

# **CAPÍTULO 5. COMPARACIÓN CON OTROS MODELOS HIDROLÓGICOS DE SIMULACIÓN**



## ÍNDICE DEL CAPÍTULO

5. COMPARACIÓN CON OTROS MODELOS HIDROLÓGICOS DE SIMULACIÓN .....	5-1
5.1. Objetivos .....	5-1
5.2. Vertedero simulado .....	5-2
5.2.1. Localización .....	5-2
5.2.2. Forma de explotación.....	5-2
5.2.3. Residuos .....	5-4
5.2.4. Clima .....	5-4
5.2.5. Características notables.....	5-4
5.3. Modelo en MODUELO .....	5-4
5.3.1. Introducción. Datos disponibles .....	5-4
5.3.2. Datos meteorológicos .....	5-5
5.3.3. El terreno.....	5-6
5.3.4. Residuos vertidos.....	5-9
5.3.5. Información sobre emisiones producidas.....	5-11
5.4. Modelo con los otros programas.....	5-12
5.4.1. Con HELP .....	5-12
5.4.2. Con MODUELO 1 .....	5-15
5.5. Comparación.....	5-16
5.5.1. Simulación del período de explotación.....	5-16
5.5.2. Simulación del vertedero clausurado .....	5-21
5.6. Discusión.....	5-24
5.7. Referencias .....	5-25

## 5. COMPARACIÓN CON OTROS MODELOS HIDROLÓGICOS DE SIMULACIÓN

### 5.1. OBJETIVOS

Una vez descritos, justificados y comparados con otros existentes los modelos que componen MODUELO 2, en este capítulo se comparan los resultados globales del mismo en aplicación a un caso real con los obtenidos con HELP y MODUELO 1.

Basando el análisis en una aplicación real se puede observar directamente el resultado global de cada programa, constituido por un conjunto de expresiones matemáticas en el que influyen las interrelaciones entre unas y otras. Así, y no aislando cada modelo (el de infiltración del de evapotranspiración, éstos del de flujo interior, etc.), se estudia el comportamiento práctico de los mismos, que en la realidad habrán de aplicarse también de forma conjunta.

La comparación realizada se basa en la simulación de Meruelo Fase I, cuya topografía, climatología e historial de vertido está bastante identificada y que por ello sirvió de base para las aplicaciones preliminares de la versión anterior de MODUELO. Tanto este vertedero como el simulado en el capítulo 7, son instalaciones modélicas en cuanto a explotación y seguimiento, y por eso fueron elegidos para contrastar los modelos.

En primer lugar se contrastan los resultados del módulo hidrológico con los datos experimentales y los obtenidos con MODUELO 1 y con otro programa ampliamente utilizado como es HELP (Schroeder *et al.*, 1994) para estimar si son adecuados como base para la predicción de las emisiones generadas. En el capítulo siguiente, sobre el modelo hidrológico calibrado, se comparan los resultados del módulo de contaminación con los datos disponibles.

Para la comparación del módulo hidráulico se han realizado dos simulaciones: una durante su explotación (entre diciembre de 1988 y diciembre de 1990) y otra que se extiende 10 años más, hasta 2001. La primera permite comparar los resultados del modelo con datos reales obtenidos en campo y establecer una calibración aproximada. La segunda, realizada sobre el vertedero sellado con una capa imaginaria, hace posible contrastar las tendencias a largo plazo que resultan de cada modelo (HELP y MODUELO 2).

## 5.2. VERTEDERO SIMULADO

### 5.2.1. Localización

El vertedero de residuos urbanos de Meruelo está situado en la zona nororiental de Cantabria, en terrenos del municipio del mismo nombre. El acceso al vertedero se realiza desde la autovía A-8, tomando el desvío hacia Beranga y allí la carretera hacia la costa (ver Figura 5.1).



Figura 5.1. Localización de Meruelo.

### 5.2.2. Forma de explotación

En Meruelo Fase I se vertieron los residuos urbanos generados en las zonas Este y Central de Cantabria durante los años 1989 y 1990. Se trata de un área controlada, situada en el fondo de una vaguada, entre las cotas 186 y 221 m. Los residuos se fueron acumulando tras caballones de contención de 2'5 m de altura, formando tongadas de residuo de 50 cm de espesor cubiertas diariamente con 20 cm de cobertura intermedia. Cada tongada era compactada hasta densidades de 0'9 T/m<sup>3</sup>. El material de cobertura era extraído del mismo vaso, ampliándose así el volumen de vertido inicial.

Topográficamente se caracteriza por la elevada pendiente del perfil de terreno natural en el fondo de vertido, que fue interrumpida por tres retranqueos de 20 m de anchura para asegurar la estabilidad de la masa, lo que provocó importantes cambios en el área hidrológicamente activa a lo largo de la vida del vertedero, como es habitual en este tipo de instalaciones en vaguada. El área superficial final es de 39.600 m<sup>2</sup>, siendo el volumen total del vertedero de 429.200 m<sup>3</sup>.

El sistema de captación y conducción de lixiviados está formado por una red en espina de pez situada sobre el fondo "impermeable" (constituido por el material arcilloso del vaso original compactado) y un gran muro central de escollera (ver Figura 5.2). Este muro drenante sigue la pendiente de la vaguada y se extiende en toda la altura de vertido, estando comunicado con la conducción principal de lixiviados. La espina de pez está compuesta por drenes secundarios de grava que conectan con la tubería principal central.

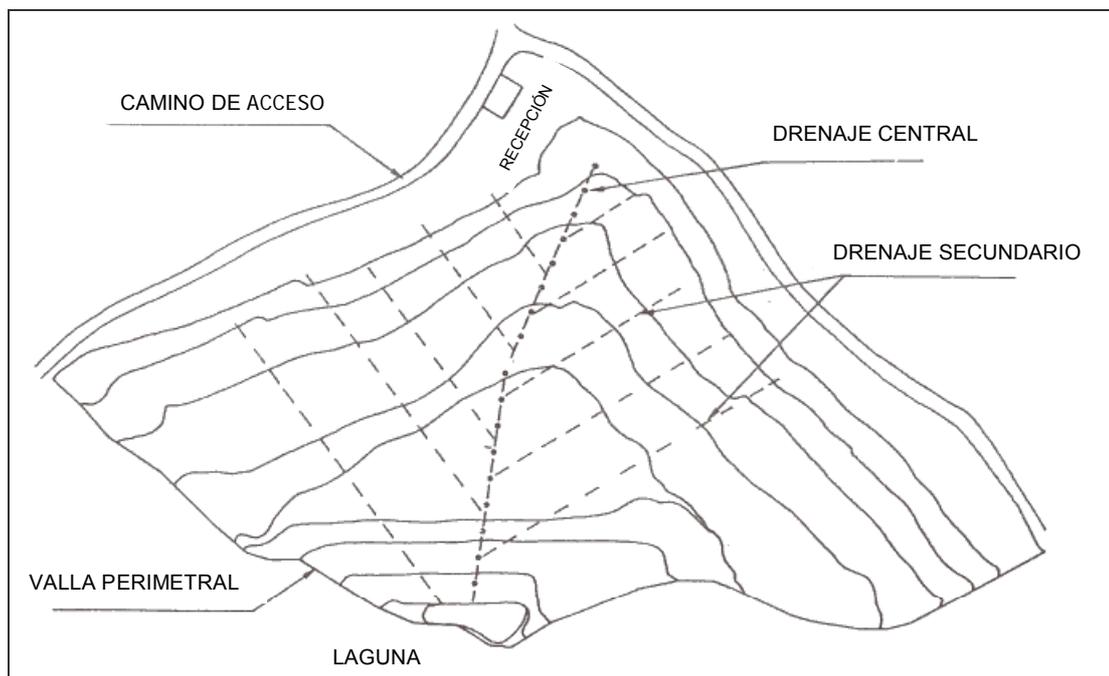


Figura 5.2. Esquema del sistema de drenaje en Meruelo I.

