

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE CIENCIAS GEOLÓGICAS

Departamento de Geodinámica



**ESTUDIO METODOLÓGICO PARA EL CÁLCULO DE LA
INFILTRACIÓN EN EL VASO DE LAS TABLAS DE DAIMIEL:
VALIDACIÓN DE RESULTADOS**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

PRESENTADA POR

Silvino Castaño Castaño

Bajo la dirección del doctor

Pedro Emilio Martínez Alfaro

Madrid, 2003

ISBN: 84-669-1776-4

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE CIENCIAS GEOLÓGICAS
Departamento de Geodinámica



**Estudio metodológico para el cálculo de la infiltración
en el vaso de las Tablas de Daimiel.
Validación de resultados**

TESIS DOCTORAL
Silvino Castaño Castaño
Madrid, 2003



**Estudio metodológico para el cálculo de la infiltración en el
vaso de las Tablas de Daimiel.
Validación de Resultados**

Memoria presentada por:
D. Silvino Castaño Castaño
para optar al grado de Doctor por la Universidad Complutense de Madrid
bajo la dirección del Dr. D. Pedro Emilio Martínez Alfaro
Madrid, 2003

Estudio metodológico para el cálculo de la infiltración en el vaso de las Tablas de Daimiel. Validación de Resultados

Tesis presentada en el Departamento de Geodinámica por D. Silvino Castaño Castaño para la obtención del Grado de Doctor por la Universidad Complutense de Madrid.

La Tesis ha sido dirigida por el Doctor D. Pedro Emilio Martínez Alfaro, Catedrático de Hidrogeología del Departamento de Geodinámica de la Universidad Complutense de Madrid.

Vº Bº del Director

Doctor D. Pedro Emilio Martínez Alfaro
Director

Marco Polo describe un puente, piedra por piedra.

- ¿Pero cuál es la piedra que sostiene el puente? –pregunta Kublai Jan.

- El puente no está sostenido por esta piedra o por aquella -respondió Marco-, sino por la línea del arco que ellas forman.

Kublai permanece silencioso, reflexionando. Después añade:

- ¿Por qué me hablas de las piedras? Lo único que me importa es el arco.

Polo responde: - Sin piedras no hay arco.

Italo Calvino, Las ciudades invisibles

Agradecimientos

Por muy personal que sea un trabajo, nunca lo es completamente. De alguna manera intervienen muchas personas que, en un momento u otro, te ayudan expresamente. Otras sin saberlo consiguen modificar los planteamientos del trabajo, resuelven dudas, provocan que el trabajo cambie de rumbo, se acelere, originan que se modifiquen hasta detalles mínimos en el resultado final. Hay otras personas que con sólo creer que es posible obtener un mínimo resultado aceptable prestan un gran apoyo. Las hay, en fin, que también lo prestan, aunque sea por no creer en los objetivos, métodos y los resultados.

No quiero dejar de mencionar, de todos modos al Dr. D. Pedro Emilio Martínez Alfaro, verdadero motor y alma del trabajo, además de director del mismo. Ha demostrado una paciencia infinita ante las diferentes idas y venidas de la Tesis durante su elaboración, y del doctorando con ella por su afición al “salseo”.

Quiero agradecer a la Confederación Hidrográfica del Guadiana, y muy especialmente a D. José Ramón Aragón, Comisario de Aguas cuando se comenzó el trabajo, todas las facilidades que nos han prestado, en la obtención de datos propios de la misma y en la gestión para conseguir otros. También quiero agradecer a José María Marco el habernos proporcionado la información sobre aforos, incluso antes de haberse procesado.

A la Dirección y Personal del Parque Nacional de las Tablas de Daimiel, que facilitaron muchos de los datos imprescindibles para la realización del trabajo.

La empresa Tragsatec, S.A. facilitó información que ha sido analizada y revisada en este trabajo. Igualmente proporcionó el Modelo Digital del Terreno que hemos tratado de acuerdo con los fines del presente trabajo.

A todos aquéllos que directa indirectamente me han ayudado o apoyado antes y durante la realización del trabajo y que injustamente no he mencionado (me faltaría espacio). Para todos, un cálido abrazo.

A mi familia, que, aun en etapas duras, ha soportado esos momentos endiablados que surgen en trabajos como la realización de una Tesis.

Índice

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS	4
3. METODOLOGÍA.....	5
4. EL SISTEMA FÍSICO.....	7
4.1 La zona húmeda y el Parque Nacional de las Tablas de Daimiel.....	7
4.2 Modificaciones antrópicas del estado hídrico y geometría del vaso de las Tablas de Daimiel.....	11
5. ANTECEDENTES Y REVISIÓN CRÍTICA.....	17
6. ESPACIO Y TIEMPO DE APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA.....	22
6.1 Espacio físico de trabajo	22
6.2 Geometría del vaso.....	25
6.2.1 Comparación Superficies encharcadas-Superficies de MDT.....	25
6.2.2 Relación Superficies MDT-Volumen almacenado.....	28
6.3 Período de aplicación del método	30
7. DATOS DE PARTIDA.....	38
8. ESTIMACIÓN DE LA INFILTRACIÓN.....	47
8.1 Cálculo preliminar de la infiltración en el vaso de las Tablas de Daimiel.....	47
8.2 Balance diario de agua en el vaso de las Tablas de Daimiel.....	50
8.2.1 Modelo conceptual.....	52
8.2.2 Programa de cálculo	54
8.2.3 Calibración: Aproximación mediante ensayo-error.....	59
8.2.4 Análisis de sensibilidad. Resultados.....	61
8.3 Estimación automática de la infiltración y parámetros geométricos del vaso.....	67
8.3.1 El programa utilizado	68
8.3.2 Simulaciones realizadas.....	71
8.3.3 Comparación de resultados de las diferentes estimaciones.....	80
8.4 Aplicación de la metodología propuesta a otra geometría del vaso de las Tablas de Daimiel.....	85
9. RESUMEN Y CONCLUSIONES	94
10. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS Y DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA.....	99
11. REFERENCIAS.....	108

Índice de figuras

Fig. 4.1. Situación general de la zona de estudio y de los principales elementos constructivos y de control existentes	8
Fig. 4.2. Topografía del Parque Nacional de las Tablas de Daimiel, área de protección y entorno, y toponimia de la zona	10
Fig 4.3. Descenso del nivel freático en el entorno de las Tablas de Daimiel entre 1974 y 1991 [Tomado de García Rodríguez y Llamas, 1992].....	11
Fig. 4.4. Situación de algunos de los sondeos realizados para el mantenimiento artificial de una lámina de agua en el vaso de las Tablas de Daimiel.....	14
Fig. 6.1. Superficie y volumen entre Puente Navarro y el Dispositivo Hidráulico correspondientes a la cota de coronación de la presa de Puente Navarro.....	23
Fig. 6.2. Superficie y volumen aguas arriba del Dispositivo Hidráulico correspondientes a la cota de coronación de éste.....	24
Fig. 6.3. Posibles cambios en las cotas del agua almacenada y en el flujo a través del Dispositivo Hidráulico en función de los balances parciales en los dos sectores principales en los que se divide el vaso de las Tablas de Daimiel.....	27
Fig. 6.4. Procedimiento de comparación de superficie observada en campo con la correspondiente al Modelo Digital del Terreno	27
Fig. 6.5. Comparación en el tiempo de los valores de superficie encharcada medida y los obtenidos del MDT	30
Fig. 6.6. Correlación entre valores de superficie encharcada observada y obtenida del MDT para los períodos de vaciado de las Tablas de Daimiel en 1996 y 1997.....	31
Fig. 6.7. Correlación entre valores de superficie encharcada y volumen almacenado obtenidos del MDT para los períodos de vaciado de las Tablas de Daimiel en 1996 y 1997	31
Fig. 6.8. Recorrido de las aguas procedentes del trasvase Tajo-Segura con destino al Parque Nacional de las Tablas de Daimiel y de los excedentes no infiltrados del embalse de Peñarroya (acuífero del Campo de Montiel).....	33
Fig. 6.9. Precipitación anual en la cuenca alta del Guadiana, y desviaciones acumuladas respecto a la media [Fuente: Martínez Cortina, 2003].....	34
Fig. 7.1. Precipitaciones diarias registradas en la estación meteorológica del Instituto Nacional de Meteorología 04112U (Tablas de Daimiel), situada en las proximidades del Centro de Recepción del Parque Nacional.....	39
Fig. 7.2. Volúmenes diarios registrados en la estación de aforos E-04204, de Villarrubia de los Ojos, entre el 1 de enero de 1996 y el 30 de septiembre de 1997	41
Fig. 7.3. Situación de las escalas limnimétricas para el control de la lámina de agua del Parque Nacional de las Tablas de Daimiel.....	43
Fig. 7.4. Comparación de las precipitaciones en la estación meteorológica de las Tablas de Daimiel y la lluvia útil unitaria calculada para la estimación de la escorrentía en los afluentes septentrionales de las Tablas de Daimiel.....	46

Fig. 8.1 Relación entre la superficie encharcada media y la infiltración diaria calculada en dos períodos de vaciado del vaso de las Tablas de Daimiel en 1996 y 1997.....	51
Fig. 8.2. Componentes que se han considerado en el cálculo del balance diario de agua en el vaso de las Tablas de Daimiel.....	52
Fig. 8.3. Organigrama del funcionamiento del programa realizado para el cálculo del balance diario de agua en la superficie encharcada del vaso de las Tablas de Daimiel..	58
Fig. 8.4. Comparación de las superficies encharcadas observadas y simuladas en el ámbito de las Tablas de Daimiel para el mejor ajuste encontrado mediante el método de ensayo y error.....	59
Fig. 8.5. Correlación entre los valores de superficie encharcada medida y calculada suponiendo coeficiente de infiltración media diaria de 10 mm/d	60
Fig. 8.6. Comparación de las superficies encharcadas medidas y las simuladas con coeficientes de infiltración media de 5 mm/d, 10 mm/d y 15 mm/d	61
Fig. 8.7. Evolución de los volúmenes infiltrados simulados suponiendo coeficientes de infiltración media diaria de 5 mm/d, 10 mm/d y 15 mm/d	64
Fig. 8.8. Comparación de la aportación diaria medida en la estación de aforos de Villarrubia de los Ojos y la infiltración calculada suponiendo un coeficiente de infiltración de 10 mm/d.....	65
Fig. 8.9. Evolución de los volúmenes vertidos en la presa de Puente Navarro simulados suponiendo coeficientes de infiltración media diaria de 5 mm/d, 10 mm/d y 15 mm/d..	66
Fig. 8.10. Esquema del control del programa PEST sobre el modelo en el que se estiman sus parámetros, de acuerdo con las especificaciones de los ficheros que debe originar el usuario	69
Fig. 8.11. Comparación de la superficie inundada calculada mediante la estimación PEST01 y los resultados de referencia (PEST00) considerando coeficiente de infiltración de 10 mm/d.....	72
Fig. 8.12. Residuales de la optimización PEST01	73
Fig. 8.13. Comparación de la superficie inundada calculada mediante la estimación PEST02 y los resultados de referencia (PEST00) considerando coeficiente de infiltración de 10 mm/d.....	75
Fig. 8.14. Residuales de la optimización PEST02	76
Fig. 8.15. Comparación de la superficie inundada calculada mediante la estimación PEST03 y los resultados de referencia (PEST00) que considera coeficiente de infiltración de 10 mm/d.....	77
Fig. 8.16. Relaciones entre volumen almacenado en el vaso de las Tablas y superficie encharcada calculada en PEST04, obtenida a partir de los datos del modelo digital del terreno y ajuste polinómico de éstos adoptado en PEST00	78
Fig. 8.17. Comparación de la superficie inundada calculada mediante la estimación PEST04 y los resultados de referencia (PEST00) que considera coeficiente de infiltración de 10 mm/d.....	79
Fig. 8.18. Diagramas de cajas de los valores de los residuales de las simulaciones realizadas en las estimaciones automáticas de diversos parámetros relacionados con el balance de agua en el vaso de las Tablas de Daimiel.....	83

Fig. 8.19. Representación de los valores de volumen almacenado-superficie encharcada tomada del informe MOPU y MAPA (1986) y relaciones asumidas entre las dos variables	85
Fig. 8.20. Comparación de las curvas de embalse utilizadas en MOPU y MAPA (1986) y la asumida en el presente trabajo a partir del modelo digital del terreno.....	86
Fig. 8.21. Comparación de la distribución de los residuales de la simulación del balance diario de agua en las Tablas de Daimiel con la geometría obtenida de MOPU y MAPA (1986) y las estimaciones automáticas previas	88
Fig. 8.22. Comparación de los valores de superficie encharcada medida y simuladas utilizando la curva de embalse de MOPU y MAPA (1986) para coeficientes de infiltración media de 9.063, 5 y 15 mm/d, y simulación con geometría actual y coeficiente de infiltración de 10 mm/d	89
Fig. 9.1. Esquema simplificado de la metodología propuesta para el cálculo de la infiltración en el vaso de las Tablas de Daimiel.....	95
Fig. 10.1. Esquema del modelo conceptual utilizado para considerar infiltración variable en función del volumen embalsado en el vaso de las Tablas de Daimiel.....	102
Fig. 10.2. Residuales de la simulación del balance de agua diario en las Tablas de Daimiel calculados en la estimación automática de tres coeficientes de infiltración....	104
Fig. 10.3. Diagramas de caja de las distribuciones de las diferencias entre valores observados y medidos para las simulaciones más significativas realizadas con el programa de estimación automática de parámetros PEST.....	105
Fig. 10.4. Comparación de las superficies encharcadas observadas y las calculadas considerando coeficientes de infiltración variables y en la simulación de referencia ...	106

Índice de Tablas

Tabla 4.1. Volúmenes bombeados por los pozos de emergencia para mantenimiento de láminas de agua en el vaso de las Tablas de Daimiel.....	14
Tabla 5.1. Comparación de resultados globales de balances en las Tablas de Daimiel en el período en el que la laguna y el acuífero se encuentran desconectados.....	20
Tabla 6.1. Fechas en las que se tienen medidas de superficie encharcada en las etapas de vaciado de las Tablas de Daimiel dentro del período de estudio seleccionado	28
Tabla 6.2. Comparación de superficie encharcada y volumen de agua embalsada en varias fechas del período de 7 de junio de 1996 a 19 de noviembre de 1996.....	29
Tabla 6.3. Comparación de superficie encharcada y volumen de agua embalsada en varias fechas del período de 9 de junio de 1997 a 22 de septiembre de 1997	29
Tabla 6.4. Características de los trasvases de agua desde las infraestructuras del Acueducto Tajo-Segura hacia el Parque Nacional de las Tablas de Daimiel.....	32
Tabla 6.5. Pérdidas de volúmenes de agua derivada entre el acueducto Tajo-Segura y el Parque Nacional de las Tablas de Daimiel.....	35
Tabla 6.6. Precipitaciones totales mensuales y precipitación máxima en un día en la estación meteorológica de las Tablas de Daimiel para el período comprendido entre octubre de 1996 y febrero de 1997.....	36
Tabla 7.1. Fechas en las que se ha dispuesto de superficie encharcada observada en campo del período comprendido entre 1 de enero de 1996 y 30 de septiembre de 1997...	44
Tabla 8.1. Cálculo de la infiltración en el período de vaciado de las Tablas de Daimiel comprendido entre el 7 de junio de 1996 y el 19 de noviembre de 1996	49
Tabla 8.2. Cálculo de la infiltración en el período de vaciado de las Tablas de Daimiel comprendido entre el 9 de junio de 1997 y el 22 de septiembre de 1997.....	50
Tabla 8.3. Resultados del balance obtenido por simulación para el periodo comprendido entre el 1 de enero de 1996 y el 30 de septiembre de 1996	62
Tabla 8.4. Resultados del balance obtenido por simulación para el periodo comprendido entre el 1 de octubre de 1996 y el 30 de septiembre de 1997	63
Tabla 8.5. Características generales de las diferentes estimaciones automática de parámetros utilizados en el cálculo del balance diario de agua en las Tablas de Daimiel mediante el programa PEST.....	82
Tabla 8.6. Resultados globales del cálculo del balance diario de agua en las Tablas de Daimiel, para distintas estimaciones de parámetros	82
Tabla 8.7. Comparación de la superficie máxima de encharcamiento observada y calculada, y del porcentaje de días del período con superficies encharcadas superiores a 600 ha y 850 ha para diversas simulaciones	84
Tabla 8.8. Comparación de los valores utilizados en el mejor ajuste obtenido para los balances diarios (PEST00) y los considerados en la estimación automática utilizando la curva de embalse del informe MOPU y MAPA (1986), denominado PEST05	87

Tabla 8.9. Comparación de los valores de los componentes del balance en el vaso de las Tablas de Daimiel calculados para el mejor ajuste de los balances diarios iniciales (PEST00) y los calculados con el coeficiente de infiltración estimado para la curva de embalse del MOPU y MOPU (PEST05) para el período comprendido entre el 1 de enero de 1996 y el 30 de septiembre de 1996.....	91
Tabla 8.10. Comparación de los valores de los componentes del balance en el vaso de las Tablas de Daimiel calculados para el mejor ajuste de los balances diarios iniciales (PEST00) y los calculados con el coeficiente de infiltración estimado para la curva de embalse del MOPU y MOPU (PEST05) para el período comprendido entre el 1 de octubre de 1996 y el 30 de septiembre de 1997.....	91
Tabla 8.11. Comparación de los resultados de los balances diarios de agua en el vaso de las Tablas para las distintas simulaciones planteadas y para dos períodos de tiempo con diferentes características hidrológicas	92
Tabla 10.1. Comparación de los resultados globales de los balances realizados mediante las simulaciones PEST00 y PEST06 para los dos períodos de tiempo más característicos de las condiciones hidrológicas en las Tablas en los años 1996 y 1997.....	104

Índice de Fotografías

Foto 4.1. Presa de Puente Navarro en la parte suroccidental del Parque Nacional de las Tablas de Daimiel.....	12
Foto 4.2. Sector de “Las Cañas” visto desde la presa de Puente Navarro	15
Foto 4.3. Azud de Molemocho visto desde el puente del mismo nombre hacia el Parque Nacional de las Tablas de Daimiel.....	16
Foto 6.1. Rebosamiento del embalse de Peñarroya a la salida del Campo de Montiel en febrero de 1997, vertiéndose los excedentes al Canal del Guadiana, que circula por el acuífero de la Mancha occidental hasta el río Cigüela.....	37
Foto 7.1. Estación meteorológica de las Tablas de Daimiel, situada junto al centro de información del Parque Nacional.....	40
Foto 7.2. Estación de aforos de Villarrubia de los Ojos	41
Foto 8.1. Vertidos de agua de las Tablas de Daimiel hacia el río Guadiana en la presa de Puente Navarro.....	54
Foto 8.2. Antiguo cauce del río Guadiana, el 27 de marzo de 1997, entre los puentes de Molemocho y Griñón, inundado por aportes en sentido aguas arriba procedentes de las Tablas de Daimiel desde la zona de Molemocho.....	55
Foto 8.3. Antiguo cauce del río Guadiana inundado, el 27 de marzo de 1997, visto desde el puente de Molemocho	55

Índice de Anexos

Anexo 1. Niveles medidos en las escalas limnimétricas instaladas en el Parque Nacional de las Tablas de Daimiel

Anexo 2. Superficies encharcadas y volúmenes de agua almacenados en el vaso de las Tablas de Daimiel, según cota, calculados a partir del Modelo Digital del Terreno

Anexo 3. Superficies encharcadas medidas

Anexo 4. Caudales medios diarios medidos en la estación de aforos E-4204 de Villarrubia de los Ojos

Anexo 5. Datos de precipitación y temperatura diarios medidos en la estación meteorológica 04112U del Parque Nacional de las Tablas de Daimiel

Anexo 6. Notas de la Confederación Hidrográfica del Guadiana sobre la inundación del cauce del Guadiana entre los puentes de Molemocho y Nuevo

Anexo 7. Caudales bombeados para el mantenimiento de las superficies encharcadas del Parque Nacional de las Tablas de Daimiel

Anexo 8. Evaporación diaria medida en la estación meteorológica 04112U del Parque Nacional de las Tablas de Daimiel

Anexo 9. Datos de temperatura y evaporación diarias para 1995. Correlación entre ambas magnitudes

Anexo 10. Evapotranspiración potencial media mensual calculada con datos de la estación meteorológica de Daimiel (Elías y Ruz Beltrán, 1977)

Anexo 11. Resultados del modelo precipitación-escorrentía basado en balance de agua en el suelo

Anexo 12. Datos de entrada al modelo de simulación del balance de agua diario en el vaso de las Tablas de Daimiel

Anexo 13. Entradas diarias al vaso de las Tablas de Daimiel, y salidas y variación del almacenamiento diarios para coeficientes de infiltración media diaria de 5, 10, Y 15 mm/d

1.

Introducción

Las Tablas de Daimiel, situadas en la zona central de la Península Ibérica, constituyeron un humedal consecuencia de la escasa pendiente de la red hidrográfica, de la existencia de depresiones semiendorreicas e, hidrogeológicamente, de la descarga del extenso acuífero situado bajo la zona occidental de la Llanura manchega. Era la más extensa de un conjunto de zonas húmedas que forman la denominada Mancha Húmeda, que se sitúa en la cuenca alta del Guadiana.

Su posición geográfica ha originado que fuese un lugar de gran importancia ecológica en la migración y nidificación de aves, habiendo sido declarado Parque Nacional en 1973 (ampliado en 1980) y, junto con otras lagunas manchegas, Reserva de la Biosfera en 1981.

Al encharcamiento de las Tablas contribuía la escorrentía superficial de algunos ríos con caudales muy irregulares que se unían para formar el río Guadiana. Sin embargo, la mayor parte del caudal y la permanencia del encharcamiento se debía a un conjunto de surgencias, del gran acuífero de la Mancha occidental que tiene de más de 5000 km² de extensión, que aparecían en las proximidades de las Tablas de Daimiel, concretamente en los denominados “Ojos del Guadiana” y en el propio espacio natural. La convergencia de aguas superficiales, estacionales y salobres, y aguas subterráneas, más constantes y dulces, confería a las Tablas un carácter especial dentro de las zonas húmedas españolas y europeas.

El humedal y la zona saturada se encuentran actualmente desconectados debido a los importantes volúmenes bombeados para regadío en el acuífero, que han provocado la inversión del flujo, de modo que la laguna constituye, actualmente y cuando tiene agua procedente de la escorrentía superficial, una zona de recarga del acuífero de la Mancha occidental.

Desde mediados de la década de 1980, las Tablas de Daimiel no han recibido aportes subterráneos. Los aportes superficiales también se redujeron debido a una fuerte sequía

y a que los cauces fluviales se desconectaron del acuífero, por lo que una parte significativa, o la totalidad de sus caudales, se infiltra. Así pues, las Tablas de Daimiel sufren un fuerte déficit hídrico que se ha intentado resolver mediante obras de retención de agua, que favorecen los encharcamientos, y mediante aportes artificiales, sobre todo procedentes de bombeos en sondeos próximos a la zona inundable y de trasvases desde la cuenca del Tajo, aprovechando las infraestructuras del acueducto Tajo-Segura.

Sin embargo, y aunque los encharcamientos parecen ser ligeramente positivos para las especies animales y vegetales del Parque Nacional, los aportes naturales o artificiales que llegan a éste tenderán a perderse como consecuencia de la evaporación y la infiltración, cuyo valor, nada despreciable, no está bien acotado.

La cuantificación de la infiltración se convierte así en una variable esencial en cualquier estudio relativo a la restauración de las Tablas de Daimiel, que debe ser considerada al introducir en ellas agua subterránea o trasvasada. Sin embargo, su cálculo es complejo debido a la heterogeneidad del terreno, a la inexistencia de datos o a la deficiente calidad de alguno de ellos. Esa variable, junto con la evaporación condicionarán el comportamiento de los recursos hídricos del espacio natural en lo que se refiere a tiempo de encharcamiento, tan importante desde el punto de vista ecológico.

En el otoño de 1995 se rompe una tendencia negativa en la degradación del espacio natural ya que se suceden varios años húmedos consecutivos, especialmente el año hidrológico 1996-97 en el que se produce una avenida que provoca el máximo encharcamiento de las Tablas y que se extiende por los cauces de la zona de protección. Además, las cuantiosas precipitaciones y, sobre todo, la infiltración en los cauces fluviales y la recuperación del acuífero del Campo de Montiel, originaron una ligera mejoría en la situación del acuífero de la Mancha occidental. Algunos autores echan en falta la disponibilidad de los datos hidrológicos de esos años húmedos, ya que no es habitual en la hidrología de la zona contar con una secuencia de esas características.

En el presente trabajo, gracias a la contribución de la Confederación Hidrográfica del Guadiana, de la Dirección del Parque Nacional de las Tablas de Daimiel y de alguna empresa colaboradora de las mismas, ha sido posible contar con numerosos datos correspondientes o aplicables a los años 1996 y 1997. Su síntesis e integración en la cuantificación de la infiltración de agua en el vaso de las Tablas pueden ayudar a comprender mejor algunos de los procesos que se produjeron en esa época y que influyeron en su entorno, como es el acuífero de la Mancha occidental.

En este trabajo se aborda por primera vez una metodología que permite acotar de manera razonable el valor de los parámetros de mayor grado de desconocimiento en la estimación de la infiltración. Por primera vez se simula, con un programa de ordenador, elaborado específicamente para este caso, un balance día a día en el vaso de las Tablas. También por primera vez se establece, a tal efecto, la correspondencia entre volumen almacenado en el vaso de las Tablas y la superficie encharcada, considerando independientemente dos zonas en el vaso: aguas arriba y aguas abajo del Dispositivo Hidráulico, que divide en dos el vaso de las Tablas. Finalmente, también por primera vez se utiliza la superficie encharcada, medida realmente en el vaso de la laguna en diferentes fechas, como elemento de calibración del balance realizado, al ser comparada, para las mismas fechas, con la que proporciona el simulador elaborado. El grado de aproximación entre superficie encharcada real y simulada es el índice de credibilidad del balance que se obtiene.

La presente Tesis pretende, pues, realizar una aportación al conocimiento de un espacio natural singular por la cantidad de aspectos involucrados (naturales, sociales,

económicos, hidrológicos), pero siempre fuera de las polémicas que pueden surgir sobre la bondad o perjuicios que suponen los encharcamientos artificiales de las Tablas de Daimiel.

El esquema que se ha seguido en la presentación del trabajo realizado Tesis es el siguiente:

En el capítulo 2 se plantea el objetivo principal que se pretende alcanzar, junto con aquéllos secundarios, pero necesarios, para poder conseguir el primero.

En el capítulo 3 se resume la metodología que se utilizará para alcanzar el objetivo principal propuesto.

En el capítulo 4 se describen someramente las características de la zona húmeda de las Tablas de Daimiel, la relación entre aguas superficiales y subterráneas y las modificaciones antrópicas (físicas y de régimen hídrico) que se han llevado a cabo para facilitar el encharcamiento en el Parque Nacional pero que, por otra parte, dificultan los estudios hídricos de detalle.

El capítulo 5 pretende mostrar una visión crítica sobre los balances que se han realizado en las Tablas de Daimiel y de las etapas esenciales en los estudios hidrológicos e hidrogeológicos de la zona.

La caracterización geométrica del espacio físico y los hitos más importantes del período en el que se aplica la metodología propuesta se muestran en el capítulo 6.

Una vez definidos el espacio y el tiempo de aplicación de la metodología, en el capítulo 7 se analizan los datos de los que se ha podido disponer, explicando aquéllos que no es posible utilizar.

En el capítulo 8, núcleo de la Tesis Doctoral, se realiza un cálculo preliminar de la infiltración en dos períodos de vaciado de las Tablas, se comprueban los pros y contras de ese tipo de cálculo, se modifica éste, adaptándolo al menor tiempo de cálculo posible, se explican las herramientas utilizadas para la utilización del modelo planteado, se calibra mediante la técnica clásica de ensayo-error y por estimación automática de parámetros, y, finalmente, se comparan y discuten los resultados obtenidos en diversas simulaciones.

El capítulo 9 presenta el resumen y las conclusiones obtenidas para el trabajo realizado.

Por último, en el capítulo 10 se realiza una revisión crítica de la metodología empleada en su aplicación al cálculo de la infiltración en las zonas encharcadas del vaso de las Tablas de Daimiel. Se hace especial hincapié en el hecho de la variabilidad de la infiltración por cambios espaciales del sustrato y por la variación de la lámina de agua, comentándose las ventajas e inconvenientes de utilizar un modelo con coeficiente de infiltración único o de varios coeficientes.

2.

Objetivos

El objetivo fundamental que se pretende alcanzar en la presente Tesis es obtener una metodología fácil de utilizar y de actualizar que permita acotar, con un grado de aproximación aceptable y de manera debidamente justificada, el orden de magnitud de la infiltración de agua desde el vaso de la zona húmeda del Parque Nacional de las Tablas de Daimiel a la Unidad Hidrogeológica 04.04 (Mancha occidental).

La consecución de ese objetivo final ha requerido considerar un conjunto de objetivos parciales, entre los cuales se pueden destacar los siguientes:

- Evaluar limitaciones de los parámetros y variables que se han venido utilizando en diversos balances en los que se ha considerado el vaso de las Tablas de Daimiel como dador o receptor de recursos hídricos hacia o desde la unidad hidrogeológica 04.04.
- Elaborar un modelo conceptual básico que permita utilizar, en el estado actual de las Tablas de Daimiel, un número reducido de parámetros y variables del sistema para la estimación de la infiltración, intentando evitar o minimizar los problemas encontrados en los balances hídricos realizados con anterioridad.
- Obtener un parámetro que permita estimar la cuantía de la infiltración en el dominio del vaso de las Tablas de Daimiel mediante la construcción de un sistema de cálculo sencillo.
- Obtener elementos de contraste con los que comprobar la validez del cálculo de la infiltración en períodos característicos del régimen hídrico originado por el cese de las descargas subterráneas en el Parque Nacional de las Tablas de Daimiel.

3.

Metodología

Para la obtención del objetivo principal y de los objetivos secundarios mencionados anteriormente, ha sido necesario realizar un conjunto de trabajos mediante una serie de etapas que se resumen a continuación:

- Recopilación de información existente sobre el Parque Nacional de las Tablas de Daimiel y su entorno. Esa recopilación se ha centrado casi exclusivamente a aquella documentación relacionada con la problemática hídrica de las mismas. Ello ha requerido, sin embargo, la consulta de información referente al conjunto del Alto Guadiana, pero especialmente al sistema acuífero que alimentó el humedal de las Tablas y que ahora es el receptor inmediato de parte de la infiltración. Esta documentación, utilizada como base para la elaboración de la Tesis, está convenientemente citada en el apartado de referencias bibliográficas.
- Análisis de la problemática asociada al cálculo de la infiltración desde el vaso de las Tablas obtenida a partir de la documentación consultada. Con ello se han intentado establecer las limitaciones propias del cálculo de la infiltración en función de los parámetros considerados, así como de las escalas espacial y temporal utilizadas en dicho cálculo.
- Selección de un período en el que las condiciones hidrológicas fuesen típicas del funcionamiento actual de las Tablas de Daimiel, sin aportes subterráneos naturales y aportes superficiales basados en bombeos y trasvases de cuencas exteriores. En él se analizarían los parámetros y variables implicados en el balance de agua en el vaso de las Tablas, así como la respuesta del medio ante los procesos hidrológicos implicados.
- Determinación de la geometría del vaso de las Tablas de Daimiel para obtener una relación del volumen de agua almacenada con la superficie encharcada que pueda ser utilizada mediante cálculos sencillos.

- Aplicación de la ley de conservación de masas en períodos en los que algunas variables de difícil control se anulan, para acotar el volumen infiltrado resolviendo la ecuación del balance en la que la infiltración podría obtenerse como residuo. El balance se aplica a períodos comprendidos entre fechas con medidas reales, que oscilan entre una semana y un mes.
- Comprobación de la validez de la metodología de tanteo utilizada mediante el análisis de los resultados obtenidos, y comparación con los valores medidos en campo.
- De acuerdo con los resultados anteriores y la problemática surgida por la aplicación del modelo conceptual utilizado a períodos amplios y de longitud variable, elaboración de un marco metodológico lo más sólido posible para acotar la infiltración desde el punto de vista de la gestión de los recursos hídricos implicados en la conservación del Parque Nacional. Dicha metodología se basaría en la elaboración de balances diarios en las zonas encharcadas del vaso de las Tablas de Daimiel. Desde el punto de vista del objetivo principal del estudio, ese cálculo debe ser sencillo y debe implicar un conjunto de parámetros y variables fácilmente obtenibles y que puedan ser actualizados también de modo sencillo.
- Selección de un parámetro que sirva de valor de referencia para la medida de la capacidad de infiltración en las Tablas de Daimiel. En concreto se ha utilizado el coeficiente de infiltración media diaria, que indicaría las pérdidas de volumen de agua en una superficie unitaria en un día.
- Contraste de los resultados obtenidos mediante calibración por el método de “ensayo-error” y calibración automática de los parámetros utilizados en las herramientas informáticas que se han creado.
- Comprobación de la validez de la metodología aplicada mediante el uso de otros valores utilizados en otros estudios.
- Cuantificación en valores absolutos y relativos de los distintos componentes que se han considerado en el balance de agua en las Tablas de Daimiel.
- Finalmente, se ha realizado una discusión de la validez de la aplicación de la metodología propuesta en función del fin con el que se utilice y de la variación de las premisas y modelo conceptual utilizado en el cálculo de la infiltración.

4.

El sistema físico

4.1 La zona húmeda y el Parque Nacional de las Tablas de Daimiel

Las Tablas de Daimiel, situadas en la zona central de la Península Ibérica (figura 4.1), constituyeron un humedal ribereño ligado a llanuras de inundación de los ríos, con alimentación fluvial y de aguas subterráneas (Rodríguez García, 1998; Rodríguez García y Pérez-González, 1999). En esa zona, con escasa pendiente en general (figura 4.2), se encontraba una serie encadenada de áreas encharcadas, denominadas “tablas”. La persistencia de láminas de agua en esas zonas se debía a tres procesos (Álvarez Cobelas et al., 2001):

1) Aportes superficiales procedentes de los ríos Cigüela (o Gigüela) y Azuer, siendo las principales las del primero. Las descargas de ambos ríos eran estacionales, pero irregulares entre años, siendo además perdedores durante largos periodos (Esnaola y Martínez Alfaro, 1992). La aportación del Cigüela oscilaba entre 0 y 324 hm³/a y la del Azuer entre 0 y 67 hm³/a, pero estuvo prácticamente seco desde 1980 hasta 1996, aunque existe información de que el agua de este último río llegó a las Tablas a través del cauce del Guadiana en 1986 (López Camacho et al., 1996).

2) Aportes de aguas subterráneas, procedentes del río Guadiana y de múltiples “ojillos” que aparecían en la zona húmeda. El río Guadiana nacía en los manantiales procedentes del acuífero de la Mancha occidental denominados “Ojos del Guadiana”, a unos 20 km al este de los límites del Parque Nacional. Es decir, se alimentaba principalmente de aguas subterráneas. En datos procedentes de medidas de 1915 a 1932, la aportación media del Guadiana aguas arriba de su confluencia con el río Azuer era de 61 hm³/a (Álvarez Cobelas et al., 2001) o 72 hm³/a (García Rodríguez (1996).

3) Retenciones de agua en las presas de 14 molinos

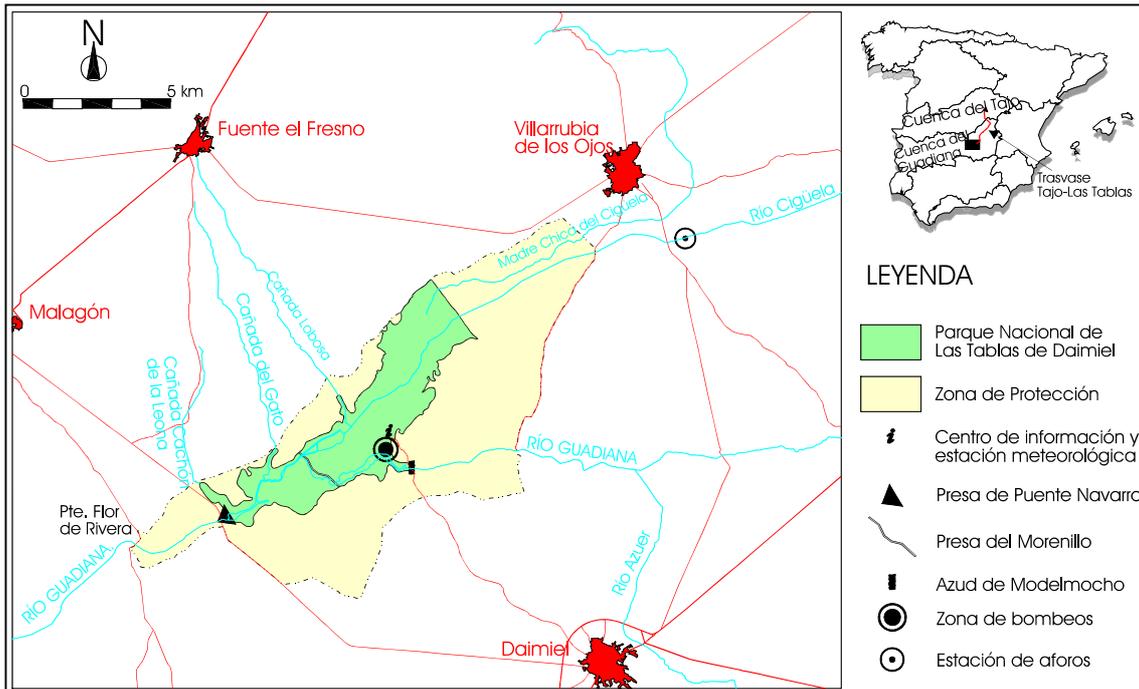


Figura 4.1. Situación general de la zona de estudio y de los principales elementos constructivos y de control existentes

Las Tablas constituían, al igual que el resto de la cuenca alta del Guadiana, un ejemplo claro de interrelación entre aguas superficiales y subterráneas (López Camacho et al., 1996), con conexión hidráulica entre ríos y acuíferos en la mayor parte de los cauces de la cuenca, lo que determinaba la aparición de las zonas húmedas de la región (Cruces y Martínez Cortina, 2000).

Estas circunstancias originaban la existencia de una zona húmeda desde Villarrubia de los Ojos hasta el embalse del Vicario (aguas abajo de la zona de estudio) de unos 150 km² a lo largo de los cauces del Guadiana y del Cigüela (Álvarez Cobelas et al., 2001).

El régimen de encharcamiento era una mezcla de la estacionalidad de las entradas de agua por el Cigüela y por el Guadiana. En invierno y primavera las entradas del Cigüela eran dominantes, mientras que en verano y principios de otoño predominaban las aportaciones subterráneas desde el río Guadiana.

A la salida del actual Parque Nacional, las aportaciones conjuntas oscilaban entre 0 y 1924 hm³, registrándose este valor en 1960 (Álvarez Cobelas, 2001). Con anterioridad a ese año, entre 1944 y 1956, las salidas de las Tablas apenas alcanzaban los 250 hm³/a, mientras que entre 1957 y 1974 esas salidas eran mayores y en algunos años se aproximaban a los 750 hm³/a. El primer intervalo mencionado coincide con el fin de un período seco arrastrado desde casi comienzos del siglo XX (con algún subciclo húmedo a finales de los años de la década de 1930), mientras que el segundo de los intervalos forma parte de un conjunto de años húmedos que llega hasta finales de la década de 1970 (Montesinos, 1990; García Rodríguez, 1996; Álvarez Cobelas y Verdugo, 1996; Cruces y Martínez Cortina, 2000; Martínez Cortina, 2003). Desde 1986, principalmente como consecuencia de los bombeos en el acuífero de la Mancha occidental, las salidas han sido nulas o muy reducidas (3.5 hm³ en 1989 y 5 hm³ en 1990, según Sánchez Soler y Carrasco, 1996), salvo en 1997 cuando se han vertido unos 80 hm³, consecuencia de

lluvias excepcionales, según información de la Confederación Hidrográfica del Guadiana, también recogida en Cruces y Martínez Cortina (2000).

El factor clave para la anulación de las aportaciones subterráneas ha sido, sin duda, la extracción de recursos hídricos del acuífero para regadío, especialmente a partir de 1974, dada la facilidad de obtener caudales elevados (50-100 l/s) sin necesidad de cuidar especialmente las técnicas de perforación de los pozos, comenzó una explotación intensiva del acuífero con vistas al desarrollo agrícola de la región.

Ello trajo consigo descensos de niveles del límite superior de la zona saturada de 30-35 m en las zonas de mayor explotación, con la consiguiente inversión del flujo, que teniendo originalmente un sentido preferente desde el este hacia el oeste, con salida en el Guadiana en el entorno de las Tablas de Daimiel, ha pasado a ser radial convergente hacia los conos de bombeo situados en el interior de la unidad hidrogeológica 04.04, especialmente al norte de la población de Manzanares (SGDGOH, 1988a; López-Camacho y García Jiménez, 1989; SGDGOH, 1991).

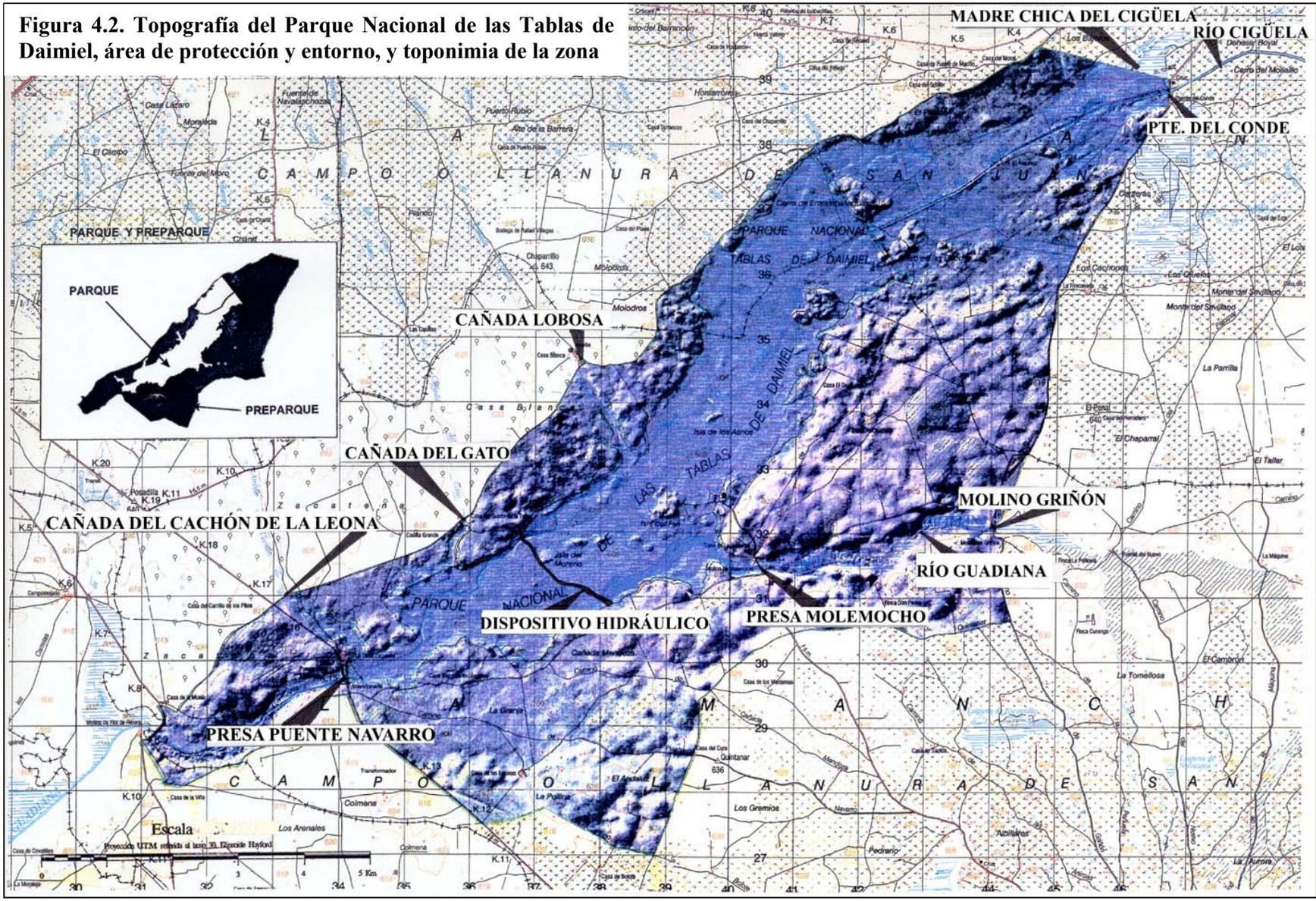
Las estimaciones de los bombeos del acuífero de la Mancha occidental en el período comprendido entre 1974 y 1994 oscilan entre los 152 hm³ en 1974 a un máximo de 600 hm³ en 1987 (López Camacho y García Jiménez, 1989 y 1991) o 568 hm³ en 1988 (Sánchez Soler y Carrasco, 1996), aunque con posterioridad a ese año las extracciones han disminuido considerablemente. Así, en Martínez Cortina (2003), aparecen poco más de 100 hm³ en 1997 o de 300 hm³ en 2000; sin embargo, como en otros aspectos relacionados con la Unidad Hidrogeológica 04.04, los valores son contradictorios, y Varela et al. (2003) citan unas extracciones de 203 hm³ para 1997.

En las proximidades de las Tablas de Daimiel, se ha ido produciendo un descenso progresivo del nivel freático, que ha desconectado los cauces fluviales y la zona húmeda de la zona saturada; este hecho se muestra gráficamente en Esnaola y Martínez Alfaro (1992), García Rodríguez y Llamas (1992) y García Rodríguez (1996). En la figura 4.3 se muestra ese descenso entre 1974 y 1991.

Ello ha afectado al estado de encharcamiento de las Tablas debido a la progresiva disminución de las aportaciones subterráneas. Así, a partir de 1980, dentro de la evolución cíclica del nivel freático, éste empezó a quedar bajo la cota del terreno durante varios meses (Berzal et al., 1987), y en eso los Ojos del Guadiana estaban casi secos (García Rodríguez, 1996), secándose definitivamente en 1983 (Cruces y Martínez Cortina, 2001), mientras que las Tablas de Daimiel lo hicieron en 1987 (García Jiménez et al., 1992).

Con anterioridad a la pérdida de alimentación hídrica, las obras realizadas para drenar las lagunas en las Tablas comenzaron el proceso de degradación de la zona húmeda. Sin embargo, ese período coincidió con el nacimiento de una conciencia conservacionista que originó la declaración de la Reserva Nacional de Caza de las Tablas de Daimiel en 1966, con una extensión de 2750 ha en la amplia zona deprimida de la confluencia de los ríos Cigüela y Guadiana. Posteriormente se creó el Parque Nacional de las Tablas de Daimiel en 1973, con una superficie de 1875 ha, siendo el resto de la Reserva de Caza la zona de protección. El Parque fue reclasificado en 1980 hasta las 1928 ha actuales (figuras 4.1 y 4.2). La zona encharcable, en cambio y según Álvarez Cobelas et al. (1996), tendría una extensión de 1675 ha.

Figura 4.2. Topografía del Parque Nacional de las Tablas de Daimiel, área de protección y entorno, y toponimia de la zona



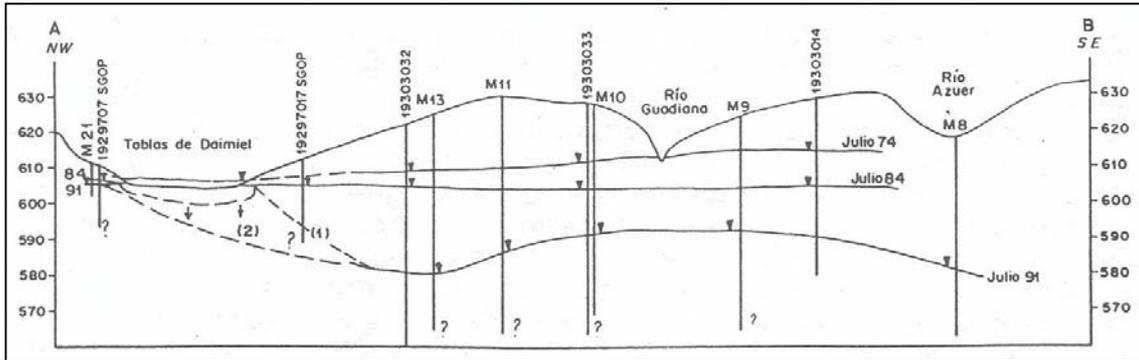


Figura 4.3. Descenso del nivel freático en el entorno de las Tablas de Daimiel entre 1974 y 1991 [Tomado de García Rodríguez y Llamas, 1992]

En este sector, donde se formaban las zonas inundadas más extensas y donde se han realizado modificaciones para que, a pesar de la escasez de entradas naturales, se puedan mantener zonas encharcadas para favorecer la vida animal y vegetal. Es en esta área, donde la estimación de la infiltración adquiere especial importancia ya que de ella depende el tiempo en el que se mantiene el encharcamiento del terreno, donde se ha realizado el presente estudio.

