MODELO NUMÉRICO DE LA MASA DE AGUA SUBTERRÁNEA LILLO-QUINTANAR

111111111111111111111

111111111111

11111111111111



Informe modelo conceptual

Informe modelo numérico

Resumen ejecutivo





Diciembre 2021





ÍNDICE

1.1. OBJETIVO 6 1.2. RESUMEN 6 2. MARCO GEOGRÁFICO, GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO 7 3. CLIMATOLOGÍA 9 3.1. Temperatura 9 3.2. Precipitación 10 3.3. Piezometría 11 3.3.1. Dirección y sentido de flujo 14 4. EXTRACCIONES 15 5. BALANCE HÍDRICO 17 5.1. Entradas por precipitación 17 5.1.2. Balance hidrometeorológico del suelo 19 5.2. Entradas por retorno de riegos 21 5.3. Entradas por manantiales 21 5.4. Relaciones hidráulicas río acuífero 21 5.5. Salidas por manantiales 22 5.7. Salidas coultas 22 5.8. Resultados 23 6. GEOMETRÍA 24 6.1. Definición de Unidades Hidrogeológicas 24 6.2. Elaboración de modelo geológico tridimensional 25 6.3. Parámetros hidráulicos 29 7. MODELO CONCEPTUAL 30 8. MODELO NUMÉRICO 32 8.1.1. GEOMETRÍA 32 8.1.2. PARÁMETROS HIDRÁULICOS INICIALES 34	1.	INTRO	DUCCIÓN	6
1.2. RESUMEN 6 2. MARCO GEOGRÁFICO, GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO 7 3. CLIMATOLOGÍA 9 3.1. Temperatura 9 3.2. Precipitación 10 3.3. Piezometría 11 3.3.1. Dirección y sentido de flujo 14 4. EXTRACCIONES 15 5. BALANCE HÍDRICO 17 5.1. Cálculo de la lluvia útil 17 5.1.2. Balance hidrometeorológico del suelo 19 5.2. Entradas por precipitación 21 5.3. Entradas ocultas 21 5.4. Relaciones hidráulicas río acuífero 21 5.5. Salidas por manantiales 21 5.6. Salidas por bombeos 22 5.7. Salidas ocultas 23 6. GEOMETRÍA 24 6.1. Definición de Unidades Hidrogeológicas 24 6.3. Parámetros hidráulicos 29 7. MODELO CONCEPTUAL 30 8. MODELO NUMÉRICO 32 8.1.1. GEOMETRÍA 32 8.1.2. PARÁMETROS HIDRÁULICOS INICIALES 34 8.2.2. CELDAS INACTIVAS 35 8.2.3. CONDICIONES DE CONTORNO 36 <		I.1. OBJE	TIVO	6
2. MARCO GEOGRÁFICO, GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO 7 3. CLIMATOLOGÍA 9 3.1. Temperatura 9 3.2. Precipitación 10 3.3. Piezometría 11 3.3.1. Dirección y sentido de flujo 14 4. EXTRACCIONES 15 5. BALANCE HÍDRICO 17 5.1. Entradas por precipitación 17 5.1.2. Balance hídrometeorológico del suelo 19 5.2. Entradas por retorno de riegos 21 5.3. Entradas ocultas 21 5.4. Relaciones hidráulicas río acuífero 21 5.5. Salidas por manantiales 22 5.7. Salidas ocultas 22 5.8. Resultados 23 6. GEOMETRÍA 24 6.1. Definición de Unidades Hidrogeológicas 24 6.3. Parámetros hidráulicos 29 7. MODELO CONCEPTUAL 30 8. MODELO NUMÉRICO 32 8.1.1. GEOMETRÍA 32 8.1.2. PARÁMETROS HIDRÁULICOS INICIALES 34 8.2.2. CELDAS INACTIVAS 35 8.2.3. CONDICIONES DE CONTORNO 36 <td></td> <td>I.2. RESU</td> <td>JMEN</td> <td>6</td>		I.2. RESU	JMEN	6
3. CLIMATOLOGÍA	2.	MARCO) GEOGRÁFICO, GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO	7
3.1. Temperatura	3.	CLIMAT	TOLOGÍA	9
3.2. Precipitación 10 3.3. Piezometría 11 3.3. 1. Dirección y sentido de flujo 14 4. EXTRACCIONES 15 5. BALANCE HÍDRICO 17 5.1. Entradas por precipitación 17 5.1.2. Balance hidrometeorológico del suelo 19 5.2. Entradas por retorno de riegos 21 5.3. Entradas ocultas 21 5.4. Relaciones hidráulicas río acuífero 21 5.5. Salidas por manantiales 21 5.6. Salidas por bombeos 22 5.7. Salidas ocultas 22 5.8. Resultados 23 6. GEOMETRÍA 24 6.1. Definición de Unidades Hidrogeológicas 24 6.2. Elaboración de modelo geológico tridimensional 25 6.3. Parámetros hidráulicos 29 7. MODELO CONCEPTUAL 30 8. MODELO NUMÉRICO 32 8.1.1. GEOMETRÍA 32 8.1.2. PARÁMETROS HIDRÁULICOS INICIALES 34 8.2. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO 34 8.2.1. MALLADO 34 8.2.2. CELDAS INACTIVAS 35 8.2.3. CONDICIONES DE CONTORNO	:	3.1. Temp	eratura	9
3.3. Piezometría 11 3.3.1. Dirección y sentido de flujo 14 4. EXTRACCIONES 15 5. BALANCE HÍDRICO 17 5.1. Entradas por precipitación 17 5.1.1. Cálculo de la lluvia útil 17 5.1.2. Balance hidrometeorológico del suelo 19 5.2. Entradas por retorno de riegos 21 5.3. Entradas ocultas 21 5.4. Relaciones hidráulicas río acuífero 21 5.5. Salidas por manantiales 21 5.6. Salidas por bombeos 22 5.7. Salidas ocultas 22 5.8. Resultados 23 6. GEOMETRÍA 24 6.1. Definición de Unidades Hidrogeológicas 24 6.3. Parámetros hidráulicos 29 7. MODELO CONCEPTUAL 30 8. MODELO NUMÉRICO 32 8.1.1. GEOMETRÍA 32 8.1.2. PARÁMETROS HIDRÁULICOS INICIALES 34 8.2.2. CELDAS INACTIVAS 35 8.2.3. CONDICIONES DE CONTORNO 36	(3.2. Precij	pitación	10
3.3.1. Dirección y sentido de flujo	3	3.3. Piezo	metría	11
4. EXTRACCIONES 15 5. BALANCE HÍDRICO 17 5.1. Entradas por precipitación 17 5.1.1. Cálculo de la Iluvia útil 17 5.1.2. Balance hidrometeorológico del suelo 19 5.2. Entradas por retorno de riegos 21 5.3. Entradas ocultas 21 5.4. Relaciones hidráulicas río acuífero 21 5.5. Salidas por manantiales 21 5.6. Salidas por bombeos 22 5.7. Salidas ocultas 22 5.8. Resultados 23 6. GEOMETRÍA 24 6.1. Definición de Unidades Hidrogeológicas 24 6.2. Elaboración de modelo geológico tridimensional 25 6.3. Parámetros hidráulicos 29 7. MODELO CONCEPTUAL 30 8. MODELO NUMÉRICO 32 8.1.1. GEOMETRÍA 32 8.1.2. PARÁMETROS HIDRÁULICOS INICIALES 34 8.2. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO 34 8.2.1. MALLADO 34 8.2.3. CONDICIONES DE CONTORNO 36		3.3.1.	Dirección y sentido de flujo	14
5. BALANCE HÍDRICO 17 5.1. Entradas por precipitación 17 5.1.1. Cálculo de la lluvia útil 17 5.1.2. Balance hidrometeorológico del suelo 19 5.2. Entradas por retorno de riegos 21 5.3. Entradas ocultas 21 5.4. Relaciones hidráulicas río acuífero 21 5.5. Salidas por manantiales 21 5.6. Salidas por bombeos 22 5.7. Salidas ocultas 22 5.8. Resultados 23 6. GEOMETRÍA 24 6.1. Definición de Unidades Hidrogeológicas 24 6.2. Elaboración de modelo geológico tridimensional 25 6.3. Parámetros hidráulicos 29 7. MODELO CONCEPTUAL 30 8. MODELO NUMÉRICO 32 8.1.1. GEOMETRÍA 32 8.1.2. PARÁMETROS HIDRÁULICOS INICIALES 34 8.2. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO 34 8.2.1. MALLADO 34 8.2.2. CELDAS INACTIVAS 35 8.2.3. CONDICIONES DE CONTORNO 36	4.	EXTRA	CCIONES	15
5.1. Entradas por precipitación 17 5.1.1. Cálculo de la lluvia útil 17 5.1.2. Balance hidrometeorológico del suelo 19 5.2. Entradas por retorno de riegos 21 5.3. Entradas ocultas 21 5.4. Relaciones hidráulicas río acuífero 21 5.5. Salidas por manantiales 21 5.6. Salidas por bombeos 22 5.7. Salidas ocultas 22 5.8. Resultados 23 6. GEOMETRÍA 24 6.1. Definición de Unidades Hidrogeológicas 24 6.2. Elaboración de modelo geológico tridimensional 25 6.3. Parámetros hidráulicos 29 7. MODELO CONCEPTUAL 30 8. MODELO NUMÉRICO 32 8.1.1. GEOMETRÍA 32 8.1.2. PARÁMETROS HIDRÁULICOS INICIALES 34 8.2.1. MALLADO 34 8.2.2. CELDAS INACTIVAS 35 8.2.3. CONDICIONES DE CONTORNO 36	5.	BALAN	CE HÍDRICO	17
5.1.1. Cálculo de la lluvia útil 17 5.1.2. Balance hidrometeorológico del suelo 19 5.2. Entradas por retorno de riegos 21 5.3. Entradas ocultas 21 5.4. Relaciones hidráulicas río acuífero 21 5.5. Salidas por manantiales 21 5.6. Salidas por bombeos 22 5.7. Salidas ocultas 22 5.8. Resultados 23 6. GEOMETRÍA 24 6.1. Definición de Unidades Hidrogeológicas 24 6.2. Elaboración de modelo geológico tridimensional 25 6.3. Parámetros hidráulicos 29 7. MODELO CONCEPTUAL 30 8. MODELO NUMÉRICO 32 8.1.1. GEOMETRÍA 32 8.1.2. PARÁMETROS HIDRÁULICOS INICIALES 34 8.2.1. MALLADO 34 8.2.1. MALLADO 34 8.2.3. CONDICIONES DE CONTORNO 36	Ę	5.1. Entra	das por precipitación	17