En el Anejo 2 a esta memoria se incluyen varias fotografías del vertedero Meruelo I que muestran claramente la forma de explotación descrita.

### **5.2.3. Residuos**

Durante los dos años que permaneció operativa, entre diciembre de 1988 y diciembre de 1990, esta fase del vertedero recibió 90.450 T y 111.650 T de residuo respectivamente, de composición (ver Tabla 5.4) y características conocidas (Grupo de Ingeniería Ambiental, 1991).

### **5.2.4. Clima**

El clima en la región donde se sitúa Meruelo es de tipo atlántico, templado y lluvioso. La temperatura media anual entre los años 1971 y 2000 fue de 14°C, siendo la precipitación media anual durante este período de 1246 mm, según datos recogidos en Ministerio de Medio Ambiente (2001). Según esta misma publicación el número medio anual de días con precipitación mayor que 1 mm fue de 128, siendo el número de días con precipitación en forma de nieve de 1. Las mayores precipitaciones suelen tener lugar a finales del otoño – comienzos del invierno.

La evapotranspiración potencial calculada según la fórmula de Thornthwaite se sitúa cerca de los 700 mm anuales (Font, 2000).

### **5.2.5. Características notables**

La respuesta del vertedero ante las lluvias y su régimen hidrológico en general están condicionados por la presencia del gran dren central. Por un lado potencia el drenaje horizontal de las capas intermedias cuyas aguas se acumulan sobre la capa de cobertura inferior y se mueven hacia la zona central que actúa de sumidero. Por otra parte, la acumulación de escollera actuó como camino de evacuación para la escorrentía superficial del área de vertido.

## **5.3. MODELO EN MODUELO**

### **5.3.1. Introducción. Datos disponibles**

Meruelo I ha sido objeto de varios estudios por varios grupos de la Universidad de Cantabria, entre ellos el Grupo de Ingeniería Ambiental. Por eso se dispone de abundante información, que permite su empleo en el estudio y desarrollo de modelos como el que se trata en este trabajo. Y ello a pesar de que gran parte de las series de datos no puede ser completada en la actualidad, por razones que se exponen en los siguientes apartados.

De hecho, Meruelo I fue objeto de las calibraciones preliminares del modelo MODUELO 1 (Herrero y Montero, 1999), parte de cuyos ficheros de datos ha sido empleada en este trabajo.

### 5.3.2. Datos meteorológicos

En la simulación del vertedero de Meruelo, se empleó el fichero climático generado por Herrero y Montero (1999).

Este fichero fue creado a partir de las series de datos registrados en las estaciones que el Instituto Nacional de Meteorología tiene en Santander y en el propio vertedero de Meruelo. En concreto las series manejadas fueron:

.- MERUELO: temperatura diaria media (5/1989 - 1/1998) y precipitación diaria (6/1989 - 2/1998).

.- SANTANDER: temperatura diaria media (1/1989-3/1998), precipitación diaria (1/1989-3/1998), humedad relativa media diaria (1/1989-3/1998), precipitación horaria (1/1988-8/1998), insolación diaria media (1/1988-8/1998) y velocidad media diaria del viento (1/1988-8/1998).

Los datos de Santander sirvieron para completar los disponibles de Meruelo, que no es una estación meteorológica completa. Así en el fichero meteorológico generado se tomaron los valores de humedad relativa, insolación y velocidad del viento de Santander, utilizando también datos de esta estación para completar la información sobre precipitaciones. Para aproximar los datos de precipitación horaria en el vertedero se procedió de la siguiente manera:

1º. Se obtiene la serie completa de datos horarios correspondiente a Santander, completando los días sin dato a partir de la serie de precipitación diaria acumulada. El criterio adoptado es rellenar los vacíos de la serie original copiando en los mismos los valores horarios correspondientes al día cuya precipitación diaria es más próxima a la registrada el día de interés.

2º. Una vez completa la serie de Santander ésta se corrige multiplicando las precipitaciones horarias de cada día por el factor “precipitación diaria en Meruelo / precipitación diaria en Santander” correspondiente.

3º. Los posibles vacíos en la serie de Meruelo se completan adoptando los valores registrados en Santander.

### 5.3.3. El terreno

El modelo geométrico del vertedero, mostrado en parte en la Figura 5.3, también se basa en el trabajo de Herrero y Montero (1999), cuyo fichero morfológico se ha adaptado a las nuevas características del programa. Las capas de residuos se fueron incorporando sobre el modelo de vaso de vertido, creado a partir de la cartografía del terreno original recogida en el proyecto de construcción del Meruelo. El modelo está constituido por 876 celdas de 14x14 m y 2'5 m de altura de las cuales 490 son de tipo vertedero, 97 "vertedero sellado", 246 "relleno" y 43 "dren", distribuidas verticalmente en trece capas (32'5 m de altura). La superficie hidrológicamente activa final, no constante durante la explotación, es de 19796 m<sup>2</sup>. Todas las celdas con residuo tienen un espesor de cobertura de 0'6 m, para conservar aproximadamente la relación cobertura/residuo (2/5). El material tipo "dren" permite definir con facilidad el gran muro central. Para adaptar su sección al tamaño de las celdas del modelo no se define un dren continuo sino una serie de "chimeneas" compuestas por celdas dren situadas unas sobre otras, como se muestra en la Figura 5.3 para facilitar el flujo vertical hacia el fondo.

En la nueva versión de este modelo varían las representaciones del drenaje inferior y superficial. Las conducciones de lixiviados se trazan celda a celda y no por capas completas como anteriormente, definiendo en cada una específicamente qué tipo de dren contiene. De acuerdo con las secciones disponibles (Tabla 5.1), se definió el sistema de drenaje inferior con los valores mostrados en la Tabla 5.2.