4.2. Modificaciones antrópicas del estado hídrico y geometría del vaso de las Tablas de Daimiel

La zona de confluencia de los ríos Guadiana y Cigüela, donde se sitúan las Tablas de Daimiel, ha sufrido en el siglo XX una serie de actuaciones por parte del hombre, que han modificado profundamente su régimen hídrico, como se ha dicho, y también las características físicas de las zonas en las que se producían los encharcamientos característicos en forma de “tabla”.

A continuación se mencionan algunas de esas actuaciones, destacando especialmente aquéllas que han tenido influencia en la modificación de la geometría del sector o en las entradas y salidas de agua de éste.

Canalizaciones

Por ley de 17 de julio de 1956 sobre “Saneamiento y colonización de los terrenos pantanosos que se extienden inmediatos a las márgenes de los ríos Guadiana, Gigüela, Záncara, y afluentes de estos dos últimos en las provincias de Ciudad Real, Toledo y Cuenca”, se comenzaron en 1967 los trabajos necesarios para la desecación de las Tablas de Daimiel, que fueron paralizados en 1971, cuando habían afectado a unos 130 km² (Álvarez Cobelas et al., 2001).

Para ello se abrieron numerosos canales de drenaje y se rectificaron y reprofundizaron tramos de los cauces fluviales del Guadiana y Cigüela, con el fin de desecar y poner en cultivo gran parte de las zonas palustres de la Mancha. Igualmente una de las justificaciones para realizarlos fue luchar contra el paludismo de la zona.

Explotación intensiva del acuífero

Si bien las zanjas de drenaje fueron un elemento de pérdida de capacidad de almacenamiento de agua en las Tablas, la explotación intensiva de las aguas subterráneas eliminó la fuente más regular de ese encharcamiento, con lo que las consecuencias han sido peores ya que, además, el agua que pudiera llegar a las Tablas tenderá a infiltrarse en los cauces fluviales que alimentan de agua superficial al Parque Nacional, también desconectados del acuífero, y existirá una pérdida de aportaciones por infiltración. En el apartado 4.1 se ha descrito someramente ese proceso de inversión del flujo del agua subterránea.

Presa de Puente Navarro

Su construcción tenía como objeto restaurar la zona suroeste del Parque Nacional, desecada a finales de los años 60 e incluida en la ampliación de límites de 1980, así como retener las aguas superficiales que se evacuaban por los canales de drenaje. Su construcción finalizó en 1985. Está realizada en hormigón (foto 4.1) y, al parecer, carece de desagües de fondo (Sánchez Soler y Carrasco, 1996), con lo que sólo se puede evacuar agua es mediante la apertura de alguna compuerta.



Foto 4.1. Presa de Puente Navarro en la parte suroccidental del Parque Nacional de las Tablas de Daimiel

Eliminación de los canales de drenaje

Se acometió en 1986 con el fin de restituir a sus cauces el flujo superficial, favoreciendo el encharcamiento de las tablas centrales.

Actuaciones del Plan de Regeneración Hídrica del Parque Nacional de las Tablas de Damiel

El Consejo de Ministros, en reunión de 10 de octubre de 1984, aprueba un acuerdo por el que se encarga a los Ministerios de Obras Públicas y Urbanismo, y de Agricultura, Pesca y Alimentación, la elaboración de un Estudio de Viabilidad de un Plan de Regeneración Hídrica del Parque Nacional de las Tablas de Damiel, que finaliza en 1986 (MOPU y MAPA, 1986; Berzal et al., 1987).

Los objetivos principales fueron conocer las leyes de demanda de agua más apropiados para obtener niveles hídricos adecuados en el Parque Nacional, que se estimaron mediante balances mensuales con el fin de calcular las necesidades hídricas, y proponiendo soluciones para satisfacer esa demanda.

El Plan estudió 30 alternativas para mantener niveles inundados en las Tablas, diferenciándola en aquéllas posibles a corto, medio y largo plazos, aunque como medidas complementarias se contemplaban la reducción de extracciones de la Mancha occidental y la supresión de derivaciones en la red fluvial del Cigüela.

Del conjunto de actuaciones previstas se han realizado muy pocas, destacando la construcción de una batería de sondeos en el Parque Nacional para cubrir las pérdidas por infiltración, la derivación de volúmenes de agua desde el acueducto Tajo-Segura y la construcción de un dispositivo hidráulico interior.

Batería de sondeos

El planteamiento inicial consistía en realizar 11 sondeos en las proximidades de los ríos Cigüela y Guadiana para conseguir, además de una lámina de agua para las emergencias del sistema, una mezcla de calidad de aguas similar a la original (Sánchez Soler y Carrasco, 1996).

Sin embargo, las expectativas no se cumplieron en cuanto a los caudales esperados, por lo que se debieron perforar sondeos en lugares distintos a los previstos, abandonarse, etc. Así, ya en García Rodríguez (1996) se menciona la existencia de unos 20 sondeos perforados, la mayor parte abandonados, y también que la información recopilada podía variar por la constante modificación que sufre el sistema de sondeos y la denominación de algunos.

En la figura 4.4 se muestra la situación de los 7 sondeos muestreados para análisis químico por Arauzo et al. (1996).

Finalmente, en la tabla 4.1 aparecen los volúmenes totales bombeados desde los sondeos de emergencia entre 1989 y 1997. Para los datos de 1996 y 1997 se han utilizado los recopilados en el presente, correspondientes únicamente se ha dispuesto de datos de 4 sondeos.

Derivación de volúmenes de agua desde el acueducto Tajo-Segura

Fue una de las medidas recomendadas por el Plan de Regeneración Hídrica de las Tablas, especialmente para resolver el problema hídrico del Parque Nacional a corto plazo, aunque finalmente se ha convertido en una actuación casi definitiva. Ha sido, de todos modos, también la más polémica.

Tabla 4.1. Volúmenes bombeados por los pozos de emergencia para mantenimiento de láminas de agua en el vaso de las Tablas de Daimiel

Año	Volumen bombeado (m ³)
1989	959638
1990	700000
1991	1825000
1992	5825000
1993	9070090
1994	6463000
1995	6463000
1996	2306000
1997	0

A partir de datos de Sánchez Soler y Carrasco (1996) y del Parque Nacional

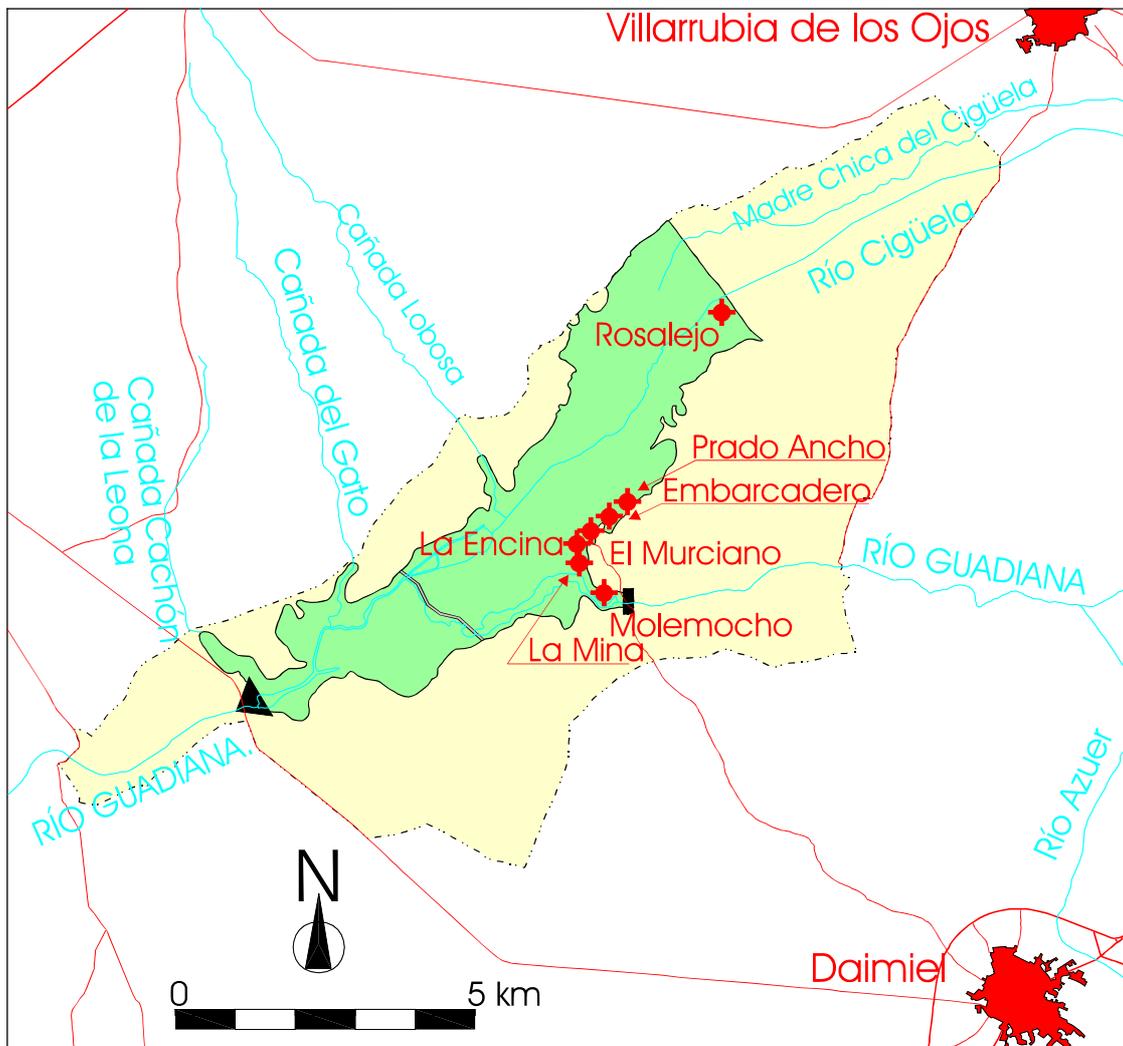


Figura 4.4. Situación de algunos de los sondeos realizados para el mantenimiento artificial de una lámina de agua en el vaso de las Tablas de Daimiel

Comenzó con derivaciones con carácter experimental en 1988 y el trasvase ha sido prorrogado posteriormente. Entre ese año y el año 2002 se han producido trasvases durante 9 años, habiendo oscilado el volumen total entre los 6.5 hm³/a y los 30 hm³/a. Estas aportaciones han sido generalmente inferiores a las necesidades totales calculadas en el estudio del Plan de Regeneración Hídrica (MOPU y MAPA, 1986), que eran del orden de 30 hm³/a, aunque para trasvases se estimaron unas necesidades de 15 hm³/a.

Dispositivo Hidráulico interior: Presa Central o del Morenillo

Para conseguir los niveles de inundación requeridos en los cálculos del Plan de Regeneración Hídrica era necesario la construcción de un dispositivo de control mediante la construcción de un dique de tierra paralelo a la margen derecha del Guadiana.

El dique construido tiene una longitud de casi 2 km, siendo paralelo al Guadiana (figura 4.1). Tiene dos aliviaderos situados en los cauces de los ríos Guadiana y Cigüela y tres aliviaderos de fondo, situados entre la margen izquierda de las Tablas y la isla del Morenillo.

La presa divide el Parque Nacional en dos áreas (Sánchez Soler y Carrasco, 1996): “Las Tablas”, situadas aguas arriba del Dispositivo Hidráulico, y “Las Cañas”, aguas abajo de éste hasta la presa de Puente Navarro (foto 4.2). Esta última zona parece ser más impermeable, por lo que se favorece su inundación abriendo los desagües de fondo del Dispositivo. Sin embargo, García Rodríguez (1996) opina que es precisamente la zona de “Las Cañas”, o “zona de restauración” como él la denomina, la más permeable.



Foto 4.2. Sector de “Las Cañas” visto desde la presa de Puente Navarro

Azud o presa de Molemocho

Se trata de un pequeño dique de tierra (foto 4.3) situado junto al puente de Molemocho, en el límite del Parque Nacional (figura 4.1), para evitar que el agua que inunde las Tablas fluyan fuera de éste por el antiguo cauce del Guadiana, aguas arriba, hacia el puente del molino de Griñón. No se ha podido conocer la fecha de construcción del azud, pero ha sido derruido en alguna ocasión para favorecer la recarga del acuífero de la Mancha occidental en el cauce del Guadiana en las épocas de avenidas.



Foto 4.3. Azud de Molemocho visto desde el puente del mismo nombre hacia el Parque Nacional de las Tablas de Daimiel

5.

Antecedentes y revisión crítica

En el corazón de la España seca las Tablas de Daimiel son, probablemente, el espacio natural que más atención ha demandado en las últimas décadas desde puntos de vista tan variopintos como el político, el económico, el social, el periodístico, el turístico, el ecológico y el puramente científico.

Han corrido ríos de tinta a escala local, provincial, regional, nacional e internacional. Sólo los documentos escritos harían posible la elaboración de una Tesis Doctoral propia de un documentalista o un historiador inquietos por la naturaleza.

No es ésta la finalidad de este apartado de revisión crítica de antecedentes que se limitará a los trabajos más en concordancia con el objetivo de esta Tesis Doctoral, prestando especial atención al análisis de los balances hídricos incluidos en los trabajos que tratan este tema, sobre todo en lo referente a la metodología utilizada en su elaboración y poniendo de manifiesto las principales carencias y problemas encontrados por los autores, al objeto de paliarlos, en la medida de lo posible, en la metodología objeto de esta Tesis.

Siguiendo un orden cronológico, citaremos en primer lugar los trabajos realizados por el Servicio Geológico, de Obras Públicas primero y de la Dirección General de Obras Hidráulicas después, que son recopilados en SGDGOH (1989b).

Probablemente el trabajo más destacable en las Tablas de Daimiel, desde el punto de vista de sus recursos hídricos y su comportamiento hidrogeológico, es la Tesis Doctoral de García Rodríguez, *Hidrogeología de las Tablas de Daimiel y de los Ojos del Guadiana. Bases hidrogeológicas para una caracterización funcional de humedales ribereños*, de 1996.

La mencionada Tesis incluye una muy completa revisión de la información hidrológica e hidrogeológica en el contexto de las Tablas de Daimiel, destacando la correspondiente a múltiples informes inéditos, especialmente del Servicio Geológico de Obras Públicas

o de la Dirección General de Obras Hidráulicas (SGOP o SGDGOH). Se realiza así mismo una caracterización hidrogeológica muy detallada de las Tablas mediante análisis de columnas litológicas de sondeos, realización de cortes hidrogeológicos, análisis de la evolución piezométrica de la zona y caracterización hidroquímica. Es pues, una referencia obligada. Es importante señalar que, debido a su fecha de realización, no recoge la respuesta de las Tablas al período húmedo extraordinario que comenzó en otoño de 1995 y que tuvo su momento culminante con la avenida del invierno de 1996-1997.

De la misma época que la Tesis mencionada anteriormente, merece destacarse, por su intento de síntesis del conocimiento de las Tablas de Daimiel considerando aspectos relativos al medio físico, medio biótico, históricos y humanos, el conjunto de trabajos editados por Álvarez Cobelas y Cirujano en 1996 (*Las Tablas de Daimiel. Ecología acuática y sociedad*). En él se pueden encontrar numerosos datos relativos a la historia y modificaciones antrópicas en el entorno de las Tablas, y también al medio hídrico, esencialmente desde el punto de vista ecológico, aunque siempre con la limitación de los trabajos de síntesis. Al igual que el trabajo de García Rodríguez (1996), no recoge la recuperación temporal del Parque Nacional ocurrido, en parte, en la época de realización de ambos trabajos.

También en la década de 1990 se plantearon otro tipo de estudios basados en grandes proyectos internacionales, como el proyecto GRAPES (*Groundwater and River Resources Action Programme on a European Scale*). El equipo investigador español tuvo como zona de estudio la cuenca alta del Guadiana, tratándola desde el punto de vista hidrológico y socioeconómico. Recoge sólo parcialmente el cambio en la hidrogeología en cuanto a piezometría y extracciones desde 1995 (Broomley et al., 2000) y analiza marginalmente las Tablas de Daimiel.

Recogiendo parcialmente algunos estudios y resultados del proyecto GRAPES, existe un conjunto de trabajos editados por la Fundación Botín a partir del año 2000, algunos de ellos con especial vocación hacia las zonas húmedas de la cuenca alta del Guadiana, incluyendo lógicamente a las Tablas de Daimiel. Las publicaciones concretas de las que se ha obtenido información para la presente Tesis aparecen en el correspondiente capítulo de referencias.

Mención y tratamiento aparte merece otro grupo de trabajos en los que específicamente se realizan balances hídricos o se analizan sus resultados. El mayor problema de los mismos es que en su mayor parte son informes inéditos, con lo cual su accesibilidad es restringida.

En el contexto hídrico de las Tablas de Daimiel se han realizado varios balances, aunque con un recinto físico variable. Por una parte hay balances referentes a todo el acuífero de la Mancha occidental, algunos de ellos obtenidos a partir de la realización de modelos, y, por otra, se han realizados balances centrados exclusivamente en el entorno de las Tablas de Daimiel.

Los realizados a nivel del acuífero de la Mancha occidental suelen tener como objetivo la comparación del sistema antes y después de que la afección de los bombeos anulase la descarga subterránea a las Tablas. Estos balances son difícilmente comparables entre sí puesto que se suelen referir a períodos de tiempo y a lugares diferentes, como es el caso de SGOP (1983), MOPU y MAPA (1986), Ruiz Celaa y Fabregat (1987).

Seguramente los balances de SGOP (1983) son los primeros que se refieren al Parque Nacional exclusivamente. Se realiza uno en régimen “natural” para 1973-74 y se utiliza

como referencia para otro realizado con las Tablas y el acuífero desconectados como consecuencia de los bombeos (régimen influenciado). Este último se realiza para un año, aunque dividido en un período seco y un período húmedo, presuponiendo superficie de encharcamiento fija para cada época.

Considera que los aportes desde el río Azuer y los del Cigüela son los medidos en la estación de aforos de Buenavista, situada a unos 30 km aguas arriba del Parque Nacional, por lo que estarán sobreestimadas, ya que en ese recorrido se producirán pérdidas de caudal en el río por infiltración hacia el acuífero que no están descontadas en el balance. La escorrentía desde los afluentes septentrionales no se miden y se estiman en un 5% de la precipitación anual, resultando $12 \text{ hm}^3/\text{a}$, cifra que ya se utilizó para el balance de 1973-74, por lo cual no se tiene en cuenta la variabilidad de la precipitación.

Finalmente la infiltración se estima para cuadrar los balances, para después utilizarla en el cálculo de las salidas superficiales del sistema.

Quizá uno de los balances más completos realizados en las Tablas de Daimiel sea el correspondiente al *Estudio de viabilidad de un plan de regeneración hídrica en el Parque Nacional de las Tablas de Daimiel* (MOPU y MAPA, 1986; Berzal et al., 1987).

En él se obtienen curvas de embalse a partir de una base topográfica. La realización de los balances tenía como fin calcular el agua necesaria para mantener una lámina de agua en unas determinadas superficies, para lo que se calcularon los niveles en unas escalas fijas.

Debido a que lo que se pretendía era calcular las necesidades hídricas para conseguir las superficies adecuadas, se realizan balances hídricos mensuales realmente bajo 3 supuestos hídricos con aportes subterráneos nulos, pero considerando un caudal fijo en las salidas del Parque Nacional, y aportaciones correspondientes a años seco, medio y húmedo y teniendo en cuenta unos niveles de agua mínimo y óptimo, con lo cual se calculan 18 posibilidades de aportaciones a las Tablas. La evaporación se calcula sólo para los niveles de agua óptimo y mínimo. Los aportes necesarios para un año seco manteniendo el nivel mínimo de agua y las salidas mínimas por Puente Navarro se estiman en unos $31 \text{ hm}^3/\text{a}$, correspondiendo unos $15 \text{ hm}^3/\text{a}$ a aportes exteriores a la cuenca vertiente a las Tablas.

La infiltración en estos balances se considera de 6 mm/d en la superficie encharcada en cada mes, que García Rodríguez (1996) considera muy reducido vistos la gran variabilidad y los valores encontrados en algunos estudios previos. Las aportaciones superficiales seguramente se encuentren sobrevaloradas, al considerarse entradas por el Azuer y por el Cigüela con datos en Buenavista, que, como se ha comentado, está relativamente lejos del Parque y entre ella y éste se produce infiltración desde el cauce.

Entre junio de 1988 y marzo de 1993, el Servicio Geológico realiza cinco informes relacionados con la derivación de caudales de agua desde la cuenca alta del Tajo hasta el Parque Nacional de las Tablas de Daimiel a través del acueducto Tajo-Segura (Ley 13/1987). En estos informes (SGDGOH, 1988 a, 1988b, 1989 a, 1990 y 1993) se realiza el seguimiento de los caudales derivados y la evolución de las superficies encharcadas en el Parque, a lo largo del tiempo. García Rodríguez (1996), tras un análisis pormenorizado, pone en duda la validez de los resultados de estos informes ante la falta de justificación de algunas hipótesis en ellos asumidas. Considera este mismo autor como más representativo para el cálculo de la infiltración en la laguna el informe SGDGOH (1989 a), que abarca el periodo entre noviembre de 1988 y junio de

1989, debido a que es el periodo en el que se consigue durante mayor tiempo una mayor superficie inundada, corresponde a un año medio en lo que a precipitaciones se refiere y, al no haberse bombeado caudales para el mantenimiento del Parque, no existe incertidumbre acerca de este tipo de aportaciones. El balance para este periodo de tiempo aparece en la tabla 5.1.

Considera García Rodríguez (1996), que las superficies encharcadas utilizadas en estos informes están sobreestimadas, y concluye que la infiltración puede ser bastante mayor de la que en estos informes se calculan. Uno de los motivos es que seguramente se utiliza una curva de superficie encharcada que no tiene en cuenta el Dispositivo Hidráulico interior.

Otro grupo de balances tiene su origen en trabajos de Llamas y García Rodríguez (Llamas, 1991; García Rodríguez y Llamas, 1992 y 1993). Son balances generales, anuales, y se centran fundamentalmente en considerar una infiltración mucho mayor que la estimada en balances previos. Este criterio es defendido por García Rodríguez (1996) basándose en criterios geológicos y de homogeneidad de los datos.

Algunos de los balances citados anteriormente se muestran en la tabla 5.1. Aparecen dos de los realizados por el Servicio Geológico y algunos de los realizados posteriormente en los que se incrementa el concepto de infiltración.

Tabla 5.1. Comparación de resultados globales de balances en las Tablas de Daimiel en el período en el que la laguna y el acuífero se encuentran desconectados

Concepto	SGOP (1983)	SGOP (1989)	Llamas (1989)	García y Llamas (1993)
Precip.	6	4.5	7	6-8
Ríos	112	28.7	30-60	20-70
Afl. Norte	12	5.5	12	8-12
Entradas	130	38.7	50-80	40-90
Evaporación	10	7.7	9	8-14
Infiltración	32	20.6	40-70	25-70
Salidas super.	88	3.2	0	0-10
Salidas	130	31.5	50-80	40-90

Los datos en hm³

Las diferentes cifras obtenidas en los balances realizados hasta el momento corresponden a diferentes enfoques del balance considerando los mismos, o muy parecidos datos de partida “fiables” (generalmente lluvias y aportaciones superficiales, incluso evaporación), y jugando, con mayor o menor criterio hidrogeológico, con la incertidumbre existente sobre la infiltración, lo que repercute en las salidas superficiales y en el balance final. Otro aspecto sin resolver, que repercute directamente sobre el resultado de los balances, es la geometría correcta del lugar en el que se realizan. Todo esto lleva consigo que las cifras obtenidas sean difícilmente comparables entre sí y que por lo tanto pueda mejorarse en la precisión de los balances puesto que en ningún caso se tiene como objetivo prioritario la resolución de las incertidumbres existentes.

Por esto se plantea esta Tesis enfocada al avance del conocimiento de la geometría del vaso de las Tablas de Daimiel en relación con la superficie encharcada y el volumen de agua almacenado en cada situación de encharcamiento, y la calibración de la infiltración a partir de la evolución de las superficies encharcadas reales (medidas en campo), y las

obtenidas, para las mismas fechas, a partir de un balance diario obtenido mediante un simulador digital.

Espacio y tiempo de aplicación de la metodología propuesta

6.1 Espacio físico de trabajo

El espacio físico sobre el que se centra el estudio (figuras 4.1 y 4.2), es el constituido por el vaso de las Tablas de Daimiel, depresión que se origina en el entorno de la confluencia de los ríos Guadiana y Cigüela (o Gigüela). Además de estos dos ríos confluyen a esta depresión otros cauces de menor importancia como son las cañadas del Cachón de la Leona, del Gato, Lobosa, y Madre Chica o Vieja del Cigüela.

Ha sido posible cuantificar algunos aspectos geométricos del vaso de las Tablas al haberse podido disponer de un Modelo Digital del Terreno (MDT), realizado por Tragsatec, S.A. para la Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas (Tragsatec, 1996). Dicho MDT se realizó a partir de una cartografía topográfica del vaso de las Tablas a escala 1:2000, de 1993, con equidistancia de curvas de nivel de 0.5 m. El tamaño de pixel utilizado fue de $2 \times 2 \text{ m}^2$.

Al objeto de optimizar el encharcamiento del Parque se han construido tres presas (capítulo 4), Puente Navarro, El Morenillo o Dispositivo Hidráulico, y Molemocho. El objeto de ésta última es evitar el escape del agua embalsada en el Parque fluyendo aguas arriba por el antiguo cauce del Guadiana.

La presa de Puente Navarro es el cierre final del vaso, siendo su cota de coronación 606 m s.n.m. (Tragsatec, 1996).

El Dispositivo Hidráulico, cuya cota de coronación es la de 607 m s.n.m. (Tragsatec, 1996) divide al vaso de las tablas en dos subembalses conectados en serie:

Entre Puente Navarro y el Dispositivo Hidráulico (denominado sector de “Las Cañas”), la cota de 606 m s.n.m. condiciona el máximo volumen de agua almacenable. A partir del MDT y utilizando el programa ERDAS IMAGINE (ERDAS Inc., 1995) se ha

podido determinar que este volumen de agua es de 5.086 hm^3 , y la superficie encharcada correspondiente 441.13 ha (figura 6.1).

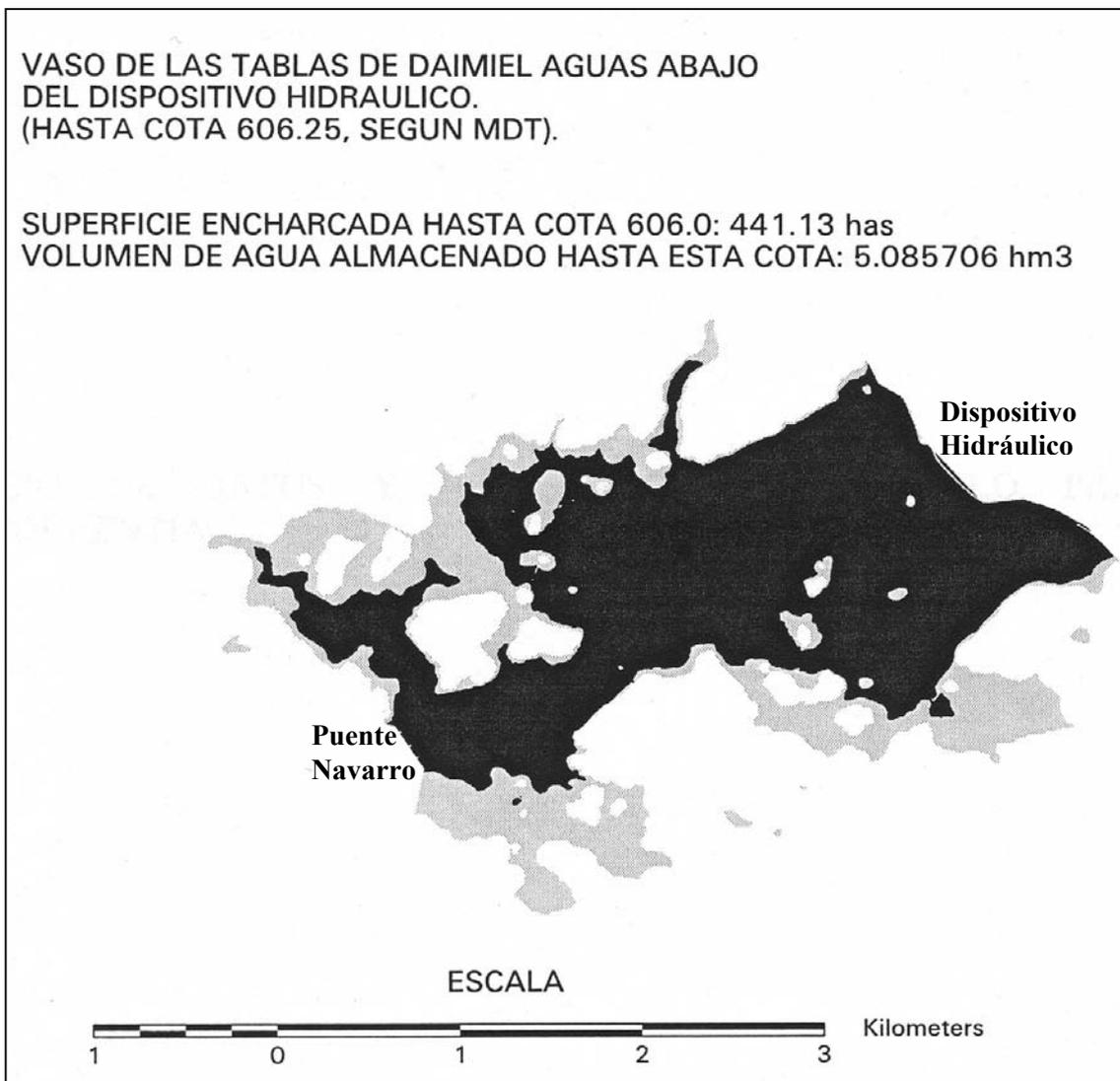


Figura 6.1. Superficie y volumen entre Puente Navarro y el Dispositivo Hidráulico correspondientes a la cota de coronación de la presa de Puente Navarro

Aguas arriba del Dispositivo Hidráulico la cota que marca la capacidad de esta zona es la de 607 m , siendo el máximo volumen almacenable de 17.39 hm^3 , y la superficie encharcada correspondiente de 1641.12 ha (figura 6.2).

Así pues, considerando el vaso de las Tablas de Daimiel al completo el máximo volumen almacenable es de 22.5 hm^3 y la máxima superficie encharcable de 2082.25 ha . Esta superficie es mayor que la dada en otros trabajos (capítulo 4), ya que dicha superficie queda definida por las curvas de nivel mencionadas, y es diferente de la superficie del Parque Nacional incluida en los límites definidos políticamente.

Los balances que se realizan en este trabajo se refieren siempre a zonas encharcadas limitadas por curvas de nivel, aunque ello suponga que no siempre esté esta superficie totalmente incluida dentro de los límites políticos del Parque, que es la zona donde se han medido, en la mayor parte de las ocasiones, las superficies encharcadas. Debido a

ello existirá una discrepancia entre la superficie encharcada medida en campo y la correspondiente obtenida a partir del MDT.

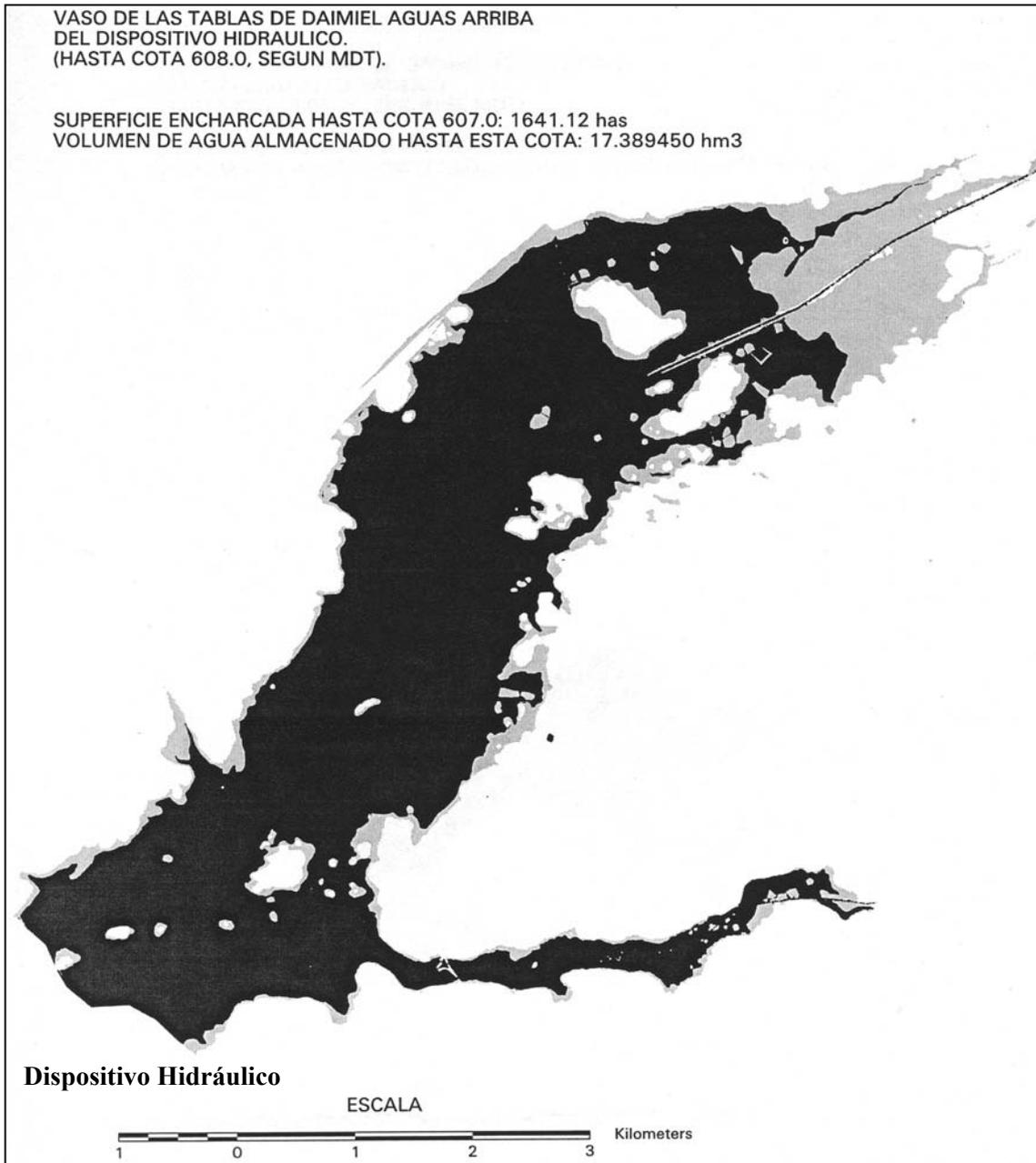


Figura 6.2. Superficie y volumen aguas arriba del Dispositivo Hidráulico correspondientes a la cota de coronación de éste

También es necesario reseñar que aunque existen datos que se refieren a cuando y durante cuanto tiempo se abren o cierran las compuertas del Dispositivo Hidráulico, no hay datos de volúmenes trasvasados a través de este Dispositivo. Debido a esto, a la hora de realizar balances hay que recurrir a cuantificar por separado los volúmenes almacenados, en una fecha concreta, en los dos subembalses en los que queda dividido el vaso de las Tablas por el Dispositivo Hidráulico. Esta cuantificación, como se verá más adelante, ha sido realizada a partir del MDT utilizando el programa ERDAS IMAGINE (ERDAS Inc., 1995).

6.2 Geometría del vaso

Como se comentó anteriormente al establecer las características geométricas generales de la zona de estudio y los datos que se han podido obtener, se ha dispuesto de un Modelo Digital del Terreno (MDT) bastante preciso del vaso de las Tablas de Daimiel. Aunque se basa en una cartografía de la topografía del vaso de 1993, unos 3 y 4 años anterior al período de estudio, entre esas fechas parecen haberse mantenido básicamente las mismas estructuras que condicionan el almacenamiento del agua puesto que entre ellas no han existido grandes avenidas ni modificaciones antrópicas de importancia. El incendio que se produjo en 1994 tuvo escasas consecuencias, ya que casi únicamente afectó al carrizo y no al substrato (García Rodríguez, 1996).

El MDT se ha utilizado como herramienta de definición de la geometría del vaso en el cálculo de un balance hídrico para la estimación de la infiltración considerando dos aspectos:

- La cubicación del vaso permite calcular el posible almacenamiento de agua y la variación del mismo.
- La estimación de la superficie ocupada por el agua permite calcular algunos componentes del balance dependientes de la superficie (infiltración, evaporación, precipitación directa), de las superficies encharcadas en fechas o intervalos distintos a los medidos, y comprobar la validez de los resultados de los balances comparando los valores de superficie calculados con los de la superficie observada.

Para facilitar el uso de la geometría del vaso de las Tablas, se ha pretendido establecer un modelo geométrico para relacionar operativamente los cambios en la superficie encharcada con la variación del volumen de agua almacenada utilizando los datos, aparentemente objetivos, del MDT. Para ello ha sido necesario ajustar los datos de éste a los datos geométricos reales que se han podido conseguir, para después establecer la relación entre superficie encharcada y volumen almacenado.

6.2.1 Comparación Superficies encharcadas-Superficies de MDT

Como se ha dicho anteriormente (capítulo 4), el vaso de las Tablas está condicionado por varias estructuras artificiales, que pretenden incrementar la retención del agua de la prácticamente inexistente escorrentía natural, y actuar como lo hacían los molinos de la zona (Cobelas et al., 1996; Álvarez Cobelas et al., 2001). La principal obra es la presa de Puente Navarro, situada en el extremo sudoccidental del Parque Nacional, y que hace que éste sea un embalse (Álvarez Cobelas, 1996), aunque la construcción del Dispositivo Hidráulico origina realmente dos subembalses conectados en serie. Esa obra divide el Parque Nacional en dos zonas con comportamiento distinto (Álvarez Cobelas, 1996), denominándose “Las Cañas” a la comprendida entre Puente Navarro y el Dispositivo Hidráulico, y “Las Tablas” aguas arriba de éste (Sánchez Soler y Carrasco, 1996; Carrasco, 2003).

Aunque existen datos que se refieren a cuándo y durante cuánto tiempo se abren o cierran los desagües del Dispositivo Hidráulico (anexo 1), no hay datos de los volúmenes trasvasados a través del mismo. Se sabe, sin embargo, que se tiende a mantener encharcado el sector de Las Cañas, ya que se cree que la infiltración es menor y el tiempo de permanencia del agua, por tanto, es mayor (Sánchez Soler y Carrasco, 1996; Carrasco, 2003).

Así pues, el sistema se puede considerar como dos embalses diferenciados donde las sueltas del superior (Las Tablas) afectan al inferior (Las Cañas). Pero debido al desconocimiento de las sueltas no se puede determinar la interrelación entre ellos.

Por lo tanto, a la hora de cuantificar los volúmenes almacenados y las superficies encharcadas correspondientes en una fecha concreta, debe realizarse por separado para cada uno de los sectores en que se divide el vaso de las Tablas de Daimiel. Por otra parte, cada elemento constructivo retiene agua pero las cotas que puede alcanzar el agua en cada uno son distintas; si el coeficiente de infiltración es distinto en cada uno de los sectores y los desagües de fondo quedan abiertos, se pueden dar varias situaciones en cuanto al flujo de agua entre los mismos (figura 6.3). Esa cuantificación ha sido realizada a partir del MDT utilizando el programa ERDAS IMAGINE (ERDAS Inc., 1995), mediante la suposición de que las superficies encharcadas en cada sector se podrían asimilar a curvas de nivel del MDT, y que el volumen entre esas curvas de nivel correspondería a cambios de volumen de agua.

El primer paso ha consistido en comprobar la validez de utilizar los valores del MDT como sustitución de los valores observados, en lo que se refiere a superficie encharcada, único elemento de contraste disponible. Para ello, mediante ERDAS IMAGINE cada sector (Las Cañas y Las Tablas) se ha representado según curvas de nivel cada 10 cm, calculándose la superficie comprendida en cada una y el volumen del vaso hasta cada una de las cotas (anexo 2). En estas circunstancias, las superficies consideradas no siempre están incluidas dentro de los límites políticos del Parque, que es la zona donde se han medido, en la mayor parte de las ocasiones, las superficies encharcadas observadas en campo. Este es uno de los motivos de que exista una discrepancia entre la superficie encharcada medida en campo y la correspondiente obtenida a partir del MDT.

El procedimiento operativo ha sido una simple semejanza cartográfica entre los planos proporcionados por la Dirección del Parque Nacional (anexo 3) y las curvas de nivel del MDT (anexo 2), siempre comprobando esa semejanza, de modo independiente, aguas arriba y aguas abajo del Dispositivo Hidráulico (figura 6.4). La superficie total encharcada y el volumen total almacenado en el vaso de las Tablas se obtienen sumando los valores para cada uno de las áreas definidas.

Dado que la comparación de superficies se ha realizado mediante las curvas de nivel del MDT, se ha supuesto que la lámina de agua es horizontal en los dos subembalses en los que se divide el vaso de las Tablas de Daimiel. Por ello, dicha comparación se ha realizado seleccionando períodos en los que el sistema se encuentre prácticamente en equilibrio, que corresponderían, en general, a los períodos de vaciado del vaso. Durante esos periodos las entradas de agua al vaso serían mínimas o nulas, y las salidas se reducirían a la infiltración y a la evaporación.

Para la época de estudio seleccionada, se pueden diferenciar claramente dos de esos períodos. El primero abarca desde el 7 de junio de 1996 al 19 de noviembre de 1996 y corresponde al período de vaciado del vaso de las Tablas tras el trasvase realizado desde la cabecera del Tajo. El segundo abarca desde el 9 de junio de 1996, cuando ya han acabado los vertidos de agua por Puente Navarro y la superficie encharcada medida está entre los valores máximos, hasta el 22 de septiembre de 1997, última fecha de la que hay datos de superficies encharcada antes del final del año hidrológico 1996-97

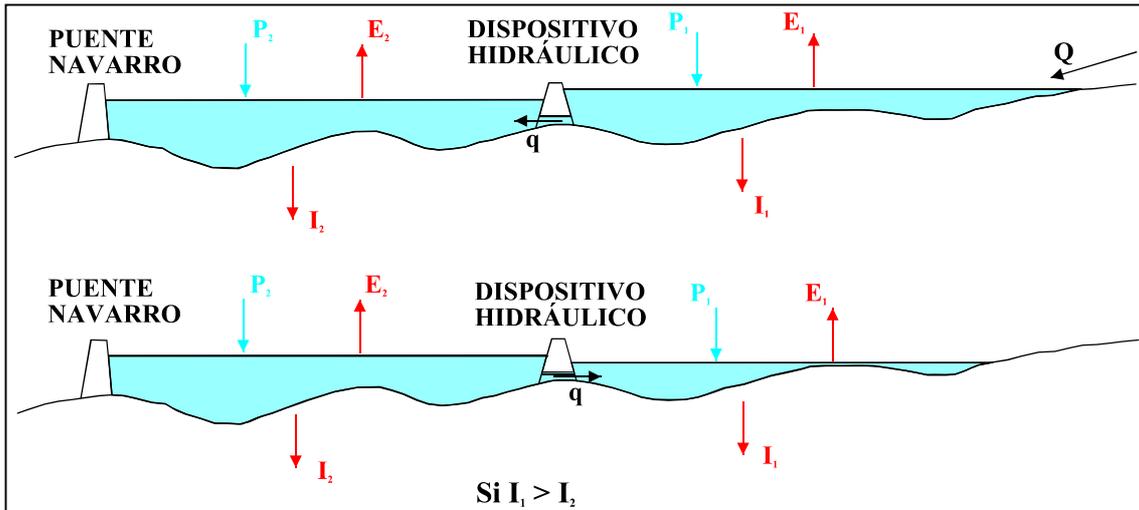


Figura 6.3. Posibles cambios en las cotas del agua almacenada y en el flujo a través del Dispositivo Hidráulico en función de los balances parciales en los dos sectores principales en los que se divide el vaso de las Tablas de Daimiel

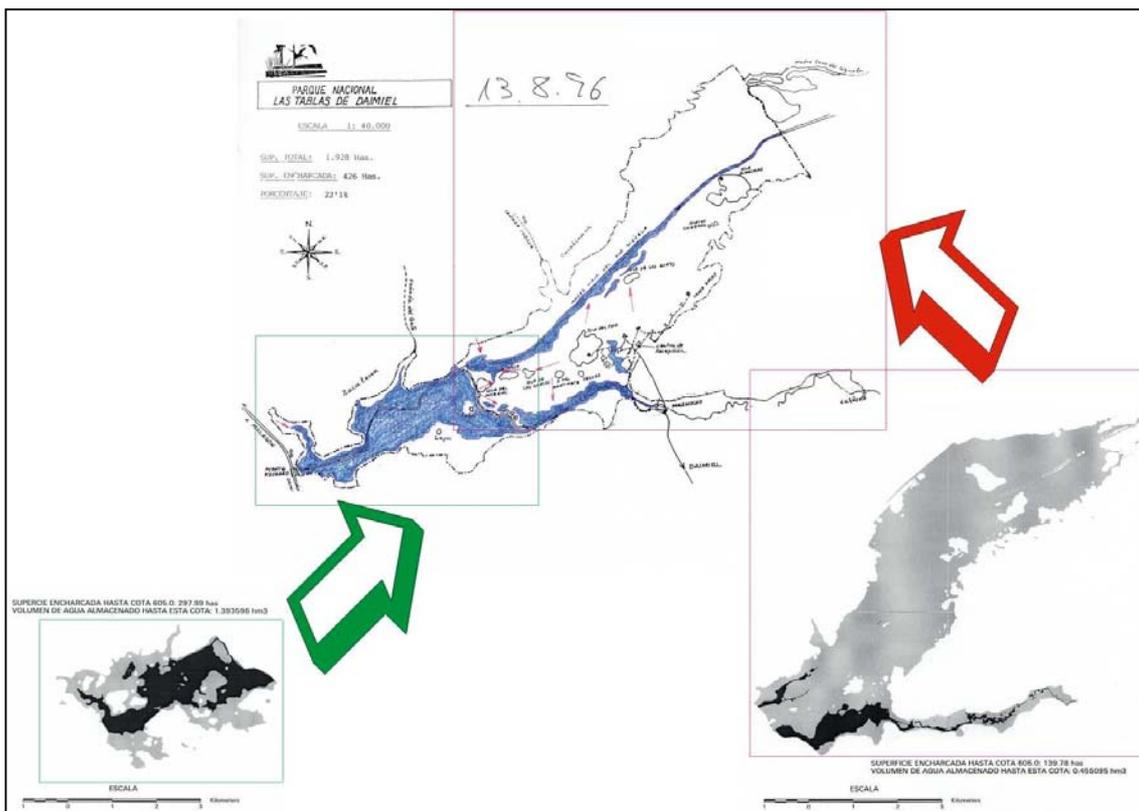


Figura 6.4. Procedimiento de comparación de superficie observada en campo con la correspondiente al Modelo Digital del Terreno

En la tabla 6.1 se muestran las fechas en las que se tienen valores de superficie encharcada en los dos períodos considerados.