5.1.2. Balance hidrometeorológico del suelo 19 5.2. Entradas por retorno de riegos 21 5.3. Entradas ocultas 21 5.4. Relaciones hidráulicas río acuífero 21 5.5. Salidas por manantiales 21 5.6. Salidas por bombeos 22 5.7. Salidas ocultas 22 5.8. Resultados 23 6. GEOMETRÍA 24 6.1. Definición de Unidades Hidrogeológicas 24 6.2. Elaboración de modelo geológico tridimensional 25 6.3. Parámetros hidráulicos 29 7. MODELO CONCEPTUAL 30 8. MODELO NUMÉRICO 32 8.1.1. GEOMETRÍA 32 8.1.2. PARÁMETROS HIDRÁULICOS INICIALES 34 8.2.1. MALLADO 34 8.2.2. CELDAS INACTIVAS 35 8.2.3. CONDICIONES DE CONTORNO 36		5.1.1.	Cálculo de la lluvia útil	17
5.2. Entradas por retorno de riegos 21 5.3. Entradas ocultas 21 5.4. Relaciones hidráulicas río acuífero 21 5.5. Salidas por manantiales 21 5.6. Salidas por bombeos 22 5.7. Salidas ocultas 22 5.8. Resultados 23 6. GEOMETRÍA 24 6.1. Definición de Unidades Hidrogeológicas 24 6.2. Elaboración de modelo geológico tridimensional 25 6.3. Parámetros hidráulicos 29 7. MODELO CONCEPTUAL 30 8. MODELO NUMÉRICO 32 8.1. ALIMENTACIÓN DEL MODELO 32 8.1.2. PARÁMETROS HIDRÁULICOS INICIALES 34 8.2. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO 34 8.2.1. MALLADO 34 8.2.2. CELDAS INACTIVAS 35 8.2.3. CONDICIONES DE CONTORNO. 36		5.1.2.	Balance hidrometeorológico del suelo	19
5.3. Entradas ocultas. 21 5.4. Relaciones hidráulicas río acuífero. 21 5.5. Salidas por manantiales 21 5.6. Salidas por bombeos. 22 5.7. Salidas ocultas 22 5.8. Resultados 23 6. GEOMETRÍA 24 6.1. Definición de Unidades Hidrogeológicas 24 6.2. Elaboración de modelo geológico tridimensional 25 6.3. Parámetros hidráulicos 29 7. MODELO CONCEPTUAL 30 8. MODELO NUMÉRICO 32 8.1. ALIMENTACIÓN DEL MODELO 32 8.1.1. GEOMETRÍA 32 8.1.2. PARÁMETROS HIDRÁULICOS INICIALES 34 8.2. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO 34 8.2.1. MALLADO 34 8.2.2. CELDAS INACTIVAS 35 8.2.3. CONDICIONES DE CONTORNO. 36	ł	5.2. Entra	das por retorno de riegos	21
5.4. Relaciones hidráulicas río acuífero. 21 5.5. Salidas por manantiales 21 5.6. Salidas por bombeos 22 5.7. Salidas ocultas 22 5.8. Resultados 23 6. GEOMETRÍA 24 6.1. Definición de Unidades Hidrogeológicas 24 6.2. Elaboración de modelo geológico tridimensional 25 6.3. Parámetros hidráulicos 29 7. MODELO CONCEPTUAL 30 8. MODELO NUMÉRICO 32 8.1. ALIMENTACIÓN DEL MODELO 32 8.1.2. PARÁMETROS HIDRÁULICOS INICIALES 34 8.2. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO 34 8.2.1. MALLADO 34 8.2.2. CELDAS INACTIVAS 35 8.2.3. CONDICIONES DE CONTORNO 36	ł	5.3. Entra	das ocultas	21
5.5. Salidas por manantiales 21 5.6. Salidas por bombeos 22 5.7. Salidas ocultas 22 5.8. Resultados 23 6. GEOMETRÍA 24 6.1. Definición de Unidades Hidrogeológicas 24 6.2. Elaboración de modelo geológico tridimensional 25 6.3. Parámetros hidráulicos 29 7. MODELO CONCEPTUAL 30 8. MODELO NUMÉRICO 32 8.1. ALIMENTACIÓN DEL MODELO 32 8.1.2. PARÁMETROS HIDRÁULICOS INICIALES 34 8.2. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO 34 8.2.1. MALLADO 34 8.2.2. CELDAS INACTIVAS 35 8.2.3. CONDICIONES DE CONTORNO. 36	ł	5.4. Relac	iones hidráulicas río acuífero	21
5.6. Salidas por bombeos. 22 5.7. Salidas ocultas 22 5.8. Resultados 23 6. GEOMETRÍA 24 6.1. Definición de Unidades Hidrogeológicas 24 6.2. Elaboración de modelo geológico tridimensional 25 6.3. Parámetros hidráulicos 29 7. MODELO CONCEPTUAL 30 8. MODELO NUMÉRICO 32 8.1. ALIMENTACIÓN DEL MODELO 32 8.1.1. GEOMETRÍA 32 8.1.2. PARÁMETROS HIDRÁULICOS INICIALES 34 8.2. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO 34 8.2.1. MALLADO 34 8.2.2. CELDAS INACTIVAS 35 8.2.3. CONDICIONES DE CONTORNO. 36	ł	5.5. Salida	as por manantiales	21
5.7. Salidas ocultas 22 5.8. Resultados 23 6. GEOMETRÍA 24 6.1. Definición de Unidades Hidrogeológicas 24 6.2. Elaboración de modelo geológico tridimensional 25 6.3. Parámetros hidráulicos 29 7. MODELO CONCEPTUAL 30 8. MODELO NUMÉRICO 32 8.1. ALIMENTACIÓN DEL MODELO 32 8.1.2. PARÁMETROS HIDRÁULICOS INICIALES 34 8.2. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO 34 8.2.1. MALLADO 34 8.2.2. CELDAS INACTIVAS 35 8.2.3. CONDICIONES DE CONTORNO. 36	Ę	5.6. Salida	as por bombeos	22
5.8. Resultados 23 6. GEOMETRÍA 24 6.1. Definición de Unidades Hidrogeológicas 24 6.2. Elaboración de modelo geológico tridimensional 25 6.3. Parámetros hidráulicos 29 7. MODELO CONCEPTUAL 30 8. MODELO NUMÉRICO 32 8.1. ALIMENTACIÓN DEL MODELO 32 8.1.1. GEOMETRÍA 32 8.1.2. PARÁMETROS HIDRÁULICOS INICIALES 34 8.2. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO 34 8.2.1. MALLADO 34 8.2.2. CELDAS INACTIVAS 35 8.2.3. CONDICIONES DE CONTORNO 36	Ę	5.7. Salida	as ocultas	22
6. GEOMETRÍA 24 6.1. Definición de Unidades Hidrogeológicas 24 6.2. Elaboración de modelo geológico tridimensional 25 6.3. Parámetros hidráulicos 29 7. MODELO CONCEPTUAL 30 8. MODELO NUMÉRICO 32 8.1. ALIMENTACIÓN DEL MODELO 32 8.1.1. GEOMETRÍA 32 8.1.2. PARÁMETROS HIDRÁULICOS INICIALES 34 8.2. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO 34 8.2.1. MALLADO 34 8.2.2. CELDAS INACTIVAS 35 8.2.3. CONDICIONES DE CONTORNO 36	Ę	5.8. Resu	Itados	23
6.1. Definición de Unidades Hidrogeológicas246.2. Elaboración de modelo geológico tridimensional256.3. Parámetros hidráulicos297. MODELO CONCEPTUAL308. MODELO NUMÉRICO328.1. ALIMENTACIÓN DEL MODELO328.1.1. GEOMETRÍA328.1.2. PARÁMETROS HIDRÁULICOS INICIALES348.2. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO348.2.1. MALLADO348.2.3. CONDICIONES DE CONTORNO36	6.	GEOME	ETRÍA	24
6.2. Elaboración de modelo geológico tridimensional256.3. Parámetros hidráulicos297. MODELO CONCEPTUAL308. MODELO NUMÉRICO328.1. ALIMENTACIÓN DEL MODELO328.1.1. GEOMETRÍA328.1.2. PARÁMETROS HIDRÁULICOS INICIALES348.2. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO348.2.1. MALLADO348.2.2. CELDAS INACTIVAS358.2.3. CONDICIONES DE CONTORNO36	(6.1. Defini	ición de Unidades Hidrogeológicas	24
6.3. Parámetros hidráulicos297. MODELO CONCEPTUAL308. MODELO NUMÉRICO328.1. ALIMENTACIÓN DEL MODELO328.1.1. GEOMETRÍA328.1.2. PARÁMETROS HIDRÁULICOS INICIALES348.2. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO348.2.1. MALLADO348.2.2. CELDAS INACTIVAS358.2.3. CONDICIONES DE CONTORNO36	(6.2. Elabo	ración de modelo geológico tridimensional	25
7. MODELO CONCEPTUAL	(6.3. Parár	netros hidráulicos	
 8. MODELO NUMÉRICO	7.	MODEL	O CONCEPTUAL	
8.1. ALIMENTACIÓN DEL MODELO328.1.1. GEOMETRÍA328.1.2. PARÁMETROS HIDRÁULICOS INICIALES348.2. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO348.2.1. MALLADO348.2.2. CELDAS INACTIVAS358.2.3. CONDICIONES DE CONTORNO36	8.	MODEL	O NUMÉRICO	
8.1.1.GEOMETRÍA	8	3.1. ALIM	ENTACIÓN DEL MODELO	
8.1.2. PARÁMETROS HIDRÁULICOS INICIALES 34 8.2. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO 34 8.2.1. MALLADO 34 8.2.2. CELDAS INACTIVAS 35 8.2.3. CONDICIONES DE CONTORNO 36		8.1.1.	GEOMETRÍA	
 8.2. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO		8.1.2.	PARÁMETROS HIDRÁULICOS INICIALES	
8.2.1. MALLADO	8	3.2. CON	STRUCCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO	
8.2.2. CELDAS INACTIVAS		8.2.1.	MALLADO	
8.2.3. CONDICIONES DE CONTORNO		8.2.2.	CELDAS INACTIVAS	
		8.2.3.	CONDICIONES DE CONTORNO	





