

# Universidad de Huelva

Departamento de Ciencias Agroforestales



## Mejora de los parámetros de cálculo del modelo del número de curva y su validación mediante un modelo hidrológico distribuido

Memoria para optar al grado de doctor  
presentada por:

Rubén Fernández de Villarán San Juan

Fecha de lectura: 1 de diciembre de 2006

Bajo la dirección del doctor:

Juan Manuel Domingo Santos

Huelva, 2010

ISBN: 978-84-92944-94-1

D.L.: H 72-2010

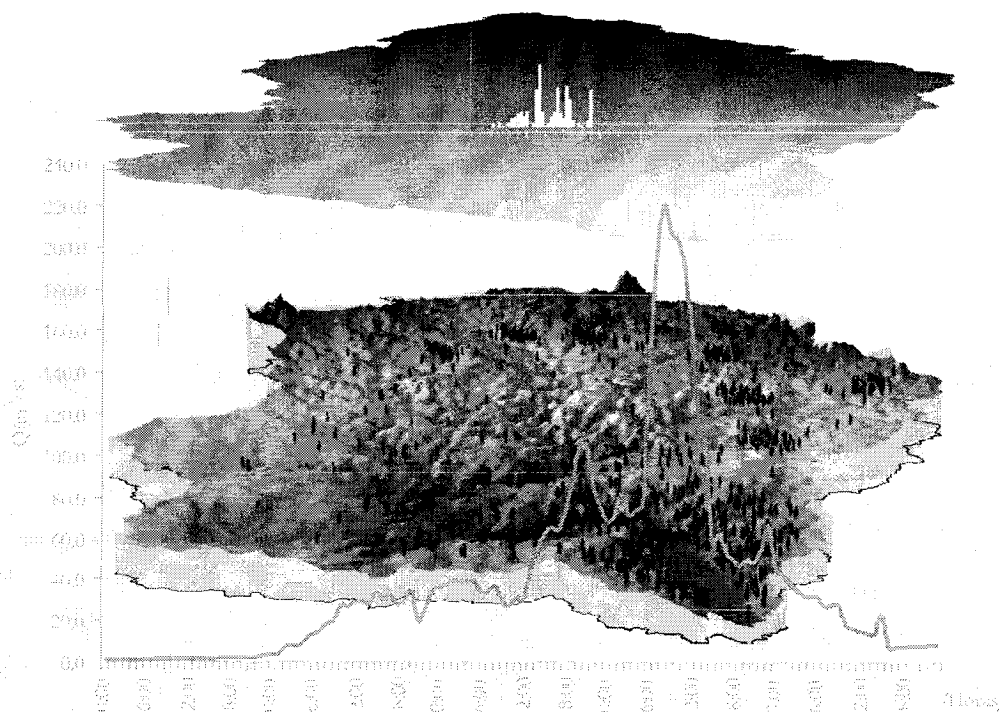
**TESIS  
UHU  
2006  
8**

TESIS  
UNHS  
2006  
3

**UNIVERSIDAD DE HUELVA**  
**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**  
**Departamento de Ciencias Agroforestales**

## **TESIS DOCTORAL**

**Mejora de los parámetros de cálculo del modelo del  
número de curva y su validación mediante un modelo  
hidrológico distribuido**



**Rubén Fdez. de Villarán San Juan**

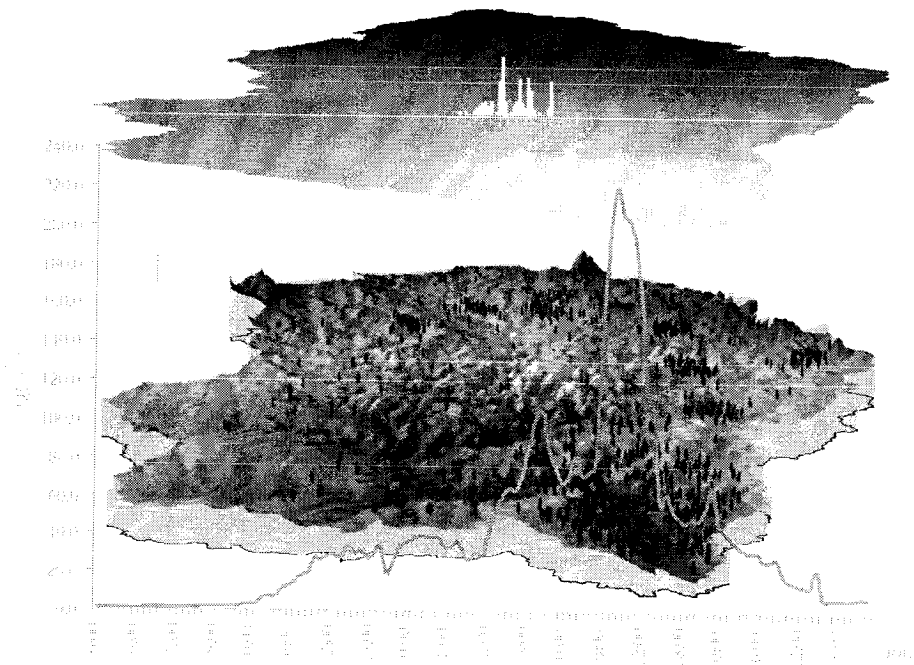
**Julio 2006**



**UNIVERSIDAD DE HUELVA**  
**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**  
**Departamento de Ciencias Agroforestales**

**TESIS DOCTORAL**

**Mejora de los parámetros de cálculo del modelo del  
número de curva y su validación mediante un modelo  
hidrológico distribuido**



**Autor: Rubén Fdez. de Villarán San Juan**

**Director: Juan M. Domingo Santos**

**Julio 2006**



## Agradecimientos

Antes de exponer esta tesis deseo expresar mi reconocimiento a todas aquellas personas que la han hecho posible, pero en especial:

A todos los miembros que forman o formaron parte del equipo de trabajo dedicado a la *caracterización de los suelos forestales de la provincia de Huelva*, por la recolección, elaboración y preparación tan minuciosa de los datos de suelo tan necesarios para este trabajo.

A Francisco Blanquer Jaraiz (jefe de explotación de la presa de El Sancho) y al Grupo ENCE, por el tiempo dedicado en sus explicaciones sobre el funcionamiento del embalse y por haberme facilitado la documentación técnica de la presa, así como los partes diarios de explotación, los datos de los sensores y de las estaciones meteorológicas, sin los cuales no podría haber afrontado la parte final de este trabajo, así como la validación de los resultados.

A Ígor Rápp Arrarás por sus aportaciones matemáticas y por haberme guiado en los planteamientos necesarios para reliazar las interpolaciones y extrapolaciones para convertir los números de curva de discretos a continuos.

A Juan Domingo Santos, director de esta tesis, por haber aportado la luz necesaria para finalizarla y por haber puesto a mi servicio sus grandes conocimientos edafológicos.

A Dominique y a sus hijas Elsa y Manuela por cederme generosamente todo el tiempo que he necesitado de su marido y padre durante las largas horas de tutorías realizadas.

A Andrés Martínez de Azagra y a Joaquín Navarro Hevia que hace años despertaron en mí el interés por la hidrología y el número de curva, y que me enseñaron a ser práctico.

A Teresa por su eficacia y rapidez en la localización y adquisición de los prestamos interbibliotecarios tan necesarios en estos trabajos.

A Gloria por meterme prisa para que terminase este documento.

A Eva por su ayuda en la revisión del documento y por interrumpirme, de vez en cuando, el ritmo de trabajo con sus dudas de ArcGis.

A mis compañeros “mazagoneros” de los viernes por dar ánimos, apoyo y sacarme de casa muchos días.

A Jorge y Valle por su amistad, apoyo y disposición para cualquier cosa a pesar de la distancia.

A mis padres, a Alberto, a Ana y a Guillermo por su apoyo incondicional a lo largo de los años.

A Ana, por su paciencia, generosidad, cariño y su inestimable colaboración en la edición y revisión del texto y por las largas horas de soledad soportadas.



## ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1: OBJETIVOS Y ANTECEDENTES</b> .....	1
1.1. Objetivos y estructura del trabajo .....	2
1.2. Antecedentes del número de curva .....	3
1.2.1. Origen del modelo .....	3
1.2.2. Importancia e interés del modelo del número de curva .....	5
<b>CAPÍTULO 2: EL MÉTODO DEL NÚMERO DE CURVA</b> .....	7
2.1. Desarrollo del modelo .....	7
2.2. Las variables del número de curva .....	11
2.2.1. Variable “uso del suelo” .....	12
2.2.1.1. Áreas cultivadas.....	12
2.2.1.2. Pastizales .....	12
2.2.1.3. Bosques y superficies forestales .....	12
2.2.1.4. Áreas urbanas .....	14
2.2.2. Variable “prácticas de cultivo” .....	14
2.2.3. Variable “condición hidrológica” .....	15
2.2.3.1. Condición hidrológica para las áreas cultivadas .....	15
2.2.3.2. Condición hidrológica para los pastizales .....	15
2.2.3.3. Condición hidrológica de bosques y superficies forestales .....	16
2.2.4. Variable “grupo hidrológico de suelo” .....	17
2.2.5. Variable “condición antecedente de humedad” .....	19
2.3. Valores del número de curva .....	22
2.4. La sensibilidad del modelo y de sus variables .....	25
2.4.1. Análisis de sensibilidad de la función de transformación.....	26
2.4.2. Análisis de sensibilidad de las variables que determinan el número de curva.....	28
2.4.2.1. Análisis de la sensibilidad del número de curva a las técnicas de cultivo .....	29
2.4.2.2. Análisis de la sensibilidad del número de curva al grupo hidrológico de suelo .....	29
2.4.2.3. Análisis de la sensibilidad del número de curva a la condición hidrológica.....	30
2.5. Ventajas y limitaciones del método del número de curva .....	34
2.6. Modificaciones del modelo original .....	35
2.6.1. Ajuste del número de curva a causa de la pendiente del terreno .....	36
2.6.2. Adaptación del método de curva al territorio español .....	36
<b>CAPÍTULO 3: EL NÚMERO DE CURVA Y LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO</b> .....	41
3.1. El número de curva como ecuación de infiltración .....	41
3.2. El número de curva y su relación con las propiedades hídricas del suelo .....	44
3.2.1. Conductividad hidráulica saturada .....	44
3.2.2. Sortividad ( $S_o$ ) .....	46
3.2.3. Conductividad hidráulica equivalente .....	47
3.3. Los grupos hidrológicos de suelo .....	48
3.3.1. Definición de los grupos hidrológicos de suelo.....	49
3.3.1.1. Definición original de Musgrave (1955) .....	49
3.3.1.2. Revisión de los grupos hidrológicos por Mockus.....	49
3.3.1.3. Definición del soil survey manual .....	50
3.3.1.4. Definición de Nearing et al. (1996) .....	52
3.3.1.5. Definición española (MOPU, 1990) .....	53
3.3.1.6. Definición de Ferrer (2003) .....	53
3.3.2. Los grupos hidrológicos de suelo y su relación con la textura .....	55
3.3.2.1. Relación de Rawls et al. (1983).....	56
3.3.2.2. Relación de Témez (1987).....	57
3.3.2.3. Relación del MOPU (1990).....	57
3.3.2.4. Relación del MOPT (1992) .....	57
3.3.2.5. Relación de Ferrer (2003).....	58
3.3.2.6. Relación entre las distintas clasificaciones propuestas .....	58
3.4. Evaluación de la conductividad hidráulica saturada del suelo ( $K_s$ ) .....	60
3.4.1. Las funciones de edafotransferencia (FETs) .....	61

3.4.1.1. Cosby et al. (1984) .....	61
3.4.1.2. Saxton et al. (1986) .....	62
3.4.1.3. Brakensiek et al. (1984) .....	63
3.4.1.4. Modelo Rosetta (1999) .....	65
3.4.1.5. Ferrer (2003) .....	68
3.4.1.6. Comparación de las distintas funciones de edafotransferencia estudiadas .....	69
<b>CAPÍTULO 4: PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA MEJORA DEL MODELO DEL NÚMERO DE CURVA .....</b>	<b>75</b>
4.1. El número de curva como un parámetro continuo .....	76
4.1.1. Transformación del grupo hidrológico de suelo en valores continuos .....	76
4.1.1.1. Metodología .....	76
4.1.1.2. Interpretación del índice de grupo de un suelo .....	77
4.1.2. Obtención de los números de curva en función del índice de grupo .....	78
4.1.2.1. Función de interpolación $y(x)$ para $I_g \leq 3,5$ .....	78
4.1.2.2. Función de extrapolación $f(x)$ para $I_g > 3,5$ .....	80
4.1.2.3. Coeficientes de las funciones de estimación de los números de curva en función del índice de grupo ( $I_g$ ) .....	84
4.1.2.4. Ajuste para el caso del umbral de escorrenría de Témez .....	87
4.2. El balance hídrico del suelo como indicador del estado antecedente de humedad .....	90
4.2.1. Estimación del balance hídrico del suelo .....	90
4.2.2. Adaptación del balance hídrico mensual a diario .....	92
4.2.3. Estimación de la capacidad de retención de agua .....	96
4.2.3.1. Método de cálculo de la CRA (Gandullo, 1985) .....	96
4.2.3.2. Estimación de la capacidad de retención de agua modificada (CRAM) .....	98
4.2.3.3. Estimación de la capacidad de retención de agua disponible (CRAD) .....	99
4.2.4. Estimación del estado antecedente de humedad .....	101
4.2.4.1. Estimación de AMC según el porcentaje de saturación de la reserva de agua en el suelo (%R) .....	101
4.2.4.2. Estimación de AMC según el contenido de agua disponible en el suelo ( $I_{eh}$ ) .....	102
4.2.5. Relación del índice de humedad ( $I_H$ ) y del índice de estado antecedente de humedad ( $I_{eh}$ ) con el número de curva .....	104
<b>CAPÍTULO 5: ADQUISICIÓN DE LA INFORMACIÓN BÁSICA PARA LA VALIDACIÓN DEL MODELO .....</b>	<b>107</b>
5.1. Zona de estudio y sus características generales .....	107
5.1.1. Rasgos fisiográficos de la cuenca del embalse de El Sancho .....	108
5.1.2. Relieve .....	109
5.1.3. Climatología .....	109
5.1.4. Geología .....	110
5.1.5. Litología .....	112
5.1.6. Edafología .....	115
5.2. Tratamiento de los datos meteorológicos .....	119
5.2.1. Corrección y relleno de series diarias meteorológicas .....	120
5.2.1.1. Preparación de los datos .....	120
5.2.1.2. Relleno de los datos ausentes de precipitaciones diarias .....	122
5.2.1.3. Relleno de los datos ausentes de evapotranspiraciones diarias .....	124
5.2.2. Elección de los eventos tormentosos destinados a la validación del modelo .....	124
5.2.2.1. Tormenta de 16 de diciembre de 2002 (Tormenta 1) .....	124
5.2.2.2. Tormenta de 24 de febrero de 2003 (Tormenta 2) .....	126
5.2.2.3. Tormenta de 27 de marzo de 2003 (Tormenta 3) .....	127
5.2.2.4. Tormenta de 22 de abril de 2003 (Tormenta 4) .....	129
5.2.2.5. Tormenta de 5 de diciembre de 2003 (Tormenta 5) .....	130
5.2.2.6. Tormenta de 8 de diciembre de 2003 (Tormenta 6) .....	131
5.2.2.7. Tormenta de 20 de febrero de 2004 (Tormenta 7) .....	133
5.2.2.8. Tormenta de 23 de febrero de 2004 (Tormenta 8) .....	134
5.3. Estudio de los suelos de la cuenca vertiente del embalse de El Sancho .....	136
5.3.1. Litofacies simplificadas .....	137
5.3.2. Definición de unidades de paisaje .....	138
5.3.3. Definición de relaciones suelo-paisaje .....	140

5.3.3.1. Análisis de relaciones entre variables categóricas .....	143
5.3.3.2. Tipificación de valores según las medias de cada litofacies o grupo litoedáfico.....	144
5.3.3.3. Análisis de correlaciones de las variables del medio físico frente a las variables edafológicas .....	145
5.3.3.4. Análisis de los casos en los cuales puede existir influencia del relieve.....	148
5.3.3.5. Comparación de medias y definición de las litofacies más influenciadas por el relieve .....	150
5.3.4. Valores de interés hidrológico relativos a los suelos de la cuenca .....	151
5.3.4.1. Estimación del grupo hidrológico de suelo (discreto) .....	151
5.3.4.2. Estimación del Índice de grupo hidrológico (I <sub>g</sub> ).....	154
5.3.4.3. Estimación de la CRAM, CRAD, PMP.....	156
5.4. Estimación del estado antecedente de humedad en la cuenca del embalse de El Sancho.....	159
5.4.1. Estimación de la condición antecedente de humedad.....	160
5.4.2. Modelos propuestos para la estimación de la condición antecedente de humedad.....	160
5.4.2.1. Cálculo de los balances hídricos diarios para las distintas zonas de influencia y diversas CRAM.....	160
5.4.2.2. Modelo de estimación de AMC según el porcentaje de saturación de la reserva de agua en el suelo (%R).....	165
5.4.2.3. Modelo de estimación de AMC basado en el contenido de agua en el suelo (I <sub>eh</sub> ).....	168
5.5. Estimación de los usos del suelo para el modelo del número de curva .....	170
5.5.1. Fuente cartográfica para la determinación de los usos del suelo .....	170
5.5.1.1. Breve evolución histórica de la cartografía de usos del suelo en Andalucía .....	170
5.5.1.2. Descripción de la cartografía de usos y coberturas vegetales de 1999 .....	170
5.5.1.3. Descripción de las principales unidades cartográficas del mapa .....	176
5.5.2. Los usos del suelo presentes en la cuenca de El Sancho .....	177
5.5.3. Equivalencias entre los usos del suelo presentes en la cuenca y los propuestos en las tablas del SCS .....	179
5.5.3.1. Equivalencias entre el mapa de usos y las tablas del SCS.....	179
5.5.3.2. Equivalencias entre el mapa de usos y las tablas del método del umbral de escorrentía (Témez).....	181
5.6. Estimación de los números de curva en la cuenca del embalse de El Sancho .....	186
<b>CAPÍTULO 6: METODOLOGÍA DE VALIDACIÓN DE LOS MODELOS PROPUESTOS ....</b>	<b>189</b>
6.1. Estimación de los hidrogramas reales de escorrentía superficial registrados por la presa .....	189
6.1.1. Estimación de las variables del balance hídrico .....	191
6.1.1.1. Cálculo del caudal emitido por el aliviadero .....	191
6.1.1.2. Vertido por el desagüe de fondo .....	194
6.1.1.3. Caudal derivado a fábrica .....	195
6.1.1.4. Variación del volumen almacenado en el embalse .....	195
6.1.2. Estimación de los hidrogramas de entrada .....	196
6.1.2.1. Tormenta de 16 de diciembre de 2002 (Tormenta 1).....	196
6.1.2.2. Tormenta de 24 de febrero de 2003 (Tormenta 2).....	198
6.1.2.3. Tormenta de 27 de marzo de 2003 (Tormenta 3) .....	200
6.1.2.4. Tormenta de 22 de abril de 2003 (Tormenta 4) .....	202
6.1.2.5. Tormenta de 5 de diciembre de 2003 (Tormenta 5) .....	204
6.1.2.6. Tormenta de 8 de diciembre de 2003 (Tormenta 6) .....	206
6.1.2.7. Tormenta de 20 de febrero de 2004 (Tormenta 7).....	208
6.1.2.8. Tormenta de 23 de febrero de 2004 (Tormenta 8).....	210
6.2. Caracterización y modelización hidrológica de la cuenca de El Sancho .....	211
6.2.1. Caracterización física e hidromorfométrica de la cuenca de El Sancho .....	212
6.2.1.1. Creación de un modelo hidrológicamente correcto .....	213
6.2.1.2. Caracterización hidrológica de la cuenca .....	217
6.2.2. Modelo conceptual lluvia-escorrentía, el programa HEC-HMS 2.2.2.....	221
6.2.3. Caracterización de los submodelos de simulación hidrológica empleados .....	226
6.2.3.1. Submodelo de transformación lluvia-escorrentía .....	226
6.2.3.2. Submodelo de propagación en cauces .....	233
6.3. Alternativas de OBTENCIÓN del número de curva ensayadas .....	238
6.3.1. Metodología de evaluación de la precisión de los distintos modelos propuestos .....	240
<b>CAPÍTULO 7: RESULTADO DE LAS SIMULACIONES.....</b>	<b>245</b>
7.1. Resultados de la simulación I .....	245

7.1.1. Tormenta 1 (16/12/2002) .....	245
7.1.2. Tormenta 2 (24/02/2003) .....	246
7.1.3. Tormenta 3 (27/03/2003) .....	247
7.1.4. Tormenta 4 (22/04/2003) .....	248
7.1.5. Tormenta 5 (05/12/2003) .....	249
7.1.6. Tormenta 6 (08/12/2003) .....	250
7.1.7. Tormenta 7 (20/02/2004) .....	251
7.1.8. Tormenta 8 (23/02/2004) .....	252
7.1.9. Resumen de la simulación I .....	253
7.2. Resultados de la simulación II .....	255
7.2.1. Tormenta 1 (16/12/2002) .....	256
7.2.2. Tormenta 2 (24/02/2003) .....	257
7.2.3. Tormenta 3 (27/03/2003) .....	258
7.2.4. Tormenta 4 (22/04/2003) .....	259
7.2.5. Tormenta 5 (05/12/2003) .....	260
7.2.6. Tormenta 6 (08/12/2003) .....	261
7.2.7. Tormenta 7 (20/02/2004) .....	262
7.2.8. Tormenta 8 (23/02/2004) .....	263
7.2.9. Resumen de la simulación II .....	263
7.3. Resultados de la simulación III .....	267
7.3.1. Tormenta 1 (16/12/2002) .....	267
7.3.2. Tormenta 2 (24/02/2003) .....	268
7.3.3. Tormenta 3 (27/03/2003) .....	269
7.3.4. Tormenta 4 (22/04/2003) .....	270
7.3.5. Tormenta 5 (05/12/2003) .....	271
7.3.6. Tormenta 6 (08/12/2003) .....	272
7.3.7. Tormenta 7 (20/02/2004) .....	273
7.3.8. Tormenta 8 (23/02/2004) .....	274
7.3.9. Resumen de la simulación III .....	275
7.4. Resultados de la simulación IV .....	277
7.4.1. Tormenta 1 (16/12/2002) .....	278
7.4.2. Tormenta 2 (24/02/2003) .....	279
7.4.3. Tormenta 3 (27/03/2003) .....	280
7.4.4. Tormenta 4 (22/04/2003) .....	281
7.4.5. Tormenta 5 (05/12/2003) .....	282
7.4.6. Tormenta 6 (08/12/2003) .....	283
7.4.7. Tormenta 7 (20/02/2004) .....	284
7.4.8. Tormenta 8 (23/02/2004) .....	285
7.4.9. Resumen de la simulación IV .....	285
7.5. Comparación de las medias de los modelos .....	288
<b>CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES .....</b>	<b>293</b>
8.1. Conclusiones relativas a las mejoras del modelo del número de curva .....	293
8.2. Conclusiones relativas a la modelización hidrológica .....	294
8.3. Líneas futuras de trabajo .....	295
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>297</b>

## ÍNDICE FIGURAS

Figura 1.1: Representación gráfica de la relación escorrentía acumulada frente a lluvia acumulada.....	5
Figura 2.1: Relación entre las variables del modelo.....	8
Figura 2.2: Representación gráfica del modelo del número de curva (SCS, 1986).....	10
Figura 2.3: Expresión gráfica de la relación entre el número de curva y la retención potencial .....	11
Figura 2.4: Ejemplo de relación precipitación-escorrentía para una cuenca experimental (Van Mullem et al.,2002).....	11
Figura 2.5: Ábaco para la determinación de la condición hidrológica del suelo para las masas forestales del este de EEUU (modificado de NRCS, 1972) .....	17
Figura 2.6: Ábaco de cálculo del número de curva en función de la condición hidrológica del suelo para masas forestales del este de los EE.UU. ....	24
Figura 2.7: Ábacos para la determinación del número de curva en la zona oeste de los EE.UU. Áreas áridas y semiáridas de matorrales y herbáceas (SCS, 1972; en Wood, 1984).....	24
Figura 2.8: Ábacos para la determinación del número de curva en la zona oeste de los EE.UU. Áreas áridas y semiáridas con arbolado (SCS, 1972; en Wood, 1984).....	25
Figura 2.9: Representación de la sensibilidad relativa de la función de transformación de lluvia en escorrentía por unidad de variación de CN (ecuación 2.21).....	27
Figura 2.10: Variación de los números de curva en condición II de humedad en función de la pendiente, según la ecuación 2.22 .....	36
Figura 3.1: Representación de la relación $f/i$ para distintos números de curva y precipitaciones.....	44
Figura 3.2: Ejemplo de interpolación del número de curva cuando se trabaja con subgrupos hidrológicos de suelos (modificado de NCRS, 1985) .....	50
Figura 3.3: Triángulo textural según clasificación USDA.....	55
Figura 3.4: Triángulo textural ortonormal según clasificación USDA.....	56
Figura 3.5: Propuestas de diversos autores de las relaciones entre la textura y los grupos hidrológicos de suelo.....	59
Figura 3.6: Variación de la conductividad hidráulica saturada en función de la textura, según Cosby et al.....	62
Figura 3.7: Distribución de la conductividad hidráulica saturada en relación a las clases texturales, según Saxton et al.....	63
Figura 3.8: Ábaco para la determinación de la densidad aparente mineral (modificado de Rawls et al., 1992) .....	64
Figura 3.9: Distribución de la conductividad hidráulica saturada en relación a las clases texturales, según Brakensiek et al.....	65
Figura 3.10: Esquema de una red artificial neuronal.....	66
Figura 3.11: Esquema de la red neuronal del modelo Rosetta.....	67
Figura 3.12: Modelo predictivo SSC y SSCBD de la conductividad hidráulica saturada según el modelo Rosetta.....	68
Figura 3.13: Distribución de la conductividad hidráulica saturada en relación con las clases texturales, según Ferrer et al. ....	69
Figura 3.14: Clases texturales y conductividad hidráulica saturada máxima del suelo.....	71
Figura 3.15: Clases texturales y conductividad hidráulica saturada mínima del suelo.....	71
Figura 3.16: Clases texturales y conductividad hidráulica saturada media del suelo .....	72
Figura 3.17: Clases texturales y desviación estándar de la conductividad hidráulica saturada del suelo .....	72
Figura 3.18: Estimación de la conductividad hidráulica saturada de un suelo en función de la densidad aparente del suelo (modificado de Soil Survey Division Staff, 1993).....	74
Figura 4.1: Variación de la escorrentía en relación a los valores del índice de grupo ( $I_g$ ) en contraste con la información que dan las clases discretas de los grupos hidrológicos de suelo (elaboración propia) .....	78
Figura 4.2: Representación gráfica del comportamiento de los polinomios de ajuste.....	81
Figura 4.3: Representación gráfica de dos funciones globales de interpolación .....	84
Figura 4.4: Esquema general del balance hídrico del suelo propuesto por Thornthwaite-Matter (elaboración propia) .....	91
Figura 4.5: Relación lineal entre la evapotranspiración y la reserva de agua en el suelo (elaboración propia).....	93
Figura 4.6: Comparación del balance mensual y diario, CRA baja.....	95
Figura 4.7: Comparación del balance mensual y diario, CRA alta.....	95

Figura 4.8: Valores del parámetro de permeabilidad ( $Per_i$ ) en función de CCC y CIL (Gandullo, 1985) .....	97
Figura 4.9: Relación entre el agua disponible, la CC y el PMP en función de la textura (traducido de Brandy y Weil, 1996).....	100
Figura 4.10: Relación entre el índice de humedad y el estado de la reserva de agua en el suelo.....	102
Figura 4.11: Comportamiento del índice de estado antecedente de humedad para dos suelos .....	103
Figura 4.12: Relación entre los números de curva para distintos índices de estados antecedentes de humedad.....	105
Figura 5.1: Mapa de situación del área de estudio .....	109
Figura 5.2: Distribución de las pendientes dentro de la cuenca .....	109
Figura 5.3: Climodiagrama de Walter-Lieth .....	110
Figura 5.4: Distribución de las litofacies simplificadas presentes en la cuenca.....	114
Figura 5.5: Esquema evolutivo de los suelos sobre materiales ácidos del Complejo Vulcano-Sedimentario .....	117
Figura 5.6: Esquema evolutivo de los suelos sobre materiales básicos del Complejo Vulcano-Sedimentario .....	118
Figura 5.7: Croquis de la red automática de estaciones meteorológicas .....	120
Figura 5.8: Hietogramas de la tormenta de 16 de diciembre de 2002 (Tormenta 1).....	125
Figura 5.9: Hietogramas de la tormenta de 24 de febrero de 2003 (Tormenta 2) .....	127
Figura 5.10: Hietogramas de la tormenta de 27 de marzo de 2003(Tormenta 3).....	128
Figura 5.11: Hietogramas de la tormenta de 22 de abril de 2003 (Tormenta 4).....	129
Figura 5.12: Hietogramas de la tormenta de 5 de diciembre de 2003 (Tormenta 5).....	131
Figura 5.13: Hietogramas de la tormenta de 8 de diciembre de 2003 (Tormenta 6).....	132
Figura 5.14: Hietogramas de la tormenta de 20 de febrero de 2004 (Tormenta 7) .....	133
Figura 5.15: Hietogramas de la tormenta de 23 de febrero de 2004 (Tormenta 8) .....	135
Figura 5.16: Esquema metodológico seguido para la determinación de la cartografía paramétrica de suelos .....	137
Figura 5.17: Unidades de paisaje definidas en la cuenca del embalse de El Sancho .....	140
Figura 5.18: Gráfico de cajas que caracteriza las distintas litofacies simplificadas frente al grupo hidrológico de suelo para litofacies con fuerte dependencia roca-suelo .....	153
Figura 5.19: Detalle de la distribución de las unidades litoedáficas en la cuenca del embalse de El Sancho.....	153
Figura 5.20: Gráfico de cajas que caracteriza los distintos grupos litoedáficos frente al grupo hidrológico de suelo para litofacies sin fuerte dependencia roca-suelo .....	154
Figura 5.21: Gráfico de cajas que caracteriza las distintas litofacies simplificadas frente al índice de grupo de suelo para litofacies con fuerte dependencia roca-suelo .....	155
Figura 5.22: Gráfico de cajas que caracteriza los distintos grupos litoedáficos frente al índice de grupo hidrológico de suelo para litofacies sin fuerte dependencia roca-suelo .....	156
Figura 5.23: Gráfico de cajas que caracteriza las distintas litofacies simplificadas frente a la CRAM .....	157
Figura 5.24: Gráfico de cajas que caracteriza las distintas litofacies simplificadas frente a la CRAD .....	158
Figura 5.25: Gráfico de cajas que caracteriza las distintas litofacies simplificadas frente al PMP.....	158
Figura 5.26: Áreas de influencia de las estaciones meteorológicas de la cuenca.....	159
Figura 5.27: Balance hídrico mensual del año 2003 para la estación de la Presa y CRAM de 43,78 mm/m.....	162
Figura 5.28: Balance hídrico mensual del año 2003 para la estación de la Presa y CRAM de 220,8 .....	162
Figura 5.29: Estructura de la leyenda y definición de criterios del mapa de usos y coberturas vegetales de Andalucía, aplicado a las zonas forestales y naturales (Junta de Andalucía, 1999) .....	172
Figura 5.30: Diagrama de flujo del proceso de unificación de la leyenda de usos del suelo (elaboración propia).....	178
Figura 5.31: Distribución de usos del suelo (SCS) en la cuenca de El Sancho .....	181
Figura 5.32: Distribución de usos del suelo según el método de Témez en la cuenca de El Sancho .....	186
Figura 5.33: Flujo de trabajo para la determinación de los números de curva según los distintos modelos.....	187
Figura 5.34: Números de curva medios de la cuenca del embalse de El Sancho según los distintos modelos ensayados.....	188
Figura 5.35: Números de curva medios según Témez (1987) en la cuenca del embalse de El Sancho según los distintos modelos ensayados .....	188
Figura 6.1: Esquema de circulación de flujos en la presa de El Sancho .....	190
Figura 6.2: Aliviadero de la Presa de El Sancho (fuente: ENCE).....	191
Figura 6.3: Esquema de funcionamiento de las compuertas de la presa .....	192

Figura 6.4: Límite de vertido bajo compuerta-lámina libre para el embalse de El Sancho (elaboración propia).....	192
Figura 6.5: Relación entre la cota de agua embalsada y el caudal emitido por el desagüe de fondo totalmente abierto (elaboración propia).....	195
Figura 6.6: Pluviograma de la tormenta de 16 de diciembre de 2002 (Tormenta 1).....	197
Figura 6.7: Hidrograma de la tormenta de 16 de diciembre de 2002 (Tormenta 1).....	197
Figura 6.8: Pluviograma de 24 de febrero de 2003 (Tormenta 2).....	198
Figura 6.9: Hidrograma de la tormenta de 2 de febrero de 2003 (Tormenta 2).....	199
Figura 6.10: Pluviograma de la tormenta de 27 de marzo de 2003 (Tormenta 3).....	200
Figura 6.11: Hidrograma de la tormenta de 27 de marzo de 2003 (Tormenta 3).....	201
Figura 6.12: Pluviograma de la tormenta de 22 de abril de 2003 (Tormenta 4).....	202
Figura 6.13: Hidrograma de la tormenta de 22 de abril de 2003 (Tormenta 4).....	203
Figura 6.14: Pluviograma de la tormenta de 5 de diciembre de 2003 (Tormenta 5).....	204
Figura 6.15: Hidrograma de la tormenta de 5 de diciembre de 2003 (Tormenta 5).....	205
Figura 6.16: Pluviograma de la tormenta de 8 de diciembre de 2003 (Tormenta 6).....	206
Figura 6.17: Hidrograma de la tormenta de 8 de diciembre de 2003 (Tormenta 6).....	207
Figura 6.18: Pluviograma de la tormenta de 20 de febrero de 2004 (Tormenta 7).....	208
Figura 6.19: Hidrograma de la tormenta de 20 de febrero de 2004 (Tormenta 7).....	209
Figura 6.20: Pluviograma de la tormenta de 23 de febrero de 2004 (Tormenta 8).....	210
Figura 6.21: Hidrograma de la tormenta de 23 de febrero de 2004 (Tormenta 8).....	211
Figura 6.22: Diagrama de flujo de la caracterización física e hidromorfométrica de la cuenca de El Sancho.....	212
Figura 6.23: Representación gráfica del proceso de corrección de un sumidero.....	213
Figura 6.24: Determinación de la dirección de flujo superficial.....	214
Figura 6.25: Determinación del flujo acumulado.....	214
Figura 6.26: Cuenca del embalse de El Sancho y su red de drenaje.....	215
Figura 6.27: Subsistemas resultantes de la fragmentación de la cuenca del embalse de El Sancho.....	216
Figura 6.28: Clasificación de Horton-Strahler de la cuenca del embalse de El Sancho.....	218
Figura 6.29: Cauces principales de los subsistemas hidrológicos.....	219
Figura 6.30: Esquema de la cuenca del embalse de El Sancho aplicado en la simulación.....	222
Figura 6.31: Esquema de interpolación en función de la inversa de la distancia para el nodo j.....	224
Figura 6.32: Esquema metodológico de generación del modelo meteorológico de precipitaciones distribuida.....	225
Figura 6.33: Interpretación de los tiempos de concentración según diversos métodos.....	228
Figura 6.34: Esquema del modelo de depósito lineal empleado en el hidrograma de Clark.....	228
Figura 6.35: Determinación del coeficiente de almacenamiento (R) de una cuenca.....	230
Figura 6.36: Esquema de aplicación del modelo modificado de Clark (modificado de Kull y Feldman, 1998).....	232
Figura 6.37: Diagrama de flujo para la generación de un fichero compatible con programa HEC-HMS que contenga las variables necesarias para el modelo modificado de Clark.....	233
Figura 6.38: Almacenamiento por prisma y por cuña en un tramo de un canal (modificada de Chow, 1994).....	234
Figura 6.39: Esquema del programa HEC-HMS, variables de simulación y conexión con las demás herramientas empleadas.....	237
Figura 7.1: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación I y la tormenta 1 del 16/12/2002.....	245
Figura 7.2: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación I y la tormenta 2 del 24/02/2003.....	246
Figura 7.3: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación I y la tormenta 3 del 27/03/2003.....	247
Figura 7.4: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación I y la tormenta 4 del 22/04/2003.....	248
Figura 7.5: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación I y la tormenta 5 del 05/12/2003.....	249
Figura 7.6: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación I y la tormenta 6 del 08/12/2003.....	250
Figura 7.7: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación I y la tormenta 7 del 20/02/2004.....	251
Figura 7.8: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación I y la tormenta 8 del 23/02/2004.....	252

Figura 7.9: Diferencia de volumen para la simulación I y las distintas tormentas .....	253
Figura 7.10: Valores del error medio cuadrático para la simulación I y las distintas tormentas .....	253
Figura 7.11: Valores del error relativo del caudal para la simulación I y las distintas tormentas .....	254
Figura 7.12: Valor de la eficiencia del ajuste de la simulación I y las distintas tormentas .....	254
Figura 7.13: Valor del error relativo del caudal punta de la simulación I para las distintas tormentas .....	255
Figura 7.14: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación II y la tormenta 1 del 16/12/2002 .....	256
Figura 7.15: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación II y la tormenta 2 del 24/02/2003 .....	257
Figura 7.16: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación II y la tormenta 3 del 27/03/2003 .....	258
Figura 7.17: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación II y la tormenta 4 del 22/04/2003 .....	259
Figura 7.18: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación II y la tormenta 5 del 05/12/2003 .....	260
Figura 7.19: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación II y la tormenta 6 del 08/12/2003 .....	261
Figura 7.20: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación II y la tormenta 7 del 20/02/2004 .....	262
Figura 7.21: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación II y la tormenta 8 del 23/02/2004 .....	263
Figura 7.22: Diferencia de volumen para la simulación II y las distintas tormentas.....	264
Figura 7.23: Valores del error medio cuadrático para la simulación II y las distintas tormentas.....	264
Figura 7.24: Valores del error relativo del caudal para la simulación II y las distintas tormentas.....	265
Figura 7.25: Valor de la eficiencia del ajuste de la simulación II y las distintas tormentas .....	265
Figura 7.26: Valor del error relativo del caudal punta de la simulación II para las distintas tormentas.....	266
Figura 7.27: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación III y la tormenta 1 del 16/12/2002 .....	267
Figura 7.28: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación III y la tormenta 2 del 24/02/2003 .....	268
Figura 7.29: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación III y la tormenta 3 del 27/03/2002 .....	269
Figura 7.30: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación III y la tormenta 4 del 22/04/2003 .....	270
Figura 7.31: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación III y la tormenta 5 del 5/12/2003 .....	271
Figura 7.32: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación III y la tormenta 6 del 08/12/2003 .....	272
Figura 7.33: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación III y la tormenta 7 del 20/02/2004 .....	273
Figura 7.34: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación III y la tormenta 8 del 23/02/2004 .....	274
Figura 7.35: Diferencia de volumen para la simulación III y las distintas tormentas .....	275
Figura 7.36: Valores del error medio cuadrático para la simulación III y las distintas tormentas .....	275
Figura 7.37: Valores del error relativo del caudal para la simulación III y las distintas tormentas.....	276
Figura 7.38: Valor de la eficiencia del ajuste de la simulación III y las distintas tormentas.....	276
Figura 7.39: Valor del error relativo del caudal punta de la simulación III para las distintas tormentas .....	277
Figura 7.40: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación IV y la tormenta 1 del 16/12/2002 .....	278
Figura 7.41: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación IV y la tormenta 2 del 24/02/2003 .....	279
Figura 7.42: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación IV y la tormenta 3 del 27/03/2002 .....	280
Figura 7.43: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación IV y la tormenta 4 del 22/04/2003 .....	281
Figura 7.44: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación IV y la tormenta 5 de 05/12/2003 .....	282
Figura 7.45: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación IV y la tormenta 6 del 08/12/2003 .....	283