Tabla 6.1. Fechas en las que se tienen medidas de superficie encharcada en las etapas de vaciado de las Tablas de Daimiel dentro del período de estudio seleccionado

Período de 07/06/1996 a 19/11/1996			Período de 09/06/1997 a 22/09/1997		
07/06/1996	24/07/1996	17/09/1996	09/06/1997	30/07/1997	02/09/1997
18/06/1996	01/08/1996	02/10/1996	08/07/1997	20/08/1997	22/09/1997
27/06/1996	08/08/1996	23/10/1996			
08/07/1996	13/08/1996	19/11/1996			
17/07/1996	05/09/1996				

Para estas fechas, correspondientes a ambos períodos de vaciado, tras hacer un análisis comparativo entre la superficie encharcada medida y la obtenida con el MDT (tanto en el área delimitada por la cota 606 m s.n.m. desde Puente Navarro hasta el Dispositivo Hidráulico, como en la delimitada aguas arriba de este Dispositivo por la cota 607 m s.n.m.), se ha obtenido, a partir del MDT, tanto la superficie encharcada en el vaso de las Tablas como el volumen de agua embalsado bajo cada una de las curvas de nivel de las que se ha medido la respectiva superficie.

Tanto la superficie total encharcada como el volumen total almacenado en el vaso de las Tablas se calcula sumando los valores obtenidos para cada una de las áreas definidas. Los patrones de medida obtenidos del MDT se dan en el anexo 2.

En las tablas 6.2 y 6.3 se muestran los valores numéricos obtenidos mediante el método mencionado más arriba, resumido en la figura 6.4.

La comparación de valores de superficie encharcada medida y estimada en los dos períodos de tiempo seleccionados se ha representado en la figura 6.5. Además en la figura 6.6 se muestra el alto grado de correlación entre valores medidos y calculados.

6.2.2 Relación Superficies MDT-Volumen almacenado

Una vez comprobada la semejanza y la alta correlación entre los valores de las superficies encharcadas medidas (único elemento de contraste que se ha podido utilizar para comprobar los resultados de cualquier balance en las Tablas) y las obtenidas a partir del MDT (figuras 6.5 y 6.6) se puede establecer una relación entre la superficie inundada y el volumen almacenado en el vaso del Parque Nacional, ambos obtenidos desde el MDT, a modo de una “curva de embalse”.

En la figura 6.7 se han representado los datos de las tablas 6.2 y 6.3, donde se relaciona el volumen almacenado en el vaso de las Tablas con la superficie encharcada, para cada fecha según el MDT, adoptando un ajuste polinómico. En este ajuste se han incluido dos puntos adicionales correspondientes a las situaciones de superficie y volumen mínimos, y superficie y volumen máximos.

Puesto que la superficie encharcada en cada fecha depende del uso que se haga de los aliviaderos del Dispositivo Hidráulico, esta gráfica sólo es utilizable para el periodo de tiempo que se contempla en este estudio que es en el que se ha medido la superficie encharcada en cada uno de los sectores de las Tablas en unas determinadas condiciones

del estado de los desagües y es en el que se han establecido la semejanza entre superficies medidas y encharcadas y la relación entre superficie encharcada y volumen almacenado.

Tabla 6.2. Comparación de superficie encharcada y volumen de agua embalsada en varias fechas del período de 7 de junio de 1996 a 19 de noviembre de 1996

FECHA	SUPERFICIE ENCHARCADA MEDIDA (ha) (*)	SUPERFICIE ENCHARCADA SEGÚN MDT (ha) (**)	VOLUMEN AGUA DE ALMACENADO SEGÚN MDT (hm ³)
07/06/96	1396	1532.15	13.1538
18/06/96	1344	1446.30	11.0612
27/06/96	1216	1404.40	10.0756
08/07/96	1008	1056.85	7.4062
17/07/96	890	960.59	5.9829
24/07/96	832	815.52	5.0930
01/08/96	776	805.94	4.7070
08/08/96	642	635.79	2.9539
13/08/96	426	437.77	1.8487
05/09/96	272	285.08	1.1833
17/09/96	230	235.20	1.0967
02/10/96	175	160.20	0.7064
23/10/96	125	133.00	0.5600
19/11/96	115	112.09	0.4371

(*) Área encharcada exclusivamente dentro del límite del Parque.

(**) Área encharcada delimitada en cada caso por la curva de nivel correspondiente.

Cuando el encharcamiento está por encima de una determinada cota se sobrepasan los límites del Parque Nacional.

Tabla 6.3. Comparación de superficie encharcada y volumen de agua embalsada en varias fechas del período de 9 de junio de 1997 a 22 de septiembre de 1997

FECHA	SUPERFICIE ENCHARCADA MEDIDA (ha) (*)	SUPERFICIE ENCHARCADA SEGÚN MDT (ha)	VOLUMEN AGUA DE ALMACENADO SEGÚN MDT (hm ³)
09/06/97	1717	1752.80	16.7355
08/07/97	1242	1372.47	9.2396
30/07/97	1048	1038.93	6.5880
20/08/97	804	773.84	3.9860
02/09/97	620	610.73	2.6805
22/09/97	430	464.25	2.0030

(*) Incluye zona encharcada dentro del límite del Parque más la zona encharcada en el área de protección.

La relación obtenida en la figura 6.7 puede entonces ser utilizada para la estimación de superficies encharcadas y volúmenes almacenados del período considerado en días distintos a los medidos por el personal del Parque Nacional.

Esa relación puede considerarse válida, con las condiciones impuestas, para utilizarse como una curva única en todo el vaso de las Tablas de Daimiel.

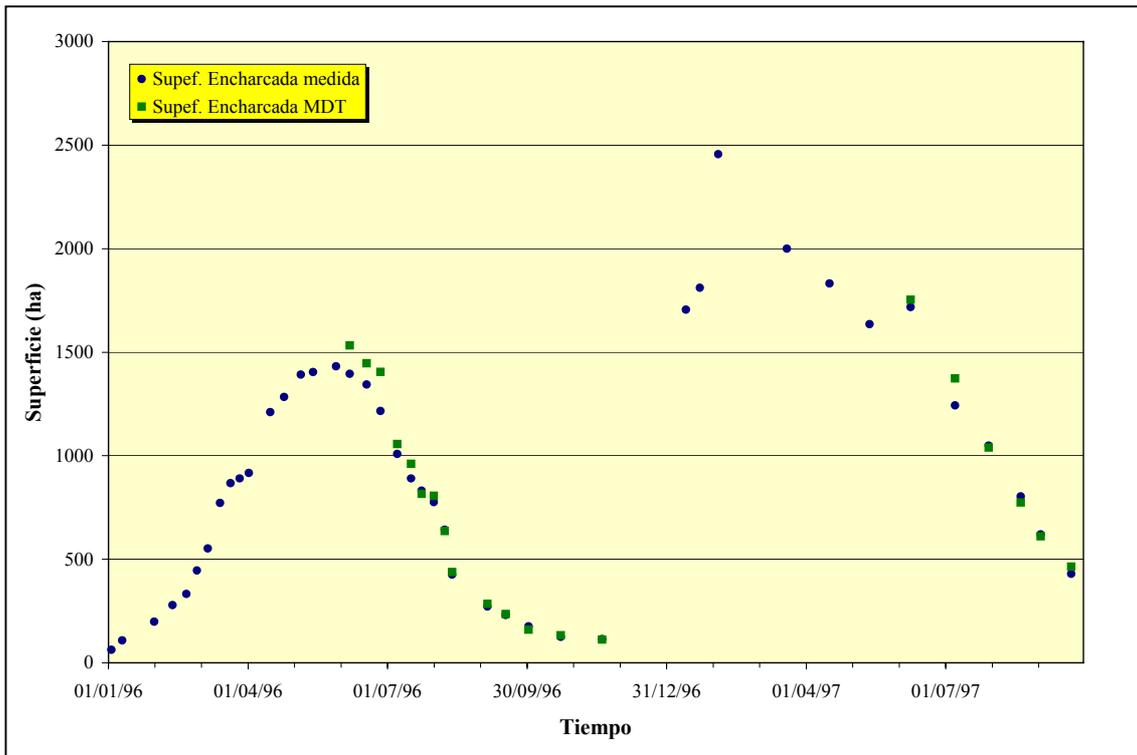


Figura 6.5. Comparación en el tiempo de los valores de superficie encharcada medida y los obtenidos del MDT

6.3 Período de aplicación del método

El intervalo de tiempo considerado para la realización de este trabajo abarca desde el 1 de enero de 1996 hasta el 30 de septiembre de 1997. Este periodo de tiempo incluye:

- a) Un trasvase de agua desde los embalses de la cabecera del Tajo, realizado entre el 14 de febrero y el 10 de junio de 1996.
- b) Una época de aportaciones extraordinarias correspondiente al año hidrológico 1996-97, entre diciembre de 1996 y abril de 1997.

Por lo que se refiere al primer punto, como se mencionó en el capítulo 4, la situación de progresivo deterioro originado en el Parque Nacional de las Tablas de Daimiel originado por la pérdida de aportes naturales debido al incremento de la explotación de la Llanura Manchega (Berzal et al., 1987; García Rodríguez, 1996; López Camacho, 1996; Cruces y Martínez Cortina, 2000; entre otros), junto con las derivaciones no autorizadas en los cauces superficiales (Berzal et al., 1987) y la persistencia de un largo período seco (Álvarez Cobelas y Verdugo, 1996; Cobelas et al. 1996; López-Camacho et al., 1996; Cruces y Martínez Cortina, 2000; Martínez Cortina, 2003), originaron la búsqueda de soluciones mediante un Plan de Regeneración Hídrica del Parque Nacional de las Tablas de Daimiel (MOPU y MAPA, 1986; Berzal et al., 1987; Sánchez Soler y Carrasco, 1996; Carrasco, 2003).

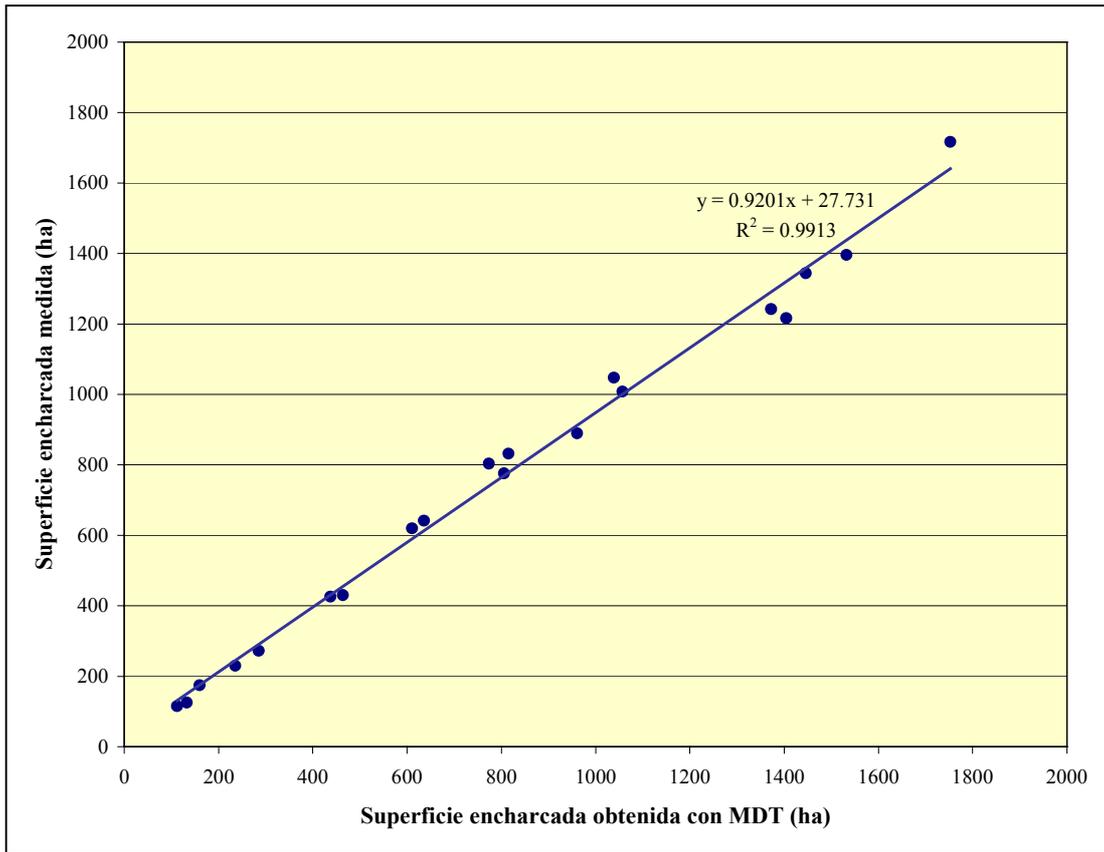


Figura 6.6. Correlación entre valores de superficie encharcada observada y obtenida del MDT para los períodos de vaciado de las Tablas de Daimiel en 1996 y 1997

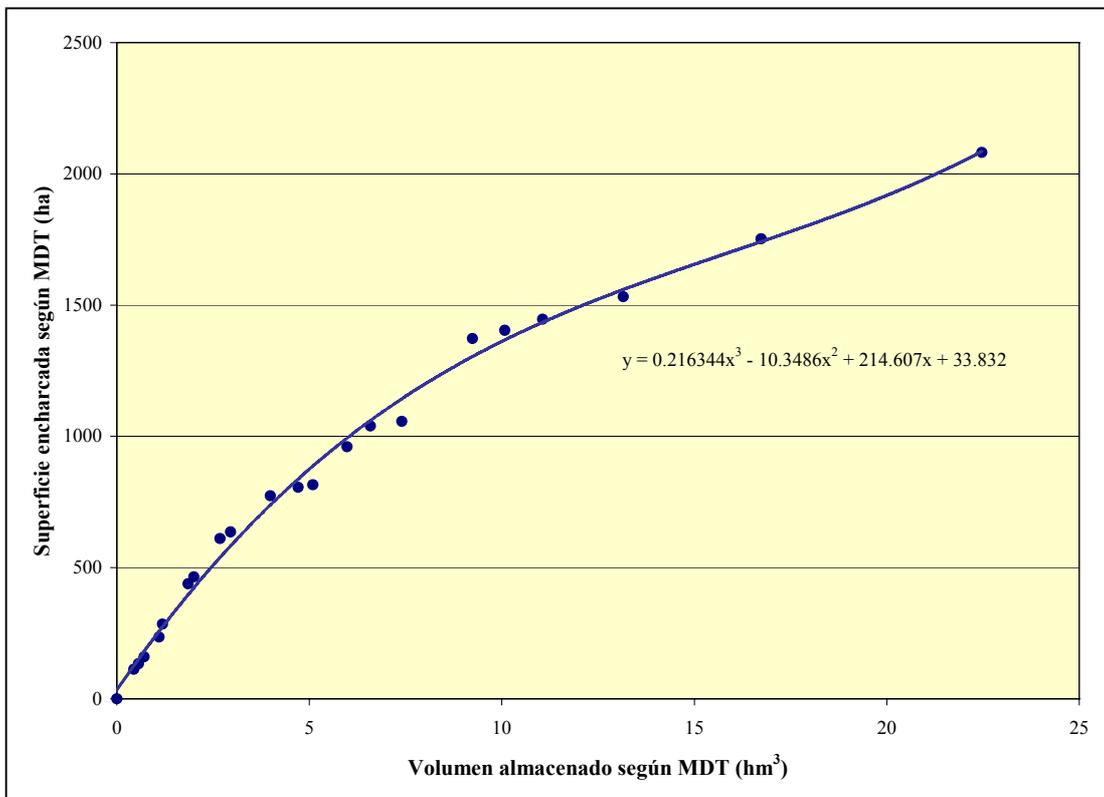


Figura 6.7. Correlación entre valores de superficie encharcada y volumen almacenado obtenidos del MDT para los períodos de vaciado de las Tablas de Daimiel en 1996 y 1997

Una de las soluciones previstas fue la derivación de aguas desde las infraestructuras del trasvase Tajo-Segura (MOPU y MAPA, 1986; Berzal et al., 1987). Esta solución considerada en principio como de corto plazo (Berzal et al., 1987), a pesar de la controversia de su aplicación (López-Camacho et al., 1996; Sánchez Soler y Carrasco, 1996; Llamas, 1989 y 1991; García Rodríguez, 1996; Cruces y Martínez Cortina, 2000) prácticamente se ha convertido en definitiva.

La derivación de caudales del acueducto Tajo-Segura se efectúa (Sánchez Soler y Carrasco, 1996; Carrasco, 2003) en Carrascosa del Campo, en Cuenca, al arroyo Valdejudíos, que es afluente del Cigüela. Por el cauce de este último río llega el agua al Parque Nacional después de recorrer cerca de 155 km (figura 6.8).

Esta solución, sin embargo, presenta algunos problemas (Sánchez Soler y Carrasco, 1996; Carrasco, 2003):

- Dificultad de ajustar las necesidades hídricas del Parque Nacional de las Tablas de Daimiel cuantitativa y temporalmente a las disponibilidades del trasvase Tajo-Segura.
- Cuando existen problemas de agua en períodos de sequía, el Parque Nacional de las Tablas de Daimiel suele ser el más afectado por la política de ahorro de agua.

Se han realizado varios trasvases irregularmente repartidos en el tiempo y con cuantía variable desde la puesta en marcha efectiva de los mismos en 1988 (tabla 6.4). En algunos períodos, como en 1995 no se produjeron derivaciones por las escasas reservas de los embalses de la cabecera del Tajo (Sánchez Soler y Carrasco, 1996; Carrasco, 2003), mientras que entre 1997 y 1999 no se realizaron trasvases al haber existido en la zona una alta pluviometría (figura 6.9), lo que provocó la inundación total del espacio protegido con aportes superficiales de la propia cuenca alta del Guadiana a través del Cigüela (Carrasco, 2003) y de los afluentes de la margen derecha de las Tablas.

Tabla 6.4. Características de los trasvases de agua desde las infraestructuras del Acueducto Tajo-Segura hacia el Parque Nacional de las Tablas de Daimiel

Año	Volumen (hm ³)	Rendimiento (%)	Período	Supf. Máxima (ha)
1988	12.09	75	29-feb a 5-may	1530
1989	13.33	75	13-mar a 30-jun	1570
1990	15.79	75	2-abr a 16-ago	1675
1991	17.77	68	27-feb a 15-jul	1245
1992	6.50	40	5-feb a 7-mar	870
1993	---	---	---	100
1994	15.00	10	13-ene a 14-mar	340
1995	---	---	---	45
1996	30.00	61	14-feb a 10-jun	1432
1997	---	---	---	2456 ^(*)
1998	---	---	---	
1999	---	---	---	
2000	16.00			
2001	20.00			
2002	20.00			

(*) Medidas en Parque Nacional y zona de protección

Elaboración propia a partir de datos de Sánchez Soler y Carrasco (1996), CHG (1996), y Aragón (2003)

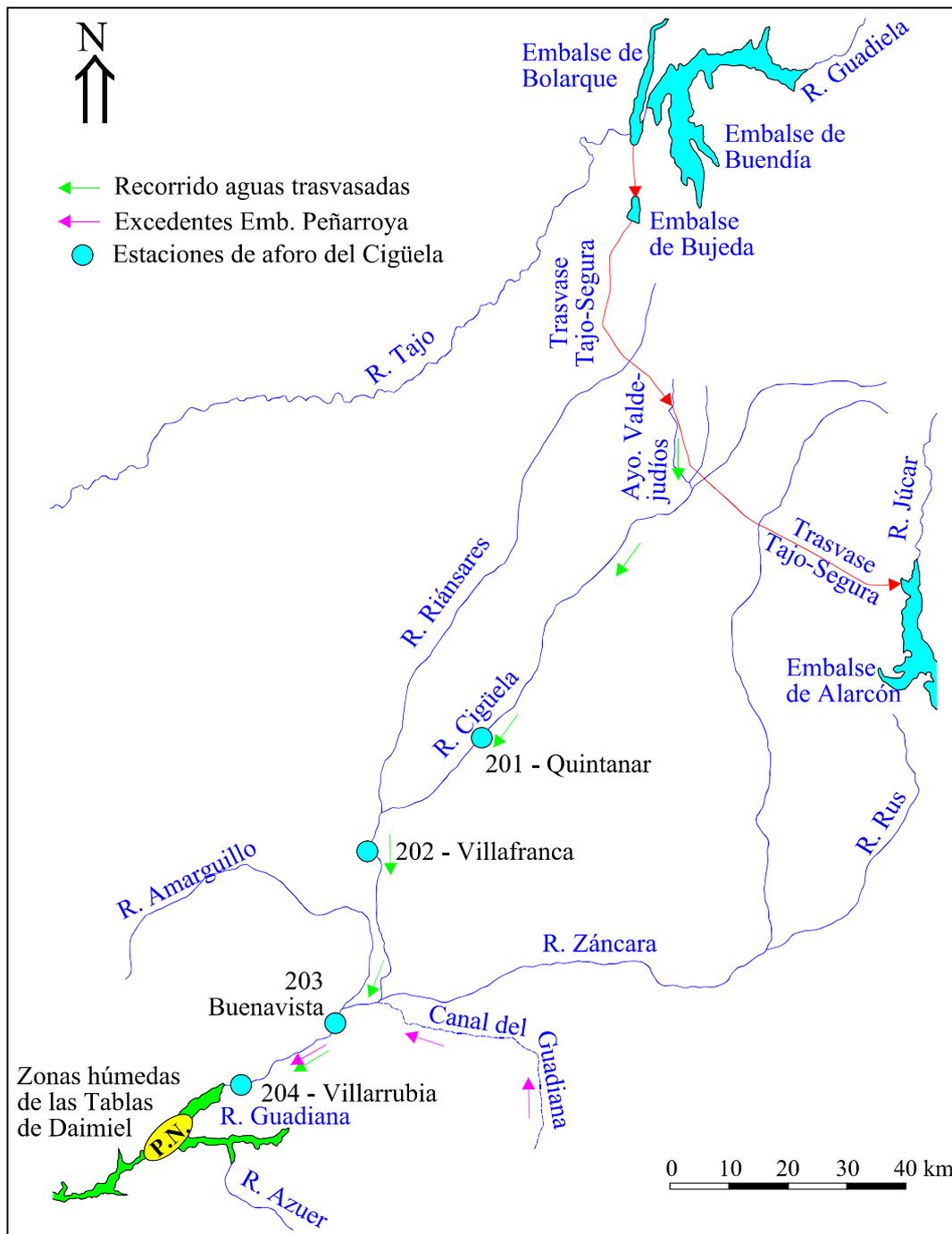


Figura 6.8. Recorrido de las aguas procedentes del trasvase Tajo-Segura con destino al Parque Nacional de las Tablas de Daimiel y de los excedentes no infiltrados del embalse de Peñarroya (acuífero del Campo de Montiel). Base cartográfica de Elvira y Barrachina (1996)

El largo recorrido del agua trasvasada por terrenos permeables y la derivación ilegal desde el cauce del Ciguéla originan unas pérdidas en la efectividad del trasvase. En la tabla 6.4 aparecen los rendimientos (caudal que llega al Parque Nacional/caudal concedido \times 100) en porcentajes, que han sido muy variables. Las primeras cifras muestran los valores más elevados que las últimas. Sánchez Soler y Carrasco (1996) y Carrasco (2003) creen que esos altos rendimientos se deben al hecho de que durante los primeros trasvases (período 1988-1990) se produjeron lluvias abundantes dentro del

período de sequía que sufría la zona (figura 6.9). De todos modos, se desconoce la estación de aforos utilizada para la estimación de dichos rendimientos, pero la estación de aforos de Villarrubia, situada próxima a la zona de protección del Parque Nacional (figura 4.1), a menos de 10 km del Parque Nacional, se comenzó a medir en 1993 (García Rodríguez, 1996; Cruces y Martínez Cortina, 2000), por lo que es posible que la estación de medida fuese la de Buenavista (figura 6.8).

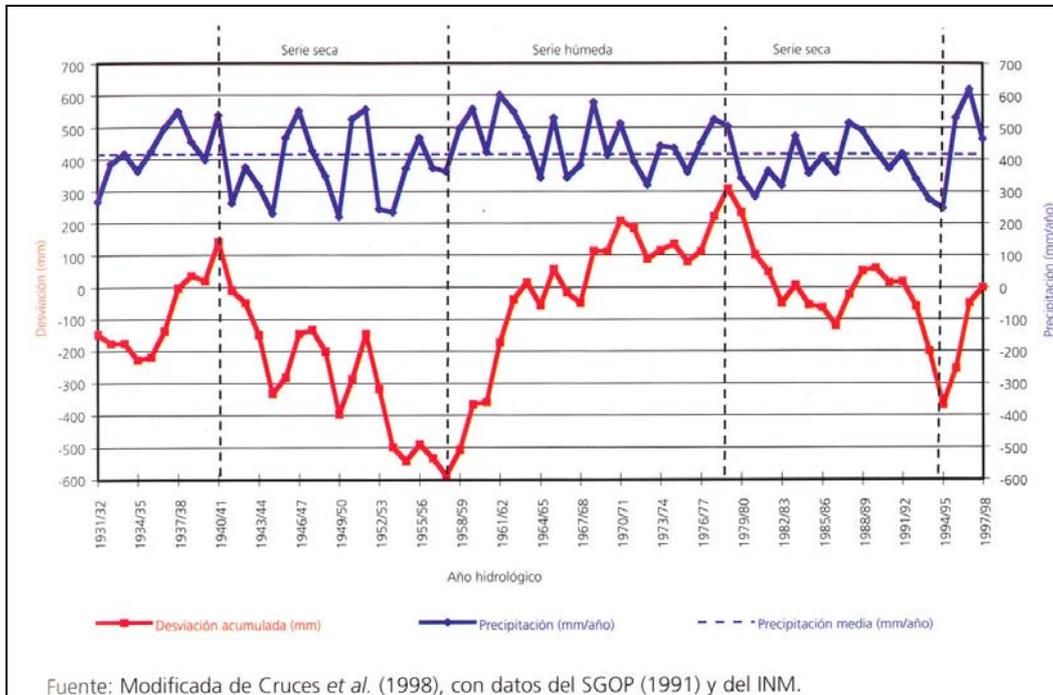


Figura 6.9. Precipitación anual en la cuenca alta del Guadiana, y desviaciones acumuladas respecto a la media [Fuente: Martínez Cortina, 2003]

Desde que el nivel freático está por debajo del fondo del vaso de las Tablas de Daimiel, la cuantificación de la infiltración del agua trasvasada que llega a las Tablas tiene gran interés con vistas a la previsión de la persistencia de láminas de agua libre, ya que la cuantía de los trasvases intentan compensar ese proceso de infiltración para mantener los niveles de agua durante determinados períodos.

Con la recuperación de los embalses de la cabecera de la cuenca del Tajo, en otoño de 1995, fue posible la realización de un trasvase hacia las Tablas en los primeros meses de 1996. Ese trasvase ha originado las circunstancias adecuadas para abordar la realización de un balance con vistas a estimar la infiltración en las Tablas.

La Confederación Hidrográfica del Guadiana (CHG) proporcionó la información básica del trasvase realizado el año 1996, que quedó plasmada en CHG (1996), parte de cuyos datos se resumen más abajo.

Las fechas más importantes en el desarrollo del trasvase pueden considerarse las siguientes:

- Autorización de la derivación de 15 hm³ el 8/2/1996
- Comienzo del trasvase el 14/2/1996, con un caudal de 2 m³/s
- Llegada del agua trasvasada a la estación de aforos de Villarrubia de los Ojos el 19/2/1996

- El 23/2/1996 se modifica el caudal derivado a 3 m³/s
- Autorización de una derivación adicional de 15 hm³, el 10/4/1996
- Finalización de las sueltas desde el acueducto el 10/6/1996
- El agua deja de llegar a la estación de Villarrubia de los Ojos el 30/6/1996 (según los datos de caudales en la estación de Villarrubia, que aparecen en el anexo 4).

Por lo que respecta a las pérdidas del caudal trasvasado, en la tabla 6.5 se presentan las registradas en diferentes estaciones de aforo situadas a lo largo del río Cigüela entre la zona en la que se lleva a cabo la derivación y las Tablas de Daimiel. En definitiva se han estimado en cerca de 16 hm³ las pérdidas de agua trasvasada por tomas superficiales y, sobre todo, por infiltración desde el cauce fluvial.

Tabla 6.5. Pérdidas de volúmenes de agua derivada entre el acueducto Tajo-Segura y el Parque Nacional de las Tablas de Daimiel

Tramo	Distancia (km)	Pérdida de caudal (m ³)
Quintanar-Villafranca	41	(*)
Villafranca-Buenavista	19	1994803
Buenavista-Villarrubia	25	13966733
Pérdidas totales		15961536

(*) Incremento de caudal de 4 hm³
 [Datos obtenidos de CHG (1996)]

Puesto que a Villarrubia de los Ojos llegaron 18.4 hm³ frente a los 30 hm³ derivados, se supuso una eficacia del trasvase del 61%, aunque realmente es menor ya que en el caudal medido en aquella estación de aforos estarán incluidas aportaciones naturales como las registradas entre Quintanar y Villafranca (tabla 6.5). En realidad el rendimiento puede estar en un 54%.

El segundo período de los mencionados, correspondiente al año hidrológico 1996-97, fue un período anormalmente lluvioso en toda la Península Ibérica, y había sido precedido por otro año también húmedo. No fue ajena a estos hechos la cuenca alta del Guadiana, donde esos años suponen un punto de inflexión al período de sequía que, con mayor o menor intensidad, venía afectando a la región desde 1979-80 (figura 6.9).

En el anexo 5 aparecen los valores diarios de precipitación registrados en la estación meteorológica de las Tablas de Daimiel, para el período de estudio. A pesar de que los valores son locales, son representativos de lo sucedido en la zona, dado el carácter generalizado de los fenómenos de precipitación ocurridos.

En el año 1996-97, en el que en total se registraron 592 mm, las precipitaciones más cuantiosas se concentraron en los meses de noviembre y diciembre de 1996 y enero de 1997, destacando estos dos últimos.

En la tabla 6.6 se han sintetizado algunos valores que pueden caracterizar la pluviometría de ese período. A modo comparativo, también figuran los meses anterior y posterior a los mencionados previamente. Figuran en la tabla la precipitación total mensual, la precipitación máxima en un día y el número de días con precipitación cuantificable.

Como se ha mencionado, destacan los meses de diciembre y enero, en los que se registraron conjuntamente más de 330 mm, cuando la media en la zona apenas supera

los 400 mm/a (figura 6.9). Además en diciembre se registraron valores de lluvia durante 23 días, y se llegan a superar los 77 mm en un día. La persistencia e intensidad de la lluvia, y quizá también el que en noviembre se produjeron lluvias intensas, provocaron escorrentía en toda la red fluvial de la cuenca alta del Guadiana. Aquélla que forma parte del sistema del Cigüela originó grandes aportes de agua superficial (anexo 4) que, como se ha dicho, inundaron totalmente la zona protegida. A esto último contribuyeron también los afluentes septentrionales de las Tablas, que contribuyeron al encharcamiento del Parque Nacional.

Tabla 6.6. Precipitaciones totales mensuales y precipitación máxima en un día en la estación meteorológica de las Tablas de Daimiel para el período comprendido entre octubre de 1996 y febrero de 1997

Mes	Año	Prec. Total (mm)	Prec. Max. (mm/d)	Nº días lluvia
Octubre	1996	18.6	14.0	3
Noviembre	1996	45.2	21.7	8
Diciembre	1996	216.2	77.5	23
Enero	1997	115.9	18.5	14
Febrero	1997	5.5	4.7	2

Complementariamente, y motivado por la misma situación meteorológica, se produjo una recuperación total del acuífero del Campo de Montiel (Cruces y Martínez Cortina, 2000). En éste la escorrentía del sistema de las lagunas se recoge en el embalse de Peñarroya. Sin embargo, la cuantía de las aportaciones fue tan importante que el embalse se llenó y estuvo vertiendo por la coronación durante varios meses (foto 6.1). Ante esa situación, los excedentes fueron conducidos hacia el llamado Canal del Guadiana, desde el cual el agua se suele infiltrar y recarga el acuífero de la Mancha occidental. En 1997 esos excedentes fueron tan cuantiosos que llegaron hasta el río Cigüela (figura 6.8) donde se sumaron a los aportes de este sistema, y por él llegaron a las Tablas de Daimiel.

En la zona sur, el Azuer también se recuperó y sus aportes llegaron hasta el antiguo cauce del Guadiana, aunque se infiltraron hacia el acuífero de la Mancha occidental antes de unirse a la zona encharcada en la zona de protección del Parque Nacional (anexo 6).



Foto 6.1. Rebosamiento del embalse de Peñarroya a la salida del Campo de Montiel en febrero de 1997, vertiéndose los excedentes al Canal del Guadiana, que circula por el acuífero de la Mancha occidental hasta el río Cigüela

Datos de partida

Para la estimación de la infiltración en el período de tiempo considerado se ha podido disponer de una serie de datos que pueden ser utilizados para realizar balances de agua a escala diaria, para definir de modo preciso la zona del vaso en la que se almacena, infiltra y evapora el agua, y también para contrastar los resultados de los cálculos con datos “reales” que muestran el estado del sistema.

A continuación, se enumeran dichos datos, que están ordenados, salvo alguna excepción, en función de su uso en el cálculo de la infiltración. En primer lugar se describen las entradas al sistema, después las salidas y finalmente los datos que se pueden utilizar como contraste de los cálculos con la realidad.

Mención aparte merecen algunas de las entradas al sistema, como son los aportes procedentes de los tributarios septentrionales de las Tablas, puesto que, para el período de estimación de la infiltración considerado en la presente Tesis, no existían dispositivos de control de los caudales de las cañadas. Dado que en algunos balances realizados con anterioridad esos elementos adquieren una importancia relativa (MOPU-MAPA, 1986; García Rodríguez y Llamas, 1993; García Rodríguez, 1996; López-Camacho et al., 1996), sus aportes se han estimado de modo indirecto mediante un modelo precipitación-escorrentía basado en un balance de agua en el suelo.

Geometría del vaso: Modelo geométrico del vaso de las Tablas de Daimiel

Como se dijo en el capítulo 6, la existencia de un Modelo Digital del Terreno (MDT) detallado, con información de 1993, ha permitido establecer la relación ente la superficie que envuelven las curvas de nivel y los volúmenes que se pueden almacenar bajo las cotas respectivas (figura 6.7). Esa relación es la que se va a utilizar para la estimación de las superficies encharcadas a partir de los volúmenes resultantes del balance en las Tablas de Daimiel, siguiendo los criterios que se utilizan en embalses.

Sin embargo, el MDT utilizado tiene una validez limitada en el tiempo puesto que el lecho de la zona húmeda puede sufrir modificaciones como consecuencia de las avenidas en época de precipitaciones extraordinarias, de los fenómenos de subsidencia originados en épocas largas de sequía, alteraciones en la topografía originadas por los fenómenos de autocombustión de las turbas, alteración antrópica, etc.

Precipitación diaria

Los datos de precipitación diaria recopilados son los registrados en la estación meteorológica 04112U del Instituto Nacional de Meteorología, denominada Tablas de Daimiel (figura 4.1 y foto 7.1), para el periodo comprendido entre enero de 1996 y septiembre de 1997. Estos datos han sido facilitados por la Dirección del Parque Nacional. Aparecen en el anexo 5 y se han representado en la figura 7.1. Se observan lluvias relativamente abundantes y, a veces, intensas, especialmente en el invierno de 1996-97 (tabla 6.6). La precipitación total entre enero y septiembre de 1996 en las Tablas fue de 318.1 mm, y en el año hidrológico 1996-97 de 591.7 mm, cuando la media anual en la cuenca alta del Guadiana es del orden de 415 mm (Montesinos, 1990; Álvarez Cobelas y Verdugo, 1996).

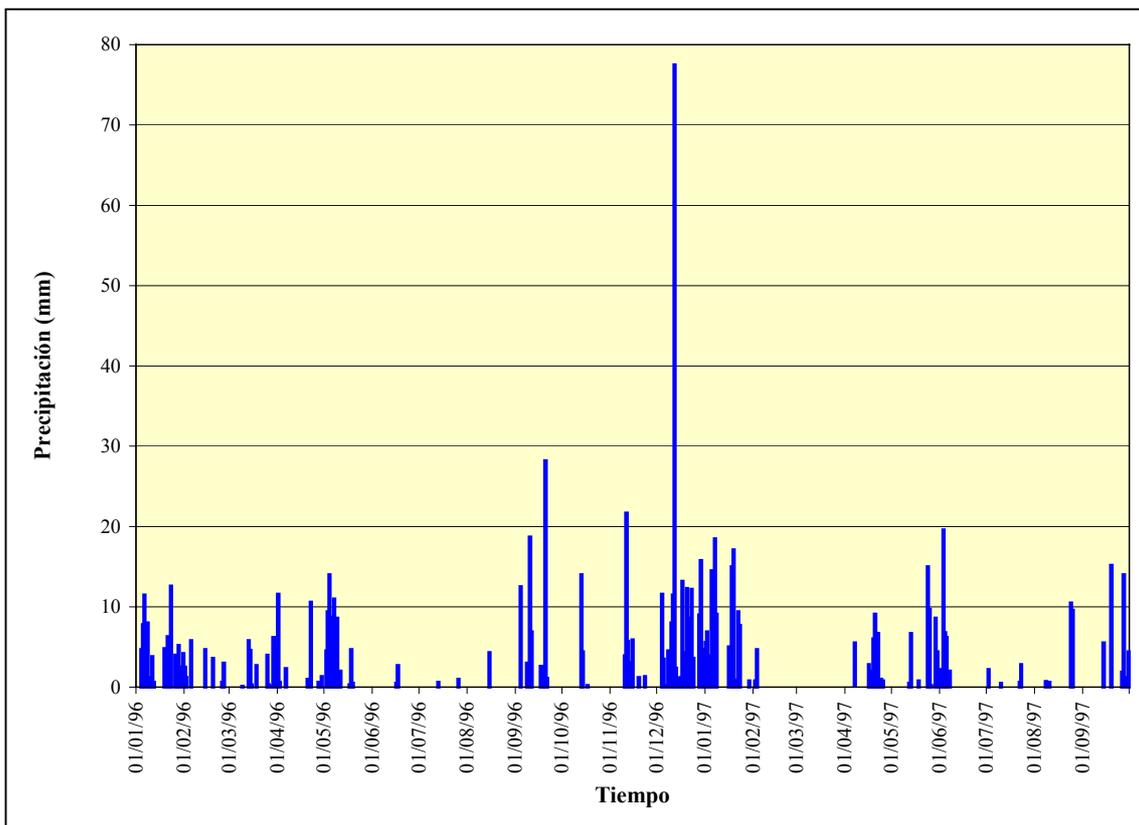


Figura 7.1. Precipitaciones diarias registradas en la estación meteorológica del Instituto Nacional de Meteorología 04112U (Tablas de Daimiel), situada en las proximidades del Centro de Recepción del Parque Nacional



Foto 7.1. Estación meteorológica de las Tablas de Daimiel, situada junto al centro de información del Parque Nacional

Caudales medios diarios

Corresponden a los caudales aforados en la estación E-4202, de Villarrubia de los Ojos (foto 7.2), para el período comprendido entre enero de 1996 y septiembre de 1997 (anexo 4). Estos datos han sido proporcionados por la Confederación Hidrográfica del Guadiana (CHG) y se han representado en la figura 7.2. Destacan dos períodos claramente diferenciados, correspondientes a los descritos en el capítulo 6.

En el primero los aportes proceden esencialmente del trasvase de agua del Acueducto Tajo-Segura, con una llegada de agua que refleja las características de las sueltas explicadas en el apartado 6.3.

En el segundo, la aportación iniciada en diciembre de 1996 corresponde a un período extraordinariamente húmedo. No se aprecian de modo significativo efectos reguladores de aguas subterráneas mediante agotamientos que incrementen el tiempo de llegada de aportes al espacio natural, mostrando una infiltración rápida en un río perdedor.

Trasvase Tajo-Tablas de Daimiel

Se ha contado con el informe relativo al *Trasvase desde el Acueducto Tajo-Segura hasta el Parque Nacional de las Tablas de Daimiel* (CHG, 1996), proporcionado por la Confederación Hidrográfica del Guadiana, en el que se detallan las fechas e incidencias más significativas en el mayor trasvase de agua realizado al Parque Nacional (tabla 6.4), en 1996, y que se describe en el apartado 6.3.

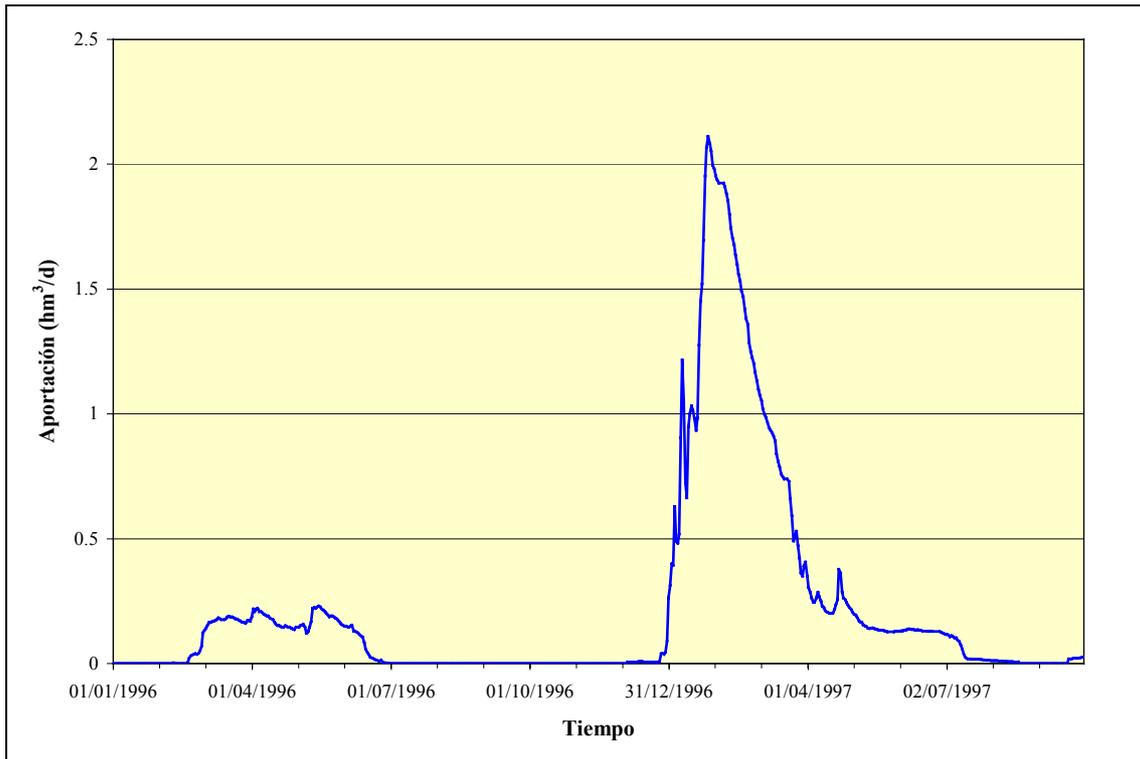


Figura 7.2. Volúmenes diarios registrados en la estación de aforos E-04204, de Villarrubia de los Ojos, entre el 1 de enero de 1996 y el 30 de septiembre de 1997



Foto 7.2. Estación de aforos de Villarrubia de los Ojos

Bombeos de pozos de emergencia

La Dirección del Parque Nacional ha facilitado los caudales diarios bombeados desde los pozos de emergencia “La Viña”, “La Mina”, “El Murciano”, y “Molemochó”, hasta el Parque Nacional, durante 1995, 1996 y 1997 (anexo 7). En este último año, debido al estado de inundación óptima de las Tablas, no se realizaron extracciones.

Evaporación

Se ha contado con información procedente de dos fuentes diferentes:

- Evaporación diaria en lámina libre medida en tanque en la estación 04112U, del Parque Nacional de las Tablas de Daimiel, para el periodo mayo a septiembre de 1997. Estos datos han sido facilitados por la Dirección del Parque Nacional (anexo 8).
- Para el período comprendido entre enero de 1996 y abril de 1997 se ha usado la correlación entre temperaturas medias diarias y evaporación diaria en lámina libre, ya que no se ha podido disponer de información de evaporímetro para el período mencionado. Esa correlación fue hallada por Tragsatec, S.A. para el año 1995 completo, utilizando datos de la estación meteorológica instalada en el Parque Nacional. La relación encontrada fue $Evap = 0.26 \times Temp - 0.65$ (anexo 9).

Los valores de evaporación parecen más adecuados de para utilizar en este caso que los de evapotranspiración. Cruces y Martínez Cortina (2000) comentan la necesidad de considerar la evapotranspiración de modo detallado para el cálculo de las salidas de agua en las zonas húmedas manchegas con vegetación, que creen sistemáticamente subestimada. Sin embargo, su justificación se centra esencialmente en zonas de descarga en ríos y humedales, que no es el caso de las Tablas de Daimiel en la actualidad. Además reconocen que los cálculos con evaporación neta (diferencia entre la evaporación real deducida de tanque evaporimétrico y la precipitación) son más adecuados en superficie de agua libre, lo que sucede en las Tablas de Daimiel en los períodos de inundación. Además el cálculo de la evapotranspiración (potencial y real) a escala diaria puede resultar extremadamente complejo, por lo que quedaría fuera de los objetivos principales del estudio.

Escalas limnimétricas

Se ha contado con los niveles de agua medidos diariamente en las escalas limnimétricas instaladas en el Parque Nacional, concretamente las de Puente Navarro, Quinto de la Torre, Casablanca, Entradilla, Embarcadero, Tablazo, Algeciras, Puente el Conde, y estación de aforos de Villarrubia (figura 7.3), para el periodo comprendido entre agosto de 1996 y septiembre de 1997 (anexo 1).

Los datos se corresponden con cotas absolutas de nivel de agua en el caso de la escala de Puente Navarro, y con datos de espesor de lámina de agua en el resto de las escalas. Para todas estas escalas también se ha dispuesto de datos diarios de medidas de nivel de agua para el periodo comprendido entre el 1 de enero de 1996 y el 30 de septiembre de 1996. Esos datos han sido facilitados por Tragsatec, S.A.

Sin embargo, una revisión de dichos datos muestra que en la fecha de realización del presente trabajo, las escalas no estaban niveladas, por lo que su utilización como elementos de control y contraste de la evolución de la lámina de agua puede plantear más problemas que resolverlos.

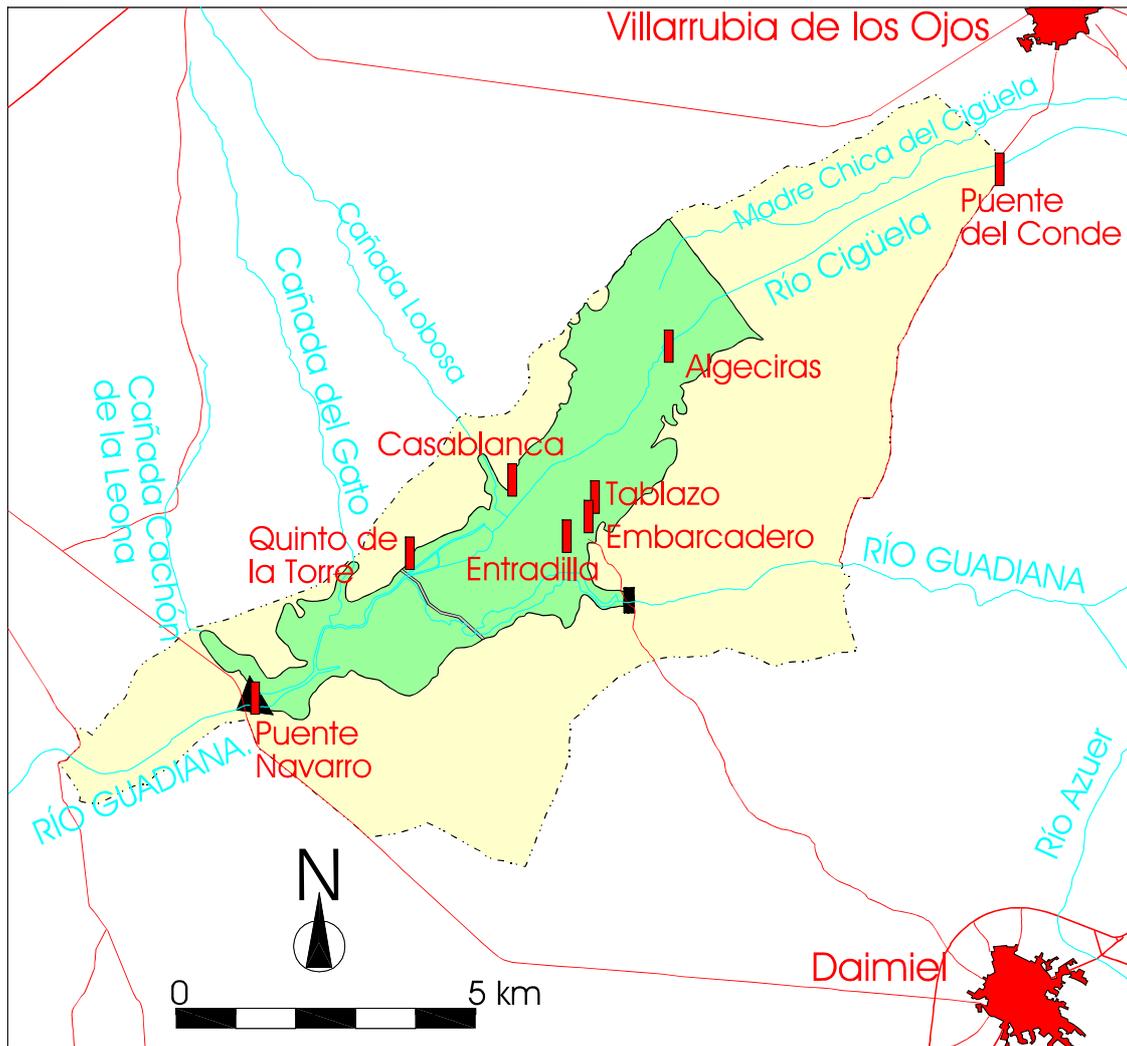


Figura 7.3. Situación de las escalas limnimétricas para el control de la lámina de agua del Parque Nacional de las Tablas de Daimiel (Nota: También se controla la escala de la estación de afloros de Villarrubia de los Ojos, fuera del área protegida)

Superficie encharcada observada

Se ha contado con planos del vaso de las Tablas con la extensión y la cuantificación en hectáreas de la superficie encharcada, medida en campo, para distintas fechas del período de estudio, facilitados por la Dirección del Parque Nacional (anexo 3). En la tabla 7.1 se muestran las fechas y los valores numéricos de la estimación de esa superficie encharcada. Las medidas son realizadas cartografiando la zona encharcada utilizando distintos medios de transporte, generalmente dentro del perímetro del Parque Nacional.