	8.2.3.1.	NIVEL CONSTANTE Y DREN	
	8.2.3.2.	INFILTRACIÓN POR PRECIPITACIÓN	
	8.2.3.3.	INFILTRACIÓN A TRAVÉS DE CAUCES	
	8.2.3.4.	BOMBEOS	
8	3.3. EJECUCI	ÓN DEL MODELO	
	8.3.1. RÉ	GIMEN ESTACIONARIO	
	8.3.2. CA	LIBRACIÓN RÉGIMEN ESTACIONARIO	
8	8.4. Resultado	os del modelo	44
9.	CONCLUSI	ONES	





FIGURAS

Figura 1. Mapa geológico MASb Lillo-Quintanar. Base geológica GEODE (IGME) Figura 2. Formaciones acuíferas identificadas en la MASb Lillo-Quintanar (IGME.202	7
	8
Figura 3. Estaciones meteorológicas	9
Figura 4. Temperatura promedio mensual	10
Figura 5. Precipitación mensual promedio	.11
Figura 6. Ubicación de piezómetros	12
Figura 7. Niveles de agua a cotas superiores a 724 m s.n.m.	13
Figura 8. Niveles de agua a cotas inferiores a 724 m s.n.m.	13
Figura 9. Mapa de piezometría (junio 2021)	14
Figura 10. Niveles piezométricos vs. bombeo promedio en MASb Lillo-Quintanar	16
Figura 11. Zonificación realizada mediante los polígonos de Thiessen.	18
Figura 12. Evolución de la precipitación y la recarga en la MASb Lillo-Quintanar	-
durante el periodo 2001-2020	20
Figura 13. Perforaciones empleadas en el registro litológico	25
Figura 14. Distribución de las secciones realizadas mediante HydroGeoAnalyst	26
Figura 15. Corte W-E de la MASb Lillo-Quintanar v Sierra de Altomira (perfil-1)	27
Figura 16. Corte W-E de la MASb Lillo-Quintanar (perfil-5)	27
Figura 17. Corte SSW-NNE de la MASb Lillo-Quintanar (perfil-7)	27
Figura 18. Superficies de contacto de las unidades hidrogeológicas	28
Figura 19. Esquema del modelo conceptual	31
Figura 20. Superficies creadas	33
Figura 21. Perfil Norte – Sur MASb Lillo-Quintanar	33
Figura 22. Perfil Sur – Norte MASb Sierra de Altomira	33
Figura 23. Perfil Oeste – Este MASb Lillo-Quintanar y Sierra de Altomira	33
Figura 24. Mallado	34
Figura 25. Celdas activas (blanco) e inactivas (verde)	35
Figura 26. Celdas en marrón incluidas como condición de borde constante y azules	
como tipo río	36
Figura 27. Celdas en azul oscuro con condición River simulando recarga del rio	37
Figura 28. Celdas en rojo con condición Well simulando las salidas por bombeo	38
Figura 29. Piezometría calculada vs observada en la calibración en régimen	
estacionario.	40
Figura 30. Distribución de la conductividad hidráulica horizontal (Kx – Ky) y vertical	
(Kz) obtenida tras calibración en régimen estacionario de la Unidad Hidrogeológica 1	1
	41
Figura 31. Distribución de la conductividad hidráulica horizontal (Kx – Ky) y vertical	
(Kz) obtenida tras calibración en régimen estacionario de la Unidad Hidrogeológica 2	2.
	42
Figura 32. Distribución de la conductividad hidráulica horizontal (Kx – Ky) y vertical	
(Kz) obtenida tras calibración en régimen estacionario de la Unidad Hidrogeológica 3	3
	43
Figura 33. Sectores del balance	46
Figura 34. Piezometría capa 1	47
Figura 35. Piezometría capa 2	48
Figura 36. Direcciones de flujo	49





TABLAS

Tabla 1. Volumen de extracción total en las MASb Lillo-Quintanar	.15
Tabla 2. Umbral de escorrentía (Po) medio por sector	. 17
Tabla 3. Capacidad de campo, punto de marchitez, humedad y espesor radicular po	r
sector utilizados para el balance hidrometeorológico en el suelo	.19
Tabla 4. Resultados de precipitación y recarga para la MASb Lillo - Quintanar	
mediante el programa EasyBalance para el periodo 2001-2020	.19
Tabla 5. Resultados de precipitación y recarga para cada zona mediante el programa	а
EasyBalance para el periodo 2001-2020	.20
Tabla 6. Inventario de manantiales de la MASb Lillo-Quintanar	.21
Tabla 7. Salidas ocultas correspondientes a la MASb Lillo-Quintanar	.22
Tabla 8. Balance hídrico para la MASb Lillo-Quintanar	.23
Tabla 23. Balance hídrico de la MASb Lillo-Quintanar	.45





1. INTRODUCCIÓN

1.1. OBJETIVO

El objetivo del presente estudio es caracterizar hidrogeológicamente la MASb Lillo-Quintanar, un complejo sistema hidrogeológico Terciario de la Cuenca del Guadiana. La masa de agua se localiza en la Zona Oriental de la Cuenca del Guadiana (Alto Guadiana), en las provincias de Toledo, Cuenca y Ciudad Real.

1.2. RESUMEN

La precipitación anual media es de 335 mm/año, concentrándose en el mes de abril (54 mm/mes). La temperatura media de la zona es de 14,2°C, superando los 25°C en los meses estivales.

El límite hidrogeológico septentrional de la MASb Lillo-Quintanar coincide con la divisoria hidrológica entre las cuencas del Tajo y Guadiana. Se estima que a través de dicho límite no existe un flujo subterráneo significativo entre ambas cuencas. El resto de límites hidrogeológicos de la MASb son de tipo abierto y a su través se producen transferencias laterales con las masas de agua circundantes (Sierra de Altomira y Consuegra-Villacañas). La MASb Lillo-Quintanar se encuentra en equilibrio con unas entradas y salidas estimadas en 58,6 y 58,3 hm³/año, respectivamente. La principal fuente de recarga se produce por la infiltración del agua de lluvia sobre los materiales permeables. Las salidas están más diversificadas, aunque predominan las salidas por bombeos, laterales y hacia el sistema superficial.

El balance hídrico de la MASb ha sido un constatado mediante la construcción de un modelo matemático hidrogeológico





2. MARCO GEOGRÁFICO, GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO

La MASb Lillo-Quintanar se encuentra en la zona nororiental de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana, presentando una superficie total de 1.101,7 Km². La mayoría de su territorio se encuentra en la provincia de Toledo y, en menor proporción, en las provincias de Cuenca y Ciudad Real.