---

Figura 7.46: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación IV y la tormenta 7 del 20/02/2004.....	284
Figura 7.47: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación IV y la tormenta 8 del 23/02/2004.....	285
Figura 7.48: Diferencia de volumen para la simulación IV y las distintas tormentas.....	286
Figura 7.49: Valores del error medio cuadrático para la simulación IV y las distintas tormentas.....	286
Figura 7.50: Valores del error relativo del caudal para la simulación IV y las distintas tormentas.....	287
Figura 7.51: Valor de la eficiencia del ajuste de la simulación IV y las distintas tormentas.....	287
Figura 7.52: Valor del error relativo del caudal punta de la simulación IV para las distintas tormentas .....	288
Figura 7.53: Media aritmética de la diferencia entre el volumen de escorrentía observado y el estimado .....	288
Figura 7.54: Media aritmética del error medio cuadrático .....	289
Figura 7.55: Media aritmética del error relativo del caudal.....	290
Figura 7.56: Media aritmética del parámetro de eficiencia de Nash .....	290
Figura 7.57: Media aritmética del error relativo del caudal punta.....	291



## ÍNDICE TABLAS

Tabla 2.1: Relación entre el número de curva (CN) y la retención potencial (S).....	10
Tabla 2.2: Adaptación de los ecosistemas áridos americanos a los españoles (Martínez de Azagra et al., 1996).....	14
Tabla 2.3: Condición hidrológica del pasto en función de la carga ganadera (NRCS,2002).....	15
Tabla 2.4: Condición hidrológica de los pastizales en función del peso seco de materia (NRCS, 2002).....	16
Tabla 2.5: Condición hidrológica para los matorrales con algo de herbáceas (SCS ,1986) .....	16
Tabla 2.6: Condición hidrológica de pequeñas arboledas (NRCS, 2002) .....	16
Tabla 2.7: Clases de humus y su relación con su compactación .....	17
Tabla 2.8: Relación tabular entre las condiciones antecedentes de humedad (NRCS, 2002).....	20
Tabla 2.9: Tabla para la determinación de la condición antecedente de humedad en función de la precipitación acumulada en los cinco días previos.....	21
Tabla 2.10: Números de curva para los cultivos agrícolas .....	22
Tabla 2.11: Números de curva para pastizales y arboledas. ....	23
Tabla 2.12: Números de curva para zonas urbanas .....	23
Tabla 2.13: Tabla para la determinación del número de curva en zonas áridas y semiáridas (SCS, 1986) .....	25
Tabla 2.14: Tanto por uno de error en la estimación de la escorrentía, para una precipitación dada, por unidad de número de curva .....	28
Tabla 2.15: Sensibilidad del número de curva a las técnicas de cultivo .....	29
Tabla 2.16: Sensibilidad del número de curva al grupo hidrológico de suelo .....	31
Tabla 2.17: Sensibilidad del número de curva a la condición hidrológica .....	33
Tabla 2.18: Umbrales de escorrentía ( $P_0$ en mm) para condiciones medias de humedad (Témez, 1987) .....	38
Tabla 3.1: Relación entre el número de curva, la conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ), la sortividad ( $S_o$ ) y el factor de succión ( $F_s$ ) (modificada de Morel-Seytoux y Verdin, 1982).....	45
Tabla 3.2: Caracterización de la conductividad hidráulica saturada (modificada de Soil Survey Division Staff, 1993).....	51
Tabla 3.3: Clasificación de la profundidad de la capa freática (Soil Survey Division Staff, 1993) .....	51
Tabla 3.4: Caracterización de los grupos hidrológicos en función de la conductividad hidráulica saturada y de la profundidad de la capa freática.....	51
Tabla 3.5: Asignación de los grupos hidrológicos en función de las tres variables que los definen .....	52
Tabla 3.6: <i>Distribución de suelos de los ensayos de Nearing et al. (1996)</i> .....	53
Tabla 3.7: Clasificación de los grupos hidrológicos en función del contenido de arena del suelo según Bouwer 1969 (en Neitsch et al., 2002).....	53
Tabla 3.8: Clasificación de grupos hidrológicos para España (MOPU, 1990).....	53
Tabla 3.9: Equivalencias entre las clases de infiltración establecidas por Trueba et al., 2000 y Porta et al.,1999 (en Ferrer, 2003).....	54
Tabla 3.10: Equivalencias entre tasas de infiltración y grupos hidrológicos de suelo (Ferrer, 2003) .....	54
Tabla 3.11:Asignación de grupos hidrológicos de suelos en función de la tasa de transmisión de agua en el suelo, según diversos autores .....	54
Tabla 3.12: Correspondencia entre la textura y los grupos hidrológicos de suelo (Rawls et al., 1983; en SCS 1986 y en Maidment, 1992) .....	56
Tabla 3.13: Correspondencia entre la textura y los grupos hidrológicos de suelo (Témez, 1987) .....	57
Tabla 3.14: Correspondencia entre la textura y los grupos hidrológicos de suelo (MOPU, 1990).....	57
Tabla 3.15: Correspondencia entre la textura y los grupos hidrológicos de suelo (MOPT, 1992).....	58
Tabla 3.16: Correspondencia entre la textura y los grupos hidrológicos de suelo (Ferrer, 2003) .....	58
Tabla 3.17: Modelos predictivos y variables necesarias del modelo Rosetta .....	67
Tabla 3.18: Relaciones de las clases texturales con las funciones de edafotransferencia propuestas ( $K_s$ en mm/h) .....	70
Tabla 3.19: Resumen de las características de las funciones de edafotransferencia estudiadas .....	73
Tabla 4.1: Caracterización de los grupos hidrológicos en función de la conductividad hidráulica saturada .....	76
Tabla 4.2: Límites de clase del índice de grupo para cada grupo hidrológico en función de la conductividad hidráulica saturada .....	76
Tabla 4.3: Asignación del índice de grupo hidrológico para el perfil edáfico en función de los índices obtenidos a distintas profundidades.....	77
Tabla 4.4: Ejemplo de asignación de grupo hidrológico de suelo .....	77
Tabla 4.5: Relación de los grupos hidrológicos con los valores centrales de $I_g$ .....	79

Tabla 4.6: Ejemplo de pares de valores del número de curva y de Ig central .....	79
Tabla 4.7: Coeficientes de las funciones de estimación para los usos agrarios.....	85
Tabla 4.8: Coeficientes de las funciones de estimación para los pastizales y arboledas .....	86
Tabla 4.9: Coeficientes de las funciones de estimación para zonas urbanas.....	86
Tabla 4.10: Coeficientes de las funciones de estimación para áreas áridas y semidesérticas .....	87
Tabla 4.11: Números de curva asociados a los umbrales de escorrentía del método de Témez .....	88
Tabla 4.12: Coeficientes de las funciones de estimación del número de curva (CN), derivados del método del umbral de escorrentía de Témez.....	89
Tabla 4.13: Situaciones de cálculo del balance hídrico del suelo .....	92
Tabla 4.14: Valores del coeficiente $a_1$ .....	98
Tabla 4.15: Relación entre los estados antecedentes de humedad y el porcentaje de reserva de agua del suelo.....	101
Tabla 4.16: Relación entre los estados antecedentes de humedad y el contenido de agua del suelo.....	102
Tabla 4.17: Relación entre los estados antecedentes de humedad del suelo y el índice de estado antecedente de humedad .....	104
Tabla 5.1: Litofacies presentes en la cuenca del embalse de El Sancho .....	112
Tabla 5.2: Litofacies simplificadas presentes en la cuenca del embalse de El Sancho .....	113
Tabla 5.3: Características de las estaciones de la red meteorológica .....	119
Tabla 5.4: Coeficientes de correlación de Pearson para la precipitación diaria de las estaciones (a un nivel de significación $\alpha=0,05$ ) .....	121
Tabla 5.5: Regresión multivariante y coeficientes de determinación.....	122
Tabla 5.6: Rectas de regresión simple y coeficiente de determinación.....	123
Tabla 5.7: Rectas de regresión y coeficientes de correlación para la evapotranspiración.....	124
Tabla 5.8: Principales características de la tormenta de 16/12/2002 (Tormenta 1).....	126
Tabla 5.9: Principales características de la tormenta de 24/2/2003 (Tormenta 2).....	126
Tabla 5.10: Principales características de la tormenta de 27/3/2003 (Tormenta 3).....	128
Tabla 5.11: Principales características de la tormenta de 22/4/2003 (Tormenta 4).....	130
Tabla 5.12: Principales características de la tormenta de 5/12/2003 (Tormenta 5).....	130
Tabla 5.13: Principales características de la tormenta de 8/12/2003 (Tormenta 6).....	132
Tabla 5.14: Principales características de la tormenta de 20/02/2004 (Tormenta 7).....	134
Tabla 5.15: Principales características de la tormenta de 23/02/2004 (Tormenta 8).....	134
Tabla 5.16: Distribución de litofacies simplificadas en la cuenca del embalse de El Sancho.....	138
Tabla 5.17: Tipos de relieve presentes en la zona de estudio.....	139
Tabla 5.18: Distribución de las unidades de paisaje dentro de la cuenca.....	139
Tabla 5.19: Variables categóricas del medio.....	141
Tabla 5.20: Variables continuas del medio .....	141
Tabla 5.21: Variables categóricas del perfil completo .....	141
Tabla 5.22: Variables continuas del perfil completo.....	141
Tabla 5.23: Variables por categorías del perfil obtenidas como valores medios de los horizontes.....	143
Tabla 5.24: Variables continuas del perfil obtenidas como valores medios de los horizontes.....	143
Tabla 5.25: Variables tipificadas.....	143
Tabla 5.26: Resultados del análisis mediante tablas de contingencia de las relaciones entre la variable “lito_simp” (litofacies simplificadas) y el resto de variables categorizadas .....	143
Tabla 5.27: Resultados del análisis mediante tablas de contingencia de las relaciones entre la variable “TipoProfUtil” (categorías de profundidad útil) y el resto de variables categorizadas .....	143
Tabla 5.28: Resultados del análisis mediante tablas de contingencia de las relaciones entre las variables “TipoCram” / “TipoCradU” (categorías de capacidad de retención de agua total y útil) y el resto de variables categorizadas .....	143
Tabla 5.29: Medias por litologías simplificadas para las variables principales estudiadas .....	145
Tabla 5.30: Correlaciones más significativas de las variables de profundidad del suelo (Prof_util) y profundidad tipificada (ProfU_LT).....	146
Tabla 5.31: Correlaciones más significativas de las variables de capacidad de retención de agua del suelo total (CRAM) y útil (CRADutil) .....	146
Tabla 5.32: Correlaciones más significativas de las variables de conductividad hasta 50 cm de profundidad (KBrakMin50 y KBrak50LT para la tipificada) y del parámetro continuo del grupo hidrológico de suelos (Ig y Ig_PfLT para la tipificada).....	147
Tabla 5.33: Principales correlaciones entre variables del suelo-medio y las variables objetivo, para las zonas de relieve accidentado.....	148
Tabla 5.34: Principales correlaciones entre variables del suelo-medio y las variables objetivo tipificadas según la media de su litología, para las zonas de relieve accidentado.....	149

Tabla 5.35: Variables y litofacies que presentan diferencias superiores al 15% en las medias de las zonas de relieve accidentado frente a la media general de toda la litología .....	150
Tabla 5.36: Porcentaje de variación de las medias totales de la CRAM, CRAD y PMP respecto a las medias de las variables del relieve accidentado .....	151
Tabla 5.37: Valores del grupo hidrológico de suelo por litofacies simplificadas y tipo de relieve .....	152
Tabla 5.38: Unidades litoedáficas presentes en la cuenca de El Sancho (Domingo et al., 2003) .....	153
Tabla 5.39: Resultado de los grupos hidrológicos de suelo por unidades litoedáficas .....	154
Tabla 5.40: Resultado de los grupos hidrológicos de suelo para la litofacies 9000 .....	154
Tabla 5.41: Valores medios del índice de grupo hidrológico de suelo por litofacies simplificadas y tipo de relieve .....	155
Tabla 5.42: Resultado del índice de grupo hidrológico de suelo por unidades litoedáficas .....	156
Tabla 5.43: Resultado del índice de grupo hidrológico de suelo para la litofacies 9000 .....	156
Tabla 5.44: Valores de CRAM, CRAD y PMP por litofacies simplificadas y tipo de relieve .....	157
Tabla 5.45: Resultado de la CRAM, CRAD y PMP por unidades litoedáficas .....	158
Tabla 5.46: Resultado de la CRAM, CRAD y PMP para la litofacies 9000 .....	159
Tabla 5.47: Condición de humedad para cada una de las zonas de influencia y para los distintos eventos de precipitación estudiados .....	160
Tabla 5.48: <i>CRAM por áreas de influencia de las estaciones meteorológicas, en función de tipo de suelo</i> .....	161
Tabla 5.49: Balance hídrico mensual del año 2003 para la estación de la Presa y CRAM de 43,78 mm/m (valores en mm) .....	161
Tabla 5.50: Balance hídrico mensual del año 2003 para la estación de la Presa y CRAM de 244,2mm/m (valores en mm) .....	162
Tabla 5.51: Coeficientes de reducción del poder evaporante de la atmósfera (Martínez de Azagra, 1996) .....	163
Tabla 5.52: Reserva del día 1 de septiembre para las distintas estaciones en función de la CRAM .....	163
Tabla 5.53: Estado de la reserva de agua del suelo previa a las tormentas (mm/m) .....	164
Tabla 5.54: Porcentaje de la reserva de agua del suelo respecto a la reserva máxima en el día previo a las tormentas .....	165
Tabla 5.55: Índice de humedad para las tormentas estudiadas y los distintos suelos de la cuenca .....	167
Tabla 5.56: Valores del índice de estado antecedente de humedad el día antes del evento estudiado .....	168
Tabla 5.57: Nomenclatura utilizada en el mapa de usos y coberturas vegetales del suelo de Andalucía para superficies construidas y alteradas (Junta de Andalucía, 1999) .....	173
Tabla 5.58: Nomenclatura utilizada en el mapa de usos y coberturas vegetales del suelo de Andalucía para zonas húmedas y superficies de agua (Junta de Andalucía, 1999) .....	173
Tabla 5.59: Nomenclatura utilizada en el mapa de usos y coberturas vegetales del suelo de Andalucía para superficies agrícolas (Junta de Andalucía, 1999) .....	174
Tabla 5.60: Nomenclatura utilizada en el mapa de usos y coberturas vegetales del suelo de Andalucía para superficies forestales y naturales (Junta de Andalucía, 1999) .....	174
Tabla 5.61: Cultivos agrícolas homogéneos .....	176
Tabla 5.62: Especificaciones de las formaciones forestales (Junta de Andalucía, 1999) .....	177
Tabla 5.63: Usos del suelo presentes en la cuenca del embalse de El Sancho .....	178
Tabla 5.64: Equivalencias entre la leyenda del mapa de usos y las tablas del número de curva del SCS .....	179
Tabla 5.65: Distribución de los usos del suelo (SCS) en la cuenca de El Sancho .....	180
Tabla 5.66: Equivalencias entre los usos del suelo y las categorías de Témez (Generalitat de Catalunya, 2001) .....	182
Tabla 5.67: Equivalencias entre los usos del suelo y las categorías de Témez (Ferrer, 2003) .....	182
Tabla 5.68: Equivalencias entre la leyenda del mapa de usos y las tablas del método de Témez (elaboración propia) .....	184
Tabla 5.69: Distribución de los usos del suelo (umbral de escorrentía) en la cuenca de El Sancho .....	186
Tabla 6.1: Datos de la tormenta de 16 de diciembre de 2002 (Tormenta 1) .....	197
Tabla 6.2: Datos de la tormenta de 24 de febrero de 2003 (Tormenta 2) .....	198
Tabla 6.3: Datos de la tormenta de 27 de marzo de 2003 (Tormenta 3) .....	200
Tabla 6.4: Datos de la tormenta de 22 de abril de 2003 (Tormenta 4) .....	202
Tabla 6.5: Datos de la tormenta de 5 de diciembre de 2003 (Tormenta 5) .....	204
Tabla 6.6: Datos de la tormenta de 8 de diciembre de 2003 (Tormenta 6) .....	206
Tabla 6.7: Datos de la tormenta de 20 de febrero de 2004 (Tormenta 7) .....	208
Tabla 6.8: Datos de la tormenta de 23 de febrero de 2004 (Tormenta 8) .....	210
Tabla 6.9: Características morfométricas de los subsistemas hidrológicos del embalse de El Sancho .....	216
Tabla 6.10: Interpretación del índice de compacidad (Monsalve, 1999) .....	217

Tabla 6.11: Índice de compacidad de las distintas subcuencas del sistema del embalse de El Sancho.....	217
Tabla 6.12: Clasificación de Horton-Strahler de los subsistemas hidrológicos .....	219
Tabla 6.13: Relación de longitudes de los cauces principales.....	220
Tabla 6.14: Tiempo de concentración de los distintos subsistemas .....	221
Tabla 6.15: Valores de $\lambda$ en función del tipo de cuenca .....	231
Tabla 6.16: Coeficientes de almacenamiento (R) para las distintas subcuencas del embalse de El Sancho.....	231
Tabla 6.17: Relación $V_w/V$ (USACE, 1994).....	235
Tabla 6.18: Caracterización de los regímenes hidráulicos para los tramos de propagación de la cuenca del embalse de El Sancho (Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía, 2003).....	236
Tabla 6.19: Valores estimados para los tiempos de viaje de la onda de avenida ( $V_w$ ).....	236
Tabla 6.20: Valores de los parámetros de Muskingum para los distintos tramos de propagación .....	236
Tabla 6.21: Resumen de las características de las distintas combinaciones de obtención del número de curva .....	240
Tabla 6.22: Agrupación de los modelos de simulación en función de las variables ensayadas .....	243
Tabla 7.1: Parámetros y estadísticos de la simulación I y la tormenta 1 del 16/12/2002 .....	246
Tabla 7.2: Parámetros y estadísticos de la simulación I y la tormenta 2 del 24/02/2003 .....	247
Tabla 7.3: Parámetros y estadísticos de la simulación I y la tormenta 3 del 27/03/2003 .....	248
Tabla 7.4: Parámetros y estadísticos de la simulación I y la tormenta 4 del 22/04/2003 .....	248
Tabla 7.5: Parámetros y estadísticos de la simulación I y la tormenta 5 del 05/12/2003 .....	249
Tabla 7.6: Parámetros y estadísticos de la simulación I y la tormenta 6 del 08/12/2003 .....	250
Tabla 7.7: Parámetros y estadísticos de la simulación I y la tormenta 7 del 20/02/2004 .....	251
Tabla 7.8: Parámetros y estadísticos de la simulación I y la tormenta 8 del 23/02/2004 .....	252
Tabla 7.9: Parámetros y estadísticos de la simulación II y la tormenta 1 del 16/12/2002.....	256
Tabla 7.10: Parámetros y estadísticos de la simulación II y la tormenta 2 del 24/02/2003.....	257
Tabla 7.11: Parámetros y estadísticos de la simulación II y la tormenta 3 del 27/03/2003.....	258
Tabla 7.12: Parámetros y estadísticos de la simulación II y la tormenta 4 del 22/04/2003.....	259
Tabla 7.13: Parámetros y estadísticos de la simulación II y la tormenta 5 del 05/12/003.....	260
Tabla 7.14: Parámetros y estadísticos de la simulación II y la tormenta 6 del 08/12/2003.....	261
Tabla 7.15: Parámetros y estadísticos de la simulación II y la tormenta 7 del 20/02/2004.....	262
Tabla 7.16: Parámetros y estadísticos de la simulación II y la tormenta 8 del 23/02/2004.....	263
Tabla 7.17: Parámetros y estadísticos de la simulación III y la tormenta 1 del 16/12/2002 .....	267
Tabla 7.18: Parámetros y estadísticos de la simulación III y la tormenta 2 del 24/02/2003 .....	268
Tabla 7.19: Parámetros y estadísticos de la simulación III y la tormenta 3 del 27/03/2003 .....	269
Tabla 7.20: Parámetros y estadísticos de la simulación III y la tormenta 4 del 22/04/2003 .....	270
Tabla 7.21: Parámetros y estadísticos de la simulación III y la tormenta 5 del 5/12/2003 .....	271
Tabla 7.22: Parámetros y estadísticos de la simulación III y la tormenta 6 del 08/12/2003 .....	272
Tabla 7.23: Parámetros y estadísticos de la simulación III y la tormenta 7 del 20/02/2004 .....	273
Tabla 7.24: Parámetros y estadísticos de la simulación III y la tormenta 8 del 23/02/2004 .....	274
Tabla 7.25: Parámetros y estadísticos de la simulación IV y la tormenta 1 del 16/12/2002 .....	278
Tabla 7.26: Parámetros y estadísticos de la simulación IV y la tormenta 2 del 24/02/2003 .....	279
Tabla 7.27: Parámetros y estadísticos de la simulación IV y la tormenta 3 del 27/03/2003 .....	280
Tabla 7.28: Parámetros y estadísticos de la simulación IV y la tormenta 4 del 22/04/2003 .....	281
Tabla 7.29: Parámetros y estadísticos de la simulación IV y la tormenta 5 del 05/12/2003 .....	282
Tabla 7.30: Parámetros y estadísticos de la simulación IV y la tormenta 6 del 08/12/2003 .....	283
Tabla 7.31: Parámetros y estadísticos de la simulación IV y la tormenta 7 del 20/02/2004 .....	284
Tabla 7.32: Parámetros y estadísticos de la simulación IV y la tormenta 8 del 23/02/2004 .....	285

## ÍNDICE ANEJOS

ANEJO I: PERFILES TIPO

ANEJOII: INTERVALOS CUALITATIVOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES EDÁFICAS

ANEJO III: DESCRIPCIÓN DE VARIABLES USADAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS RELACIONES SUELO-PAISAJE

ANEJO IV: MEDIAS DE LAS VARIABLES ENSAYADAS POR SUBGRUPOS DE LITOFACIES SIMPLIFICADAS

ANEJO V: BALANCES HÍDRICOS DIARIOS



## Resumen

Este trabajo plantea una serie de mejoras al método del número de curva para la estimación de la transformación de lluvia en escorrentía. Se incide en la mejora de la precisión en la determinación del grupo hidrológico de suelo y en la reducción de la ambigüedad en el establecimiento del estado antecedente de humedad del suelo.

Para la determinación del grupo hidrológico de suelo se ha acudido a las definiciones del organismo de referencia, habiéndose realizado una revisión y análisis profundos del modelo. La metodología propuesta parte de la estimación de la conductividad hidráulica saturada de los horizontes del suelo que, combinada con la profundidad a la que se produce la mínima conductividad, da lugar a un índice continuo del grupo hidrológico de suelo, que disminuye en gran medida la probabilidad de error que presenta la actual determinación discreta.

La obtención de valores continuos del grupo hidrológico de suelo lleva a plantear la obtención de los números de curva de forma continua en vez de discreta, mediante la transformación de las tablas actuales en familias de funciones dependientes del índice de grupo hidrológico de suelo.

En cuanto a la condición antecedente de humedad del suelo, basada en la actualidad en la precipitación antecedente y no en parámetros edáficos, se han planteado dos modelos continuos basados en la evolución de la reserva de agua en el suelo, partiendo de una transformación del balance hídrico mensual a balance hídrico diario.

La validación de los parámetros mejorados y la cuantificación del nivel de mejora se ha realizado en una cuenca aforada y con 5 estaciones meteorológicas automáticas en el suroeste de España. La validación utiliza un modelo hidrológico distribuido, que funciona sobre un sistema de información geográfica, para la estimación de hidrogramas de tormentas, que se comparan con los hidrogramas reales de escorrentía.

Las mejoras planteadas aumentan notablemente la precisión del método del número de curva, especialmente en condiciones de insaturación del suelo.

## Summary

This work proposes a set of improvements to the curve number method for runoff estimation. It deals with a more precise procedure to the calculation of the hydrological soil group as well as the reduction of ambiguity in determining the antecedent soil moisture condition.

For hydrological soil group, a previous deep analysis of the method has been performed from the definitions of its reference organism. The proposed procedure determines a continuous hydrological soil group index by means of combining pedotransfer estimations of hydraulic conductivity of soil horizons with the soil depth where minimum hydraulic conductivity occurs. The continuous index should reduce the probability of error arising from the traditional sharp classes.

The continuous index obtained for hydrological soil group leads to the proposal of continuous curve numbers. This has been done by shifting from the standard tables to a set of functions with the hydrological soil group index as independent variable.

The antecedent moisture condition (AMC) is based so far on previous rainfall, not taking in account pedologic parameters. Soil water balance has been transformed from monthly to daily in order to propose two continuous models for AMC, based on the water content evolution related to time.

To validating the proposals made, as well as their level of improvement, a test has been conducted in a controlled watershed, containing five meteorological automated stations in South western Spain. Real runoff hydrograms of several storms were compared to the results of a distributed hydrological model that uses curve number, running on a geographical information system.

The proposed improvements make more precise the curve number, specially in unsaturated soil conditions.

## CAPÍTULO 1: OBJETIVOS Y ANTECEDENTES

La historia de la hidrología es tan antigua como la de los propios hombres y a lo largo de los siglos el desarrollo de las grandes civilizaciones ha estado ligado al manejo y aprovechamiento del agua; sirva de ejemplo la civilización egipcia, que estudió el comportamiento del Nilo, llegando a represarlo en el año 4000 antes de Cristo.

Desde siempre la mente del ser humano se ha maravillado con el discurrir de las aguas sobre la superficie de la tierra, surgiéndole la necesidad de conocer la cantidad de agua disponible en un área geográfica concreta, bien como medida del riesgo de inundación o, simplemente, para adaptar sus sistemas productivos a la disponibilidad del recurso agua. Esta necesidad ha provocado que los hidrólogos traten de estimar la escorrentía producida por un evento tormentoso, mediante el desarrollo de modelos que relacionan la precipitación con el agua excedente que escurre sobre la superficie del suelo.

El presente trabajo se centra en uno de los numerosos modelos de estimación de escorrentía existentes, conocido como el método de número de curva del *Soil Conservation Service (SCS)* de los Estados Unidos. Las razones que han conducido a centrar el estudio sobre dicho modelo se pueden resumir en:

- Su amplia difusión a escala mundial, siendo uno de los métodos de transformación de lluvia en escorrentía más utilizados en hidrología.
- Su frecuente aplicación en los estudios hidrológicos que se realizan en España.
- La amplia vigencia temporal del modelo hace pensar que está lo suficientemente contrastado y que aporta resultados fiables.
- La relativa facilidad de aplicación en cualquier punto del territorio, puesto que su determinación depende de variables fácilmente cuantificables.

A la vista de lo expuesto se puede pensar que el modelo está suficientemente desarrollado tras tantos años de uso y que no presenta problemas en su aplicación, pero cuando se intenta determinar el número de curva de un lugar, con el fin de evaluar la escorrentía que genera una precipitación, aparecen determinadas ambigüedades que pueden hacer variar los resultados de forma alarmante e, incluso, conducir a errores graves.

Aunque se desarrollará en capítulos posteriores, la estimación del número de curva de una zona concreta pasa, básicamente, por la determinación de tres variables:

- El uso que soporta el suelo y que evalúa la influencia de las distintas coberturas vegetales sobre la escorrentía.
- El grupo hidrológico de suelo que relaciona la escorrentía con las propiedades hídricas de los suelos y con su predisposición para producir escorrentía.

- La condición antecedente de humedad, que intenta evaluar el estado de saturación de agua del suelo como medida de la tendencia de éste a transformar la lluvia en escorrentía o en infiltración.

La determinación de la primera variable es obvia, aunque presenta una serie de dificultades de adaptación a los cultivos y usos en el ámbito español. Es en las otras dos variables donde el modelo presenta dificultades y ambigüedades, bien sea por confiar en los juicios del hidrólogo, por simplificar en exceso el comportamiento de los suelos o por intentar evaluar las condiciones de los mismos sin el apoyo de las características edafológicas.

## 1.1. OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DEL TRABAJO

Dado que parece irrefutable que el modelo presenta situaciones en las que puede ofrecer grandes imprecisiones, bien sea por un juicio inadecuado del hidrólogo o por las simplificaciones que se derivan de la formulación del modelo, los objetivos perseguidos en el presente trabajo son:

- Proponer mejoras en la determinación del grupo hidrológico de suelo que eliminen las posibles ambigüedades y aumenten la precisión del valor final del número de curva.
- Definir el estado antecedente de humedad del suelo, sobre una base edafoclimática consistente.
- Validar las innovaciones planteadas mediante la aplicación de un modelo hidrológico de cuenca sobre distintas alternativas de obtención del número de curva y comparando los resultados con los aforos reales.

Sobre la base de estos objetivos el trabajo se ha estructurado en ocho capítulos, según se indica a continuación:

- Un primer capítulo de introducción donde se explican brevemente los antecedentes del modelo del número de curva, cómo nace, la importancia e interés del modelo, y los usos actuales del mismo. Se plantean también los objetivos del trabajo.
- Un segundo capítulo donde se describe la componente teórica del modelo, las variables necesarias para la estimación del número de curva y los posibles valores que adoptan. También incluye un análisis de sensibilidad del modelo respecto de las variables que se usan en su determinación, con el fin de acotar las posibles fuentes de error.
- A la vista de los resultados obtenidos en el capítulo anterior, en el tercer capítulo se expresan las relaciones que tiene el número de curva con algunas propiedades físicas del suelo y se hace un análisis de las distintas definiciones de los grupos hidrológicos de suelo. Así mismo se analizan las funciones de edafotransferencia de la conductividad hidráulica saturada del suelo, como base para la estimación del grupo hidrológico de suelo.
- Una vez expuestos los principales problemas de aplicación que presenta el número de curva, el cuarto capítulo se ha destinado al planteamiento y justificación, a escala teórica, de las mejoras propuestas en este trabajo; la primera, destinada a la objetivación de la determinación del grupo hidrológico de suelo y a la obtención del número de curva como un parámetro continuo; la segunda se ha dirigido a la mejora de la estimación del estado antecedente de humedad del suelo.

- El quinto capítulo se ha dedicado a la descripción de la zona experimental, así como al procesado de la información necesaria para la obtención de los números de curva en la cuenca, según las mejoras propuestas. El capítulo finaliza con la presentación de los números de curva obtenidos para un conjunto de alternativas generadas por las combinaciones de distintas mejoras posibles, además del planteamiento original del método.
- En el capítulo sexto se establece el proceso de validación de las mejoras propuestas, lo que incluye la estimación de los hidrogramas reales y el desarrollo del modelo hidrológico distribuido para la cuenca experimental, así como la definición de indicadores estadísticos para la comparación de resultados.
- En el capítulo séptimo se recogen y analizan los resultados obtenidos.
- En el capítulo octavo, y último, se plasman las conclusiones y se plantean las futuras líneas de trabajo.

## 1.2. ANTECEDENTES DEL NÚMERO DE CURVA

### 1.2.1. Origen del modelo

El método del número de curva (*USDA SCS Curve Number Runoff*) tiene como finalidad la estimación de los volúmenes de escorrentía superficial y, en combinación con otras metodologías, el cálculo de los caudales máximos de salida de cuencas no aforadas. Actualmente el modelo es ampliamente utilizado en una gran variedad de zonas climáticas, desde áreas templadas-húmedas a desiertos, así como en situaciones diversas, incluso en la estimación del escurrimiento superficial en escombreras de minas (Boughton, 1989). En definitiva es uno de los modelos más perdurables en hidrología.

El modelo del número de curva es una creación del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (*Soil Conservation Service, SCS*), en cuyo seno, hacia 1935, se percibió la necesidad de obtener datos hidrológicos y de establecer una metodología simple para la estimación de las tasas de escorrentía en pequeñas cuencas agrícolas, bajo distintas condiciones de tratamiento (Hawkins, 1978).

Previamente, durante los años 1920 y 1930 se habían ido desarrollando trabajos con un carácter meramente científico en lo que era el nacimiento de la hidrología aplicada a cuencas agrícolas como una nueva ciencia (Woodward *et al.*, 2002). El primer paso fue obtener las tasas de infiltración en un gran número de cuencas de tipo agrícola y establecer una metodología de estudio de la infiltración. Durante los años 1930 y 1940 se realizaron cientos de ensayos de infiltración, lo que planteó un debate sobre la localización y el número de ensayos necesario para la caracterización hidrológica de una cuenca.

Bajo estas condiciones el SCS contrató a tres consultores privados (W.W. Horner, R.E. Horton y L.K. Sherman) con el fin de desarrollar un método racional de estimación de la escorrentía a partir de parcelas con distintas condiciones de uso del suelo (Rallison y Miller, 1982). El resultado de sus estudios, publicado en 1949, fue una serie de curvas de retención de lluvia que podían ser utilizadas, en combinación con otros parámetros, para calcular el volumen de escorrentía de una parcela.

L.K. Sherman fue el primero en proponer la relación directa entre la escorrentía superficial y la precipitación de una tormenta. Mockus, en 1949, retomó esta idea y construyó

un modelo en el que la escorrentía superficial puede ser estimada por la agregación de diversas variables relacionadas con la parcela de experimentación, tales como (Rallison y Miller, 1982):

- El suelo: tipo, extensión y localización.
- El uso del suelo: clase, superficie ocupada y localización.
- La lluvia previa al evento.
- La duración de la tormenta y la cantidad de lluvia.
- La temperatura media anual y la fecha de la tormenta.

Por lo que la escorrentía se podía calcular a través de las ecuaciones 1.1 y 1.2 (Woodward *et al.*, 2002):

$$Q = P \cdot (1 - 10^{-bP}) \quad 1.1$$

Donde:  $Q$  es la escorrentía directa en pulgadas

$P$  es la precipitación de la tormenta en pulgadas

$b$  es un parámetro que depende de las características de la parcela y de la duración de la tormenta, y se calcula mediante la expresión:

$$b = \frac{0,0374 \cdot 10^{0,229M} \cdot C^{1,061}}{T^{1,99} \cdot D^{1,333} \cdot 10^{2,271S/D}} \quad 1.2$$

Donde:  $M$  es la lluvia de los cinco días precedentes a la tormenta de estudio (en pulgadas)

$C$  es el índice de prácticas de cubierta (uso del suelo)

$T$  es el índice estacional, que es función de la fecha y la temperatura (°F)

$D$  es la duración de la tormenta en horas

$S$  es un índice del suelo en pulgadas por hora

De forma paralela, a principios de los años cuarenta se desarrollaron otros métodos de estimación de la escorrentía a partir de datos de infiltración. El más relevante fue el formulado por Andrews en 1954, que plantea un método gráfico de estimación de la escorrentía directa a través del complejo suelo-cobertura, que interrelaciona la textura del suelo, el tipo y la cantidad de cubierta vegetal, y las técnicas de conservación de suelos aplicadas (Woodward *et al.*, 2002). Era la primera vez que se planteaba, de forma directa, la relación suelo-vegetación en la generación de escorrentía superficial, por lo que Andrews acuñó el término de “complejo suelo-cubierta”, que en la actualidad sigue siendo una parte muy importante del número de curva.

En 1955 G.W. Musgrave realiza una clasificación de los suelos en cuatro grandes grupos, en función de su tasa mínima de infiltración, asignado una “A” a los suelos con texturas gruesas (arenosos o con tasas mínimas de infiltración elevadas) y una “D” a los arcillosos (o con tasas de infiltración finales muy bajas) (Musgrave, 1955). Las situaciones intermedias fueron definidas con las letras “B” y “C”. Esta clasificación de los suelos es lo que

Musgrave denominó como los grupos hidrológicos de suelo y que hoy es una de las variables principales del modelo del número de curva.

Con el paso del tiempo se hizo patente que el SCS necesitaba un método estándar de predicción de la escorrentía superficial que pudiese ser aplicado al amplio territorio nacional (Estados Unidos), basado en el gran número de datos recogidos a lo largo de los años de experimentación. Si bien, hasta la fecha, se habían planteado diversos modelos, estos presentaban algunos problemas de aplicación, en opinión del SCS, a escala nacional; el de Sherman requería trabajar con cuencas aforadas y las pretensiones del SCS era trabajar con no aforadas. La ecuación de Mockus resolvía esta dificultad, pero presentaba el problema de la aplicación de los coeficientes y de los índices fuera de los límites de las zonas para los que habían sido calibrados.

De esta forma, los trabajos de Andrews y Mockus fueron el punto de partida para la ecuación general de la escorrentía superficial del SCS, que se basa en el siguiente postulado: “cuando la escorrentía natural acumulada es enfrentada gráficamente a la lluvia acumulada, la escorrentía comienza después de que se haya acumulado algo de lluvia y la línea de regresión se curva y comienza a ser asintótica a una recta de pendiente 1:1” (Figura 1.1) (Woodward *et al.*, 2002).

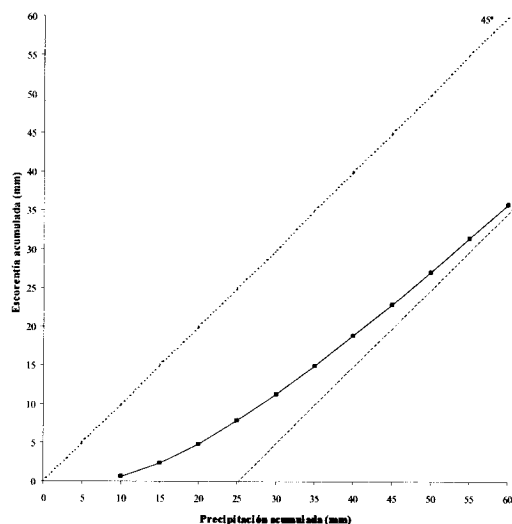


Figura 1.1: Representación gráfica de la relación escorrentía acumulada frente a lluvia acumulada

### 1.2.2. Importancia e interés del modelo del número de curva

A pesar de las críticas y limitaciones que sufre el modelo, es ampliamente incorporado en diversos paquetes informáticos para cálculo de una gran cantidad de cuestiones relacionadas con la escorrentía superficial y el agua en el suelo. Esta circunstancia queda constatada por el hecho de que, aun siendo uno de los modelos más antiguos en hidrología, sea uno de los más estudiados y de los que más revisiones está sufriendo por el organismo responsable de su gestión en Estados Unidos, el *National Resources Conservation Service* (NRCS).

A continuación se señalarán algunos de los principales modelos de cálculo que tienen como base el número de curva.

**TR-20 (1992):** programa informático para la estimación de la escorrentía superficial de un evento y el hidrograma generado en una cuenca, a partir de un hietograma de precipitación, bien sea natural o sintético. El programa calcula la propagación de los caudales a través de las corrientes de agua y de los embalses. A su vez, el programa gestiona los hidrogramas de los tributarios y, por suma de caudales, calcula el caudal de la corriente principal. Los datos básicos del modelo son: área de la cuenca, número de curva y tiempo de concentración de la cuenca. Se utiliza, básicamente, para el cálculo de canalizaciones, embalses de laminación y áreas inundables.

**TR-50 (Urban Hydrology for Small Watersheds) (2003):** programa informático basado en los mismos principios que el TR-20, pero enfocado al cálculo de la escorrentía y de los caudales máximos en pequeñas cuencas urbanas o agrícolas. Su principal uso es el diseño de estructuras hidráulicas de control de la escorrentía producida por una tormenta.

**HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) (2003):** está diseñado para simular los procesos de escorrentía-precipitación de cuencas dendríticas. Puede ser aplicado en una gran variedad de áreas geográficas para solucionar el mayor rango posible de problemas. Esto incluye hidrología para cuencas de grandes ríos, estudios de inundación y cuencas urbanas. Los hidrogramas generados por el programa pueden ser utilizados, en conjunción con otros programas, para los estudios de disponibilidad de agua, diseño de desagües urbanos, estimación de caudales, impacto de futuras transformaciones del territorio, diseño de vertederos de presas, estimación de daños por inundación y estimación de la gestión de sistemas hidráulicos de control y regulación de inundaciones.