Las superficies inundadas se vienen midiendo por parte del personal del Parque Nacional desde 1989 (Álvarez Cobelas et al., 2001).

Tabla 7.1. Fechas en las que se ha dispuesto de superficie encharcada observada en campo del período comprendido entre 1 de enero de 1996 y 30 de septiembre de 1997

Ob.	Fecha	Superf. medida (ha)									
1	03/01/1996	62	12	16/04/1996	1210	23	01/08/1996	776	33	03/02/1997	2456
2	10/01/1996	108	13	25/04/1996	1284	24	08/08/1996	642	34	20/03/1997	2000
3	31/01/1996	198	14	06/05/1996	1392	25	13/08/1996	426	35	17/04/1997	1832
4	12/02/1996	278	15	14/05/1996	1404	26	05/09/1996	272	36	13/05/1997	1635
5	21/02/1996	332	16	29/05/1996	1432	27	17/09/1996	230	37	09/06/1997	1717
6	28/02/1996	446	17	07/06/1996	1396	28	02/10/1996	175	38	08/07/1997	1242
7	06/03/1996	552	18	18/06/1996	1344	29	23/10/1996	125	39	30/07/1997	1048
8	14/03/1996	772	19	27/06/1996	1216	30	19/11/1996	115	40	20/08/1997	804
9	21/03/1996	868	20	08/07/1996	1008	31	13/01/1997	1705	41	02/09/1997	620
10	27/03/1996	890	21	17/07/1996	890	32	22/01/1997	1810	42	22/09/1997	430
11	02/04/1996	916	22	24/07/1996	832						

Escorrentía de los afluentes secundarios septentrionales

Los caudales procedentes de la escorrentía de cauces secundarios, cañadas, situados en el margen derecha de las Tablas son un elemento esencial a la hora de calcular el balance en la zona húmeda. De hecho, en diferentes balances que tienen en cuenta las aportaciones de esas corrientes los valores difieren ligeramente. Así, en el informe del Servicio Geológico de Obras Públicas 12/83 (SGOP, 1983, en García Rodríguez, 1996), se calculan 12 hm³ para 1973-74; en MOPU y MAPA (1986) para ese mismo año se estiman 11 hm³; en García Rodríguez y Llamas, 1993, se estiman en 8-12 hm³; en el informe 09/89 del SGDGOH (1989a), en García Rodríguez (1996), entre octubre de 1988 y junio de 1989 se calculan en 5 hm³ los aportes de los afluentes superficiales.

La cuantificación de esos aportes presenta la dificultad de que, como se ha mencionado, no se ha dispuesto de elementos de control para aforar los caudales procedentes de esas cañadas. Eventualmente se han calculado suponiendo un porcentaje de la precipitación sobre las superficies de las cuencas vertientes a las Tablas.

Por ello, para estimar las aportaciones diarias de estas cañadas al vaso de las Tablas se ha elaborado un modelo precipitación-escorrentía basado en balances de agua en el suelo, de acuerdo con la metodología de Thornthwaite y Mather (1955), en Estrela (1993), que se encuentra ampliamente difundido y cuyo cálculo, a escala mensual, está explicado detalladamente en Martín Arnaiz (1983). En el presente trabajo el balance se ha realizado a escala diaria. El esquema conceptual planteado es el siguiente:

- De acuerdo con la realidad, los materiales que constituyen el área norte de las Tablas son impermeables a efectos prácticos (García Rodríguez, 1996). Esto supone que una vez satisfecha la capacidad de campo del suelo, toda el agua sobrante se transforma en escorrentía superficial.
- Cuando la precipitación es mayor que la evapotranspiración potencial, se hace la evapotranspiración real igual a la potencial y el sobrante pasa a saturar la capacidad de campo del suelo. Cuando la capacidad de campo del suelo se encuentra totalmente satisfecha el excedente pasa a ser escorrentía superficial que va a parar al vaso de las Tablas.

- Cuando la precipitación es menor que la evapotranspiración potencial, toda el agua precipitada se transforma en evapotranspiración real, y se toma de la reserva del suelo la cantidad de agua necesaria para tratar de igualar la evapotranspiración real a la potencial. Si esto no es posible, a la diferencia entre evapotranspiración potencial y real se la considera déficit, y la reserva de agua en el suelo queda agotada.

De acuerdo con estos supuestos, se ha elaborado un programa en lenguaje FORTRAN que simula día a día el balance de agua en el suelo en la zona norte de las Tablas. Los datos de entrada a este programa son:

- Número de días para los que se realizará el balance.- Para el período considerado son 639, desde el 1 de enero de 1996 hasta el 30 de septiembre de 1997.

- Capacidad de campo del suelo y contenido de agua en el suelo el día que comienza la simulación (ambas cantidades en mm).- Estos valores, a priori desconocidos, se han estimado haciendo varios tanteos hasta hacer coincidir el período en el que se produce escorrentía en la realidad (deducido de los planos de encharcamiento observado, que se muestran en el anexo 3), con el período en el que se produce escorrentía en la simulación. Éste ha sido el único método de estimar estos parámetros con los datos disponibles. Los mejores resultados se han obtenido para capacidad de campo de 200 mm y reserva de agua al comienzo del cálculo, el día 1 de enero de 1996, de 135 mm.

- Datos de precipitación diaria (mm) de la estación meteorológica 04112U del Instituto Nacional de Meteorología, situada en las Tablas de Daimiel (anexo 5).

- Datos de evapotranspiración potencial diaria (mm). Se han utilizado los datos de evapotranspiración potencial media mensual obtenidos por Elías y Ruiz Beltrán (1977) para la estación de Daimiel para el periodo 1947 a 1969 (anexo 10).

El resultado del modelo es el valor de la escorrentía en mm/d para cada día de los que abarca el periodo de simulación.

El anexo 11 muestra el listado del fichero de los resultados obtenidos. En la figura 7.4 se presentan resumidos esos resultados, comparándose con los datos de precipitación en la estación del Parque Nacional de las Tablas de Daimiel. En ella se observa que el período principal en el que se calcula escorrentía (lluvia útil) corresponde a los meses de diciembre de 1996 y enero de 1997, con valores unitarios que superan los 15 mm/d durante varios días e incluso tras varios días de precipitaciones cuantiosas, estas se convierten prácticamente en lluvia útil, como desde finales de diciembre de 1996 hasta mediados de enero de 1997. Se puede destacar, sin embargo, que, a pesar de las precipitaciones tan cuantiosas, y a veces intensas, los días en los que se calcula excedente de agua en el suelo son relativamente pocos, dado el alto valor de capacidad de almacenamiento de agua del suelo que se ha asignado.

Finalmente, los valores obtenidos multiplicados por la superficie de la cuenca de cada una de las cañadas, y por los factores convenientes para el cambio de unidades, proporcionarán, para cada cañada, el valor de la aportación diaria al vaso de las tablas en hm^3 . En el presente estudio, se han considerado las cañadas con las cuencas de mayor extensión, Cachón de la Leona, del Gato, Lobosa y Madre Chica (o Vieja) del Cigüela (figuras 4.1 y 4.2). Las superficies se han obtenido por planimetría, resultando 12 km^2 , 15 km^2 , 24 km^2 y 45 km^2 , respectivamente. Con ellas, se han calculado unas aportaciones totales de 3.72 hm^3 para el período comprendido entre enero y septiembre de 1996, y de 14.14 hm^3 para el período que abarca entre octubre de 1996 y septiembre de 1997.

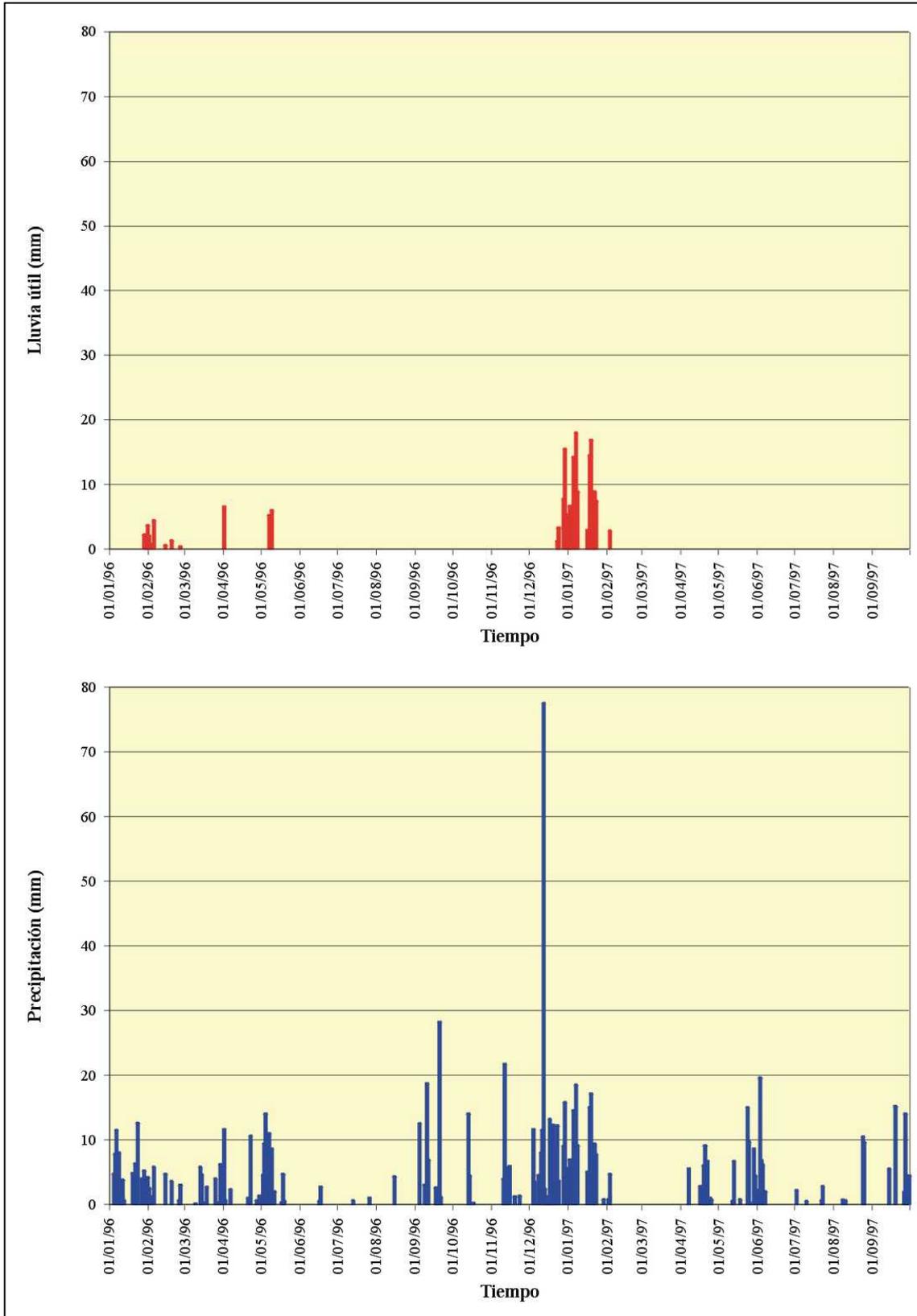


Figura 7.4. Comparación de las precipitaciones en la estación meteorológica de las Tablas de Daimiel (gráfico inferior) y la lluvia útil unitaria calculada para la estimación de la escorrentía en los afluentes septentrionales de las Tablas de Daimiel (gráfico superior)

8.

Estimación de la infiltración

8.1 Cálculo preliminar de la infiltración en el vaso de las Tablas de Daimiel

Se ha realizado, de modo preliminar, un cálculo de la infiltración utilizando la ley de conservación de masas mediante la aplicación de un balance de agua en el vaso de las Tablas de Daimiel. Este balance servirá de tanteo para comprobar si los valores obtenidos son aceptables y, en caso de no serlos, aplicar, si es posible, otro medio de estimar de la infiltración con los datos disponibles.

La metodología comentada, a partir de balances, ha sido la utilizada tradicionalmente sobre todo para estimar las descargas procedentes del acuífero de la Mancha Occidental al vaso de las Tablas de Daimiel. Sin embargo, las incertidumbres planteadas por los datos de partida, especialmente de aquéllos no medidos o de los valores medios empleados correspondientes a períodos de tiempo diferentes, son tan elevadas que dichos balances son muy discutibles (García Rodríguez, 1996).

En el cálculo preliminar que se ha planteado en el presente apartado, el balance se ha acotado temporalmente para fechas en las que se ha dispuesto de medidas de superficie encharcada.

Para reducir incertidumbres, en la medida de lo posible, el cálculo de la infiltración se ha realizado en las dos etapas de vaciado del vaso de las Tablas, que se han mencionado en el capítulo 6, dentro del total del período de tiempo del estudio. Durante esas dos etapas, las entradas de agua al vaso son mínimas o nulas, y las salidas se reducen a la infiltración y a la evaporación. De modo aproximado, ya que las entradas no son totalmente nulas (existen algunos aportes superficiales, de bombeo y de lluvia), la ecuación del balance quedaría entonces,

$$INF \approx \pm \Delta VOL - EVAP,$$

siendo,

INF la infiltración desde la superficie encharcada,

EVAP la evaporación desde la superficie encharcada, y

ΔVOL la variación del volumen almacenado en el vaso de las Tablas de Daimiel.

La primera etapa considerada abarca desde el 7 de junio de 1996 hasta el 19 de septiembre de 1996. Corresponde, como se dijo, al período de vaciado del vaso de las Tablas tras el aporte de agua realizado desde las infraestructuras del trasvase Tajo-Segura.

La segunda etapa comprende desde el 9 de junio de 1997 hasta el 22 de septiembre de 1997. En la primera fecha han terminado los vertidos por la presa de Puente Navarro, y corresponde a uno de los máximos valores de superficie encharcada que se ha medido. La última fecha es en la que se tiene el último valor de superficie encharcada antes del final del año hidrológico de 1996-97.

En esas etapas, correspondientes, como se dijo, a períodos de vaciado, se ha realizado un análisis comparativo entre la superficie encharcada medida y la obtenida con el Modelo Digital del Terreno (MDT), de acuerdo con los criterios expuestos en el apartado 6.2. A partir de dicho análisis se han calculado, a partir del MDT, tanto la superficie encharcada en el ámbito geográfico de estudio, como el volumen de agua embalsada correspondiente a cada una de esas superficies. Los valores y relaciones de referencia que se han utilizado corresponden a los representados en las figuras 6.6 y 6.7.

Los valores de superficie encharcada medidos y obtenidos a partir del MDT, y los volúmenes de agua almacenados en el vaso de las Tablas, obtenidos a partir de la relación de la figura 6.7, aparecen respectivamente en las tablas 6.2 y 6.3 para cada uno de los períodos considerados, ya que fueron los que se tomaron como referencia para establecer las relaciones geométricas.

Con los datos de las tablas 6.2 y 6.3 es posible calcular la variación en el almacenamiento entre cada una de las fechas reseñadas. Además con los datos de evaporación diaria (anexos 8 y 9), precipitación diaria (anexo 5), caudales diarios de aguas subterráneas bombeados al vaso del humedal (anexo 7) y caudales diarios medidos en la estación de aforos de Villarrubia de los Ojos (anexo 4), y aplicando la ecuación de conservación de masas se ha calculado el valor de la infiltración en el vaso de las Tablas de Daimiel para las etapas de vaciado citados. Los resultados de los balances realizados aparecen en las tablas 8.1 y 8.2.

A partir de los resultados que aparecen en esas tablas (tablas 8.1 y 8.2) se ha intentado encontrar una relación entre la infiltración calculada y el volumen de agua que contiene el vaso de las Tablas o la correspondiente superficie encharcada, relacionada con ese volumen según se explicó en el apartado 6.2, y de acuerdo con las tablas 6.2 y 6.3.

La representación de la superficie encharcada con la infiltración calculada (figura 8.1) muestra aparentemente una ausencia de correlación entre ambas variables, resultado que responde a la enorme dispersión de los valores de infiltración que se han calculado (tablas 8.1 y 8.2).

Esta variación puede ser debida a muchos factores, entre ellos se pueden mencionar la falta de control riguroso de algunas variables hidrológicas relacionadas con el balance en las Tablas de Daimiel, o no haber considerado alguna de ellas, como, por ejemplo, la escorrentía de los afluentes septentrionales. Estos factores, sin embargo, no deberían contribuir de modo significativo, al menos en la etapa de 1996, dado que los balances se

han realizado, como se dijo, en períodos de secado, para reducir las variables implicadas.

Tabla 8.1. Cálculo de la infiltración en el período de vaciado de las Tablas de Daimiel comprendido entre el 7 de junio de 1996 y el 19 de noviembre de 1996

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
07/06 a 18/06	11	1489.2	-2.092	0.0480	1.0588	0.1267	0.8818	2.4443	14.92
18/06 a 27/06	9	1425.3	-0.986	0.0000	0.1411	0.1067	0.6207	0.6127	4.78
27/06 a 08/07	10	1230.6	-2.669	0.0037	0.0109	0.1124	0.6738	2.1226	17.24
08/07 a 17/07	9	1008.7	-1.423	0.0061	0.0000	0.0108	0.5245	0.9160	10.09
17/07 a 24/07	7	888.0	-0.890	0.0000	0.0000	0.0000	0.3763	0.5136	8.26
24/07 a 01/08	8	810.7	-0.386	0.0081	0.0000	0.0000	0.3604	0.0337	0.52
01/08 a 08/08	7	720.9	-1.753	0.0000	0.0000	0.0000	0.2712	1.4819	29.36
08/08 a 13/08	5	536.8	-1.105	0.0000	0.0000	0.0000	0.1691	0.9361	34.87
13/08 a 05/09	23	361.4	-0.665	0.0607	0.0000	0.0000	0.3658	0.3603	4.33
05/09 a 17/09	12	260.1	-0.087	0.0744	0.0000	0.0000	0.1182	0.0428	1.37
17/09 a 02/10	15	197.7	-0.390	0.0643	0.0000	0.0000	0.1050	0.3496	11.79
02/10 a 23/10	21	146.6	-0.146	0.0273	0.0000	0.0000	0.0802	0.0935	3.04
23/10 a 19/11	27	122.5	-0.123	0.0523	0.0000	0.0000	0.0638	0.1114	3.37

Otro factor que puede influir en la variación de la infiltración calculada es la existencia de una gran heterogeneidad en la capacidad de infiltración del vaso de las Tablas. Este hecho, seguramente real por la heterogeneidad en los materiales que conforman las Tablas de Daimiel, tanto en superficie como en profundidad, deber ser muy importante a una escala de trabajo detallada.

Sin embargo, el considerar esa variabilidad queda fuera de los objetivos del presente estudio, en el que se pretende estimar la infiltración a escala del vaso de las Tablas en conjunto. La obtención de suficientes datos que pudieran utilizarse para estimar la infiltración en toda el área de estudio es extremadamente compleja por la configuración del fondo del vaso, con significativos depósitos orgánicos, y porque una parte del año puede estar inundado.

Finalmente se podría tener cuenta que a uno de los elementos básicos de cálculo, la superficie de referencia para la estimación del volumen almacenado, se le ha supuesto una disminución lineal entre dos días con medida (se ha utilizado la superficie media encharcada entre esos días), que, por otra parte, no son periódicas (hay medidas desde cada 5 días hasta cada 29 días). Si esa suposición no se cumple, se puede producir un desajuste en el balance que tendrá su repercusión en la infiltración, calculada como resto de dicho balance. En este contexto, también puede tener su influencia la diferencia en el tiempo de cálculo de las variables, ya que la superficie ha sido calculada para el tiempo medio del intervalo considerado, mientras que para el resto de las variables se ha tenido en cuenta el volumen total acumulado durante ese intervalo.

Tabla 8.2. Cálculo de la infiltración en el período de vaciado de las Tablas de Daimiel comprendido entre el 9 de junio de 1997 y el 22 de septiembre de 1997

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
09/06 a 08/07	29	1562.6	-7.496	0.0341	3.6050	0.0000	2.7800	8.3548	18.43
08/07 a 30/07	22	1205.7	-2.652	0.0470	0.6190	0.0000	2.0581	1.2595	4.75
30/07 a 20/08	21	906.4	-2.600	0.0110	0.1900	0.0000	1.5572	1.2458	6.55
20/08 a 02/09	13	692.3	-1.310	0.1391	0.0000	0.0000	0.5365	0.9081	10.09
02/09 a 22/09	20	537.5	-0.678	0.1113	0.0375	0.0000	0.6058	0.2205	2.05

LEYENDA PARA LAS TABLAS 8.1 Y 8.2.

A: Fechas en las que se conoce superficie encharcada y volumen almacenado en el vaso de las Tablas, obtenidos del MDT a partir de la superficie encharcada medida.

B: Número de días entre esas fechas.

C: Superficie media encharcada entre esas fechas (ha), obtenida a partir de los datos de las tablas 6.2 y 6.3.

D: Variación en el volumen almacenado en el vaso de las Tablas (hm^3), entre las fechas que se indican.

E: Aportación al vaso de las Tablas (hm^3) por precipitación directa sobre la superficie encharcada entre las fechas que se indican.

F: Aportación al vaso de las Tablas (hm^3) medida en la estación de aforos de Villarrubia de los Ojos entre las fechas que se indican.

G: Aportación al vaso de las Tablas (hm^3) por bombeo de los pozos construidos a tal efecto, entre las fechas que se indican.

H: Salidas del vaso de las Tablas (hm^3) por evaporación directa entre las fechas indicadas.

I: Infiltración al acuífero desde el vaso de las Tablas (hm^3) entre las fechas consideradas.

J : Infiltración al acuífero desde el vaso de las Tablas, expresada en mm/d.

En cualquier caso, el balance planteado no consigue alcanzar los objetivos perseguidos. Aunque es relativamente fácil de usar, no obtiene unas cifras homogéneas de capacidad de infiltración con vistas a una cuantificación rápida de pérdidas de agua por ese concepto. Además sólo sería utilizable cuando no se producen situaciones extraordinarias, ya que si aparecen entradas adicionales, el balance puede no tener en cuenta valores significativos, sobre todo si los intervalos de tiempo utilizados son grandes.

8.2 Balance diario de agua en el vaso de las Tablas de Daimiel

A la vista de los resultados obtenidos en el apartado 8.1, se ha abordado el problema de acotar la infiltración en el vaso de las Tablas planteando un balance en el que se tienen en cuenta dos de los factores que pudieron originar el no obtener resultados satisfactorios. Dichos factores son la escala temporal, que se ha reducido y homogeneizado, y el considerar de forma más rigurosa algunas de las variables que

intervienen en el balance hídrico. Para la elaboración de éste, se han tenido en cuenta algunas de las recomendaciones planteadas por García Rodríguez (1996), como el reducir la escala temporal, tener en cuenta la entrada de aguas mediante pozos, etc., aunque otras no son aplicables ya que no se pueden obtener fácilmente para una evaluación fácil de la infiltración, como son la estimación de ésta por zonas dentro del vaso, la realización de medidas de caudal a la entrada del Cigüela en el Parque Nacional, ya que serían puntuales y de poca fiabilidad, etc.

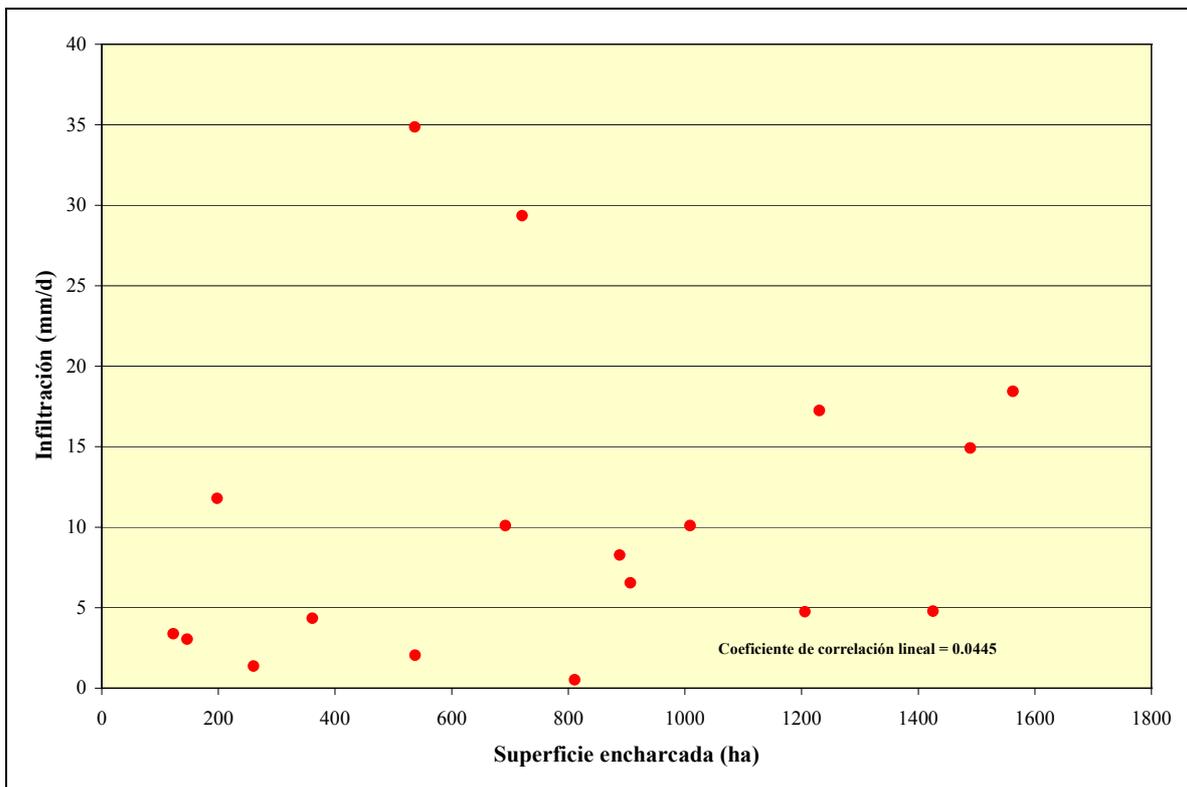


Figura 8.1 Relación entre la superficie encharcada media y la infiltración diaria calculada en dos períodos de vaciado del vaso de las Tablas de Daimiel en 1996 y 1997

En definitiva, se ha elaborado un programa para calcular a escala diaria un balance en el vaso de las Tablas de Daimiel, concretamente en la superficie encharcada, desde el 1 de enero de 1996 hasta el 30 de septiembre de 1997.

El elemento clave para la calibración de los resultados obtenidos por el modelo es la superficie encharcada observada realmente en el campo a lo largo del período de tiempo mencionado, y cuyo valor aproximado ha sido estimado, y también comparado, con las superficies más parecidas entre curvas de nivel, obtenidas a partir del Modelo Digital del Terreno (apartado 6.2.1 y figura 6.6). Ello es debido a que el espacio en el que se realiza diariamente el balance corresponde exclusivamente a la zona encharcada calculada con la ecuación correspondiente a la figura 6.7 (volumen almacenado-superficie encharcada) a la que llegan unos volúmenes aportados por diferentes fuentes de agua y de la que se detraen unos volúmenes por distintas salidas de agua.

8.2.1 Modelo conceptual

Se ha procedido a realizar un balance de agua en la superficie encharcada de las Tablas de Daimiel a escala diaria. Dicho balance se ha obtenido de acuerdo con el principio de conservación de masas, considerando los conjuntos de entradas y salidas de agua en el vaso de las Tablas (figura 8.2). En definitiva, el balance se basa en la ecuación:

$$E - S = \pm \Delta V$$

siendo,

E las entradas diarias de agua al sistema,

S las salidas diarias de agua desde el sistema, y

ΔV la variación diaria del agua almacenada en el vaso de las Tablas de Daimiel.

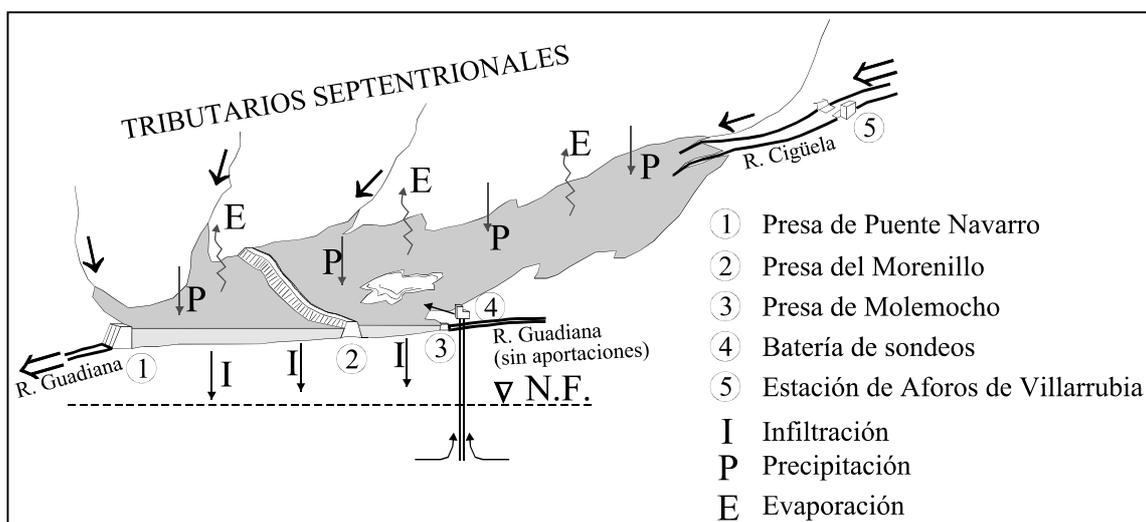


Figura 8.2. Componentes que se han considerado en el cálculo del balance diario de agua en el vaso de las Tablas de Daimiel

Los componentes del balance que han sido considerados son los siguientes:

ENTRADAS AL VASO DE LAS TABLAS (E):

- Aportaciones del río Gigüela, controladas por la Estación de Aforos de Villarrubia de los Ojos.
- Caudales bombeados por los pozos destinados al mantenimiento de zonas encharcadas en el Parque Nacional. En el período de cálculo habría que considerar los pozos de Molemocho y el Murciano, ya que los pozos de la Viña y de la Mina, no se bombearon en el período de tiempo simulado.
- Precipitación directa sobre las áreas encharcadas. La precipitación unitaria utilizada es la medida en la estación meteorológica del Parque Nacional.
- Aportaciones, no controladas en el período de cálculo, procedentes del área norte de las Tablas, y que llegan al Parque Nacional a través de las cañadas "Cachón de la

Leona”, “El Gato”, “Lobosa” y “Madre Chica del Gigüela”. Los valores utilizados se basan en los cálculos del balance de agua en el suelo, según se explicó en el apartado 7.

SALIDAS DEL VASO DE LAS TABLAS (S):

- Evaporación desde las zonas encharcadas, medida en la estación meteorológica del Parque (mayo a septiembre de 1997), y obtenida por correlación con la temperatura cuando no se han tenido medidas directas (enero de 1996 a abril de 1997).
- Infiltración hacia el acuífero infrayacente. Es la variable a cuantificar.
- Vertidos en el azud de Puente Navarro. Se producirían cuando el vaso de las Tablas se encuentra lleno y continúan las aportaciones. Este volumen de agua desembalsada no se conoce de modo detallado, aunque a partir de los datos de nivel medidos en la escala limnimétrica de la presa de Puente Navarro, confirmados por el Personal de la Comisaría de Aguas del Guadiana, se conoce la fecha en que comenzaron los vertidos (16 de enero de 1997), y la fecha de cese (6 de mayo de 1997). La Confederación Hidrográfica del Guadiana estimó en unos 80 hm³ los vertidos de 1997, cifra también recogida por Cruces y Martínez Cortina (2000). Existen, además, medidas de aportaciones aguas abajo de Puente Navarro, al menos hasta 1995 (Álvarez Cobelas, 2001), que podrían corresponder a una escala en el puente Flor de Ribera, mencionada por García Rodríguez (1996), pero no se ha dispuesto de información sobre las mismas.

* * * * *

En definitiva, y resumiendo, al vaso de las Tablas, tratado como la suma de volúmenes retenidos por la presa de Puente Navarro y el Dispositivo Hidráulico (o presa del Morenillo), según lo planteado en el apartado 6.2, se considera que llegan exclusivamente aportes superficiales procedentes del río Cigüela y de un conjunto de cuatro cañadas procedentes de los relieves montañosos del norte de la cuenca vertiente a las Tablas. Además habría que añadir como entrada el bombeo de agua desde el acuífero de la Mancha occidental como apoyo al encharcamiento de la zona húmeda. A la superficie encharcada por esos volúmenes, calculada de acuerdo con los postulados del apartado 6.2.2, llegaría también otro volumen correspondiente a la precipitación.

Por otra parte, de esa superficie encharcada habrá que detraer un volumen perdido por evaporación en la lámina de agua. Además, si el volumen almacenado alcanza el máximo posible y siguen existiendo aportes, habrá un vertido aguas abajo de las Tablas por el azud de Puente Navarro (foto 8.1), que se obtiene como resto del balance, como parte de las salidas.

En la zona encharcada se produciría una infiltración. Ésta se ha supuesto como el producto de un coeficiente de infiltración (volumen infiltrado en un día en una superficie unitaria) por la superficie encharcada. Ese coeficiente se ha ido acotando mediante sucesivas ejecuciones del programa.

No se han tenido en cuenta aportes superficiales procedentes de los ríos Guadiana y Azuer, por no haber existido en el período considerado (anexo 6), ni tampoco aportes subterráneos, ya que los niveles piezométricos se encuentran por debajo del fondo del vaso de las Tablas.

Por otro lado, se debe mencionar que, para los volúmenes calculados en función de la superficie encharcada (precipitación, evaporación e infiltración), se ha incluido en el cálculo un sector del antiguo cauce del Guadiana situado aguas arriba del azud de Molemocho. Esa zona, como se ha mencionado, estuvo inundada durante un amplio período del año 1997 (fotos 8.2 y 8.3), al haberse destruido el azud de contención (Molemocho) que favorece el encharcamiento de las Tablas (anexo 6).

Finalmente, se ha supuesto como condición inicial, que el 1 de enero de 1996, fecha de comienzo del cálculo del balance, el volumen almacenado en el vaso de las Tablas es nulo.

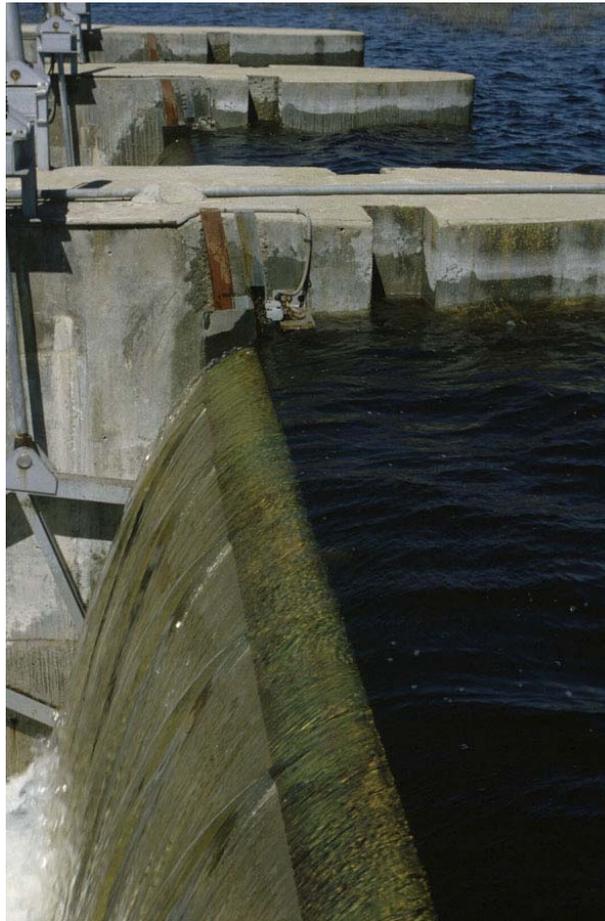


Foto 8.1. Vertidos de agua de las Tablas de Daimiel hacia el río Guadiana en la presa de Puente Navarro

8.2.2 Programa de cálculo

Para una estimación más fácil y rápida de la infiltración se ha elaborado, de acuerdo con el modelo conceptual planteado en el apartado 8.2.1, un programa en lenguaje FORTRAN que permite calcular el balance diario en la zona encharcada del vaso de las Tablas de Daimiel. Este programa ha sido preparado, en principio, para la simulación del período comprendido entre el 1 de enero de 1996 y el 30 de septiembre de 1997 con unas características del espacio físico como las planteadas en el apartado 6.2, aunque con escasas modificaciones puede ser aplicado a otros períodos de tiempo, y también a otras relaciones entre las variables que definen la geometría del vaso de las Tablas de Daimiel.



Foto 8.2. Antigo cauce del río Guadiana, el 27 de marzo de 1997, entre los puentes de Molemocho y Griñón, inundado por aportes en sentido aguas arriba procedentes de las Tablas de Daimiel desde la zona de Molemocho



Foto 8.3. Antigo cauce del río Guadiana inundado, el 27 de marzo de 1997, visto desde el puente de Molemocho

La estructura interna del programa es relativamente sencilla, y se ha sintetizado en la figura 8.3. A continuación se detalla el funcionamiento del mismo, mencionando la denominación de los diferentes parámetros y variables que intervienen.

El primer paso en el programa es la lectura de datos (figura 8.3), los cuales se introducen de dos formas. La primera es mediante un fichero externo, denominado *B.DAT*, con formato libre. La segunda es incluyendo otros datos dentro del propio programa.

Por lo que se refiere a los datos de entrada que figuran en el fichero externo, y cuyos valores numéricos aparecen en el anexo 12, son los siguientes:

- a) Datos de precipitación diaria (mm/d), $P(I)$.
- b) Caudales medios diarios (m^3/s) medidos en la estación de aforos de Villarrubia de los Ojos, $QV(I)$.
- c) Escorrentía diaria unitaria generada en el área norte del vaso de las Tablas (mm/d), $AAN(I)$.
- d) Caudal diario bombeado por el pozo Molemocho (m^3/d), $AMOL(I)$.
- e) Caudal diario bombeado por el pozo el Murciano (m^3/d), $AMUR(I)$.
- f) Evaporación diaria desde el vaso de las Tablas (mm/d), $EV(I)$.

Según los datos proporcionados por la Dirección del Parque Nacional, durante el período a que se refiere el balance sólo bombearon los pozos de Molemocho y el Murciano, como se ha mencionado.

Además, fuera del fichero reseñado, pero dentro del programa, se necesitan los datos siguientes:

- Número de días de simulación ($ND=639$).
- Coeficiente de infiltración media diaria, desde la superficie encharcada en el vaso de las Tablas (mm/d), XIN . Se deben ensayar varios valores de este parámetro al objeto de, por una parte, obtener el mejor ajuste entre superficies encharcadas reales y simuladas, y por otra, analizar la sensibilidad del sistema a este parámetro. Este será el parámetro a modificar para la calibración del balance, y para obtener, por lo tanto el orden de magnitud de la infiltración.
- Volumen máximo almacenable en el vaso de las Tablas, $VMAX$. Es la capacidad máxima del vaso de las Tablas con el agua en reposo, considerando como cotas máximas de encharcamiento la de 606 m desde Puente Navarro hasta el Dispositivo Hidráulico, y la de 606.9 m, aguas arriba de éste. Según la escala limnimétrica de Quinto la Torre la máxima cota alcanzada por el agua en el Dispositivo Hidráulico fue la de 606.9 m durante el periodo de tiempo que se simula; esto implica que, durante el tiempo considerado, el volumen máximo, $VMAX$, sería 20.935 hm^3 .

Una vez leído el fichero de datos el programa realiza los siguientes cálculos (figura 8.3):

- Cálculo en el día I de las entradas al vaso de las Tablas por escorrentía y bombeos de pozos, expresadas en hm^3 , $A(I)$. La escorrentía incluye las aportaciones medidas en Villarrubia de los Ojos, y las que se producen en las cañadas “Cachón de la Leona”, “El Gato”, “Lobosa” y “Madre Chica del Gigüela”, obtenidas multiplicando, para cada día, el área de cada una de las cuencas de las cañadas por el correspondiente valor de la escorrentía unitaria, $AAN(I)$, que fue calculada mediante el modelo precipitación–

escorrentía, basado en el balance de agua en el suelo (apartado 7), y haciendo el conveniente cambio de unidades para dar el resultado en hm^3 .

- Cálculo del volumen almacenado en el vaso de las Tablas el día I :

$$VALM(I) = VALM(I-1) + A(I)$$

Si el volumen almacenado calculado es mayor que el máximo especificado, $VMAX$, $VALM(I)$ se hace igual a éste, y el sobrante se considera como vertidos de Puente Navarro ese día, $VPN(I)$.

- Cálculo de la superficie encharcada, en hectáreas, en función del volumen almacenado, aplicando la ecuación de la figura 6.7.

- Cálculo de la precipitación $P(I)$ sobre el área encharcada, en hm^3 , multiplicando los mm/d de lluvia por el área encharcada calculada, y haciendo las operaciones oportunas para dar el resultado en unidades homogéneas.

- Cálculo del volumen total almacenado en el vaso de las Tablas el día I , considerando la precipitación areal: $VALM(I) = VALM(I) + P(I)$. Si el volumen almacenado calculado es mayor que el máximo especificado, $VMAX$, $VALM(I)$ se hace igual a éste, y el sobrante se añade a los vertidos de Puente Navarro ese día, $VPN(I)$, calculados anteriormente

- Vuelve a calcular la superficie encharcada, en hectáreas, el día I , pero considerando ya el volumen de agua caído por precipitación sobre el área encharcada.

- Cálculo de las salidas del vaso de las Tablas por evaporación directa el día I , multiplicando la evaporación en mm/d , $EV(I)$, por la superficie encharcada, en hectáreas, y por los factores adecuados para dar el resultado en hm^3 .

- Cálculo del volumen infiltrado el día I , $VINF(I)$, multiplicando el área encharcada el día I (ha), por la infiltración media diaria, XIN , en mm/d , y por los factores adecuados para dar el resultado en hm^3 .

- Cálculo de las aportaciones totales del día I : $VOL(I) = A(I) + P(I)$.

- Cálculo de las salidas totales sumando las salidas por Puente Navarro, la evaporación y la infiltración, $SAL(I) = APN(I) + EV(I) + VINF(I)$.

- Cálculo del volumen finalmente almacenado en el vaso de las Tablas en el día I , que será considerado como volumen almacenado al comienzo del día siguiente:

$$VALM(I) = VALM(I) - EV(I) - VINF(I)$$

- Cálculo de la variación en el almacenamiento en el día I , como diferencia entre el volumen almacenado en el vaso de las Tablas el día anterior y el día que se trate:

$$VARVOL(I) = VALM(I-1) - VALM(I)$$

Finalmente el programa calcula los totales de entradas, salidas y variación en el almacenamiento independientemente para el periodo comprendido entre el 1 de enero de 1996 y 30 de septiembre de 1996, y para el año hidrológico 1996-97.

Los resultados del balance diario y los totales quedan escritos en dos ficheros denominados *ENTRADAS* y *SALIDAS*. En este último fichero se almacena también la superficie encharcada para cada día obtenida por el programa, es decir la superficie encharcada simulada, que se comparará con la superficie observada durante la calibración.

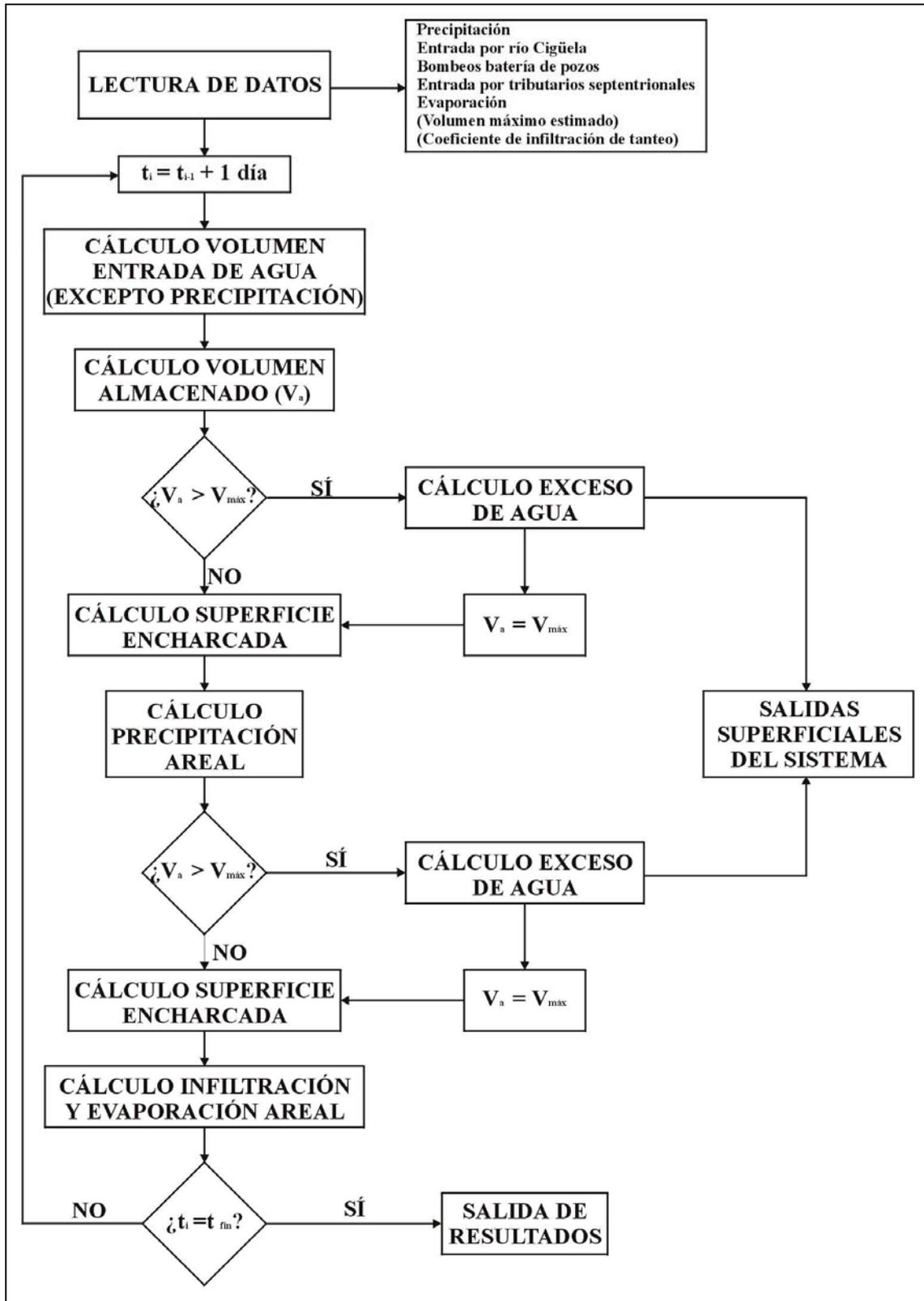


Figura 8.3. Organigrama del funcionamiento del programa realizado para el cálculo del balance diario de agua en la superficie encharcada del vaso de las Tablas de Daimiel

8.2.3 Calibración: Aproximación mediante ensayo-error

Como se ha venido diciendo, el elemento clave para la validación del balance simulado es la comparación de las superficies encharcadas obtenidas por el programa con las superficies encharcadas reales observadas en campo y cuantificadas para la misma fecha. Cuando la evolución de encharcamiento proporcionada por el programa se aproxime lo suficiente a la real, el balance puede considerarse aceptable para órdenes de magnitud que se pueden utilizar en la gestión de recursos hídricos.