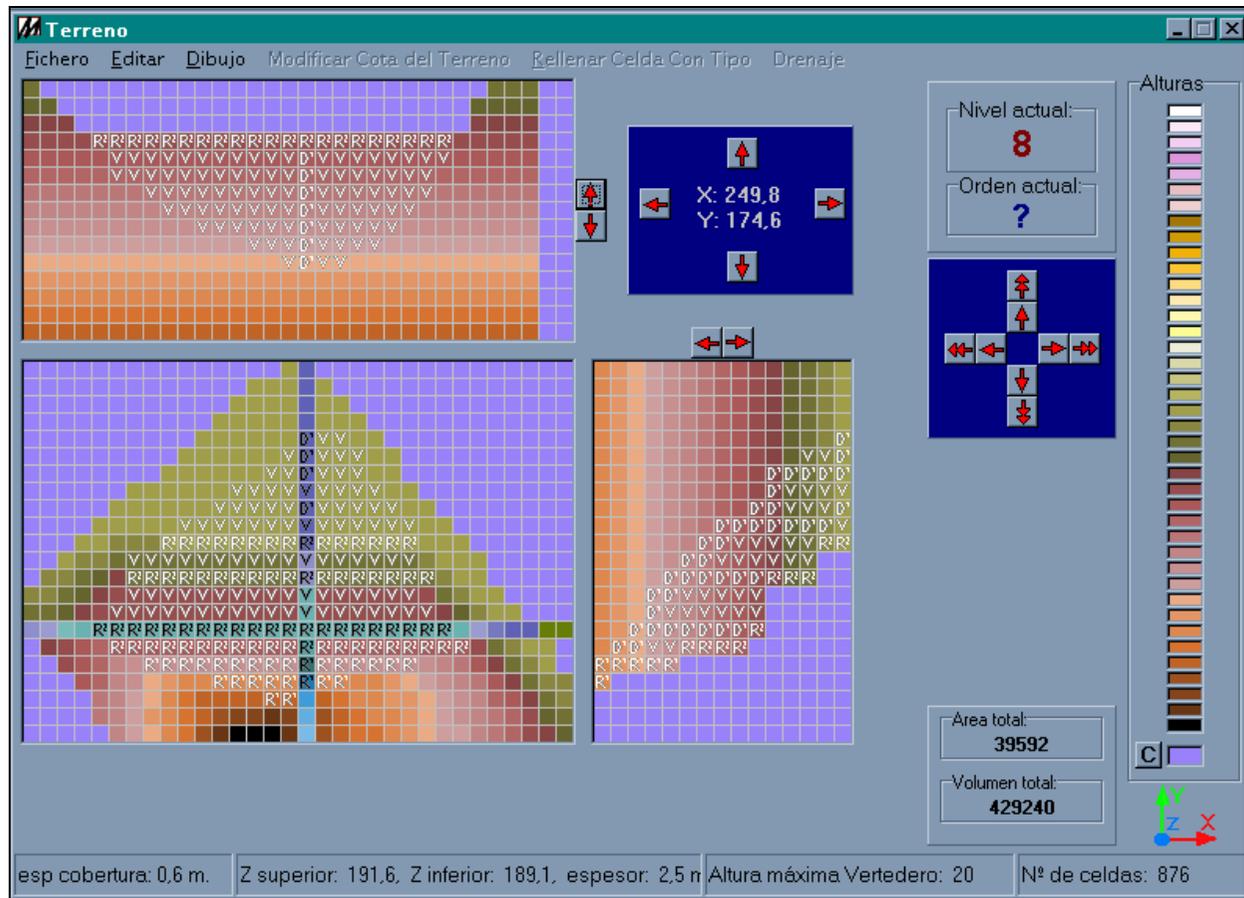


Figura 5.3. Pantalla de definición del modelo morfológico de Meruelo I en MODUELO.

Tabla 5.1. Características de las secciones drenantes empleadas en la definición del sistema de drenaje inferior en Meruelo.

	<b>Principal</b>	<b>Secundario</b>
Diámetro / área	300 mm	0'25 m <sup>2</sup>
Coefficiente Manning / Permeabilidad	0'013	0'01 m/s
Pendiente	3%	3%
Caudal máximo (m <sup>3</sup> /d)	204768	6'5
Nº celdas (volúmenes unitarios) en que se sitúa	7	10
Caudal unitario (m <sup>3</sup> /d)	29252	0'65
Área equivalente dren por celda (m <sup>2</sup> )	0'111	0'007

Tabla 5.2. Características de los drenes inferiores en Meruelo.

	<b>PRINCIPAL</b>	<b>SECUNDARIO 1</b>	<b>SECUNDARIO 2</b>
Área tubería por celda (m <sup>2</sup> )	0'111		0'007
Pendiente tubería (%)	3		3
Ángulo hacia el dren (grados)	0		0
Dirección del dren (grados)	90	45	135
Longitud de influencia (m)	10	36	36

En cuanto a las características superficiales se ha supuesto una altura de encharcamiento nula, tanto durante la explotación como una vez sellado el vertedero, pues las capas de residuo se iban colocando con pendiente hacia el dren central. La escorrentía superficial en el área de vertido está conectada durante el período de explotación, pero no posteriormente, cuando el gran muro central queda tapado.

La caracterización hidrológica, resumida en la Tabla 5.3, se ha realizado a partir de los valores teóricos encontrados en la literatura consultada. Los valores de permeabilidad se eligen para obtener un valor medio de  $10^{-5}$  m/s en la altura de vertido, que es la referencia en los estudios hidráulicos de vertederos. El parámetro de variación de la permeabilidad del residuo se toma directamente por adaptación del valor obtenido por Rowe y Nadarajah (1996), de  $0'269 \text{ m}^{-1}$ , dividiéndolo por el peso específico del residuo para transformarlo a  $\text{m}^2/\text{T}$ . La variación de permeabilidad de la

cobertura se calcula imponiendo que en profundidad la cobertura nunca sea más permeable que el residuo.

Durante la calibración del balance superficial a partir de los datos de evaporación anual media se observó que el modelo es muy poco sensible a la profundidad de evaporación. El límite máximo de evaporación (o evapotranspiración) se calcula multiplicando la profundidad de evaporación por el contenido de agua evaporable (humedad real menos higroscópica), pero el modelo considera toda la celda superficial (en este caso de 2'5 m de altura) al calcular la humedad disponible. Esto hace que el balance de agua se realice en toda la celda y no sólo en la zona de evaporación como debiera, resultando cantidades de agua disponible para evaporación (o evapotranspiración) mayores que las reales. Por este motivo se ha tenido que recurrir a valores de profundidad y porcentaje de la humedad de capacidad de campo que no puede ser evaporada (o evapotranspirada) que no tienen un sentido real.

#### **5.3.4. Residuos vertidos**

Herrero y Montero (1999) establecieron las características de los residuos vertidos en Meruelo I a partir de los datos publicados en (Grupo de Ingeniería Ambiental, 1991). La composición del residuo determinada en dicho estudio se recoge en la Tabla 5.4. Los datos de densidad ( $0'9 \text{ T/m}^3$ ) y humedad (48%) manejados en el programa se tomaron de la misma fuente, mientras que el peso de residuos depositado se adopta de las tablas de registro del pesaje de camiones en la entrada al vertedero.

En las calibraciones de MODUELO 1 se produjo un error al transformar estos datos a los valores manejados por el programa, referidos al peso de los residuos secos. Estos valores se han corregido para este trabajo, lo que ha implicado el cambio no sólo de densidad y humedad, sino también de las tasas de producción, que el programa interpreta también en peso seco. Los nuevos valores de tasa de producción inicial expresada en peso seco, densidad de los residuos y humedad son  $0'65 \text{ kg/hab/d}$ ,  $0'612 \text{ T/m}^3$  y 48%.

Tabla 5.3. Parámetros hidrológicos adoptados en los modelo de Meruelo I en MODUELO 1 y MODUELO 2.

		MODUELO 1		MODUELO 2		MODUELO 1 y 2	
		CELDA VERTEDERO	CELDA VERTEDERO SELLADO	CELDA VERTEDERO	CELDA VERTEDERO SELLADO	CELDA DREN	CELDAS RELLENO
EVA.	H <sub>eva</sub> (m)		1		0'76		
	H <sub>lim</sub> (%)		50		94		
INFILTR.	fc Horton (mm/h)	3	3	3	3	-	-
	f0 Horton (mm/h)	30	15	30	15	-	-
	k Horton (min <sup>-1</sup> )	1,4	1'4	1'4	1'4	-	-
CAPAC. CAMPO	CCa (%peso seco)	47	47	47	47	10	20
	CCb (%peso seco)	30	-	30	-	-	-
	CCc (T/m <sup>2</sup> )	30	-	30	-	-	-
HIDROLÓGICO	Hsaturación (%peso seco)	70	70	70	70	50	20
	Kh (m/s)	1E-02	1E-02	7'9E-04	7'9E-04	0'005	0
	aK (m <sup>3</sup> /T)	-	-		0'264	-	-
	bK (m <sup>3</sup> /T)				0'075		
	Kv (m/s) de cobertura	2E-06	1E-07	2E-06	1E-07	0'005	0

Tabla 5.4. Composición de los residuos vertidos en Meruelo I (Grupo de Ingeniería Ambiental, 1991).