**AgNPS (Agricultural-Non Point Source Pollution Model) (2002):** es un modelo distribuido desarrollado por científicos e ingenieros del *Agricultural Research Service (ARS)* de los Estados Unidos. Predice la erosión laminar y en regueros (modelo USLE), así como las tasas de transporte de nutrientes de cuencas agrícolas derivadas de una tormenta real o sintética. El AgNPS está basado en otros modelos como el número de curva (estimación de la escorrentía superficial) y en el CREAMS para predecir los movimientos de nutrientes/pesticidas y las interacciones de éstos con el tamaño de la partícula de suelo.

**SWRRBWQ (Simulator for Water Resources in Rural Basin-Water Quality) (1993):** fue desarrollado para la simulación hidrológica de sedimentación y el transporte de nutrientes y de pesticidas en una cuenca rural de tamaño grande y compleja. El modelo opera para periodos de tiempo y puede predecir el impacto y el efecto de las decisiones de gestión sobre las aguas, los sedimentos y sobre la contaminación por pesticidas, con una exactitud razonable para cuencas rurales no aforadas. El modelo incluye cinco componentes principales: el clima, la hidrología, la sedimentación, los nutrientes y los pesticidas. Los procesos considerados incluyen las pérdidas de la escorrentía superficial, la percolación, la evapotranspiración, la transmisión y almacenamiento del agua, la sedimentación y el crecimiento de las cosechas.

**SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (2002):** herramienta enfocada a predecir el efecto de la gestión de los usos del suelo, las reservas de agua, los acuíferos y los trasvases de agua, sobre los sedimentos y la química del agua en grandes cuencas. Puede analizar cuencas de hasta 26.000 ha, que subdivide en partes homogéneas, usando datos diarios durante periodos de tiempo de 1 a 100 años. El modelo se basa en la ecuación del balance hídrico, a partir de la escorrentía superficial estimada por el número de curva.

**ArccCN-Runoff (2004):** herramienta del sistema de información geográfica ArcGis (ESRI) enfocada a la generación de mapas del número de curva y de escorrentía superficial a partir de los datos de usos del suelo y de tipos de suelos (Zhan y Huang, 2004).

## CAPÍTULO 2: EL MÉTODO DEL NÚMERO DE CURVA

El presente trabajo de investigación no se puede abordar sin un conocimiento amplio del número de curva, por lo que este capítulo se ha dedicado al estudio en profundidad del modelo, desde su concepción original, pasando por el desarrollo detallado de las distintas variables que participan en su estimación, para finalizar realizando un análisis de la sensibilidad del modelo ante las variables de cálculo.

El análisis del método del número de curva se ha dirigido principalmente a la identificación de los aspectos en los que se puede plantear una mejora sustancial.

En el análisis intuitivo del modelo, que se desprende del conocimiento global del mismo, ya se observan algunas carencias en torno a la asignación de los suelos a los distintos grupos hidrológicos y en cuanto a la incidencia que tiene el contenido de humedad del suelo.

Con la realización de un análisis de sensibilidad se aprecian resultados relativamente preocupantes, ya que se demuestra que la escorrentía calculada por el modelo del número de curva es extremadamente sensible a las variaciones de este parámetro. Por tanto, la incertidumbre en la determinación del grupo hidrológico de suelo o de la condición de humedad pueden conducir a errores importantes.

También se indican en este capítulo diversas modificaciones del método del número de curva, principalmente, la adaptación al territorio español que realizó Témez en 1987.

### 2.1. DESARROLLO DEL MODELO

Partiendo de su propia ecuación, Mockus propone que la relación lluvia-escorrentía puede ser desarrollada a partir de la siguiente hipótesis (Baughton, 1989):

$$F / S = Q / P \quad 2.1$$

Donde:  $F$  es el agua retenida durante la tormenta

$S$  es la retención potencial de agua (la máxima posible)

$Q$  es la escorrentía directa

$P$  es la lluvia total o la escorrentía potencial o máxima

Esta primera versión de la ecuación de escorrentía (2.1) no contenía la abstracción inicial ( $I_a$ ), que representa el agua interceptada por la vegetación, el almacenamiento superficial y la infiltración inicial, anterior al inicio de la escorrentía.

Posteriormente Mockus añade dicho término a la ecuación anterior, transformándola en:

$$F/S = Q/P_a \quad 2.2$$

Donde:  $P_a$  es la precipitación efectiva o la fracción de la precipitación que se transforma en escorrentía, por lo que:

$$P_a = P - I_a \quad 2.3$$

El agua retenida durante la tormenta ( $F$ ) es aquella que no se transforma en escorrentía y, por tanto, las relaciones entre las distintas variables del modelo se pueden ver en la Figura 2.1.

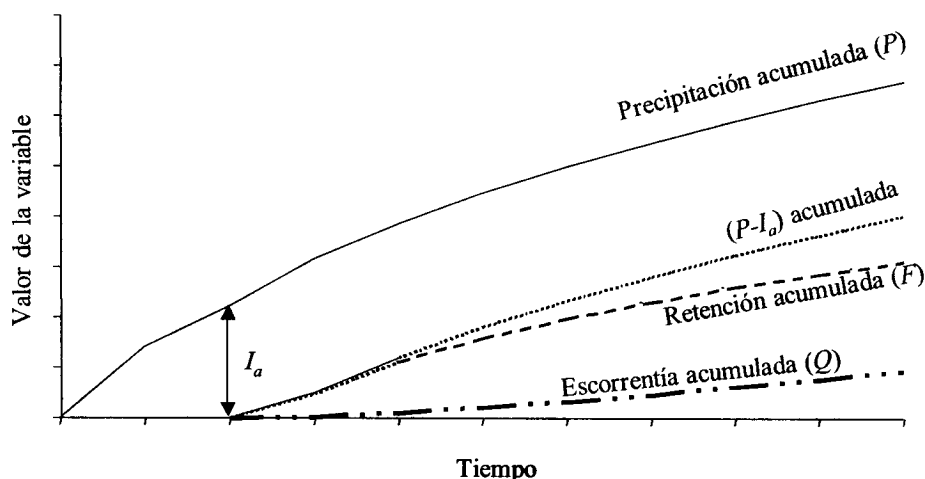


Figura 2.1: Relación entre las variables del modelo

Así, se puede decir que:

$$F = P_a - Q \quad 2.4$$

Por lo que la ecuación de partida (2.1) se puede escribir de la siguiente forma:

$$(P_a - Q)/S = Q/P_a \quad 2.5$$

Despejando  $Q$  y sustituyendo los términos adecuados de la ecuación 2.5, se llega a que la escorrentía se puede expresar como:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad \text{si } P > I_a$$

$$Q = 0 \quad \text{si } P \leq I_a \quad 2.6$$

Con el fin de reducir el número de variables de la fórmula y a partir de los datos recogidos durante 20 años de experimentación, Mockus establece la relación entre la abstracción inicial ( $I_a$ ) y la retención potencial ( $S$ ), de tal forma que  $I_a$  se define como el 20% de  $S$ , quedando la ecuación final como:

$$Q = \frac{(P - 0,2 \cdot S)^2}{P + 0,8 \cdot S} \quad \text{si } P > 0,2 \cdot S$$

$$Q = 0 \quad \text{si } P \leq 0,2 \cdot S$$
2.7

Esta sencilla ecuación únicamente de la precipitación y de la cantidad máxima de agua retenida en el suelo ( $S$ ), que a su vez depende de las características de la cuenca. Para la determinación de  $S$  se utiliza el parámetro adimensional conocido como el número de curva ( $CN$ ), mediante la ecuación 2.8:

$$CN = \frac{1000}{10 + S} \quad ; \quad S = \frac{1000}{CN} - 10$$
2.8

Donde el valor de  $S$  queda expresado en pulgadas.

En el Sistema Internacional, con  $S$  expresada en mm, la relación es:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$
2.9

Por lo que la estimación de la escorrentía podría expresarse como (Ponce y Hawkins, 1996):

$$Q = \frac{R \{ CN [(P/R) + 2] - 200 \}^2}{CN \{ CN [(P/R) - 8] + 800 \}}$$
2.10

Donde  $R$  toma el valor de 1 cuando  $P$  está en pulgadas o el valor de 25,4 cuando está en unidades del Sistema Internacional ( $P$  en mm).

El parámetro del número de curva expresa la capacidad relativa de un suelo para producir escorrentía, al recibir una precipitación, bajo unas condiciones determinadas de usos y de laboreos del suelo. Por lo tanto, en principio, puede variar entre los valores de 0 a 100, tomando el valor de cero para los suelos con poca capacidad de producir escorrentía (suelos altamente permeables en los que toda el agua de lluvia se transforma en infiltración) y el valor de cien para los suelos totalmente impermeables, en los que toda el agua de lluvia se transforma en escorrentía superficial.

Esta interpretación no debe hacer pensar que todo este rango de valores de  $CN$  está disponible; la última revisión realizada por el USDA, no contiene valores del número de curva menores de 30 (Bonznay, 1989).

Mientras que en nuestro país es más conocida la formulación matemática del modelo, en Estados Unidos y en otros países anglosajones es más usual la representación gráfica del número de curva (Figura 2.2).

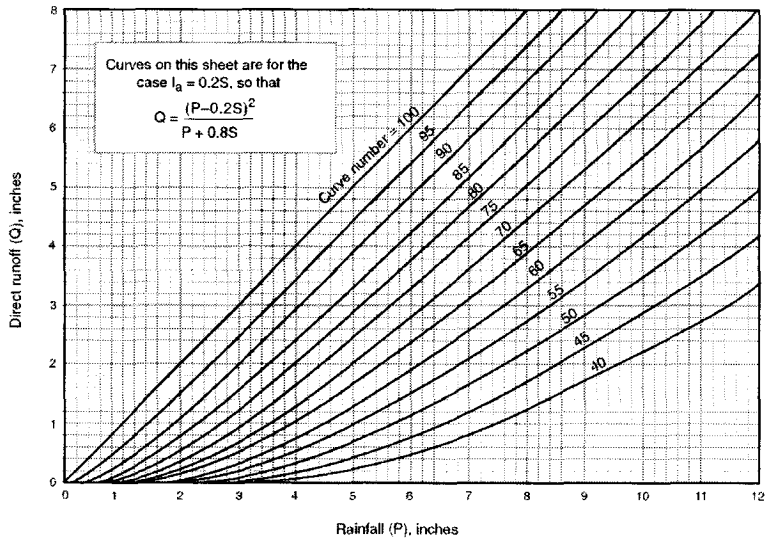


Figura 2.2: Representación gráfica del modelo del número de curva (SCS, 1986)

En el gráfico se puede apreciar que el número de curva puede variar desde 40 hasta 100.

También conviene destacar que la retención potencial ( $S$ ) aumenta exponencialmente a medida que el número de curva disminuye, como se puede ver en la Tabla 2.1 y en la Figura 2.3.

Tabla 2.1: Relación entre el número de curva (CN) y la retención potencial ( $S$ )

CN	S (mm)
30	592,7
35	471,7
40	381,0
45	310,4
50	254,0
55	207,8
60	169,3
65	136,8
70	108,9
75	84,7
80	63,5
85	44,8
90	28,2
95	13,4
100	0,0

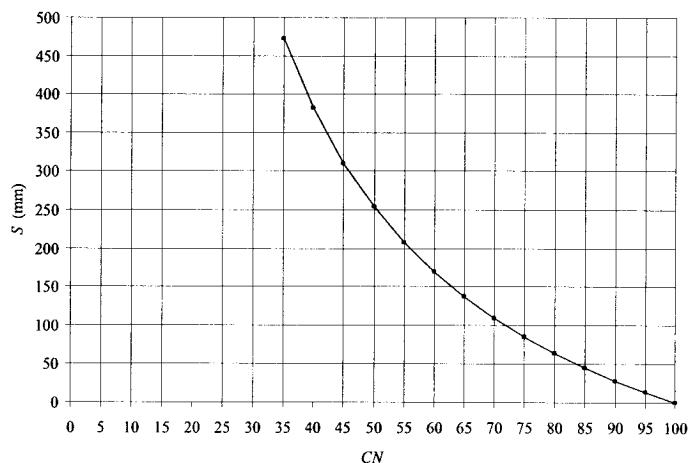


Figura 2.3: Expresión gráfica de la relación entre el número de curva y la retención potencial

El número de curva para cada complejo suelo-cubierta vegetal se estableció a partir del análisis gráfico de la mayor escorrentía anual frente a la lluvia asociada para una cuenca con un solo suelo y una sola cubierta. Cuando se estudiaba más de un lugar con el mismo complejo suelo-cubierta vegetal se estimó el número de curva calculando la media de todos los analizados (Figura 2.4). Finalmente el SCS publicó las tablas en las que se relacionaban los usos del suelo, los grupos hidrológicos de suelos, las prácticas de cultivo y las condiciones hidrológicas.

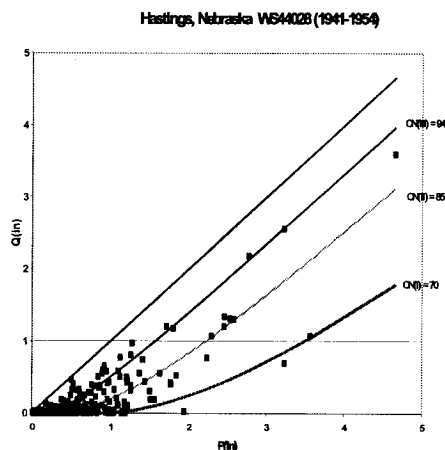


Figura 2.4: Ejemplo de relación precipitación-escorrentía para una cuenca experimental (Van Mullem et al., 2002)

## 2.2. LAS VARIABLES DEL NÚMERO DE CURVA

El cálculo del parámetro de curva tiene en cuenta los efectos de diversos factores como: el uso del suelo, el tipo de terreno, las condiciones hidrológicas, las prácticas de cultivo y las condiciones previas de humedad de suelo. A continuación se describen cada uno de estos factores.

### 2.2.1. Variable “uso del suelo”

El SCS agrupa los usos del suelo en grandes grupos: agrícola, pastizal, forestal y urbano, adaptados a las áreas estudiadas en Estados Unidos, y que en ocasiones presentan dificultades de ajuste a otros ámbitos o a otros territorios. Dichos grupos se definen como:

#### 2.2.1.1. Áreas cultivadas

**Barbecho:** tierras agrícolas que se mantienen sin vegetación con el fin de conservar el contenido de humedad lo más alto posible, para posteriormente ser cultivadas. Las pérdidas de agua por el incremento de la escorrentía son despreciables frente a la ganancia que produce la reducción de la transpiración vegetal. Otras clases de barbechos pueden ser estimadas por comparación con otros de los usos del suelo tabulados (NRCS, 2002).

**Cultivos en hileras:** cualquier cultivo (maíz, sorgo, soja, remolacha, tomates, tulipanes) plantado en filas lo suficientemente alejadas para que la mayor parte de la superficie del terreno quede expuesta al impacto de la lluvia a lo largo de toda la estación de crecimiento. Durante la plantación, el cultivo es equivalente al barbecho, lo mismo que después de la recolección o cosecha (NRCS, 2002).

**Cultivos de grano pequeño:** (trigo, avena, cebada, fibra de lino) cultivos plantados en filas lo suficientemente cercanas para permitir que la superficie del terreno no esté al descubierto, excepto durante la plantación y poco tiempo después (NRCS, 2002).

**Cultivos de leguminosas o cultivos de rotación gramíneas-leguminosas:** (alfalfa, trébol y rotaciones) ya sea plantado en hileras cercanas o a voleo. Esta cubierta puede permanecer más de un año con el fin de dar protección al terreno (NRCS, 2002).

#### 2.2.1.2. Pastizales

**Pastos o pastizal:** terreno dedicado a la producción de hierba con el fin de que el ganado pade en él.

**Pradera:** es un campo en el cual la hierba está continuamente creciendo, acotada al pastoreo y, generalmente, segada para henificarla. Los prados a los que se practica un drenaje presentan poca o nula capacidad de producir escorrentía, excepto durante las tormentas intensas; por contra, los prados no drenados artificialmente (con capas freáticas altas) pueden estar tan encharcados que se comporten de forma equivalente a una superficie de agua en la generación de escorrentía. Por lo tanto, la acción antrópica sobre este uso puede hacer variar de forma sustancial el número de curva (NRCS, 2002).

**Matorral con vegetación herbácea:** combinación de matorrales con malas hierbas o con pasto pobre.

#### 2.2.1.3. Bosques y superficies forestales

**Mezcla de árboles con hierba:** mezcla de árboles con pasto en una proporción del 50%. Otras combinaciones de mezclas se pueden estimar interpolando el número de curva entre los usos del suelo referente a arboledas y a pastizales (SCS, 1986).

**Pequeñas arboledas:** pequeñas manchas de árboles que crecen cerca de las granjas para su propio uso (NRCS, 2002).

**Superficies forestales:** cuando las masas de árboles se desarrollen sobre superficies extensas, el NRCS recomienda utilizar la guía propuesta en 1954 por el “*Forest Service and the Soil Conservation Service crops*” (NRCS, 2002). Dicha metodología distingue entre las masas comerciales y productivas del este de Estados Unidos y los espacios forestales del oeste del país. En las regiones forestales húmedas del este, el grupo de suelo, el tipo de humus y la profundidad son los principales factores usados en la determinación del número de curva; mientras que en las regiones del oeste, el grupo de suelo, el tipo de vegetación y su densidad son los factores principales usados en la determinación.

Para las masas forestales del este del país (con carácter más húmedo), la variable que determina el número de curva es la condición hidrológica del bosque y el desarrollo del horizonte húmico. Mientras que para las masas del oeste (áreas áridas y semiáridas), se hace distinción entre distintos ecosistemas, como:

- **Áreas con matorral desértico:** formaciones mixtas de matorral desértico y herbazales, con el matorral como elemento predominante. Algunas de las plantas típicas son: mesquite (*Prosopis glandulosa*), creosota (*Larrea divaricata*, *Larrea tridentata*), yuca (*Yuca sp.*) y artemisia (*Artemisia tridentata*). Se localizan en las zonas bajas de las áreas áridas y semiáridas (SCS, 1972; en Wood, 1984). Desde el punto de vista climático son zonas con precipitaciones entre los 50 a 150 mm y con temperaturas extremas tanto en verano como en invierno (más de 40° C en verano, mientras que en invierno desciende hasta los -10° C).
- **Herbáceas:** mezclas de hierba-malas hierbas-matorral, pero con el matorral como elemento minoritario. Las plantas típicas son: distintas especies de gramas (*Bouteloua gracilis*, *Bouteloua eripoda*, *Bouteloua curtipendula*, etc.), tobosa (*Hilaria mutica*), *Gutierrezia sarothrae* G. *Microcephala*, distintas especies de artemisias (*Artemisia tridentata*, *A. ludoviciana*, *A. filifolia*) y distintas especies de atriplex (*Atriplex reptans*, *A. canescens*). Localizándose en las zonas bajas de las áreas áridas y semiáridas (SCS, 1972; en Wood, 1984). Climatológicamente se trata de zonas con los mismos parámetros que el tipo anterior.
- **Matorrales de montaña:** mezclas de matorrales de montaña, como algunas quercíneas de pequeña talla (*Quercus gambelli*), otros matorrales subarbustivos (*Cercocarpus ledifolius*, *Cercocarpus montanus*, *Fallugia paradoxa*, *Chrysothamnus nauseosus*, *Rhus trilobata*) y distintas especies de rosáceas (*Purshia sp.*). Por lo general son arbustos de montaña, típicos de elevaciones intermedias con precipitaciones mayores que las zonas de matorral y de herbazal desértico (SCS, 1972; en Wood, 1984). Localizándose en áreas en las que las precipitaciones sobrepasan los 150 mm e, incluso, alcanzan los 500 mm, con unas temperaturas de frías a cálidas.
- **Sabinar-herbazal:** estas áreas son mezclas, en cantidades variables, de distintas especies de enebros y sabinas (*Juniperus osteosperma*, *J. occidentales*), de pinos (*Pinus edulis*, *P. monophylla*) y hierba. La cobertura herbácea es más densa que en los herbazales desérticos, debido principalmente a la mayor precipitación. La combinación sabina-herbazal es típica de las faldas de las montañas y de las mesetas con elevaciones intermedias (SCS, 1972; en Wood, 1984).
- **Pinares:** masas de *Pinus ponderosa*, típicas de zonas con elevada altitud donde el principal uso es el maderero (SCS, 1972; en Wood, 1984). La precipitación en esta zonas está comprendida entre los 300 mm y los 500 mm.

La adaptación de estas áreas naturales a las condiciones climáticas españolas es compleja; Oria de Rueda (Martínez de Azagra *et al.*, 1996) propone las siguientes correlaciones entre los ecosistemas desérticos americanos y los peninsulares:

Tabla 2.2: Adaptación de los ecosistemas áridos americanos a los españoles (Martínez de Azagra *et al.*, 1996)

Árido americano	Árido español
Herbáceas	Herbazales de <i>Brachypodium retusum</i> con algo de matorral subdesértico
Matorrales de montaña	Coscojar, monte bajo de rebollo (aunque en condiciones de mayor sequedad). Matorrales de <i>Rhamnus lycioides</i>
Pinares, sabinas o mezcla de ambos	Sabinas claras de <i>Juniperus thurifera</i> con <i>Pinus nigra</i> dispersos Sabinas de <i>Juniperus phoenicia</i> con <i>Pinus halepensis</i>
Matorral desértico	Vegetación del semiárido murciano y almeriense
Artemisia con algo de hierba	Formaciones con <i>Artemisia herba-alba</i> y <i>A. campestris</i>

#### 2.2.1.4. Áreas urbanas

**Granjas:** edificaciones, caminos, accesos y zonas aledañas a las construcciones.

**Áreas urbanas completamente desarrolladas:** en esta categoría se incluyen las estructuras urbanas típicas.

**Áreas abiertas:** Céspedes, jardines, campos de golf.

**Áreas impermeables:** aparcamientos, azoteas, carreteras, calles, caminos.

**Zonas ajardinadas xerófitas:** zonas permeables y zonas no permeables como barreras anti-malas hierbas, zonas con arbustos xerofíticos con mulch de arena y grava.

**Zonas urbanas:** Centros comerciales, de negocios e industriales.

**Zonas residenciales**

**Las áreas recién explanadas:** sólo permeables, sin vegetación.

#### 2.2.2. Variable “prácticas de cultivo”

Las distintas prácticas de cultivo se aplican principalmente a las áreas de carácter agrícola, incluyéndose preparaciones mecánicas, como los cultivos a nivel y las terrazas, algunas otras prácticas de gestión tales como el pastoreo o la rotación de cultivos. Las técnicas tenidas en cuenta son las siguientes:

**Cultivo según máxima pendiente (SR):** cuando los cultivos en hilera se realizan siguiendo las líneas de máxima pendiente de la ladera. Si la pendiente es inferior a un 2%, aunque la tierra se cultive de esta forma, el efecto es análogo al del cultivo según curvas de nivel (NRCS, 2002).

**Cultivo según curvas de nivel (C):** cuando las labores de cultivo se efectúan siguiendo ,en la medida de lo posible, las curvas de nivel. Los datos facilitados por las tablas

del número de curva están basados en los datos experimentales para cuencas con pendientes entre 3% y el 8% (NRCS, 2002). El cultivo en fajas es una práctica que no se refleja en las tablas, puesto que es una combinación de dos situaciones de uso del suelo y de práctica de cultivo, ya reflejadas en las tablas.

**Cultivo en terrazas (T):** si los cultivos se realizan sobre terrenos abancalados.

**Gestión de los residuos (CR):** cuando se efectúa un manejo de los residuos de los propios cultivos, dejando parte de los restos vegetales sobre la superficie del suelo.

### 2.2.3. Variable “condición hidrológica”

Este parámetro indica los efectos del tipo de cubierta y de su tratamiento sobre la infiltración y la escorrentía. Generalmente es estimada a través de la densidad de la planta que cubre el suelo o de los residuos acumulados sobre él. Algunos factores a considerar en la estimación del efecto de la cubierta en la infiltración y en la escorrentía son (SCS, 1986):

- La fracción de cabida cubierta o densidad de céspedes, cultivos u otras áreas cubiertas por vegetales
- La cantidad de suelo cubierto a lo largo del año
- Las rotaciones de cultivo entre leguminosas y gramíneas
- El porcentaje de suelo cubierto de residuo
- El grado de rugosidad superficial del suelo

A continuación se describe la metodología propuesta para la valoración de la condición hidrológica para cada uso del suelo:

#### 2.2.3.1. Condición hidrológica para las áreas cultivadas

Para los cultivos agrícolas la condición hidrológica se determina teniendo en cuenta cómo los factores anteriores afectan a la infiltración. Se habla de “condición hidrológica pobre” cuando existan sobre el suelo factores que reducen las tasas de infiltración y aumenten la escorrentía. La “condición hidrológica buena” se observa cuando los factores antes mencionados tiendan a mejorar la infiltración del agua en el suelo.

#### 2.2.3.2. Condición hidrológica para los pastizales

**Pastos o pastizal:** la condición hidrológica se puede estimar a través de la densidad del pasto y de la carga ganadera, como se muestra en la Tabla 2.3:

Tabla 2.3: Condición hidrológica del pasto en función de la carga ganadera (NRCS, 2002)

Condición vegetal	Condición hidrológica
Fuertemente pastada (sin residuos sobre el suelo, las plantas cubren menos del 50%)	Pobre
No fuertemente pastada (las plantas cubren de un 50% a un 75 % de la superficie)	Regular
Ligeramente pastada (las plantas cubren más del 75 % de la superficie del suelo)	Buena

Otra posibilidad para obtener la condición hidrológica de los pastos es a través del peso seco de las plantas y de los residuos del pastadero (Tabla 2.4):

Tabla 2.4: Condición hidrológica de los pastizales en función del peso seco de materia (NRCS, 2002)

Fracción de cabida cubierta (%)	Peso seco de plantas y residuos (tn/ha)		
	< 1,23	1,23 a 3,71	> 3,71
< 50	Pobre	Pobre <sup>+</sup>	Regular
50 - 75	Pobre <sup>+</sup>	Regular	Regular
> 75	Regular	Regular	Buena

<sup>+</sup> Las condiciones con este signo son intermedias a las adyacentes y su número de curva debe ser calculado por interpolación entre las distintas condiciones hidrológicas implicadas.

**Matorral con vegetación herbácea:** la condición hidrológica se estima a partir de la fracción de cabida cubierta del suelo (SCS, 1986), como se muestra en la Tabla 2.5:

Tabla 2.5: Condición hidrológica para los matorrales con algo de herbáceas (SCS, 1986)

Fracción de cabida cubierta del suelo (%)	Condición hidrológica
< 50	Pobre
50 - 75	Regular
> 75	Buena

### 2.2.3.3. Condición hidrológica de bosques y superficies forestales

**Mezcla de árboles con hierba:** la condición hidrológica para esta cubierta del suelo se estima en función de la fracción de cabida cubierta, de forma análoga a los datos mostrados en la Tabla 2.5

**Pequeñas arboledas:** la condición hidrológica se estima en función del tratamiento que se da a la superficie del suelo o de las condiciones en las que vegetan los árboles. Las indicaciones que ofrece el Servicio Americano de Conservación de Suelos se muestran en la Tabla 2.6 (NRCS, 2002):

Tabla 2.6: Condición hidrológica de pequeñas arboledas (NRCS, 2002)

Tratamiento de la superficie	Condición hidrológica
Lugares altamente pastados o regularmente quemados. Los residuos vegetales, los árboles pequeños y los arbustos son destruidos	Pobre
Zonas pastadas, pero no quemadas. Algunos residuos sobre la superficie, pero los árboles están sin protección	Regular
Acotado al pastoreo. Los residuos y los matorrales cubren el suelo	Buena

**Superficies forestales:** como ya se ha mencionado anteriormente, el SCS hace una distinción entre los espacios forestales del este y los del oeste de EEUU.

**Masas del este:** en las regiones húmedas del este la condición hidrológica del suelo depende principalmente del humus que exista sobre el suelo y del tipo de humus que se genere, por lo que la determinación de la condición hidrológica para estas coberturas debe hacerse a través del ábaco que propone el SCS y que se muestra en la Figura 2.5:

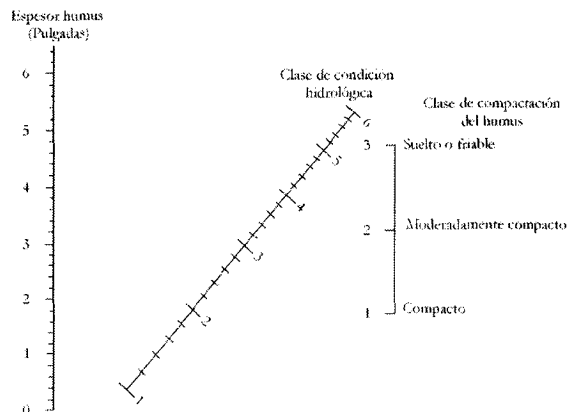


Figura 2.5: Ábaco para la determinación de la condición hidrológica del suelo para las masas forestales del este de EEUU (modificado de NRCS, 1972)

El manejo del ábaco es muy sencillo. Se parte de los datos del espesor de humus (en pulgadas) que hay sobre el suelo, teniendo en cuenta que si la cantidad de residuos orgánicos (acículas, ramillas, hojarasca, etc.) que protegen al horizonte húmico es inferior a 13 mm, se ha de considerar que el humus está desprotegido y, por tanto, la condición hidrológica resultante ha de ser reducida a la mitad. La clase de compactación del humus depende del tipo de este, como se puede ver en la Tabla 2.7:

Tabla 2.7: Clases de humus y su relación con su compactación

Grado de compactación	Tipo de humus	
	Mull	Mor
1 Compacto	Humus firme	Humus afieltrado
2 Moderadamente compacto	De firme a otros	De afieltrado a otros
3 Suelto o friable	Distinto de firme	Distinto de afieltrado

El tipo de humus mull o humus elaborado es el que corresponde a la degradación de la materia orgánica sobre suelos donde la actividad biológica es intensa y la descomposición es rápida, originándose una mezcla íntima entre los productos de la descomposición de la materia orgánica y los materiales del suelo mineral. Este tipo de humus produce grumos estables, dando al suelo buena estructura y resistencia a la erosión. El humus mor o humus bruto son productos resultantes de la degradación de la materia orgánica en condiciones de baja actividad biológica; su capacidad estabilizadora de la estructura del suelo es mucho menor.

**Masas del oeste:** en este caso la condición hidrológica del suelo se estima a través del porcentaje de suelo cubierto por los residuos de las plantas o por la hierba.

#### 2.2.4. Variable “grupo hidrológico de suelo”

Un grupo hidrológico de suelo se define como el conjunto de suelos que se pueden agrupar en una misma categoría por poseer una capacidad similar de producir escorrentía, bajo análogas condiciones de precipitación y de cobertura vegetal, teniendo en cuenta que las propiedades del suelo que influyen en la capacidad de producir escorrentía son aquellas que afectan a la tasa mínima de infiltración, para un suelo desnudo después de una humectación prolongada y cuando el suelo no presenta congelación (NRCS, 2002).

En un principio, las propiedades del suelo que afectan a la infiltración son sus propiedades físicas primarias, como la textura y la profundidad de los horizontes moderadamente permeables (Musgrave, 1955), por lo que se puede decir que un grupo hidrológico de suelo es un conjunto de suelos que presentan características físicas tales que hacen que todos ellos presenten tasas de infiltración similares después de un periodo prolongado de humectación y siempre que el suelo esté desnudo y no se llegue a helar.

La primera definición de los grupos hidrológicos que planteó Musgrave es la siguiente (Musgrave, 1955):

**Grupo A:** Incluye las arenas profundas muy permeables y los agregados limosos procedentes de las deposiciones atmosféricas que tengan poca arcilla y coloides, siempre que el limo tenga suficiente materia orgánica para realizar una buena agregación.

**Grupo B:** Incluye suelos arenosos y franco-limosos de moderada profundidad y con tasas de infiltración mínimas por encima de la media, comprendidas entre las 0,15 y las 0,30 pulgadas/h (3,81 mm/h a 7,62 mm/h).

**Grupo C:** Incluye suelos poco profundos de todas las clases texturales; con tasas mínimas de infiltración por debajo de la media, comprendidas entre 0,05 y 0,15 pulgadas/h (1,27 mm/h a 3,81 mm/h).

**Grupo D:** Incluye suelos con altas tasas de expansión en la superficie o en la subsuperficie, a causa de su alto contenido en arcillas o coloides; presentan tasas de infiltración mínimas, aproximadamente de 0,05 pulgadas/h (1,27 mm/h).

Mientras que en el “*soil survey manual*” (Soil Survey Division Staff, 1993) los grupos hidrológicos se definen como:

**Grupo A:** Suelos con conductividad hidráulica saturada muy alta o por encima de la media de las altas, y con la capa freática muy profunda.

**Grupo B:** Suelos con conductividad hidráulica saturada por debajo de la media de las altas o por encima de la media de las moderadamente altas, y en los que la capa freática está profunda o muy profunda.

**Grupo C:** Suelos con conductividad hidráulica saturada por debajo de la media de las moderadamente altas o por encima de la media de las moderadamente bajas, y en los que la capa freática está más profunda que somera.

**Grupo D:** Suelos con conductividad hidráulica saturada por debajo de la media de las moderadamente bajas y/o en los que la capa freática está poco profunda o muy somera de forma transitoria a permanentemente.

Esta última clasificación se basa en el supuesto de que la mínima conductividad hidráulica ocurre en los 0,5 m superiores del perfil edáfico. Si el mínimo ocurre entre los 0,5 y 1 m de profundidad, el grupo hidrológico debe ser aumentado en una categoría, siempre que la conductividad entre 0 y 0,5 m corresponda a una categoría superior. Los mínimos por debajo de 1 m de profundidad no se tienen en cuenta.

A algunos terrenos se les asignaba el grupo D por tener una capa freática alta que crea problemas de drenaje, pero una vez que estos terrenos son avenados eficazmente pueden ser clasificados en un grupo diferente (SCS, 1986). Para solventar esta circunstancia se han creado tres grupos hidrológicos duales (A/D, B/C, C/D), en los que la primera letra hace referencia al

comportamiento de los suelos con drenajes y la segunda letra al comportamiento sin avenamiento.

La clasificación de los suelos en estas siete categorías es ambigua pues, como se puede ver, básicamente es una tipificación cualitativa que depende de la interpretación que realice quien clasifica el suelo. Por ello, suelos con propiedades físicas e hidrológicas similares pueden ser clasificados en grupos distintos (Nielsen y Hjelmfelt, 1998).

En capítulos próximos de este trabajo se intentará reducir la subjetividad de la asignación de los grupos hidrológicos de suelo.

### **2.2.5. Variable “condición antecedente de humedad”**

Como ya se ha mencionado, el modelo del número de curva trabaja con datos medios; los valores de los números de curva asociados a cada complejo suelo-cubierta vegetal han sido estimados como valores medios de todos los observados en las experiencias. Por lo tanto, hay lugar a que se presenten variaciones del parámetro para un mismo complejo suelo-cubierta vegetal en una misma cuenca (Ponce y Hawkins, 1996).

Estas posibles variaciones del número de curva están atribuidas a distintas variables del ciclo hidrológico difíciles de cuantificar y que no se tuvieron en cuenta en el planteamiento del modelo, pero que afectan a la infiltración del agua en el suelo; serían: la intensidad de la tormenta, la temperatura, el tiempo de concentración, la evapotranspiración y la humedad del suelo (Rallison y Miller, 1982).

La variable humedad del suelo sí trató de incorporarse al modelo a través del parámetro “condición antecedente de humedad” (AMC).

Los números de curva expresados en las tablas corresponden a la mediana de los valores observados para unas condiciones determinadas de suelo y cobertura vegetal; son por tanto valores próximos a la escorrentía media que produce una cuenca ante una precipitación. Por extensión, ese estadístico se ha utilizado para estimar el estado antecedente de humedad del suelo, considerando que el percentil 50 de las distintas situaciones de humedad edáfica antes de una tormenta será el que origine el valor del número de curva (Miller y Cronshey 1989). Esta situación se conoce como la condición antecedente de humedad II (AMC II).

Se establecen otras dos AMC, que corresponden con la envolvente inferior (condición I) y con la superior (condición III) de los valores observados. Dichas condiciones, por extensión del significado dado a la AMC II, corresponderían con el suelo seco (AMC I) y con el suelo húmedo (AMC III).

En un principio la relación entre la envolvente inferior y superior del número de curva se mostró en forma tabular (Tabla 2.8).

Tabla 2.8: Relación tabular entre las condiciones antecedentes de humedad (NRCS, 2002)

Condición I	Condición II	Condición III	Condición I	Condición II	Condición III
100	100	100	55	74	88
97	99	100	54	73	87
94	98	99	53	72	86
91	97	99	52	71	86
89	96	99	51	70	85
87	95	98	50	69	84
85	94	98	48	68	84
83	93	98	47	67	83
81	92	97	46	66	82
80	91	97	45	65	82
78	90	96	44	64	81
76	89	96	43	63	80
75	88	95	42	62	79
73	87	95	41	61	78
72	86	94	40	60	78
70	85	94	39	59	77
68	84	93	38	58	76
67	83	93	35	55	74
66	82	92	30	51	70
64	81	92	35	49	69
63	80	91	28	47	67
62	79	91	21	39	59
60	78	90	18	35	55
59	77	89	15	30	50
58	76	89	12	25	43
57	75	88			

Sobhami y Hawkins (1975; en Ponce y Miller, 1996) establecieron la relación matemática entre las condiciones antecedentes de humedad para valores del número de curva comprendidos entre 50 y 95, mediante las ecuaciones 2.11 y 2.12:

$$CN_I = \frac{CN_{II}}{2,281 - 0,01281 \cdot CN_{II}} \quad \text{con } r^2 = 0,996 \quad 2.11$$

$$CN_{III} = \frac{CN_{II}}{0,427 + 0,00573 \cdot CN_{II}} \quad \text{con } r^2 = 0,994 \quad 2.12$$

Donde:  $CN_I$ ,  $CN_{II}$  y  $CN_{III}$  son los números de curva de las correspondientes condiciones antecedentes de humedad.

Para la determinación de la condición antecedente de humedad, el SCS desarrolló una tabla en función de la precipitación acumulada en los cinco días previos al momento de estudio y de la actividad vegetativa (Tabla 2.9). Dicha tabla, en las últimas revisiones del método del número de curva, ha sido desestimada (Ponce y Miller, 1996; Hjelmfelt, 2001), puesto que está confeccionada para una localización desconocida (Miller y Cronshey, 1989) y no puede ser aplicada de forma genérica a otros lugares, como se venía haciendo.

Tabla 2.9: Tabla para la determinación de la condición antecedente de humedad en función de la precipitación acumulada en los cinco días previos

Condición antecedente de humedad	Periodo de reposo vegetativo (mm)	Periodo vegetativo (mm)
I	< 13	< 36
II	13 a 28	36 a 54
III	> 28	>54

Analizando la Tabla 2.8, Hjermfelt *et al.* (1982), estimaron que la condición I representaba el 10% de la probabilidad acumulada de que una escorrentía determinada se produzca ante un evento de precipitación concreto, mientras que las condiciones II y III representarían, respectivamente, la probabilidad del 50% y del 90%. Por tanto la condición II constituye la tendencia central y las condiciones I y III simbolizan la dispersión de los datos con los que han sido calculados los número de curva (Ponce y Hawkins, 1996).

Para otros autores, esta dispersión de los datos tendría una correlación con los periodos de retorno de las precipitaciones que generan las distintas escorrentías. Así, en algunos lugares se estima que la condición I corresponde con periodos de retorno de 1, 2 y 5 años, la condición II para 10, 25 y 50 años, mientras que la III es para 100 años (Ponce y Hawkins, 1996).