Se han dado varias pasadas al programa considerando valores de infiltración media diaria desde la superficie encharcada en el vaso de las Tablas (*XIN*) variables entre 3 y 30 mm/d, obteniéndose la mayor semejanza entre superficie encharcada medida y simulada para el valor de infiltración media diaria de 10 mm (figura 8.4). En la figura 8.5 puede apreciarse el alto grado de correlación entre los valores que muestran el encharcamiento real en el ámbito del Parque Nacional y el simulado para el periodo de tiempo comprendido entre el 1 de enero de 1996 y el 30 de septiembre de 1997, sin considerar la componente temporal.

En la figura 8.4 puede apreciarse cómo la curva de evolución real muestra un pico, indicando un máximo de superficie encharcada hacia principios de febrero de 1997, mientras que la curva de evolución simulada presenta, días antes de esa fecha, el comienzo de una meseta (superficie encharcada constante) que dura hasta finales de abril de ese año.

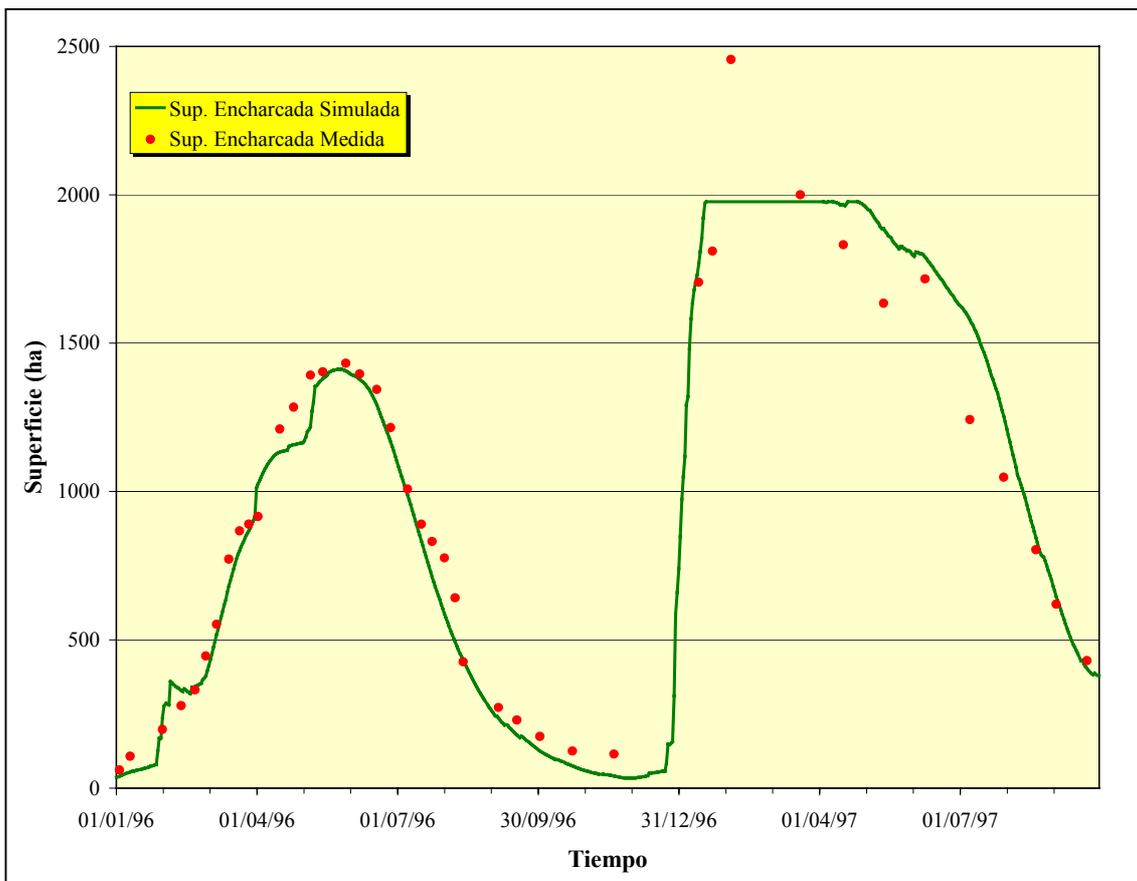


Figura 8.4. Comparación de las superficies encharcadas observadas y simuladas en el ámbito de las Tablas de Daimiel para el mejor ajuste encontrado mediante el método de ensayo y error

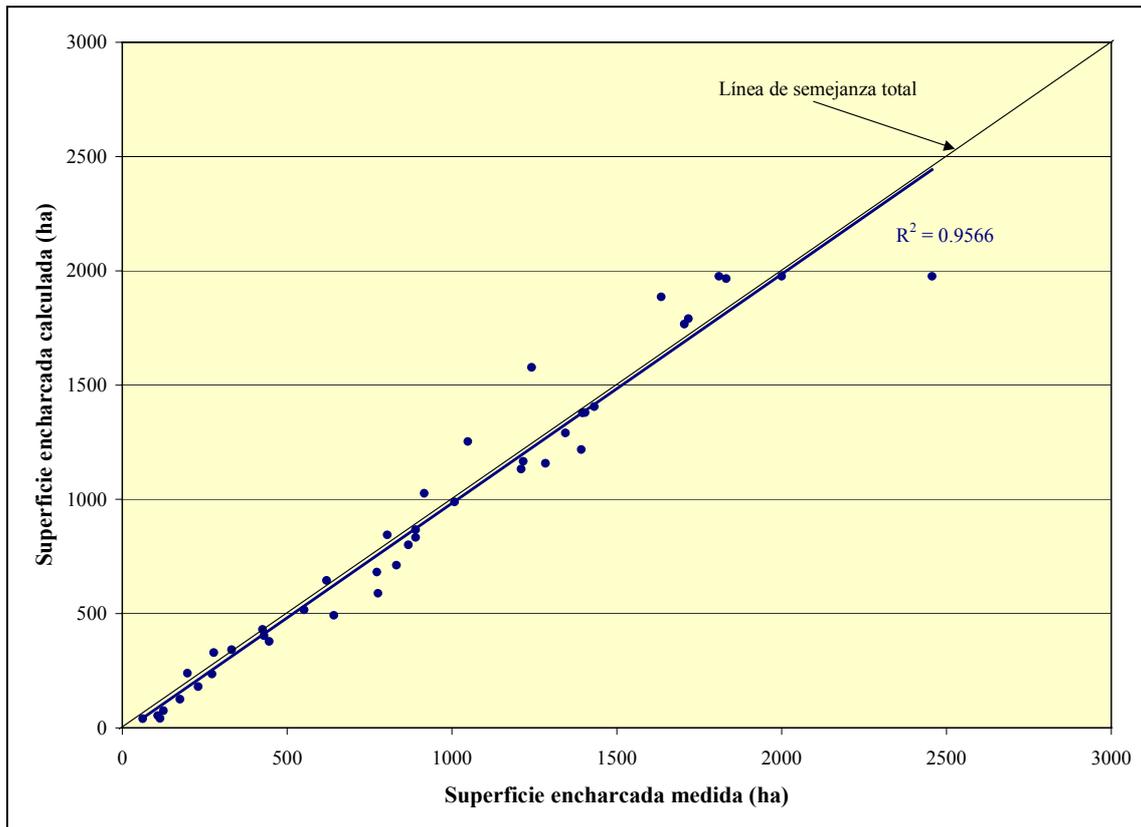


Figura 8.5. Correlación entre los valores de superficie encharcada medida y calculada suponiendo coeficiente de infiltración media diaria de 10 mm/d

Este hecho es debido a que la curva de simulación pone de manifiesto que a partir de mediados de enero de 1997 y hasta finales de abril se producen los vertidos en la presa de Puente Navarro. Durante esta época, es decir mientras duran los vertidos, el volumen embalsado y la superficie encharcada calculados por el programa permanecen constantes, dado que se alcanzan los valores máximos, de acuerdo con el valor asignado a *VMAX*.

En la realidad, y coincidiendo sensiblemente con el modelo, los vertidos por Puente Navarro comenzaron a mediados de enero de 1997 y terminaron a principios de mayo de ese año, según se deduce, aunque con reservas, de las medidas efectuadas en la escala de la presa de Puente Navarro (anexo 1). Sin embargo, las observaciones en esas fechas, aunque escasas, no muestran los valores uniformes de la superficie encharcada obtenida en la simulación. Este hecho se debe a que los planos de encharcamiento realizados durante ese período contabilizan, además de la superficie encharcada dentro de los límites del Parque Nacional, el encharcamiento en la “zona de protección” aguas abajo de Puente Navarro hasta el puente de Flor de Rivera, y aguas arriba del ámbito geográfico considerado en la presente Tesis (figura 4.1 y anexo 3).

Además, esa parte de zona inundada medida realmente situada en la zona nororiental, se encuentra por encima de la curva de nivel más alta obtenida del MDT para el cálculo de la superficie del vaso inundable. Esa superficie, también fuera del ámbito del Parque Nacional seguramente se inundó por el desbordamiento del Cigüela y de la Madre Chica del Cigüela a su entrada al humedal, y por la propia pendiente del gran volumen de agua fluyendo desde estos cauces hacia el Parque Nacional. En este sentido, hay que recordar que las superficies simuladas utilizadas en la calibración corresponden a láminas de

agua en equilibrio en el vaso de las Tablas de Daimiel, correspondientes a las curvas de nivel del MDT.

8.2.4 Análisis de sensibilidad. Resultados

Aunque, como se ha comentado, se han realizado tanteos con coeficientes de infiltración comprendidos entre 3 mm/d y 30 mm/d, en la figura 8.6 se han representado las superficies inundadas simuladas para valores de infiltración de 5 mm/d, 10 mm/d y 15 mm/d, junto con las superficies encharcadas medidas en campo.

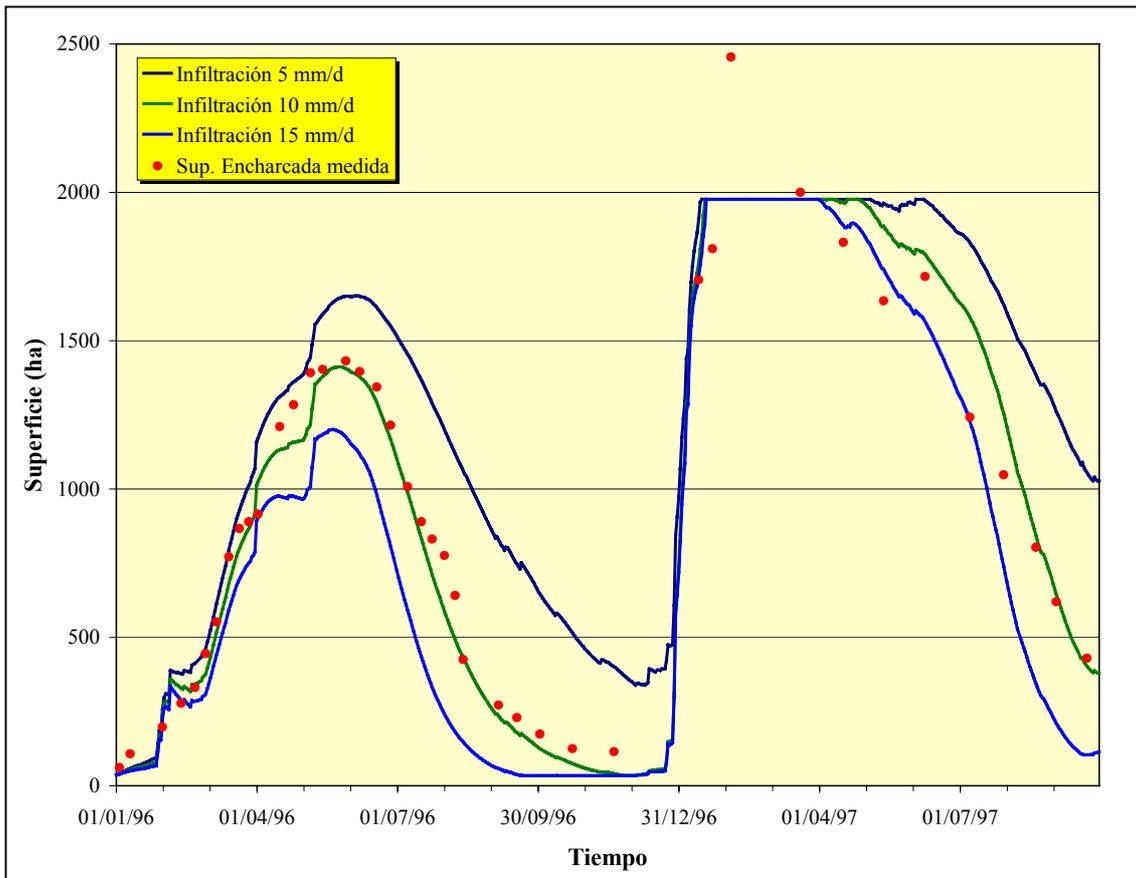


Figura 8.6. Comparación de las superficies encharcadas medidas y las simuladas con coeficientes de infiltración media de 5 mm/d, 10 mm/d y 15 mm/d

De esa representación, aparte de apreciarse parte del proceso de calibración, descrito en el apartado 8.2.3, puede obtenerse una muestra de la sensibilidad del sistema a la variación del valor de la recarga media diaria a escala del vaso de las Tablas de Daimiel. Los resultados completos de esas simulaciones se muestran en el anexo 13.

De la figura 8.6 se deduce que, dada la geometría asumida en la que se consiguen incrementos considerables de superficie encharcada con aumentos relativamente reducidos del volumen almacenado (figura 6.7), el modelo es muy sensible a la variación del coeficiente medio diario de infiltración. Así pues, con el modelo conceptual utilizado, y aunque el modelo operativo no ha sido concebido para ello, si lo que se quiere estimar es la superficie inundada, es necesario contar con un modelo geométrico detallado y fiable. De todos modos, a la vista de los resultados obtenidos

durante la calibración (apartado 8.2.3), con la combinación de la geometría asumida junto con un coeficiente de infiltración de 10 mm/d, la similitud de los valores de superficie simulados con los medidos puede ser aceptable, salvo para algunos valores que fueron explicados en el apartado anterior.

Por otro lado, en las tablas 8.3 y 8.4 muestran respectivamente los resultados globales de los balances para los períodos comprendidos entre el 1 de enero de 1996 y el 30 de septiembre de 1996, y entre el 1 de octubre de 1996 y el 30 de septiembre de 1997. A partir de las mismas se aprecia que, en ambos períodos y para los supuestos de coeficiente de infiltración utilizados, la diferencia entre entradas y salidas es escasa, suponiendo en todos los casos un pequeño incremento de almacenamiento de agua en la zona húmeda.

Tabla 8.3. Resultados del balance obtenido por simulación para el periodo comprendido entre el 1 de enero de 1996 y el 30 de septiembre de 1996

	INFILTR=5 mm/d	INFILTR=10 mm/d	INFILTR=15 mm/d
ENTRADAS (hm³)			
PRECIPITACIÓN	1.84	1.84	1.84
AP. VILLARRUBIA	18.76	18.76	18.76
AP. ZONA NORTE	3.72	3.72	3.72
POZOS	2.30	2.30	2.30
TOTAL ENTRADAS	26.62	26.62	26.62
SALIDAS (hm³)			
INFILTRACION	13.62	19.25	21.48
EVAPORACION	10.31	6.91	4.81
PTE. NAVARRO	0.00	0.00	0.00
TOTAL SALIDAS	23.93	26.16	26.29
VAR. ALMACEN.	2.69	0.46	0.33

Sin embargo, las variables que componen las salidas del balance varían considerablemente mostrando, al igual que la superficie encharcada, que el sistema planteado es muy sensible a la modificación del coeficiente de infiltración media diaria. En cambio, en la precipitación areal, que depende de la superficie encharcada pero sólo influye puntualmente en el tiempo, no se aprecia variabilidad en los resultados obtenidos.

Tomando como referencia los valores calculados para la simulación realizada con coeficiente de 10 mm/d, para la cual la infiltración total del período de simulación sería de 63 hm³, los valores tomados en las otras simulaciones consideradas se desvían hasta en un 36%. Esas variaciones son mayores para el período comprendido entre el 1 de octubre de 1996 y el 30 de septiembre de 1997, cuando los volúmenes de entrada de agua al vaso de las Tablas son mayores. En este último período, en el que el agua de entrada proviene de procesos naturales extraordinarios, la infiltración calculada más aceptable sería de 44 hm³, aunque podría variar hasta en cerca del 40%. En cambio, para el período comprendido entre el 1 de enero de 1996 y el 30 de septiembre de ese año, cuando la mayor parte de las entradas proceden de las infraestructuras del trasvase Tajo-

Segura, la infiltración estimada es cercana a 20 hm³, pero en las simulaciones consideradas varía del orden del 30% de ese valor.

Tabla 8.4. Resultados del balance obtenido por simulación para el periodo comprendido entre el 1 de octubre de 1996 y el 30 de septiembre de 1997

	INFILTR=5 mm/d	INFILTR=10 mm/d	INFILTR=15 mm/d
ENTRADAS (hm³)			
PRECIPITACIÓN	4.96	4.96	4.96
AP. VILLARRUBIA	122.33	122.33	122.33
AP. ZONA NORTE	14.14	14.14	14.14
POZOS	0.00	0.00	0.00
TOTAL ENTRADAS	141.43	141.43	141.43
SALIDAS (hm³)			
INFILTRACION	26.31	43.61	57.04
EVAPORACION	19.66	15.88	12.56
PTE. NAVARRO	94.18	80.70	71.31
TOTAL SALIDAS	140.15	140.19	140.91
VAR. ALMACEN.	1.28	1.24	0.52
Periodos con vertidos por Puente Navarro	15 de enero a 4 de mayo 3 de junio a 8 de junio	18 de enero a 10 de abril 20 de abril a 26 de abril	18 de enero a 31 de marzo

Por otra parte, en la figura 8.7 se ha representado la evolución de la infiltración diaria calculada en el período de simulación para los tres coeficientes que se vienen mencionando. En ella se aprecian igualmente las grandes diferencias de cálculo, tanto referentes al valor diario de la infiltración, como a la afección temporal de la misma.

En lo que respecta al valor diario, alcanza su máximo en el período de llenado completo del vaso de las Tablas, cuando la superficie encharcada es máxima también, ya que la infiltración es directamente proporcional a ella. Ese máximo es del orden de 0.2 hm³/d para un coeficiente de 10 mm/d, llegándose a alcanzar 0.14 hm³/d en el período de enero a septiembre de 1996, cuando la alimentación fundamental procede del agua del trasvase Tajo-Segura. Para los otros coeficientes, representados a título orientativo, los valores máximos calculados corresponden aproximadamente a 0.30 hm³/d para un coeficiente de 15 mm/d, y de 0.10 hm³/d para el coeficiente de 5 mm/d, mientras que para el período del trasvase se llega respectivamente a 0.18 hm³/d y a 0.08 hm³/d.

La duración de los períodos de máxima infiltración es, lógicamente, mayor cuanto menor sea el coeficiente de infiltración asignado, al permanecer más tiempo una mayor superficie encharcada para la misma distribución temporal de las aportaciones.

Para el total del período simulado, el volumen infiltrado, para un coeficiente de 10 mm/d es cercano a 63 hm³, que representa un 44% del total de entradas estimadas, variando entre un 23% y un 56% para los coeficientes de 5 mm/d y de 15 mm/d respectivamente.

La infiltración es más significativa cuando se analiza por separado el período comprendido entre el 1 de enero de 1996 y el 30 de septiembre de ese año. Este período representa, la situación hidrológica más frecuente en el Parque Nacional, en la que las

entradas de agua cuantitativamente más importantes proceden, a través del río Cigüela, de los aportes superficiales exteriores a la cuenca del Guadiana. Teniendo en cuenta exclusivamente el coeficiente de infiltración de 10 mm/d, que, como se ha venido diciendo, es el que mejor representa la respuesta observada del sistema, la infiltración en esa etapa es cercana a 20 hm³, lo que significaría el 72% de las entradas totales al sistema, y es del orden de las entradas medidas en el río Cigüela en la estación de aforos de Villarrubia de los Ojos.

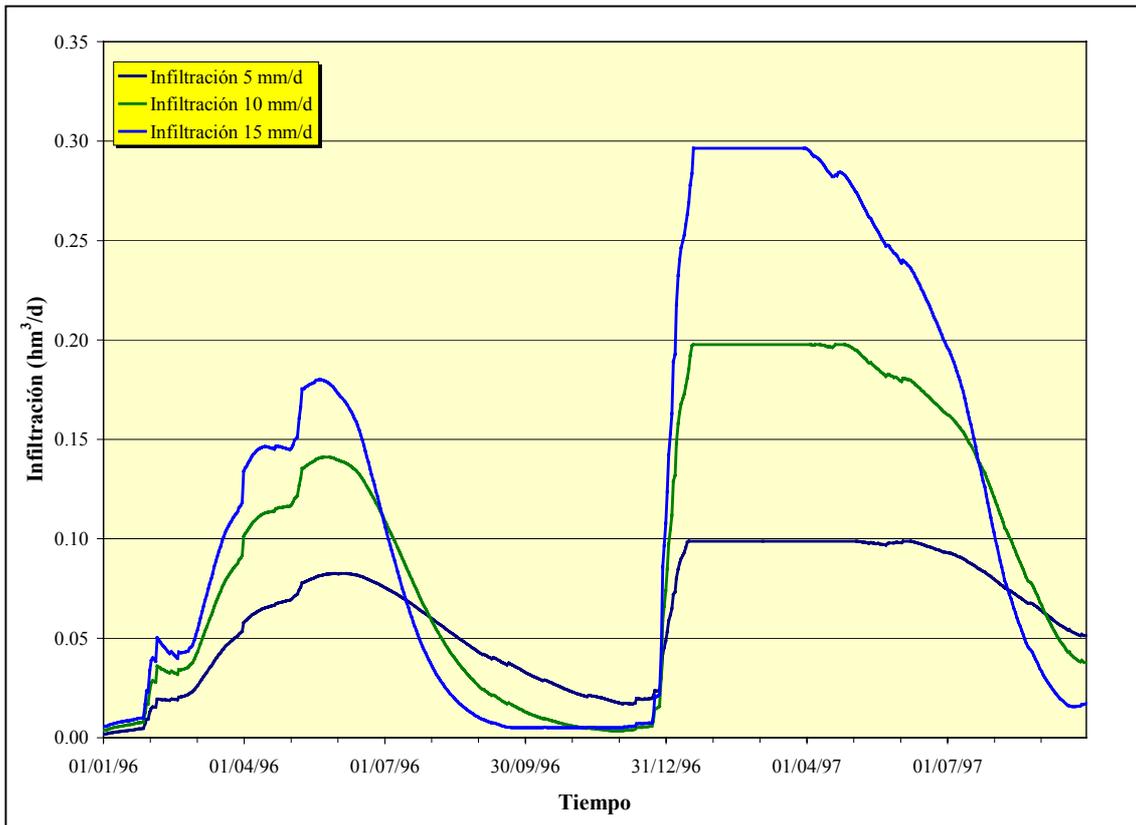


Figura 8.7. Evolución de los volúmenes infiltrados simulados suponiendo coeficientes de infiltración media diaria de 5 mm/d, 10 mm/d y 15 mm/d

La situación del año hidrológico 1996-97 ha sido excepcional, ya que la mayor parte del agua que entra en las Tablas procede de la escorrentía superficial “natural” de los ríos que confluyen en el Cigüela, incluyendo los excedentes del río Guadiana procedentes del embalse de Peñarroya en el Campo de Montiel. Aún así, la infiltración calculada, 44 hm³ considerando 10 mm/d, es del orden del 30% del total de entradas de agua, y del 36% de aquéllas medidas en el río Cigüela en la estación de Villarrubia de los Ojos.

Estas dos situaciones se aprecian de modo evidente en la figura 8.8, donde se ha representado la evolución de los volúmenes diarios de entrada de agua desde el río Cigüela a las Tablas y de los calculados para la infiltración en ellas. Destaca, como se ha dicho, el período comprendido entre enero y septiembre de 1996 por la semejanza en los volúmenes totales de ambas variables.

Finalmente, y de modo complementario, se pueden mencionar los resultados obtenidos referentes a las salidas de agua de las Tablas desde la presa de Puente Navarro. Esas salidas representarían los excedentes del sistema cuando el vaso se encuentre lleno.

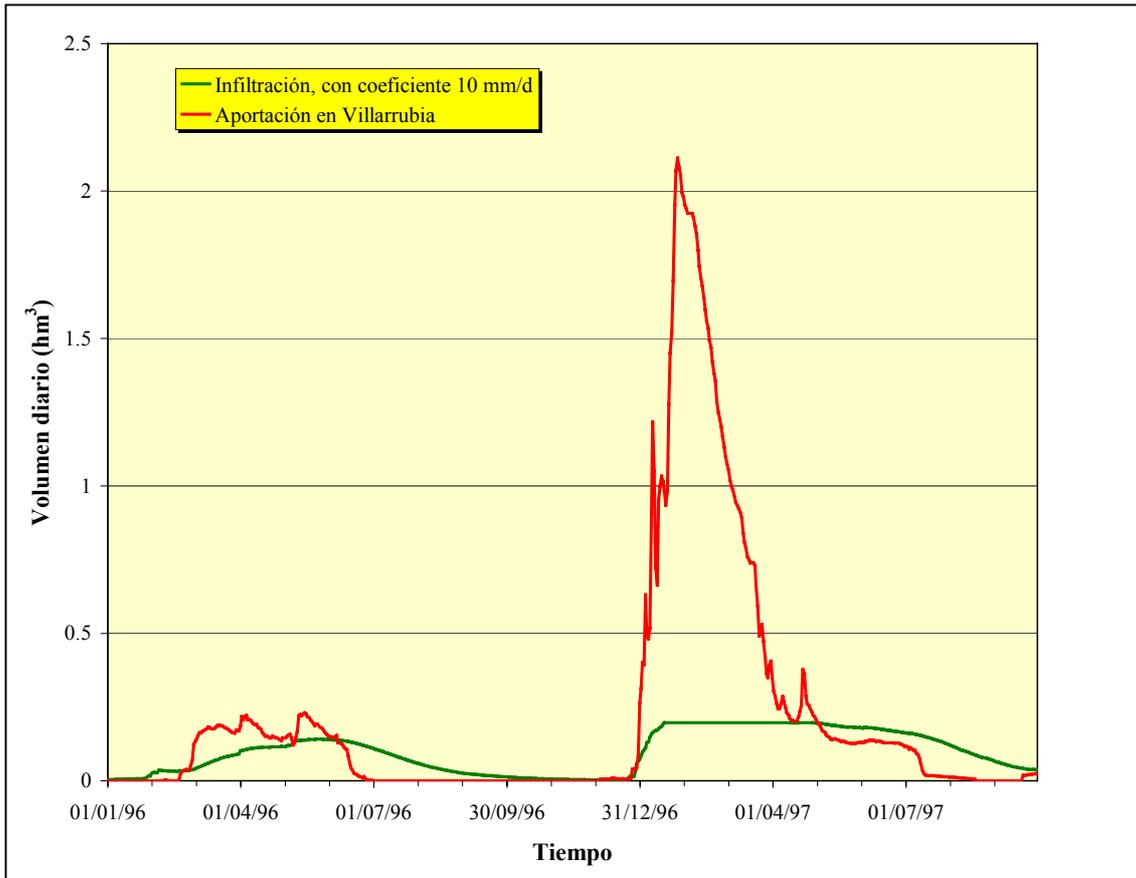


Figura 8.8. Comparación de la aportación diaria medida en la estación de aforos de Villarrubia de los Ojos y la infiltración calculada suponiendo un coeficiente de infiltración de 10 mm/d

Como se ha mencionado, el valor de esas salidas no se ha conocido en detalle y ha sido calculado también como uno de los componentes de las salidas del vaso de las Tablas a partir del balance diario de agua, aunque la Confederación del Guadiana las estimó en unos 80 hm³ para la avenida de 1997, que coincide sensiblemente con los 80.7 hm³ calculados por el modelo para un coeficiente de infiltración media diaria de 10 mm/d.

La estimación de esa variable es significativa, no sólo por su valor cuantitativo, sino también teniendo en cuenta las fechas en las que se calculan esos vertidos. Así, se conoce que se produjeron vertidos por encima de las compuertas de la presa entre el 16 de enero de 1997 y el 6 de mayo de ese mismo año. La variación del tiempo en el que se simulen vertidos será otro elemento que puede servir tanto para contrastar los resultados del modelo como para comprobar la sensibilidad del mismo ante distintos coeficientes de infiltración media diaria. Hay que resaltar, sin embargo, que durante las fechas en las que se produjeron vertidos, se comprobó que las compuertas de la presa de Puente Navarro no se encontraban todas a la misma altura con lo que los resultados obtenidos pueden diferir de modo apreciable, dado el modelo geométrico asumido (apartado 6.2).

A pesar de ello, el período de vertidos calculado es razonablemente parecido al real para un coeficiente de infiltración de 10 mm/d, como se comentó anteriormente, y según refleja la tabla 8.4, ya que la simulación muestra el comienzo de vertidos tan sólo 2 días después del real, y el final unos 10 días antes del real. Para coeficientes de infiltración

mucho mayores, los vertidos simulados finalizan considerablemente antes que los reales, y para coeficientes menores finalizan mucho después.

Por otra parte, los volúmenes totales vertidos sólo afectan al año hidrológico 1996-97 (tabla 8.4). Los resultados obtenidos, como se ha dicho, son de unos 80 hm³ para el coeficiente de infiltración de 10 mm/d, con una diferencia máxima de un 17% para los otros coeficientes considerados, relativamente más reducida que para otras variables comparadas anteriormente.

Estos resultados también se muestran en la figura 8.9, en la que se comparan los volúmenes vertidos para los tres coeficientes de infiltración media diaria de 5 mm/d, 10 mm/d y 15 mm/d. En ella se observa que a escala diaria se aprecian diferencias cuantitativas, pero las formas de las curvas son muy semejantes. En todos los casos, la variación de los vertidos está ligada a los aportes de agua desde el río Cigüela, ya que desde mediados de enero hasta el fin de los vertidos, la curva de las aportaciones medidas en Villarrubia de los Ojos (figura 8.8) y la de los vertidos calculados son semejantes, aunque en esta última se suman también los efectos de la lluvia sobre la lámina de agua del Parque y los aportes de los afluentes de la margen derecha de las Tablas (apartado 7). En conjunto existe un fuerte pico a mediados de enero de 1997 de unos 2.7 hm³/d (con un 4% de diferencia en función del coeficiente asumido) que se va reduciendo paulatinamente de acuerdo con el cese de aportes desde el río Cigüela.

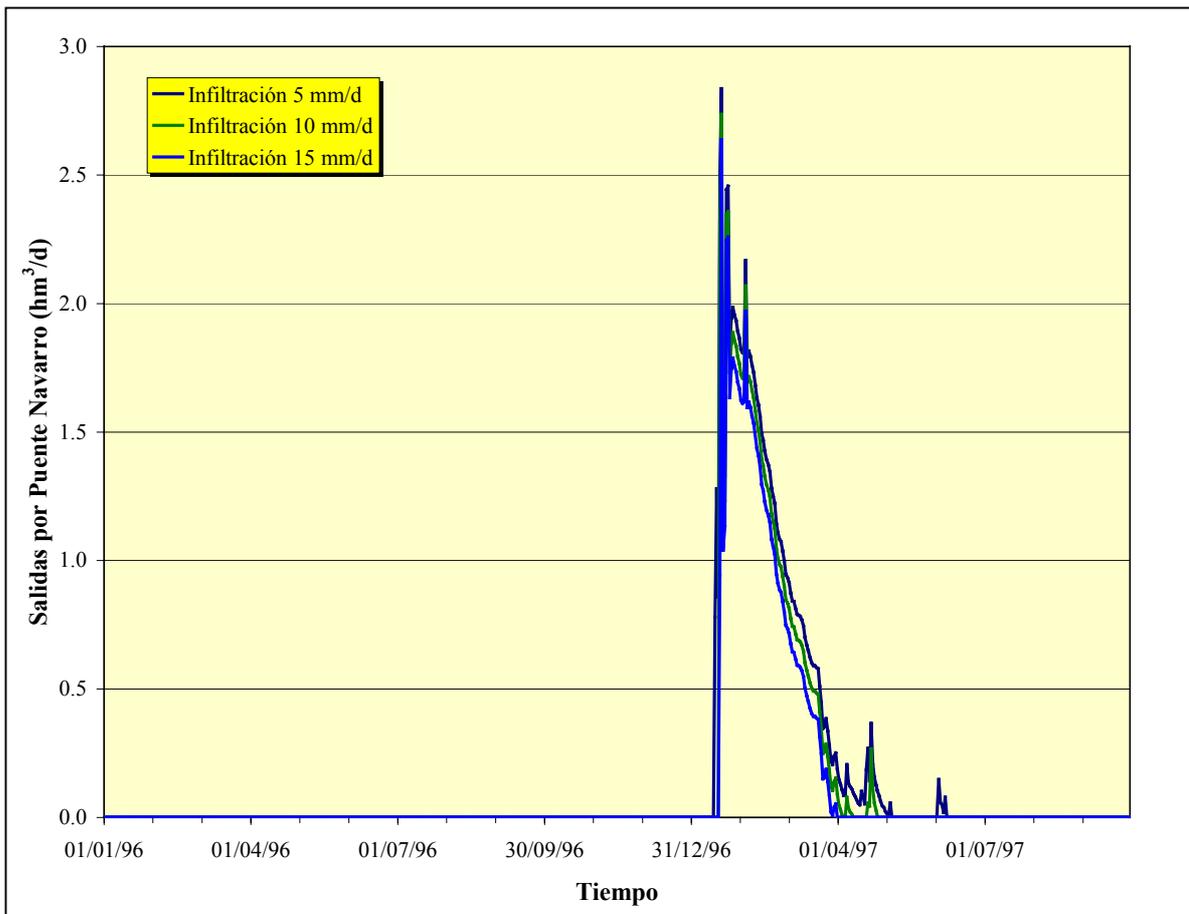


Figura 8.9. Evolución de los volúmenes vertidos en la presa de Puente Navarro simulados suponiendo coeficientes de infiltración media diaria de 5 mm/d, 10 mm/d y 15 mm/d

8.3 Estimación automática de la infiltración y parámetros geométricos del vaso

En cualquier sistema a analizar, como ocurre también en la zona húmeda del Parque Nacional de las Tablas de Daimiel, se pueden definir una serie de elementos, como son:

- Espacio físico, que en general suele estar caracterizado por una geometría fijada entre unos límites determinados.
- Parámetros, que son los valores que caracterizan las propiedades del sistema. En el caso de las Tablas de Daimiel que se viene analizando, el coeficiente de infiltración sería uno de los parámetros del mismo.
- Acciones exteriores o excitaciones, son aquéllas que modifican la situación del sistema dentro de sus límites. Para el sistema analizado corresponderían a las entradas y salidas de agua en las Tablas.
- Variables de estado o datos de control son las respuestas del sistema ante las acciones externas, y están condicionadas por la geometría y los parámetros. Para el sistema planteado, podrían considerarse como variable de estado la superficie encharcada de acuerdo con el volumen almacenado.
- Observaciones, que es la información histórica de las variables en uno o varios puntos del sistema. En el modelo conceptual de las Tablas de Daimiel que se ha explicado, las observaciones estarían representadas por las medidas de la superficie inundada en distintas fechas a lo largo del período analizado.

La diferencia entre las características geométricas, parámetros, acciones exteriores y datos de control puede no ser clara en cada caso particular (Watermark Computing, 1998). Así ocurre en el vaso de las Tablas de Daimiel, donde la geometría en la que actúan algunas entradas y salidas de agua es variable en función del estado de dicho sistema.

Un modelo generalmente intenta reproducir de modo simplificado y controlado un sistema, caracterizándolo mediante su geometría y parámetros, para, aplicando unas acciones, obtener unas respuestas (variables de estado). La similitud entre las variables y los datos reales (observaciones) puede dar idea del grado de aproximación entre la representación del sistema en el modelo y el sistema real. La mayor parte de las veces es necesario modificar las condiciones inicialmente planteadas en el sistema simulado para conseguir la aproximación adecuada, en un proceso denominado calibración.

La calibración en los modelos es necesaria cuando no se conocen algunos de los elementos que intervienen en la modelización. Dicha calibración se realiza mediante pasadas sucesivas del mismo, modificando los valores de esos componentes tantas veces como sea necesario hasta alcanzar una aproximación entre los valores calculados y los reales que se considere adecuada para caracterizar el sistema y alcanzar los objetivos perseguidos.

Mediante los métodos directos, es el modelador el que realiza las modificaciones y las comparaciones de los resultados del modelo con las medidas reales que se utilizan para calibrar. Generalmente se usa el método de aproximación por ensayo y error (apartado 8.2.3). Suele ser un medio costoso en tiempo y dinero, aunque el control que se tiene de las entradas y salidas del modelo puede ser muy adecuado, y puede permitir un mejor conocimiento del medio simulado.

Debido a esos costes que suponen ese tipo de calibración, se viene imponiendo la calibración por el método inverso. En ella se intenta, mediante algún procedimiento matemático de ajuste, conocer de forma automática qué valores de parámetros (o acciones externas) de un sistema originan respuestas semejantes a las observadas. Con este método es necesario conocer de modo muy preciso el modelo conceptual así como los valores que se utilizan en el procedimiento matemático de estimación automática, ya que, en algunos casos, combinaciones muy diversas de parámetros pueden originar respuestas semejantes en el modelo a calibrar.

En el presente apartado se intenta contrastar el resultado obtenido mediante calibración por el método ensayo-error, y los conseguidos aplicando una calibración mediante el método inverso (estimación de parámetros a partir de las observaciones reales como respuestas de un sistema con dichos parámetros).

8.3.1 El programa utilizado

Se ha usado un programa ampliamente difundido y contrastado para la estimación automática de parámetros. En concreto se ha usado el programa PEST v.4.01 (Watermark Computing, 1998, 2000) en su versión PESTLITE, que permite estimar hasta 4 parámetros pudiendo compararse hasta 80 observaciones con los resultados del modelo.

PEST (acrónimo de Parameter ESTimation) es, en realidad, un conjunto de programas que permite la estimación no lineal de parámetros para casi cualquier tipo de modelo, tanto si el usuario tiene acceso al código fuente como si no lo tiene. Los escasos requisitos necesarios para la aplicación de la versión de PEST que se ha utilizado en la presente Tesis son:

- El fichero o ficheros que contienen las acciones y/o parámetros que se quieren ajustar con PEST deben ser ficheros ASCII, aunque el modelo pueda leer muchos ficheros de entrada, algunos de los cuales pueden ser binarios y otros ASCII.
- El fichero o ficheros que contienen los resultados a comparar con las medidas de campo o laboratorio deben ser ficheros ASCII, aunque el modelo pueda escribir muchos ficheros de salida, algunos de los cuales pueden ser binarios y otros ASCII.
- El modelo debe tener la posibilidad de ser ejecutado usando un sistema de comandos para DOS o UNIX, y de no necesitar la intervención del usuario.

Con mínimas modificaciones, el programa realizado para el cálculo del balance diario en las Tablas de Daimiel (apartado 8.2.2) ha podido adaptarse a los dos primeros requisitos mencionados para así poder comparar los resultados obtenidos mediante la aplicación de PEST con los de la calibración por el método ensayo-error.

Por otra parte, mediante el último requisito mencionado, PEST es capaz de tomar el control de un modelo, ejecutarlo tantas veces como sea necesario para ajustar sus parámetros hasta que las discrepancias entre las salidas del modelo y las medidas reales (observaciones) queden reducidas a un mínimo de una función basado en un ajuste por mínimos cuadrados ponderado de acuerdo con la credibilidad de las observaciones.

El programa utilizado para el cálculo del balance diario en las Tablas de Daimiel fue realizado en lenguaje FORTRAN, como se comentó, y mediante su compilación y depuración se originó un fichero ejecutable mediante un comando equivalente al

nombre del programa, por lo que se cumple el último de los requisitos mencionados anteriormente para la aplicación de PEST a dicho programa.

En la figura 8.10 se muestra un esquema sencillo del funcionamiento de PEST respecto al modelo que se esté analizando.

Por otra parte, PEST usa una técnica de estimación no lineal conocida como “método Gauss-Marquardt-Levenberg”. La potencia de este método (Watermark Computing, 1998) reside en el hecho de que puede generalmente estimar los parámetros usando menos pasadas del modelo que ningún otro método de estimación, lo que le hace ser el preferido para modelos grandes cuyos tiempos de ejecución pueden ser considerable.

A continuación se mencionan, a modo de resumen, algunos de los aspectos generales más relevantes de la utilización de PEST, resaltando aquéllos usados en el modelo de cálculo del balance de agua en las zonas encharcadas del vaso de las Tablas de Daimiel. Cualquier aspecto de detalle del paquete PEST, así como los planteamientos matemáticos del ajuste pueden ser consultados en Watermark Computing (1998 y 2000).

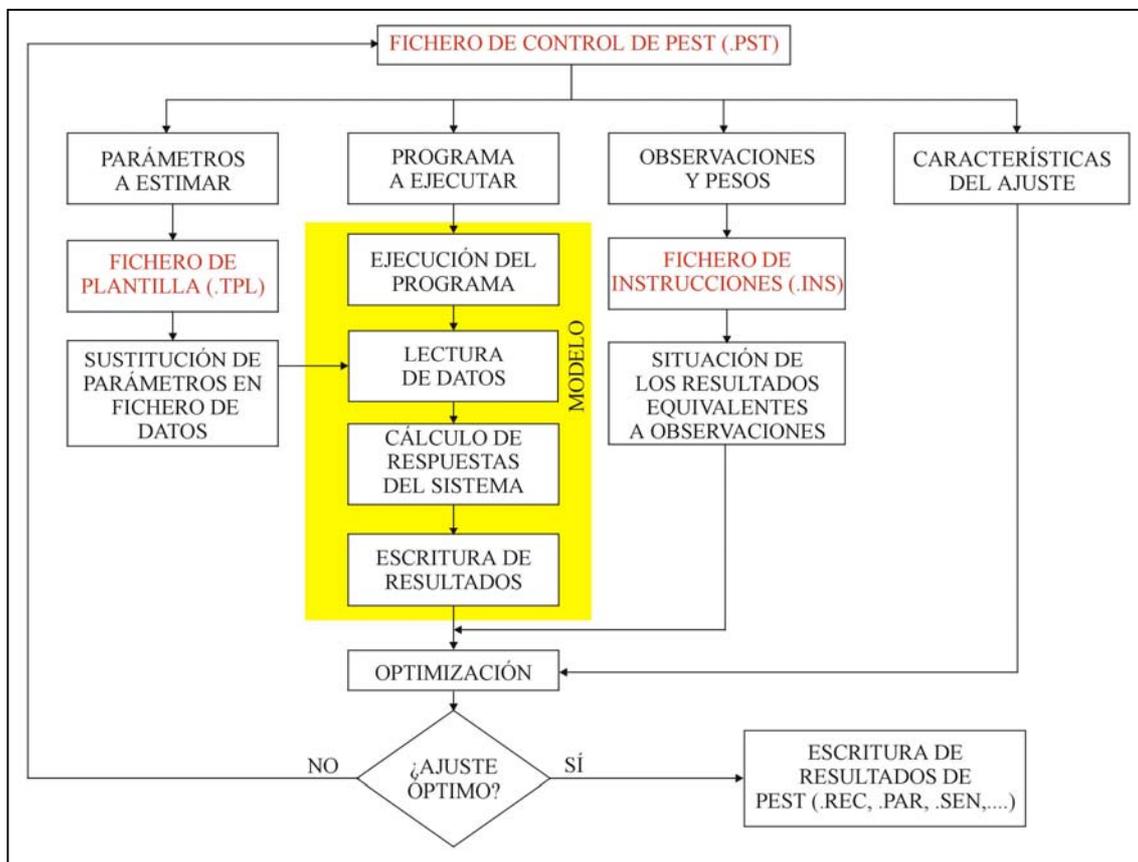


Figura 8.10. Esquema del control del programa PEST sobre el modelo en el que se estiman sus parámetros, de acuerdo con las especificaciones de los ficheros que debe originar el usuario (en rojo)

En definitiva, PEST puede ser dividido en tres componentes funcionales separados, que son:

- Definición y reconocimiento de los parámetros y/o acciones exteriores

Por lo que se refiere al reconocimiento y definición de los parámetros, en los conjuntos de datos de todos los tipos que pueden aparecer en los ficheros de entrada de un modelo, se deben identificar aquellos valores que pueden ser alterados y optimizados libremente por PEST. Éste es un proceso sencillo que puede ser realizado usando ficheros de entrada de plantilla con extensión *.TPL* (figura 8.10). Para construir un fichero de plantilla, simplemente se utiliza un fichero de entrada del modelo y se reemplaza cada espacio ocupado por un parámetro por un conjunto de caracteres que identifican el parámetro y definen su anchura en el fichero de entrada. En el caso del programa para el balance diario en Las Tablas, habría que partir del fichero de lectura *B.DAT*, que es el fichero externo de entrada de datos (apartado 8.2.2), aunque modificado respecto al original (anexo 12) ya que se ha modificado el programa para que los valores a calibrar puedan ser modificados libremente por PEST. Entonces, siempre que PEST ejecuta el modelo copia la plantilla al fichero de entrada del modelo, reemplazando cada espacio del parámetro con un valor (figura 8.10). Por otro lado, PEST para controlar las variaciones de los valores de los parámetros acude a un fichero de control (extensión *.PST*) donde se suministran los límites superior e inferior de los parámetros a ajustar, informando así del rango de los valores permitidos para ese parámetro. Igualmente en ese fichero de control se definen características de los parámetros tales como si permanecen fijos en determinadas simulaciones, si están ligados a otros parámetros o si pueden ser modificados de forma logarítmica.

- Definición y reconocimiento de las observaciones

Por otra parte, un modelo puede producir gran cantidad de datos, de los cuales sólo una parte correspondería a la respuesta del mismo ante las acciones impuestas al sistema y equivaldrían a “observaciones simuladas” (variables de estado) de las que, a su vez, sólo una pequeña parte deben ser utilizadas para ser comparadas con las “observaciones reales”. Para poder pasar por el fichero de salida y leer los valores equivalentes a las observaciones que han sido calculadas por el modelo, PEST debe disponer de un conjunto de instrucciones. PEST requiere entonces que para cada fichero de salida del modelo exista un fichero de instrucciones, con extensión *.INS*, permitiendo leer los valores calculados de los ficheros de salida y extraer aquellos equivalentes a los valores observados (figura 8.10). Así, en el período en el que se ha simulado la superficie encharcada en las Tablas de Daimiel, el modelo ha calculado un total de 639 valores, mientras que sólo se ha dispuesto de 42 observaciones. Cuando se conecta a la interfaz del modelo, el papel del PEST consiste en minimizar la suma ponderada de los cuadrados de la diferencia entre los valores de las “observaciones” generadas por el modelo y las medidas realmente en el campo (o laboratorio). Esa suma del cuadrado de las discrepancias ponderadas entre los valores modelados y medidos puede denominarse “función objetivo”. Las discrepancias pueden ser ponderadas de acuerdo con el “peso” que se les dé a algunas observaciones. Los pesos deben ser inversamente proporcionales a las desviaciones típicas de las observaciones, de modo que las observaciones más creíbles tienen un peso mayor.