Componente	Proporción en el total de R.U. (%)
Papel	15'7
Cartón	6'2
Residuos de alimento	52'1
Madera	2'4
Textil	3'7
Goma y cuero	1'0
Material celulósico	2'0
Plástico	8'3
Vidrio	4'0
Metal	3'2
Otros inorgánicos	1'4

### 5.3.5. Información sobre emisiones producidas

Los datos base para la calibración de los modelos de Meruelo I son las series de valores puntuales de caracterización de los lixiviados (en caudal y contaminación) producidos en el período 1/03/90 y 15/10/90 [Fantelli (1990) y Grupo de Ingeniería Ambiental (1991)]. Lamentablemente hoy en día no es posible completar esta información porque el sistema de evacuación de lixiviados de la Fase II de Meruelo, cuya explotación comienza en enero de 1991, se conectó directamente al existente, mezclándose desde entonces las aguas recogidas.

No existe registro de cantidades o calidad del biogás producido en el vertedero porque entonces no se había implantado un sistema de aprovechamiento, aunque sí hubiera chimeneas de ventilación.

La campaña experimental de caracterización de los lixiviados, realizada por el Grupo de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Cantabria, tuvo lugar desde el 1 de marzo de 1990 hasta el 15 de octubre de 1990. De las muestras, tomadas puntualmente y aproximadamente cada tres días, se analizaron los siguientes parámetros: caudal instantáneo de lixiviado, pH, conductividad, y concentraciones de sólidos suspendidos, sólidos suspendidos volátiles, DQO, alcalinidad, cloruros, sulfatos, nitrógeno amoniacal, nitritos, nitratos y ortofosfatos.

## 5.4. MODELO CON LOS OTROS PROGRAMAS

### 5.4.1. Con HELP

#### 5.4.1.1 Modelo “físico” del vertedero

Para modelizar un vertedero en vaguada según HELP (“H” en lo que sigue) hay que plantear una redistribución de los volúmenes realmente ocupados hasta llegar a una sección “hidrológicamente representativa” de la realidad. Esta “representatividad” abarca dos aspectos fundamentales, muchas veces contrapuestos. Ha de buscarse un área superficial ( $A_{sup}$ ) expuesta a los efectos climatológicos (lluvia y evapotranspiración) lo más aproximada posible a la superficie real, pero además la altura del vertedero ( $H_v$ ), la distancia vertical que ha de recorrer el agua hasta alcanzar los conductos de drenaje, también ha de ajustarse a las condiciones existentes. Como en HELP la sección horizontal de todo vertedero es constante en su altura, ha de encontrarse un compromiso entre  $A_{sup}$  y  $H_v$ . Si se adoptase la  $A_{sup}$  final del vertedero, la altura media a la que da lugar el reparto del volumen real de residuos en esa superficie puede ser mucho menor que la existente, pues en la vaguada las secciones horizontales van disminuyendo en profundidad. Podría pensarse entonces en aumentar el volumen del “vertedero modelo” respecto al real, pero entonces se falsean las capacidades de almacenamiento y transporte interior de la humedad. Si, por el contrario, se elige la  $H_v$  igual a la máxima distancia vertical entre superficie y vaso, manteniendo aproximadamente el volumen global, esto daría lugar a una superficie de infiltración mucho menor, modificando significativamente las condiciones hidrológicas.

Por otro lado no puede reproducirse la secuencia de crecimiento del vertedero. Ha de partirse de una “foto fija” que represente el tamaño medio del vertedero durante el período estudiado. En general la “foto” suele tomarse una vez clausuradas las instalaciones, cuando no van a seguir aumentando, pero esto impide el seguimiento de los años anteriores.

En este trabajo se ha optado por reproducir aproximadamente el volumen de vertido ajustando la altura y área horizontal a unos valores medios. El modelo del vertedero durante el período de explotación tiene un área horizontal de  $17940 \text{ m}^2$  que se extiende en un total de diez capas, cuatro de las cuales (las máximas permitidas en el programa) son de residuos (de 515 cm de espesor) separadas entre sí y de la superior por capas de material de cobertura (210 cm de espesor entre capas de

drenaje lateral y 110 cm la superior). Las dos capas restantes son la superior, de tipo “de percolación vertical” (100 cm) y la de impermeabilización inferior (“barrera mineral” de 100000 cm). La escorrentía superficial se simula con 96’9 como número de curva SCS modificado.

Como se ha adelantado, al no reproducir HELP la historia de vertido cada situación del vertedero simulada requiere una sección representativa diferente. La representación del vertedero sellado, que se muestra en la Figura 5.4, tiene una superficie activa superior, de 19796 m<sup>2</sup>. En este caso el espesor de las capas varía, pues la altura total alcanzada es mayor. Las capas de residuos son de 610 cm, las de cobertura de 240 cm, manteniéndose el resto similar. Varía también el número de curva del modelo de escorrentía SCS modificado adoptado (89’2).

La influencia del gran dren central se modeliza definiendo todas las capas de residuo como de “tipo 2” o “de drenaje lateral”, teniendo una longitud de drenaje la tres capas superiores igual a la anchura media del vertedero (49 m) y pendiente 3%. La red de drenaje inferior se simula igualando la longitud de drenaje de la capa de residuos inferior a la distancia media a los drenes de grava (36 m). La pendiente en este caso se mantiene (3%).

Para permitir el drenaje lateral las capas de cobertura y la inferior, sobre las que se asientan las de residuo, se definen como “tipo 3” o “de impermeabilización” (HELP no permite el transporte horizontal sobre otro tipo de capas). El material de la capa superior, sea la cobertura final o intermedia forma una capa de “tipo 1” o de “percolación vertical” que permite los cálculos de la infiltración de la lluvia, evapotranspiración, etcétera.

La “textura” o tipo de material elegido varía entre las capas de residuo (textura N°18, “residuo sin canalizaciones”), la cobertura y capa de sellado (textura N°22 con características similares a la marga-arcillosa empleada en Meruelo) y la capa de impermeabilización del vaso (textura N°16, “barrera inferior mineral”), para la que se ha tomado un espesor de 1000 m con el objetivo de minimizar “las pérdidas por contorno” calculadas por HELP, que dificultarían la comparación entre los resultados de ambos modelos.