Desde un punto de vista geológico, la masa de agua se encuentra enclavada entre dos grandes unidades morfoestructurales diferenciadas: la Cuenca Cenozoica de la zona Centro-Ibérica y el borde sur de los Montes de Toledo. La estructura geológica principal que la compone es un sistema monoclinal que presenta una morfología de llanura con suaves ondulaciones y relieve tabular, presentando varias áreas endorreicas (Figura 1). La base impermeable la constituye unos depósitos paleozoicos y mesozoicos triásicos (facies Keuper), los cuales afloran en diversos sectores de la masa de agua. De manera discordante se sitúan el Terciario Inferior continental caracterizado por múltiples variaciones laterales de facies generalmente margosas (Fm. Villalba de la Sierra) y un Mioceno Superior-Plioceno litológicamente compuesto por materiales carbonatados (Fm. Páramo) y depósitos aluviales.



Figura 1. Mapa geológico MASb Lillo-Quintanar. Base geológica GEODE (IGME)

El actual Plan Hidrológico (CHG, 2015) define los límites de la MASb a las cuencas medias de los ríos Cigüela y Riansares:

 El límite Oeste y Noroeste corresponde a la divisoria de aguas entre los ríos Cigüela y Testillos, la cual corresponde a la divisoria entre la cuenca del río Tajo y del río Guadiana.





- El límite Este coincide con los afloramientos mesozoicos de las sierras de Altomira y Almenara.
- El límite Sur viene definido con los materiales detríticos miocenos y cuaternarios de la MASb Consuegra-Villacañas.

La principal unidad permeable de la MASb se corresponde con los materiales carbonatados de la Fm. Páramo que funcionan como acuíferos colgados que drenan hacia los depósitos aluviales pliocuaternarios. Los conjuntos no suelen superar los 30-40 m de espesor y poseen una transmisividad media de 500 m²/día (IGME, 1979). La base impermeable la constituye los sedimentos margosos, arcillosos y yesíferos del Paleógeno (Figura 2).

	EDAD	GEOLÓGICA		Litologi a s predaminantes	Formaciones Acuiferas <u>Sistema Acuifero 20</u>	Formaciones Acuiferas <u>MASb Lillo-Quintanar</u>
	CUA	TERNARIO		Gravas, arenas, limos y arcillas		Ac. detrítico (aluviales y terrazas)
		PLIOCENO	Superior Inferior	Arenas, gravos, limos y margas con yesos		Acuifero detritico (raño)
	NEÓGENO	ÓCENO	Superior	Calizos, calizas margasas y margas	Acuifero Mioceno superior calizo	Acuífero carbonatado (calizas del Páramo)
ENOZOICC	NEOGENO	MIOCENO	Medio	Variedad litológica (predominantemente arcillosa)		Acuitardo
D	e calificat		Inferior	Arenas, limos, margas y yesos		
	PALEÓGENO	OLIGOCENO EOCENO PALEOCENO Superior		Availlar arabarar archierae		
				conglomerados, calizas y yesas		
					e 2	
	CRETÁCICO			Calizas		
		Superior - Malm			-	
0	upásico			Dolomios		
ozo	JORASICO	Inferio	r - Lías	DOID IN IS		
MES		Superior		Yesos y arcillas]
	TRIÁSICO	Mer	lio	Areniscas y limos arcillosos	Acuifero Triásico	
	and the first of	Inferior		Areniscas, conglomerados, maroras y arcillos		
		Supe	rior]	an i
ZOIC	ORDOVÍCICO	OVÍCICO Medio	dio	Pizarras, cuarcitas y areniscas		
EO	S. Harrison	Infe	rior			2
PA	CÁMBRICO	Infe	rior	Calizas, areniscas y pizarras	Acuífero Cámbrico	

Figura 2. Formaciones acuíferas identificadas en la MASb Lillo-Quintanar (IGME.2020)

Los cursos fluviales más importantes que atraviesan la MASb Lillo-Quintanar, ambos tributarios del Río Guadiana son los ríos Riansares y Cigüela. Dichos cursos fluviales discurren en dirección noroeste-sureste recogiendo las aguas de múltiples arroyos secundarios y cañadas. El río Riansares desemboca en el río Cigüela fuera de los límites de la MASb.





3. CLIMATOLOGÍA

La caracterización climática del área de estudio se ha realizado mediante los registros de las estaciones meteorológicas que aparecen en la Figura 3. En términos generales, estos puntos tienen una periodicidad diaria de las medidas, que abarca desde el año 2000 hasta la actualidad.



Figura 3. Estaciones meteorológicas

3.1. Temperatura

La temperatura anual media para el periodo 2000-2020 es de 14,2°C, con máximos que superan los 30°C en los meses estivales y mínimos que caen por debajo de los 0°C en los meses invernales. Es decir, la distribución de las temperaturas mensuales muestra la clásica forma sinusoidal que se da en el hemisferio norte. Las temperaturas más bajas se registran en enero con un valor de 4,3°C, mientras que las más altas se dan en los meses de julio y agosto, con temperaturas superiores a los 25°C (Figura 4).







Figura 4. Temperatura promedio mensual

3.2. Precipitación

Las precipitaciones consideradas en el documento son las que se producen de forma líquida, ya que son las más frecuentes. La precipitación anual media del conjunto de estaciones analizadas es de 334,7 mm/año. Tal y como se observa en la Figura 5, el periodo menos lluvioso del año se concentra entre los meses de junio y agosto, con precipitaciones mensuales inferiores a 20 mm/mes. El resto del año la precipitación supera los 30 mm/mes.

Los años más secos del periodo considerado (2000-2020) fueron 2000 y 2005, con precipitaciones anuales promedio de 169,1 y 176,2 mm, respectivamente. Por otro lado, el año más lluvioso fue el 2010, donde se alcanzó un valor promedio de 531,4 mm.







Figura 5. Precipitación mensual promedio

3.3. Piezometría

En términos generales **los niveles se caracterizan por ser fundamentalmente estables** o ligeramente variables entre julio de 2009 y octubre de 2021. Los puntos sobre los que se ha realizado el análisis piezométrico se muestran en la Figura 6

Con la finalidad de ilustrar los comportamientos piezométricos observados, se han graficado de manera separada los niveles por encima y por debajo de la cota 724 m s.n.m.: los niveles distribuidos a cotas superiores a 724 m s.n.m. (Figura 7) son fundamentalmente estables, presentando escasas variaciones inferiores a 10 m. Estos niveles evidencian no estar afectados por influencias de signo positivo (procesos de recarga estacional) ni de signo negativo. (extracciones por bombeo). Los niveles distribuidos a cotas inferiores a 724 m s.n.m. (Figura 8) presentan tanto tendencias estables como tendencias variables. Los niveles con tendencias estables se caracterizan por presentar escasa o nula variación a lo largo del periodo de registro, mientras que los niveles de tendencia variable presentan amplitudes máximas de variación de 10 m. Esta diferencia de comportamientos podría ser debida a que son niveles albergados en distintas unidades hidrogeológicas.







Figura 6. Ubicación de piezómetros







Figura 7. Niveles de agua a cotas superiores a 724 m s.n.m.



Figura 8. Niveles de agua a cotas inferiores a 724 m s.n.m.





3.3.1.Dirección y sentido de flujo

A continuación, se ilustra la dirección y sentido del flujo subterráneo en la MASb Lillo-Quintanar mediante el mapa de piezometría correspondiente a junio de 2021 (Figura 9). En base a las observaciones realizadas se constata que:

- La MASb Lillo- Quintanar recibe un flujo subterráneo de entrada a lo largo de todo su límite oriental procedente de la MASb Sierra de Altomira. En dicho límite las cotas piezométricas se mantienen en torno a 700 y 800 m s.n.m.
- La dirección de flujo predominante a lo largo de toda la MASb Lillo-Quintanar es **NE-SO**.
- El flujo subterráneo a lo largo del límite occidental de la MASb Lillo-Quintanar tiene lugar fundamentalmente en dirección NE-SO, a excepción de la porción más septentrional donde se produce en dirección NO.
- A lo largo del límite meridional de la MASb Lillo-Quintanar tiene lugar un flujo de dirección NE-SO dirigido hacia la MASb Consuegra-Villacañas. En dicho límite las cotas piezométricas se disponen en torno a 640-660 m s.n.m.



Figura 9. Mapa de piezometría (junio 2021)





4. EXTRACCIONES

La MASb Lillo-Quintanar dispone de 3319 pozos censados que se distribuyen por toda su extensión. La estimación de los volúmenes de extracción se ha realizado para el periodo 2001-2020. Se sabe que, atendiendo a los datos de contadores facilitados por la propia CUAS, no se llega a bombear la totalidad del volumen en concesiones, sino que se establece un coeficiente del 70%, denominado coeficiente de uso. Que ha sido extrapolado para aquellos pozos en los que no se dispone de datos de contadores.

Por tanto, los resultados de las extracciones obtenidos son similares a los incluidos en el Plan Hidrológico de la Confederación del Guadiana, cifrados en **17 hm³/año**.

Los caudales máximos de explotación medios por pozo muestran valores de 35 m³/día durante los meses estivales (junio/julio). Se producen mínimos de explotación durante los meses de invierno (diciembre- enero).