- Algoritmo de estimación no lineal

El algoritmo de Gauss-Marquardt-Levenberg usado por PEST compara los cambios en los parámetros con la mejora de la función objetivo conseguida en una iteración con la obtenida en iteraciones previas y, si no se alcanzan los criterios fijados, el proceso es repetido. Al comienzo de una pasada de PEST, se debe suministrar un conjunto de valores de parámetros iniciales; éstos son los valores que PEST usa al comienzo de su

primera iteración. Cuando se llega al final del proceso de estimación de parámetros (que puede ser determinado por PEST o el usuario) PEST escribe una gran cantidad de datos útiles en un fichero que registra cada ejecución (fichero *.REC*); se puede instruir a PEST para que proporcione parte de esa información que se necesite. En ese fichero se escriben los valores de cada parámetro a ajustar junto con el intervalo de confianza del 95% de ese parámetro.

Finalmente, y para poder trabajar mediante los tres componentes funcionales mencionados, la operativa de PEST requiere tres tipos de ficheros de entrada (figura 8.10):

- Ficheros de plantilla (*.TPL*). Se necesita uno por cada fichero de entrada del modelo que es escrito por PEST antes de cada ejecución del modelo.
- Ficheros de instrucción (*.INS*). Se necesita uno por cada fichero de salida, que es leído por PEST después de cada ejecución del modelo.
- Fichero de control de PEST (*.PST*). Suministra a PEST los nombres de todos los ficheros de entrada y salida del modelo a calibrar. El fichero de control también proporciona a PEST el nombre del modelo, las estimaciones iniciales de los parámetros, las medidas reales de campo o laboratorio a las que ajustan los resultados del modelo, además de la información de los parámetros y un número de variables que controlan la implementación del método de Gauss-Marquardt-Levenberg.

8.3.2 Simulaciones realizadas

Se han realizado cuatro simulaciones del programa de cálculo diario del balance de agua en las Tablas de Daimiel aplicando el programa PEST para la estimación automática de los parámetros que requiere el primer programa mencionado. Los resultados obtenidos se han comparado con los resultantes de la simulación descrita en el apartado 8.2 para una infiltración media diaria de 10 mm, la que más acerca, a nivel cualitativo, los resultados del programa a las observaciones (figura 8.4), y que se ha tomado como referencia, denominándose en adelante PEST00.

Las simulaciones se han realizado para estimar tanto el coeficiente de infiltración global en las Tablas como algunos aspectos geométricos que pudieran influir en la cantidad de agua infiltrada. Estas simulaciones, además, pueden ayudar en la discusión sobre la validez y limitaciones de la metodología que se ha venido aplicando.

Estimación PEST01

La utilización inicial del programa PEST para la comprobación de la metodología aplicada ha consistido en la estimación del coeficiente de infiltración media diaria, *XIN* (apartado 8.2.2), como único parámetro. Esta estimación se ha denominado PEST01. En su realización ha sido necesario modificar el programa inicialmente elaborado, de modo que la infiltración media diaria a utilizar se lea desde el fichero independiente de datos de entrada para que PEST pueda acceder a ese parámetro y modificar sus valores durante el proceso automático de calibración, según los criterios que figuran en el fichero de control.

El intervalo de posibles variaciones de *XIN* durante la optimización se ha limitado por 0 mm/d (sin infiltración) y 50 mm/d, con un valor inicial para la estimación de 0.1 mm/d.

La optimización necesitó un total de 27 ejecuciones del programa del cálculo del balance. El coeficiente de infiltración media diaria que se ha obtenido en la optimización ha sido de 9.71 mm/d, siendo los límites inferior y superior del intervalo de confianza del 95%, 9.13 mm/d y 10.30 mm/d respectivamente.

En la figura 8.11 se han representado las superficies inundadas considerando tanto el valor de infiltración óptimo obtenido como los límites del intervalo de confianza y las superficies inundadas resultantes en PEST00 (coeficiente de infiltración media diaria de 10 mm/d).

Las curvas en los cuatro casos son muy similares, dados los valores de coeficiente de infiltración media diaria utilizados, que son semejantes. Así pues, con los modelos geométrico y conceptual para el cálculo del balance diario de agua que se han adoptado, y con la resolución matemática planteada en el programa utilizado (apartado 8.2.2), las calibraciones mediante prueba-error e inversa muestran resultados gráficos muy semejantes, con lo que la aproximación para la estimación de la infiltración de 10 mm/d resultaría aceptable.

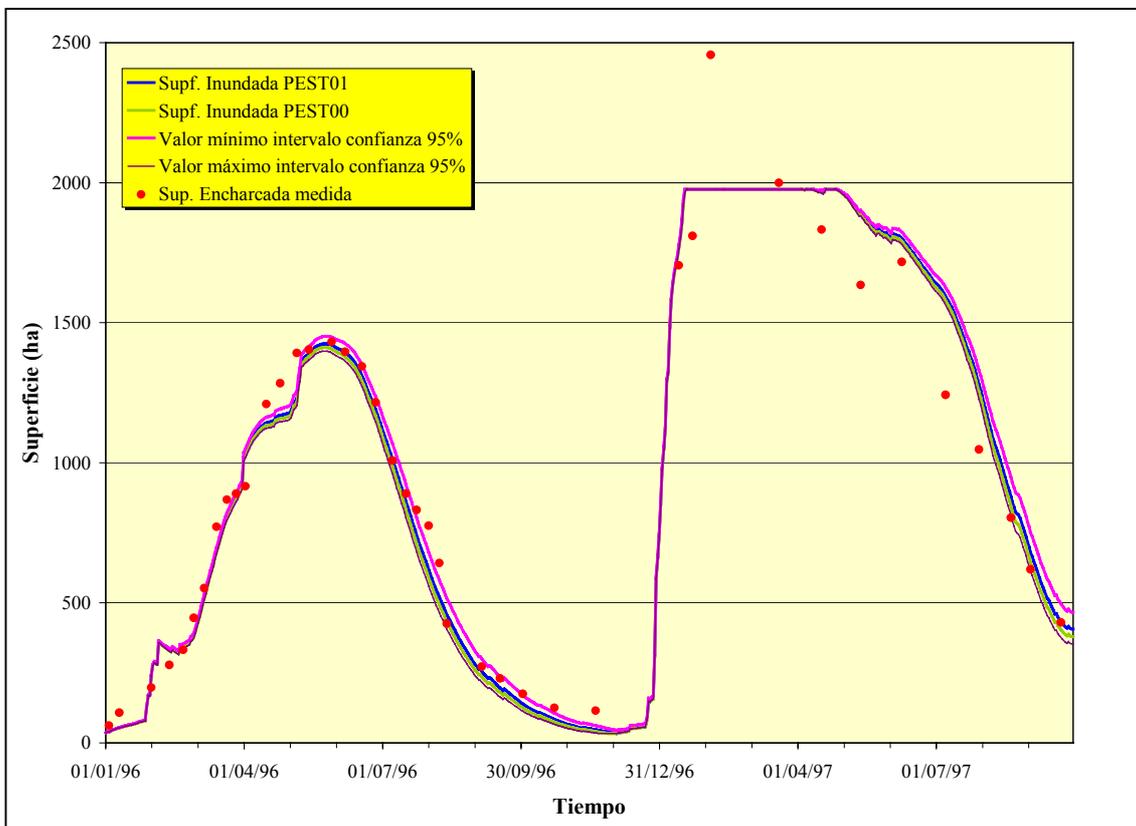


Figura 8.11. Comparación de la superficie inundada calculada mediante la estimación PEST01 y los resultados de referencia (PEST00) considerando coeficiente de infiltración de 10 mm/d

Por otra parte, y como se ha comentado, la optimización que realiza PEST se basa en alcanzar un mínimo en los cuadrados de los residuales (diferencia entre los valores de calibración medidos y los calculados) con las condiciones de ajuste impuestas al programa. Por ello, la representación de los residuales mostrará las menores diferencias

alcanzadas en la optimización y puede ayudar a conocer los problemas de simulación del modelo en general o de alguna parte del mismo.

Por ello, en la figura 8.12 se han representado los residuales de la simulación PEST01. Las mayores semejanzas entre las variables de control (superficie inundada medida y calculada) se sitúan en las proximidades del valor cero (semejanza total).

Las menores diferencias se encuentran hasta la observación 31, correspondiente al 13 de enero de 1997, según se muestra en la tabla 7.1. Corresponde al período en el que las Tablas responden a la entrada de aguas del trasvase Tajo-Segura y al comienzo del llenado de las Tablas en el período extraordinario de lluvias y avenidas del año hidrológico 1996-97. En esta etapa, los residuales son, en general, inferiores a 50 ha, lo que representa un error inferior al 3% de la máxima superficie inundable adoptada en el modelo geométrico (aproximadamente 2000 ha correspondientes al volumen máximo de 20.9 hm³). Existen, sin embargo, algunas diferencias que superan las 100 ha, pero siempre son inferiores al 8% de la máxima superficie inundable. Dadas las simplificaciones asumidas en el modelo conceptual, estas diferencias no son significativas desde el punto de vista de la gestión del agua, ya que las diferencias entre los valores reales y calculados serán escasas, aunque podrían plantear problemas en la previsión de superficies encharcadas con el fin de mejorar las condiciones hídricas para la flora y la fauna del Parque.

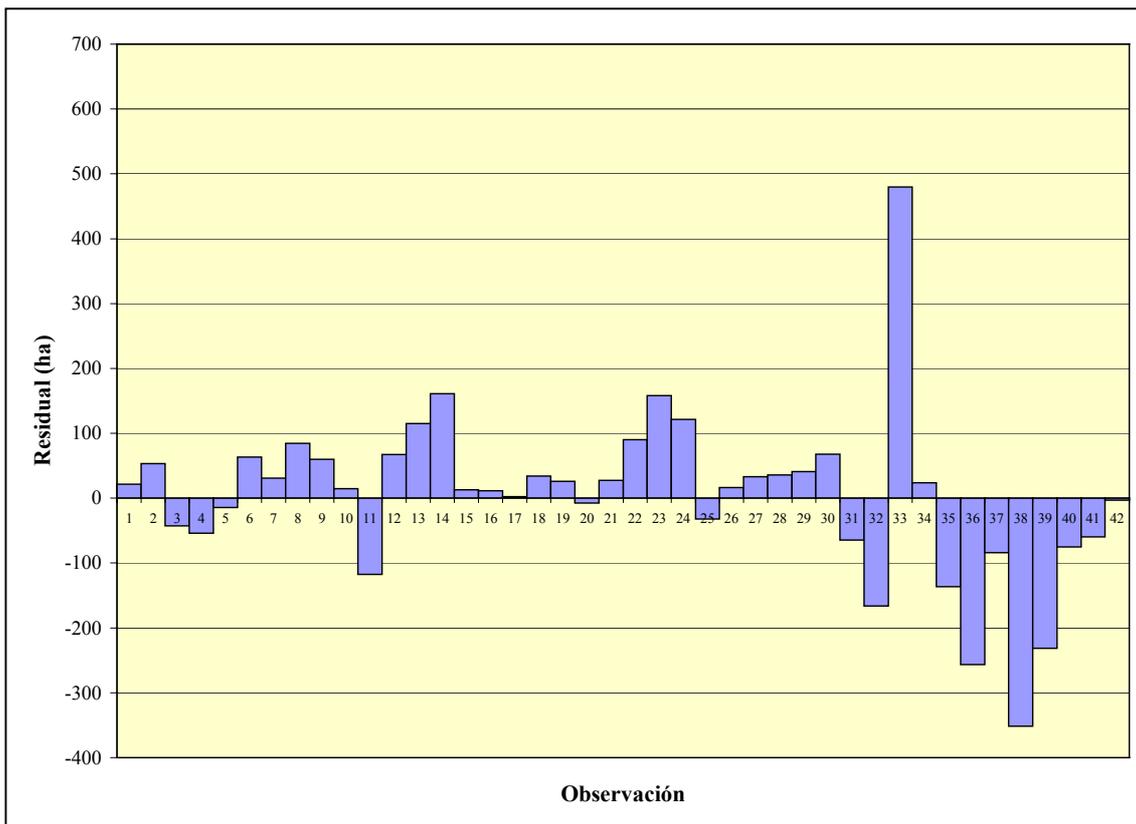


Figura 8.12. Residuales de la optimización PEST01

Para reducir esos residuales posiblemente sería necesario refinar el modelo geométrico mediante una mayor resolución del modelo digital del terreno o plantear otra curva de embalse diferente. En este sentido hay que considerar que para la realización de la curva

de embalse utilizada, seleccionando los períodos de vaciado de las Tablas, la diferencia cartográfica entre los valores medidos y los calculados puede superar el 10%. Además, existe también una gran incertidumbre en la superficie real inundada, ya que el error puede superar el 20%, con lo que el error cometido por el modelo puede ser aceptable, sobre todo dado que lo que se pretende es obtener una metodología fácil de utilizar con los datos disponibles. Aun así, si se quisiera una mayor precisión en los resultados, también sería necesario mejorar la exactitud en las medidas de las superficies inundadas.

Mayores diferencias se encuentran en los residuales del período comprendido entre mediados de enero de 1997 y finales de septiembre de 1997 (observaciones 32 a 42). Durante parte de este período, como ya se anotó en el apartado 8.2.3, los criterios de medida de las superficies inundadas no se ceñían al vaso de las Tablas de Daimiel ni al Parque Nacional, sino que consideraban también la zona de protección del mismo. Además al comienzo de este período se produjo una situación de avenida desde el río Cigüela con entrada de grandes caudales y desbordamientos desde el mismo.

Algunos de los residuales son, sin embargo, negativos, indicando que a pesar de haberse incrementado la zona de medida de la superficie encharcada, los valores calculados son superiores a las observaciones, llegando la diferencia a ser cercana al 20% de la superficie máxima inundable obtenida mediante la aplicación del modelo digital del terreno. Estos datos en los que las diferencias son mayores coinciden con el período de vertido aguas debajo de Puente Navarro que como se comentó, no tenía todas sus compuertas a la misma altura, al menos durante la realización de algunas visitas, por lo que el modelo geométrico considerado podría no adaptarse al real. Por otra parte, también es posible que durante este período en el que los accesos a determinados lugares del Parque estaban dificultados por la existencia de zonas inundadas la precisión de las observaciones sea más reducida.

Las últimas observaciones, correspondientes a los meses de agosto y septiembre de 1997, con una mayor estabilización del sistema, presentan un ajuste muy aceptable.

Estimación PEST02

Dada la problemática que puede plantear el modelo geométrico asumido, se ha pretendido obtener una respuesta sobre la influencia que podrían tener algunos parámetros que controlan dicho modelo, y por tanto el volumen almacenado y la superficie encharcada.

En la estimación automática de parámetros (denominada PEST02) se ha asumido el coeficiente de infiltración media diaria calculado en PEST01 (9.71 mm/d), mientras que el valor a calibrar sería el volumen máximo de agua que se puede almacenar en el vaso de las Tablas (*VMAX*), que en la estimación PEST01 y en la concepción inicial del cálculo diario del balance se fijó en 20.9 hm³.

En este caso, además se ha reducido la confianza en las observaciones correspondientes al 3 de febrero de 1997 y al 20 de marzo de 1997, reduciéndose su peso para la estimación, especialmente la de la primera fecha.

Para conseguir la optimización y la estimación del volumen máximo del vaso de las Tablas, el número de ejecuciones necesitadas por PEST fue de 11. El valor obtenido por PEST para *VMAX* fue de 18.317 hm³, 2.6 hm³ menos (un 13% menos) de los considerados inicialmente.

En la figura 8.13 se han representado conjuntamente las superficies inundadas calculadas considerando el valor de V_{MAX} estimado por PEST junto con las simuladas en la estimación de referencia, PEST00, y las superficies inundadas medidas. Los resultados son muy similares para el período comprendido entre el enero de 1996 y enero de 1997. De hecho, el resultado es igual al representado en la figura 8.11, dado que no se alcanza el volumen máximo almacenable en el vaso de las Tablas de Daimiel.

Para el período comprendido entre finales de enero de 1997 y septiembre de este mismo año, el ajuste mejora apreciablemente, aunque los valores correspondientes a las máximas inundaciones muestran un alejamiento de la curva simulada.

Las diferencias en el ajuste se aprecian también en la representación gráfica de los residuales correspondientes a la optimización PEST02, que aparecen en la figura 8.14. En la misma se aprecia, como se ha comentado, que para ese último período mencionado, los residuales se reducen de forma apreciable, aunque aún así algunas diferencias siguen siendo considerables. Además, como se ha mencionado también, se incrementan los residuales de las fechas de mayor superficie medida (observaciones 33, correspondiente al 3 de febrero de 1997, y 34, del 20 de marzo de 1997) que, de todos modos, son datos problemáticos, al cambiarse el criterio de cuantificación de la superficie inundada.

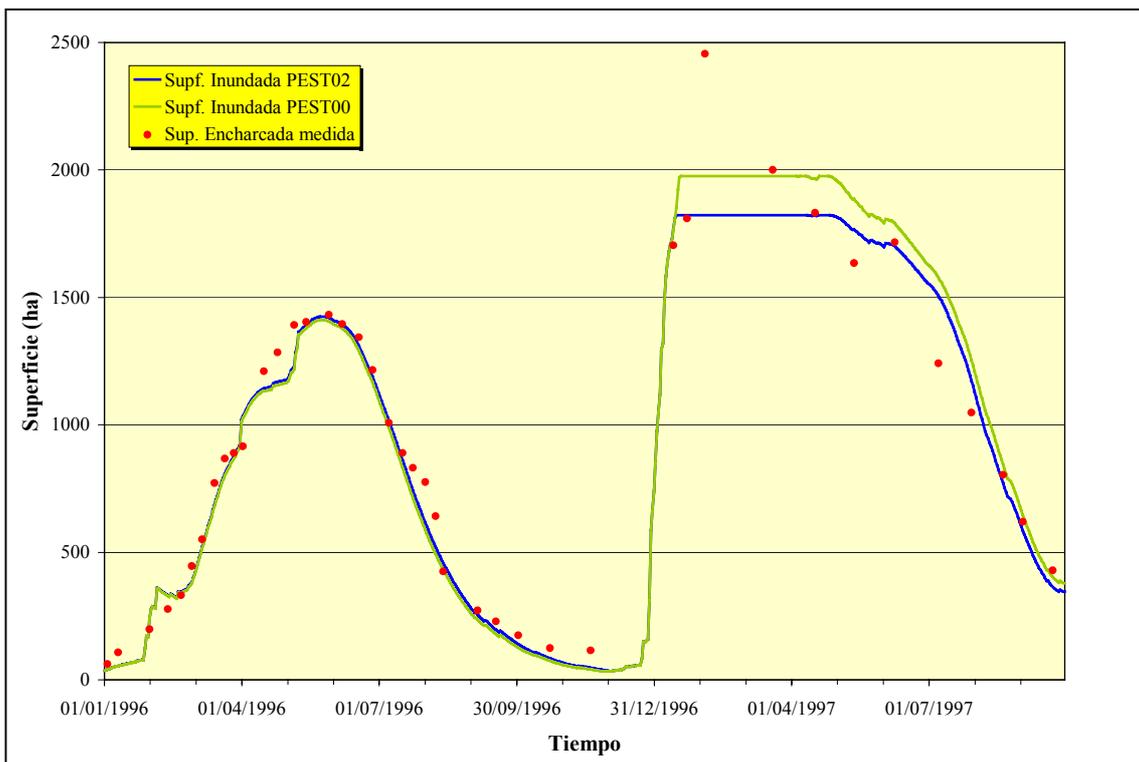


Figura 8.13. Comparación de la superficie inundada calculada mediante la estimación PEST02 y los resultados de referencia (PEST00) considerando coeficiente de infiltración de 10 mm/d

La reducción del volumen máximo del vaso de las Tablas parece mejorar ligeramente el modelo geométrico del mismo, lo que se evidencia especialmente cuando tienen lugar períodos extraordinarios de lluvia y avenidas.

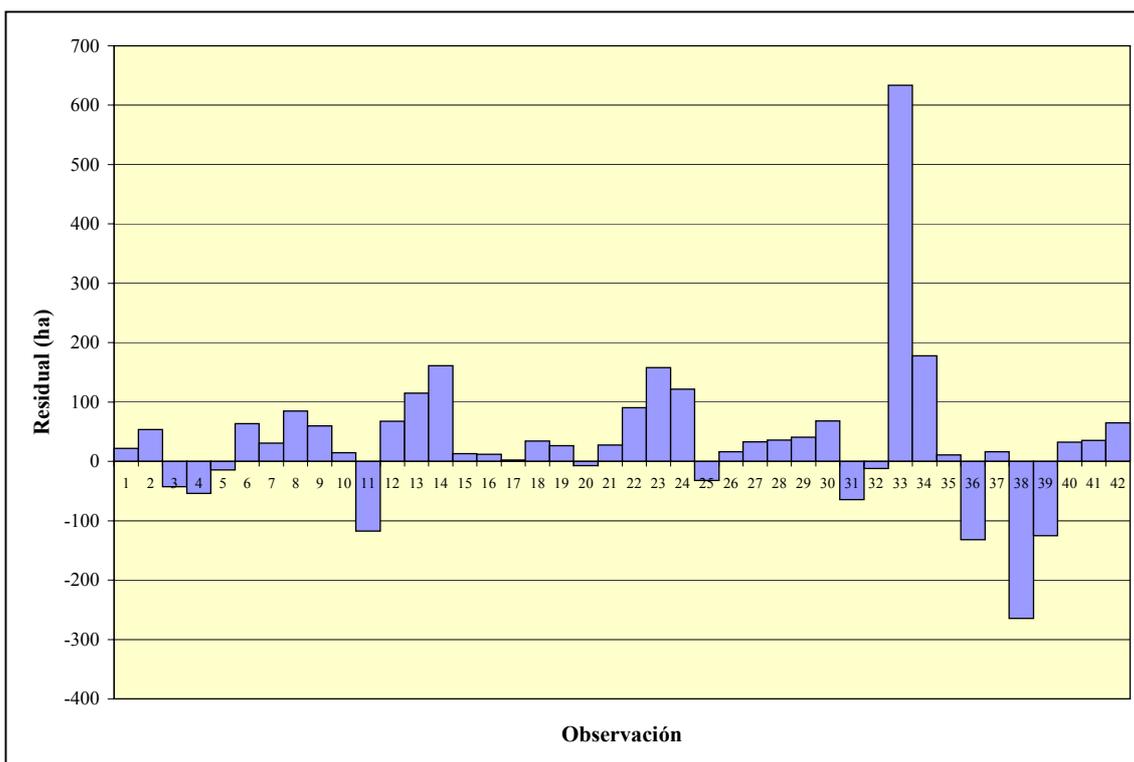


Figura 8.14. Residuales de la optimización PEST02

Estimación PEST03

La estimación PEST03 es esencialmente igual a la denominada PEST02, ya que se pretende estimar igualmente el volumen máximo, V_{MAX} , que optimice los resultados del modelo de acuerdo con las observaciones reales. Las únicas diferencias han consistido en considerar que la infiltración media diaria ha sido la obtenida por la aproximación por ensayo-error, es decir, 10 mm/d, y que las observaciones han tenido todas un peso unitario, con lo que se les otorga la misma confianza a las medidas.

El volumen máximo (óptimo) del vaso de las Tablas para las condiciones impuestas ha sido estimado en 19.986 hm^3 . Este volumen es mayor que el estimado en PEST02, pero aún es menor que el considerado inicialmente, que era de 20.935 hm^3 .

En la figura 8.15 se han representado conjuntamente la evolución de las superficies encharcadas medidas, las calculadas en la estimación PEST03 y las tomadas como referencia de la simulación PEST00.

Es de destacar que los resultados obtenidos en PEST03 son iguales a los de PEST00 (y por tanto muy parecidos a los de PEST01, figura 8.11) en todo el período simulado, salvo cuando las Tablas de Daimiel se encuentran llenas o casi llenas. En estas circunstancias, la superficie inundada calculada en PEST03 es ligeramente inferior a la impuesta en PEST00, con lo que aquélla se aproxima algo más a las superficies encharcadas reales. Sin embargo, las diferencias entre las dos simulaciones representadas puede considerarse que no son significativas.

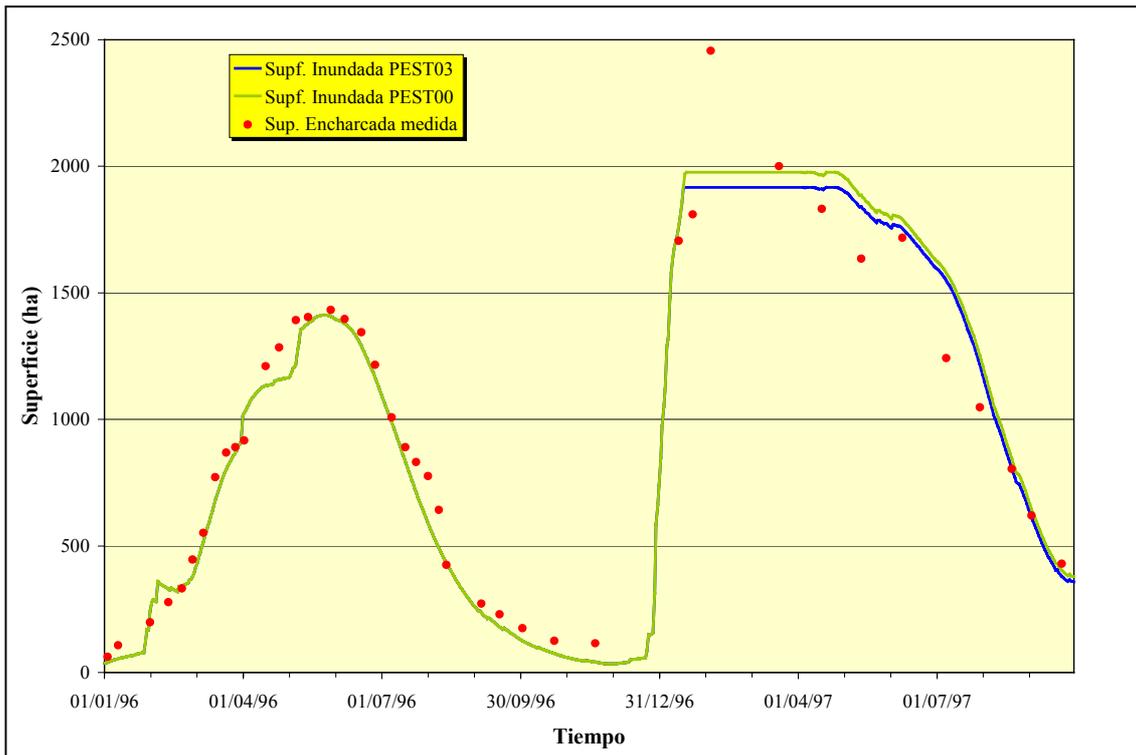


Figura 8.15. Comparación de la superficie inundada calculada mediante la estimación PEST03 y los resultados de referencia (PEST00) que considera coeficiente de infiltración de 10 mm/d

Estimación PEST04

De acuerdo con las simulaciones previas, durante la exposición general del modelo (apartado 8.2), se comprobó que éste es sensible al coeficiente de infiltración media diaria, aunque el que mejor permite ajustar las superficies encharcadas calculada y medida es el de 10 mm/d (apartados 8.2.2 y 8.2.3).

De todos modos, dado que el modelo se pretende plantear del tipo “parámetros agregados” (con un solo coeficiente de infiltración), que la estimación automática de éste ha obtenido valores similares al mencionado anteriormente (9.71 mm/d en la estimación PEST01) y que la modificación del modelo geométrico puede mejorar los resultados (estimación PEST02), se ha realizado una nueva estimación automática teniendo en cuenta otra posible relación geométrica en el vaso de las Tablas de Daimiel.

En concreto, se ha pretendido calibrar la curva que relaciona el volumen embalsado en el vaso de las Tablas de Daimiel con la superficie encharcada, manteniendo fijos el coeficiente de infiltración, XIN , en 10 mm/d y el volumen máximo almacenable, $VMAX$, en 20.935 hm^3 . Para ello se han tratado los coeficientes de la curva de ajuste polinómico que relaciona las superficies y los volúmenes del vaso de las Tablas a partir del MDT (figura 6.7) a modo de parámetros a estimar. Aunque los coeficientes que mejor representan el ajuste de los valores del MDT son evidentemente los planteados en el modelo geométrico de partida, los nuevos coeficientes pueden ayudar a apoyar o rebatir ese modelo geométrico propuesto.

La estimación realizada, denominada PEST04, ha requerido la modificación parcial del programa para que los coeficientes del ajuste polinómico fuesen leídos en el fichero de datos del programa, para permitir a PEST, a su vez, modificar los valores de dichos coeficientes a partir de los datos incluidos en sus ficheros de control y plantilla.

La ejecución de PEST ha obtenido los resultados óptimos de ajuste de valores calculados y medidos con la relación

$$SUP(I) = 0.25696 VALM(I)^3 - 11.2423 VALM(I)^2 + 212.7389 VALM(I) + 41.24557$$

donde,

$SUP(I)$ es la superficie encharcada en el día I , y

$VALM(I)$ es el volumen almacenado en el vaso de las Tablas en el día I .

Dicha función se ha representado en la figura 8.16, junto con la utilizada en las simulaciones previas y los valores puntuales volumen almacenado-superficie encharcada obtenidos del modelo digital del terreno (apartado 6.2).

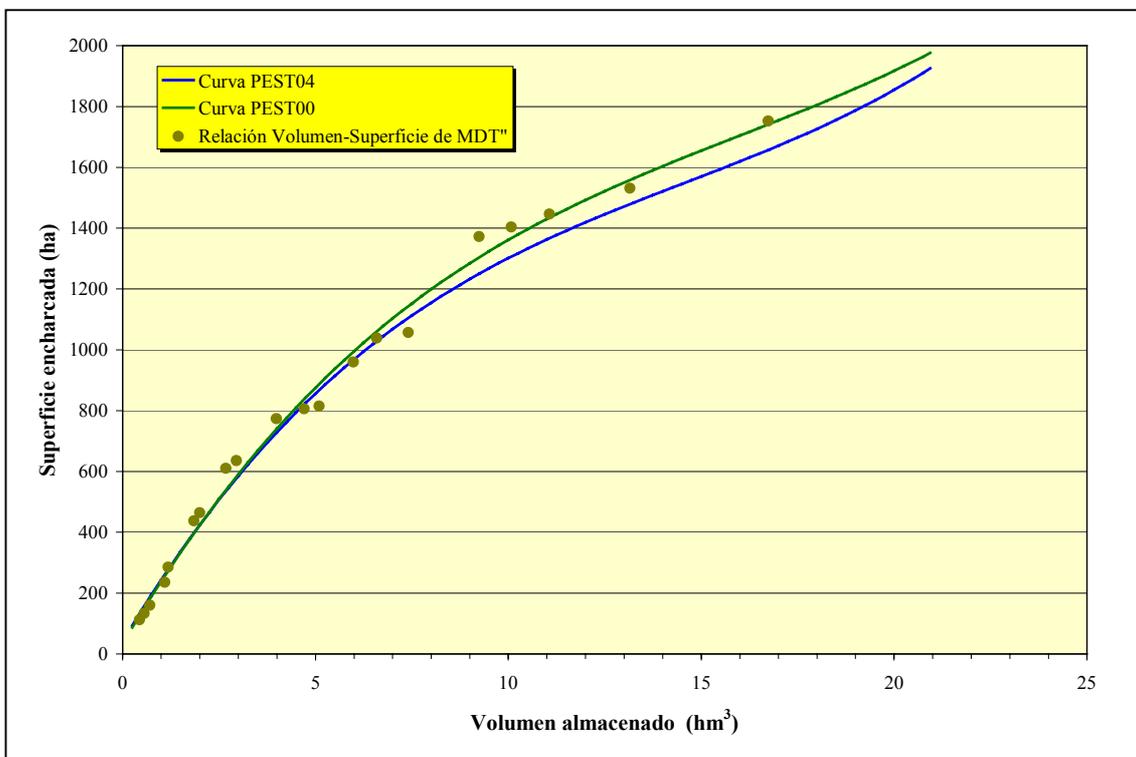


Figura 8.16. Relaciones entre volumen almacenado en el vaso de las Tablas y superficie encharcada calculada en PEST04, obtenida a partir de los datos del modelo digital del terreno y ajuste polinómico de éstos adoptado en PEST00

Como era de esperar, la curva de embalse encontrada se separa de los datos obtenidos a partir del modelo digital del terreno. Sin embargo, existe una coincidencia prácticamente total entre la curva obtenida en PEST04 y el ajuste polinómico adoptado en las simulaciones previas en volúmenes de almacenamiento bajo, inferiores a 7 hm^3 , equivalentes a superficies encharcadas menores a 1100 ha . Estos valores son, como se puede apreciar en la figura 8.17, los más frecuentes en el período comprendido entre el 1 de enero de 1996 y el 30 de septiembre de ese año, cuando el agua almacenada

procede esencialmente del trasvase Tajo-Segura. En este período, cuando se supera esa superficie encharcada, las discrepancias entre las simulaciones representadas se incrementan, pero los resultados de la estimación inicial, que asume el ajuste de los datos del modelo digital del terreno, se acercan más a las reales que los procedentes de la calibración por PEST.

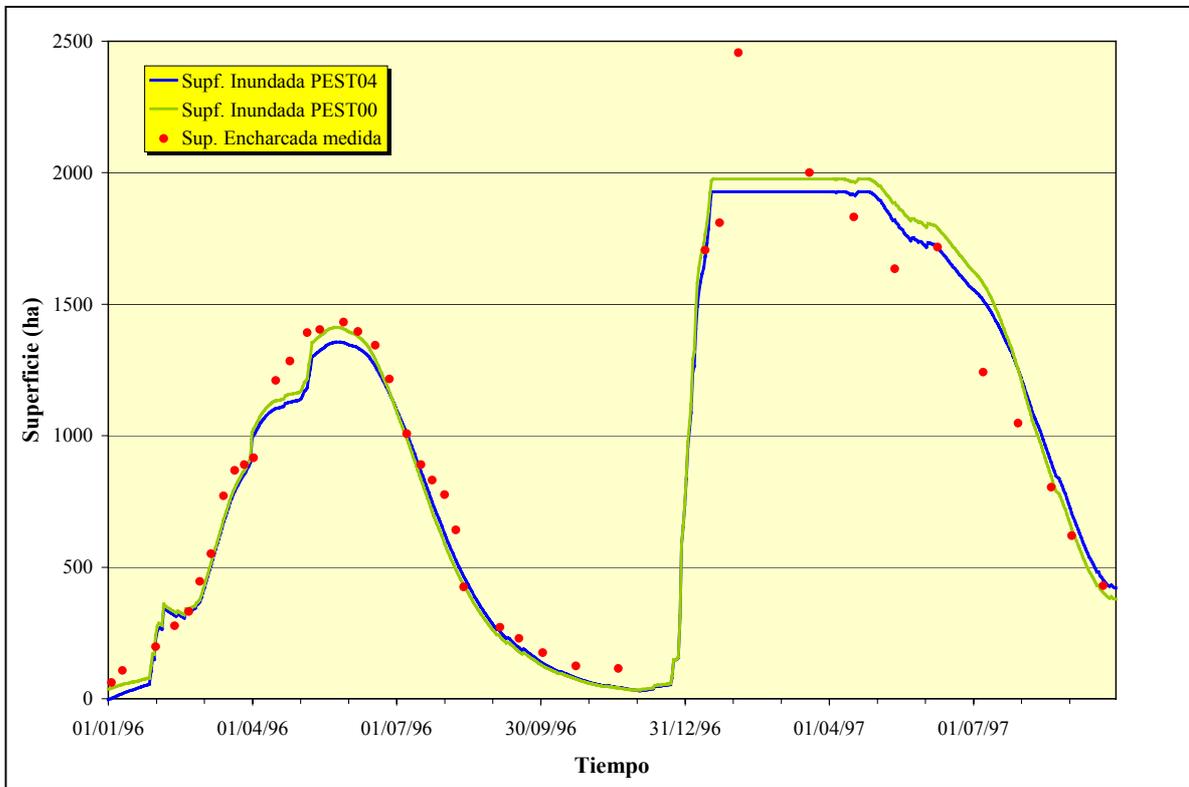


Figura 8.17. Comparación de la superficie inundada calculada mediante la estimación PEST04 y los resultados de referencia (PEST00) que considera coeficiente de infiltración de 10 mm/d

Para los valores elevados, la diferencia entre los dos modelos de curva de embalse se incrementa (figura 8.16), especialmente hacia los 15 hm³, cuando la diferencia de estimación es de unas 85 ha. Este valor, aunque importante si se gestiona la superficie de encharcamiento, es poco significativo en relación con algunos de los residuales que se han venido calculando en las distintas estimaciones.

El origen de esas discrepancias entre las dos curvas habría que buscarlo en los datos tomados para el cálculo de las mismas, ya que para la considerada en las simulaciones previas se partió exclusivamente de los pares volumen almacenado-superficie encharcada de los períodos de vaciado de las Tablas en 1996 y 1997 (tablas 6.2 y 6.3), que corresponden a volúmenes relativamente reducidos. En cambio, para la estimación PEST04 se han incluido todas las observaciones disponibles, con lo cual se consideran los máximos valores de superficie encharcada, incluyendo las del período extraordinario de avenidas de 1997. De hecho, el ajuste obtenido en esta etapa con la estimación PEST04 mejora, aunque sólo ligeramente, los resultados de la simulación PEST00, aunque al final del período simulado los ajustes se invierten (figura 8.17).

Así pues, la estimación analizada en los párrafos previos no ha supuesto una mejora en el ajuste que proporcione argumentos para modificar el modelo geométrico adoptado. Sin embargo, como se ha comentado en estimaciones previas, se han obtenido algunos ajustes mejores calibrando el modelo con modificaciones de parámetros geométricos. Por ello, se han realizado varios ensayos más de estimaciones en el mismo sentido de la denominada PEST04, aunque los resultados no han mostrado tampoco mejores ajustes, por lo que no se describen.

Únicamente cabe mencionar que una de esas estimaciones también se ha centrado en los coeficientes de la curva de embalse, considerando valores de optimización de estimaciones previas (coeficiente de infiltración media diaria de 9.71 mm, volumen máximo del vaso de 18.32 hm³). La curva obtenida difiere ligeramente de las que aparecen en la figura 8.16, pero la curva de superficies encharcadas resultante no muestra una aproximación mejor a la real que la de PEST02 (figura 8.13), con lo que los residuales tampoco disminuyen, por lo que se ha considerado que la descripción de sus resultados no supone ninguna aportación a la mejora de la metodología utilizada.

8.3.3 Comparación de resultados de las diferentes estimaciones

Una vez descritas las principales estimaciones automáticas realizadas y su comparación con los valores de superficie encharcada medida, tanto gráficamente como mediante la representación de los residuales, se analizan los resultados cuantitativos obtenidos en las mismas, con el fin de tener una visión de la variabilidad de las cifras proporcionadas por el modelo en función del criterio concreto de coeficiente de infiltración y de la geometría que se ha considerado.

Por otra parte, es conveniente también comparar esos resultados con la simulación que se ha venido tomando como referencia (denominada PEST00), realizada, como se vio en el apartado 8.2, mediante un programa de fácil implementación. Ello permitirá obtener, aunque sólo sea de modo cualitativo, una visión de la utilidad de la metodología y criterios empleados a la hora de estimar órdenes de magnitud en el balance de agua en las Tablas de Daimiel con vistas a la gestión de los recursos hídricos en el Parque Nacional.

Como recordatorio de esos criterios, en la tabla 8.5 se han sintetizado los valores de los parámetros que se han mantenido fijos en cada simulación, y los valores iniciales, intervalo de variación y valor final de los parámetros que se han estimado de modo automático.

Por otra parte, en la figura 8.18 se han representado los diagramas de caja de los residuales (valores medidos menos valores calculados) de las estimaciones automáticas consideradas. De forma general, todas las estimaciones presentan una dispersión considerable, con alas de más de 100 ha, o cercanas incluso a 200 ha, aunque el 50%, o más en algunos casos, de los valores se sitúan en el intervalo comprendido entre las -50 ha y las +50 ha, error que se puede considerar aceptable con los criterios e incertidumbres de los datos de partida.

Además, todas las estimaciones muestran que los residuales dominantes son los positivos, inclusive aquéllos con una menor dispersión de valores (estimación PEST02). Ello es debido a que en todos los casos, durante el período comprendido entre enero y septiembre de 1996, cuando más medidas existen, las simulaciones consideradas suelen calcular valores ligeramente inferiores a los medidos (figuras 8.11, 8.13, 8.15 y 8.17). En cambio, existe un grupo de residuales negativos, que suelen corresponder a valores

extremos, en el período comprendido entre abril y agosto de 1997, cuando el régimen de las Tablas corresponde a la finalización de un llenado y a un vaciado tras un régimen extraordinario de precipitaciones y avenidas en toda la Península Ibérica. Estos valores extremos pueden representar tanto errores en la cuantificación de las superficies inundadas (cambian los criterios de las medidas y se dificulta la accesibilidad a los puntos de control de la extensión de la lámina de agua) o que los procesos que tienen lugar no se ajustan al modelo conceptual considerado en las estimaciones mencionadas.

Un aspecto importante a considerar, para comprobar la validez de la metodología con vistas a la gestión de los recursos hídricos, es comprobar, aparte de la desviación de los valores calculados respecto a las observaciones (figura 8.18), las diferencias en cuanto a los distintos componentes que interviene en el balance de agua en las Tablas de Daimiel.

En este sentido, en la tabla 8.6 se han resumido los resultados obtenidos en las simulaciones finales de las diferentes estimaciones automáticas. Dado que, como se ha venido comentando, se observa una diferencia en los ajustes entre el período comprendido entre el 1 de enero de 1996 y el 30 de septiembre de 1996, y el comprendido entre el 1 de octubre de 1996 y el 30 de septiembre de 1997, derivada en parte por la calidad y criterios de los datos de superficies encharcadas medida, en dicha tabla, ambos períodos se han considerado independientemente. Esos resultados se comparan con los de la simulación de referencia PEST00.

Como era de esperar, los resultados correspondientes al primer período mencionado son más homogéneos que los del segundo, dado que los aportes no provocan grandes diferencias en las superficies encharcadas (de las que depende el cálculo de la infiltración, precipitación areal y evaporación areal) como se vio en el apartado anterior. Además, tampoco se llena el vaso de las Tablas con lo que no existirían vertidos aguas abajo por Puente Navarro. En definitiva, la infiltración calculada sería del orden de 19 hm^3 , similar a las entradas medidas en la estación de aforos del Cigüela de Villarrubia de los Ojos. Ello suponiendo una infiltración del 72% de las entradas totales.

Así pues, para este período en el que las aportaciones esenciales al vaso de las Tablas proceden del trasvase Tajo-Segura, y el sistema permanece relativamente estable en cuanto a volúmenes diarios de las entradas (figura 7.2), los resultados obtenidos, para un coeficiente de infiltración del mismo orden de magnitud, son muy similares aunque la geometría considerada se modifique ligeramente. Con ello, para esta situación, que es la “normal” desde mediados de la década de 1980, la metodología utilizada y el valor del coeficiente de infiltración media diaria podrían considerarse adecuados a la hora de gestionar los recursos hídricos destinados a mejorar la situación hídrica de las Tablas de Daimiel.

En este sentido, para esas mismas fechas, y aunque fuera de los objetivos del presente trabajo, se han comparado igualmente algunas cifras de superficie de encharcamiento observadas y calculadas. Concretamente en la tabla 8.7 se comparan las superficies máximas encharcadas mostrando una semejanza prácticamente total. La mayor disparidad se encuentra en PEST04, aunque es orden del 5% solamente, y tiene su origen en la diferencia, para volúmenes almacenados elevados, de las curvas de embalse estimada en esta simulación respecto a la usada en el resto (figura 8.16).

Tabla 8.5. Características generales de las diferentes estimaciones automática de parámetros utilizados en el cálculo del balance diario de agua en las Tablas de Daimiel mediante el programa PEST

Estimación	Fijados	Iniciales	Rango variación	Calculados con PEST
PEST01	a = 0.21634 b = -10.349 c = 214.607 d = 33.832 $v_{\max} = 20.935 \text{ hm}^3$	infil = 0.1 mm/d	0 a 50 mm/d	infil = 9.71 mm/d
PEST02	infil = 9.71 mm/d a = 0.21634 b = -10.349 c = 214.607 d = 33.832	$v_{\max} = 15 \text{ hm}^3$	0 a 50 hm^3	$v_{\max} = 18.317 \text{ hm}^3$
PEST03	infil = 10 mm/d a = 0.21634 b = -10.349 c = 214.607 d = 33.832	$v_{\max} = 15 \text{ hm}^3$	0 a 50 hm^3	$v_{\max} = 19.986 \text{ hm}^3$
PEST04	infil = 10 mm/d $v_{\max} = 20.935 \text{ hm}^3$	a = 0.1 b = 0.1 c = 0.1 d = 0.1	-500 a 500 -500 a 500 -500 a 500 -500 a 500	a = 0.25696 b = -11.242 c = 212.739 d = 41.2456

infil - coeficiente de infiltración media diaria; v_{\max} - volumen máximo del vaso;

a, b, c, d - coeficientes de la relación superficie inundada [supf] - volumen almacenado [vol]

$$[\text{supf} = a \cdot \text{vol}^3 + b \cdot \text{vol}^2 + c \cdot \text{vol} + d]$$

Tabla 8.6. Resultados globales del cálculo del balance diario de agua en las Tablas de Daimiel, para distintas estimaciones de parámetros

Estimación	1 de enero de 1996 a 30 de septiembre de 1996 (1)							1 de octubre de 1996 a 30 de septiembre de 1997 (2)							Infiltración (%)		
	SALIDAS			ENTRADAS				SALIDAS			ENTRADAS				I/(P+C+AS+SB)*100		
	I	E	PN	P	C	AS	SB	I	E	PN	P	C	AS	SB	(1)	(2)	(1 y 2)
PEST00	19.25	6.91	0.00	1.84	18.76	3.72	2.30	43.61	15.88	80.70	4.96	122.33	14.14	0.00	72.32	30.84	38.54
PEST01	19.06	7.07	0.00	1.87	18.76	3.72	2.30	42.70	16.08	81.35	4.99	122.33	14.14	0.00	71.53	30.19	37.86
PEST02	19.06	7.07	0.00	1.87	18.76	3.72	2.30	39.66	14.87	85.63	4.70	122.33	14.14	0.00	71.53	28.09	36.00
PEST03	19.25	6.91	0.00	1.84	18.76	3.72	2.30	42.45	15.44	82.31	4.85	122.33	14.14	0.00	72.32	30.04	37.83
PEST04	19.00	6.89	0.00	1.79	18.76	3.72	2.30	42.75	15.65	81.48	4.84	122.33	14.14	0.00	71.52	30.25	37.88

I - Infiltración (hm^3)

E - Evaporación (hm^3)

PN - Rebosamiento por Puente Navarro (hm^3)

C - Entradas medidas en estación de aforos del río Cigüela (hm^3)

AS - Aportaciones de tributarios septentrionales (hm^3)

SB - Bombeos de aguas subterráneas hacia el vaso de las Tablas (hm^3)

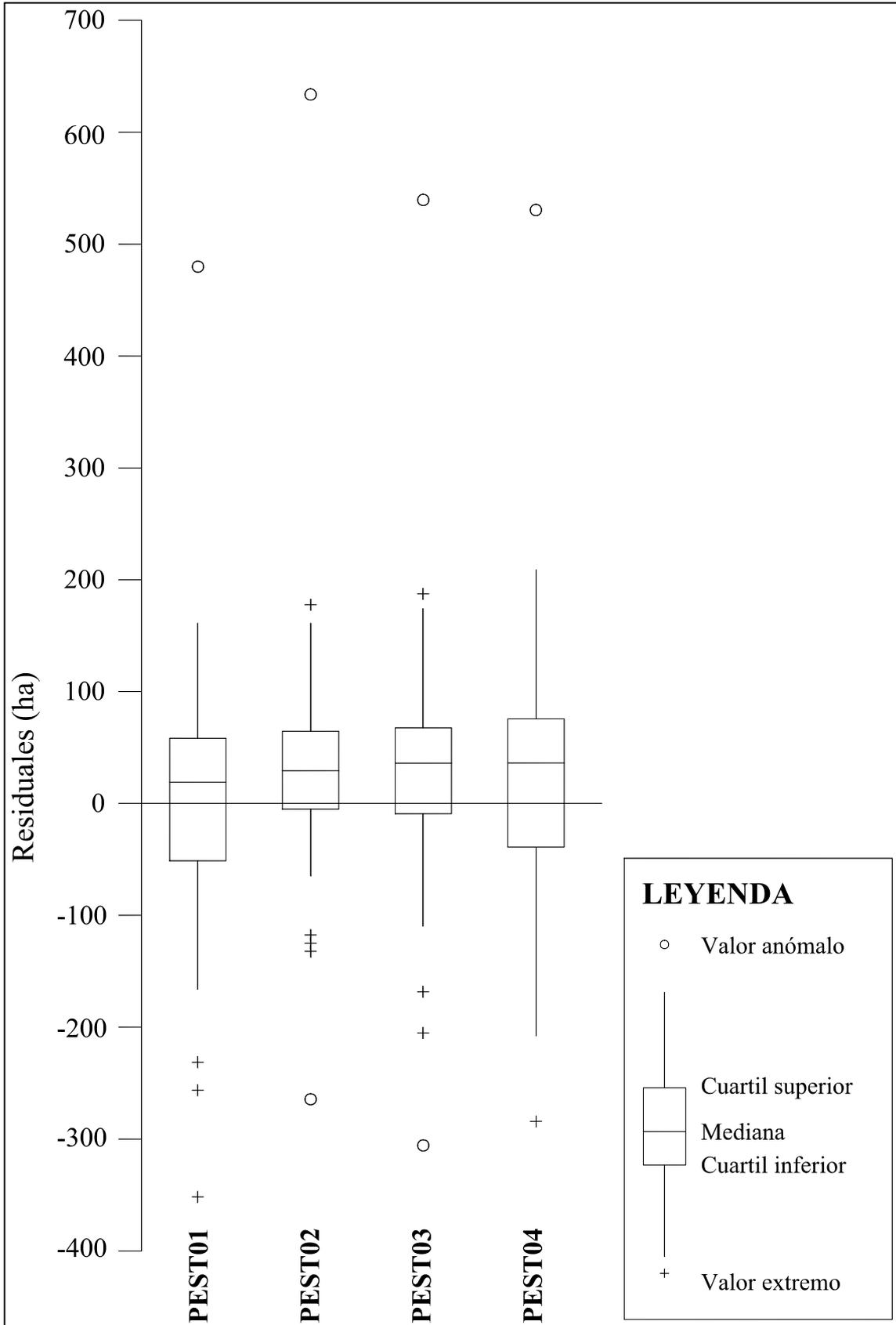


Figura 8.18. Diagramas de cajas de los valores de los residuales de las simulaciones realizadas en las estimaciones automáticas de diversos parámetros relacionados con el balance de agua en el vaso de las Tablas de Daimiel

Tabla 8.7. Comparación de la superficie máxima de encharcamiento observada y calculada, y del porcentaje de días del período con superficies encharcadas superiores a 600 ha y 850 ha para diversas simulaciones

Período 1 de enero de 1996 a 30 de septiembre de 1996					
Estimación	Máxima superf. encharcada (ha)	Fecha	Diferencia respecto observada (%)	Porcentaje días > 600 ha	Porcentaje días > 850 ha
PEST00	1412	25/05/1996	1.40	52.19	41.24
PEST01	1425	25/05/1996	0.49	53.28	41.97
PEST02	1425	25/05/1996	0.49	52.90	41.67
PEST03	1412	25/05/1996	1.40	52.19	41.24
PEST04	1356	26/05/1996	5.31	52.92	41.24
Observaciones	1432	29/05/1996		62.96	48.15

Nota: Se tienen observaciones de 27 días en un período de 274 días

También son semejantes los valores de los porcentajes de días entre el 1 de enero de 1996 y el 30 de septiembre de 1996 con superficies encharcadas superiores a determinadas cifras. En la tabla 8.7 figuran aquellos en los que se superan las 600 ha y 850 ha encharcadas, superficie mínima en el cálculo de las necesidades hídricas de las Tablas y superficie de encharcamiento mínimo a conseguir, respectivamente (MOPU y MAPA, 1986; Berzal et al., 1987). En este caso, sin embargo hay una mayor diferencia respecto a los valores observados, aunque hay que tener en cuenta que el número de días con medida es únicamente el 10% del período considerado.