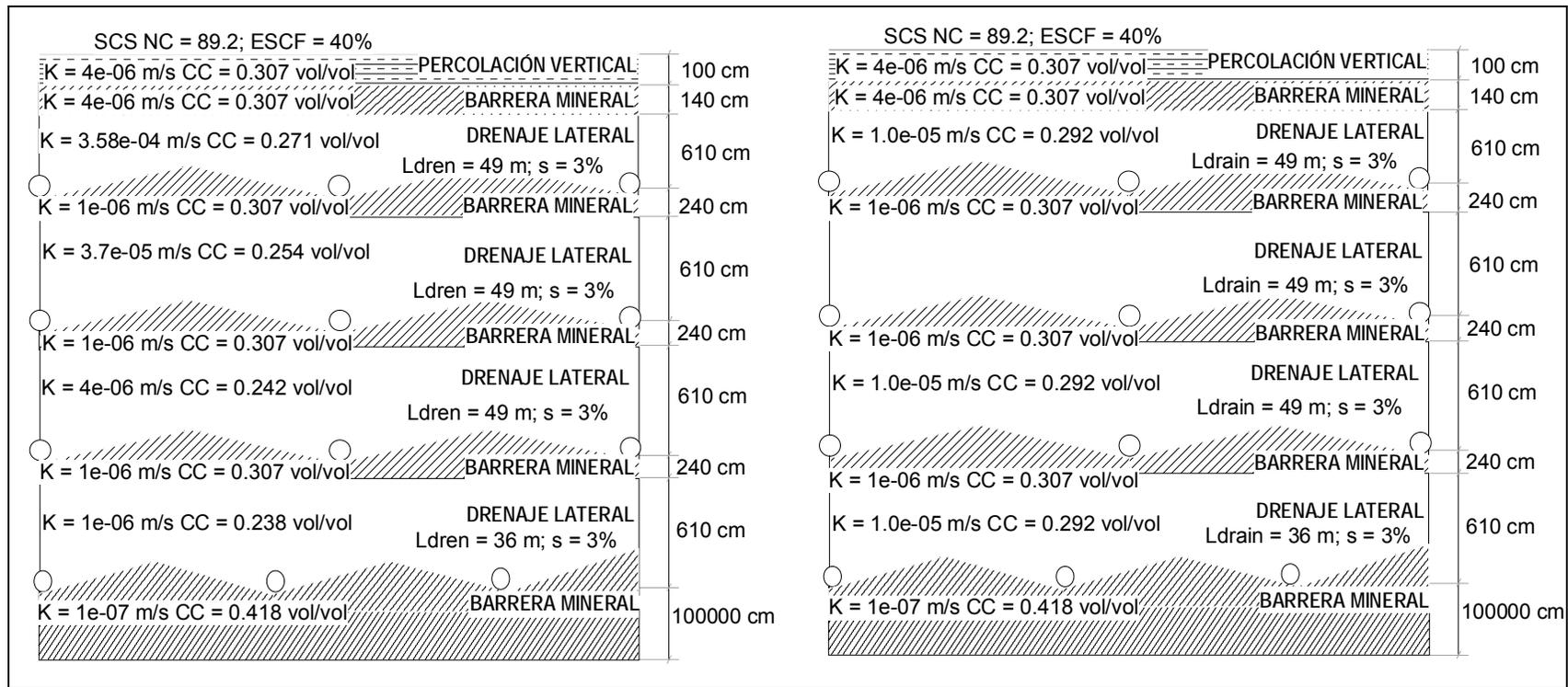


Figura 5.4. Esquema del modelo del vertedero Meruelo I clausurado en HELP con variación de las características hidráulicas (“HK”, a la izquierda) y sin variación de las mismas (“HW”, a la derecha).

Los parámetros hidráulicos se han tomado entre los valores propuestos en el Manual del programa (Schroeder *et al.*, 1994), que se encuentran dentro de los rangos publicados por la literatura citada en capítulos anteriores. Para simular la variación de la capacidad de campo y permeabilidad en profundidad se han variado sus valores de una capa de residuos a otra, calculándolos según las leyes propuestas en MODUELO 2 de manera que a la profundidad media del vertedero le correspondan los valores de referencia ( $K = 10^{-5}$  m/s y  $\omega_{CC} = 0'292$  vol/vol). En el resto de parámetros hidráulicos se conservan los valores propuestos por defecto en HELP para cada textura elegida.

Fijadas todas estas características como parámetro de calibración se empleó la “proporción de área afectada por la escorrentía superficial”.

#### 5.4.1.2 Modelo “meteorológico”.

La información meteorológica empleada en el modelo HELP en este caso es la misma que la descrita en apartados anteriores. Las series de número de horas de insolación y temperatura media diarias son las proporcionadas por el Centro Meteorológico Territorial de Santander, que se introducen en el programa en ficheros ASCII. Los valores de precipitación diaria son los registrados en la estación de Meruelo, completados en caso necesario por los valores de Santander, como en el modelo MODUELO.

Los parámetros del modelo de evapotranspiración se basan también en la información suministrada por el organismo mencionado. Para la velocidad media del viento y la humedad media trimestral se toman los valores de las medias del período considerado. El período anual de crecimiento del cultivo, de mayo a octubre, coincide con los meses cuya temperatura media es superior a 13 °C.

#### 5.4.2. Con MODUELO 1

El modelo de Meruelo I en MODUELO 1 (“M1” en los siguientes apartados) empleado en este caso es el que sirvió de base para definir el modelo en MODUELO 2 (“M2”).

Cambia únicamente, respecto a este último, la definición del drenaje superficial, que en este caso no puede detallarse y la red de drenaje inferior. Esta última se caracterizó en su momento por un área de tubo por celda de 0'0225 m<sup>2</sup>, con pendiente del mismo del 0'2 ‰ e inclinación del terreno del 3%.

En la Tabla 5.3 se reúnen los parámetros principales de caracterización hidráulica e hidrológica a que condujo la calibración preliminar del modelo (Lobo *et al.*, 2002). Al no incorporar M1 el efecto de la introducción de escorrentía superficial en la corriente de lixiviados, la calibración de las rápidas “respuestas” del vertedero a la lluvia condujo a valores de permeabilidad muy por encima de los esperables de acuerdo a las observaciones experimentales de distintos autores.

## **5.5. COMPARACIÓN**

### **5.5.1. Simulación del período de explotación**

#### **5.5.1.1 Contraste gráfico**

La Figura 5.5 presenta los caudales de lixiviado observados durante la campaña de marzo – octubre de 1990 frente a los resultados diarios simulados con los tres modelos en estudio.

En la comparación detallada de estos datos hay que tener en cuenta que, aunque aquí se tome como representativa de las condiciones diarias, la medida experimental de los caudales fue realizada puntualmente, en algún momento del día. Esto puede explicar las desviaciones registradas en las tres curvas de resultados en algunos días, como el 10/08/90. El caudal instantáneo registrado entonces puede corresponder a una situación puntual en el día y por tanto la medida obtenida no sería representativa de las condiciones medias.

Las lluvias sobre Meruelo I producen un aumento del caudal de lixiviado más rápido que el resultante de la simulación con M1. Los otros modelos, que incluyen el efecto de la escorrentía superficial, ajustan las curvas caudal - tiempo más aproximadamente. Para incluir la fracción de escorrentía que penetra en la red de lixiviados en los resultados diarios de HELP, dado que el programa no incorpora esta opción, se ha recurrido al artificio de sumar el resultado “escorrentía superficial” al caudal recogido en las capas de drenaje lateral.