Dia 1. Volumen de extracción total en las MASD Lillo-Quintanar						
		Concesión	Coeficiente	Extracciones		
	Masas de agua	(hm³/año)	de uso	(hm³/año)		
	Lillo-Quintanar	25,20	0,70	17,63		

Tabla 1. Volumen de extracción total en las MASb Lillo-Quintanar

Con la finalidad de ilustrar el efecto de los bombeos sobre los niveles de agua de la MASb Lillo-Quintanar, se ha representado de manera conjunta la cota piezométrica de aquellos pozos con un periodo de registro significativo y el caudal de extracción promedio (Figura 10). Tal como se muestra, los niveles fluctúan en función de los caudales extraídos: descienden durante los meses de mayor extracción pero se recuperan durante los meses que cesan los bombeos. Sin embargo los niveles fluctúan en torno a cotas fundamentalmente estables. Únicamente se observan dos niveles que han experimentado un claro descenso durante el período de registro: 04.02.004 y 04.02.203, con un descenso medio de 15 m.







Figura 10. Niveles piezométricos vs. bombeo promedio en MASb Lillo-Quintanar





5. BALANCE HÍDRICO

5.1. Entradas por precipitación

5.1.1.Cálculo de la lluvia útil

Para determinar el valor de la lluvia útil se ha seguido el método del *Soil Conservation Service* de EE. UU. (SCSUS), que se basa en el hecho de que sólo se produce escorrentía superficial cuando se supera un determinado umbral de escorrentía (Po), cuyo valor depende de:

- los usos del suelo,
- las pendientes y
- la permeabilidad

A partir de la intersección de los mapas de distribución espacial de dichos parámetros se elaboró el mapa de umbral de escorrentía mostrado en la Figura 11, que incluye además los valores de Po de la MASb Sierra de Altomira, así como las zonas de influencia de cada estación meteorológica empleados para obtener los resultados por zona y área mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2. Umbral de escorrentía	(Po)	medio	por sector
--------------------------------	------	-------	------------

MASb	Sectores	Área (km²)	Po medio (mm/día)
Lillo Quintonor	Zona 1	393,9	14,7
Lillo - Quintanai	Zona 2	807,0	17,9







Figura 11. Zonificación realizada mediante los polígonos de Thiessen.





5.1.2.Balance hidrometeorológico del suelo

El cálculo de la infiltración por precipitación se ha realizado con el método hidrometeorológico de Thornthwaite para el periodo 2001-2020, mediante el programa EasyBalance, a partir de los datos diarios de precipitación y temperatura, el establecimiento de una reserva útil de agua en el suelo, la adopción de un umbral de escorrentía ligado a las pendientes y los usos del suelo (Tabla 3). En base a la información expuesta anteriormente, se han obtenido los siguientes resultados mostrados en la

Tabla 4.

Tabla 3. Capacidad de campo, punto de marchitez, humedad y espesor radicular por sector utilizados para el balance hidrometeorológico en el suelo.

Sector recarga	Capacidad de campo (%)	Punto de marchitez permanente (%)	Humedad disponible (%)	Espesor radicular (m)
Zona 1	0,12	0,06	0,05	0,70
Zona 2	0,12	0,06	0,06	0,70

Tabla 4. Resultados de precipitación y recarga para la MASb Lillo - Quintanar mediante el p	orograma
EasyBalance para el periodo 2001-2020.	

Lillo - Quintanar						
Año	Recarga (hm³/año)	Recarga (mm/año)	PP (hm³/año)	PP (mm/año)	Recarga %	
2001	56,2	46,8	440,0	366,3	12,8	
2002	12,2	10,1	464,8	387,0	2,6	
2003	85,1	70,8	604,8	503,6	14,1	
2004	21,8	18,2	577,1	480,5	3,8	
2005	65,7	54,7	364,6	303,5	18,0	
2006	51,8	43,1	455,2	379,0	11,4	
2007	6,4	5,4	421,0	350,6	1,5	
2008	7,1	5,9	454,7	378,6	1,6	
2009	73,0	60,8	369,1	307,3	19,8	
2010	153,2	127,5	640,8	533,5	23,9	
2011	3,4	2,8	354,7	295,3	1,0	
2012	49,7	41,4	373,4	310,9	13,3	
2013	53,1	44,2	473,3	394,1	11,2	
2014	104,0	86,6	443,6	369,4	23,5	
2015	10,5	8,7	246,0	204,8	4,3	
2016	44,2	36,8	529,6	441,0	8,3	
2017	0,0	0,0	242,6	202,0	0,0	
2018	81,7	68,0	519,8	432,8	15,7	
2019	46,7	38,9	445,4	370,8	10,5	
2020	1,3	1,1	461,7	384,4	0,3	
Promedio	46,4	38,6	444,1	369,8	9,9	

La **recarga** media por infiltración calculada para **Lillo – Quintanar** es de **46,4 hm³/año**, lo que supone un 9,9% de la precipitación. También se ha realizado una discretización de la recarga atendiendo a la delimitación realizada por zonas, la cual se muestra en la Tabla 5.





Tabla 5. Resultados de precipitación y recarga para cada zona mediante el programa EasyBalance para el periodo 2001-2020.

	Recarga por zonas (hm3/año)		
Año	Lillo-Quintanar		
	Zona 1	Zona 2	
2001	16,9	39,3	
2002	1,0	11,1	
2003	19,1	65,9	
2004	2,4	19,4	
2005	0,0	65,7	
2006	4,5	47,3	
2007	0,0	6,4	
2008	0,0	7,1	
2009	20,6	52,4	
2010	44,2	108,9	
2011	2,3	1,0	
2012	15,6	34,0	
2013	11,3	41,8	
2014	26,5	77,5	
2015	0,0	10,5	
2016	11,4	32,8	
2017	0,0	0,0	
2018	21,8	59,9	
2019	14,0	32,6	
2020	0,0	1,3	
Promedio	10.6	35.8	



Figura 12. Evolución de la precipitación y la recarga en la MASb Lillo-Quintanar durante el periodo 2001-2020





5.2. Entradas por retorno de riegos

Se ha considerado que un 7% del volumen aplicado a zonas de riego de Lillo-Quintanar se transforma en recarga al acuífero (PHDGn, 2021-2027), lo que ascendería a unos **1,2 hm³/año** de media suponiendo que las demandas de riego estimadas ascienden a 17 hm³/año.

5.3. Entradas ocultas

Las entradas ocultas o entradas laterales son aportes de agua subterránea procedentes de otros sistemas acuíferos, debido a que sus materiales permeables están en conexión hidráulica. Según el Plan Hidrológico de la Cuenca del Guadiana (2021-2027), las entradas ocultas de la MASb Lillo-Quintanar (**11,0 hm³/año**) proceden de las salidas de (041.001) Sierra de Altomira.

5.4. Relaciones hidráulicas río acuífero

La MAsb Lillo-Quintanar carece de una serie de información lo suficientemente amplia para conocer con precisión la relación río-acuífero. En base a la información disponible se ha cuantificado las salidas del acuífero hacia del río Cigüela en torno a los 3 hm³/año, sin embargo, este valor podría estar subestimado. El IGME en su informe *Encomienda de gestión para la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas* estima el drenaje de las calizas neógenas hacia el río Riansares en 20 L/s (0,63 hm³/año).

5.5. Salidas por manantiales

En la MASb Lillo-Quintanar se han inventariado un total de 7 manantiales con datos de caudal histórico. Todos los manantiales se ubican en cotas superiores a los 700 m s.n.m. En la Tabla 6 se muestra el código, coordenadas y caudal de cada manantial.

C	ódigo del manantial	Cód. IGME	Coordenadas UTM			Caudal histórico (L/s)	
	40.003.004	212630003	500804	4401929	740	22,2	
_	40.003.001	212570001	502968	4415279	785	1,5	
anal	40.003.002	212570013	502247	4411240	760	1,7	
iinta	40.003.003	212580004	510324	4416557	870	2,8	
- Ŏ	40.003.005	212650001	490477	4398269	720	10,0	
olli-	40.003.006	212660007	494436	4398948	740	22,2	
	40.003.007	212670003	500571	4397637	740	11,1	
	(Caudal total (hi	m³/año)			2,3	

Tabla 6. Inventario de manantiales de la MASb Lillo-Quintanar

Los manantiales más caudalosos poseen valores superiores a los 20 L/s, están asociados a las calizas de la Fm. Páramo y drenan hacia los ríos Cigüela y Riansares.





Las **salidas** por manantiales de la MASb Lillo-Quintanar se valoran en unos **2,3** hm³/año. Sin embargo, podrían ser superiores debido a la estructura del acuífero carbonatado.

5.6. Salidas por bombeos

Las salidas por bombeos estimada en la MASb Lillo-Quintanar ascendería a unos **17 hm³/año** (ver capítulo 4).

5.7. Salidas ocultas

Para estimar las salidas ocultas de la MASb Lillo-Quintanar se ha tenido en consideración los valores del Plan Hidrológico de Guadiana (**11,5 hm³/año**). Sin embargo, estos valores se han ajustado mediante un coeficiente corrector que ha sido estimado en función de las tasas de variación del nivel piezométrico: periodos de ascenso piezométrico denotan un superávit general de recurso subterráneo, mientras que un descenso piezométrico denota lo contrario. El coeficiente corrector ha sido ajustado por tanto en base a estas fluctuaciones piezométricas para que las salidas anuales consigan reproducirlas de igual forma.