Por lo que respecta al período comprendido entre el 1 de octubre de 1996 y el 30 de septiembre de 1997 las discrepancias absolutas entre los resultados de las simulaciones son mayores (tabla 8.6), como lo han sido los problemas en los ajustes. En esta etapa, las superficies encharcadas reales son muy elevadas, aunque están medidas con un criterio diferente al período anterior. Por ello, las variables dependientes del área de la lámina de agua (precipitación, evaporación, infiltración), se incrementan, aunque dado que es un período de avenida extraordinaria, su cuantía es reducida en comparación con las aportaciones superficiales, especialmente procedentes del río Cigüela. Además, el llenado del vaso provoca salidas por las compuertas de Puente Navarro (foto 8.1), por lo que la geometría del sistema, especialmente en lo referente a la capacidad máxima de la zona húmeda, adquiere suma importancia.

Así, las mayores diferencias se encuentran en la simulación correspondiente a la estimación PEST02, en la que se calculó un valor relativamente reducido de V_{MAX} y son mayores las salidas por Puente Navarro y más reducida la infiltración volumétrica. Aún así, estos valores son muy similares, entre 40 y 44 hm³ para el año hidrológico 1996-97, y también son muy similares los valores de infiltración relativa a las entradas al sistema, que son cercanas al 30%.

Finalmente, cabe señalar que en la tabla 8.6 también se ha estimado la infiltración relativa para todo el período de estudio y las simulaciones mencionadas en este apartado, mostrando que oscila entre el 36% y el 39% según los valores usados en los parámetros. Con ello, las cifras calculadas, aplicando el marco metodológico explicado en el apartado 8.2, se pueden considerar semejantes y dentro del mismo orden para la estimación de la recarga bajo distintos regímenes hídricos y algunas variaciones geométricas del vaso de las Tablas, indicando su validez como herramienta de apoyo a la gestión hídrica del Parque Nacional. Esa similitud de resultados hace recomendable y

justificable la utilización de la simulación más sencilla y fácil de utilizar, que sería la que se ha venido denominando PEST00 a lo largo del presente apartado.

8.4 Aplicación de la metodología propuesta a otra geometría del vaso de las Tablas de Daimiel

Para comprobar la validez de la metodología general propuesta, ha sido utilizada ante otros datos referentes a la geometría del vaso de las Tablas planteada en otros estudios.

En concreto, se ha seleccionado la que aparece en el informe de MOPU y MAPA (1986) utilizado para realizar varios balances, recogidos también en Berzal et al. (1987) y en García Rodríguez (1996). En dicho informe se muestra la relación volumen almacenado-superficie encharcada, que se ha representado en la figura 8.19. Dicha relación es relativamente más compleja que la utilizada en la presente Tesis (figura 8.20). En el presente apartado, sin embargo, esa geometría inicial se ha resumido considerando cuatro tramos en función del volumen almacenado, a los que se han ajustado sendas funciones polinómicas, que aparecen también en la figura 8.19.

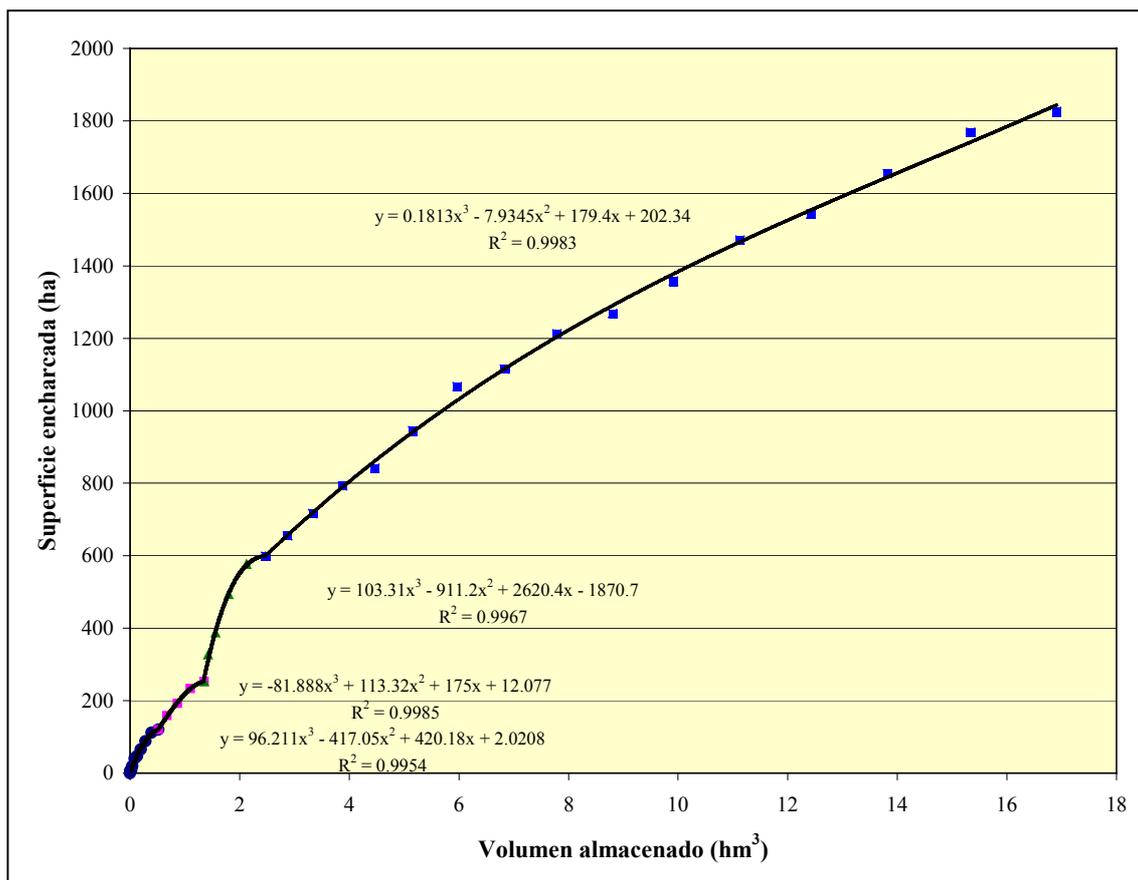


Figura 8.19. Representación de los valores de volumen almacenado-superficie encharcada tomada del informe MOPU y MAPA (1986) y relaciones asumidas entre las dos variables

Esta geometría ha sido modificada posteriormente en algunos aspectos fundamentales, como la construcción del Dispositivo Hidráulico central, con lo que su validez es histórica.

Sin embargo, en dicho informe se realizan balances de agua en el vaso de las Tablas de Daimiel con el fin de estimar los volúmenes de agua que se necesitaban en el Plan de Regeneración Hídrica para conseguir mantener determinadas láminas de agua en el vaso de las Tablas, aunque son discutibles en algunos aspectos según García Rodríguez (1996). Los resultados obtenidos simulando un año con trasvase real, puede ayudar a comprobar la validez de las previsiones realizadas respecto a dicho Plan.

Para aplicar la simulación del cálculo del balance diario ha sido necesario modificar el programa descrito anteriormente (apartado 8.2.2) en dos aspectos fundamentales. El primero ha consistido en cambiar el valor de la capacidad máxima de almacenamiento en el vaso de las Tablas de Daimiel, V_{MAX} , a 16.91 hm^3 . En cuanto al segundo, ha consistido en introducir las funciones que relacionan la superficie encharcada y el volumen almacenado, que ha sido calculado a su vez en el programa de acuerdo con el volumen del vaso en el período precedente, y de las entradas y salidas en el sistema.

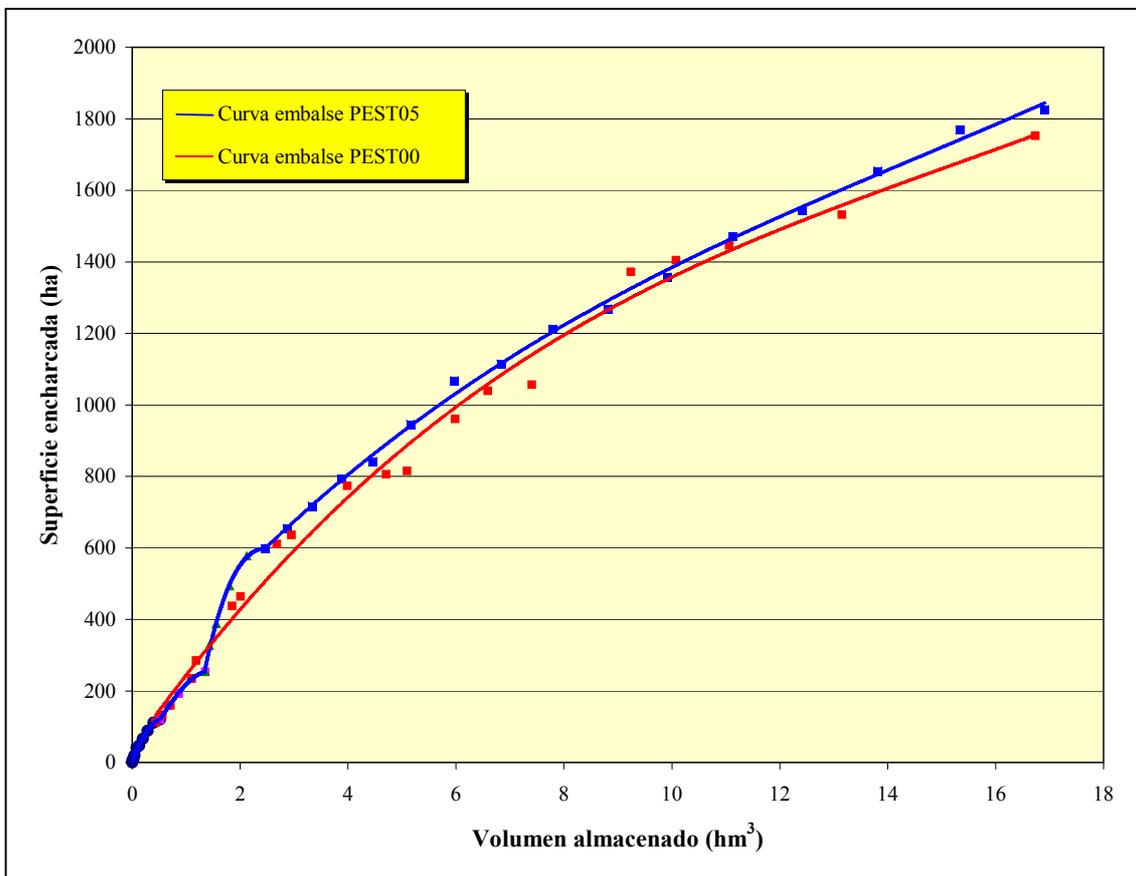


Figura 8.20. Comparación de las curvas de embalse utilizadas en MOPU y MAPA (1986) y la asumida en el presente trabajo a partir del modelo digital del terreno

El análisis del cálculo diario del balance con esta nueva geometría se ha realizado en varias etapas:

- Estimación automática del coeficiente de infiltración. Para poder comparar con los resultados obtenidos anteriormente, también se ha utilizado el programa PEST, habiéndose denominado a esta nueva estimación PEST05.
- Realización de diversas pasadas del programa, con la nueva geometría, para diversos coeficientes de infiltración.
- Comparación de los resultados obtenidos para el período simulado, especialmente los del período comprendido entre enero y noviembre de 1996, con las evaluaciones realizadas en el proyecto MOPU y MAPA (1986), y analizadas por García Rodríguez (1996).
- Comparación de los resultados obtenidos con los de los apartados previos, tanto aquellos procedentes de la calibración mediante el procedimiento de ensayo-error, como de la estimación automática de parámetros.

La primera etapa mencionada ha consistido en la estimación automática exclusivamente del coeficiente de infiltración. Las características de esta estimación, denominada PEST05, se muestran en la tabla 8.8, donde se comparan con los parámetros fijados en la simulación considerada más aceptable para el cálculo del balance hídrico diario en el apartado 8.2.

Tabla 8.8. Comparación de los valores utilizados en el mejor ajuste obtenido para los balances diarios (PEST00) y los considerados en la estimación automática utilizando la curva de embalse del informe MOPU y MAPA (1986), denominado PEST05

Estimación	Fijados	Iniciales	Calculados con PEST
PEST00	infil = 10 mm/d $v_{\max} = 20.935 \text{ hm}^3$		
PEST05	$v_{\max} = 16.909 \text{ hm}^3$	infil = 0.1 mm/d	infil = 9.063 mm/d

infil - coeficiente de infiltración; v_{\max} - volumen máximo del vaso;

El coeficiente de infiltración media diaria calculada, 9.063 mm/d, no es muy diferente a la simulación de referencia (difieren en menos del 1%) y del coeficiente de infiltración calculado de forma automática en PEST01, que era de 9.71 mm/d. Ello muestra que sea cual sea la geometría, el coeficiente de infiltración media del vaso de las Tablas no debe ser muy distinto a ese valor.

En la figura 8.21 se ha representado el diagrama de cajas obtenido de los residuales de la estimación que se está comentando, comparándolo con los correspondientes a todas las simulaciones realizadas mediante calibración por el método inverso. Como se puede apreciar, a pesar de considerar una geometría distinta, con un solo vaso, la diferencia entre los valores medidos y calculados muestra una distribución más homogénea que las obtenidas en apartados anteriores, con una semejanza mayor entre ambos valores (la mediana es cercana al valor cero), aunque en este caso, existe una ligera sobreestimación de la superficie encharcada calculada sobre la medida, pero poco significativa (figura 8.22).

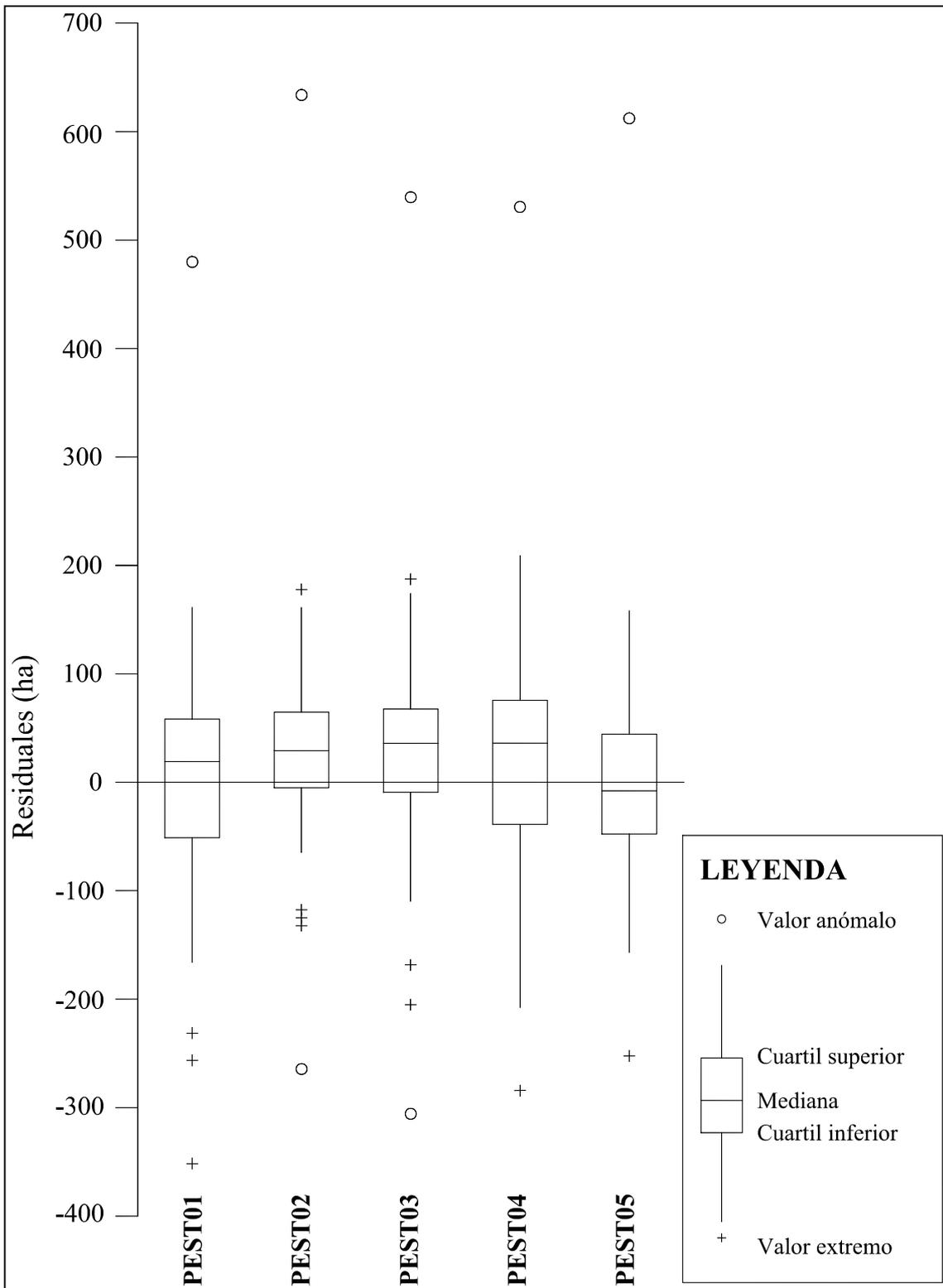


Figura 8.21. Comparación de la distribución de los residuales de la simulación del balance diario de agua en las Tablas de Daimiel con la geometría obtenida de MOPU y MAPA (1986) y las estimaciones automáticas previas

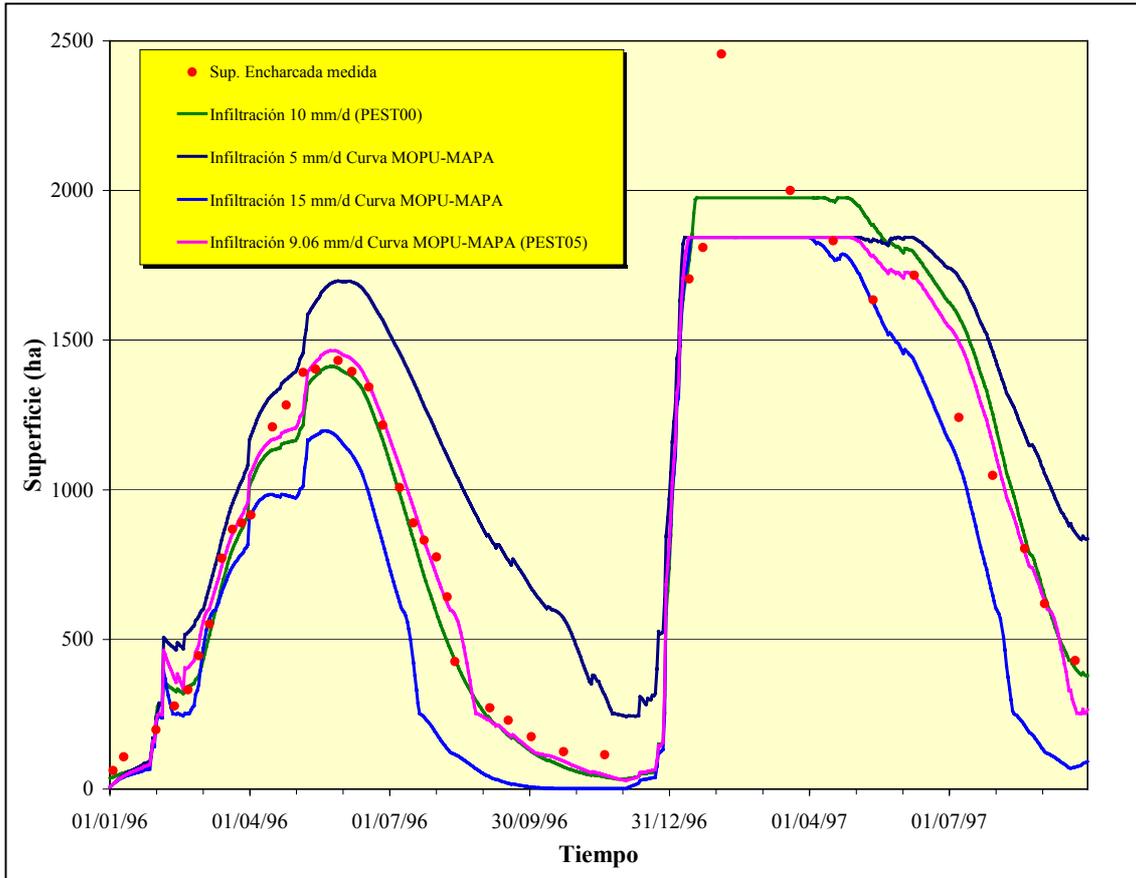


Figura 8.22. Comparación de los valores de superficie encharcada medida y simuladas utilizando la curva de embalse de MOPU y MAPA (1986) para coeficientes de infiltración media de 9.063, 5 y 15 mm/d, y simulación con geometría actual y coeficiente de infiltración de 10 mm/d

Por otra parte, como se ha comentado, la curva de embalse contemplada en la simulación PEST05 fue la utilizada para estimar la cuantía de los caudales externos necesarios para mantener unos niveles mínimos y óptimos de encharcamiento del vaso de las Tablas en el Plan de Regeneración Hídrica. En estos balances, realizados a escala mensual, se cuantificaba en un volumen de agua en las Tablas de 4.4 hm^3 para conseguir los niveles mínimos requeridos (que encharcarían unas 840 ha), y se calculaban en unos 30 hm^3 los aportes totales para obtener dichos niveles en años secos, correspondiendo a unos 15 hm^3 al trasvase requerido. García Rodríguez (1996) apunta que esos aportes seguramente están subestimados al no considerarse la infiltración en los terrenos permeables entre las infraestructuras del Trasvase Tajo-Segura (arroyo de Valdejudíos y río Cigüela) y el vaso de las Tablas de Daimiel y al utilizar para la infiltración un valor de “permeabilidad” no justificado y seguramente reducido.

Como se ha dicho también (apartado 6.3), el trasvase realizado entre febrero y junio de 1996 ha sido de una cuantía de 30 hm^3 (Aragón, 2003), el mayor de todos los realizados, aunque sólo llegaron a las Tablas 18.76 hm^3 (el 61% del volumen concedido), que es del mismo orden que el mencionado más arriba, aunque el resto de entradas es muy reducido. Para el período comprendido entre el 1 de enero de 1996 y el 30 de noviembre de 1996 en el que aprecia todo el efecto de la llegada de agua trasvasada y su desaparición del vaso de las Tablas (figura 8.22), el número de días en el

que igualan o superan los 4.4 hm^3 es de 121, lo que supone cerca del 40% del período de tiempo considerado.

En la figura 8.22 también se han representado las superficies simuladas considerando coeficientes de infiltración media diaria de 5 y 15 mm/d, que lógicamente se alejan de los valores medidos, mejor ajustados en la calibración automática.

Igualmente en la misma figura se comparan las simulaciones descritas en este apartado con la realizada con coeficiente de infiltración de 10 mm/d y modelo geométrico basado en el modelo digital del terreno explicado en el apartado 6.2. La comparación muestra que, aunque los ajustes se han realizado considerando geometrías distintas, las superficies encharcadas resultantes no difieren significativamente, salvo cuando las Tablas se llenan, dado que el volumen máximo del vaso considerado en MOPU y MAPA (1986) es más reducido que el adoptado en el presente trabajo.

También hay algunas diferencias entre las 600 y 800 ha de superficie encharcada, donde se ajusta mejor la simulación que utiliza la curva de MOPU y MAPA ya que, como se aprecia en la figura 8.20, para esas superficies, los pares volúmenes almacenados-superficies encharcadas del modelo digital del terreno se alejan de la curva adoptada para la geometría actual.

Con la utilización de curvas de embalse más complejas, como por ejemplo la representada en la figura 8.19, para los pares de valores del modelo digital del terreno (apartado 6.2) puede mejorar el ajuste de los de las superficies calculadas con las medidas, pero ello requiere un mayor esfuerzo que puede no compensarse por la incertidumbre de los datos disponibles y la precisión de los resultados finales.

En este sentido, en la tabla 8.9 se muestran los resultados del balance para la simulación de referencia (PEST00) junto con los de la simulación PEST05 en el período comprendido entre el 1 de enero de 1996 y el 30 de septiembre de ese año. Los valores obtenidos para este período son relativamente semejantes. Las mayores diferencias son del orden de 0.5 hm^3 y se observan en los valores de infiltración y evaporación, como consecuencia de la diferencia del coeficiente de infiltración considerados, aunque en ambas simulaciones el volumen de infiltración calculado es del mismo orden que el procedente del trasvase. En este período pues, que es el más frecuente desde el secado de las Tablas, la utilización de curvas de embalse más complejas no aportaría ventajas significativas para la estimación de la infiltración sobre la considerada inicialmente en el presente trabajo.

Para el año hidrológico 1996-97, las diferencias son mayores, sobre todo porque el volumen máximo (V_{MAX}) es mucho más reducido en PEST05 que en PEST00, con lo que los excedentes vertidos por Puente Navarro que se calculen serán mayores en el primero respecto al segundo. Así, en la tabla 8.10 se comparan los resultados de ambas estimaciones, mostrando la diferencia comentada, que influye también en el volumen infiltrado estimado, ya que, al existir más pérdidas del sistema como recurso superficial, el volumen que potencialmente se podrían infiltrar es menor. En esos resultados también influye la diferencia en la superficie encharcada estimada en ambas simulaciones, aunque dicha diferencia es relativamente reducida (figura 8.22); en este sentido, los resultados en los conceptos de evaporación y precipitación, también dependientes de la superficie, son muy similares. Igualmente contribuye a esas diferencias el distinto coeficiente de infiltración media diaria que ha sido considerado en ambas simulaciones.

Tabla 8.9. Comparación de los valores de los componentes del balance en el vaso de las Tablas de Daimiel calculados para el mejor ajuste de los balances diarios iniciales (PEST00) y los calculados con el coeficiente de infiltración estimado para la curva de embalse del MOPU y MOPU (PEST05) para el período comprendido entre el 1 de enero de 1996 y el 30 de septiembre de 1996

	INFILTR=10 mm/d (PEST00)	INFILTR=9.06 mm/d (PEST05)
ENTRADAS (hm³)		
PRECIPITACIÓN	1.84	1.91
AP. VILLARRUBIA	18.76	18.76
AP. ZONA NORTE	3.72	3.72
POZOS	2.30	2.30
TOTAL ENTRADAS	26.62	26.69
SALIDAS (hm³)		
INFILTRACION	19.25	18.69
EVAPORACION	6.91	7.43
PTE. NAVARRO	0.00	0.00
TOTAL SALIDAS	26.16	26.12
VAR. ALMACEN.	0.46	0.57

Tabla 8.10. Comparación de los valores de los componentes del balance en el vaso de las Tablas de Daimiel calculados para el mejor ajuste de los balances diarios iniciales (PEST00) y los calculados con el coeficiente de infiltración estimado para la curva de embalse del MOPU y MOPU (PEST05) para el período comprendido entre el 1 de octubre de 1996 y el 30 de septiembre de 1997

	INFILTR=10 mm/d (PEST00)	INFILTR=9.06 mm/d (PEST05)
ENTRADAS (hm³)		
PRECIPITACIÓN	4.96	4.76
AP. VILLARRUBIA	122.33	122.33
AP. ZONA NORTE	14.14	14.14
POZOS	0.00	0.00
TOTAL ENTRADAS	141.43	141.23
SALIDAS (hm³)		
INFILTRACION	43.61	37.35
EVAPORACION	15.88	14.94
PTE. NAVARRO	80.70	88.18
TOTAL SALIDAS	140.19	140.46
VAR. ALMACEN.	1.24	0.76
Períodos con vertidos por Puente Navarro	18 de enero a 10 de abril 20 de abril a 26 de abril	13 de enero a 27 de abril

Finalmente, en la tabla 8.11, similar a la tabla 8.6, se muestran los resultados obtenidos en los balances diarios en el vaso de las Tablas en algunas de las simulaciones comentadas en apartados anteriores, diferenciando los dos períodos de tiempo que se han venido analizando de modo independiente. En la misma, se comparan los resultados relativos de la infiltración respecto a las entradas de agua en el sistema.

Como se comentó en los apartados y párrafos anteriores, para el período en el que las aportaciones más importantes proceden del trasvase Tajo-Segura, las simulaciones que consideran coeficientes de infiltración media de 9-10 mm/d proporcionan resultados muy similares, aunque la geometría que se utilice se modifique. Ello indica que, utilizando un modelo con un único coeficiente de infiltración media diaria para una situación hidrológica “normal” en las Tablas (sin aportes subterráneos, encharcamiento artificial, sin vertidos aguas abajo de Puente Navarro) dicho coeficiente queda acotado en unos valores semejantes a los que se acaban de indicar. En esta situación, para el período simulado, el agua infiltrada es de una cuantía similar a la que entra procedente del trasvase, correspondiendo también entre el 70% y el 73% del total de las entradas al sistema.

Tabla 8.11. Comparación de los resultados de los balances diarios de agua en el vaso de las Tablas para las distintas simulaciones planteadas y para dos períodos de tiempo con diferentes características hidrológicas

Estimación	1 de enero de 1996 a 30 de septiembre de 1996 (1)							1 de octubre de 1996 a 30 de septiembre de 1997 (2)							Infiltración (%)		
	SALIDAS			ENTRADAS				SALIDAS			ENTRADAS				I/(P+C+AS+SB)*100		
	I	E	PN	P	C	AS	SB	I	E	PN	P	C	AS	SB	(1)	(2)	(1 y 2)
PEST00	19.25	6.91	0.00	1.84	18.76	3.72	2.30	43.61	15.88	80.70	4.96	122.33	14.14	0.00	72.32	30.84	38.54
PEST01	19.06	7.07	0.00	1.87	18.76	3.72	2.30	42.70	16.08	81.35	4.99	122.33	14.14	0.00	71.53	30.19	37.86
PEST02	19.06	7.07	0.00	1.87	18.76	3.72	2.30	39.66	14.87	85.63	4.70	122.33	14.14	0.00	71.53	28.09	36.00
PEST03	19.25	6.91	0.00	1.84	18.76	3.72	2.30	42.45	15.44	82.31	4.85	122.33	14.14	0.00	72.32	30.04	37.83
PEST04	19.00	6.89	0.00	1.79	18.76	3.72	2.30	42.75	15.65	81.48	4.84	122.33	14.14	0.00	71.52	30.25	37.88
PEST05	18.69	7.43	0.00	1.91	18.76	3.72	2.30	37.35	14.94	88.18	4.76	122.33	14.14	0.00	70.02	26.44	34.34

I - Infiltración (hm³)

E - Evaporación (hm³)

PN - Rebosamiento por Puente Navarro (hm³)

C - Entradas medidas en estación de aforos del río Cigüela (hm³)

AS - Aportaciones de tributarios septentrionales (hm³)

SB - Bombeos de aguas subterráneas hacia el vaso de las Tablas (hm³)

Si existen aportaciones extraordinarias, como las ocurridas en el año hidrológico 1996-97, la geometría (especialmente el valor correspondiente al volumen máximo del vaso) adquiere cierta importancia para la estimación de la infiltración, ya que si el volumen máximo almacenable es reducido existen unos excedentes que salen del sistema como escorrentía superficial y no son factibles de infiltrarse. En este caso, los mejores ajustes para coeficientes de infiltración media del orden de 10 mm/d se obtienen cuando cesan los aportes superficiales del Cigüela y se reduce considerablemente el volumen almacenado. Sin embargo, para este caso, la infiltración relativa respecto a las entradas en las simulaciones resumidas en la tabla 8.11 muestra unas diferencias inferiores al 5% (oscilan entre el 26 y el 31%), que se pueden considerar pequeñas debido a las incertidumbres de algunos datos utilizados.

Del mismo orden es la diferencia entre las infiltraciones relativas para el total del tiempo simulado, que varían entre el 34% y el 39%, dado que las entradas en el segundo período considerado son 5 veces mayores que las del primero, con lo que su peso en la estimación es muy elevada.

De nuevo, esa similitud de resultados hace recomendable y justificable la utilización de la simulación más sencilla y fácil de utilizar, que sería la que se ha venido denominando PEST00 a lo largo del presente capítulo.

Resumen y conclusiones

Se propone una metodología relativamente fácil de utilizar para la estimación de la infiltración en función de las entradas y salidas de agua que se producen en el vaso de las Tablas de Daimiel dentro del Parque Nacional del mismo nombre (figura 9.1). Su aplicación se ha realizado para el período comprendido entre el 1 de enero de 1996 y el 30 de septiembre de 1997, en el que se produjo un trasvase de agua de 30 hm³ desde la cuenca del Tajo (analizado entre enero y septiembre de 1996) y aportes superficiales extraordinarios debidos a intensas y prolongadas precipitaciones (año hidrológico 1996-97). Dicha metodología, además, se considera adecuada para optimizar el volumen utilizado en el mantenimiento de la lámina de agua libre que favorece la migración y nidificación de una fauna acuática diversificada.

En resumen, la metodología consiste en:

A) Obtención de la curva de embalse del vaso de las Tablas de Daimiel para los distintos sectores en los que se dividió artificialmente la zona húmeda. En el presente trabajo se ha obtenido una función que relaciona el volumen almacenado con la superficie de la lámina de agua a partir de un modelo digital del terreno. Éste se ha basado en una topografía de 1993, con equidistancia de curvas de nivel de 0.5 m, con tamaño de pixel de 2 × 2 m². La utilización de modelos digitales del terreno, ampliamente difundida, parece ser el sistema más adecuado por su rapidez. Su obtención puede basarse en un formato digital preexistente o en la digitalización de topografías detalladas del vaso de las Tablas. La caracterización geométrica del vaso de las Tablas de Daimiel mediante modelos digitales del terreno, o cualquier otro medio, presenta el inconveniente de la necesidad de su continua actualización.

La relación geométrica utilizada tiene en cuenta que el vaso de las Tablas de Daimiel es un embalse dividido en dos sectores por un azud (Dispositivo Hidráulico o presa del Morenillo). Cualquier modificación o mejora del “modelo geométrico” propuesto debe tener en cuenta esta situación y, si es posible, la transferencia de agua entre subsectores.

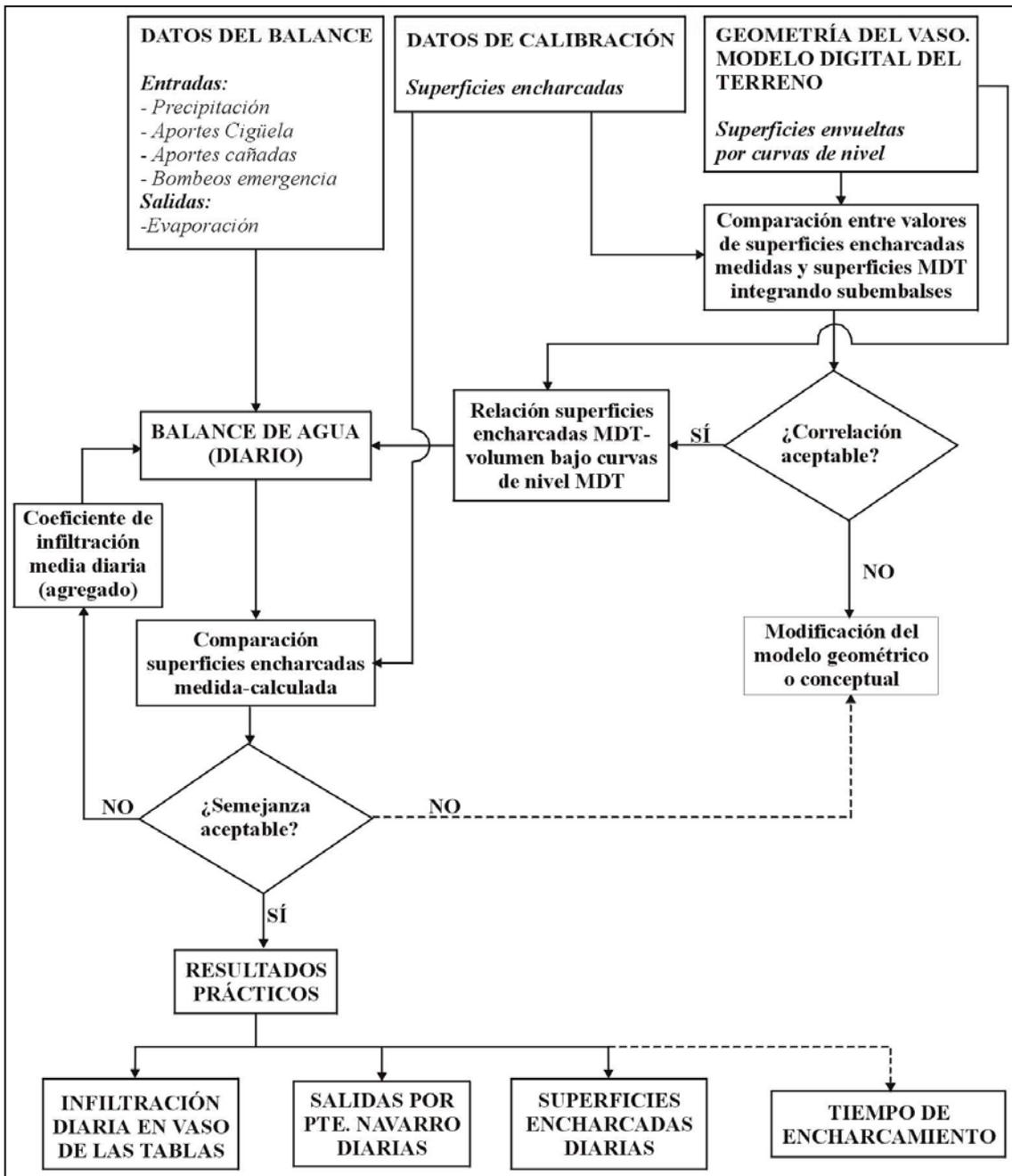


Figura 9.1. Esquema simplificado de la metodología propuesta para el cálculo de la infiltración en el vaso de las Tablas de Daimiel

B) Realización de un balance hídrico diario en la zona encharcada del vaso de las Tablas sobre la base de un único coeficiente de infiltración media diaria. La utilización de períodos más amplios (incluso semanales en condiciones de estabilidad del sistema) da lugar a resultados no satisfactorios. En el presente trabajo se han realizados sendos balances en dos períodos de vaciado del vaso entre fechas con medidas directas de superficie encharcada y con entradas mínimas o nulas, para el cálculo de un coeficiente de infiltración único en el vaso, no encontrándose un valor aceptable para el mismo, por lo que se planteó una escala temporal diaria como más adecuada.

C) *Recopilación de datos diarios sobre los componentes del balance* que deben considerarse (precipitación, datos de aforos, evaporación, temperatura y medidas de superficie encharcada para contraste de resultados). Es quizá la parte más compleja y tediosa del trabajo. En el presente estudio, aunque se ha dispuesto de una amplia información, se ha trabajado con datos recopilados en varios Organismos y otros ya elaborados en diversos estudios que se han aplicado al balance diario. Se consideran imprescindibles los datos diarios de la pluviometría en el entorno de las Tablas (se han utilizado los de la estación meteorológica del Parque Nacional) y de caudales en la estación de aforos de Villarrubia de los Ojos, relativamente próxima a la entrada del río Cigüela al Parque Nacional.

Se ha contado con 42 observaciones de superficie encharcada entre el 3 de enero de 1996 y el 22 de septiembre de 1997.

D) *Elaboración de un modelo conceptual basado en la ley de conservación de masas*, en el que la diferencia entre entradas y salidas de agua se manifiesta como variación de agua almacenada en la zona de embalsamiento. Los componentes del balance no medidos directamente deben estimarse de modo indirecto como resto del balance o mediante el uso de herramientas auxiliares.

D.1) Como entradas al sistema se han considerado:

- Escorrentía superficial diaria del río Cigüela medida en la estación de aforos de Villarrubia de los Ojos. Se diferencian claramente dos períodos. En el primero, entre el 1 de enero y el 30 de septiembre de 1996, se midieron 18.76 hm^3 , correspondientes a restos de un trasvase de 30 hm^3 desde el acueducto Tajo-Segura más la escorrentía superficial en la cuenca alta del Cigüela. En el segundo período, con aportaciones extraordinarias, se registran 122 hm^3 de escorrentía superficial de la cuenca del Cigüela y de excedentes no infiltrados del sistema de las Lagunas de Ruidera.
- Bombeos de la batería de sondeos perforados para el mantenimiento de lámina de agua. En el período considerado, se bombearon dos pozos en 1996, con un volumen total de 2.3 hm^3 ; en el año hidrológico 1996-97 no se bombearon los pozos, dadas las aportaciones naturales entrantes.
- Precipitación directa sobre la lámina de agua, calculada mediante el producto de la lluvia diaria medida en la estación meteorológica de las Tablas y la superficie encharcada calculada mediante la curva de embalse.
- Escorrentía superficial procedente de los afluentes septentrionales de las Tablas de Daimiel. Para los períodos simulados, no se ha dispuesto de medidas de caudal, por lo que se han calculado mediante el modelo precipitación-escorrentía, basado en un balance de agua en el suelo. Se ha aplicado a las cuatro cuencas vertientes de mayor superficie, las cañadas “Cachón de la Leona”, “El Gato”, “Lobosa” y “Madre Chica del Cigüela”, obteniéndose aportaciones totales de 3.7 hm^3 entre enero y septiembre de 1996, y de 14.1 hm^3 para el año hidrológico 1996-97. Para conseguir simular escorrentía en las épocas de encharcamiento en las Tablas, la capacidad de almacenamiento se ha ajustado en el modelo a 200 mm.

D.2) Como salidas del sistema han sido consideradas las siguientes:

- Evaporación directa desde la lámina de agua libre. Se han utilizado tanto valores diarios de evaporación en tanque de la estación meteorológica del Parque Nacional, como datos estimados en función de la temperatura del aire. En el presente trabajo, ha habido un período en el que no se ha podido disponer de datos de evaporación en

tanque, concretamente entre enero de 1996 y abril de 1997, por lo que se ha utilizado una correlación entre temperatura y evaporación.

- Vertidos aguas abajo de la presa de Puente Navarro. Para el período de simulación no se tienen medidas de los mismos, salvo una estimación total de 80 hm³ en 1997. Por ello, deben ser calculados a partir del balance, como excedentes superficiales del sistema.

- Infiltración de agua desde el área encharcada. La cuantificación de la infiltración, objeto esencial del presente trabajo se ha realizado considerando una capacidad de infiltración media diaria única para todo el ámbito del estudio. Se ha calculado a partir del balance en la zona encharcada, como el producto de un coeficiente de infiltración media diaria por la superficie encharcada cada día.

E) Elaboración de una herramienta de cálculo del balance diario en la zona encharcada de las Tablas de Daimiel. Para el presente estudio se ha realizado un programa en lenguaje FORTRAN.

Entre los elementos necesarios a la hora de realizar el balance, aparte de los datos de entradas y salidas de agua, deben figurar el volumen máximo almacenable en el vaso, la relación entre el volumen almacenado cada día y la superficie ocupada por la lámina de agua y el coeficiente de infiltración media diaria.

F) Calibración del modelo planteado basándose en las superficies encharcadas medidas. Para el ajuste se pueden emplear tanto métodos basados en prueba-error como en el método inverso modificando el coeficiente de infiltración. En el caso de utilizar el método inverso, el uso de un programa de optimización general puede ser más adecuado porque no se necesita programación especial, y los programas suelen estar validados, como en esta Tesis, que se ha utilizado el programa PEST, de estimación automática de parámetros, válido para muchos tipos de modelos.

En el presente trabajo, el coeficiente de infiltración media diaria más adecuado, obtenido por calibración de los dos tipos mencionados, es del orden de 10 mm/d, siendo el programa utilizado muy sensible a la variación del coeficiente de infiltración.

En los dos períodos en los que se han analizado los resultados, enero a septiembre de 1996 y año hidrológico 1996-97, el grado de calibración se puede considerar muy aceptable, si bien en el segundo período, en el que se produjo una avenida, se observa una cierta dispersión de la que puede ser consecuencia el propio proceso físico de llenado de las Tablas por esa avenida.

Utilizando el método inverso se han analizado otros aspectos que pueden influir en el balance, tales como el volumen máximo del vaso y la relación entre volumen almacenado y la superficie encharcada. Los resultados obtenidos son similares a los de las simulaciones en las que se ha calibrado únicamente el coeficiente de infiltración, tanto por prueba-error como por el método inverso.