La determinación de la AMC es, al día de hoy, una de las más complejas, pues no hay un criterio fijo y fiable; lo único que se puede decir es que la condición II representa la situación media y típica de un suelo, mientras que las condiciones I y III representarían aquellas en las que, para una misma tormenta, la cuenca sería capaz de producir menos o más escorrentía, respectivamente, que en las condiciones medias.

## 2.3. VALORES DEL NÚMERO DE CURVA

Una vez explicadas las variables que intervienen en la determinación del número de curva, a continuación se muestran las tablas y figuras publicadas por los organismos competentes (NRCS, 2002 y SCS, 1986):

Tabla 2.10: Números de curva para los cultivos agrícolas

Descripción del uso			Grupo hidrológico de suelo			
Uso del suelo	Prácticas de cultivo	Condición hidrológica	A	B	C	D
Barbecho	Suelo desnudo	-	77	86	91	94
	Suelo cubierto de residuos *	Pobre	76	85	90	93
		Buena	74	83	88	90
Cultivo en hileras	Según máxima pendiente	Pobre	72	81	88	91
		Buena	67	78	85	89
	Máxima pendiente + cubierto de residuos	Pobre	71	80	87	90
		Buena	64	75	82	85
	Según curva de nivel	Pobre	70	79	84	88
		Buena	65	75	82	86
	Curva de nivel + cubierto de residuos	Pobre	69	78	83	87
		Buena	64	74	81	85
	Según curva de nivel y aterrazado	Pobre	66	74	80	82
		Buena	62	71	78	81
	Según curva de nivel y aterrazado + cubierto de residuos	Pobre	65	73	79	81
		Buena	61	70	77	80
Cultivo de grano pequeño	Según máxima pendiente	Pobre	65	76	84	88
		Buena	63	75	83	87
	Máxima pendiente + cubierto de residuos	Pobre	64	75	83	86
		Buena	60	72	80	84
	Según curva de nivel	Pobre	63	74	82	85
		Buena	61	73	81	84
	Curva de nivel + cubierto de residuos	Pobre	62	73	81	84
		Buena	60	72	80	83
	Según curva de nivel y aterrazado	Pobre	61	72	79	82
		Buena	59	70	78	81
	Según curva de nivel y aterrazado + cubierto de residuos	Pobre	60	71	78	81
		Buena	58	69	77	80
Cultivo de leguminosas o rotaciones de leguminosas-gramíneas	Según máxima pendiente	Pobre	66	77	85	89
		Buena	58	72	81	85
	Según curva de nivel	Pobre	64	75	83	85
		Buena	55	69	78	83
	Según curva de nivel y aterrazado	Pobre	63	73	80	83
		Buena	51	67	76	80

\* Los residuos cubren al menos el 5% de superficie a lo largo del año

Tabla 2.11: Números de curva para pastizales y arboledas.

Descripción de uso		Grupo hidrológico de suelo			
Uso de suelo	Condición hidrológica	A	B	C	D
Pastos o pastizales	Pobre	68	79	89	89
	Regular	49	69	79	84
	Buena	39	61	74	80
Praderas	-	30	58	71	78
Matorral con vegetación herbácea	Pobre	48	67	77	83
	Regular	35	56	70	77
	Buena	30	48	65	73
Mezcla de árboles con hierba	Pobre	57	73	82	86
	Regular	43	65	76	82
	Buena	32	58	72	79
Pequeñas arboledas	Pobre	45	66	77	83
	Regular	36	60	73	79
	Buena	30	55	70	77
Granjas, edificaciones y caminos	-	59	74	82	86

Tabla 2.12: Números de curva para zonas urbanas

Descripción de uso		Grupo hidrológico de suelo				
Uso de suelo	Condición hidrológica	% medio área impermeable	A	B	C	D
<b>Áreas urbanas completamente desarrolladas</b>						
	Pobre		68	79	86	89
	Media		49	69	79	84
	Buena		39	61	74	80
<b>Áreas impermeables</b>						
Aparcamientos, azoteas, carreteras			98	98	98	98
<b>Calles y carreteras</b>						
Pavimentadas; cunetas y red de saneamiento			98	98	98	98
Pavimentadas; cunetas abiertas			83	89	92	93
Grava			76	85	89	91
Sucias			72	82	87	89
<b>Zonas ajardinadas xerófitas</b>						
Zonas naturales (sólo permeables)			63	77	85	88
Zonas ajardinadas (incluidas zonas impermeables)			96	96	96	96
<b>Zonas urbanas</b>						
Centros comerciales y de negocios		85%	89	92	94	95
Industrial		72%	81	88	91	93
<b>Zonas residenciales</b>						
1/8 acre (0,05 ha) o menos (2 casas)		65%	77	85	90	92
1/4 acre (0,10 ha)		38%	61	75	83	87
1/3 acre (0,13 ha)		30%	57	72	81	86
1/2 acre (0,20 ha)		25%	54	70	80	85
1 acre (0,40ha)		30%	51	68	79	84
2 acres (0,81 ha)		12%	46	65	77	82
<b>Áreas urbanas en desarrollo</b>						
Explanaciones (zonas permeables, sin vegetación)			77	86	91	94

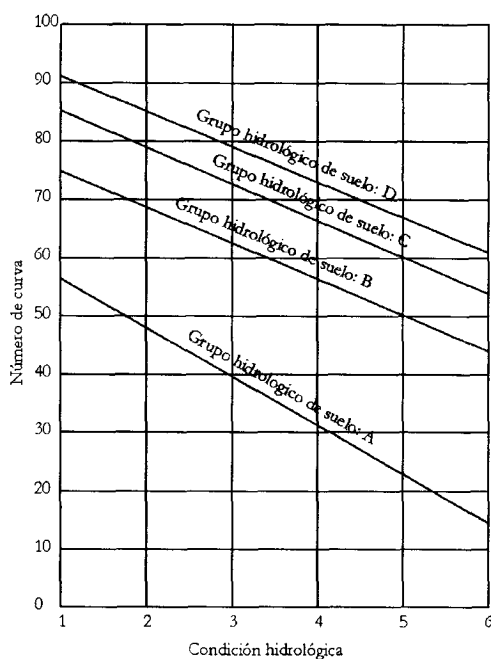


Figura 2.6: Ábaco de cálculo del número de curva en función de la condición hidrológica del suelo para masas forestales del este de los EE.UU.

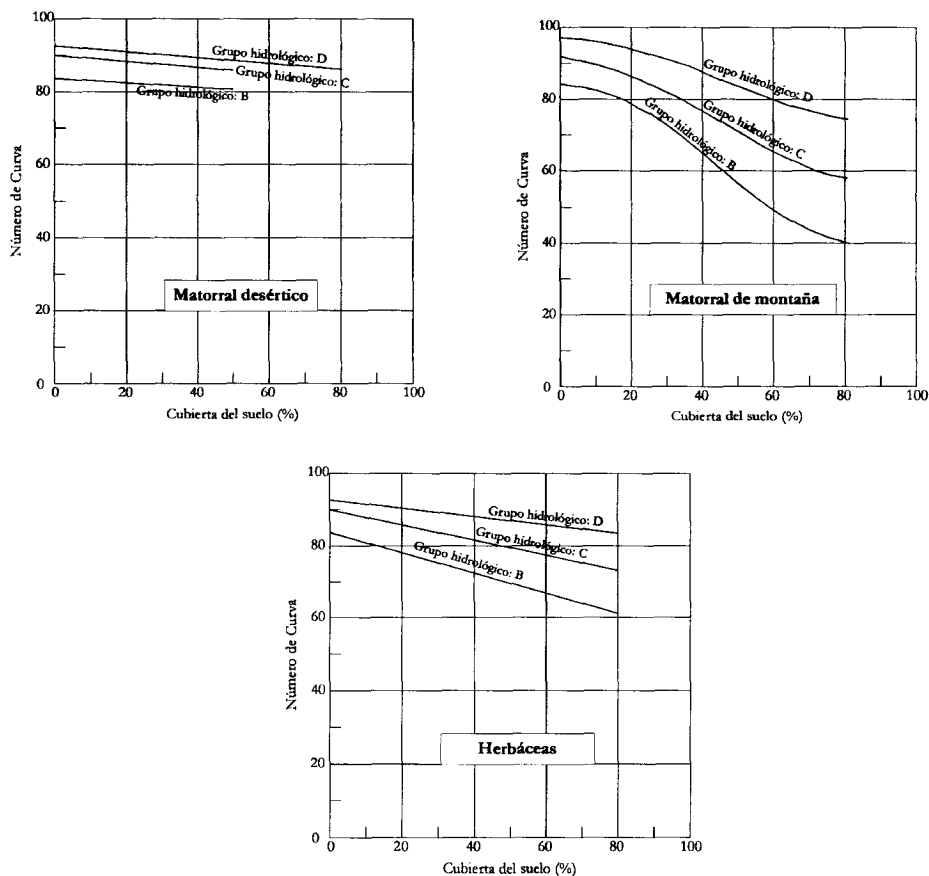


Figura 2.7: Ábacos para la determinación del número de curva en la zona oeste de los EE.UU. Áreas áridas y semiáridas de matorrales y herbáceas (SCS, 1972; en Wood, 1984)

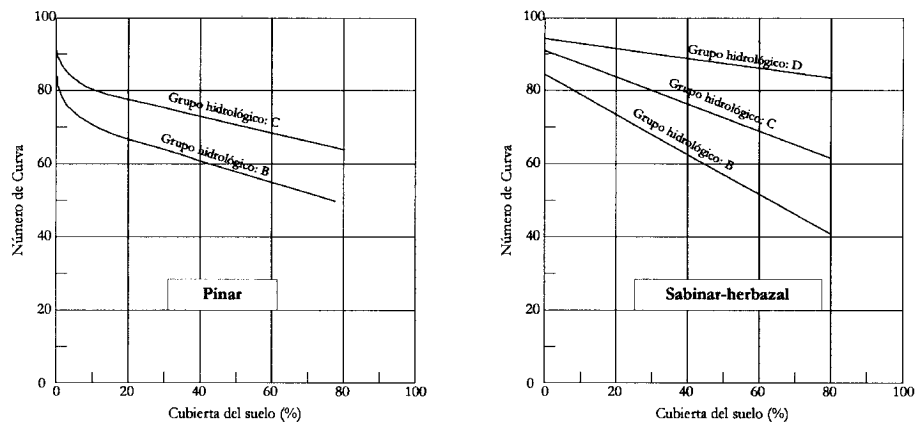


Figura 2.8: Ábacos para la determinación del número de curva en la zona oeste de los EE.UU. Áreas áridas y semiáridas con arbolado (SCS, 1972; en Wood, 1984)

En 1986 el SCS publicó una tabla para la determinación del número de curva en las zonas áridas y semiáridas del país:

Tabla 2.13: Tabla para la determinación del número de curva en zonas áridas y semiáridas (SCS, 1986)

Descripción del uso	Condición hidrológica <sup>1</sup>	Grupo hidrológico de suelo			
		A	B	C	D
Herbáceas con algo de matorral	Pobre		80	87	93
	Regular		71	81	89
	Buena		62	74	85
Mezclas de matorral de montaña	Pobre		66	74	79
	Regular		48	57	63
	Buena		30	41	48
Sabinar-Pinar o mezcla	Pobre		75	85	89
	Regular		58	73	80
	Buena		41	61	71
Artemisia con algo de hierba	Pobre		67	80	85
	Regular		51	63	70
	Buena		35	47	55
Matorral desértico	Pobre	63	77	85	88
	Regular	55	72	81	86
	Buena	49	68	79	84

<sup>1</sup> Pobre: < 30 % del terreno cubierto  
 Regular: 30 al 70 % del terreno cubierto  
 Buena: > 70% de terreno cubierto

## 2.4. LA SENSIBILIDAD DEL MODELO Y DE SUS VARIABLES

A continuación se realizará un análisis de sensibilidad del modelo del número de curva, tanto de la influencia del propio número de curva sobre la función de transformación de precipitación en escorrentía, como de la repercusión que tienen las variaciones de las variables que determinan el número de curva de un lugar.

### 2.4.1. Análisis de sensibilidad de la función de transformación

La valoración de la sensibilidad de la función de transformación de precipitación en escorrentía se ha realizado a través de la sensibilidad relativa de la función a los cambios del número de curva.

De forma genérica la sensibilidad relativa ( $Sr$ ) de una variable  $y$  al cambio de otra variable  $x$ , de la que depende, se expresa como (Bondelid *et al.*, 1982):

$$Sr = \frac{dy/y}{dx/x} = \frac{dy}{dx} \cdot \frac{x}{y} \quad 2.13$$

Por lo que la sensibilidad relativa mide la variación proporcional de  $y$  para una variación en  $x$ , representando la variación de forma adimensional.

Si lo aplicamos a las ecuaciones de transformación de la precipitación en escorrentía, que ya se vieron ( 2.7 y 2.9):

$$Q = \frac{(P - 0,2 \cdot S)^2}{P + 0,8 \cdot S} \quad ; \quad S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (2.7 \text{ y } 2.9)$$

La sensibilidad relativa para esta función se puede expresar como (Bondelid *et al.*, 1982):

$$Sr_Q = \frac{dQ/Q}{dCN} = \frac{dQ}{dCN} \cdot \frac{1}{Q} \quad 2.14$$

Por lo tanto,  $Sr_Q$  representa la sensibilidad relativa de la escorrentía al cambio del número de curva, expresado en proporción de variación por unidad del número de curva.

La sensibilidad relativa se puede expresar de otra forma, ya que la escorrentía depende del parámetro  $S$  y este, a su vez, del número de curva ( $CN$ ).

$$Sr_Q = \frac{\partial Q}{\partial S} \cdot \frac{dS}{dCN} \cdot \frac{1}{Q} \quad 2.15$$

Desarrollando esta expresión 2.15, por partes:

$$\frac{\partial Q}{\partial S} = \frac{[(-0,4 \cdot P + 0,08 \cdot S) \cdot (P + 0,8 \cdot S)] - [(P - 0,2 \cdot S)^2 \cdot 0,8]}{(P + 0,8 \cdot S)^2} \quad 2.16$$

$$\frac{dS}{dCN} = - \frac{25400}{CN^2} \quad 2.17$$

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{\frac{(P - 0,2 \cdot S)^2}{P + 0,8 \cdot S}} \quad 2.18$$

Sustituyendo estos términos en la fórmula de la sensibilidad relativa (2.15):

$$Sr_Q = \frac{[(-0,4 \cdot P + 0,08 \cdot S) \cdot (P + 0,8 \cdot S)] - [(P - 0,2 \cdot S)^2 \cdot 0,8]}{(P + 0,8 \cdot S)^2} \cdot \left[ -\frac{25400}{CN^2} \right] \cdot \frac{P + 0,8 \cdot S}{(P - 0,2 \cdot S)^2} \quad 2.19$$

Operando y simplificando términos, se obtiene que la sensibilidad relativa de la función de transformación de precipitación en escorrentía se puede expresar como:

$$Sr_Q = \left[ \frac{0,4}{P - 0,2 \cdot S} + \frac{0,8}{P + 0,8 \cdot S} \right] \cdot \frac{25400}{CN^2} \quad 2.20$$

La expresión de la sensibilidad relativa se puede expresar en relación a la precipitación y al número de curva, según la ecuación 2.9, transformándose la expresión en la siguiente:

$$Sr_Q = \left[ \frac{0,4}{P - \left( \frac{5080}{CN} - 50,8 \right)} + \frac{0,8}{P + \left( \frac{20320}{CN} - 203,2 \right)} \right] \cdot \frac{25400}{CN^2} \quad 2.21$$

Si se desarrolla esta expresión matemática en forma gráfica para algunos número de curva y diversas precipitaciones, se obtiene el gráfico de la Figura 2.9:

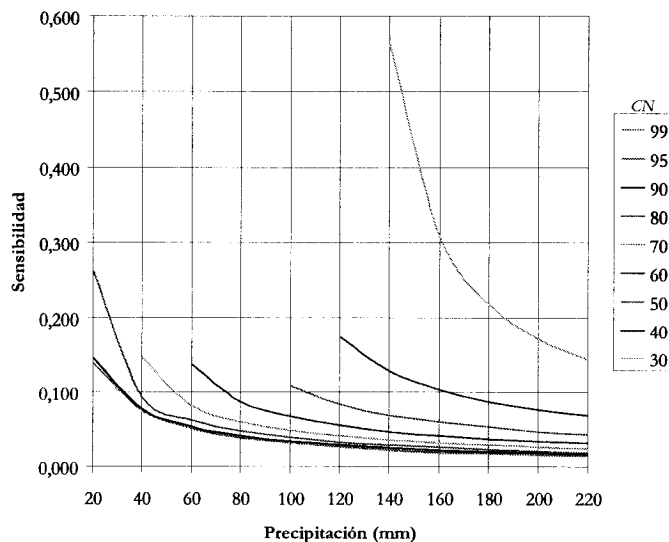


Figura 2.9: Representación de la sensibilidad relativa de la función de transformación de lluvia en escorrentía por unidad de variación de CN (ecuación 2.21)

En la Figura 2.9, el inicio de cada curva viene determinado por la cantidad de precipitación necesaria para que se inicie la escorrentía. A la vista de esto, se puede observar

que la sensibilidad de la función de transformación precipitación-escorrentía aumenta a medida que disminuye la precipitación y a medida que disminuye el número de curva.

Esta afirmación parece razonable, ya que el número de curva determina la abstracción inicial ( $I_a$ ), por lo que, a medida que la precipitación y el número de curva disminuyen, la proporción de precipitación que se pierde en la abstracción inicial aumenta y el error también aumentará.

Como la sensibilidad relativa muestra la variación de la escorrentía por unidad de variación del número de curva, esta se puede asimilar al error relativo que se comete al transformar una precipitación en escorrentía, en función del error cometido al establecer el número de curva de un lugar. Así, para unas precipitaciones dadas y para unos números de curva determinados, se puede calcular el porcentaje de error en la estimación de las escorrentías que generan dichas precipitaciones, cuando se comete un error de una unidad en la asignación del número de curva. Estos errores relativos se muestran en la Tabla 2.14.

Tabla 2.14: Tanto por uno de error en la estimación de la escorrentía, para una precipitación dada, por unidad de número de curva

P (mm)	Números de curva								
	99	95	90	80	70	60	50	40	30
20	0,147	0,138	0,146	0,262					
40	0,076	0,075	0,077	0,093	0,146				
60	0,051	0,051	0,053	0,062	0,082	0,137			
80	0,038	0,039	0,041	0,048	0,060	0,087			
100	0,031	0,032	0,034	0,039	0,049	0,067	0,109		
120	0,026	0,027	0,029	0,033	0,041	0,055	0,084	0,175	
140	0,022	0,023	0,025	0,029	0,036	0,047	0,069	0,128	0,563
160	0,019	0,020	0,022	0,026	0,032	0,041	0,060	0,103	0,308
180	0,017	0,018	0,020	0,023	0,029	0,037	0,053	0,087	0,218
200	0,015	0,016	0,018	0,021	0,026	0,034	0,047	0,076	0,172
220	0,014	0,015	0,016	0,019	0,024	0,031	0,043	0,068	0,144

Como conclusión se puede decir que la función de transformación es sensible al número de curva, especialmente cuando se conjugan situaciones de precipitaciones altas y bajos números de curva, o en aquellas en las que la precipitación se aproxima al valor de la abstracción inicial ( $I_a$ ), situaciones ya descritas por Wakins (1975) y por Mishra *et al.*(2003).

#### 2.4.2. Análisis de sensibilidad de las variables que determinan el número de curva

Como se ha visto en el apartado anterior, la sensibilidad de la función de transformación a la variación del número de curva puede ser alta, por lo que ahora se pretende analizar cuáles de las variables que participan en la estimación del número de curva tiene una influencia más clara sobre su valor.

Este análisis se ha realizado a través de la función de sensibilidad calculada en el apartado anterior. Recordemos que la sensibilidad no sólo depende de la variación del número de curva, sino también de la precipitación, por lo que, para permitir la comparación entre las distintas variables, se ha fijado una precipitación de 180 mm. Esta precipitación es suficientemente grande como para producir escorrentía con los números de curva más bajos y evitar las situaciones de proximidad a la abstracción inicial, donde los errores de la función tienden a infinito.

A continuación se ha procedido a valorar el error inducido por cada una de las variables que participan en la determinación del número de curva. El error ha sido calculado como el porcentaje de variación de la escorrentía respecto al valor máximo del número de curva que puede adoptar para la variable analizada.

La única variable no analizada es el tipo de cobertura del suelo, pues se ha considerado que su determinación induce a pocos errores, ya que las fuentes de información de los usos del territorio se encuentran en un estado de evolución muy alto y con niveles de detalle elevados.

#### 2.4.2.1. Análisis de la sensibilidad del número de curva a las técnicas de cultivo

Los resultados del análisis de las técnicas de cultivo sobre los terrenos agrícolas se pueden observar en la Tabla 2.15. Como se puede apreciar, el valor máximo de variación corresponde a cultivos de leguminosas o rotación gramíneas-leguminosas, dentro del grupo hidrológico de suelo A. Para este uso del suelo, la determinación de si se cultiva siguiendo curvas de nivel o en terrazas es muy importante, puesto que la variación en el número de curva puede llegar a ser de 15 unidades, lo que para la precipitación estudiada supone una variación aproximada de la escorrentía del 48%.

La variación media de la escorrentía debida a los posibles errores inducidos por las técnicas de cultivo es del 19 %.

Tabla 2.15: Sensibilidad del número de curva a las técnicas de cultivo

Cultivo	Grupo hidrológico	Nº curva mínimo	Nº curva máximo	Variación nº curva	t.p.u. Variación Q por unidad de CN	% Variación Q
Barbecho	A	74	77	3	0,025	7,50
	B	83	86	3	0,021	6,30
	C	88	91	3	0,019	5,70
	D	90	94	4	0,018	7,20
Cultivo en hileras	A	61	72	11	0,027	29,70
	B	70	81	11	0,023	25,30
	C	77	88	11	0,020	22,00
	D	80	91	11	0,019	20,90
Cultivo grano pequeño	A	58	65	7	0,032	22,40
	B	69	76	7	0,025	17,50
	C	77	84	7	0,022	15,40
	D	80	88	8	0,020	16,00
Cultivo leguminosas o rotaciones leg-gramíneas	A	51	66	15	0,032	48,00
	B	67	77	10	0,025	25,00
	C	76	85	9	0,021	18,90
	D	80	89	9	0,020	18,00
<b>Media</b>		<b>73,81</b>	<b>81,88</b>	<b>8,06</b>	<b>0,023</b>	<b>19,11</b>

#### 2.4.2.2. Análisis de la sensibilidad del número de curva al grupo hidrológico de suelo

Para estimar la sensibilidad del método del número de curva a las variaciones del grupo hidrológico de suelo, se han evaluado las desviaciones entre los grupos contiguos (Tabla 2.16), puesto que los errores de determinación se producen entre los grupos más cercanos o parecidos de comportamiento hídrico y no entre los más alejados entre sí.

La mayor variación media se produce entre la determinación de los grupos A y B (86,4%), disminuyendo entre los demás grupos (B-C =27,8% y C-D =10,1%). A su vez se puede ver que los cultivos agrícolas son menos sensibles a la variación del grupo hidrológico,

mientras que las áreas de carácter más natural incrementan su susceptibilidad a la variación del grupo hidrológico.

La variación de la esorrentía entre los grupos A y B es muy elevada, puesto que existen usos del suelo con números de curva muy bajos (30) o con abstracciones iniciales muy altas y muy cercanas a la precipitación de referencia, prueba de ello es que si se excluyen de los cálculos los números de curva inferiores a 40, las medias de los porcentajes de variación disminuyen de forma drástica (A-B=36%, B-C=16% y C-D=6%).

#### ***2.4.2.3. Análisis de la sensibilidad del número de curva a la condición hidrológica***

Esta variable tiene un comportamiento muy inestable, como se puede ver en la Tabla 2.17, puesto que introduce pocas variaciones para los usos más agrícolas, mientras que en los de carácter más natural los porcentajes de variación de la esorrentía pueden llegar a ser máximos. Si nos fijamos en la media, el comportamiento de esta variable se sitúa entre las dos anteriores.

De igual forma que en el caso de la variación respecto al grupo hidrológico de suelo, las áreas naturales presentan un comportamiento extremo por la proximidad entre el valor de la precipitación y el de la abstracción inicial. Si se eliminan los datos para números de curva inferiores a 40, las medias de los porcentajes se reducen a valores que varían entre el 15% y el 4%.

Tabla 2.16: Sensibilidad del número de curva al grupo hidrológico de suelo

Cobertura vegetal	Tratamiento	Condición hidrol.	Variación grupo														
			A-B					B-C					C-D				
			CN mín	CN máx	Variación	t.p.u. Variac.	% Q variación	CN mín	CN máx	Variación	t.p.u. Variac.	% Q variación	CN mín	CN máx	Variación	t.p.u. Variac.	% Q variación
Barbecho	desnudo		77	86	9	0,026	23,46	86	91	5	0,022	10,79	91	94	3	0,020	5,90
	residuos	pobre	76	85	9	0,027	23,92	85	90	5	0,022	10,97	90	93	3	0,020	5,99
		buena	74	83	9	0,028	24,92	83	88	5	0,023	11,36	88	90	2	0,020	4,10
Cultivo hileras	SR	pobre	72	81	9	0,029	25,99	81	88	7	0,024	16,70	88	91	3	0,021	6,18
		buena	67	78	11	0,033	36,01	78	85	7	0,025	17,67	85	89	4	0,022	8,72
	SR+CR	pobre	71	80	9	0,030	26,56	80	87	7	0,024	17,01	87	90	3	0,021	6,29
		buena	64	75	11	0,035	38,76	75	82	7	0,027	18,75	82	85	3	0,023	6,85
	C	pobre	70	79	9	0,030	27,16	79	84	5	0,024	12,22	84	88	4	0,022	8,87
		buena	65	75	10	0,034	34,16	75	82	7	0,027	18,75	82	86	4	0,023	9,19
	C+CR	pobre	69	78	9	0,031	27,78	78	83	5	0,025	12,46	83	87	4	0,023	9,03
		buena	64	74	10	0,035	35,03	74	81	7	0,027	19,14	81	85	4	0,023	9,36
	C+T	pobre	66	74	8	0,033	26,35	74	80	6	0,027	16,30	80	82	2	0,024	4,71
		buena	62	71	9	0,037	33,03	71	78	7	0,029	20,41	78	81	3	0,025	7,38
	C+T+CR	pobre	65	73	8	0,034	27,01	73	79	6	0,028	16,65	79	81	2	0,024	4,80
		buena	61	70	9	0,038	33,93	70	77	7	0,030	20,87	77	80	3	0,025	7,53
Grano pequeño	SR	pobre	65	76	11	0,034	37,80	76	84	8	0,026	21,13	84	88	4	0,022	8,87
		buena	63	75	12	0,036	43,64	75	83	8	0,027	21,56	83	87	4	0,023	9,03
	SR+CR	pobre	64	75	11	0,035	38,76	75	83	8	0,027	21,56	83	86	3	0,022	6,73
		buena	60	72	12	0,039	47,28	72	80	8	0,029	22,96	80	84	4	0,024	9,54
	C	pobre	63	74	11	0,036	39,77	74	82	8	0,028	22,01	82	85	3	0,023	6,85
		buena	61	73	12	0,038	46,01	73	81	8	0,028	22,47	81	84	3	0,023	6,98
	C+CR	pobre	62	73	11	0,037	40,82	73	81	8	0,028	22,47	81	84	3	0,023	6,98
		buena	60	72	12	0,039	47,28	72	80	8	0,029	22,96	80	83	3	0,024	7,11
	C+T	pobre	61	72	11	0,038	41,93	72	79	7	0,029	19,96	79	82	3	0,024	7,24
		buena	59	70	11	0,040	44,33	70	78	8	0,030	23,99	78	81	3	0,025	7,38
	C+T+CR	pobre	60	71	11	0,039	43,10	71	78	7	0,029	20,41	78	81	3	0,025	7,38

El método del número de curva

Cobertura vegetal	Tratamiento	Condición hidrol.	Variación grupo														
			A-B						B-C						C-D		
			CN mín	CN máx	Variación	t.p.u. Variac.	% Q variación	CN mín	CN máx	Variación	t.p.u. Variac.	% Q variación	CN mín	CN máx	Variación	t.p.u. Variac.	% Q variación
Leguminosas	SR	buena	58	69	11	0,041	45,63	69	77	8	0,031	24,54	77	80	3	0,025	7,53
		pobre	66	77	11	0,034	36,88	77	85	8	0,026	20,72	85	89	4	0,022	8,72
	C	buena	58	72	14	0,042	59,03	72	81	9	0,029	25,99	81	85	4	0,023	9,36
		pobre	64	75	11	0,035	38,76	75	83	8	0,027	21,56	83	85	2	0,022	4,46
	C+T	buena	55	69	14	0,046	64,58	69	78	9	0,031	27,78	78	83	5	0,025	12,46
		pobre	63	73	10	0,036	35,94	73	80	7	0,028	19,54	80	83	3	0,024	7,11
Pastos o pastizales		pobre	68	79	11	0,032	35,17	79	86	7	0,025	17,33	86	89	3	0,021	6,39
		regular	49	69	20	0,058	116,24	69	79	10	0,031	31,06	79	84	5	0,024	12,22
		buena	39	61	22	0,088	194,45	61	74	13	0,039	50,13	74	80	6	0,027	16,30
Praderas		30	58	28	0,148	413,95	58	71	13	0,042	54,51	71	78	7	0,029	20,41	
Arbusto-vegt. herbácea		pobre	48	67	19	0,060	113,89	67	77	10	0,033	32,54	77	83	6	0,026	15,34
		regular	35	56	21	0,108	226,89	56	70	14	0,045	62,63	70	77	7	0,030	20,87
		buena	30	48	18	0,147	264,17	48	65	17	0,059	100,92	65	73	8	0,034	27,01
Árboles-hierba		pobre	57	73	16	0,044	70,25	73	82	9	0,028	25,44	82	86	4	0,023	9,19
		regular	43	65	22	0,074	162,73	65	76	11	0,034	37,80	76	82	6	0,026	15,65
		buena	32	58	26	0,130	337,84	58	72	14	0,042	59,03	72	79	7	0,029	19,96
Pequeñas arboledas		pobre	45	66	21	0,068	142,52	66	77	11	0,034	36,88	77	83	6	0,026	15,34
		regular	36	60	24	0,103	248,03	60	73	13	0,040	51,52	73	79	6	0,028	16,65
		buena	30	55	25	0,147	366,88	55	70	15	0,046	69,57	70	77	7	0,030	20,87
<b>Media</b>				<b>13,57</b>	<b>0,052</b>	<b>86,38</b>			<b>8,57</b>	<b>0,030</b>	<b>27,83</b>			<b>4,04</b>	<b>0,024</b>	<b>10,11</b>	

El método del número de curva

Tabla 2.17: Sensibilidad del número de curva a la condición hidrológica

Cobertura vegetal	Tratamiento	Grupo hidrológico																			
		A					B					C					D				
		CN mín	CN máx	Variación	t.p.u. Variac.	% Q variación	CN mín	CN máx	Variación	t.p.u. Variac.	% Q variación	CN mín	CN máx	Variación	t.p.u. Variac.	% Q variación	CN mín	CN máx	Variación	t.p.u. Variac.	% Q variación
Barbecho		74	76	2	0,027	5,40	83	85	2	0,022	4,40	88	90	2	0,019	3,80	90	93	3	0,018	5,40
	SR	67	72	5	0,032	16,00	78	81	3	0,025	7,50	85	88	3	0,020	6,00	89	91	2	0,019	3,80
	SR+CR	64	71	7	0,034	23,80	75	80	5	0,026	13,00	82	87	5	0,020	10,00	85	90	5	0,019	9,50
Cultivo hileras	C	65	70	5	0,033	16,50	75	79	4	0,026	10,40	82	84	2	0,021	4,20	86	88	2	0,020	4,00
	C+CR	64	69	5	0,034	17,00	74	78	4	0,027	10,80	81	83	2	0,022	4,40	85	87	2	0,020	4,00
	C+T	62	66	4	0,036	14,40	71	74	3	0,028	8,40	78	80	2	0,023	4,60	81	82	1	0,022	2,20
	C+T+CR	61	65	4	0,037	14,80	70	73	3	0,029	8,70	77	79	2	0,023	4,60	80	81	1	0,023	2,30
Grano pequeño	SR	63	65	2	0,034	6,80	75	76	1	0,026	2,60	83	84	1	0,021	2,10	87	88	1	0,020	2,00
	SR+CR	60	64	4	0,038	15,20	72	75	3	0,028	8,40	80	83	3	0,022	6,60	84	86	2	0,021	4,20
	C	61	63	2	0,036	7,20	73	74	1	0,027	2,70	81	82	1	0,022	2,20	84	85	1	0,021	2,10
	C+CR	60	62	2	0,037	7,40	72	73	1	0,028	2,80	80	81	1	0,023	2,30	83	84	1	0,021	2,10
	C+T	59	61	2	0,039	7,80	70	72	2	0,029	5,80	78	79	1	0,024	2,40	81	82	1	0,022	2,20
	C+T+CR	58	60	2	0,040	8,00	69	71	2	0,030	6,00	77	78	1	0,024	2,40	80	81	1	0,023	2,30
Leguminosas	SR	58	66	8	0,041	32,80	72	77	5	0,028	14,00	81	85	4	0,021	8,40	85	89	4	0,019	7,60
	C	55	64	9	0,045	40,50	69	75	6	0,030	18,00	78	83	5	0,021	10,50	83	85	2	0,021	4,20
	C+T	51	63	12	0,052	62,40	67	73	6	0,032	19,20	76	80	4	0,023	9,20	80	83	3	0,022	6,60
Pastos o pastizales		39	68	29	0,091	263,90	61	79	18	0,040	72,00	74	86	12	0,019	22,80	80	89	9	0,019	17,10
Arbusto- vezt. herbácea		30	48	18	0,147	264,60	48	67	19	0,060	114,00	65	77	12	0,023	27,60	73	83	10	0,021	21,00
Arboles hierba		32	57	25	0,130	325,00	58	72	14	0,042	58,80	72	82	10	0,021	21,00	79	86	7	0,020	14,00
Pequeñas arboledas		30	45	15	0,148	222,00	55	70	15	0,046	69,00	70	77	7	0,024	16,80	77	83	6	0,021	12,60
<b>Media</b>				<b>8,1</b>	<b>0,050</b>	<b>68,56</b>			<b>5,85</b>	<b>0,031</b>	<b>22,83</b>			<b>4</b>	<b>0,022</b>	<b>8,595</b>			<b>3,2</b>	<b>0,021</b>	<b>6,59</b>

El método del número de curva

## 2.5. VENTAJAS Y LIMITACIONES DEL MÉTODO DEL NÚMERO DE CURVA

Las principales ventajas que hacen de este método de transformación de lluvia en escorrentía uno de los más utilizados, se pueden resumir en:

- Es un método simple, previsible y estable conceptualmente para la estimación de la escorrentía generada por una tormenta, basado en la cantidad de lluvia precipitada (Ponce y Hawkins, 1996).
- Es la única fórmula de escorrentía que sólo depende de un parámetro, el número de curva, que representa las propiedades de la cuenca vertiente sobre la que se está estudiando el comportamiento hidrológico.
- El método parte de un parámetro que ha sido calibrado con datos de escorrentía y precipitación de numerosas cuencas, por lo que es un método aplicable a cuencas de similares características, aunque no se encuentren aforadas.
- Los datos para la estimación del parámetro del número de curva son de determinación relativamente sencilla, de forma directa o bien a través de las nuevas fuentes de información de carácter espacial, como los sistemas de información ambiental o técnicas de teledetección.
- Como el modelo se planteó en un principio ante las necesidades de evaluar el efecto del cambio de uso sobre la hidrología de pequeñas cuencas, es adecuado para recrear escenarios o situaciones futuras, producidas por los posibles cambios de uso.
- El método es más adecuado para procesos de escorrentía con mecanismos hortonianos que para aquellos que se producen por exceso de saturación de humedad del suelo. Son los hortonianos mecanismos típicos de las zonas áridas (Ponce y Hawkins, 1996), por lo que en toda la cuenca mediterránea presenta un campo de aplicación amplio.

Dentro de las limitaciones que presenta el modelo se pueden citar:

- La falta de transparencia en lo que se refiere a los análisis y al establecimiento de las relaciones que presentan las variables que intervienen en el modelo, así como en los datos originales que se utilizaron para establecer la función de transformación de lluvia en escorrentía. Estas circunstancias han provocado numerosas críticas del método desde su nacimiento. Así mismo, han conducido a una serie de errores de aplicación y de interpretación de las fórmulas, que provocan grandes desajustes en los resultados obtenidos. Todo ello ha ocasionado que algunos científicos, como Willeke (1997), opinen que el método está obsoleto y debe ser revisado.

Es cierto que los aspectos oscuros del modelo han podido conducir a una interpretación subjetiva de las tablas y de las variables que participan en el método, pero una revisión de los últimos documentos publicados (Ponce y Hawkins, 1996; Woodward *et al.*, 2002; Hawkins, 2002; Van Mullem, 1998; NRCS, 2002) y una lectura detenida del mismo hacen aumentar la objetividad en gran medida.

- La incertidumbre introducida por la no existencia de un número único de curva para un mismo complejo suelo-cubierta, al existir tres posibles condiciones de humedad antecedente del suelo. En este sentido el NRCS está trabajando con la intención de transformar la condición antecedente de humedad (AMC) en la condición antecedente de escorrentía (ARC) y la variabilidad del número de curva y de la escorrentía han de

ser incorporadas considerando al número de curva como una variable aleatoria y a las ARC-I y ARC-III como los límites de la distribución o como el rango de la tendencia respecto a la tendencia central (Van Mullem et. al, 2002).

- Otra de las críticas que recibe el modelo es la relación del 20% entre la abstracción inicial ( $I_a$ ) y la retención potencial ( $S$ ), puesto que el propio SCS afirma que las cuencas de experimentación sobre las que se estimó la relación presentaban una dispersión considerable de los datos y que el 50% de los datos estaban comprendidos entre valores del 95% al 38% de la retención potencial (Ponce y Hawkins, 1996).

Así, Hawkins *et al.* (2002) afirman que la relación entre la abstracción inicial y la retención potencial no es constante de tormenta a tormenta o de cuenca a cuenca, y que el 20% es extraordinariamente alto. Para mejorar los resultados en tormentas cortas y pequeñas proponen usar una relación del 5%. Este cambio supone transformar los números de curva actuales, puesto que no guardan una relación lineal, como se comprueba si se recalcula la escorrentía con la nueva abstracción inicial.

- Es un método que no es válido para aquellas zonas en las que predominan los flujos de escorrentía subsuperficial o áreas kársticas (Rallison y Miller, 1982).

- Según sus autores presenta una limitación al no contemplar la variable tiempo (Mockus, 1964; en Rallison y Miller, 1982). La justificación de Cowan (Rallison y Miller, 1982) por no haber incluido el tiempo en el modelo deriva de la falta de datos fiables de tiempo, pues la incorporación de esta variable supone la necesidad de conocer la distribución de la lluvia en el tiempo, lo que en la mayoría de las cuencas es imposible.

Aun así, Yu (1998) concluye que la relación lluvia-escorrentía en el método del número de curva, que asume la proporcionalidad entre la retención y la escorrentía, puede ser desarrollada analíticamente si la variación temporal de la intensidad de lluvia y la variación espacial de la tasa de infiltración son caracterizadas por una distribución exponencial de la probabilidad. O lo que es lo mismo, que la relación entre lluvia y escorrentía propuesta por el método del número de curva es idéntica a la que se puede establecer entre la variación temporal de la lluvia y la variación espacial de la infiltración.