En la Tabla 7 se muestran las salidas promedio contenidas en el Plan Hidrológico, así como las salidas calculadas mediante la aplicación del coeficiente corrector. Las salidas calculadas incluyen tanto las salidas ocultas como las salidas al sistema superficial (cauces y manantiales). No obstante, estos valores serán verificados/ajustados con el modelo matemático. En términos generales, la MASb Lillo-Quintanar, presenta una dirección de flujo NE-SW, hacia (041.004) Consuegra-Villacañas.

Año	Plan Hidrológico (hm3/año)	Salidas calculadas (hm3/año)	Coef.
2001	11,5	51,5	4,5
2002	11,5	4,8	0,4
2003	11,5	77,0	6,7
2004	11,5	14,9	1,3
2005	11,5	62,2	5,4
2006	11,5	47,8	4,2
2007	11,5	0,4	0,0
2008	11,5	1,8	0,2
2009	11,5	67,0	5,8
2010	11,5	147,6	12,8
2011	11,5	0,9	0,1
2012	11,5	48,0	4,2
2013	11,5	45,9	4,0
2014	11,5	102,9	8,9
2015	11,5	7,8	0,7
2016	11,5	39,3	3,4
2017	11,5	-5,1	-0,4
2018	11,5	77,1	6,7
2019	11,5	40,6	3,5

Tabla 7. Salidas ocultas correspondientes a la MASb Lillo-Quintanar





A	Nño	Plan Hidrológico (hm3/año)	Salidas calculadas (hm3/año)	Coef.
	2020	11,5	-5,9	-0,5

5.8. Resultados

A continuación se presenta un resumen de los resultados del balance hídrico de la MASb Lillo-Quintanar. La recarga media anual asciende a unos **58,6 hm³/año** (Tabla 8). La recarga se produce principalmente por infiltración del agua de lluvia sobre los materiales permeables y en menor medida desde los cauces, retornos de riego y entradas laterales. Las salidas están más diversificadas, aunque predominan las salidas por bombeos, hacia el sistema superficial y laterales u ocultas. Las salidas medias anuales se cuantifican en **58,3 hm³/año**.

	Lillo-Quintanar							
		Entradas (hr	n³/año)		Salidas	(hm3/año)		
Año	PP	Ent. Lat. + Sist. Superficial	R.R	Total	Bombeos	Sal. Lat. + Sist. Superficial	Total	Balance (hm³/año)
2001	56,2	11,0		68,4		51,5	68,5	-0,1
2002	12,2	11,0		24,4		4,8	21,8	2,6
2003	85,1	11,0		97,3		77,0	94,0	3,3
2004	21,8	11,0		34,0		14,9	31,9	2,1
2005	65,7	11,0		77,9		62,2	79,2	-1,3
2006	51,8	11,0		64,0		47,8	64,8	-0,8
2007	6,4	11,0		18,6		0,4	17,4	1,2
2008	7,1	11,0		19,3		1,8	18,8	0,5
2009	73,0	11,0		85,2		67,0	84,0	1,2
2010	153,2	11,0	12	1,2 165,4 15,6	17.0	147,6	164,6	0,8
2011	3,4	11,0	.,_		15,6	17,0	0,9	17,9
2012	49,7	11,0		61,9		48,0	65,0	-3,1
2013	53,1	11,0		65,3		45,9	62,9	2,4
2014	104,0	11,0		116,2		102,9	119,9	-3,7
2015	10,5	11,0		22,7		7,8	24,8	-2,1
2016	44,2	11,0		56,4		39,3	56,3	0,1
2017	0,0	11,0		12,2		-5,1	11,9	0,3
2018	81,7	11,0		93,9		77,1	94,1	-0,2
2019	46,7	11,0		58,9		40,6	57,6	1,3
2020	1,3	11,0		13,5		-5,9	11,1	2,4
Promedio	46,4	11,0	1,2	58,6	17,0	41,3	58,3	0,2

Tabla 8. Balance hídrico para la MASb Lillo-Quintanar





6. GEOMETRÍA

6.1. Definición de Unidades Hidrogeológicas

Las unidades hidrogeológicas son materiales o grupos de materiales geológicos que poseen características hidráulicas similares. Con el objetivo de identificar las unidades hidrogeológicas que componen la MASb Lillo-Quintanar se agruparon, en base a sus propiedades hidrológicas, las principales litologías presentes en el área de estudio:

- Calizas, areniscas y conglomerados (Fm. Páramo).
- Gravas, arenas, margas, arcillas y yesos (Fm. Villalba de la Sierra)
- **Calizas y brechas dolomíticas** (Fm. Calizas y Brechas de la Sierra de Utiel)
- Margas y niveles dolomíticos (Fm. Margas de Alarcón)
- **Calizas, dolomías y margas** (Fm. Dolomías de la Ciudad Encantada, Fm. Dolomías tableadas de la Villa de Vés y Fm. Dolomías de Alatoz)
- Arenas, arcillas y margas (Utrillas y Weald)
- Carniolas, calizas y dolomías (Fm. Carbonatada de Chelva, Fm. Calizas y dolomías tableadas de Cuevas Labradas y Fm. Carniolas de Cortes de Tajuña)
- Lutitas, arcillas y yesos (Triásico Keuper)

Estos grupos litológicos se agruparon en un total de siete (07) unidades con diferentes propiedades hidráulicas para el almacenamiento y transmisión del agua subterránea (**unidades hidrogeológicas**) que, listadas de más someras a más profundas, son:

- 1. Unidad miocena-pliocena (acuífero)
- 2. Unidad paleógena (acuitardo)
- 3. Unidad cretácica campaniense santoniense (acuífero)
- 4. Unidad cretácica coniaciense (acuitardo)
- 5. <u>Unidad cretácica turoniense cenomaniense (acuífero)</u>
- 6. Unidad cretácica inferior (acuitardo/acuicludo)
- 7. Unidad jurásica (acuífero)

Las arcillas y yesos del Keuper (Triásico Superior) se consideran la **base impermeable** del sistema hidrogeológico. Las dos primeras unidades hidrogeológicas son las que mayor representación tienen en la MASb Lillo-Quintanar. La distribución de las unidades mesozoicas en la MASb Lillo-Quintanar es incierta, debido a que se hunden bajo el potente relleno terciario y son pocos los pozos que han conseguido alcanzar estas formaciones.





6.2. Elaboración de modelo geológico tridimensional

Con el objetivo de definir la morfología tridimensional de cada unidad hidrogeológica se realizaron las siguientes tareas: i) construcción de una base de datos unificada con los registros litológicos disponibles en el área de estudio (Figura 13) y ii) definición de la geometría y extensión de sus superficies de contacto mediante el software *HydroGeoAnalyst* (Waterloo Hydrogeologic), generando para ello múltiples secciones geológicas que atraviesan la MASb (Figura 14).



Figura 13. Perforaciones empleadas en el registro litológico







Figura 14. Distribución de las secciones realizadas mediante HydroGeoAnalyst

Las siguientes figuras representan la estructura general de la MASb Lillo-Quintanar, estructura que será empleada para el modelamiento numérico hidrogeológico. Las líneas de color negro representan la superficie topográfica, en morado el muro las calizas neógenas de la Fm. Páramo, en verde el muro del Cretácico y en azul el muro del Jurásico.





Figura 15. Corte W-E de la MASb Lillo-Quintanar y Sierra de Altomira (perfil-1)



Figura 16. Corte W-E de la MASb Lillo-Quintanar (perfil-5)



Figura 17. Corte SSW-NNE de la MASb Lillo-Quintanar (perfil-7)

La Figura 18 muestra las superficies de contacto de cada unidad hidrogeológica. En base al análisis realizado se observa que:

- El basamento se dispone entre cotas inferiores a 200 m s.n.m., en la parte nororiental y 750 m s.n.m., en la parte occidental donde llega a aflorar. Es decir, el basamento asciende hacia el Oeste y su disposición condiciona la estructura geológica local.
- El Jurásico y Cretácico están pobremente representados en la MASb-Lillo-Quintanar. Se ha considerado que la serie mesozoica no tenga continuidad lateral hacia el oeste, ya que no hay información disponible que lo demuestre. No obstante, cabe mencionar que el espesor de estas unidades es muy variable y aumenta hacia el sureste.
- La unidad paleógena se distribuye extensamente a lo largo de la MASb Lillo-Quintanar y las masas vecinas. El espesor de esta unidad puede superar los cientos de metros en algunas zonas.
- La unidad miocena se emplaza a modo de acuífero colgado y drena sus aguas hacia los cursos de agua superficial y depósitos aluviales. Su potencia es variable, pero suele presentar 30 m de espesor.







Figura 18. Superficies de contacto de las unidades hidrogeológicas





6.3. Parámetros hidráulicos

Se realizó asimismo una recopilación de información existente sobre parámetros hidráulicos de los materiales de la MASb. El objetivo ha sido caracterizar cada unidad hidrogeológica en base a sus principales parámetros hidráulicos. A continuación se sintetizan los valores de las principales unidades hidrogeológicas:

- PNIAS (1979): caracteriza el acuífero Mioceno calizo con una transmisividad que varía de 500 a 700 m²/día y la base areniscosa miocena con una media de 450 m²/día. La base paleógena se considera como acuitardo de permeabilidades bajas, pero no especifica valores concretos.
- 2. PNIAS (1979): caracteriza los materiales calizos cámbricos como una unidad acuífera de entre 240 y 600 m²/día.