G) Análisis de los resultados. Una vez calibrado, el modelo proporciona los siguientes resultados:

G.1) Volumen infiltrado.- Representa el máximo de la recarga potencial a la unidad hidrogeológica 04.04 desde el vaso de las Tablas. Se ha calculado en algo más del 70% de las entradas para el período en las que éstas proceden del Trasvase Tajo-Segura, del orden del 30% para el período excepcional del año hidrológico 1996-97, y cercana al 40% para el total del período simulado, para un coeficiente de infiltración media diaria del orden de 10 mm/d.

G.2) Salidas por Puente Navarro.- Es un recurso que podría ser utilizable aguas abajo del sistema. Dichos recursos dejaron de poder aprovecharse tras el secado de las salidas subterráneas naturales debido a la explotación de la unidad hidrogeológica 04.04. La simulaciones realizadas han estimado en unos 80-85 hm³ las salidas aguas abajo de las Tablas, del mismo orden del dato proporcionado por la Confederación Hidrográfica del Guadiana. Esta salida se ha producido exclusivamente en el período correspondiente al año hidrológico 1996-97 que fue el excepcional en cuanto a aportaciones, mientras que para una situación con aportaciones mayoritariamente procedentes del trasvase no existen tales vertidos.

G.3) Superficies encharcadas diarias.- Con el volumen almacenado calculado en el balance se pueden estimar las superficies encharcadas en función de la relación entre esas variables. Esta estimación es especialmente interesante en el caso de que el aporte proceda esencialmente del trasvase desde el Tajo. En las simulaciones realizadas, entre enero y septiembre de 1996 algo más del 50% de los días simulados la superficie encharcada sería superior a las 850 ha, superficie mínima a mantener encharcada según el Plan de Regeneración Hídrica de las Tablas de Daimiel.

G.4) Tiempo de encharcamiento, en una primera aproximación.

H) Se trata de un modelo en el que, aunque se varíen las características del vaso, los resultados son muy similares entre todas las simulaciones realizadas. Esta afirmación es especialmente válida para el período comprendido entre enero y septiembre de 1996, con aguas de trasvase. En cualquier caso, los mejores resultados se obtienen para un coeficiente de infiltración media diarias para el conjunto del vaso de las Tablas con valor entre 9 y 10 mm/d.

El modelo se muestra particularmente sensible a la variación del coeficiente de infiltración media diaria y muy poco sensible a la variación de otros parámetros tales como volumen máximo del vaso.

Discusión de los resultados y de la metodología propuesta

La metodología propuesta presenta algunos problemas debido a las simplificaciones realizadas en el medio y en las relaciones entre diferentes parámetros y variables, y al compromiso asumido entre los datos de los que se ha podido disponer y los resultados que se han pretendido obtener para alcanzar los objetivos planteados.

Sin duda, el balance de agua en las Tablas de Daimiel se puede resolver desde otros puntos de vista en función de los objetivos a alcanzar. Hay que destacar en este sentido que cuanto mayor detalle se quiere obtener en los resultados es necesario una mayor precisión y un menor error en los datos a utilizar, lo cual no siempre es posible y especialmente en la zona de estudio. En general, los datos espaciales que condicionan la infiltración no son fáciles de conseguir, y se suelen centrar en la parte más exterior y en los alrededores del vaso, alcanzando habitualmente una profundidad reducida. Hay algunas excepciones descritas en García Rodríguez (1996), aunque su utilización a la hora de realizar balances es limitada.

Entre los métodos más usuales para abordar la infiltración se pueden mencionar estudios tipo en la zona no saturada. Estos métodos permitirían cuantificar la recarga frente a la infiltración llegando a niveles de detalle considerables. Sin embargo, ello significaría utilizar una escala de trabajo muy reducida, mediante la cual la extrapolación de resultados al vaso de las Tablas necesitaría de un gran número de estudios puntuales.

Del mismo modo, se podría abordar la infiltración mediante la realización de balances por zonas, bien considerando independientemente los subembalses que se forman por la existencia de la presa de Puente Navarro, el Dispositivo Hidráulico y el dique de Molemocho, o bien por sectores en función de la distribución de la permeabilidad (o coeficientes de infiltración) en el vaso de las Tablas. En el primer caso es necesario contar con un control muy estricto del paso de agua entre los dos subembalses y de las posibles salidas por Puente Navarro, y en el segundo se requiere un gran nivel de detalle

de la variación geométrica (incluyendo las realizadas puntualmente por el hombre) y de la geología de cada sector en el que se realice el balance.

En cualquier caso, ese enorme esfuerzo que supone realizar esos estudios de detalle, y que es necesario ir elaborando, debe ir de acuerdo con la cantidad y calidad de los datos complementarios que se utilizan en la cuantificación de los balances. Si estos datos son incompletos o poco fiables, las incertidumbres que surjan pueden ser considerables.

Conscientes de que la metodología propuesta puede ser actualizada y mejorada conforme se vaya disponiendo de más datos, a continuación se mencionan algunos de los aspectos más problemáticos y los posibles modos de plantear y resolver dichos problemas:

- Modelo digital del terreno. Es necesario contar con una actualización periódica, ya que el sistema va variando naturalmente (sedimentación, karstificación, vegetación) y artificialmente.

- Control de las entradas por el cauce del Cigüela. Debe atenderse especialmente el buen funcionamiento de esta estación de aforos mediante un mantenimiento especialmente cuidado ya que es el punto de control de aportes superficiales de la cuenca del Cigüela y de aguas del trasvase más cercano al espacio protegido.

- Control de las entradas al vaso por las cañadas Cochón de la Leona, Gato, Lobosa, y Madre Chica del Cigüela. Para el período simulado no existía ningún dispositivo de control de las aportaciones de las mismas. Como el régimen de estas cañadas puede asimilarse al torrencial (sin escorrentía gran parte del año y respuesta relativamente rápida a precipitaciones de cierta entidad), sería conveniente la instalación de aparatos de registro continuo a fin de obtener los hidrogramas completos de las avenidas que se producen.

- Control y cuantificación de la transferencia de volúmenes hacia la zona de aguas abajo a través de los aliviaderos del Dispositivo Hidráulico. Si se dispusiera de esta información, se puede refinar, con poco esfuerzo el programa utilizado para simular dos subembalses con diferente coeficiente de infiltración. Sánchez Soler y Carrasco (1996) los gestores del Parque favorecen el encharcamiento de la zona situada aguas debajo de esta presa mediante la apertura de los desagües de fondo, ya que ese sector es menos propicio a la infiltración, por lo que el modelo geométrico utilizado en este estudio, que parte de esta situación, puede considerarse adecuado en esos casos.

- Modelo conceptual tipo embalse (lámina de agua estática) frente a modelo con lámina de agua fluyente. Validez de los datos de las escalas. Este problema se puede abordar planteando modelos hidráulicos, que calculan la altura de la lámina de agua en función de la sección de paso del agua, el caudal circulante y la pérdida de energía del agua entre secciones. Ello requiere construir modelos muy complejos. También requiere una actualización continua de la geometría de las zonas de paso del agua, incluyendo aquellas siegas y quemas controladas de vegetación que se realizan para favorecer encharcamientos de determinadas zonas, especialmente si los caudales circulantes son reducidos.

- Control de las salidas por las compuertas de la Presa de Puente Navarro. Según Sánchez Soler y Carrasco (1996) no hay aliviaderos de fondo y la apertura de compuertas favorece la salida. Estos autores presentan una estimación de salidas para años húmedos (3.5 hm^3 en 1989 y 5 hm^3 en 1990). Además Álvarez Cobelas et al. (2001), mencionan aportaciones aguas abajo de Puente Navarro entre 0 y 1924 (en 1960) hm^3/a , aunque sólo entre 1944 y 1995, y la Confederación Hidrográfica del

Guadiana estimó los vertidos en el año hidrológico 1996-97 en unos 80 hm³; sin embargo, para el presente trabajo no se ha podido disponer de datos precisos. Por otra parte, la variación de las compuertas modifica el volumen máximo de agua que se puede almacenar en el embalse simulado, con lo que la relación entre las salidas puede variar considerablemente (capítulo 8).

- Control de las salidas del vaso, Guadiana “arriba”, en la zona de la presa de Molemocho. La inundación de parte del antiguo cauce del Guadiana modifica la curva de embalse. Aunque en este trabajo esta circunstancia ha sido tenida en cuenta, es necesario considerar la posibilidad de que el azud sea mantenido o demolido en época de avenidas para favorecer la recarga hacia la unidad hidrogeológica de la Mancha occidental.

Finalmente, entre las incertidumbres que han sido citadas habitualmente para cuestionar la validez de los balances realizados en las Tablas de Daimiel, está la inexistencia o imprecisión de muchos datos utilizados, lo que lleva a un grado de incertidumbre elevado.

Se ha destacado la variabilidad espacial de la infiltración como uno de los elementos clave a controlar para que el balance sea aceptable. Esa variabilidad es debida, entre otras causas, a la heterogeneidad litológica del sustrato y de la sedimentación reciente (García Rodríguez, 1996; Pérez González, 1996; Álvarez Cobelas et al., 1996), a la existencia de antiguas zonas de surgencia en “ojos” u “ojillos” (Álvarez Cobelas et al., 1996), a la modificación antrópica de las Tablas y su entorno hídrico (Álvarez Cobelas et al., 1996; Sánchez Soler y Carrasco, 1996; Carrasco, 2003; Cruces y Martínez Cortina, 2000), a la abundante y heterogénea distribución de la vegetación acuática emergida (Álvarez Cobelas et al., 1996), etc.

Puesto que la presente Tesis intenta acotar los valores de la infiltración, se ha realizado un análisis más detallado de la variabilidad de este parámetro, basándose en las herramientas desarrolladas y con el fin de discutir, aunque sea a nivel cualitativo, la necesidad de afinar en la cuantificación del mismo.

Para ello se ha intentado obtener una visión de la influencia de la variación de la infiltración considerando varios coeficientes de infiltración media diaria en lugar de uno solo, como análisis de sensibilidad del sistema a este parámetro, basándose en:

- En principio, como se ha comentado, la variabilidad del coeficiente de infiltración es consecuencia de una heterogeneidad en la distribución espacial del conjunto de factores mencionados anteriormente. Como se ha establecido un modelo geométrico que relaciona el volumen de agua almacenado con la superficie encharcada, si se establecen infiltraciones variables con el volumen almacenado también se relaciona con la superficie inundada
- La variación del volumen almacenado lleva aparejada también una variación de cota del agua y, por tanto, del potencial hidráulico que condiciona la infiltración, por lo ésta también variará.

Se ha realizado a modo de tanteo una estimación de la infiltración partiendo de las herramientas y datos utilizados previamente, pero de acuerdo con el modelo conceptual, que se muestra, simplificado, en la figura 10.1.

En él se considera que con el incremento de volumen almacenado, el coeficiente de infiltración variará, para justificar los dos puntos expuestos previamente. Dado su carácter de tanteo y de que no se dispone de valores concretos, se han supuesto tres

valores de coeficiente de infiltración. Esos valores cambiarán entre dos límites de almacenamiento de agua, que se han calculado en función del volumen máximo del vaso de las Tablas de Daimiel, V_{MAX} .

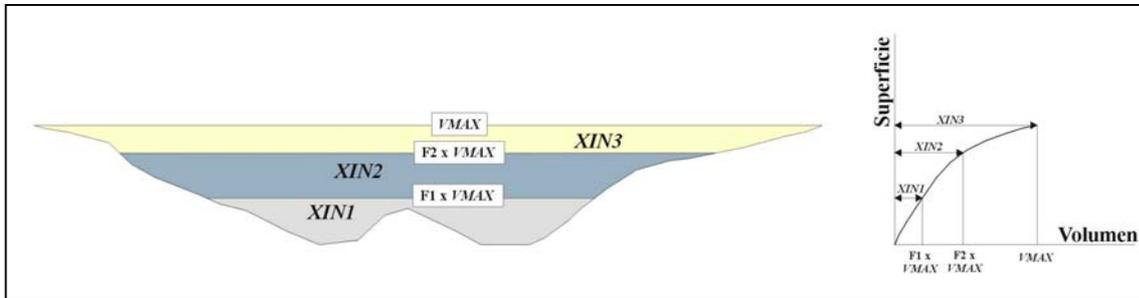


Figura 10.1. Esquema del modelo conceptual utilizado para considerar infiltración variable en función del volumen embalsado en el vaso de las Tablas de Daimiel

El aumento del volumen almacenado originaría que la superficie encharcada es mayor, con lo que la variación de las características del fondo de las Tablas provocará un cambio en la capacidad de infiltración. Ésta responderá tanto a las nuevas características del fondo del vaso, como a las de las superficies previamente encharcadas y al potencial del agua como consecuencia del incremento en el espesor del agua libre en las Tablas.

Para ese primer tanteo, únicamente se han considerado tres posibles coeficientes de infiltración diaria (figura 10.1), que se modificaría en los siguientes intervalos de volumen almacenado:

- $XIN1$, si $0 \leq VALM(I) < F1 \times VMAX$, con $F1 = 1/3$
- $XIN2$, si $F1 \times VMAX \leq VALM(I) < F2 \times VMAX$, con $F2 = 2/3$
- $XIN3$, si $F2 \times VMAX \leq VALM(I) \leq VMAX$

donde, $VMAX=20.935$ hm³ y la relación entre el volumen almacenado y la superficie inundada es la obtenida a partir del modelo digital del terreno (apartado 6.2.2)

Para introducir esas variaciones conceptuales ha sido necesario modificar ligeramente el programa original para el cálculo del balance diario de agua. Esas modificaciones han consistido en definir los intervalos de variación del volumen para los que el coeficiente de infiltración es diferente, y en leer dichos coeficientes desde el fichero de entrada de datos.

La simulación se ha realizado utilizando el método inverso para la estimación de los coeficientes de infiltración, mediante el programa PEST, habiéndose denominado la estimación PEST06.

El ajuste óptimo entre los valores observados y calculados se obtiene con los siguientes valores:

- $XIN1 = 8.085$ mm/d,
- $XIN2 = 9.607$ mm/d, y
- $XIN3 = 16.021$ mm/d.

El resultado de la estimación muestra un valor intermedio, correspondiente a *XIN2*, del mismo orden de los encontrados en las estimaciones con coeficiente único que se analizaron en el capítulo 8, otro ligeramente inferior para volúmenes reducidos, y otro mucho mayor correspondiente a las mayores superficies inundadas. En conjunto, el sistema respondería con infiltraciones progresivamente menores conforme la superficie afectada por encharcamientos disminuye, pero para la mayor parte de los volúmenes, el coeficiente de infiltración estaría próximo al estimado anteriormente de 10 mm/d.

La figura 10.2 muestra los residuales del ajuste automático conseguido, mientras que la figura 10.3 compara la distribución de esos residuales con las de las simulaciones que se realizaron con ayuda del programa PEST y que se explicaron en el apartado 8. En conjunto, en el ajuste PEST06 los residuales muestran la menor dispersión, o lo que es lo mismo, los valores calculados son los que más se asemejan a los medidos, repartiéndose de manera mayoritaria alrededor del valor cero o de semejanza total. Únicamente 8 valores muestran una diferencia superior a las 100 ha, siendo uno de ellos la medida correspondiente al 3 de febrero, que muestra problemas de cambio en los criterios de las medidas, y además en esa fecha el sistema es extremadamente variable al responder a una avenida extraordinaria.

La comparación de las evoluciones temporales de las superficies encharcadas medidas y calculadas en la simulación con coeficiente de infiltración variable (PEST06) y la tomada como referencia (PEST00) se ha representado en la figura 10.4. La simulación PEST06 muestra un ajuste más aceptable que esta última, destacando sobre todo los valores correspondientes al período correspondiente a la primera etapa de secado (o flujo de agua) tras la avenida de finales de 1996 y principios de 1997. Ese mejor ajuste en las superficies encharcadas se debe al haberse calculado un coeficiente de infiltración elevado que favorece el cálculo de una elevada pendiente en la reducción del encharcamiento, lo que, por otra parte, provoca que el período para el que se calculan salidas por Puente Navarro sea más reducido, del orden de un mes menor, que el período de vertidos observado.

Finalmente, en la tabla 10.1 se muestran los resúmenes de los balances obtenidos en las simulaciones PEST00 y PEST06 para los períodos comprendidos entre el 1 de enero de 1996 y el 30 de septiembre d ese año, y entre el 1 de octubre de 1996 y el 30 de septiembre de 1997, así como la infiltración relativa conjunta.

Al igual que en otras simulaciones, para el período en el que las entradas mayoritarias proceden del trasvase Tajo-Segura, no existen diferencias significativas entre los resultados obtenidos. Ello es debido a que los coeficientes de infiltración utilizados para el cálculo en PEST06 son similares al utilizado en la simulación PEST00, que era de 10 mm/d, dado que los volúmenes almacenados no provocan el cálculo de la infiltración con el coeficiente de mayor valor. Las pequeñas diferencias que se encuentran son debidas a que el programa utiliza el valor más reducido del coeficiente de infiltración cuando las superficies encharcadas son escasas y dicho valor es 2 mm/d más reducido que el utilizado en PEST00. En conjunto, los resultados son similares a los comentados en el capítulo 8, habiéndose calculado una infiltración relativa del orden del 70% de las entradas de agua al sistema, con valores absolutos similares a las aportaciones procedentes del trasvase.

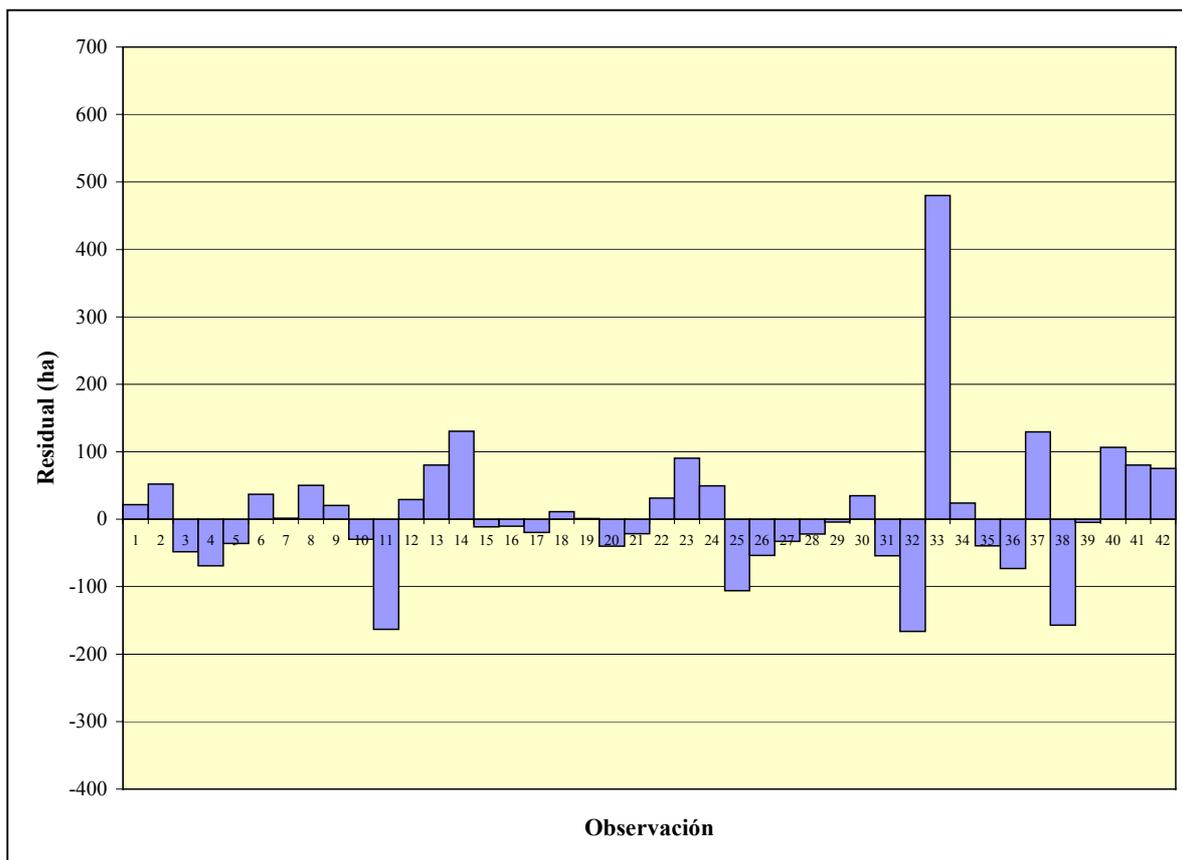


Figura 10.2. Residuales de la simulación del balance de agua diario en las Tablas de Daimiel calculados en la estimación automática de tres coeficientes de infiltración

Tabla 10.1. Comparación de los resultados globales de los balances realizados mediante las simulaciones PEST00 y PEST06 para los dos períodos de tiempo más característicos de las condiciones hidrológicas en las Tablas en los años 1996 y 1997

Estimación	1 de enero de 1996 a 30 de septiembre de 1996 (1)							1 de octubre de 1996 a 30 de septiembre de 1997 (2)							Infiltración (%)		
	SALIDAS			ENTRADAS				SALIDAS			ENTRADAS				I/(P+C+AS+SB)*100		
	I	E	PN	P	C	AS	SB	I	E	PN	P	C	AS	SB	(1)	(2)	(1 y 2)
PEST00	19.25	6.91	0.00	1.84	18.76	3.72	2.30	43.61	15.88	80.70	4.96	122.33	14.14	0.00	72.32	30.84	38.54
PEST06	18.49	7.44	0.00	1.97	18.76	3.72	2.30	55.53	14.45	70.54	4.78	122.33	14.14	0.00	69.13	39.32	45.35

I - Infiltración (hm³)

E - Evaporación (hm³)

PN - Rebosamiento por Puente Navarro (hm³)

C - Entradas medidas en estación de aforos del río Cigüela (hm³)

AS - Aportaciones de tributarios septentrionales (hm³)

SB - Bombeos de aguas subterráneas hacia el vaso de las Tablas (hm³)

Las mayores diferencias se encuentran en el segundo período (tabla 10.1), en el que el vaso de las Tablas se llena, se alcanzan los máximos volúmenes y en el programa se utiliza el coeficiente de infiltración más elevado. Dado que la infiltración calculada depende de la superficie encharcada, y ésta es también elevada, los valores obtenidos son mayores que los correspondientes a la simulación PEST00, quedando menos volúmenes para verter como excedente superficial por Puente Navarro. En valores absolutos existe una diferencia en el cálculo de 10 hm³, que es compensada por unas

menores salidas por vertidos en Puente Navarro y por evaporación en la lámina de agua libre. En cuanto a la infiltración relativa, para ese período, la diferencia llega a ser del 10%.

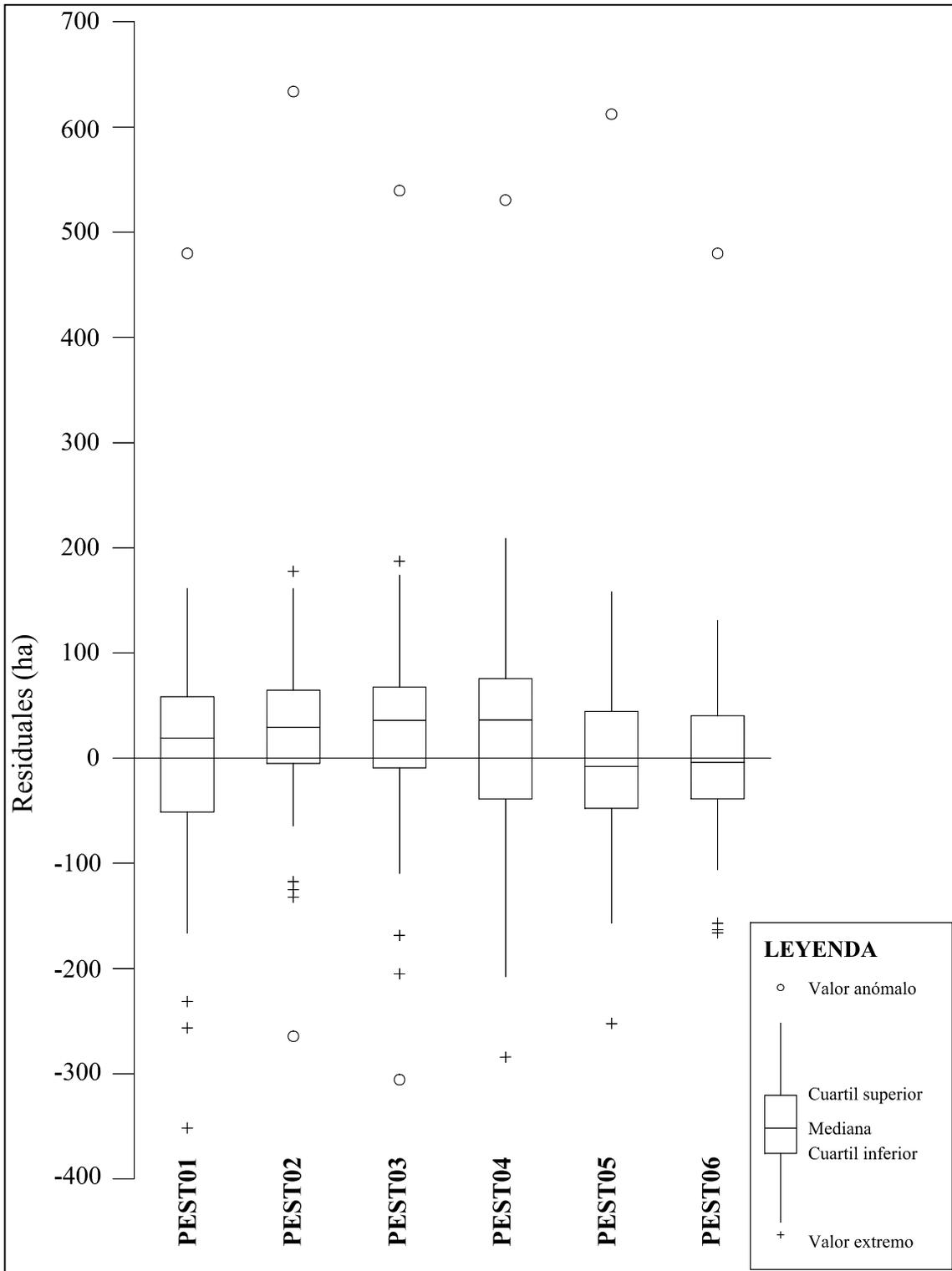


Figura 10.3. Diagramas de caja de las distribuciones de las diferencias entre valores observados y medidos para las simulaciones más significativas realizadas con el programa de estimación automática de parámetros PEST

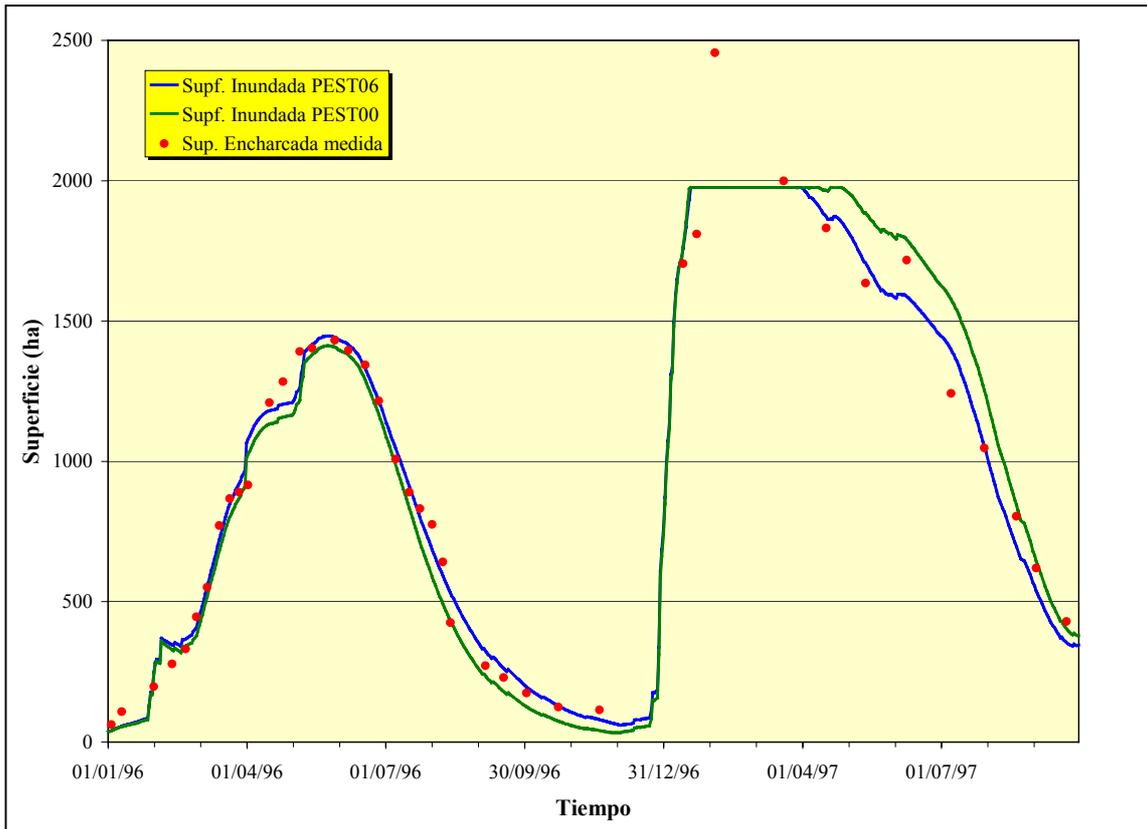


Figura 10.4. Comparación de las superficies encharcadas observadas y las calculadas considerando coeficientes de infiltración variables y en la simulación de referencia

Sin embargo, cabe recordar que las estimaciones de la Confederación Hidrográfica del Guadiana, recogidas también por Cruces y Martínez Cortina (2000), valoran las salidas por Puente Navarro en 80 hm^3 para 1997, valor más cercano al cálculo inicial con coeficiente de infiltración media de 10 mm/d .

Por otra parte, se han realizado otras estimaciones modificando los valores límite de los intervalos en los que se calcularía la infiltración con diferentes coeficientes. En las estimaciones efectuadas, los valores obtenidos para los coeficientes correspondientes a los volúmenes más bajos son muy similares a los obtenidos en la simulación PEST06 (entre 8 y 8.5 mm/d para *XIN1*, y entre 9 y 10 mm/d para *XIN2*). En cambio, para el coeficiente correspondiente a los volúmenes más elevados, ha oscilado entre 13 y 20 mm/d , no observándose, en la mayoría de los casos, grandes variaciones respecto a PEST06 en lo referente a las diferencias entre valores observados y calculados, aunque sí se encuentran diferencias respecto a los volúmenes infiltrados y los correspondientes a excedentes superficiales.

Así pues, para la situación correspondiente a 1996 (la “normal” tras el secado de las Tablas y la llegada de aguas del trasvase Tajo-Segura), con las condiciones y los datos de los que se ha dispuesto, la metodología propuesta se puede considerar válida para los objetivos planteados en la presente Tesis, aun cuando varíen algunos parámetros relacionados con la geometría del sistema.

Para el período en el que el sistema se encuentra en estado de almacenamiento máximo de agua, la variación de resultados puede plantear dudas sobre la metodología utilizada, sobre todo si se quiere usar para estimar de modo detallado la recarga hacia el acuífero

de la Mancha occidental o la escorrentía superficial aguas debajo de Puente Navarro en períodos de avenidas extraordinarias.

En el período de estas características que se ha analizado, correspondiente al año hidrológico 1996-97, los datos de observación que han servido para estimar los coeficientes de infiltración (mediante los métodos directo o indirecto) por cambios en los criterios de toma de datos, los problemas propios de un período de avenidas, y también por el incremento del período de toma de datos. Así para el período comprendido entre enero y septiembre de 1996, se hicieron observaciones cada 10 días de media, mientras que para 1996-97, las observaciones se realizaron cada 25 días aproximadamente. Al incrementarse el número de días entre medidas la evolución de las superficies encharcadas queda poco definida, y las posibles oscilaciones de valores para analizar sus causas.

En esta situación no sólo parece necesario incrementar el conocimiento de las características de la infiltración en el vaso de Tablas, sino también el número y precisión de las medidas de control. La caracterización detallada de la infiltración es quizá bastante más compleja que la mejora de las medidas de control; se podrían realizar modelos más complicados con muchos parámetros, con un incremento en la incertidumbre si no se tienen más datos de partida, pero la operatividad del cálculo del balance para uso rápido se perdería, al necesitarse más parámetros y variables para obtener resultados aceptables.

Según se desprende de lo expuesto en este capítulo, la mejora del conocimiento de la infiltración en el vaso de las Tablas de Daimiel más que en la búsqueda de nuevas metodologías pasa por la actualización continua de la geometría del vaso, que condiciona, a su vez, la superficie encharcada y el volumen almacenado, así como a la mejora de la medida de los distintos parámetros y datos que intervienen en el balance, especialmente las aportaciones de los afluentes de la margen derecha de las Tablas.

En las épocas de avenida hay que tener en cuenta que la calidad de los datos de partida es inferior debido a la dificultad que plantea su medida y obtención, y que el modelo conceptual pasa a ser un modelo hidráulico dinámico.

Referencias

- Álvarez Cobelas, M.; Cirujano, S. y Sánchez Carrillo, S. (2001): Hydrological and botanical man-made changes in the Spanish wetland of Las Tablas de Daimiel. *Biological Conservation*, 97; 89-98.
- Álvarez Cobelas, M. y Verdugo, M. (1996): El entorno de las Tablas: Climatología, en *Las Tablas de Daimiel. Ecología acuática y sociedad* (Álvarez Cobelas, M. y Cirujano, S., Eds.). Publicaciones del Organismo Autónomo de Parques Nacionales. Pp.47-55. Madrid.
- Álvarez Cobelas, M.; Verdugo, M. y Cirujano, S. (1996): El entorno de las Tablas: Geografía y Morfometría, en *Las Tablas de Daimiel. Ecología acuática y sociedad* (Álvarez Cobelas, M. y Cirujano, S., Eds.). Publicaciones del Organismo Autónomo de Parques Nacionales. pp. 23-29. Madrid.
- Aragón, J.R. (2003): Hidromitos de la cuenca alta del Guadiana, en *Conflictos entre el desarrollo de las aguas subterráneas y la conservación de los humedales: la cuenca alta del Guadiana* (Coletto, C.; Martínez Cortina, L. y Llamas, M.R., Eds.). Fundación Marcelino Botín. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. pp. 69-101.
- Arauzo, M.; Rubio, A. y Vicioso, J. (1996): El ambiente acuático: Hidroquímica, en *Las Tablas de Daimiel. Ecología acuática y sociedad* (Álvarez Cobelas, M. y Cirujano, S., Eds.). Publicaciones del Organismo Autónomo de Parques Nacionales. pp. 79-89. Madrid.
- Berzal, V.; García Berrio, F. y Vicens, J.M. (1987): Estudio de viabilidad de un plan de regeneración hídrica en el Parque Nacional de las Tablas de Daimiel. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos (IV Simposio de Hidrogeología)*; 11: 581-594. Palma de Mallorca.

- Bromley, J.; Vardavas, I. y Dolz, J. (2000): Data Collation and analysis of historical data: Analysis of historical data, en *GRAPES: Groundwater and River Resources Action Programme on a European Scale. Technical Report* (European Commission). Institute of Hydrology, Wallingford. pp. 23-65
- Carrasco, M. (2003): Daimiel como paradigma de los conflictos entre comunidades de usuarios de aguas subterráneas y conservación de humedales de alto valor ecológico, en *Conflictos entre el desarrollo de las aguas subterráneas y la conservación de los humedales: la cuenca alta del Guadiana* (Coletto, C.; Martínez Cortina, L. y Llamas, M.R., Eds.). Fundación Marcelino Botín. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. pp. 233-254.
- Cobelas, A.; Sánchez Soler, M.J.; Carrasco, M.; García-Consuegra, B.; Escuderos, J. y Álvarez Cobelas, M. (1996): La Sociedad: Aspectos Históricos, en *Las Tablas de Daimiel. Ecología acuática y sociedad* (Álvarez Cobelas, M. y Cirujano, S., Eds.). Publicaciones del Organismo Autónomo de Parques Nacionales. pp. 219-234. Madrid.
- Confederación Hidrográfica del Guadiana (1996): *Trasvase desde el Acueducto Tajo-Segura hasta el Parque Nacional de las Tablas de Daimiel*. Informe inédito. 6 pp.
- Cruces, J. y Martínez Cortina, L. (2000): La Mancha Húmeda. Explotación intensiva de las aguas subterráneas en la cuenca alta del río Guadiana. *Papeles del Proyecto Aguas Subterráneas, Serie A, n° 3*. Fundación Marcelino Botín. Santander. 66 pp.
- Elías, F. y Ruiz Beltrán, L. (1977): *Agroclimatología de España*. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias. Ministerio de Agricultura. Madrid. 26 pp. y apéndice.
- Elvira, B. y Barrachina, P. (1996): Productores secundarios: Peces, en *Las Tablas de Daimiel. Ecología acuática y sociedad* (Álvarez Cobelas, M. y Cirujano, S., Eds.). Publicaciones del Organismo Autónomo de Parques Nacionales. pp. 171-185. Madrid.
- ERDAS Inc. (1995): *ERDAS IMAGINE*. Manual del usuario. Atlanta
- Eснаоla, J.M. y Martínez Alfaro, P.E. (1992): Análisis de las aportaciones superficiales al Parque Nacional de las Tablas de Daimiel y su influencia en la evolución hidrogeológica del ecosistema. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos (V Simposio de Hidrogeología)*; 16: 411-423. Alicante.
- Estrela, T. (1993): *Modelos matemáticos para la evaluación de recursos hídricos*. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Madrid. 55 pp.
- García Jiménez, M.A.; López Camacho, B. y Montesinos, S. (1992): Aplicación de la teledetección al conocimiento hidrológico de la cuenca alta del Guadiana. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos (V Simposio de Hidrogeología)*; 17: 591-600. Alicante.
- García Rodríguez, M. (1996): *Hidrogeología de las Tablas de Daimiel y de los Ojos del Guadiana. Bases hidrogeológicas para una clasificación funcional de humedades ribereñas*. Tesis Doctoral. Tomo I: Memoria. Universidad Complutense de Madrid. 443 pp.
- García Rodríguez, M. y Llamas, M.R. (1992): Aspectos hidrogeológicos en relación con la génesis y combustión espontánea de las turbas en los “ojos” del Guadiana. *Actas del III Congreso Geológico de España*; 2: 285-289. Salamanca.

- García Rodríguez, M. y Llamas, M.R. (1993): Cambios paisajísticos en el alto Guadiana causados por la explotación intensiva e incontrolada de aguas subterráneas. *Actas de las VI Jornadas sobre el paisaje*. pp. 91-102. Segovia
- García Rodríguez, M. y Llamas, M.R. (1996): Características geológicas del borde suroccidental de la unidad hidrogeológica 04.04 y su influencia sobre la hidrogeología de las Tablas de Daimiel. *Geogaceta*, 20(6): 1271-1273
- López-Camacho, B.; De Bustamante, I.; Dorado, M. y Arauzo, M. (1996): El entorno de las Tablas: Hidrología, en *Las Tablas de Daimiel. Ecología acuática y sociedad* (Álvarez Cobelas, M. y Cirujano, S., Eds.). Publicaciones del Organismo Autónomo de Parques Nacionales. pp. 57. Madrid.
- López Camacho, B. y García Jiménez, M.A. (1989): Sobreexplotación del acuífero de la Mancha occidental (Unidad Hidrogeológica 04-04). *Actas del Congreso Nacional "La sobreexplotación de acuíferos"*. pp. 103-116. Almería
- López Camacho, B. y García Jiménez, M.A. (1991): El acuífero de la Mancha Occidental y el Parque Nacional de las Tablas de Daimiel. Situación hidráulica y medidas técnicas y administrativas adoptadas. *Actas del XXIII Congreso Internacional de la A.I.H.; 1: 145-149*. Puerto de la Cruz.
- Llamas, M.R. (1989): Consideraciones sobre la relación entre sobreexplotación de acuíferos e impactos ecológicos. *Actas del Congreso Nacional "La sobreexplotación de acuíferos"*. pp. 381-396. Almería
- Llamas, M.R. (1991): Groundwater exploitation and conservation of aquatic ecosystems. *Actas del XXIII Congreso Internacional de la A.I.H.; 1: 115-131*. Puerto de la Cruz.
- Martín Arnaiz, M. (1983): "Componentes primarios del ciclo hidrológico" en *Hidrología subterránea* (Custodio, E. y Llamas, M.R., Eds), 2ª Edición. Ed. Omega. Barcelona. pp. 281-350.
- Martínez Cortina, L. (2003): "Marco hidrológico de la cuenca alta del Guadiana", en *Conflictos entre el desarrollo de las aguas subterráneas y la conservación de los humedales: la cuenca alta del Guadiana* (Coletto, C.; Martínez Cortina, L. y Llamas, M.R., Eds.). Fundación Marcelino Botín. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. pp. 3-68.
- Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo y Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, MOPU y MAPA (1986): *Estudio de viabilidad de un Plan de Regeneración Hídrica en el Parque Nacional de las Tablas de Daimiel (Ciudad Real)*. Tomo I: Memoria. Informe interno.
- Montesinos, S. (1990): Teledetección: su utilización en la cuantificación y seguimiento de recursos hidráulicos aplicados al regadío. Proceso digital de imágenes LANDSAT TM de La Mancha Occidental. *Informaciones y Estudios*, 51: 1-95
- Pérez González, A. (1996): El entorno de las Tablas: Marco Geológico y Geomorfológico, en *Las Tablas de Daimiel. Ecología acuática y sociedad* (Álvarez Cobelas, M. y Cirujano, S., Eds.). Publicaciones del Organismo Autónomo de Parques Nacionales. pp. 31-34. Madrid.
- Rodríguez García, J.A. (1998): *Geomorfología de las Tablas de Daimiel y del endoerrismo manchego centro-occidental*. Tesis de Licenciatura. Fac. CC. Geológicas (U.C.M.). 164 pp.

- Rodríguez García, J.A. y Pérez-González, A. (1999): Clasificación geomorfológica de los humedades y fondos endorreicos de la Mancha centro-occidental. *Geogaceta*, 26: 83-86
- Ruiz Cela, C. y Fabregat, V. (1987): Situación actual y perspectivas futuras del Parque Nacional de las Tablas de Daimiel en relación con la explotación de las aguas subterráneas en la Mancha occidental (Sistema acuífero 23). *Geología y Ordenación del Territorio. III Reunión Nacional (Comunicaciones)*, 1; 357-374. Valencia
- Sánchez Soler, M.J. y Carrasco, M. (1996): La Sociedad: El Plan de Regeneración Hídrica, en *Las Tablas de Daimiel. Ecología acuática y sociedad* (Álvarez Cobelas, M. y Cirujano, S., Eds.). Publicaciones del Organismo Autónomo de Parques Nacionales. pp. 253-265. Madrid.
- Servicio Geológico de la Dirección General de Obras Hidráulicas, SGDGOH (1988 a): *Evolución de las extracciones y niveles piezométricos en el acuífero de la Llanura manchega*. Estudio 06/88. Inédito
- Servicio Geológico de la Dirección General de Obras Hidráulicas, SGDGH (1988b): *Segundo informe sobre el control y seguimiento de la actuación experimental de derivación de caudales del acueducto Tajo-Segura con destino al Parque Nacional de las Tablas de Daimiel*. Informe 11/88. Inédito.
- Servicio Geológico de la Dirección General de Obras Hidráulicas, SGDGOH (1989a): *Tercer informe sobre el control y seguimiento de la actuación experimental de derivación de caudales del acueducto Tajo-Segura con destino al Parque Nacional de las Tablas de Daimiel*. Informe interno 09/89. Inédito. 16 pp. y anexos.
- Servicio Geológico de la Dirección General de Obras Hidráulicas, SGDGH (1989b): *Estudio para la ordenación de extracciones del acuífero de la Mancha occidental*. Informe 12/89. Inédito. 116 pp.
- Servicio Geológico de la Dirección General de Obras Hidráulicas, SGDGH (1990): *Control y seguimiento de la actuación experimental de derivación de caudales del Acueducto Tajo-Segura y con carácter experimental, con destino al Parque Nacional de las Tablas de Daimiel*. Informe 09/90. Inédito. 29 pp y anexos.
- Servicio Geológico de la Dirección General de Obras Hidráulicas, SGDGOH (1991): *Evolución de las extracciones y niveles piezométricos en los acuíferos de la Llanura manchega y del Campo de Montiel. Primera parte: Llanura manchega*. Informe 05/91. Inédito. 60 pp.
- Servicio Geológico de la Dirección General de Obras Hidráulica, SGDGOH (1993): *Control de la derivación de agua con destino al Parque Nacional de las Tablas de Daimiel en desarrollo del R.D. Ley 6/1990 de 28 de diciembre*. Informe interno 03/93. Inédito
- Servicio Geológico de Obras Públicas, SGOP (1983): *Estudio de la explotación de agua subterránea en las proximidades del Parque Nacional de las Tablas de Daimiel y su influencia sobre el soporte hídrico del ecosistema*. Informe interno 12/83.
- Thornthwaite, C.W. y Mather, J.R. (1955): The water balance. *Publ. Climatol. Lab. Climatol. Drexel. Inst. Technol.*, 8(1): 1-104
- Tragsatec, S.A. (1996): *Modelo Digital del Terreno del vaso de las Tablas de Daimiel*. Dirección General de Obras Hidráulicas. Informe inédito.

Varela, C.; Sumpsi, J.M. y Blanco, M. (2003): Análisis económico de los conflictos entre el regadío y la conservación de los humedales en el alto Guadiana, en *Conflictos entre el desarrollo de las aguas subterráneas y la conservación de los humedales: la cuenca alta del Guadiana* (Coletto, C.; Martínez Cortina, L. y Llamas, M.R., Eds.). Fundación Marcelino Botín. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. pp. 257-275.

Watermark Computing (1998): *PEST. Model-Independent Parameter Estimation*. Manual del usuario. 164 pp.

Watermark Computing (2000): *PEST2000 upgrade notes*. 34 pp.



**Estudio metodológico para el cálculo de la infiltración en el
vaso de las Tablas de Daimiel.
Validación de Resultados**

Anexos

Anexos a la Memoria presentada por:
D. Silvino Castaño Castaño
para optar al grado de Doctor por la Universidad Complutense de Madrid
bajo la dirección del Dr. D. Pedro Emilio Martínez Alfaro
Madrid, 2003

Índice de Anexos

Anexo 1. Niveles medidos en las escalas limnimétricas instaladas en el Parque Nacional de las Tablas de Daimiel

Anexo 2. Superficies encharcadas y volúmenes de agua almacenados en el vaso de las Tablas de Daimiel, según cota, calculados a partir del Modelo Digital del Terreno

Anexo 3. Superficies encharcadas medidas

Anexo 4. Caudales medios diarios medidos en la estación de aforos E-4204 de Villarrubia de los Ojos

Anexo 5. Datos de precipitación y temperatura diarios medidos en la estación meteorológica 04112U del Parque Nacional de las Tablas de Daimiel

Anexo 6. Notas de la Confederación Hidrográfica del Guadiana sobre la inundación del cauce del Guadiana entre los puentes de Molemocho y Nuevo

Anexo 7. Caudales bombeados para el mantenimiento de las superficies encharcadas del Parque Nacional de las Tablas de Daimiel

Anexo 8. Evaporación diaria medida en la estación meteorológica 04112U del Parque Nacional de las Tablas de Daimiel

Anexo 9. Datos de temperatura y evaporación diarias para 1995. Correlación entre ambas magnitudes

Anexo 10. Evapotranspiración potencial media mensual calculada con datos de la estación meteorológica de Daimiel (Elías y Ruz Beltrán, 1977)

Anexo 11. Resultados del modelo precipitación-escorrentía basado en balance de agua en el suelo

Anexo 12. Datos de entrada al modelo de simulación del balance de agua diario en el vaso de las Tablas de Daimiel

Anexo 13. Entradas diarias al vaso de las Tablas de Daimiel, y salidas y variación del almacenamiento diarios para coeficientes de infiltración media diaria de 5, 10, Y 15 mm/d

Los anexos correspondientes a la Tesis Doctoral de Silvino Castaño Castaño, *Estudio metodológico para el cálculo de la infiltración en el vaso de las Tablas de Daimiel. Validación de Resultados*, se encuentran a disposición de quien desee consultarlos en el Departamento de Geodinámica (Facultad de Ciencias Geológicas) de la Universidad Complutense de Madrid. Igualmente se pueden consultar poniéndose en contacto con el autor.