- Por último, cabe citar la limitación en cuanto a la variabilidad del número de curva en función del área de la cuenca (Simanton et al., 1996), puesto que los números de curva tienden a reducirse a medida que se incrementa el tamaño de la cuenca. Quizás esta variación esté originada porque la variabilidad de las precipitaciones y de las condiciones de humedad del suelo tiende a aumentar a mediada que lo hace el área de estudio. Además, según Ponce y Miller (1996), los estudios fueron realizados en un área semiárida (Arizona), por lo que también están influenciados por la pérdida de agua que puede haber en la propagación de los caudales a través de la red de drenaje en estos climas.

Puesto que las experiencias de Simanton *et al.* son de carácter muy local, Ponce y Miller (1996) recomiendan aplicar el método del número de curva a cuencas de tamaño medio o pequeño, nunca a mayores de 250 km<sup>2</sup>.

## 2.6. MODIFICACIONES DEL MODELO ORIGINAL

El modelo original ha sufrido algunas adaptaciones o modificaciones para una mejor aplicación a las distintas situaciones. En el presente apartado se pretende dar a conocer aquellas que puedan tener una mayor incidencia en la aplicación del método.

### 2.6.1. Ajuste del número de curva a causa de la pendiente del terreno

Según Williams (1995) (en Neitsch *et al.*, 2002), los valores del número de curva obtenidos de las tablas para la condición II de humedad son apropiados para pendientes de hasta el 5%, por lo que cuando el método se aplica a pendientes mayores se debe realizar un ajuste en función de la pendiente, tal como muestra la siguiente ecuación:

$$CN_{IIS} = \frac{(CN_{III} - CN_{II})}{3} \cdot [1 - 2 \cdot e^{(-13,86 \cdot pt)}] + CN_{II} \quad 2.22$$

Donde:  $CN_{IIS}$  es el número de curva modificado por la pendiente en condición II de humedad

$CN_{II}$  es el número de curva sin modificar en condición II de humedad

$CN_{III}$  es el número de curva sin modificar en condición III de humedad

$pt$  es la pendiente media de la cuenca en tanto por uno

Como se puede deducir, la ecuación 2.22 trabaja con el número de curva medio de la cuenca y, por tanto, con la pendiente media de la cuenca, pero no presenta problemas de aplicación a otros tipos de superficies o de unidades hidrológicas.

Si representamos la ecuación 2.22 para distintos números de curva y distintas pendientes obtenemos:

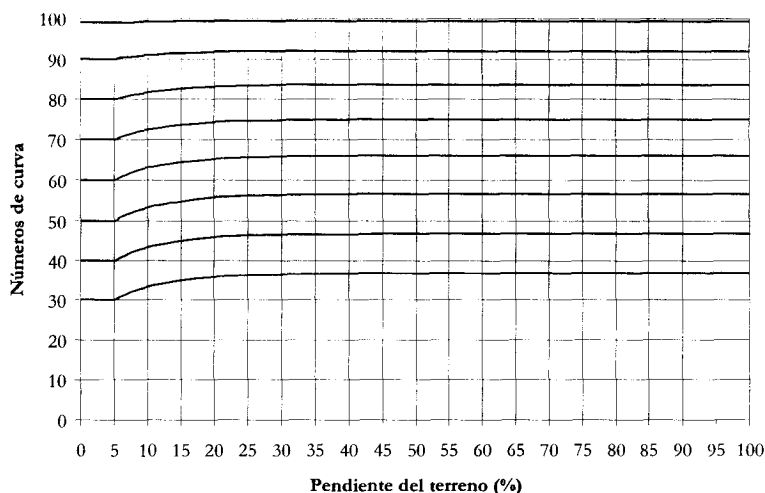


Figura 2.10: Variación de los números de curva en condición II de humedad en función de la pendiente, según la ecuación 2.22

### 2.6.2. Adaptación del método de curva al territorio español

La aplicación del método del número de curva al territorio español se ha realizado a través de la adaptación conocida como el umbral de escorrentía o de Ténez (1987). Este autor parte de la ecuación final (2.7) de la metodología del SCS.

$$Q = \frac{(P - 0,2 \cdot S)^2}{P + 0,8 \cdot S} \quad \text{si } P > 0,2 \cdot S$$

$$Q = 0 \quad \text{si } P \leq 0,2 \cdot S$$
2.23

La abstracción inicial ( $I_a$ ) pasa a ser denominada umbral de escorrentía ( $P_0$ ), por lo que la retención potencial de agua por parte del suelo es:

$$S = \frac{P_0}{0,2}$$
2.24

Por lo que la ecuación 2.23 puede ser escrita como:

$$Q = \frac{(P - P_0)^2}{P + 4 \cdot P_0} \quad \text{si } P > P_0$$

$$Q = 0 \quad \text{si } P \leq P_0$$
2.25

Así, la relación que hay entre el umbral de escorrentía ( $P_0$ ) y el parámetro del número de curva ( $CN$ ), expresado el umbral en unidades del Sistema Internacional (mm), es:

$$P_0 = 0,2 \cdot \left( \frac{25400}{CN} - 254 \right) = \frac{5080}{CN} - 50,8$$
2.26

Sobre esta última relación, Témez construye una tabla de valores del umbral de escorrentía ( $P_0$ ) para España, en la que sustituye la condición hidrológica del uso del suelo por la pendiente del mismo ( $< 3\%$  ó  $\geq 3\%$ ). Las demás variables del número de curva se mantienen, por lo que el umbral de escorrentía es función de: el uso del suelo, la pendiente del terreno, la técnica de cultivo, el grupo hidrológico de suelo y la condición antecedente de humedad. En cuanto a las técnicas de cultivo, esta adaptación no es tan detallada como la original del SCS y sólo hace una distinción entre si se cultiva siguiendo curvas de nivel ( $N$ ) o siguiendo líneas de máxima pendiente ( $R$ ).

Los valores del umbral de escorrentía para los distintos usos del suelo y las demás variables se muestran en la Tabla 2.18.

Tabla 2.18: Umbral de escorrentía ( $P_0$  en mm) para condiciones medias de humedad (Témez, 1987)

Uso de la tierra	Pendiente %	Características hidrológicas	Grupo de suelo			
			A	B	C	D
Barbecho	$\geq 3$	R	15	8	6	4
		N	17	11	8	8
	$<3$	R/N	20	14	11	8
Cultivos en hilera	$\geq 3$	R	23	13	8	6
		N	25	16	11	8
	$<3$	R/N	28	19	14	11
Cereales de invierno	$\geq 3$	R	29	17	10	8
		N	32	19	12	10
	$<3$	R/N	34	21	14	12
Rotación de cultivos pobre	$\geq 3$	R	26	15	9	6
		N	28	17	11	8
	$<3$	R/N	30	19	13	10
Rotación de cultivos densos	$\geq 3$	R	37	20	12	9
		N	42	23	14	11
	$<3$	R/N	47	25	16	13
Praderas	$\geq 3$	Pobre	24	14	8	6
		Media	53	23	14	9
		Buena	70	33	18	13
		Muy buena	80	41	22	15
	$<3$	Pobre	58	25	12	7
		Media	80	35	17	10
		Buena	120	55	22	14
		Muy buena	250	100	25	16
Plantaciones regulares. Aprovechamiento forestal	$\geq 3$	Pobre	62	26	15	10
		Media	80	34	19	14
		Buena	100	42	22	15
	$<3$	Pobre	75	34	19	14
		Media	95	42	22	15
		Buena	150	50	25	16
Masas forestales (bosques, monte bajo, etc.)	$\geq 3$	Muy clara	40	17	8	5
		Clara	60	24	14	10
		Media	75	34	22	16
		Espesa	90	47	31	23
		Muy espesa	120	65	43	33
Rocas permeables	$\geq 3$				3	
	$<3$				5	
Rocas impermeables	$\geq 3$				2	
	$<3$				4	

En la actualidad, los umbrales de escorrentía superiores a 70 mm han sido eliminados de la tabla, puesto que, según las instrucciones de drenaje superficial (MOPU, 1990), no deben ser tenidos en cuenta en el cálculo de caudales punta, ya que en nuestro territorio difícilmente pueden llegar a producir escorrentía.

La adaptación de Témez tampoco soluciona las incertidumbres que presenta el modelo original en su aplicación, incluso muestra menos posibilidades de aplicación coherente, al no haberse actualizado la tabla del umbral de escorrentía con las nuevas tablas del número de curva que han ido surgiendo en Estados Unidos, por lo que parece necesaria su revisión.

La ventaja que presenta esta adaptación es la sustitución de la abstracción inicial ( $I_a$ ) por el umbral de escorrentía ( $P_0$ ), pues este último concepto es mucho más intuitivo que la terminología original del NRCS.



## **CAPÍTULO 3: EL NÚMERO DE CURVA Y LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO**

Aunque en origen el modelo del número de curva parte de un planteamiento totalmente conceptual del ciclo hidrológico de una cuenca, diversos autores han pretendido identificar relaciones de carácter físico con variables ambientales.

En este capítulo se plantean las distintas correspondencias del número de curva con algunos parámetros de carácter físico del suelo. Se efectúa un análisis de la relación del número de curva con la infiltración y con propiedades hídricas del suelo como la conductividad hidráulica saturada, base para la definición de los grupos hidrológicos de suelo.

Se ha prestado especial atención a las definiciones que diversos autores han realizado sobre el grupo hidrológico de suelo en función de algunas propiedades edáficas, dado el alto peso de esta variable en la correcta determinación del número de curva, según se vio en el capítulo anterior. En concreto, se han analizado las asignaciones de los grupos hidrológicos de suelo basadas en la textura según las propuestas de distintos autores. En el texto se pondrán de manifiesto dos importantes problemas respecto de estas asignaciones:

- Existe disparidad de criterios según autores en las correspondencias clase textural – grupo hidrológico de suelo.
- Variaciones granulométricas mínimas que lleven a un salto en la clase textural originan grupos hidrológicos de suelo distintos, con números de curva muy alejados

Estos problemas son debidos, en gran parte, al carácter discreto que poseen tanto las clases texturales como los grupos hidrológicos de suelo.

Dado que la textura no parece el mejor indicador, se ha recurrido a la definición original de los grupos hidrológicos de suelo, basada en la conductividad hidráulica saturada y en la profundidad del suelo, que además, permite la transformación de grupos discretos a continuos; por ello se ha estimado necesario efectuar un estudio de la conductividad hidráulica saturada a través de las principales funciones de edafotransferencia existentes..

### **3.1. EL NÚMERO DE CURVA COMO ECUACIÓN DE INFILTRACIÓN**

Antes de profundizar en las relaciones del número de curva con las principales propiedades físicas del suelo, hay que analizar la correspondencia del modelo con la infiltración del agua en el suelo a lo largo del tiempo, pues ésta facilita la comprensión de las demás.

En un principio, el modelo del número de curva no fue concebido como una ecuación capaz de estimar la infiltración, pero distintos autores (Hawkins, 1978; Chen, 1982), partiendo

de las ecuaciones originales de transformación de lluvia en escorrentía ( 2.6) y de la del balance hídrico, obtuvieron una expresión que relaciona el número de curva con la infiltración.

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad \text{si } P > I_a \quad (2.6)$$

$$Q = 0 \quad \text{si } P \leq I_a$$

$$P = I_a + F + Q \quad 3.1$$

De la ecuación 3.1 se puede despejar el valor de las pérdidas ( $F$ ):

$$F = P - Q - I_a \quad 3.2$$

Sustituyendo en la ecuación 3.2 el valor de  $Q$  expresado en la ecuación 2.6 y desarrollando los polinomios, se obtiene que:

$$F = P - I_a - \left( \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \right) = P - I_a - \left( \frac{P^2 - 2 \cdot P \cdot I_a + I_a^2}{P - I_a + S} \right) \quad 3.3$$

$$F = \frac{P \cdot S - I_a \cdot S}{P - I_a + S} = \frac{(P - I_a) \cdot S}{P - I_a + S}$$

Por tanto, si se asume que las pérdidas ( $F$ ) durante una tormenta son el volumen de agua infiltrado en el suelo, derivando la ecuación 3.3 respecto del tiempo y asumiendo que la abstracción inicial ( $I_a$ ) y las pérdidas potenciales de agua ( $S$ ) son constantes e independientes del tiempo, al ser unas características del propio suelo y, por tanto, que las únicas variables dependientes del tiempo son  $F$  y  $P$ , se obtiene la siguiente expresión:

$$dF = d \left( \frac{(P - I_a) \cdot S}{P - I_a + S} \right) = \frac{S^2}{(P - I_a + S)^2} \cdot dP \quad 3.4$$

Si realizamos dicha derivada respecto del tiempo se obtiene que:

$$\frac{dF}{dt} = \frac{S^2}{(P - I_a + S)^2} \cdot \frac{dP}{dt} \quad 3.5$$

Reconociendo que  $dF/dt$  es la tasa de infiltración ( $f$ ) y que  $dP/dt$  es la intensidad de la lluvia ( $i$ ), la ecuación 3.5 se puede expresar como en 3.6, expresión que coincide con la obtenida por Colosimo y Mendicino, 1996, a través de otro planteamiento:

$$f = \frac{S^2}{(P - I_a + S)^2} \cdot i \quad 3.6$$

Por lo que se puede expresar la relación entre  $f$  e  $i$  como:

$$\frac{f}{i} = \frac{S^2}{(P - I_a + S)^2} \quad 3.7$$

Donde:  $f$  es la tasa de infiltración

$i$  es la intensidad de precipitación

$S$  es la retención potencial de agua en el suelo en el instante inicial de la tormenta

$I_a$  es la abstracción inicial en el instante inicial de la tormenta

$P$  es la precipitación acumulada

Asumiendo la relación del 20% entre la abstracción inicial ( $I_a$ ) y la retención potencial ( $S$ ) y teniendo en cuenta que:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad 2.9$$

La ecuación 3.7 se puede escribir como:

$$\frac{f}{i} = \frac{\left(\frac{25400}{CN} - 254\right)^2}{\left(P + 0,8 \cdot \left(\frac{25400}{CN} - 254\right)\right)^2} \quad 3.8$$

Donde:  $f$  es la tasa de infiltración en mm/h

$i$  es la intensidad de precipitación en mm/h

$P$  es la precipitación acumulada en mm

$CN$  es el número de curva

Hay que destacar que cuando la precipitación tiende a infinito, la tasa de infiltración lo hace hacia cero, como se puede ver en la Figura 3.1, y no hacia una tasa de infiltración final o residual, como sucede en otros modelos de infiltración como el de Horton.

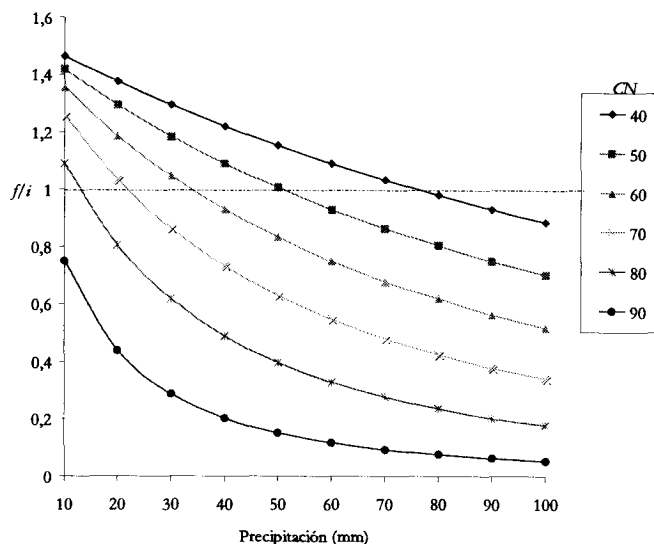


Figura 3.1: Representación de la relación  $f/i$  para distintos números de curva y precipitaciones

### 3.2. EL NÚMERO DE CURVA Y SU RELACIÓN CON LAS PROPIEDADES HÍDRICAS DEL SUELO

#### 3.2.1. Conductividad hidráulica saturada

La conductividad hidráulica se define como la capacidad de un suelo para conducir o transmitir un flujo de agua a través de él (Porta *et al.*, 1994) y la conductividad hidráulica saturada corresponde con la capacidad de un suelo de conducir un flujo de agua cuando se encuentra totalmente saturado de humedad.

La conductividad hidráulica ha sustituido, en la ciencia del suelo actual, a otros términos confusos como velocidad de drenaje o permeabilidad.

Chong y Teng (1986) establecieron que una de las variables hídricas de los suelos con más repercusión sobre el número de curva es la conductividad hidráulica saturada. Para ello realizaron el análisis de curvas de infiltración, la medición directa de la conductividad hidráulica ( $K_{sat}$ ) y la estimación de la retención máxima de agua ( $S$ ) en diversos suelos, calibrada a través de datos de escorrentía-precipitación.

Estos dos autores determinan que hay una relación directa entre el parámetro  $S$  (retención máxima de agua) del número de curva y la conductividad hidráulica saturada del suelo, puesto que la correlación de Pearson que obtienen es de 0,87. La expresión que relaciona  $S$  con  $K_{sat}$  es ( $r^2 = 0,76$ ):

$$S = 1,844 \cdot 10^5 \cdot K_{sat}^{1,208} \tag{3.9}$$

Donde:  $S$  es la retención máxima de agua en el suelo en cm

$K_{sat}$  es la conductividad hidráulica saturada del suelo en m/s

Su estudio propone calcular los números de curva de un suelo determinado a través de la relación de la retención máxima ( $S$ ) con la conductividad hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ), puesto que obtienen buenas correlaciones entre las distintas series de los suelo de las islas Hawai. En

concreto, al comparar los números de curva de la serie Molokai (obtenidos a través de ensayos de infiltración) con los números de curva, estimados gracias a la relación expresada por la ecuación 3.9, de otras series de suelos (como Waipahu, Hilo o Pakini), obtienen coeficientes de correlación de hasta 0,91 ( $r^2=0,82$ ) (Chong y Teng, 1986).

Otros autores han establecido relaciones directas entre el número de curva y la conductividad hidráulica saturada del suelo, pero con la diferencia de que estimaron la conductividad hidráulica saturada a partir de datos texturales del suelo y no a través de las curvas de infiltración.

Morel-Seytoux, en su estudio, no sólo relacionan la sortividad con el número de curva, sino que incluyen las correspondencias, de forma tabular (Tabla 3.1), del número de curva con la sortividad y con el factor de succión ( $F_s$ ), que se define por la ecuación 3.10:

$$F_s = (\theta_s - \theta_i) \cdot \psi_p \quad 3.10$$

Donde:  $F_s$  es el factor de succión (L)

$\theta_s$  es el contenido de agua del suelo saturado (%)

$\theta_i$  es el contenido de agua inicial del suelo (%)

$\psi_p$  es el potencial de presión (L)

Tabla 3.1: Relación entre el número de curva, la conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ), la sortividad ( $S_o$ ) y el factor de succión ( $F_s$ ) (modificada de Morel-Seytoux y Verdin, 1982)

CN	$K_s$ (mm/h)	$F_s$ (mm/h)	$S_o$ (mm/h <sup>1/2</sup> )	CN	$K_s$ (mm/h)	$F_s$ (mm/h)	$S_o$ (mm/h <sup>1/2</sup> )
100	0,00	----	0,00	50	11,84	22,25	22,95
99	0,08	2,24	0,60	49	12,22	21,82	23,10
98	0,15	4,50	1,20	48	12,62	21,41	23,24
97	0,25	6,73	1,80	47	13,00	21,03	23,39
96	0,33	8,97	2,41	46	13,41	20,65	23,53
95	0,42	11,23	3,00	45	13,72	20,32	23,68
94	0,48	13,46	3,61	44	13,67	20,02	23,83
93	0,56	15,57	4,21	43	14,58	19,71	23,97
92	0,63	17,96	4,81	42	14,96	19,38	24,12
91	0,74	20,19	5,41	41	15,37	19,18	24,26
90	0,81	22,43	6,01	40	15,75	18,87	24,41
89	0,89	24,69	6,61	39	16,13	18,67	24,56
88	0,96	26,92	7,21	38	16,54	18,47	24,70
87	1,04	29,16	7,81	37	16,92	18,11	24,85
86	1,12	31,42	8,42	36	17,45	17,91	24,99
85	1,22	31,37	9,02	35	18,26	16,03	25,14
84	1,29	35,92	9,62	34	19,08	16,74	25,29
83	1,37	38,15	10,22	33	19,91	16,26	25,43
82	1,45	40,39	10,82	32	20,73	15,77	25,58
81	1,52	42,65	11,42	31	21,56	15,34	25,73
80	1,60	44,88	12,02	30	22,38	14,96	25,87
79	1,70	47,12	12,62	29	23,19	14,58	26,02
78	1,78	49,38	13,23	28	24,03	14,25	26,16
77	1,85	51,61	13,83	27	24,84	13,79	26,31
76	1,93	53,85	14,43	26	25,68	13,64	26,45
75	2,06	54,89	15,03	25	26,49	13,36	26,60
74	2,44	49,89	15,63	24	27,31	13,11	26,75
73	2,84	46,38	16,23	23	28,14	12,85	26,89
72	3,23	43,85	16,83	22	28,96	12,62	27,04

CN	$K_s$ (mm/h)	$F_s$ (mm/h)	$S_o$ (mm/h <sup>1/2</sup> )	CN	$K_s$ (mm/h)	$F_s$ (mm/h)	$S_o$ (mm/h <sup>1/2</sup> )
71	3,63	41,96	17,43	21	29,79	12,40	27,19
70	4,01	40,51	18,03	20	30,61	12,19	27,33
69	4,39	39,42	18,64	19	31,42	12,01	27,48
68	4,80	38,58	19,24	18	32,26	11,84	27,62
67	5,18	37,95	19,84	17	33,07	11,66	27,77
66	5,59	37,44	20,44	16	33,91	11,48	27,91
65	5,97	36,09	20,76	15	34,72	11,33	28,06
64	6,35	34,34	20,90	14	35,53	11,20	28,21
63	6,76	32,82	21,05	13	36,37	11,05	28,35
62	7,14	31,45	21,20	12	37,19	10,92	28,50
61	7,54	30,23	21,34	11	38,02	10,80	28,65
60	7,92	29,13	21,49	10	38,84	10,67	28,79
59	8,31	25,86	21,64	9	39,65	10,57	28,94
58	8,71	27,25	21,78	8	40,49	10,44	29,08
57	9,09	26,42	21,93	7	41,30	10,34	29,23
56	9,50	25,68	22,07	6	42,14	10,24	29,38
55	9,88	24,99	22,22	5	42,95	10,13	29,52
54	10,26	24,36	22,36	4	43,76	10,06	29,54
53	10,67	23,75	22,51	3	44,60	9,96	29,81
52	11,05	23,22	22,66	2	45,42	9,88	29,96
51	11,45	22,71	22,80	1	46,25	9,80	30,11

### 3.2.2. Sortividad ( $S_o$ )

La sortividad (Porta *et al.*, 1994) expresa la capacidad de un suelo para absorber agua cuando el flujo tiene lugar bajo el efecto de un gradiente de potencial de presión únicamente. Puede entenderse como una medida de la capacidad que tiene un suelo de absorber agua durante el proceso de humedecimiento. Por lo general, cuanto mayor es el valor de  $S_o$ , mayor será el volumen de agua que puede ser absorbida y de forma más rápida.

Las unidades en las que se expresa son [longitud/(tiempo)<sup>1/2</sup>].

Para Chong y Teng (1986) esta variable no presenta una correlación de Pearson elevada, a diferencia de la conductividad hidráulica saturada, pero es fácil de medir en campo e incorporada a la ecuación que relaciona la retención máxima ( $S$ ) con la conductividad hidráulica saturada se mejora el coeficiente de determinación ( $r^2 = 0,84$ ). Así, la nueva ecuación que relaciona  $S$  con  $K_{sat}$  adopta la expresión:

$$S = 1,621 \cdot 10^6 \cdot K_{sat}^{1,06} \cdot S_o \tag{3.11}$$

Mishra *et al.* (1999 y 2004) relacionan la retención máxima de agua de un suelo ( $S$ ) con la sortividad ( $S_o$ ) y con la conductividad hidráulica del suelo. Parten de la expresión de la infiltración de Horton (Ecuación 3.12):

$$f - f_c = (f_0 - f_c) \cdot e^{-k \cdot t} \tag{3.12}$$

Donde:  $f$  es la tasa de infiltración (LT<sup>-1</sup>) en el tiempo  $t$

$f_c$  es la tasa de infiltración final (LT<sup>-1</sup>)

$f_0$  es la tasa de infiltración inicial (LT<sup>-1</sup>)

$k$  es la constante de decaimiento de la infiltración (T<sup>-1</sup>)

$t$  es instante en el que se quiere conocer  $f(T)$

Integrando esta ecuación 3.12 para el intervalo de tiempo desde que se produce el encharcamiento del suelo hasta el final de un periodo de lluvia, se obtiene el volumen de agua infiltrado en dicho lapso de tiempo:

$$F = \frac{f_o - f_c}{k} \cdot (1 - e^{-kt}) \quad 3.13$$

Donde  $F$  excluye la porción de agua infiltrada por debajo de la tasa de infiltración final ( $f_c$ ). Así que cuando  $t$  tiende a infinito,  $F$  tiende a  $(f_o - f_c)/k$ . Teniendo en cuenta que la relación escorrentía real-escorrentía máxima, según la expresión original del SCS, se puede escribir como:

$$\frac{Q}{P - I_a} = \frac{F}{S} \quad 3.14$$

Y que en esta ecuación 3.14 cuando  $Q$  tiende a  $(P - I_a)$ ,  $F$  tiende a  $S$ , cuando el tiempo se aproxima a infinito, se puede escribir que:

$$S = \frac{f_o - f_c}{k} \quad 3.15$$

Por lo que el miembro de la derecha de la ecuación 3.15 coincide con el concepto de máxima retención de agua por parte del suelo. Atendiendo a las relaciones establecidas por Collins-George (1997, en Mishra, 2004) por las que la retención máxima de un suelo está relacionada con las propiedades físicas del mismo a través de la sortividad del suelo y de su conductividad hidráulica, obtenemos que:

$$S = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{S_o^2}{K} \quad 3.16$$

Donde:  $S$  es la retención máxima o potencial de agua en el suelo (mm)

$S_o$  es la sortividad del suelo ( $\text{mm/s}^{1/2}$ )

$K$  es la conductividad hidráulica del suelo (mm/s)

### 3.2.3. Conductividad hidráulica equivalente

La conductividad hidráulica equivalente (Youngs, 1991; en Porta *et al.*, 1994) es el valor de la conductividad hidráulica que da origen al flujo de agua medido bajo las mismas condiciones que si el suelo fuese uniforme.

Este parámetro ( $K_e$ ) está relacionado con la formula de Green-Ampt y para Bouwer (1969, en Neitsch *et al.*, 2002) es aproximadamente equivalente a la mitad de la conductividad hidráulica saturada. Nearing *et al.* (1996) desarrollan una ecuación que relaciona la conductividad hidráulica efectiva con la saturada y con el número de curva:

$$K_e = \frac{56,82 \cdot K_{sat}^{0,286}}{1 + 0,051 \cdot e^{0,062 \cdot CN}} - 2 \quad 3.17$$

Donde:  $K_e$  es la conductividad hidráulica equivalente (mm/h)

$K_{sat}$  es la conductividad hidráulica saturada (mm/h)

$CN$  es el número de curva

A través de la ecuación 3.17 se relaciona el modelo del número de curva con la ecuación de infiltración de Green-Ampt Mein-Larson, en la que la tasa de infiltración se define como (Neitsch *et al.*, 2002):

$$f_{int,t} = K_e \cdot \left( 1 + \frac{\Psi_{wf} \cdot \Delta\theta_v}{F_{inf,t}} \right) \quad 3.18$$

Donde:  $f_{inf,t}$  es la tasa de infiltración en el instante  $t$  (mm/h)

$K_e$  es la conductividad hidráulica equivalente (mm/h)

$\Psi_{wf}$  es el potencial hídrico del frente de humectación (mm)

$\Delta\theta$  es el cambio volumétrico del contenido de humedad a través del frente de humectación (mm/mm)

$F_{inf}$  es la infiltración acumulada en el instante  $t$

### 3.3. LOS GRUPOS HIDROLÓGICOS DE SUELO

Como ya se vio en apartados anteriores (2.2.4 y 2.4.2.2) del presente trabajo, esta variable edáfica del número de curva es una de las más ambiguas en su definición y una de las que más repercusión tienen sobre la función de transformación de lluvia-escurrentía, al inducir las mayores variaciones.

En Estados Unidos desde un principio se han realizado distintos intentos de limitar los errores de asignación de los suelos a los grupos. El primer intento de calificación se realizó basándose en los ensayos de infiltración con los que se estableció el método del número de curva. A partir de estos datos se asumió que suelos con propiedades físicas similares (profundidad, materia orgánica, estructura y grado de expansión, cuando el suelo se encuentra saturado) se deberían comportar de forma análoga ante una precipitación (NRCS, 1972). Con estas consideraciones y los criterios publicados por el NRCS se confeccionó un listado de suelos en el que a cada serie de suelos (según *Soil Taxonomy*) se le asigna un grupo hidrológico (SCS, 1986).

A pesar de esta sistematización, la asignación de los grupos hidrológicos de suelo se basa directamente en la interpretación que los edafólogos realizan de los criterios publicados; por otro lado los propios criterios han ido variando en sucesivas revisiones. Esto ha provocado que no se realice una asignación coherente de los suelos a los grupos hidrológicos (Nielsen y Hjelmfelt, 1998).

En cuanto al territorio español, se puede decir que la situación no es mejor, al no existir una base de datos o una cartografía de las propiedades del suelo con suficiente detalle como para que se pueda aplicar alguna correlación con los criterios de clasificación publicados o con las series de suelos americanas.

En España, además, pueden existir distorsiones en la asignación de los grupos hidrológicos por interpretaciones o traducciones erróneas de las definiciones originales.

### 3.3.1. Definición de los grupos hidrológicos de suelo

Como ya se ha mencionado la definición de los grupos hidrológicos ha ido variando a lo largo del tiempo, por lo que en este apartado se intentará dar una visión de cómo han evolucionado los grupos:

#### 3.3.1.1. Definición original de Musgrave (1955)

**Grupo A:** Incluye las arenas profundas muy permeables y los agregados limosos procedentes de la deposición atmosférica, que tengan poca arcilla y coloides, y que el limo tenga suficiente materia orgánica para realizar una buena agregación.

**Grupo B:** Incluye suelos arenosos, franco-limosos de moderada profundidad y con tasas de infiltración mínimas por encima de la media, comprendidas entre 0,15 y 0,30 pulgadas/h (3,81 mm/h a 7,62 mm/h).

**Grupo C:** Incluye suelos poco profundos de todas las clases texturales; con tasas mínimas de infiltración por debajo de la media, comprendidas entre 0,05 y 0,15 pulgadas/h (1,27 mm/h a 3,81 mm/h)

**Grupo D:** Incluye suelos con altas tasas de expansión en la superficie o en la sub-superficie, a causa de su alto contenido en arcillas o coloides; presentan tasas de infiltración próximas a cero, aproximadamente de 0,05 pulgadas/h (1,27 mm/h).

Para este autor, las propiedades del suelo que están correlacionadas positivamente con la infiltración del agua son: el contenido en materia orgánica, el estado de agregación del suelo y la cantidad de grandes poros; existirían correlaciones negativas con la dispersión de las partículas, con el contenido de arcillas y con la densidad aparente de los horizontes (Musgrave, 1955).

#### 3.3.1.2. Revisión de los grupos hidrológicos por Mockus

Para Mockus, treinta años más tarde, la asignación de los grupos se ha de realizar atendiendo a la tasa de infiltración o velocidad con la que el agua entra dentro del suelo (controlada por las condiciones de la superficie del propio suelo) y a la tasa de transmisión de agua o velocidad con la que el agua se mueve en el interior del suelo (controlada por la características de los horizontes). Así, los grupos según Mockus se definen como (NRCS, 1985):

**Grupo A:** (Bajo potencial de escorrentía). Suelos con altas tasas de infiltración, incluso cuando están completamente humedecidos. Grupo constituido principalmente por arenas o gravas profundas, de excelentemente a bien drenadas. Son suelos que presentan altas tasas de transmisión de agua.

**Grupo B:** Suelos que presentan moderadas tasas de infiltración, cuando están completamente humedecidos. Grupo constituido principalmente por suelos profundos a moderadamente profundos, bien drenados a moderadamente bien drenados con texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas. Estos suelos presentan tasas de transmisión de agua moderada.

**Grupo C:** Suelos que tienen tasas de infiltración bajas cuando están completamente humedecidos. Grupo constituido principalmente por suelos con horizontes impermeables que impiden la profundización del agua o por suelos con texturas moderadamente finas a finas. Estos suelos presentan tasas de transmisión de agua lentas.

**Grupo D:** (Alto potencial de escorrentía). Suelos que presentan tasas de infiltración muy lentas cuando están completamente humedecidos. El grupo está constituido principalmente por suelos arcillosos con alto potencial expansivo, suelos con capas freáticas altas permanentes o con un horizonte arcilloso cercano a la superficie y suelos someros sobre materiales impermeables. Estos suelos tienen tasas de transmisión de agua muy lentas.

Este autor también propone que los grupos hidrológicos de suelo no son clases con intervalos cerrados, sino que un suelo, en función de sus características, puede ser asignado a un grupo intermedio, para posteriormente interpolar su número de curva (Figura 3.2). Es decir, suelos que presenten características intermedias entre dos grupos hidrológicos, pueden ser asignados a un nuevo grupo que represente dichas condiciones medias (por ejemplo un suelo que puede ser clasificado en el límite inferior del grupo B y en el límite superior de grupo C, puede ser clasificado como C+ o B-) (NRCS, 1985)

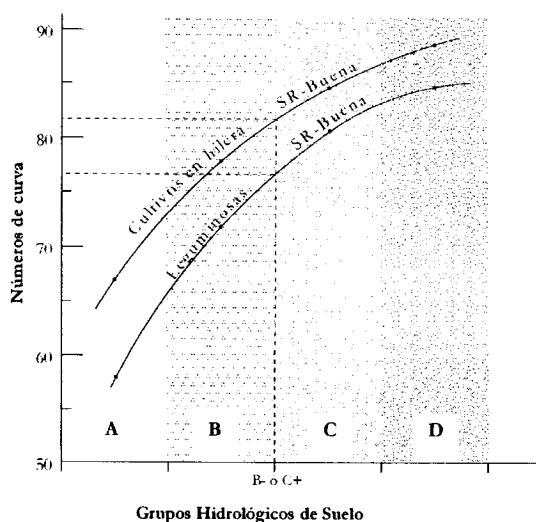


Figura 3.2: Ejemplo de interpolación del número de curva cuando se trabaja con subgrupos hidrológicos de suelos (modificado de NCRS, 1985)

Aparte de esta visión semicontinua de los grupos hidrológicos, Mockus da importancia no sólo a lo que sucede en superficie, sino que tiene en cuenta cómo los horizontes más profundos pueden controlar la entrada del agua en el suelo, incorporando este carácter a la definición de Musgrave, aunque no lo cuantifica, sino que da una clasificación cualitativa de la misma.

### 3.3.1.3. Definición del soil survey manual

En el “soil survey manual” (Soil Survey Division Staff, 1993) los grupos hidrológicos se definen en función de la conductividad hidráulica saturada:

**Grupo A:** Suelos con conductividad hidráulica saturada muy alta o por encima de la media de las altas, y en los que la capa freática está muy profunda.

**Grupo B:** Suelos con conductividad hidráulica saturada por debajo de la media de las altas o por encima de la media de las moderadamente altas, y en los que la capa freática está profunda o muy profunda.

**Grupo C:** Suelos con conductividad hidráulica saturada por debajo de la media de las moderadamente altas o por encima de la media de las moderadamente bajas, y en los que la capa freática está más profunda que somera.

**Grupo D:** Suelos con conductividad hidráulica saturada por debajo de la media de las moderadamente bajas, y/o en los que la capa freática está poco profunda o muy somera de forma transitoria a permanentemente.

La clasificación de la conductividad hidráulica saturada se muestra en la Tabla 3.2:

Tabla 3.2: Caracterización de la conductividad hidráulica saturada (modificada de Soil Survey Division Staff, 1993)

Clase	$K_{sat}$ ( $\mu\text{-m/s}$ )	$K_{sat}$ (in/h)	$K_{sat}$ (cm/h)
Muy alta	$\geq 100$	$\geq 14,17$	$\geq 36$
Alta	10 -100	1,417 – 14,17	3,6 – 36
Moderadamente alta	1 - 10	0,1417 – 1.417	0,36 – 3,6
Moderadamente baja	0,1 - 1	0,0142 – 0,1417	0,036 – 0,36
Baja	0,01 - 0,1	0,0014 – 0,0142	0,0036 – 0,036
Muy baja	$<0,01$	$<0,0014$	$<0,0036$

La clasificación de la profundidad de la capa freática propuesta es la que se muestra en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Clasificación de la profundidad de la capa freática (Soil Survey Division Staff, 1993)

Clasificación	Profundidad de la capa freática (cm)
Muy somera	$< 25$
Somera	25 a 50
Moderadamente profunda	50 a 100
Profunda	100 a 150
Muy profunda	$> 150$

Por lo que, atendiendo a estas dos clasificaciones, una vez obtenidos los valores intermedios de las clases de conductividad, los grupos hidrológicos se pueden resumir como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3.4: Caracterización de los grupos hidrológicos en función de la conductividad hidráulica saturada y de la profundidad de la capa freática

Grupo Hidrológico	$K_{sat}$ (cm/h)	Profundidad capa freática (cm)
Grupo A	$> 19,8$	$> 150$
Grupo B	1,98 – 19,8	$>100$
Grupo C	0,198 - 1,98	$>50$
Grupo D	$< 0,198$	$<50$

En esta definición de los grupos hidrológicos de suelo, presupone que la mínima conductividad hidráulica se produce en los 50 cm superiores de suelo; de no ser así hay que corregir la asignación del suelo al grupo, de tal forma que si la mínima conductividad hidráulica saturada se produce en los horizontes de profundidad 50 cm a 100 cm, la asignación de grupo se desplaza hacia un grupo hidrológico de menor infiltración. Si la profundidad a la que se produce la mínima conductividad es mayor de los 100 cm, la asignación de grupo se realiza con los valores del suelo por encima de los 100 cm, aplicando las reglas anteriormente comentadas (Soil Survey Division Staff, 1993).

Si se combinan los criterios de conductividad hidráulica saturada del suelo, profundidad de la capa freática y profundidad a la que sucede la mínima conductividad hidráulica saturada, en una tabla, es fácil de comprobar que hay situaciones de clara incertidumbre en la asignación de los grupos (Tabla 3.5).

Tabla 3.5: Asignación de los grupos hidrológicos en función de las tres variables que los definen

$K_{sat}$ (cm/h)	Profundidad $K_{sat}$ mín. (cm)	Profundidad freática (cm)				
		>150	100-150	50-100	25-50	<25
>19,8	0-50	A	B?	B-C?	C-D?	D
	>50	A	A-B?	A-B-C?	----	D
1,98-19,8	0-50	B	B	C	C-D?	D
	>50	A	A	B	----	D
0,198-1,98	0-50	C	C	C	D	D
	>50	B	B	B	C	D
<0,198	0-50	D	D	D	D	D
	>50	C	C	C	D	D

En esta etapa de definición de los grupos hidrológicos es cuando se amplía de cuatro a siete grupos, incorporándose los grupos duales (A/D, B/D y C/D), para reflejar los distintos comportamientos de los suelos cuando están drenados o no lo están.