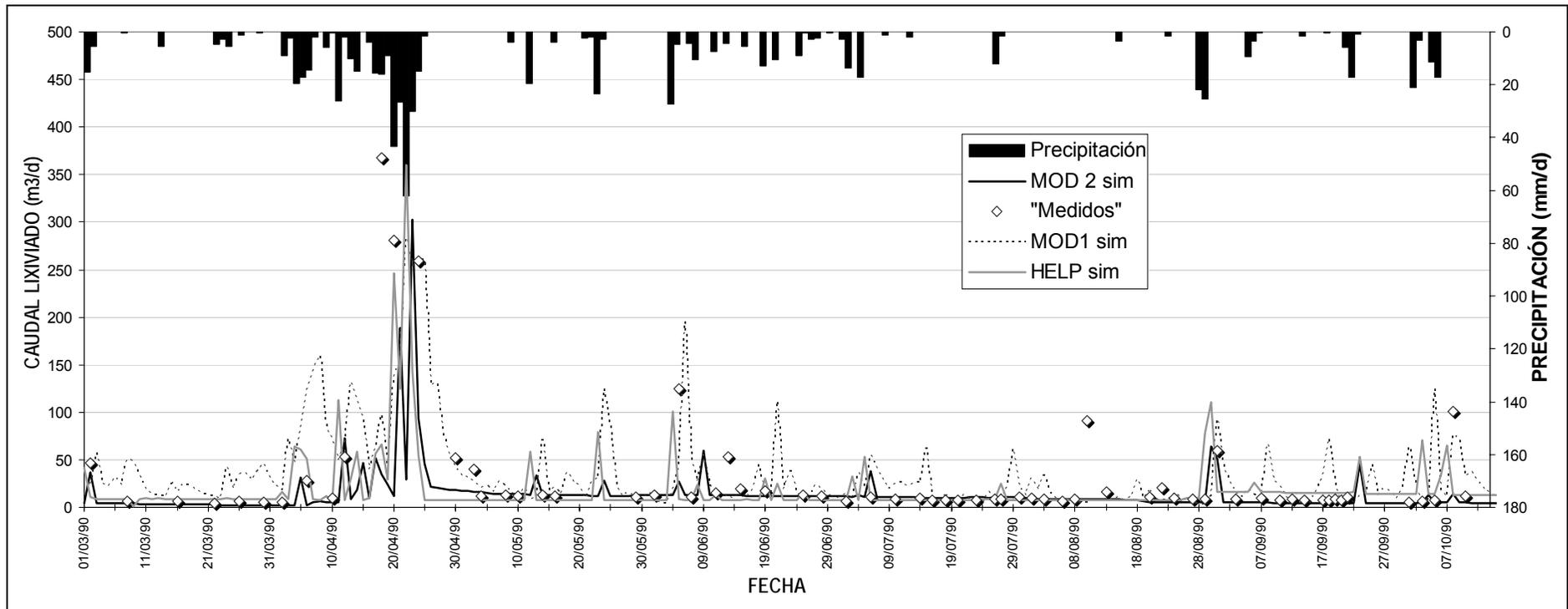


Figura 5.5. Caudal diario de lixiviado en Meruelo durante la campaña de caracterización de 1990. Valores medidos y simulados con HELP, MODUELO 1 y MODUELO 2.

Estos resultados verifican la hipótesis de que el agua escurrida en superficie condiciona en gran medida la hidráulica del sistema, pero no logran explicar lo que parece una curva de descenso de caudales menos pronunciada, como la del 24/04 al 03/05. Durante esos días se registró el caudal instantáneo en tres ocasiones (24/04, 30/04 y 03/05), así que lo que parece una curva continua de descenso progresivo de los caudales (y así se ajustó en su día M1) podría responder en realidad a sucesos de lluvia independientes, que no hayan sido registrados adecuadamente en la estación meteorológica del vertedero. No hay que olvidar la incertidumbre de los datos de partida, y especialmente la de las series de lluvia, cuya influencia en los resultados es fundamental. Sin embargo, aunque en algún caso este motivo es manifiesto (el 8/10 por ejemplo, que coincide con un vacío en la serie de lluvias de Meruelo completado con datos de Santander) los puntos mencionados no coinciden con días de ausencia de dato en la serie facilitada por el Centro Meteorológico Territorial. La desviación, por tanto, puede ser debida a otras causas, como la entrada de aguas de escorrentía externa desde las laderas que rodean la vaguada del vertedero y/o la penetración de un flujo subsuperficial proveniente de terrenos en el entorno del vaso. La primera hipótesis justificaría la observación de puntas de caudal mayores que las esperadas, como consecuencia de mayores volúmenes de lluvia conducidos hacia el vertedero (podría ser el motivo de no ajuste de los puntos del 5/06, 13/06), pero no el retraso en la atenuación de los volúmenes de agua superficial, que implica cierto retardo en los efectos de la lluvia. Este retardo sí puede atribuirse a la penetración en el vertedero de una corriente de escorrentía subsuperficial que se origine en las áreas cercanas a partir de ciertas intensidades de lluvia.

La Tabla 5.1 presenta los valores acumulados durante el período considerado de los términos principales del balance hidrológico resultantes de cada modelo (precipitación, escorrentía, evapotranspiración, lixiviado “real”, recogido en los drenes situados en el fondo y lixiviado “registrado”, suma del “real” con la escorrentía conectada al mismo). Los volúmenes de lluvia incidente son diferentes (mayores en este caso) en H por haberse supuesto una sección media del vertedero en explotación, lo que conduce a mayores áreas superficiales durante las primeras etapas de vertido, en las zonas más profundas de la vaguada. Esto provoca también unos mayores caudales de escorrentía, sobre todo en los primeros meses de estudio, cuando el área real de vertido es mucho menor que la supuesta en el modelo H, como se observa en la Figura 5.5. Sin embargo el volumen total de escorrentía obtenido en H es menor que en M2 como resultado de la calibración en H de la fracción de área sometida a este fenómeno, fijada finalmente en un 40% para ajustar en lo posible los

valores punta observados. Esta diferencia no se refleja en el gráfico porque M2 permite cuantificar independientemente la escorrentía de las áreas que realmente están conectadas al sistema de recolección de lixiviados, que es la que se suma finalmente al caudal de los drenes inferiores.

Tabla 5.5. Volúmenes totales de los términos del balance hidrológico resultantes de cada modelo de simulación.

	<b>HELP</b>	<b>MOD2</b>	<b>MOD1</b>
PRECIPITACIÓN (m <sup>3</sup> )	13294	11408	11408
ESCORRENTÍA SUP. Total (m <sup>3</sup> )	2126	2406	2652
EVAPOTRANSPIRACIÓN (m <sup>3</sup> )	7869	7810	5553
LIXIVIADO "REAL" (m <sup>3</sup> )	2116	1963	8098
LIXIVIADO "REGISTRADO" (m <sup>3</sup> )*	4236	3090	8098

\*Incluye la fracción de escorrentía conectada a la red de lixiviados.

Destaca la proximidad de los resultados globales obtenidos en H y M2 frente a los logrados en su día con M1 y es que, como se aprecia en la Figura 5.5, los dos primeros modelos reproducen mucho más adecuadamente los caudales de fondo. Analizando en el gráfico la evolución de los mismos parece obtenerse una mejor aproximación con la simulación de M2: en los primeros meses el caudal de fondo es menor, aumenta una vez cargado el vertedero con las lluvias de abril, para descender después paulatinamente a medida que va aumentando su capacidad de almacenamiento de humedad y las capas inferiores van siendo compactadas. Frente a esta respuesta el modelo H permanece insensible, como era de esperar si no se simula la historia del vertido ni la variación de sus propiedades hidráulicas durante el período. La curva resultante, con crecimiento del caudal "base" o "de fondo" en septiembre, responde a la tendencia cíclica que muestra el modelo, como se pone de manifiesto en el siguiente apartado.

#### 5.5.1.2 Contraste matemático

El criterio más habitualmente empleado para contrastar el ajuste logrado por distintas aproximaciones a una serie de datos es el de minimización de la suma cuadrática de los errores (Reichert, 1994). Se trata de cuantificar la suma de los cuadrados de los errores (diferencias entre valor simulado y valor medido) para los resultados de los distintos modelos a estudiar o de las distintas combinaciones de

parámetros. La simulación que haga mínima esta suma es la más aproximada. Esta metodología no siempre es adecuada. Cuando el período simulado incluye etapas de transición del sistema (por ejemplo el arranque de un reactor) o la variable “objetivo” (cuyos valores se pretende estimar) está formada por varios componentes, cada uno representado en una parte del modelo, como ocurre en este caso el método se complica. En el primer ejemplo aunque el modelo tenga peor resultado en el ajuste de la etapa de transición su respuesta en la etapa de funcionamiento puede ser adecuada. Esto sólo puede evaluarse mediante análisis gráfico de los resultados obtenidos. En la simulación de vertederos se comprueba que el lixiviado está formado al menos por dos componentes (infiltración y escorrentía) que deben ser calibrados independientemente. Para hacerlo con criterios matemáticos primero se debe separar los datos entre ambos factores, lo cual no es posible sin la ayuda del modelo. Por otro lado la presencia de datos “falsos” de lluvia o caudal, que no son extraños en este campo, perturbaría cualquier intento de calibración matemática. Por estos motivos en este trabajo se emplea el criterio de mínima suma de diferencias cuadradas para comparación de modelos en casos concretos, cuando ha sido posible procesar los datos previamente para que el método sea útil.