7. MODELO CONCEPTUAL

El área estudiada está conformada por un sistema hidrogeológico multicapa compuesto por materiales geológicos de distinta naturaleza y propiedades hidráulicas.

El almacenamiento y transmisión de agua subterránea en la MASb Lillo-Quintanar tiene lugar fundamentalmente en dos unidades hidrogeológicas: i) la unidad acuífera carbonatada del mioceno- plioceno y ii) la unidad margosa paleógena.

La unidad carbonatada del mioceno-plioceno constituye una importante unidad acuífera pero, dada su escasa potencia y distribución espacial, presenta una reducida capacidad para el almacenamiento de agua. Se trata de una unidad acuífera permeable por fracturamiento secundario/ disolución de transmisividad global media-alta. Por tanto, su principal función hidrogeológica consiste en transmitir hacia las unidades infrayacentes el agua que se infiltra a través de sus discontinuidades. Además, su disposición sobre una unidad hidrogeológica de menor permeabilidad determina la existencia de niveles acuíferos colgados que tendrían un carácter local.

La unidad margosa paleógena infrayace a la unidad acuífera carbonatada y constituye una unidad hidrogeológica de porosidad por fracturación que tiene una transmisividad global media-baja en virtud de su contenido en arcillas y yesos. Sin embargo, se ha observado que la permeabilidad de esta unidad varía de unas localizaciones a otras en función de su grado de fracturamiento, contenido en arcilla, o existencia de niveles conglomeráticos. Esto determina que sea apta para el almacenamiento de agua subterránea. Dados su importante espesor y amplia distribución a lo largo de toda la MASb, esta unidad albergaría los mayores volúmenes de agua subterránea.

El análisis piezométrico muestra niveles de escasa variación que experimentan respuestas amortiguadas a los cambios estacionales y a las extracciones por bombeo. El análisis realizado muestra tendencias y cotas piezométricas similares en niveles pertenecientes a distintas unidades hidrogeológicas (materiales cuaternarios y miocenos), lo que pondría de manifiesto unas propiedades hidráulicas semejantes entre sí.

Las unidades hidrogeológicas cretácicas y jurásicas, las cuales tienen una amplia representatividad en la MASb Sierra de Altomira, dentro de los límites de la MASb Lillo-Quintanar se acuñan y reducen perdiendo su importancia hidrogeológica. Por tanto, tanto el flujo como el almacenamiento de agua subterránea en la MASb Lillo-Quintanar tiene lugar en la unidad margosa paleógena.

El flujo subterráneo dentro de los límites de la MASb tiene lugar en dirección NE-SO entre cotas comprendidas entre 820 y 640 m s.n.m. El flujo subterráneo de entrada proviene en su práctica totalidad de la MASb Sierra de Altomira, el cual atraviesa el límite oriental entre ambas masas. Por otro lado, el flujo de salida de la MASb Lillo-Quintanar tiene lugar a lo largo de su límite meridional hacia la MASb Consuegra-Villacañas. En base a la orografía del área, el flujo subterráneo en la zona atravesada por su límite noroccidental es paralelo al mismo, lo cual determina que no sea un límite de recarga o descarga.





La recarga del sistema hidrogeológico se produce principalmente por infiltración del agua de lluvia y, especialmente durante el estiaje, por infiltración de los ríos. El drenaje natural se realiza en parte por los ríos Cigüela y Riansares, por manantiales y por escorrentía subterránea hacia la MASb Consuegra-Villacañas. Los escasos datos foronómico muestra que los tramos bajos de los ríos Cigüela y Riansares podrían actuar como importantes elementos de drenaje.

Las extracciones por bombeo constituyen el principal factor de salidas de origen antrópico, así como el retorno de riegos un componente de entrada derivado de ellas.

El balance hídrico realizado muestra períodos de almacenamiento tanto positivo como negativo que fluctúan en función de la variación anual de los parámetros implicados. Sin embargo, en base al resultado promedio de todos los años analizados se obtiene un balance global de la MASb de va de cuasi-equilibrio a excedentario.

A continuación, en la Figura 19, se muestra un esquema- resumen de los principales elementos que condicionan el almacenamiento subterráneo en las MASb Sierra de Altomira y Lillo-Quintanar.



Figura 19. Esquema del modelo conceptual





8. MODELO NUMÉRICO

El modelo numérico se ha llevado a cabo bajo el código MODFLOW, desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), que permite la modelización del agua subterránea en condiciones saturadas resolviendo la ecuación de flujo por diferencias finitas. La interfaz gráfica empleada ha sido Visual MODFLOW Flex v.2014.2 y Visual MODFLOW Pro V.4.6.0.169.

El procedimiento seguido para la creación del modelo numérico ha sido el siguiente:

- Alimentación del modelo
- Construcción del modelo numérico
 - o Mallado
 - Condiciones de contorno
 - o Calibración

8.1. ALIMENTACIÓN DEL MODELO

8.1.1.GEOMETRÍA

Tal y como se ha definido en el apartado 6, el área de estudio se identificaron un total de 7 unidades hidrogeológicas que descansan sobre un basamento rocoso considerado de muy baja permeabilidad. Para la incorporación de la geometría en el modelo, se han realizado perfiles hidrogeológicos en toda la extensión de las MASb (apartado 6.2) y se han creado a partir de ellos modelos digitales del terreno de sus respectivas superficies de contacto. Posteriormente, y tras ser analizadas con el modelo, se decidió agrupar las unidades hidrogeológicas en 3 subconjuntos que finalmente fueron empleadas para el modelamiento. Se generaron sendos modelos digitales del terreno que configuraron la geometría del modelo:

- Topografía de superficie
- Unidad miocena-pliocena-cuaternario (acuífero)
- Unidad paleógena (acuitardo)
- Unidad cretácica campaniense santoniense (acuífero)

El volumen entre las superficies conforma cada una de las unidades hidrogeológicas modeladas.







Figura 20. Superficies creadas



Figura 21. Perfil Norte – Sur MASb Lillo-Quintanar



Figura 22. Perfil Sur – Norte MASb Sierra de Altomira



Figura 23. Perfil Oeste – Este MASb Lillo-Quintanar y Sierra de Altomira





8.1.2. PARÁMETROS HIDRÁULICOS INICIALES

Una vez definida la geometría del sistema se ha procedido a la incorporación de los parámetros hidráulicos iniciales para cada unidad hidrogeológica.

En referencia a la permeabilidad o conductividad hidráulica, su distribución se consideró en base a los criterios descritos en el apartado 6.3. En primera instancia se consideraron permeabilidades isótropas en la horizontal (Kx, Ky), mientras que la permeabilidad vertical (Kz) se redujo a una décima parte de la horizontal.

8.2. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

8.2.1.MALLADO

Se ha realizado un mallado uniforme de 250 x 250 m que cubre toda la extensión de las dos MASb, tal como se refleja en la Figura 24.



Figura 24. Mallado





8.2.2.CELDAS INACTIVAS

Se han considerado celdas inactivas los bordes de las MASb teniendo en consideración los criterios definidos en el modelo conceptual, así como los afloramientos del basamento impermeable en el interior de ellas. En la figura siguiente se observan en blanco las celdas activas y en verde las inactivas.

Cabe indicar que, a pesar de que los bordes son inactivos, tal y como se muestra posteriormente se han incluido condiciones de contorno para simular tanto las entradas laterales como las respectivas salidas subterráneas.



Figura 25. Celdas activas (blanco) e inactivas (verde)





8.2.3. CONDICIONES DE CONTORNO

8.2.3.1. NIVEL CONSTANTE Y DREN

Para simular tanto las entradas como las salidas subterráneas se ha empleado la condición de contorno de borde constante, la cual se ha incluido para todas las capas. Las cotas introducidas para esta condición han sido las obtenidas a partir de los análisis piezométricos del apartado 3.3.

Asimismo, se ha atribuido la condición tipo dren a los manantiales existentes en las MASb, los cuales se describen en el apartado 5.5.

A continuación, en la siguiente figura se muestra la distribución de niveles constantes (líneas marrones) y ríos (azul).



Figura 26. Celdas en marrón incluidas como condición de borde constante y azules como tipo río





8.2.3.2. INFILTRACIÓN POR PRECIPITACIÓN

La infiltración por precipitación se ha incorporado con el módulo Recharge, correspondiente a una recarga por unidad de superficie para cada paso de tiempo.

Las entradas por precipitación han sido calculadas a pasos mensuales para el periodo comprendido entre 2000 y 2021, siguiendo la distribución espacial mostrada en la Figura 11.

8.2.3.3. INFILTRACIÓN A TRAVÉS DE CAUCES

La infiltración a través del cauce de los principales ríos de las MASb se ha incorporado como condición tipo River, la cual permite el cálculo de caudales por el programa. Se han representado de esta manera los principales cursos fluviales que atraviesan las MASb. Se ha considerado zona permeable todos los tramos que no se encuentran impermeabilizados (Figura 27).



Figura 27. Celdas en azul oscuro con condición River simulando recarga del rio





8.2.3.4. BOMBEOS

Los bombeos se han incorporado con la función Well, a través de la cual se han introducido los datos y estimaciones contenidas en el apartado 4. La figura siguiente muestra la ubicación de los pozos de bombeo simulados.