### 3.3.1.4. Definición de Nearing et al. (1996)

Como ya se ha comentado anteriormente, estos autores relacionan la conductividad hidráulica equivalente del suelo ( $K_e$ ) con la conductividad hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) y con el número de curva ( $CM$ ). En su experiencia llegan a establecer una correspondencia entre los grupos hidrológicos de suelo y la conductividad equivalente para los suelos en barbecho, según la cual (Nearing et al., 1996):

Grupo hidrológico A:	$K_e = 14,18$	3.19
Grupo hidrológico B:	$K_e = 1,17 + 0,072 \cdot A$	3.20
Grupo hidrológico C:	$K_e = 0,50 + 0,032 \cdot A$	3.21
Grupo hidrológico D:	$K_e = 0,34$	3.22

Donde:  $K_e$  es la conductividad hidráulica equivalente en mm/h

$A$  es el porcentaje de arena según la clasificación USDA

Las regresiones realizadas por Nearing *et al.* están basadas en las estimaciones realizadas sobre treinta y cuatro suelos americanos, distribuidos como se muestra en la tabla adjunta:

Tabla 3.6: Distribución de suelos de los ensayos de Nearing *et al.* (1996)

Grupo hidrológico	Nº de muestras	Contenido de arena (%)
A	3	89 - 91
B	19	5,5 - 85
C	9	1,8 - 38,5
D	3	5,5 - 19,5

Según la teoría de Bouwer (1969, en Neitsch *et al.*, 2002), la conductividad equivalente de un suelo es aproximadamente la mitad de la conductividad hidráulica saturada, por lo que, a partir de la Tabla 3.6, se pueden definir los grupos hidrológicos de suelo como :

Tabla 3.7: Clasificación de los grupos hidrológicos en función del contenido de arena del suelo según Bouwer 1969 (en Neitsch *et al.*, 2002)

Grupo hidrológico	Contenido de Arena (%)	$K_{sat}$ (mm/h)
A	89 - 91	$\geq 28,36$
B	5,5 - 85	3,13 - 14,58
C	1,8 - 38,5	1,1 - 3,46
D	5,5 - 19,5	$\leq 0,34$

Como se puede apreciar, la definición de los grupos es discontinua y con solapes, tanto en los contenidos en arena como en el parámetro  $K_{sat}$ .

### 3.3.1.5. Definición española (MOPU, 1990)

En las instrucciones de drenaje superficial para España, editadas por el MOPU, se refleja una definición cualitativa de los grupos hidrológicos en función de algunas variables edáficas, según se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 3.8: Clasificación de grupos hidrológicos para España (MOPU, 1990)

Grupo hidrológico	Infiltración (cuando están muy húmedos)	Potencia	Textura	Drenaje
A	Rápida	Grande	Arenosa Areno-limosa	Perfecto
B	Moderada	Media a grande	Franco-arenosa Franca Franca-arcillosa-arenosa Franco-limosa	Bueno a moderado
C	Lenta	Media a pequeña	Franco-arcillosa Franco-arcillosa-limosa Arcillo-arenosa	Imperfecto
D	Muy lenta	Pequeña (litosuelo u horizonte de arcilla)	Arcillosa	Pobre muy pobre

### 3.3.1.6. Definición de Ferrer (2003)

Esta autora establece equivalencias entre los grupos hidrológicos de suelo y las tasas de infiltración mínimas, intentando adaptar la clasificación cualitativa de la infiltración mínima de

un suelo propuesta por Trueba *et al.* (2000) y Porta *et al.* (1994) (Tabla 3.9), en una clasificación cuantitativa de los grupos hidrológicos de suelo (Tabla 3.10) (Ferrer, 2003).

Tabla 3.9: Equivalencias entre las clases de infiltración establecidas por Trueba *et al.*, 2000 y Porta *et al.*, 1999 (en Ferrer, 2003)

Infiltración cualitativa	$f_c$ (mm/h)
Muy baja	$f_c \leq 1$
Baja	$1 < f_c \leq 5$
Media	$5 < f_c \leq 20$
Alta	$20 < f_c \leq 50$
Muy alta	$f_c > 50$

Tabla 3.10: Equivalencias entre tasas de infiltración y grupos hidrológicos de suelo (Ferrer, 2003)

Infiltración cualitativa	$f_c$ (mm/h)	Grupo hidrológico de suelo
Muy baja	$f_c \leq 1$	Grupo D
Baja	$1 < f_c \leq 5$	Grupo C
Media	$5 < f_c \leq 20$	Grupo C
Alta	$20 < f_c \leq 50$	Grupo B
Muy alta	$f_c > 50$	Grupo A

Al comparar entre sí las definiciones más cuantitativas de los grupos hidrológicos de suelo, podemos encontrar variaciones importantes en la definición de los grupos, como se puede ver en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11: Asignación de grupos hidrológicos de suelos en función de la tasa de transmisión de agua en el suelo, según diversos autores

Grupo hidrológico	Musgrave $f_c$ (mm/h)	Soil survey manual $K_{sat}$ (mm/h)	Nearing $K_{sat}$ (mm/h)	Ferrer $f_c$ (mm/h)
Grupo A	$f_c > 7,62$	$K_{sat} > 198$	$K_{sat} \geq 28,36$	$f_c \geq 50$
Grupo B	$3,81 < f_c \leq 7,62$	$19,8 < K_{sat} \leq 198$	$3,13 < K_{sat} \leq 14,58$	$20 < f_c \leq 50$
Grupo C	$1,27 < f_c \leq 3,81$	$1,98 < K_{sat} \leq 19,8$	$1,1 < K_{sat} \leq 3,46$	$1 < f_c \leq 20$
Grupo D	$f_c \leq 1,27$	$K_{sat} \leq 1,98$	$K_{sat} \leq 0,34$	$f_c \leq 1$

Hay que tener en cuenta que la primera definición de Musgrave hace referencia de forma cuantitativa a la tasa mínima de infiltración como la velocidad de penetración del agua en el suelo a través de su superficie, mientras que las demás definiciones están basadas en la conductividad hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ), que representa la velocidad de movimiento del agua a través de todo el perfil edáfico. En principio la tasa de infiltración mínima tiende a igualarse con la conductividad hidráulica saturada a medida que el suelo se satura de humedad, aunque para Musgrave (1956) el principal factor que determina la cantidad de agua que entra en el suelo son las condiciones superficiales del suelo y no lo que sucede en profundidad.

Esta situación queda reflejada en la revisión de los grupos hidrológicos de Mockus, quien conjuga las tasas mínimas de infiltración con tasas de transmisión del agua a través del perfil edáfico.

En cuanto a la definición de Nearing *et al.*, hay que señalar que es un trabajo realizado con muy pocos datos y que los valores obtenidos son muy estimativos, por lo que no deben ser tomados como valores guía de los grupos hidrológicos.

Para la definición de Ferrer (2003), hay que tener en cuenta que parte de una tabla de infiltración mínima propuesta para evaluar las prácticas de riego en superficie por Trueba *et al.* (2000) y Porta *et al.* (1999) (en Ferrer, 2003) y que no tiene en cuenta otras variables edáficas, como la profundidad o las características del drenaje natural del suelo.

Por lo tanto, la definición que mejor puede representar la realidad de un suelo, en cuanto al movimiento del agua en su interior, parece ser la que propone el *soil survey manual*. Lógicamente es la más compleja de aplicar, puesto que además de una interpretación de la infiltración o de la conductividad hidráulica saturada de un suelo, tiene en cuenta otras características del perfil edáfico.

### 3.3.2. Los grupos hidrológicos de suelo y su relación con la textura

En la actualidad existen diversas propuestas de sistematización de los grupos hidrológicos de suelo en función de las clases texturales; todas ellas se basan en la clasificación textural propuesta por el *United States Department of Agriculture* (USDA). Las clases texturales se definen a partir de la distribución porcentual en peso de las distintas fracciones finas (< 2 mm) del suelo. La clasificación USDA establece 12 clases texturales en función del contenido de arena (partículas de diámetros desde 2 mm a 0,05 mm), de limo (partículas de diámetros desde 0,05 mm a 0,002 mm) y de arcilla (partículas de diámetro inferior a 0,002 mm) (Figura 3.3).

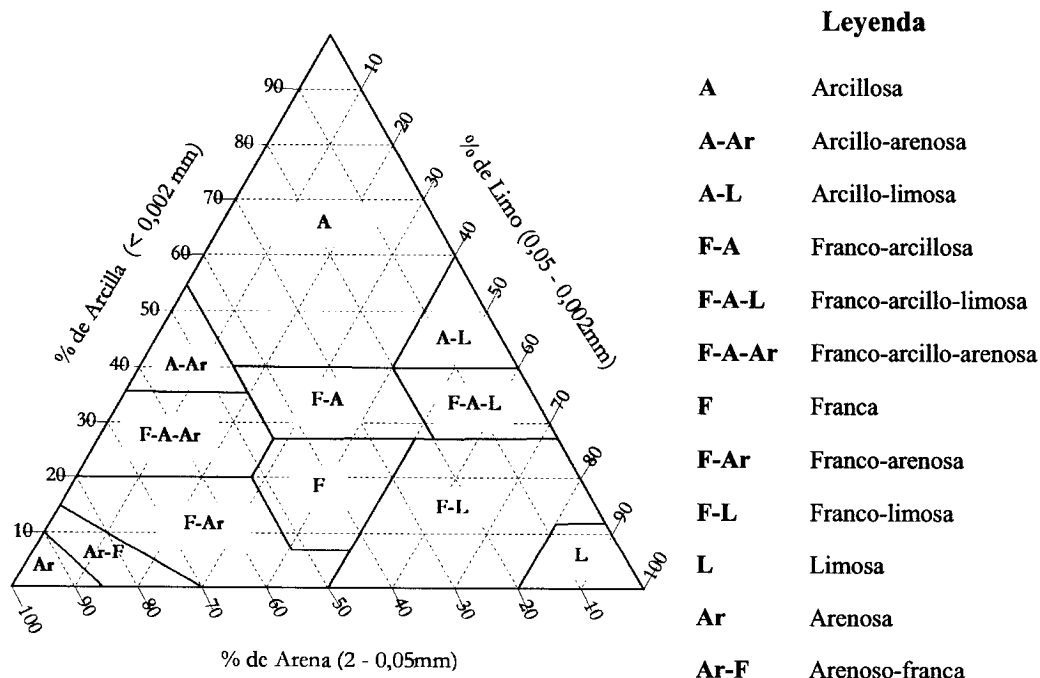


Figura 3.3: Triángulo textural según clasificación USDA

La Figura 3.3 es la representación clásica de las clases texturales en un triángulo equilátero; también se puede trasladar dicha clasificación a un triángulo rectángulo, en el que solamente se representan los porcentajes de arcilla y arena, siendo el porcentaje de limo la diferencia hasta cien de la suma de estas dos clases. Esta forma de representación recibe el nombre de triángulo textural ortonormal (Figura 3.4) y permite una sistematización más

sencilla de los datos texturales, puesto que las clases de textura están referidas a dos ejes normales entre sí y no a tres ejes con una relación no ortogonal.

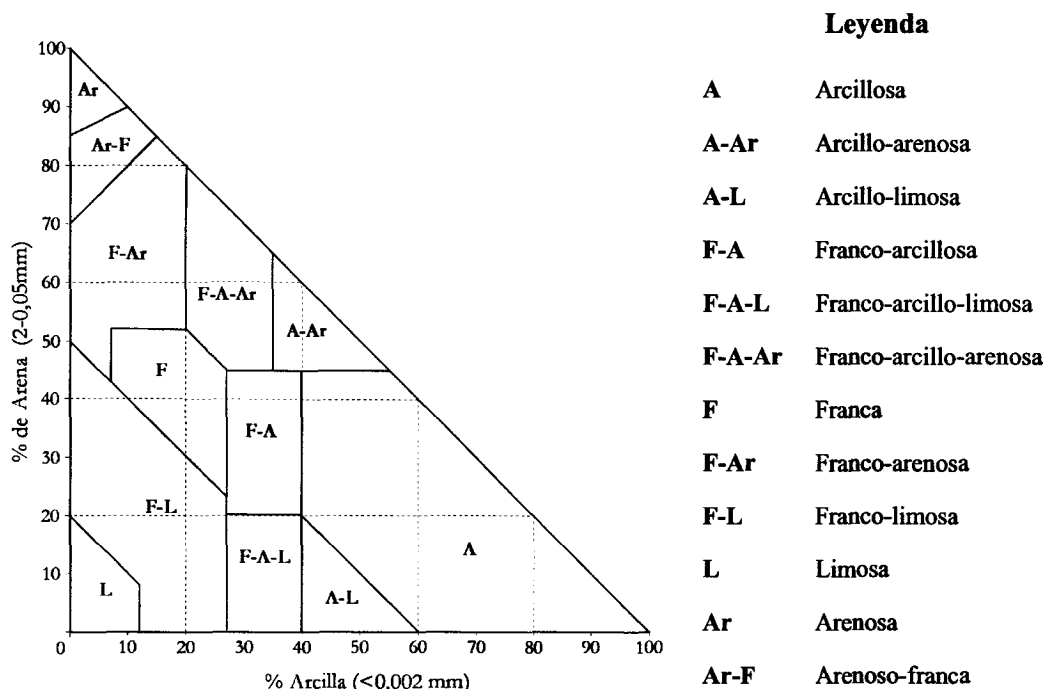


Figura 3.4: Triángulo textural ortogonal según clasificación USDA

Un intento por racionalizar la asignación de los grupos hidrológicos ha consistido en relacionar la textura de los suelos con los grupos hidrológicos y, al igual que sucede con las definiciones de los grupos expuestas anteriormente, existen diversas asignaciones; a continuación se muestran las más conocidas.

### 3.3.2.1. Relación de Rawls et al. (1983)

La relación que establecen Rawls et al. (1983) (SCS, 1986) es una de las más difundidas, incluso ha llegado a ser admitida por el órgano de referencia del número de curva (*Soil Conservation Service*). Este autor propone (Tabla 3.12):

Tabla 3.12: Correspondencia entre la textura y los grupos hidrológicos de suelo (Rawls et al., 1983; en SCS 1986 y en Maidment, 1992)

Grupo hidrológico	Textura del suelo
Grupo A	Arenosa
	Arenoso-franca
	Franco-arenosa
Grupo B	Franca
	Franco-limosa
Grupo C	Franco-arcillo-arenosa
Grupo D	Franco-arcillosa
	Franco-arcillo-limosa
	Arcillo-arenosa
	Arcillo-limosa
	Arcillosa

La clasificación original de Rawls *et al.* no afecta a la textura limosa, pero algunos autores, quizás por extensión o proximidad, asignan el grupo hidrológico de suelo B a dicha textura (Ferrer, 2003).

También cabe destacar que el organismo de referencia del número de curva (SCS) propone utilizar esta clasificación de los grupos hidrológicos en aquellas ocasiones en las que los perfiles edáficos presentan fuertes alteraciones que impiden utilizar otros métodos de clasificación, como las propias definiciones o la lista de series de suelo americana (SCS, 1986).

### 3.3.2.2. Relación de Témez (1987)

Témez, en su adaptación del método del número de curva al territorio español, propone la siguiente relación entre la textura de los suelos y los grupos hidrológicos:

Tabla 3.13: Correspondencia entre la textura y los grupos hidrológicos de suelo (Témez, 1987)

Grupo hidrológico	Textura del suelo
Grupo A	Arenosa
	Arenoso-franca
Grupo B	Franco-arenosa
	Franca
	Franco-limosa
	Franco-arcillosa (mitad franca, Franco-arcillo-limosa)
Grupo C	Limosa
	Franco-arcillo-arenosa
	Franco-arcillosa (mitad arcillosa, Franco-arcillo-arenosa)
	Arcillo-arenosa
Grupo D	Franco-arcillosa-limosa
	Arcillo-limosa
	Arcillosa

### 3.3.2.3. Relación del MOPU (1990)

El Ministerio de Obras Públicas, dentro de las “Instrucciones de drenaje superficial”, incluye una relación, para el territorio nacional, entre los grupos hidrológicos de suelo y las texturas, que se puede ver en la Tabla 3.14

Tabla 3.14: Correspondencia entre la textura y los grupos hidrológicos de suelo (MOPU, 1990)

Grupo Hidrológico	Textura del suelo
Grupo A	Arenosa
	Arenoso-franca
Grupo B	Franco-arenosa
	Franca
	Franco-limosa
	Franco-arcillo-arenosa
Grupo C	Limosa
	Franco-arcillo-limosa
	Franco-arcillosa
	Arcillo-arenosa
Grupo D	Arcillo-limosa
	Arcillosa

### 3.3.2.4. Relación del MOPT (1992)

En 1992 el Ministerio de Obras Públicas y Transportes publicó una nueva relación entre los grupos y las texturas de suelo, que se muestra en la Tabla 3.15 (MOPT, 1992):

Tabla 3.15: Correspondencia entre la textura y los grupos hidrológicos de suelo (MOPT, 1992)

Grupo hidrológico	Textura del suelo
Grupo A	Arenosa
	Arenoso-franca (mitad más arenosa)
	Limoso
Grupo B	Arenoso-franca (mitad más arcillosa)
	Franco-arenosa
	Franco-limosa
Grupo C	Franca
	Franco-arcillo-limosa
	Franco-arcillo-arenosa
	Franco-arcillosa
	Arcillo-arenosa
Grupo D	Arcillo-limosa
	Arcillosa

### 3.3.2.5. Relación de Ferrer (2003)

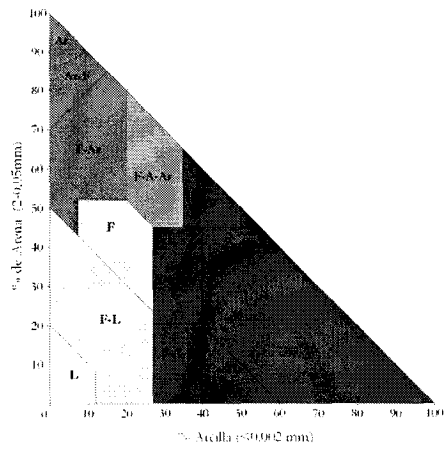
Esta autora asigna los grupos hidrológicos de suelo basándose en las tasas medias de infiltración por clases texturales obtenidas a través de una función de edafotransferencia ajustada para el territorio peninsular. La propuesta de dicha asignación se muestra en la Tabla 3.16:

Tabla 3.16: Correspondencia entre la textura y los grupos hidrológicos de suelo (Ferrer, 2003)

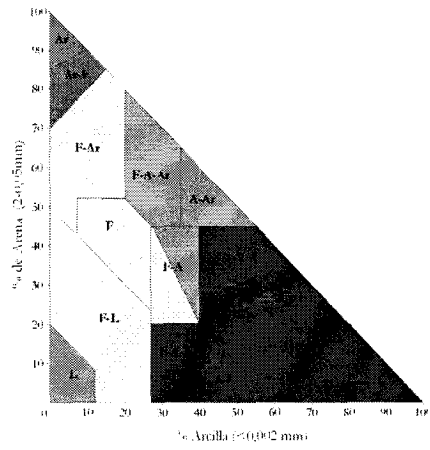
Grupo hidrológico	Textura del suelo
Grupo A	Arenosa
	Arenoso-franca
Grupo B	Franco-arenosa
Grupo C	Franca
	Franco-arcillo-limosa
	Franco-arcillo-arenosa
	Franco-arcillosa
	Arcillo-arenosa
Grupo D	Franco-limosa
	Arcillosa
	Limosa
	Arcillo-limosa

### 3.3.2.6. Relación entre las distintas clasificaciones propuestas

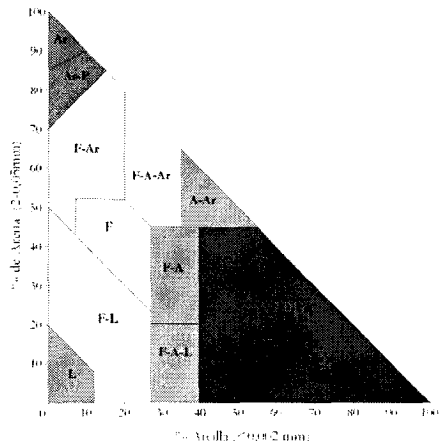
Todas estas relaciones se pueden expresar sobre un triángulo textural ortonormal, para comprender mejor las diferencias existentes entre ellas.



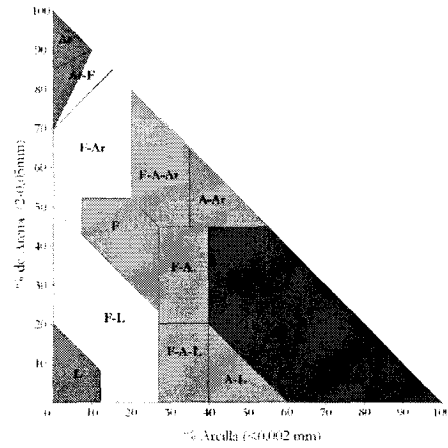
Rawls et al. (1983)



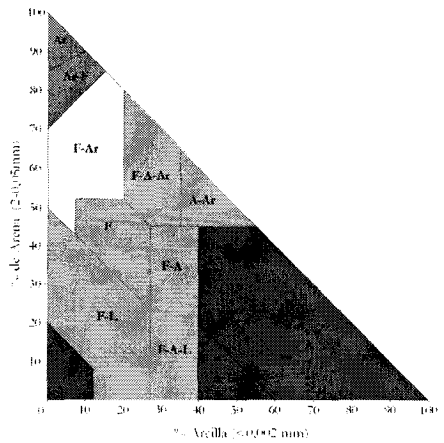
Temez (1987)



MOPU (1990)



MOPT (1992)



Ferrer (2003)

**Legenda**

- Sin definir
- Grupo A
- Grupo B
- Grupo C
- Grupo D

Figura 3.5: Propuestas de diversos autores de las relaciones entre la textura y los grupos hidrológicos de suelo

Observando las definiciones de los grupos hidrológicos de suelo, así como las relaciones entre estos y la textura del suelo, se puede concluir que la asignación de los grupos es muy dispar, lo que puede provocar errores de consideración en la estimación del número de curva, como ya se vio en el análisis de sensibilidad de las variables que determinan el número de curva.

Por otro lado, la asignación de los grupos a clases discretas provoca que suelos muy próximos en comportamiento hídrico resulten clasificados en grupos distintos, al presentar pequeñas variaciones en sus propiedades físicas. Esta circunstancia se puede observar claramente en la Figura 3.5, donde variaciones inferiores a un 1% en algunas de las fracciones granulométrica, pueden hacer que ese suelo se clasifique un grupo D, B o C. Esta deficiencia intenta ser paliada por Mockus al proponer clases intermedias de grupos hidrológicos, pero aun así el problema sigue existiendo.

Por lo tanto, la equivalencia textural con los grupos hidrológicos no debe ser un criterio válido por sí mismo, puesto que, además de los errores señalados, no tiene en cuenta otras variables de importancia en el comportamiento hídrico de los suelos, ya indicadas anteriormente. Sí ha de reconocerse que la textura del suelo tiene importancia en la definición de los grupos hidrológicos, pues de ella dependen propiedades hídricas como la conductividad hidráulica saturada.

En vista de esto, lo más lógico parece ser definir los grupos hidrológicos como una combinación de factores edáficos, como la propuesta por el *soil survey manual* (Epígrafe 3.3.1.3), en la que se combina: la conductividad hidráulica saturada mínima del perfil edáfico, la profundidad a la que se produce esta y el nivel de la capa freática.

En esta última línea está trabajando el NRCS, organismo que está intentando automatizar la asignación de los suelos a los grupos hidrológicos, aplicando los criterios publicados a las propiedades físicas e hídricas de los suelos a través de un sistema de lógica borrosa, con variables como la profundidad a la capa freática, la conductividad hidráulica saturada mínima en los 100 cm superiores de suelo, la profundidad a un horizonte restrictivo y la textura (Nielsen y Hjelmfelt, 1998).

En cualquiera de los casos la conductividad hidráulica saturada mínima del perfil edáfico parece ser una de las variables con mayor importancia en la determinación de los grupos hidrológicos, por lo que, a continuación, se va a desarrollar un epígrafe en el que se analiza su evaluación.

### **3.4. EVALUACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA SATURADA DEL SUELO ( $K_s$ )**

Este parámetro hídrico del suelo puede ser obtenido a través de medición directa en campo o en laboratorio; cualquiera de las dos metodologías requieren un trabajo intenso y un gasto de tiempo excesivo (Sobieraj *et al.*, 2001). Además, los datos obtenidos por estos procesos son puntuales, para una característica que muestra una gran variabilidad espacial y temporal (Ferrer, 2003).

La importancia, dentro del ciclo hidrológico, que han adquirido ciertos parámetros hídricos del suelo, unido a los problemas de medida directa ya expuestos, ha ocasionado que se hayan desarrollado métodos indirectos de evaluación de las propiedades hídricas de los suelos, a través de la valoración de otras propiedades edáficas de fácil medida o con una mayor

estandarización, como: la textura, la materia orgánica, la densidad aparente o la capacidad de retención de agua.

Existen distintas técnicas de evaluación indirecta de las características hídricas de los suelos, si bien la conductividad hidráulica saturada suele estimarse a través de las funciones de edafotransferencia (FETs) (*pedrotransfer funtions*).

### 3.4.1. Las funciones de edafotransferencia (FETs)

Genéricamente una función de edafotransferencia es una ecuación de regresión, derivada de un análisis estadístico, que relaciona distintas propiedades de un suelo (Wösten *et al.*, 2001). En este caso podemos decir que se trata de una ecuación de regresión para estimar las propiedades hídricas de un suelo a partir de propiedades físicas del mismo, como textura, densidad aparente, materia orgánica, o porosidad (Martínez y Ceballos, 2001). En definitiva son funciones que nos ayudan a transformar lo “*que tenemos*” en lo “*que queremos*” (Wösten *et al.*, 2001).

Actualmente se pueden distinguir dos tipos de funciones de edafotransferencia:

- Continuas: con una única ecuación obtienen los parámetros hídricos del suelo en función de sus propiedades físicas.
- De clases: presentan distintas ecuaciones para obtener los parámetros hídricos en función de los grupos o categorías en los que se puedan subdividir las propiedades físicas de los suelos (según: texturas, tipos de suelos, litologías).

A continuación se van a exponer las principales funciones de edafotransferencia que existen para el cálculo de la conductividad hidráulica saturada.

#### 3.4.1.1. Cosby *et al.* (1984)

La función de edafotransferencia propuesta por estos autores sólo tiene en cuenta los porcentajes de arena y de arcilla en la determinación de la conductividad hidráulica saturada y la expresión es la siguiente:

$$K_s = 25,4 \cdot 10^{(-0,6+0,012 \cdot A - 0,0064 \cdot Ar)} \quad 3.23$$

Donde:  $K_s$  es la conductividad hidráulica saturada en mm/h

$A$  es la fracción granulométrica en tanto por ciento de arena (USDA)

$Ar$  es la fracción granulométrica en tanto por ciento de arcilla (USDA)

Representando esta ecuación sobre el diagrama textural (Figura 3.6), podemos observar las variaciones de la conductividad hidráulica saturada en relación con la textura.

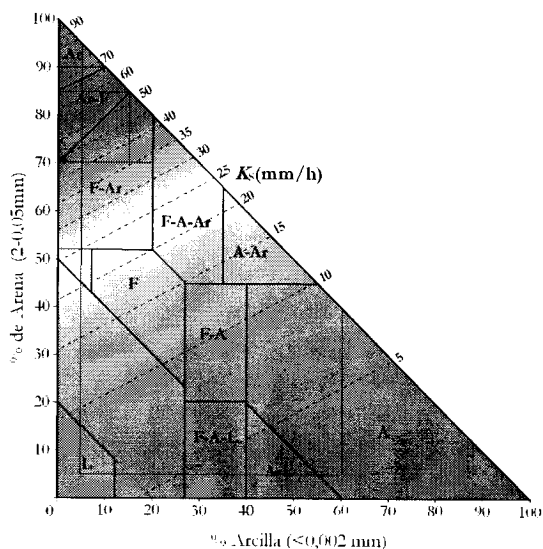


Figura 3.6: Variación de la conductividad hidráulica saturada en función de la textura, según Cosby et al

### 3.4.1.2. Saxton et al. (1986)

La función de edafotransferencia propuesta por estos autores tiene en cuenta las fracciones granulométricas del suelo (arcilla y arena) y añade el contenido de agua del suelo saturado. La ecuación propuesta es la que se muestra a continuación.

$$K_s = 10 \cdot e^{\left[ 12,012 - 0,0755 \cdot Ar + \frac{-3,895 + 0,03671 \cdot Ar - 0,01103 \cdot A + 0,000875 \cdot Ar^2}{\theta_s} \right]} \quad 3.24$$

Donde:  $K_s$  es la conductividad hidráulica saturada en mm/h

$Ar$  es la fracción granulométrica en tanto por ciento de arena (USDA)

$A$  es la fracción granulométrica en tanto por ciento de arcilla (USDA)

$\theta_s$  es el contenido de humedad del suelo saturado y que, para estos autores, toma el valor de:

$$\theta_s = 0,332 - 0,0007251 \cdot Ar + 0,1276 \cdot \log A \quad 3.25$$

Si sustituimos la ecuación 3.25 en la 3.24 se puede escribir la ecuación de la conductividad hidráulica saturada de un suelo como se muestra a continuación:

$$K_s = 10 \cdot e^{\left[ 12,012 - 0,0755 \cdot Ar + \frac{-3,895 + 0,03671 \cdot Ar - 0,01103 \cdot A + 0,000875 \cdot Ar^2}{0,332 - 0,0007251 \cdot Ar + 0,1276 \cdot \log A} \right]} \quad 3.26$$

Representando esta ecuación 3.26 sobre el diagrama textural (Figura 3.7) se puede apreciar la distribución de la conductividad hidráulica saturada en relación a las clases texturales.

La función de edafotransferencia está definida para los rangos texturales comprendidos entre:

5% ≤ Arena ≤ 30% con 8% ≤ Arcilla ≤ 58%

y

30% ≤ Arena ≤ 95% con 5% ≤ arcilla ≤ 60%.

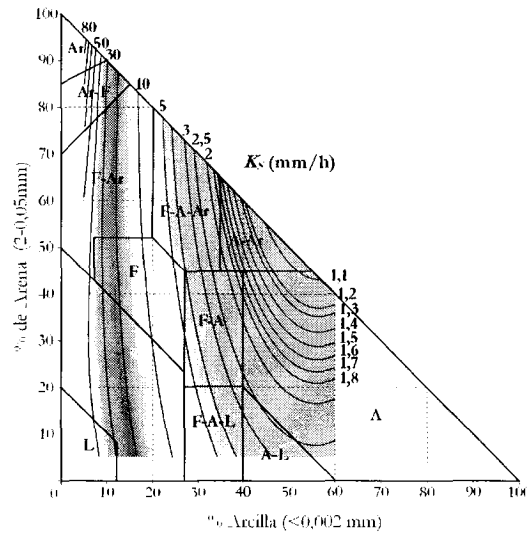


Figura 3.7: Distribución de la conductividad hidráulica saturada en relación a las clases texturales, según Saxton et al.

### 3.4.1.3. Brakensiek et al. (1984)

Brakensiek et al. proponen una ecuación de edafotransferencia algo compleja, en la que la conductividad hidráulica saturada del suelo no sólo depende de las fracciones granulométricas, sino que también lo hace de la porosidad. La ecuación propuesta es:

$$K_s = 10 \cdot e^{\left[ \begin{aligned} &19,52348 \cdot \phi - 8,96847 - 0,028212 \cdot A + 0,00018107 \cdot Ar^2 - 0,0094125 \cdot A^2 - 8,395215 \cdot \phi^2 + \\ &0,077718 \cdot A \cdot \phi - 0,00298 \cdot A^2 \cdot \phi^2 - 0,019492 \cdot Ar^2 \cdot \phi^2 + 0,0000173 \cdot A^2 \cdot Ar + 0,02733 \cdot Ar^2 \cdot \phi + 0,001434 \cdot A^2 \cdot \phi - 0,0000035 \cdot Ar^2 \cdot A \end{aligned} \right]} \quad 3.27$$

Donde:  $K_s$  es la conductividad hidráulica saturada en mm/h

$Ar$  es la fracción granulométrica en tanto por ciento de arena (USDA)

$A$  es la fracción granulométrica en tanto por ciento de arcilla (USDA)

$\phi$  es la porosidad del suelo, en tanto por uno, que es igual a:

$$\phi = \left( 1 - \frac{D_{ap}}{D_{par}} \right) \quad 3.28$$

Donde:  $D_{ap}$  es la densidad aparente del suelo ( $\text{g/cm}^3$ )

$D_{par}$  es la densidad de las partículas de suelo (valor normal de referencia  $2,65 \text{ g/cm}^3$  (Saxton et al., 1986)).

La densidad aparente del suelo se puede estimar a través de la siguiente expresión (Rawls *et al.*, 1992):

$$D_{ap} = \frac{100}{\frac{\%MO}{Densidad\ MO} + \frac{100 - \%MO}{D_{ap}mi}} \quad 3.29$$

Donde:  $D_{ap}$  es la densidad aparente del suelo ( $g/cm^3$ )

$\%MO$  es el porcentaje de materia orgánica

$Densidad\ MO$  es la densidad de la materia orgánica (valor medio  $0,224\ g/cm^3$  (Rawls *et al.*, 1992))

$D_{ap}mi$  es la densidad aparente mineral del suelo, que se estima a partir del ábaco propuesto por Rawls *et al.* (1992) y que se muestra a continuación:

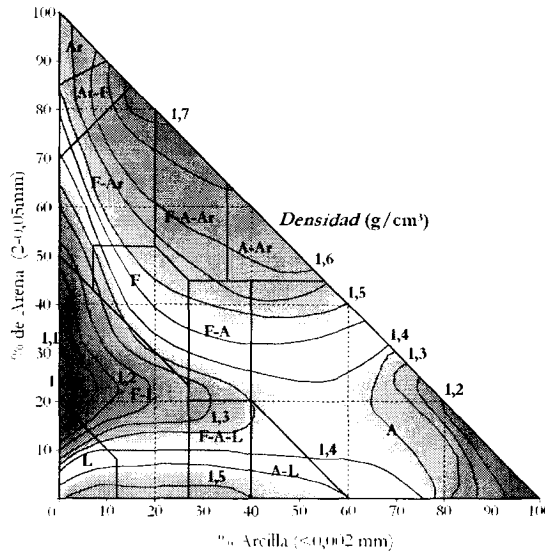


Figura 3.8: Ábaco para la determinación de la densidad aparente mineral (modificado de Rawls *et al.*, 1992)

En la ecuación 3.29 para el cálculo de la densidad aparente de un suelo participa la materia orgánica, pero se va a suponer cero, con el fin de poder comparar los distintos métodos de cálculo. Este supuesto se realiza ya que la mayoría de los suelos de la cuenca mediterránea poseen un contenido de materia orgánica muy bajo.

Aplicando las ecuaciones 3.27, 3.28 y 3.29 se puede representar la conductividad hidráulica saturada sobre el diagrama textural ortonormal según Brakensiek *et al.* (Figura 3.9).

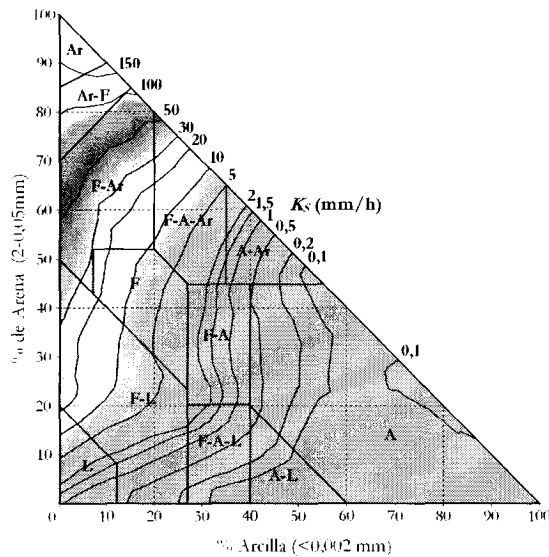


Figura 3.9: Distribución de la conductividad hidráulica saturada en relación a las clases texturales, según Brakensiek et al.

#### 3.4.1.4. Modelo Rosetta (1999)

El modelo Rosetta consiste en una red neuronal aplicada a la estimación de los parámetros hídricos de los suelos, según el modelo de retención de agua de Van Genuchten de 1980 (Schaap, 1999), el cual tiene la siguiente expresión:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha \cdot h)^n]^{1-1/n}} \quad 3.30$$

Donde:  $\theta(h)$  representa la curva de retención de agua ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ), como una función de la presión de succión (cm).

$\theta_r$  es el contenido de agua residual o humedad residual ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )

$\theta_s$  es el contenido de agua saturado o humedad saturada ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )

$h$  es la presión de succión (cm)

$\alpha$  es un parámetro de forma de la curva (1/cm)

$n$  es un parámetro de forma de la curva

La ecuación 3.30 puede ser escrita en función de la saturación efectiva ( $S_e$ ), como se muestra a continuación:

$$S_e = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{[1 + (\alpha \cdot h)^n]^{1-1/n}} \quad 3.31$$

Esta ecuación 3.31 puede ser usada en conjunción con el modelo de distribución de la porosidad de Mualem, con el objetivo de obtener el modelo de Van Genuchten (Schaap, 1999):

$$K(S_e) = K_o \cdot S_e^L \cdot \left\{ 1 - \left[ 1 - S_e^{n/(n-1)} \right]^{1-1/n} \right\}^2 \quad 3.32$$

Donde:  $K(S_e)$  es la conductividad hidráulica insaturada a la saturación efectiva (cm/día)

$K_o$  es la conductividad hidráulica saturada (cm/día)

$S_e$  es la saturación relativa

$L$  es un parámetro empírico que expresa la tortuosidad y la conectividad de los poros del suelo, y que toma el valor de 0,5

$n$  es un parámetro de forma de la curva

Las redes neuronales artificiales permiten modelar sistemas complejos de una manera relativamente simple, donde las no linealidades del sistema son absorbidas mediante técnicas de aprendizaje y entrenamiento de la red. La ventaja que presentan las redes neuronales frente a los métodos tradicionales de estimación de las funciones de edafotransferencia, es que no requieren un modelo conceptual a priori (Schaap, 1999), lo que, unido a su capacidad para imitar el comportamiento de los sistemas complejos al variar la potencia de la influencia que ejerce cada componente de la red en los demás, así como su gran capacidad de variación de las estructuras de interconexiones entre componentes y de sus relaciones, hace de las redes elementos de cálculo muy potentes.

Así, topológicamente, una red neuronal es una estructura de nodos interconectados organizada en capas y ajustada a través de factores de peso. En una primera instancia, la red aprende de un conjunto de datos definidos de entrada y salida, para luego aplicarla a nuevos patrones de entrada y predecir el comportamiento de salida (Figura 3.10).

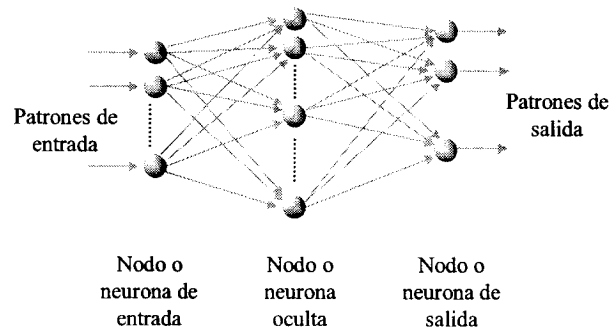


Figura 3.10: Esquema de una red artificial neuronal

Los modelos basados en redes neuronales involucran la definición de las principales variables que influyen como variables de entrada y variables de salida. Para el caso de las propiedades hídricas del suelo se puede observar la Figura 3.11.