En esta ocasión se emplea el criterio descrito para comprobar lo analizado en el análisis gráfico al comparar los resultados de los distintos modelos y explicar las dificultades comentadas. Se presentan además los valores medios del error absoluto y relativo (porcentual) en cada punto. Estos valores informan sobre la aproximación que cabe esperar en la estimación del caudal con cada modelo, mientras que la suma cuadrática, en la que no se compensan valores positivos y negativos, evalúa globalmente la aproximación lograda. En la Tabla 5.6 se reúnen los estadísticos evaluados considerando todos los puntos donde existe valor medido. Según estos resultados la aproximación más adecuada sería la de M1, que es la que conduce a menor suma cuadrática.

Tabla 5.6. Errores cometidos en la simulación de los caudales diarios de Meruelo I durante los meses de marzo – octubre de 1990. a) Considerando todos los datos medidos.

	<b>MODUELO 1</b>	<b>HELP</b>	<b>MODUELO 2</b>
Error absoluto medio (m <sup>3</sup> /d)	3	-13	-18
Error porcentual medio (%)	143	31	-21
Suma de los errores cuadrados	162715	184132	240754

Si se calculan los estadísticos de la serie de datos eliminando los puntos que son evidentemente “de escorrentía” (se ha tomado como criterio eliminar los mayores de 25 m<sup>3</sup>/d) se obtienen los valores de la Tabla 5.7, que confirma que la mejor aproximación al caudal “de base” es la de M2, siendo la peor la de M1.

Tabla 5.7. Errores cometidos en la simulación de los caudales diarios de Meruelo I durante los meses de marzo – octubre de 1990. b) Considerando solo los datos menores que 25 m<sup>3</sup>/d.

	MODUELO 1	HELP	MODUELO 2
Error absoluto medio (m <sup>3</sup> /d)	14	3	-1
Error porcentual medio (%)	177	53	-12
Suma de los errores cuadrados	40970	10741	1586

Esta vez los datos se han separado de manera sencilla, pero lo habitual es no poder hacerlo de manera rigurosa. En todo caso es imprescindible un contraste gráfico.

### 5.5.2. Simulación del vertedero clausurado

Como la capa de cobertura final no ha sido caracterizada experimentalmente, para simular Meruelo I una vez clausurado se ajustaron los parámetros hidrológicos dentro del rango teórico propio de los materiales minerales que se emplearon (ver Tabla 5.3 y Figura 5.4), procurando aproximar los volúmenes totales infiltrados estimados por ambos modelos.

La Figura 5.6 muestra los resultados de simulación con los modelos H y M2, considerando (“HK” y “MK”) y sin considerar (“HW” y “MW”) la variación de la capacidad de campo (CC) y la conductividad hidráulica saturada (K) en profundidad. Se observa principalmente un desfase temporal medio de aproximadamente 7 meses en las ondas de variación del caudal de lixiviados de HK y HW, que coinciden con la tendencia de las lluvias, respecto a MK y MW. Es el efecto del retraso en la transmisión de la humedad que supone el modelo de flujo en zona no saturada. Según el modelo H el agua infiltrada en el vertedero tarda más tiempo (en este caso varios meses) en acumularse sobre las capas de cobertura intermedia aumentando los espesores de saturación y aumentando consecuentemente el drenaje lateral.

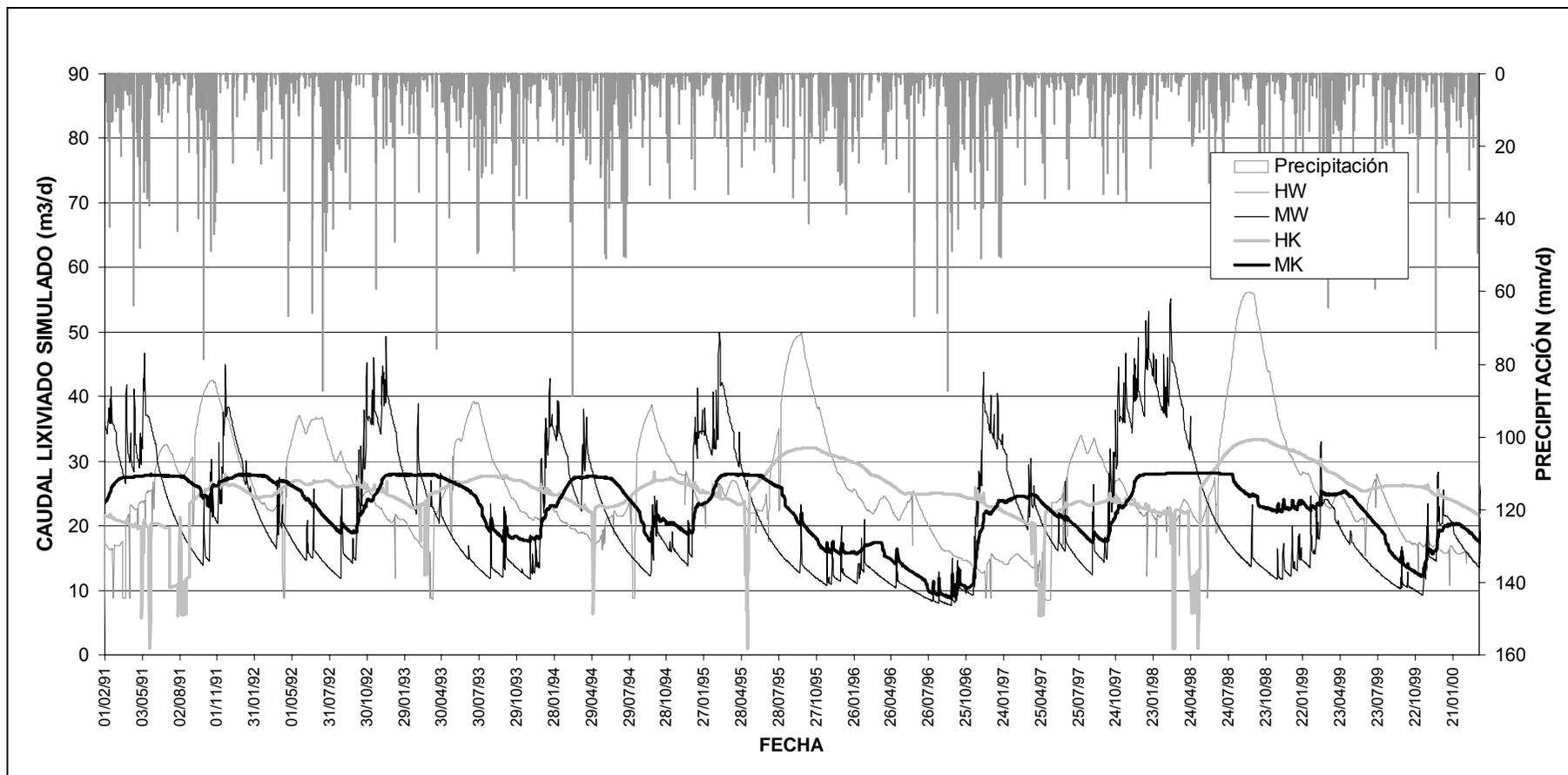


Figura 5.6. Resultados de la simulación de Meruelo I clausurado con HELP (H) y MODUELO (M) considerando (HK y MK) y despreciando (HW y MW) los cambios de la capacidad de campo y la conductividad hidráulica en profundidad.