Figura 28. Celdas en rojo con condición Well simulando las salidas por bombeo





8.3. EJECUCIÓN DEL MODELO

8.3.1.RÉGIMEN ESTACIONARIO

Una vez alimentado el modelo y aplicadas las condiciones de contorno, se realizaron varias ejecuciones en régimen transitorio, a los efectos de detectar anomalías y realizar un depurado de datos.

Una vez realizada la depuración se hizo una simulación en régimen estacionario con los parámetros hidrodinámicos iniciales. En dicha simulación se observó que las condiciones introducidas en el modelo se acercaban a un ajuste razonable teniendo en cuenta que en esta primera ejecución no se ha realizado la calibración.

8.3.2.CALIBRACIÓN RÉGIMEN ESTACIONARIO

Una vez construido el modelo se procedió a realizar una calibración en régimen estacionario con los datos correspondientes a enero del año 2000, fecha en la cual se dispone un amplio número de registros piezométricos.

Tras la calibración en régimen estacionario se obtuvo un error RMS del 11.436 %, tal y como se observa en la Figura 29. Mediante esta simulación se ajustó la conductividad hidráulica considerada inicialmente, así como la conductancia entre los cauces superficiales y los acuíferos.

Se han obtenido valores de permeabilidad horizontal de entre 0.4 m/d hasta los 6 m/d en zonas localizadas, predominando valores comprendidos entre los 0.4 y 2 m/d. La distribución espacial de la conductividad horizontal se muestra desde la Figura 30 a la Figura 32. Por otro lado, los valores de permeabilidad vertical obtenidos tras la calibración oscilan entre los 0.04 y los 0.2 m/d.

Se decidió calibrar el modelo únicamente en régimen estacionario ya que, tal como se especifica en la conceptualización hidrogeológica, las tendencias piezométricas de rango temporal medio-largo son fundamentalmente estables tanto en la MASb Lillo-Quintanar como en la MASb Sierra de Altomira. Por tanto, una calibración en régimen transitorio reflejaría resultados similares.













Conductivity

Zone	Kx [m/d]	Ky [m/d]	Kz [m/d]
1	2	2	0.2
2	2	2	0.2
3	2	2	0.2
4	2	2	0.2
5	6	6	0.6
6	0.4	0.4	0.04
7	3	3	0.3
8	0.4	0.41	0.02
9	0.5	0.5	0.05

Figura 30. Distribución de la conductividad hidráulica horizontal (Kx – Ky) y vertical (Kz) obtenida tras calibración en régimen estacionario de la Unidad Hidrogeológica 1







Conductivity

	Zone	Kx [m/d]	Ky [m/d]	Kz [m/d]	
	1	12	2	0.2	
1	2	2	2	0.2	
	3	2	2	0.2	
	4	2	2	0.2	
	5	6	6	0.6	
	6	0.4	0.4	0.04	
	7	3	3	0.3	
	8	0.4	0.41	0.02	
•	9	0.5	0.5	0.05	

Figura 31. Distribución de la conductividad hidráulica horizontal (Kx – Ky) y vertical (Kz) obtenida tras calibración en régimen estacionario de la Unidad Hidrogeológica 2.







Conductivity

Zo	ne Kx[m/d]	Ky [m/d]	Kz [m/d]
1	2	2	0.2
2	2	2	0.2
3	2	2	0.2
4	2	2	0.2
5	6	6	0.6
6	0.4	0.4	0.04
7	3	3	0.3
8	0.4	0.41	0.02
9	0.5	0.5	0.05

Figura 32. Distribución de la conductividad hidráulica horizontal (Kx - Ky) y vertical (Kz) obtenida tras calibración en régimen estacionario de la Unidad Hidrogeológica 3





8.4. Resultados del modelo

A continuación, en la Tabla 9 se muestran los resultados del balance hídrico obtenido para el período de simulación (años 2001-2020). En dicha tabla se compila el volumen promedio anual simulado para cada uno de los componentes del balance.

El modelo numérico confirma el modelo conceptual, siendo por tanto válidos los volúmenes considerados como renovables del acuífero.

Las entradas y salidas del balance han sido referidas a diferentes sectores que coinciden con varias de las MASb adyacentes a la MASb Lillo-Quintanar. Estos sectores se muestran en la Figura 33.

En base a los resultados obtenidos cabe destacar:

- Tanto la MASb Lillo-Quintanar como la MASb Sierra de Altomira presentan un balance hídrico en quasi-equilibrio en el que las entradas son muy similares a las salidas.
- Los volúmenes de entrada más importantes se producen a través de la infiltración del agua de lluvia, así como del flujo subterráneo proveniente de las MASb circundantes.
- Como principales salidas destacan tanto el flujo subterráneo hacia MASb circundantes como la extracción por pozos.
- Se observa que resultados del balance hídrico, entendidos como la diferencia entre el total de entradas y el total de salidas, dependen en gran medida de los volúmenes de infiltración anual procedentes de la precipitación.

La simulación realizada permite asimismo caracterizar la dinámica de flujo subterráneo a lo largo del período de simulación. La Figura 34 a la Figura 36 muestran las líneas isopiezas de cada uno de los niveles simulados.





Tabla 9. Balance hídrico de la MASb Lillo-Quintanar

	:	Salidas (hm³)		Entradas (hm³)						
Pozos	Hacia MASb Consuegra- Villacañas	Hacia ríos	Total Salidas	Recarga	Desde MASb Ocaña (Tajo)	Desde Entrepeñas (Tajo)	Desde MASb Altomira	Desde Ríos	Total Entradas	
15.16	31.14	12.27	58.57	43.54	1.74	1.24	11.31	0.85	58.68	







	Zone	Short Name	Description
•	1	Zone1	Zone1
	2	Lillo_Q	Lillo Quintanar
	3	S_Altomira	Sierra de Altomira
1	4	Norte_Tajo	Entrepeñas
	5	E_Obispalia	Obispalía
	6	Ocana_Tajo	Ocaña
	7	Consuegra	Consuegra
1	8	MO_1I	Mancha Occidental
	9	RV	Rus-Valdelobos
	10	TercAlarc	Terciario Alarcon

Figura 33. Sectores del balance







Figura 34. Piezometría capa 1







Figura 35. Piezometría capa 2







Figura 36. Direcciones de flujo





9. CONCLUSIONES

- El objetivo principal del presente trabajo consiste en definir las principales características hidrogeológicas de la MASb Lillo-Quintanar, así como establecer su correspondiente balance hídrico para el periodo comprendido entre los años 2001 y 2020. Los resultados mostrados en el presente Informe serán matizados mediante el modelo numérico hidrogeológico que actualmente se encuentra en construcción.
- La MASb Lillo-Quintanar es un sistema hidrogeológico multicapa cuyo almacenamiento subterráneo tiene lugar fundamentalmente en la unidad paleógena.
- Los procesos de recarga de mayor relevancia son i) infiltración directa de agua de lluvia y ii) transferencia subterránea procedente de la MASb Sierra de Altomira.
- El flujo subterráneo que atraviesa la MASb tiene lugar fundamentalmente en dirección noreste-suroeste, descargando en la MASb Consuegra-Villacañas.
- El balance hídrico realizado refleja un sistema hidrogeológico en cuasi-equilibrio cuya relación entradas/ salidas depende de fundamentalmente de la distribución anual de las tasas de recarga y del régimen anual de bombeos.
- Los niveles de agua subterránea medidos en pozos y piezómetros de la MASb se caracterizan por ser fundamentalmente estables a lo largo del periodo analizado.
- La estabilidad general de los niveles de agua medidos en pozos y piezómetros de la MASb muestra que el régimen de bombeo existente para el periodo 2001-2021 no ha causado reducciones sustanciales en los niveles piezométricos analizados, lo cual permite constatar la sostenibilidad ambiental de dicho régimen.
- Atendiendo al balance hídrico realizado y dado que no se observan ascensos piezométricos los años de mayor recarga, se supone que los excedentes no generan un mayor volumen de reservas en la masa de agua, sino que descargan hacia el sistema superficial (manantiales y ríos) y hacia la masa de agua Consuegra-Villacañas, poniendo de manifiesto que la masa de agua se encuentra en equilibrio.
- Así, de igual forma, en los años de menor recarga tampoco se ha constatado una tendencia piezométrica descendente, salvo descensos puntuales seguidos de recuperaciones, lo cual es indicativo de que existe un margen de no afección hidráulica a los niveles del acuífero entre la recarga media anual calculada (58,6 hm³/año) y los bombeos producidos en el acuífero (17 hm³/año), cifrada en 41,6 hm³/año en el periodo analizado.
- En esta misma línea de análisis, se estima que comienza a verse afectado el nivel piezométrico de la masa de agua cuando la diferencia entre la recarga y los bombeos es inferior a 36,4 hm³/año (5,2 hm³/año menos que la media). Esto conlleva a deducir





que el margen de no afección a los niveles piezométricos se encontraría en 5.2 hm³/año respecto a la situación actual, por tanto, cabría esperar que la masa de agua siguiera en equilibrio con una recarga inferior a 5.2 hm³/año respecto a la media o a un incremento de los bombeos en la misma proporción.

• El modelo numérico confirma el modelo conceptual, siendo por tanto válidos los volúmenes considerados como renovables del acuífero