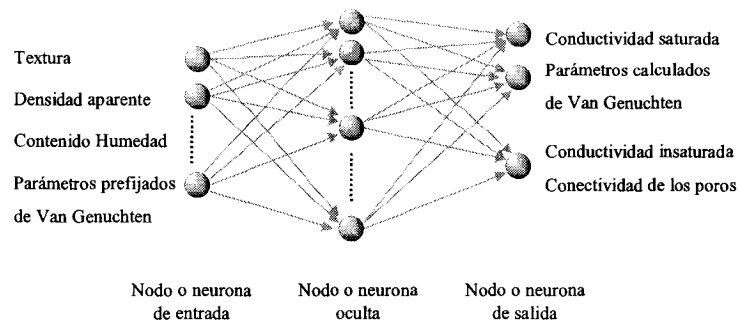


Figura 3.11: Esquema de la red neuronal del modelo Rosetta

Por tanto, las variables de entrada del modelo son las fracciones granulométricas del suelo (clasificación USDA), la densidad aparente ( $\text{g/cm}^3$ ), la presión de succión (cm), complementándose con los parámetros del modelo de Van Genuchten que tiene almacenados ( $\theta_r, \theta_s, \alpha$  y  $n$ ). Para ofrecer como datos de salida: la conductividad hidráulica saturada, la insaturada, la conectividad de los poros y los nuevos parámetros del modelo de Van Genuchten ( $\theta_r, \theta_s, \alpha$  y  $n$ ).

Rosetta permite establecer distintos niveles de predicción en función de los datos de partida, como se muestra en la Tabla 3.17. En este caso se parte de las fracciones granulométricas del suelo, por lo que el modelo predictivo aplicado es el SSC. En un segundo paso se ha calculado la densidad aparente del suelo de distintas fracciones granulométricas, a través de la ecuación 3.29, con el fin de aplicar el siguiente modelo SSCDB.

Tabla 3.17: Modelos predictivos y variables necesarias del modelo Rosetta

Modelo predictivo	VARIABLES NECESARIAS
TXT	Nombre de la clase textural
SSC	Porcentaje de arena, limo y arcilla (USDA)
SSCBD	Porcentaje de arena, limo y arcilla (USDA) Densidad aparente del suelo ( $\text{g/cm}^3$ )
SSCBDTH33	Porcentaje de arena, limo y arcilla (USDA) Densidad aparente del suelo ( $\text{g/cm}^3$ ) Contenido de agua del suelo a 33kPa
SSCBDTH331500	Porcentaje de arena, limo y arcilla (USDA) Densidad aparente del suelo ( $\text{g/cm}^3$ ) Contenido de agua del suelo a 33kPa Contenido de agua del suelo a 15.000kPa

Aplicando los modelos SSC y SSCBD sobre el triángulo textural obtenemos los siguientes resultados:

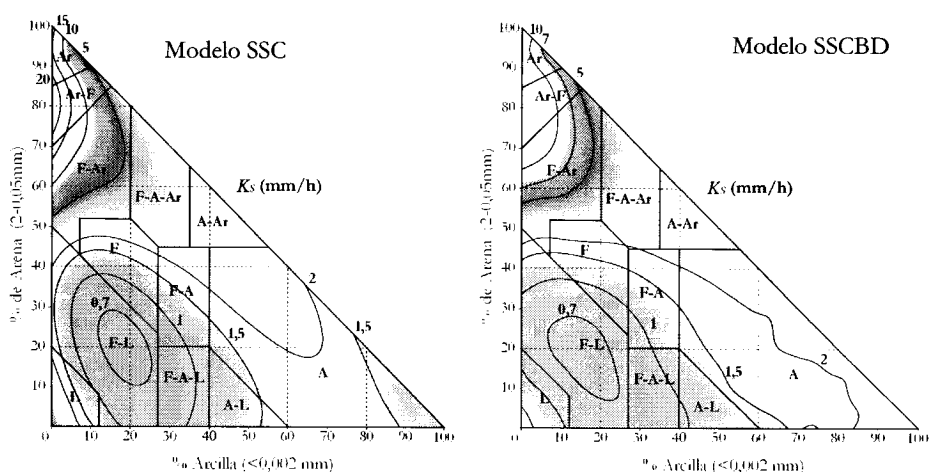


Figura 3.12: Modelo predictivo SSC y SSCBD de la conductividad hidráulica saturada según el modelo Rosetta

### 3.4.1.5. Ferrer (2003)

Esta autora estima una función de edafotransferencia para el cálculo de la conductividad hidráulica saturada en los principales suelos peninsulares a partir de 3.172 datos de horizontes edáficos. La ecuación propuesta corresponde con una ecuación de regresión multivariable en la que se incluye la arena, la arcilla y la materia orgánica, obteniendo un ajuste muy aceptable ( $R^2=0,715$ ) con la siguiente ecuación (Ferrer *et al.*, 2004):

$$K_s = -4,994 + 0,56728 \cdot A - 0,131 \cdot Ar - 0,0127 \cdot MO \quad 3.33$$

Donde:  $K_s$  es la conductividad hidráulica saturada en mm/h

$Ar$  es la fracción granulométrica en tanto por ciento de arena (USDA)

$A$  es la fracción granulométrica en tanto por ciento de arcilla (USDA)

$MO$  es el porcentaje de materia orgánica

Con el objetivo de representar los valores de la conductividad hidráulica saturada obtenidos de la ecuación 3.33 sobre el triángulo textural ortonormal, se ha prescindido de la materia orgánica ( $MO = 0$ ). Esta simplificación de la fórmula se ha realizado basándose en varias circunstancias:

- En la mayoría de los suelos los contenidos significativos de materia orgánica aparecen en los horizontes superficiales, mientras que en los más profundos los contenidos tienden a ser nulos.
- La variación de la conductividad hidráulica saturada introducida por la materia orgánica en la fórmula es mínima, puesto que un suelo con un contenido de materia orgánica del 10% (valor extremadamente alto para la mayoría de los suelos peninsulares) supondría una reducción de 0,127 mm/h de la conductividad.
- El efecto de la materia orgánica sobre la conductividad hidráulica saturada es difícil de evaluar, pero interpretando las teorías de algunos autores se puede decir que la materia orgánica afecta a la estructura del terreno, por tanto, a la porosidad y

lógicamente, a la conductividad equivalente de agua en el suelo (Saxton *et al.*, 1986). Aunque es difícil valorar el incremento de conductividad en relación al aumento de la materia orgánica, sí parece que la presencia de ésta tiende a mejorar las tasas de trasmisión de agua en el suelo, al contrario de lo que propone la fórmula de Ferrer.

Representando la ecuación sobre el diagrama orthonormal y despreciando el contenido de materia orgánica se obtiene la siguiente figura (Figura 3.13):

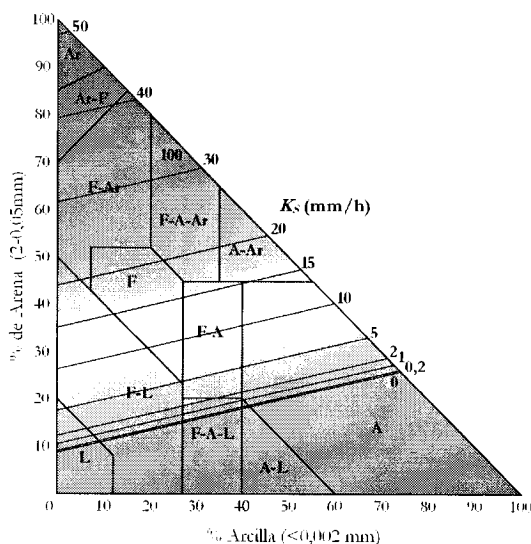


Figura 3.13: Distribución de la conductividad hidráulica saturada en relación con las clases texturales, según Ferrer *et al.*

En la Figura 3.13 se observa que los suelos con bajos contenidos de arena (por debajo del 20%) presentarían conductividades hidráulicas próximas a cero o, incluso, negativas. Al carecer de sentido, el autor propone que esos valores negativos sean tomados como valores de conductividad hidráulica saturada iguales a cero (Ferrer, 2003).

#### 3.4.1.6. Comparación de las distintas funciones de edafotransferencia estudiadas

Para comprender mejor las diferencias existentes entre las distintas distribuciones de la conductividad hidráulica saturada respecto de las clases texturales propuestas por los distintos autores, se ha realizado un análisis estadístico por grupos, el cual se muestra en la Tabla 3.18:

Tabla 3.18: Relaciones de las clases texturales con las funciones de edafotransferencia propuestas ( $K_s$  en mm/h)

		Clases texturales											
		Arcillosa (A)	Arcillo-limosa (A-L)	Franco-arcillo-limosa (F-A-L)	Franco-limosa (F-L)	Limosa (L)	Franco-arcillosa (F-A)	Franca (F)	Arcillo-arenosa (A-Ar)	Franco-arcillo-arenosa (F-A-Ar)	Franco-arenosa (F-Ar)	Areno-franca (Ar-F)	Arenosa (Ar)
Cosby	Mín	1,5	2,6	3,6	4,3	5,4	6,2	8,2	9,8	13,2	19,0	44,3	66,4
	Máx	12,2	6,1	7,5	25,2	11,0	14,8	24,2	22,9	43,2	53,3	66,9	100,6
	Media	4,9	3,9	5,2	10,3	7,4	9,8	15,6	14,6	23,1	33,5	56,2	77,0
	Desv. estándar	2,4	0,7	0,9	4,2	1,2	2,0	3,5	2,7	6,1	7,9	5,5	7,8
Brakensiek	Mín	0,0	0,0	0,0	0,2	0,6	0,5	2,5	0,1	1,2	9,0	68,3	125,6
	Máx	0,7	0,7	2,5	41,2	22,5	3,3	29,0	4,8	62,4	115,3	239,5	382,2
	Media	0,1	0,1	0,6	9,6	3,3	1,5	8,5	0,9	10,6	40,5	114,6	246,4
	Desv. estándar	0,1	0,1	0,6	9,2	3,4	0,6	5,8	0,8	9,5	18,3	34,5	62,9
Saxton	Mín	1,1	2,4	2,7	5,8	28,9	1,7	4,1	1,0	1,6	6,6	13,3	34,6
	Máx	2,7	3,7	8,1	44,0	44,1	6,0	37,1	2,2	7,6	59,2	73,9	77,4
	Media	1,8	2,8	4,7	21,4	39,0	3,2	12,7	1,4	3,8	22,5	39,5	59,1
	Desv. estándar	0,4	0,3	1,2	10,8	4,1	0,9	7,9	0,3	1,4	13,0	14,5	11,1
Rosetta SSC	Mín	1,0	1,1	0,7	0,6	1,0	0,8	0,8	2,3	2,2	1,5	3,9	5,2
	Máx	2,8	1,7	1,2	3,9	5,2	2,8	3,2	3,0	4,6	17,6	24,3	22,5
	Media	1,9	1,3	0,9	1,0	2,0	1,6	1,6	2,7	3,2	6,4	13,2	13,9
	Desv. estándar	0,4	0,1	0,1	0,4	0,8	0,5	0,6	0,2	0,5	2,9	5,4	4,2
Rosetta SSCDB	Mín	1,2	0,9	0,7	0,6	0,8	0,8	0,8	2,1	1,9	1,4	4,6	6,2
	Máx	2,8	1,4	1,2	2,8	1,8	2,2	3,0	2,8	4,4	14,1	19,7	17,8
	Media	1,9	1,2	0,9	0,8	1,1	1,4	1,6	2,5	3,1	6,1	12,3	12,3
	Desv. estándar	0,3	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,6	0,1	0,5	2,7	4,0	2,6
Ferrer	Mín	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3	4,7	13,3	16,0	18,5	34,8	43,3
	Máx	15,2	1,1	2,9	23,2	6,3	16,9	23,6	27,2	37,7	41,2	44,7	51,7
	Media	6,1	0,4	1,1	8,5	2,1	9,1	15,9	18,8	25,4	30,3	40,6	46,6
	Desv. estándar	4,0	0,3	0,7	5,4	1,5	4,1	4,2	3,0	4,9	5,0	2,2	1,8

En las figuras siguientes se muestra una representación de estos datos de forma gráfica para facilitar su comprensión (Figura 3.14, Figura 3.15, Figura 3.16 y Figura 3.17).

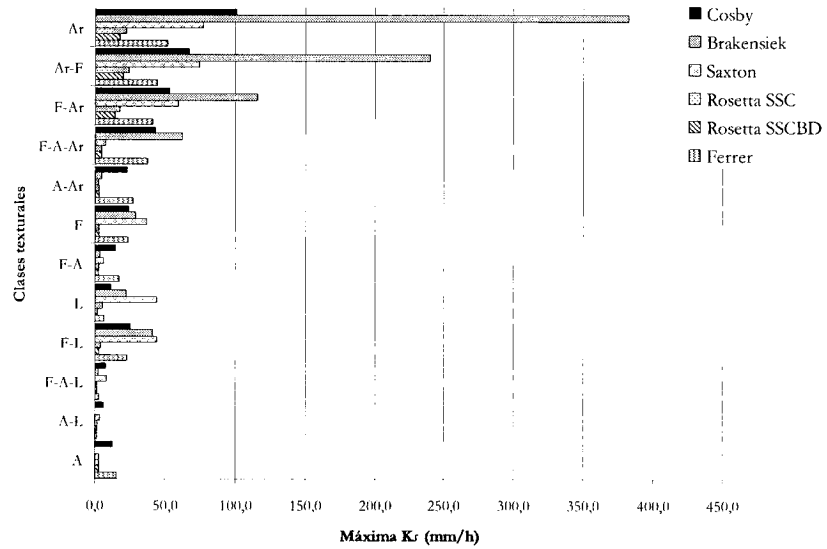


Figura 3.14: Clases texturales y conductividad hidráulica saturada máxima del suelo

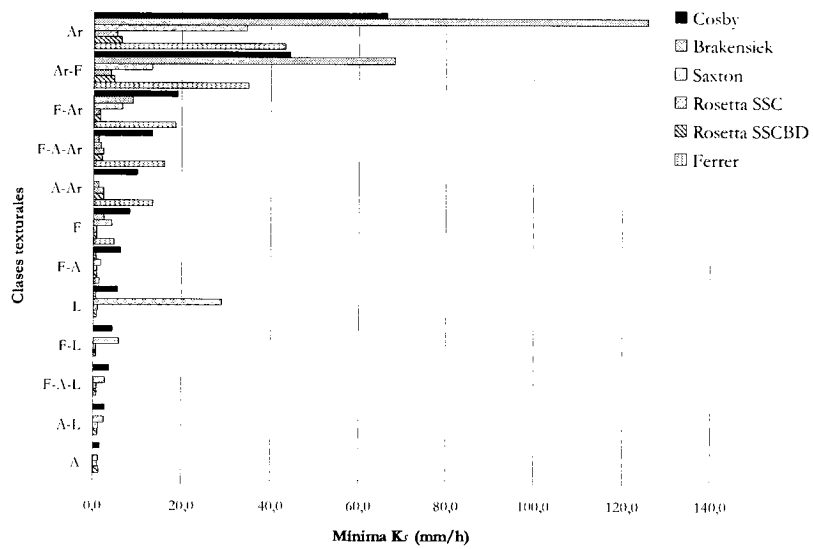


Figura 3.15: Clases texturales y conductividad hidráulica saturada mínima del suelo

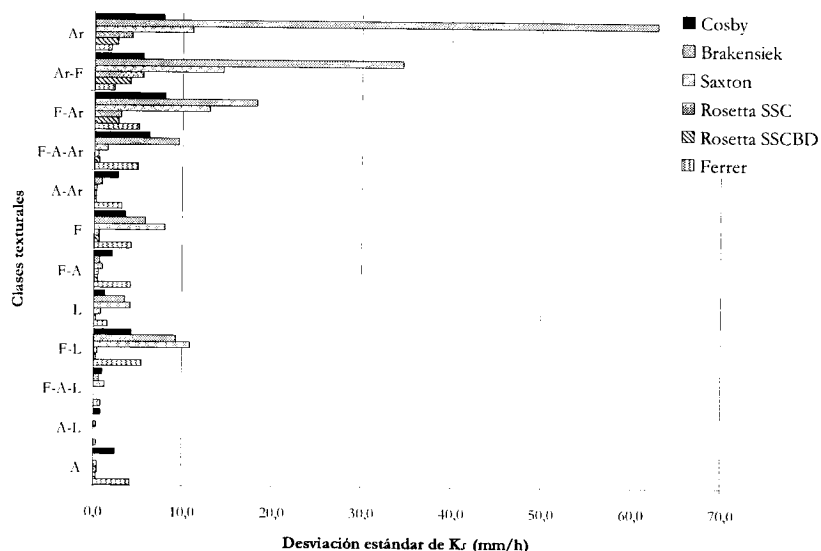


Figura 3.16: Clases texturales y conductividad hidráulica saturada media del suelo

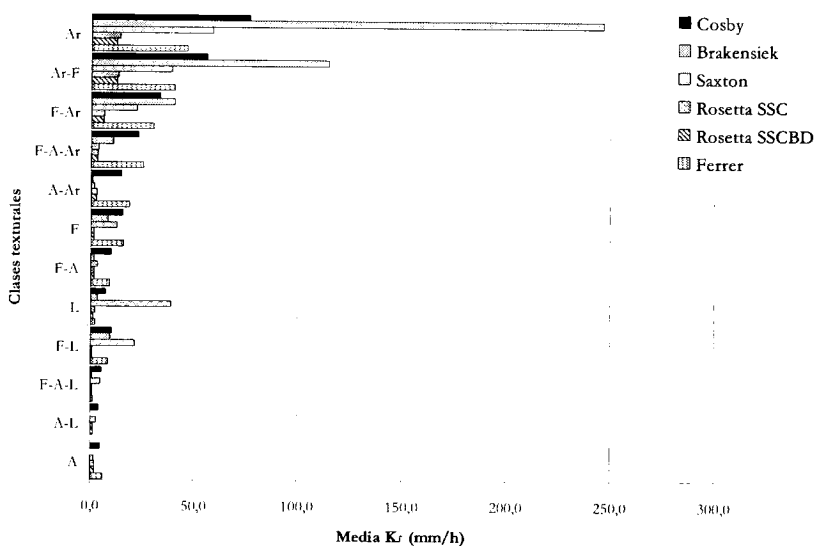


Figura 3.17: Clases texturales y desviación estándar de la conductividad hidráulica saturada del suelo

Como se puede comprobar, las distintas funciones presentan comportamientos muy diversos entre sí dentro de una misma clase textural. A modo de resumen, en la Tabla 3.19 se muestran las principales características de las funciones estudiadas.

Tabla 3.19: Resumen de las características de las funciones de edafotransferencia estudiadas

Autor	Región de ajuste	Nº de muestras Ajuste	Variables de entrada				
			$A_r$	$A$	$\phi$	$\theta_s$	$D_{ap}$
Cosby	USA	1.488	Sí	Sí			
Brakensiek	USA	5.320	Sí	Sí	Sí		
Saxton	USA	5.320	Sí	Sí		Sí	
Rosetta SSC	USA	1.306	Sí	Sí			
Rosetta SSCBD	USA	1.306	Sí	Sí			Sí
Ferrer	España	928	Sí	Sí			

Aunque la fórmula de Ferrer está ajustada al territorio nacional, el relativamente bajo número de muestras con que ha sido desarrollada y la gran heterogeneidad de la base de datos con que ha trabajado pueden explicar la aparición de anomalías como: ninguna clase textural presenta conductividades hidráulicas saturadas superiores a los 51 mm/h (ni las arenas puras), valor este que parece muy bajo en comparación con otros autores; existen clases texturales, o parte de ellas, que presentan tasas de infiltración iguales a cero (como las arcillo-limosas, franco-arcillo- limosa o gran parte de las arcillosas).

En cuanto a los modelos Rosetta no presentan grandes diferencias entre ellos, aunque hay que destacar que el comportamiento de la conductividad hidráulica saturada es sorprendente, puesto que los valores proporcionados en las clases texturales de mayor conductividad hidráulica son extremadamente bajos (los suelos arenosos no superan los 25 mm/h), mientras que los valores mínimos de conductividad se encuentran en clases texturales intermedias (franco-limosas) y no en las que cabría esperar (arcillosas). Esta situación coincide con los problemas matemáticos del modelo de Van Genuchten-Mualem, cuando la estimación de los parámetros se acerca a la saturación (Schaap, 1999). Análogos son los resultados obtenidos por Rubio y Llorens (2003) en una cuenca experimental del noreste peninsular, en la que los resultados obtenidos para suelos franco-limosos presentan un buen ajuste cerca de la capacidad de campo, descendiendo a medida que las condiciones se aproximan a la saturación (Rubio y Llorens, 2003).

La función de Cosby presenta un comportamiento muy similar a la de Ferrer, supliendo los problemas anteriormente citados aunque el número relativamente bajo de muestras con la que ha sido calculada hace que su extrapolación a los suelos españoles sea difícil.

Por tanto, las fórmulas de edafotransferencia más adecuadas para el cálculo de la conductividad hidráulica saturada, parecen ser la de Saxton y la de Brakensiek, ajustadas con un número relativamente grande de muestras de una gran variedad de tipos de suelo.

La ecuación de Saxton presenta la limitación de estar ajustada a unas fracciones granulométricas concretas y no a todo el espectro del suelo, mientras que la de Brakensiek sí lo cubre. La principal desventaja de esta fórmula es que se necesita conocer la densidad aparente del suelo ( $D_{ap}$ ) o la porosidad ( $\phi$ ).

La ecuación de Brakensiek presenta un comportamiento muy similar a los gráficos de conductividad hidráulica saturada propuestos por el “soil survey manual”, como se puede ver en la Figura 3.18:

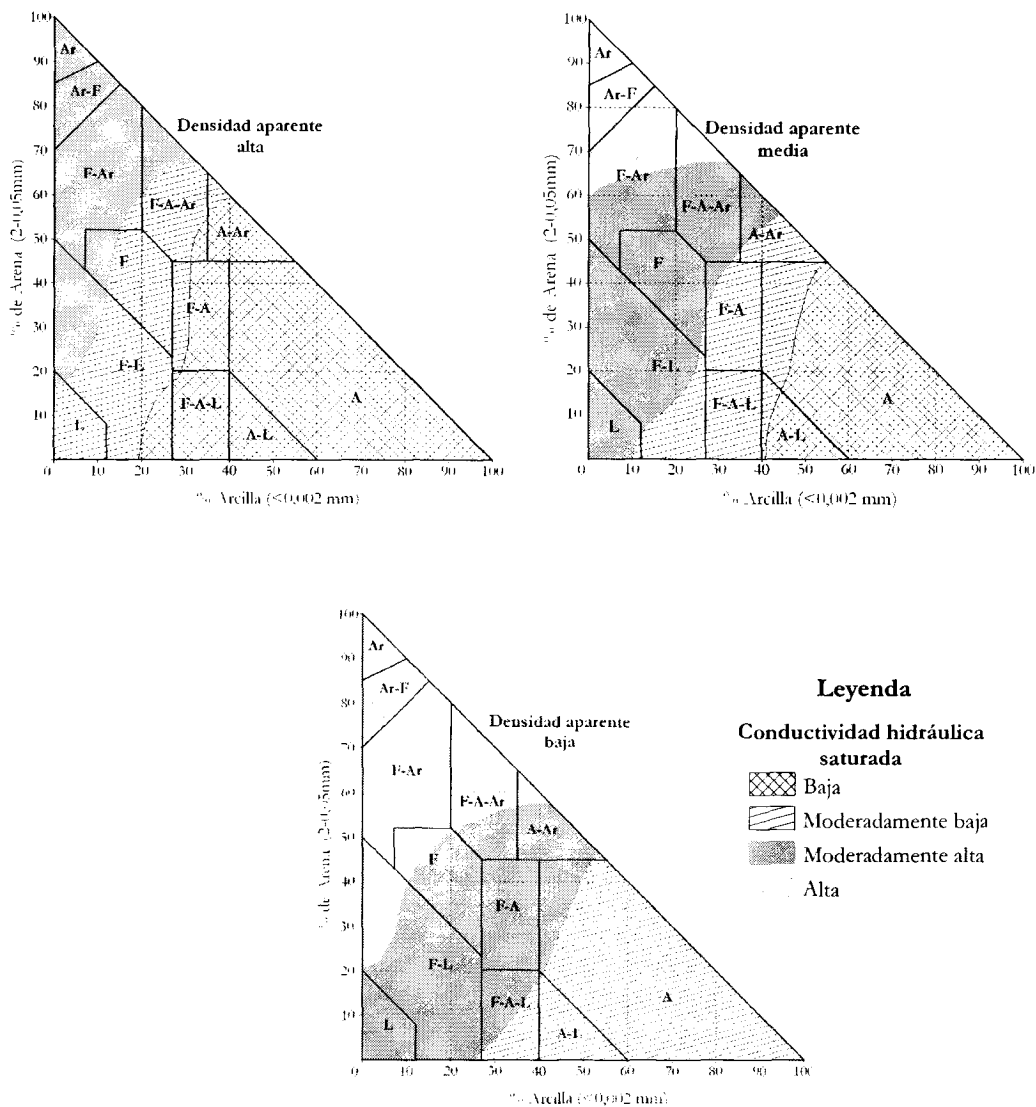


Figura 3.18: Estimación de la conductividad hidráulica saturada de un suelo en función de la densidad aparente del suelo (modificado de Soil Survey Division Staff, 1993)

Las variaciones entre la fórmula de Brakensiek y la metodología del “soil survey manual”, pueden deberse en parte a las simplificaciones realizadas con el fin de poder representar la conductividad hidráulica sobre el triángulo textural.

Por lo tanto la fórmula que se considera más adecuada para la estimación de la conductividad hidráulica saturada del suelo es la de Brakensiek.

## **CAPÍTULO 4: PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA MEJORA DEL MODELO DEL NÚMERO DE CURVA**

Como se ha visto en capítulos anteriores, la variable que introduce mayor incertidumbre en la determinación del número de curva es el grupo hidrológico de suelo, puesto que la variación de una clase puede provocar los mayores errores en la estimación del parámetro de transformación de lluvia en escorrentía.

Así mismo, la propia determinación del grupo hidrológico de suelo en clases o categorías es ambigua y ocasiona que a suelos con características físicas muy próximas y, por tanto, con comportamientos hídricos cercanos, se les pueda asignar distintos grupos hidrológicos, por lo que presentarán números de curva muy alejados, circunstancia que carece de sentido y que llevará a estimaciones erróneas de la escorrentía.

Estos errores pueden ser minorados transformando las clases o grupos hidrológicos de suelos en una variable continua que exprese la tendencia del suelo a presentar un comportamiento hídrico determinado, concepto casi coincidente con el propuesto por Mockus (NRCS, 1985), por el que los grupos hidrológicos se debían clasificar en 6 subclases. Así, un suelo del grupo B con una alta tasa de infiltración y, por tanto, baja capacidad de producir escorrentía (próximo al grupo A) puede decirse que es un suelo B+.

Por otra parte, la transformación del grupo hidrológico de suelo en valores continuos permite la interpolación del parámetro número de curva para cada tipo de suelo, sin tener que trabajar con los valores medios que, para cada grupo hidrológico, proporcionan las tablas. Esta evolución en la determinación del número de curva es fundamental para la realización de una modelización espacial de la distribución de este parámetro mediante la aplicación de un sistema de información geográfica o, simplemente, para poder utilizarlo como una variable estadística numérica más.

En resumen, la transformación del grupo hidrológico de suelo en un índice continuo permite una estimación mucho más precisa del número de curva para cada una de las distintas condiciones de los suelos, facilitando su aplicación generalizada en los cálculos de la ingeniería y en la investigación.

## 4.1. EL NÚMERO DE CURVA COMO UN PARÁMETRO CONTINUO

### 4.1.1. Transformación del grupo hidrológico de suelo en valores continuos

#### 4.1.1.1. Metodología

La transformación del grupo hidrológico en un índice continuo que exprese el potencial del suelo para producir escorrentía se ha realizado tomando como referencia la propia definición de los grupos que hace el *Soil Survey Division Staff* (1993), tanto en lo referente a la conductividad hidráulica saturada del suelo ( $K_{sat}$ ), como en lo relativo a la modificación del grupo por la profundidad de los horizontes.

El índice de grupo hidrológico se calcula aprovechando los intervalos de clases de los grupos propuesta por el *Soil Survey Division Staff* (1993), que se escalonan en potencias de diez en relación al límite inferior de todas las clases (0,198 cm/h), como se puede ver en la siguiente tabla.

Tabla 4.1: Caracterización de los grupos hidrológicos en función de la conductividad hidráulica saturada

Grupo hidrológico	$K_{sat}$ (cm/h)
Grupo A	> 19,8
Grupo B	1,98 – 19,8
Grupo C	0,198 - 1,98
Grupo D	< 0,198

Si a dichos límites de clase se les aplica la siguiente ecuación:

$$I_g = 4 - \log\left(\frac{K_{sat}}{0,0198}\right) \quad 4.1$$

Donde:  $I_g$  se ha denominado como el índice de grupo hidrológico del suelo en primera aproximación

$K_{sat}$  es la conductividad hidráulica saturada del horizonte estudiado (cm/h)

Se obtienen los límites de cada grupo hidrológico de suelo, como se puede ver en la tabla adjunta:

Tabla 4.2: Límites de clase del índice de grupo para cada grupo hidrológico en función de la conductividad hidráulica saturada

Grupo Hidrológico	$K_{sat}$ (cm/h)	$I_g$
Grupo A	> 19,8	0 a 1
Grupo B	1,98 – 19,8	1 a 2
Grupo C	0,198 - 1,98	2 a 3
Grupo D	< 0,198	> 3

Una vez establecidos los valores del índice de grupo en primera aproximación para los distintos horizontes de suelo, se calcula el valor definitivo para el perfil edáfico aplicando la modificación del grupo hidrológico debida a la profundidad.

El modificador propuesto es función de si el mínimo índice de grupo del perfil edáfico se produce a una profundidad comprendida entre 0 a 50 cm o a profundidades mayores de 50 cm. Así, el criterio aplicado es el que se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4.3: Asignación del índice de grupo hidrológico para el perfil edáfico en función de los índices obtenidos a distintas profundidades

Si $Ig_{0-50} \geq Ig_{50-100}$ entonces $Ig_{suelo} = Ig_{0-50}$
Si $Ig_{0-50} \geq (Ig_{50-100} - 0,5)$ entonces $Ig_{suelo} = Ig_{0-50}$
Si $Ig_{0-50} < (Ig_{50-100} - 0,5)$ entonces $Ig_{suelo} = (Ig_{50-100} - 0,5)$

$Ig_{0-50}$ : Índice de grupo a una profundidad entre 0 y 50 cm,  $Ig_{50-100}$ : Índice de grupo a una profundidad entre 50 y 100 cm.

En el método original del NRCS se considera que si el horizonte menos permeable se encuentra a profundidad entre 50 y 100 cm, el grupo hidrológico que corresponde al valor de la conductividad hidráulica se incrementa en una categoría, siempre que el horizonte menos permeable entre 0 y 50 cm corresponda a una categoría superior.

Para facilitar la comprensión se adjunta la siguiente tabla en la que se exponen distintos casos de asignación de grupo hidrológico de suelo.

Tabla 4.4: Ejemplo de asignación de grupo hidrológico de suelo

Caso	$K_{sat} 0-50$	$K_{sat} 50-100$	GHS asignado
1	10 (ghsB)	1 (ghsC)	B
2	1,5 (ghsC)	1 (ghsC)	C
3	30 (ghsA)	1 (ghsC)	B
4	10 (ghsB)	0,2 (ghsC)	B

La metodología del NRCS se limita a incrementar una categoría en situaciones como los casos 1, 3 ó 4. Sin embargo, es evidente que la distancia a la categoría B es mucho mayor para el caso 4 que para el caso 1 ó 3.

Para el traslado de esta metodología al índice continuo se ha estimado que deberían saltar de categoría los casos cuya distancia al inicio de la siguiente clase sea menor o igual a la media de la amplitud de la clase, que se establece en 0,5. Esto equivale a una disminución de 0,5 unidades del  $Ig$ .

#### 4.1.1.2. Interpretación del índice de grupo de un suelo

Como se deduce de la exposición anterior, el índice de grupo ( $Ig$ ) puede tomar valores desde  $-\infty$  hasta  $\infty$ , si bien, los valores negativos corresponden a suelos con conductividades hidráulicas saturadas por encima de los 198 cm/h, por lo que se ha considerado que realmente  $Ig$  nunca alcanza valores negativos y, en el hipotético caso de alcanzarlos, el valor del índice se iguala a cero. Para conductividades hidráulicas muy bajas el valor de  $Ig$  puede ser superior a 4, llegando en suelos muy impermeables a valores cercanos a 6. En este caso no se han truncado los valores por encima de 4 pues se considera que tienen una significación física. Los suelos con valores de índice de grupo próximos a cero corresponden a suelos que presentan muy bajas capacidades de producir escorrentía, caracterizándose por sus altas tasas de conductividad hidráulica saturada (suelo del límite superior del grupo A).

Puede comprobarse que el índice proporciona una mejor caracterización hidrológica de los suelos ya que el valor continuo es un buen indicador de la distancia real que existe entre ellos. Así, dentro del GHS-A, un suelo que presente un  $Ig$  de 0,8 se podrá identificar como

muy cercano a un suelo del GHS-B en el límite superior del grupo ( $I_g=1,01$ ), pero notablemente alejado de un suelo del límite inferior del mismo GHS-B ( $I_g=1,99$ ).

Por lo tanto, el índice de grupo define la capacidad de producir escorrentía que muestra un suelo, bien por la conductividad hidráulica saturada que presenta en superficie o bien por la profundidad a la que existe un horizonte limitante y, por tanto, cuanto mayor sea el valor del  $I_g$  de un suelo, mayor será su capacidad para transformar lluvia en escorrentía, como se puede observar en el gráfico siguiente:

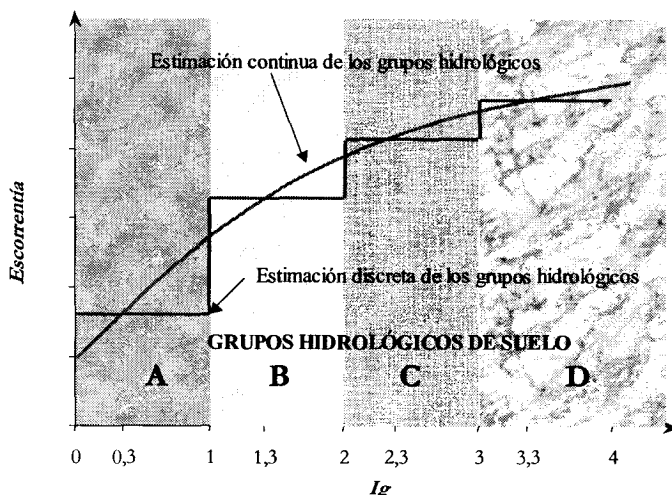


Figura 4.1: Variación de la escorrentía en relación a los valores del índice de grupo ( $I_g$ ) en contraste con la información que dan las clases discretas de los grupos hidrológicos de suelo (elaboración propia)

#### 4.1.2. Obtención de los números de curva en función del índice de grupo

Una vez transformados los grupos hidrológicos de suelo en el índice de grupo, se pueden calcular en formato continuo los números de curva para los distintos usos del suelo en función del índice de grupo.

El objeto del presente apartado es determinar las funciones de obtención del número de curva para cada uso del suelo, cada tratamiento superficial y cada condición hidrológica del suelo, en función del índice de grupo.

Hay que distinguir dos zonas en el cálculo de la función de interpolación, una primera que corresponde a la interpolación propiamente dicha y que afecta a los valores del número de curva asociados al índice de grupo comprendido entre 0 y 3,5, y una segunda de extrapolación del número de curva cuando el índice de grupo es mayor de 3,5.

##### 4.1.2.1. Función de interpolación $y(x)$ para $I_g \leq 3,5$

Partiendo de los datos contenidos en las tablas del número de curva y teniendo en cuenta que el valor reflejado corresponde a la media de los valores de los números de curva obtenidos en las distintas cuencas experimentales (Van Mullem *et al.*, 2002), se puede suponer que dichos valores, obtenidos de las tablas, se corresponden al centro del grupo hidrológico, por lo que se puede ajustar un polinomio de tercer grado al contar con cuatro valores del número de curva, uno para cada valor central del grupo hidrológico de suelo. Este polinomio permite calcular el valor del número de curva para cualquier valor del índice de grupo comprendido entre 0 y 3,5.

Aplicando la ecuación 4.1 a los valores centrales de los intervalos de conductividad hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) de cada grupo hidrológico, se obtienen los siguientes valores del índice de grupo ( $x_i$ ):

Tabla 4.5: Relación de los grupos hidrológicos con los valores centrales de Ig

Grupo hidrológico	Ig central $x_i$
Grupo A	0,3
Grupo B	1,3
Grupo C	2,3
Grupo D	3,3

Conocidos los pares de valores de los números de curva ( $y_i$ ) y los correspondientes al índice de grupo de los centros de cada grupo hidrológico de suelo ( $x_i$ ), como se muestra en la tabla Tabla 4.6, se puede hallar un polinomio único de grado  $n-1$ , donde  $n$  es el número de pares de valores conocidos para el ajuste polinomial.

Tabla 4.6: Ejemplo de pares de valores del número de curva y de Ig central

Descripción del uso		Condición hidrológica	Grupo hidrológico de suelo			
Uso del suelo	Prácticas de cultivo		A $x_1$	B $x_2$	C $x_3$	D $x_4$
			$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$

Se puede hallar un polinomio único de grado  $n-1$ , donde  $n$  es el número de pares de valores conocidos para el ajuste polinomial.

Es decir:

$$y(x) = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + a_3 \cdot x^3 \quad 4.2$$

Donde:  $y(x)$  es el valor del número de curva para el índice de grupo ( $x$ )

$a_n$  coeficientes a determinar

$x$  valor del índice de grupo para el que se quiere conocer el número de curva.

De tal forma que solamente existen unos únicos números reales  $a_0, a_1, a_2, a_3$  tales que:

$$\begin{cases} y_1 = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_1^2 + a_3 \cdot x_1^3 \\ y_2 = a_0 + a_1 \cdot x_2 + a_2 \cdot x_2^2 + a_3 \cdot x_2^3 \\ y_3 = a_0 + a_1 \cdot x_3 + a_2 \cdot x_3^2 + a_3 \cdot x_3^3 \\ y_4 = a_0 + a_1 \cdot x_4 + a_2 \cdot x_4^2 + a_3 \cdot x_4^3 \end{cases} \quad 4.3$$

El sistema mostrado en la ecuación anterior de  $n$  ecuaciones lineales con  $n$  incógnitas ( $a_n$ ) se puede escribir de forma matricial de la siguiente manera:

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & x_1^3 \\ 1 & x_2 & x_2^2 & x_2^3 \\ 1 & x_3 & x_3^2 & x_3^3 \\ 1 & x_4 & x_4^2 & x_4^3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} \quad 4.4$$

$$b = \frac{\quad}{A} \cdot x$$

Si se cumple que:

$$\det A = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & x_1^3 \\ 1 & x_2 & x_2^2 & x_2^3 \\ 1 & x_3 & x_3^2 & x_3^3 \\ 1 & x_4 & x_4^2 & x_4^3 \end{vmatrix} \neq 0 \quad 4.5$$

La solución del sistema es única y se puede aplicar la regla de Cramer, por la que:

$$a_0 = \frac{\begin{vmatrix} y_1 & x_1 & x_1^2 & x_1^3 \\ y_2 & x_2 & x_2^2 & x_2^3 \\ y_3 & x_3 & x_3^2 & x_3^3 \\ y_4 & x_4 & x_4^2 & x_4^3 \end{vmatrix}}{\det A} \quad a_1 = \frac{\begin{vmatrix} 1 & y_1 & x_1^2 & x_1^3 \\ 1 & y_2 & x_2^2 & x_2^3 \\ 1 & y_3 & x_3^2 & x_3^3 \\ 1 & y_4 & x_4^2 & x_4^3 \end{vmatrix}}{\det A} \quad a_2 = \frac{\begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1^3 \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2^3 \\ 1 & x_3 & y_3 & x_3^3 \\ 1 & x_4 & y_4 & x_4^3 \end{vmatrix}}{\det A} \quad 4.6$$

$$a_3 = \frac{\begin{vmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & y_1 \\ 1 & x_2 & x_2^2 & y_2 \\ 1 & x_3 & x_3^2 & y_3 \\ 1 & x_4 & x_4^2 & y_4 \end{vmatrix}}{\det A}$$

Lo que da solución al sistema y permite calcular el polinomio de interpolación para cada uso, cada tratamiento superficial y cada condición hidrológica.