Desafortunadamente no se dispone de datos para contrastar directamente estos resultados con la realidad, pero sí pueden relacionarse con otras observaciones. Los datos recopilados en el vertedero de Meruelo II durante su explotación (E.R.C.S.A., 2001) muestran una variación similar a las curvas de M2, con caudales medios mayores durante los meses de Noviembre – Abril (nunca máximos en agosto o septiembre). Por otro lado otros autores (Gómez, 1994 y 1997) encontraron también el mismo efecto de retraso en los caudales resultantes del modelo H respecto a los registrados en otros vertederos Sin embargo estos casos, como otros a cuyos datos se ha tenido acceso, se corresponden también con vertederos en fase de operación, lo que hace posible que esta tendencia global sea debida a la escorrentía en superficie recogida en el sistema de lixiviados provocando también grandes variaciones diarias de caudal, como las presentadas en la Figura 5.5.

Según los resultados de calibración presentados, considerar la variación de la permeabilidad en profundidad facilita el ajuste de las observaciones. La Figura 5.6 muestra claramente las consecuencias de la misma, similares en ambos modelos: atenuación de las variaciones de caudal como consecuencia de la reducción de permeabilidades en las capas más profundas que es precisamente donde tiende a acumularse el agua. A este efecto se suma, en las curvas obtenidas, el de la reducción de la capacidad de campo, que disminuye la amplitud de las ondas anuales (diferencia entre caudales máximos y mínimos obtenidos) al provocar un aumento en la capacidad de almacenamiento de agua (porosidad total del residuo menos su capacidad de campo).

El vertedero va acumulando humedad hasta alcanzar el estado estacionario, en el que existe un equilibrio entre los volúmenes de agua que entran y salen del mismo. A partir de entonces si se han calibrado convenientemente los términos del balance hidrológico superficial (evaporación, infiltración y escorrentía), como es el caso, los volúmenes lixiviados evaluados en un año hidrológico no pueden mostrar desviaciones importantes entre unos modelos y otros. Pero las características hidráulicas condicionan la cantidad de agua acumulada en el interior del vertedero: las humedades medias finales de este período en Meruelo I según los modelos “HK” y “HW”, que transmiten más lentamente la humedad, son de 0'44 y 0'40 vol/vol, frente a 0'30 y 0'27 de “MK” y “MW”. En un vertedero con diseño convencional (red de drenaje inferior, sin gran dren central) el efecto será más pronunciado: la menor conductividad hidráulica de las capas inferiores que son las que dan acceso al sistema de lixiviados provoca una profundidad de saturación mayor sobre el fondo.

## 5.6. DISCUSIÓN

En el contraste con los datos experimentales disponibles, tomados durante la explotación del vertedero, los resultados de MODUELO 2, que simula la historia del vertido, la variación de las características hidráulicas de los residuos en profundidad y la introducción de parte de la escorrentía superficial en el sistema de colección de lixiviados, parecen los más adecuados. Además las tendencias de variación anual del volumen lixiviado coinciden con lo observado en otros vertederos en explotación. Sin embargo no puede afirmarse que M2 reproduzca más adecuadamente la realidad, pues los grandes caudales de escorrentía sobre la superficie de vertido que pueden estar incorporándose a las conducciones de lixiviado podrían enmascarar las tendencias reales de evacuación de humedad del interior del vertedero.

Por otro lado se ha mostrado la importancia de considerar la lluvia no infiltrada en el estudio y la calibración a partir de datos experimentales de los caudales de lixiviado en vertederos, sobre todo antes de su clausura. De ahí la importancia de reproducir adecuadamente la historia de vertido, entre cuyas variables destacan los cambios en la superficie del vertedero sometida a la lluvia y sobre la que ésta puede escurrir.

Asimismo los resultados de simulación del vertedero variando la capacidad de campo y permeabilidad a medida que se entierra el residuo demuestran su notable influencia, no sólo en la generación del lixiviado sino también en la humedad retenida en el mismo.

En la comparación cualitativa entre las tendencias de producción de lixiviados en el vertedero simulado una vez cerrado se detecta un retraso de la onda anual en HELP respecto a MODUELO 2, como consecuencia del modelo de flujo en zona no saturada frente al de flujo libre en la zona de residuos, entre capas de cobertura más impermeables. Las desviaciones en cuanto a caudal podrían pasar desapercibidas en un análisis anual del volumen de los lixiviados producidos por el vertedero, pero la diferencia en la acumulación de agua que estima cada modelo es principal para el estudio de posibles pérdidas por contorno y las condiciones de degradabilidad del residuo. Por este motivo es importante estudiar la hidráulica del vertedero basándose no sólo en volumen anual de lixiviado sino en valores diarios/mensuales, espesores de saturación y en general en la distribución de humedad en la masa de residuos.

## 5.7. REFERENCIAS

- E.R.C.S.A., Empresa de Residuos de Cantabria Sociedad Anónima (2001). Datos de explotación del vertedero de Meruelo.
- FANTELLI, M. (1990). *Estudio de producción en cantidad y calidad de los lixiviados del Vertedero de Meruelo*. Tesina de Máster en Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y Medio Ambiente. Universidad de Cantabria.
- FONT, I. (2000). *Climatología de España y Portugal*. Ediciones Universidad de Salamanca, Salamanca.
- GÓMEZ, M. A. y ANTIGÜEDAD, I. (1994). "Validación del modelo HELP en el vertedero controlado de RSU de Lapatz (Guipúzcoa)". *Tecnoambiente*, 77, pp. 65-69.
- GÓMEZ, M. A. (1997). *Estudio hidrológico de vertederos controlados de residuos sólidos urbanos: vertederos de Guipúzcoa y Navarra*. Tesis doctoral. Departamento de Geodinámica. Universidad del País Vasco.
- GRUPO DE INGENIERÍA AMBIENTAL (1991). *Asesoría técnica al desarrollo del Plan de Gestión de RSU*. Fundación Leonardo Torres Quevedo, Universidad de Cantabria para la Consejería de Ecología, Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Diputación Regional de Cantabria.
- HERRERO, J. y MONTERO, O. (1999). *MODUELO. Modelo hidrológico, biológico y de producción para el diseño de vertederos. Manual de usuario y documentación técnica*. Grupo de Ingeniería Ambiental. Universidad de Cantabria. Documento de uso interno.
- LOBO, A.; HERRERO, J.; MONTERO, O.; FANTELLI, M. y TEJERO, I. (2002). "Modeling for Environmental Assessment of Municipal Solid Waste Landfills (Part 1: Hydrology)". *Waste Management and Research*, 20(2), pp. 198 – 210.
- Ministerio de Medio Ambiente (2001). *Guía resumida del clima en España 1971-2000. Plan Estadístico Nacional 2001-2004*. Ministerio de Medio Ambiente. Dirección General del Instituto Nacional de Meteorología.
- ROWE, R. K. y NADARAJAH, P. (1996). "Estimating leachate drawdown due to pumping wells in landfills". *Canadian Geotechnical Journal*, 33(1), pp.1-10.
- REICHERT, P. (1994). *Concepts underlying a Computer Simulation Program for the Identification and Simulation of Aquatic Systems*. Instituto federal suizo de ciencia y tecnología ambiental (EAWAG), Dübendorf.
- SCHROEDER, P. R.; DOZIER, T. S.; ZAPPI, P. A.; McENROE, B. M.; SJOSTROM, J. W. y PEYTON, R. L. (1994). *The hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) model. Engineering documentation for version 3*. EPA/600/r-94/168b. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, Estados Unidos.