#### 4.1.2.2. Función de extrapolación $f(x)$ para $Ig > 3,5$

La función calculada por el proceso descrito en el epígrafe anterior da solución en aquellos intervalos en los que conocemos los pares de valores utilizados en la interpolación, es decir, hasta que el índice de grupo ( $Ig$ ) alcanza el valor de 3,5 (valor central correspondiente al grupo hidrológico D). Para valores superiores de  $Ig$  los polinomios de interpolación pueden presentar un comportamiento que se desvía de la lógica del modelo del número de curva (Figura 4.2).

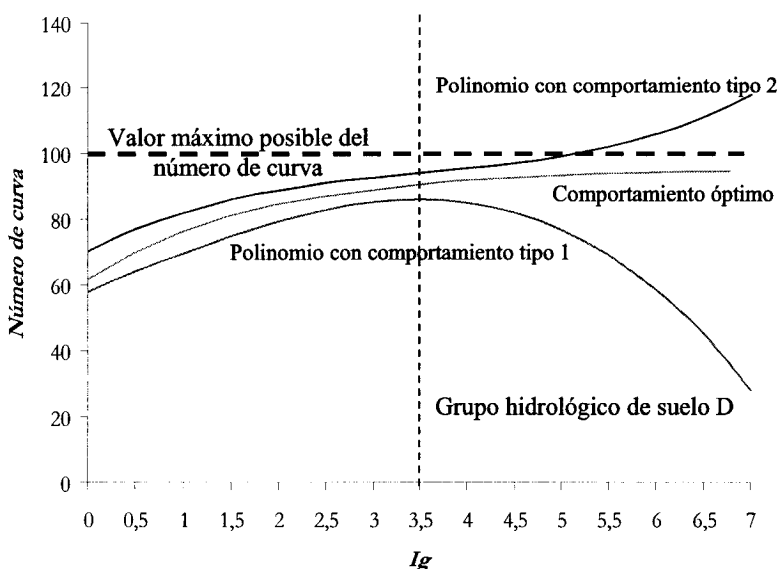


Figura 4.2: Representación gráfica del comportamiento de los polinomios de ajuste

Analizando la Figura 4.2 se comprueba que a partir del valor 3,5 del índice de grupo se puede presentar el comportamiento anómalo consistente en la caída del potencial de escorrentía, a pesar de aumentar la impermeabilidad del suelo (polinomio de comportamiento tipo 1). Por otra parte, las funciones de interpolación que no presentan esta conducta pueden alcanzar valores del número de curva superiores al máximo contemplado por el modelo ( $CN = 100$ ), como sucede en el polinomio con comportamiento tipo 2, lo cual no es posible desde el punto de vista conceptual del propio modelo.

Por lo tanto, es necesario el uso de una segunda función  $f(x)$  para la extrapolación de los valores del número de curva cuando el índice de grupo supere la cantidad de 3,5. Dicha función debe cumplir las siguientes condiciones:

- Tanto la función de interpolación  $y(x)$  como la de extrapolación  $f(x)$  en el punto en el que el índice de grupo es igual a 3,5 ( $x=3,5$ ) deben de igualarse para que no haya saltos bruscos en la determinación del número de curva.

$$y(3,5) = f(3,5) \quad 4.7$$

- Las dos funciones deben de ser tangentes en el punto en el que el índice de grupo es igual 3,5 ( $x=3,5$ ), por lo que sus derivadas en dicho punto deben ser iguales.

$$y'(3,5) = f'(3,5) \quad 4.8$$

- La función de extrapolación debe tender de forma asintótica al valor máximo posible del número de curva ( $CN = 100$ ).

$$\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = 100 = k \quad 4.9$$

Si se toma como función de extrapolación:

$$f(x) = \frac{b_1}{(\ln x)^{b_2}} \quad 4.10$$

Donde:  $f(x)$  es la función de extrapolación

$x$  es el índice de grupo

$b_1$  y  $b_2$  son parámetros a determinar de la función

Para que cumpla la condición expresada en la ecuación 4.9 hay que sumar la constante  $k$ , con un valor de 100, para que tienda a dicho punto, por lo que la función de extrapolación es:

$$f(x) = \frac{b_1}{(\ln x)^{b_2}} + 100 \quad 4.11$$

Para determinar los parámetros  $b_1$  y  $b_2$  se deben cumplir las condiciones expresadas en las ecuaciones 4.7 y 4.8.

Comenzando por la primera condición, según la cual las dos funciones en el punto  $x=3,5$  se deben de igualar, y si:

$$y(x) = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + a_3 \cdot x^3 \quad 4.12$$

Donde:  $y(x)$  es el valor del número de curva para el índice de grupo ( $x$ )

$a_n$  coeficientes procedentes del ajuste polinómico

$x$  valor del índice de grupo para el que se quiere conocer el número de curva (en este caso  $x=3,5$ )

$$a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + a_3 \cdot x^3 = \frac{b_1}{(\ln x)^{b_2}} + 100 \quad \text{para } x=3,5 \quad 4.13$$

De donde se puede despejar  $b_1$  como:

$$b_1 = (a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + a_3 \cdot x^3 - 100) \cdot (\ln x)^{b_2} \quad \text{para } x=3,5 \quad 4.14$$

O lo que es lo mismo:

$$b_1 = (y(x) - 100) \cdot (\ln x)^{b_2} \quad \text{para } x=3,5 \quad 4.15$$

Para llegar a conocer  $b_2$  hay que recurrir a la condición expresada en la ecuación 4.8, por la cual las derivadas de ambas funciones en el punto  $x=3,5$  deben de ser iguales.

Derivando las funciones expresadas en las ecuaciones 4.11 y 4.12:

$$f'(x) = -b_1 \cdot (\ln x)^{-(b_2+1)} \cdot \frac{b_2}{x} \quad 4.16$$

$$y'(x) = a_1 + 2 \cdot a_2 \cdot x + 3 \cdot a_3 \cdot x^2 \quad 4.17$$

Igualando ambas expresiones en el punto  $x=3,5$ :

$$-b_1 \cdot (\ln x)^{-(b_2+1)} \cdot \frac{b_2}{x} = a_1 + 2 \cdot a_2 \cdot x + 3 \cdot a_3 \cdot x^2 \quad \text{para } x=3,5 \quad 4.18$$

Sustituyendo el valor de  $b_1$  por el obtenido en la ecuación 4.15:

$$-(y(x)-100) \cdot (\ln x)^{b_2} \cdot (\ln x)^{(-b_2-1)} \cdot \frac{b_2}{x} = a_1 + 2 \cdot a_2 \cdot x + 3 \cdot a_3 \cdot x \quad \text{para } x=3,5 \quad 4.19$$

Operando y despejando  $b_2$ :

$$b_2 = -\frac{y'(x) \cdot x \cdot \ln(x)}{(y(x)-100)} \quad \text{para } x=3,5 \quad 4.20$$

Con lo que queda definida la función de extrapolación de tal forma que cumpla las condiciones impuestas inicialmente.

Por lo tanto, la ecuación de estimación del número de curva para cada uso del suelo, tratamiento superficial y condición hidrológica del suelo, en función del índice de grupo, queda definida por dos funciones tal y como se expresa a continuación:

$$z(x) = \begin{cases} y(x) = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + a_3 \cdot x^3 & \text{para } x \leq 3,5 \\ f(x) = \frac{b_1}{(\ln x)^{b_2}} + 100 & \text{para } x > 3,5 \end{cases} \quad 4.21$$

Donde:  $z(x)$  es la función de estimación que permite obtener el número de curva en función del valor del índice de grupo del suelo

$x$  es el valor del índice de grupo del suelo para el que se quiere conocer el número de curva

$a_n$  parámetros de la función de interpolación  $y(x)$  obtenidos por ajuste polinómico

$b_n$  parámetros de la función de extrapolación

En la Figura 4.3 se puede apreciar la representación de dos funciones globales de interpolación.

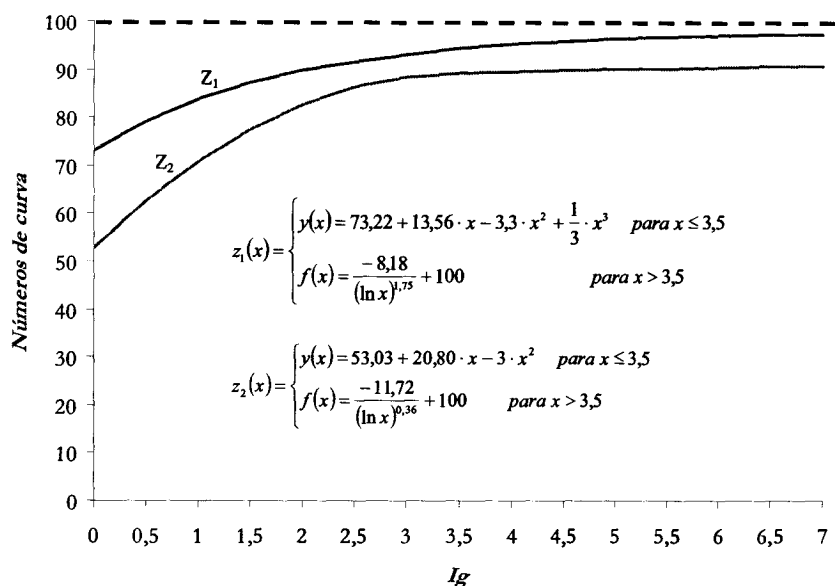


Figura 4.3: Representación gráfica de dos funciones globales de interpolación

#### 4.1.2.3. Coeficientes de las funciones de estimación de los números de curva en función del índice de grupo ( $I_g$ )

Aplicando a las tablas del número de curva la metodología descrita en los epígrafes anteriores se han calculado los distintos coeficientes de las funciones (ecuación 4.21) de estimación de los números de curva en función del índice de grupo, para cada uno de los usos del suelo, para cada tratamiento superficial y para cada una de las condiciones hidrológicas, como se puede ver en las tablas siguientes:

Tabla 4.7: Coeficientes de las funciones de estimación para los usos agrarios

Descripción del uso			Coeficientes de ajuste					
Uso del suelo	Prácticas de cultivo	Condición	a <sub>0</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>
		hidrológica						
Barbecho	Suelo desnudo	-	73,22	13,56	-3,30	0,33	-8,18	1,75
	Suelo cubierto de residuos*	Pobre	72,22	13,56	-3,30	0,33	-9,13	1,50
		Buena	70,37	12,88	-2,65	0,17	-10,60	0,33
	Según máxima pendiente	Pobre	69,21	9,24	0,30	-0,33	-9,24	0,15
		Buena	62,77	14,88	-2,65	0,17	-13,17	1,01
	Máxima pendiente + cubierto de residuos	Pobre	68,21	9,24	0,30	-0,33	-10,24	0,13
Buena		59,92	14,20	-2,00	0,00	-15,71	0,26	
Cultivo en hileras	Según curvas de nivel	Pobre	66,07	14,24	-3,95	0,50	-15,59	1,48
		Buena	61,41	12,40	-1,50	0,00	-15,86	0,70
	Curvas de nivel + cubierto de residuos	Pobre	65,07	14,24	-3,95	0,50	-16,55	1,36
		Buena	60,41	12,40	-1,50	0,00	-16,85	0,66
	Según curvas de nivel y aterrazado	Pobre	63,51	8,24	0,30	-0,33	-17,54	-0,15
		Buena	59,21	9,24	0,30	-0,33	-19,23	0,07
	Según curvas de nivel y aterrazado + cubierto de residuos	Pobre	62,51	8,24	0,30	-0,33	-18,54	-0,14
		Buena	58,21	9,24	0,30	-0,33	-20,23	0,07
	Según máxima pendiente	Pobre	61,26	12,72	-0,85	-0,17	-13,22	0,55
		Buena	58,62	15,20	-2,00	0,00	-14,47	0,61
	Máxima pendiente + cubierto de residuos	Pobre	60,41	12,04	-0,20	-0,33	-13,88	-0,05
		Buena	55,62	15,20	-2,00	0,00	-17,46	0,49
Cultivo de grano pequeño	Según curvas de nivel	Pobre	59,41	12,04	-0,20	-0,33	-14,88	-0,04
		Buena	56,77	14,52	-1,35	-0,17	-16,12	0,04
	Curvas de nivel + cubierto de residuos	Pobre	58,41	12,04	-0,20	-0,33	-15,88	-0,04
		Buena	55,77	14,52	-1,35	-0,17	-17,12	0,04
	Según curvas de nivel y aterrazado	Pobre	56,92	14,20	-2,00	0,00	-18,71	0,22
		Buena	55,41	12,04	-0,20	-0,33	-18,88	-0,03
	Según curvas de nivel y aterrazado + cubierto de residuos	Pobre	55,92	14,20	-2,00	0,00	-19,71	0,21
		Buena	54,41	12,04	-0,20	-0,33	-19,88	-0,03
	Según máxima pendiente	Pobre	62,26	12,72	-0,85	-0,17	-12,23	0,60
		Buena	52,83	18,00	-2,50	0,00	-16,08	0,39
	Según curvas de nivel	Pobre	60,56	11,37	0,45	-0,50	-13,67	-0,53
		Buena	49,68	18,68	-3,15	0,17	-19,49	0,77
Según curvas de nivel y aterrazado	Pobre	59,56	11,72	-0,85	-0,17	-17,47	0,15	
	Buena	44,54	22,96	-4,80	0,33	-21,57	0,43	

\* Los residuos cubren al menos el 5% de superficie a lo largo del año

Tabla 4.8: Coeficientes de las funciones de estimación para los pastizales y arboledas

Descripción de uso		Coeficientes de ajuste					
Uso de suelo	Condición hidrológica	a <sub>0</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>
Pastos o pastizales	Pobre	63,92	14,20	-2,00	0,00	-11,72	0,36
	Regular	40,30	31,39	-8,25	0,83	-19,19	1,03
	Buena	30,35	30,56	-5,80	0,33	-22,34	0,62
Praderas	-	17,33	46,11	-13,35	1,50	-27,47	1,25
Matorral con vegetación herbácea	Pobre	39,80	29,59	-7,75	0,83	-21,46	1,31
	Regular	27,33	26,60	-3,50	0,00	-25,58	0,60
	Buena	25,60	13,37	4,70	-1,33	-27,59	0,12
Mezcla de árboles con hierba	Pobre	50,54	22,96	-4,80	0,33	-15,60	0,61
	Regular	33,36	34,87	-9,40	1,00	-22,28	1,20
	Buena	21,11	38,99	-9,25	0,83	-24,94	0,97
Pequeñas arboledas	Pobre	36,00	32,39	-8,25	0,83	-21,02	1,20
	Regular	26,06	35,51	-8,10	0,67	-23,86	0,72
	Buena	20,25	34,36	-6,30	0,33	-25,71	0,63
Granjas, edificaciones y caminos	-	52,69	22,64	-5,45	0,50	-16,26	0,84

Tabla 4.9: Coeficientes de las funciones de estimación para zonas urbanas

Descripción de uso			Coeficientes de ajuste					
Uso de suelo	Condición hidrológica	% medio área impermeable	a <sub>0</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>
Áreas urbanas completamente desarrolladas	Pobre		63,92	14,20	-2,00	0,00	-11,72	0,36
	Media		40,30	31,39	-8,25	0,83	-19,19	1,03
	Buena		30,35	30,56	-5,80	0,33	-22,34	0,62
<b>Áreas impermeables</b>								
Aparcamientos, azoteas, carreteras			98,00	0,00	0,00	0,00	-2,00	0,00
<b>Calles y carreteras</b>								
Pavimentadas; cunetas y red de saneamiento			98,00	0,00	0,00	0,00	-2,00	0,00
Pavimentadas; cunetas abiertas			80,47	9,08	-2,15	0,17	-7,24	0,19
Grava			71,88	15,04	-4,45	0,50	-10,51	0,88
Sucias			67,73	15,36	-3,80	0,33	-11,85	0,42
<b>Zonas ajardinadas xerófitas</b>								
Zonas naturales (sólo permeables)			57,48	19,48	-3,65	0,17	-12,60	0,27
Zonas ajardinadas (incluidas zonas impermeables)			96,00	0,00	0,00	0,00	-4,00	0,00
<b>Zonas urbanas</b>								
Centros comerciales y de negocios		85%	87,91	3,80	-0,50	0,00	-5,36	0,39
Industrial		72%	77,67	12,24	-3,95	0,50	-8,98	1,41
<b>Zonas residenciales</b>								
1/8 acre (0,05 ha) o menos (2 casas)		65%	74,01	10,40	-1,50	0,00	-8,36	0,25
1/4 acre (0,10 ha)		38%	55,33	20,16	-4,30	0,33	-15,00	0,81
1/3 acre (0,13 ha)		30%	51,03	21,16	-4,30	0,33	-16,81	1,03
1/2 acre (0,20 ha)		25%	47,88	21,48	-3,65	0,17	-17,12	0,74
1 acre (0,40ha)		30%	44,73	21,80	-3,00	0,00	-17,46	0,49
2 acres (0,81 ha)		12%	38,93	24,60	-3,50	0,00	-19,08	0,33
<b>Áreas urbanas en desarrollo</b>								
Explanaciones (zonas permeables, sin vegetación)			73,22	13,56	-3,30	0,33	-8,18	1,75

Tabla 4.10: Coeficientes de las funciones de estimación para áreas áridas y semidesérticas

Descripción del uso		Coeficientes de ajuste						
Uso del suelo	Condición hidrológica <sup>1</sup>	a <sub>0</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	
	Herbáceas con algo de matorral	Pobre	----*	69,40	8,80	-0,50	-12,12	3,10
Regular		----*	55,01	13,60	-1,00	-17,15	2,51	
Buena		----*	44,90	13,80	-0,50	-24,46	2,76	
Mezclas de matorral de montaña	Pobre	----*	51,12	13,40	-1,50	-23,59	0,66	
	Regular	----*	31,81	14,40	-1,50	-40,28	0,48	
	Buena	----*	9,72	18,20	-2,00	-55,61	0,38	
Sabinar-Pinar o mezcla	Pobre	----*	53,03	20,80	-3,00	-11,72	0,36	
	Regular	----*	26,54	29,40	-4,00	-22,21	0,59	
	Buena	----*	0,05	38,00	-5,00	-32,71	0,68	
Artemisia con algo de hierba	Pobre	----*	38,14	27,40	-4,00	-15,71	0,26	
	Regular	----*	27,93	21,00	-2,50	-33,31	0,59	
	Buena	----*	13,42	19,20	-2,00	-49,39	0,53	
Matorral desértico	Pobre		57,48	19,48	-3,65	0,17	-12,60	0,27
	Regular		47,74	26,11	-6,60	0,67	-17,38	1,22
	Buena		41,44	26,76	-5,30	0,33	-17,97	0,66

<sup>1</sup> Pobre: < 30 % del terreno cubierto  
Regular: 30 al 70 % del terreno cubierto  
Buena: > 70% de terreno cubierto

\* Las ecuaciones de ajuste para estos casos son:

$$z(x) = \begin{cases} y(x) = a_1 + a_2 \cdot x + a_3 \cdot x^2 & \text{para } 1,5 \leq x \leq 3,5 \\ f(x) = \frac{b_1}{(\ln x)^{b_2}} + 100 & \text{para } x > 3,5 \end{cases}$$

#### 4.1.2.4. Ajuste para el caso del umbral de escorrentía de Témez

La metodología propuesta para la conversión del número de curva en un parámetro continuo es aplicable a la adaptación del método propuesta por Témez en 1987 para el territorio nacional, la cual se expuso en el Epígrafe 2.6.2 del presente trabajo.

La conversión del método de Témez en valores continuos es posible, ya que los grupos hidrológicos propuestos por este autor coinciden plenamente con los originales del método del número de curva. Previamente a la aplicación de la metodología de conversión descrita en el presente epígrafe, se ha procedido a la transformación de los umbrales de escorrentía ( $P_0$ ) en números de curva ( $CN$ ), según la ecuación siguiente (Témez, 1987):

$$P_0 = \frac{5080}{CN} - 50,8 \quad 4.22$$

Donde:  $P_0$  es el umbral de escorrentía asociado a un número de curva (mm)

CN es el número de curva

Despejando el número de curva de la ecuación 4.22:

$$CN = \frac{5080}{P_0 + 50,80} \quad 4.23$$

Aplicando la ecuación 4.23 a la Tabla 2.18, en la que se muestran los umbrales de escorrentía para las condiciones medias de humedad, se obtiene la Tabla 4.11, en la que se muestran los números de curva asociados a los umbrales de escorrentía propuestos por Tézmez.

Tabla 4.11: Números de curva asociados a los umbrales de escorrentía del método de Tézmez

Uso de la tierra	Pendiente %	Características hidrológicas	Grupo de suelo				
			A	B	C	D	
Barbecho	≥ 3	R	77,204	86,395	89,437	92,701	
		N	74,926	82,201	86,395	86,395	
	<3	R/N	71,751	78,395	82,201	86,395	
Cultivos en hilera	≥ 3	R	68,835	79,624	86,395	89,437	
		N	67,018	76,048	82,201	86,395	
	<3	R/N	64,467	72,779	78,395	82,201	
Cereales de invierno	≥ 3	R	63,659	74,926	83,553	86,395	
		N	61,353	72,779	80,892	83,553	
	<3	R/N	59,906	70,752	78,395	80,892	
Rotación de cultivos pobre	≥ 3	R	66,146	77,204	84,95	89,437	
		N	64,467	74,926	82,201	86,395	
	<3	R/N	62,871	72,779	79,624	83,553	
Rotación de cultivos densos	≥ 3	R	57,859	71,751	80,892	84,95	
		N	54,741	68,835	78,395	82,201	
	<3	R/N	51,943	67,018	76,048	79,624	
Praderas	≥ 3	Pobre	67,914	78,395	86,395	89,437	
		Media	48,94	68,835	78,395	84,95	
		Buena		60,621	73,837	79,624	
			Muy buena		55,338	69,78	77,204
	<3	Pobre	46,691	67,018	80,892	87,889	
		Media		59,207	74,926	83,553	
		Buena			69,78	78,395	
			Muy buena			67,018	76,048
	Plantaciones regulares. Aprovechamiento forestal	≥ 3	Pobre	45,035	66,146	77,204	83,553
Media				59,906	72,779	78,395	
Buena				54,741	69,78	77,204	
<3		Pobre		59,906	72,779	78,395	
		Media		54,741	69,78	77,204	
		Buena		50,397	67,018	76,048	
Masas forestales (bosques, monte bajo, etc.)		Muy clara	55,947	74,926	86,395	91,039	
		Clara	44,251	67,914	78,395	83,553	
		Media		59,906	69,78	76,048	
		Espesa		51,943	62,103	68,835	
		Muy espesa			43,869	54,158	60,621
Rocas permeables	≥ 3			94,42			
	<3			91,04			
Rocas impermeables	≥ 3			96,21			
	<3			92,70			

Aplicando a la Tabla 4.11 la metodología para la estimación de los coeficientes de ajuste, tanto para la ecuación de interpolación ( $y(x)$ ) como para la de extrapolación ( $f(x)$ ), se

obtiene la función global de estimación ( $z(x)$ ). Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla (Tabla 4.12):

Tabla 4.12: Coeficientes de las funciones de estimación del número de curva (CN), derivados del método del umbral de escorrentía de Témez

Uso de la tierra	Pendiente %	Características hidrológicas	Coeficientes de ajuste					
			$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$b_1$	$b_2$
Barbecho	≥ 3	R	72,29	18,43	-7,22	1,06	-12,35	2,97
		N	72,31	8,98	-0,82	-0,19	-11,99	-0,71
	<3	R/N	68,72	11,10	-3,52	0,54	-18,01	1,58
Cultivos en hilera	≥ 3	R	64,77	14,20	-2,20	0,05	-11,49	0,48
		N	63,61	11,95	-2,03	0,15	-16,30	1,02
	<3	R/N	61,31	11,07	-1,92	0,15	-20,18	0,71
Cereales de invierno	≥ 3	R	60,23	11,25	0,72	-0,52	-12,86	-0,32
		N	57,60	12,63	-0,27	-0,36	-15,91	-0,19
	<3	R/N	56,32	12,09	-0,34	-0,32	-18,61	-0,15
Rotación de cultivos pobre	≥ 3	R	62,17	13,74	-1,69	0,01	-12,77	1,07
		N	60,69	13,08	-1,66	0,02	-15,62	0,78
	<3	R/N	59,28	12,46	-1,63	0,02	-18,31	0,60
Rotación de cultivos densos	≥ 3	R	52,81	17,47	-2,16	-0,05	-16,07	0,37
		N	49,81	16,89	-1,47	-0,20	-18,17	0,12
	<3	R/N	46,15	20,31	-3,41	0,10	-21,12	0,20
Praderas	≥ 3	Pobre	64,66	10,79	0,37	-0,41	-10,38	-0,10
		Media	39,86	33,13	-9,93	1,22	-21,31	1,96
		Buena	*	32,33	26,59	-3,72	-21,88	0,40
		Muy buena	*	26,07	27,08	-3,51	-25,70	0,68
		Pobre	39,40	25,20	-2,95	-0,07	-14,75	39,40
	<3	Media	*	28,17	28,49	-3,55	-20,41	28,17
		Buena	**	49,95	8,62	-28,55	49,95	
		Muy buena	**	45,22	9,48	-31,58	45,22	
		Pobre	35,94	32,78	-8,50	0,89	-21,02	35,94
		Media	*	32,32	25,94	-3,63	-23,04	32,32
Plantaciones regulares. Aprovechamiento forestal	≥ 3	Buena	*	23,81	28,75	-3,81	-25,47	23,81
		Pobre	*	32,32	25,94	-3,63	-23,04	32,32
		Media	*	23,81	28,75	-3,81	-25,47	23,81
	<3	Buena	*	17,44	30,29	-3,80	-27,90	17,44
		Muy clara	48,69	25,45	-4,20	0,11	-10,04	48,69
Masas forestales (bosques, monte bajo, etc.)	Clara	33,41	39,54	-11,70	1,31	-20,44	33,41	
		Media	*	41,68	16,37	-1,80	-27,28	41,68
	Espesa	*	33,61	16,33	-1,71	-34,87	33,61	
		Muy espesa	*	24,77	17,18	-1,91	-42,69	24,77

\* Las ecuaciones de ajuste para estos casos son:

$$z(x) = \begin{cases} y(x) = a_1 + a_2 \cdot x + a_3 \cdot x^2 & \text{para } 1,5 \leq x \leq 3,5 \\ f(x) = \frac{b_1}{(\ln x)^2} + 100 & \text{para } x > 3,5 \end{cases}$$

\*\* Las ecuaciones de ajuste para estos casos son:

$$z(x) = \begin{cases} y(x) = a_2 + a_3 \cdot x & \text{para } 2,5 \leq x \leq 3,5 \\ f(x) = \frac{b_1}{(\ln x)^2} + 100 & \text{para } x > 3,5 \end{cases}$$

## **4.2. EL BALANCE HÍDRICO DEL SUELO COMO INDICADOR DEL ESTADO ANTECEDENTE DE HUMEDAD**

Ya se ha dicho que el contenido de humedad del suelo influye directamente sobre la capacidad de éste para producir escorrentía y que el valor del número de curva varía según tres estados de humedad (AMC).

La metodología para la determinación del AMC basada en la precipitación de los últimos 5 días ha quedado descartada por el propio NRCS (Hjelmfelt *et al.*, 2001). Tampoco la estimación de AMC propuesta por Ponce y Hawkins (1996), comentada en el Epígrafe 2.2.5, es trasladable al ámbito geográfico del presente trabajo, al no existir una relación directa entre el periodo de retorno de las tormentas americanas y las del territorio nacional.

Neitsch *et al.* (2002) y Young *et al.* (2005) indican correspondencias entre: AMC-I y el suelo seco o en el punto de marchitez permanente (*PMP*); AMC-II para las condiciones medias de humedad; AMC-III para los suelos próximos a la saturación o que hayan alcanzado la capacidad de campo.

A partir de estas referencias, para obtener una buena aproximación al AMC resulta necesario conseguir un buen estimador del contenido en humedad del suelo en el momento anterior a la tormenta; esto puede lograrse obteniendo un balance hídrico con una precisión diaria.

### **4.2.1. Estimación del balance hídrico del suelo**

Entre los numerosos modelos de balance hídrico, uno de los más difundidos es el desarrollado por Thornthwaite y Matter (1957), conocido popularmente como ficha hídrica. En este balance los datos de entrada son: la precipitación (*P*), la evapotranspiración potencial (*ETP*) a nivel mensual y la capacidad de retención de agua del suelo (*CRA*), todos ellos de fácil estimación o medida a través de los datos de las estaciones meteorológicas y de las características edáficas.

Los autores originales proponen el balance a escala mensual que, conceptualmente, corresponde al esquema mostrado en la Figura 4.4.

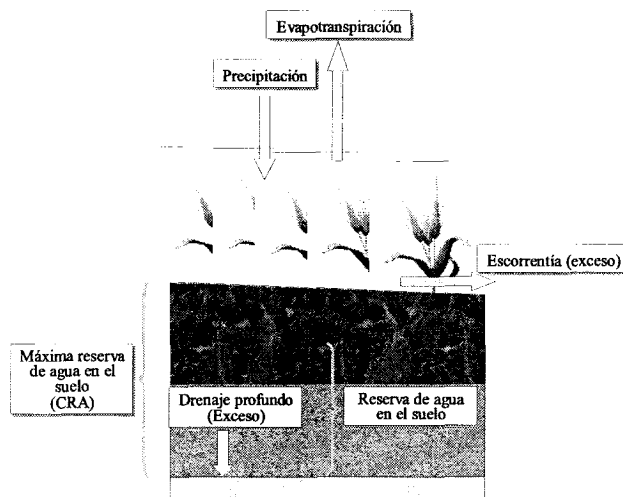


Figura 4.4: Esquema general del balance hídrico del suelo propuesto por Thornthwaite-Matter (elaboración propia)

Las hipótesis en las que se fundamenta dicho balance hídrico son (Del Río *et al.*, 1994):

- La profundidad del suelo donde se producen las pérdidas de agua por evapotranspiración viene dada por la profundidad del sistema radical de la vegetación; la cantidad de agua susceptible de ser evapotranspirada en esta zona es la comprendida entre la capacidad de campo y el punto de marchitez, ya que el exceso de agua o agua gravitacional se pierde por gravedad formando la escorrentía subterránea.
- En los meses en los que las precipitaciones ( $P$ ) son mayores que los valores respectivos de la evapotranspiración potencial ( $ETP$ ), la evapotranspiración real ( $ETR$ ) coincide con la potencial y la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración potencial ( $P-ETP$ ) o superávit se emplea en recargar la reserva del suelo ( $R$ ) hasta un máximo igual a la capacidad de retención de agua del suelo ( $CRA$ ). Una vez alcanzado el valor de la  $CRA$  por  $R$  el agua sobrante se incorpora a zonas profundas del suelo o forma parte de la escorrentía superficial.

$$\text{Si } P > ETP \rightarrow ETR = ETP \text{ y } P - ETP = S \rightarrow \text{Recarga de la reserva} \quad 4.24$$

- Si la precipitación es igual que la evapotranspiración potencial ( $P=ETP$ ) no hay exceso de agua para recargar el suelo o para generar escorrentía.
- En los meses en los que las precipitaciones ( $P$ ) son menores que la evapotranspiración potencial ( $ETP$ ), el agua evapotranspirada realmente ( $ETR$ ) será igual al valor total de la precipitación más la cantidad extra procedente de las reservas del suelo ( $R$ ) del mes anterior.

$$\text{Si } P < ETP \rightarrow ETR = P + \Delta R \quad 4.25$$

Admitiéndose que la reserva de agua de un suelo, cuando el clima demanda más de lo que aporta, desciende de forma exponencial, se pueden resumir las distintas situaciones de cálculo en la siguiente tabla (Tabla 4.13):

Tabla 4.13: Situaciones de cálculo del balance hídrico del suelo

Situación del suelo	Variables estimadas		
	Reserva de agua en el suelo ( $R$ )	Pérdidas potenciales acumuladas ( $PPA$ )	Exceso ( $S$ )
Suelo desecándose ( $P_t - ETP_t$ ) < 0	$CRA \cdot e^{\left(\frac{PPA}{CRA}\right)}$	$PPA_{t-1} + (P_t - ETP_t)$	0
Suelo en humectación ( $P_t - ETP_t$ ) > 0 pero $R_{t-1} + (P_t - ETP_t) \leq CRA$	$R_{t-1} + (P_t - ETP_t)$	$CRA \cdot \ln\left(\frac{R_t}{CRA}\right)$	0
Suelo drenado por encima de la CRA ( $P_t - ETP_t$ ) > 0 pero $R_{t-1} + (P_t - ETP_t) > CRA$	$CRA$	0	$R_{t-1} + (P_t - ETP_t) - CRA$

#### 4.2.2. Adaptación del balance hídrico mensual a diario

Para poder adaptar las fórmulas mensuales del balance hídrico de Thonhwaite y Matter (Tabla 4.13) a un balance con un paso de tiempo diario hay que plantear una nueva hipótesis de cálculo, en la que se debe suponer que el contenido de agua en el suelo por encima de la capacidad de campo, pero por debajo de la saturación, es drenado de la zona radicular hacia el drenaje profundo en el mismo día en el que se produce el excedente de agua.

Aplicando esta nueva hipótesis y las planteadas para el balance mensual, por definición, si no hay precipitación en un día, el descenso de la reserva de agua en el suelo en ese mismo día es igual a la evapotranspiración real.

$$\frac{dR}{dt} = ET \quad 4.26$$

Donde:  $\frac{dR}{dt}$  es la variación de la reserva de agua del suelo respecto del tiempo

$ET$  es la evapotranspiración

Si se asume que la evapotranspiración y la reserva de agua en el suelo mantienen una relación lineal (como la mostrada en la Figura 4.5) de tal forma que la máxima evapotranspiración (evapotranspiración potencial) se da en los momentos en los que la reserva del suelo se hace máxima o se alcanza la capacidad de campo, la  $ET$  se puede expresar como:

$$ET = ETP \cdot \frac{R}{CRA} \quad 4.27$$

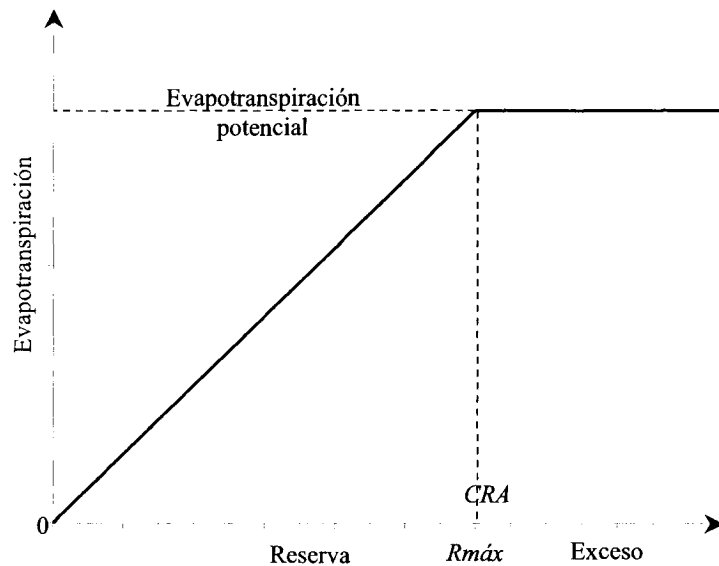


Figura 4.5: Relación lineal entre la evapotranspiración y la reserva de agua en el suelo (elaboración propia)

Cuando se da un evento de precipitación hay que asumir que la evapotranspiración (*ET*) ha de consumir, en primer lugar, el agua de lluvia para una vez agotada esta comenzar a extraer agua del interior del suelo, puesto que, a priori, el agua de lluvia se ha de localizar cerca de la superficie del terreno, en contacto más directo con la atmósfera y, por tanto, requiere un potencial de succión menor que el necesario para evaporar agua del interior del suelo.

Si se sustituye la ecuación 4.27 en la 4.26 y se opera adecuadamente se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{dR}{R} = \frac{1}{CRA} \cdot ETP \cdot dt \tag{4.28}$$

Integrando ambos miembros de la ecuación 4.28 desde cero (instante en el que la reserva del suelo ha alcanzado el máximo) hasta un instante de tiempo *t*, en el que la reserva del suelo ha variado (*R<sub>t</sub>*):

$$\int_{CRA}^{R_t} \frac{dR}{R} = \frac{1}{CRA} \cdot \int_0^t ETP \cdot dt \tag{4.29}$$

Resolviendo la ecuación 4.29 y despejando la reserva de agua para el instante *t*:

$$R_t = CRA \cdot e^{\left( \frac{\int_0^t ETP \cdot dt}{CRA} \right)} \tag{4.30}$$

Transformado la integral en un elemento discreto con incrementos diarios, la ecuación 4.30 puede ser escrita como:

$$R_t = CRA \cdot e^{\left( \frac{\sum_{i=0}^t ETP_i}{CRA} \right)} \quad 4.31$$

Donde:  $R_t$  es la reserva de agua en el suelo existente en el día  $t$

$CRA$  es la máxima reserva de agua en el suelo o capacidad de retención de agua

$\sum_{i=0}^t ETP_i$  se puede definir como la pérdida potencial acumulada de agua por parte del suelo ( $PPA_t$ )

Y, por tanto, la ecuación que permite estimar la reserva de agua en el suelo en un día se puede escribir como:

$$R_t = CRA \cdot e^{\left( \frac{PPA_t}{CRA} \right)} \quad 4.32$$

Si bien el método de Thornthwaite-Matter está derivado para el proceso de desecación de un suelo, suponiendo que tanto la pérdida de agua por parte del suelo como la ganancia son situaciones reversibles, en aquellos días en los que la reserva ( $R_t$ ) se incrementa, lo hace en una cantidad igual a la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración potencial ( $P-ETP$ ) y, por tanto,:

$$R_t = R_{t-1} + (P_t - ETP_t) \quad 4.33$$

Despejando  $PPA_t$  de la ecuación 4.32, se puede continuar el cálculo del balance hídrico:

$$PPA_t = CRA \cdot \ln\left(\frac{R_t}{CRA}\right) \quad 4.34$$

La reserva de agua en el suelo nunca puede superar la capacidad de retención de agua ( $CRA$ ), puesto que es la máxima reserva posible, momento en el que las pérdidas potenciales de agua del suelo se hacen cero.

$$\text{Si } R_t = R_{t-1} + (P_t - ETP_t) \geq CRA \Rightarrow R_t = CRA \text{ y } PPA_t = 0 \quad 4.35$$

En aquellos días en los que la precipitación no supera a la evapotranspiración ( $P_t < ETP_t$ ), las pérdidas potenciales ( $PPA_t$ ) se pueden estimar como:

$$PPA_t = PPA_{t-1} + (P_t - ETP_t) \quad 4.36$$

Y, por tanto, la reserva de agua en el suelo ( $R_t$ )

$$R_t = CRA \cdot e^{\left( \frac{PPA_t}{CRA} \right)} \quad 4.37$$

Por lo que el balance hídrico de Thornthwaite-Matter puede ser utilizado a escala diaria si se dispone de la información termopluviométrica con este detalle.

Si se comparan los balances hídricos mensuales con los diarios, fácilmente se observa que los diarios muestran oscilaciones de importancia en la reserva de agua cuando ésta se hace máxima, así como diversos desfases en las curvas de agotamiento y recarga de la reserva, ya que los balances mensuales tan sólo muestran la tendencia de la reserva. Estos desfases resultan ser mayores cuanto menor es la cuantía de la reserva máxima, como se puede comprobar en los siguientes gráficos:

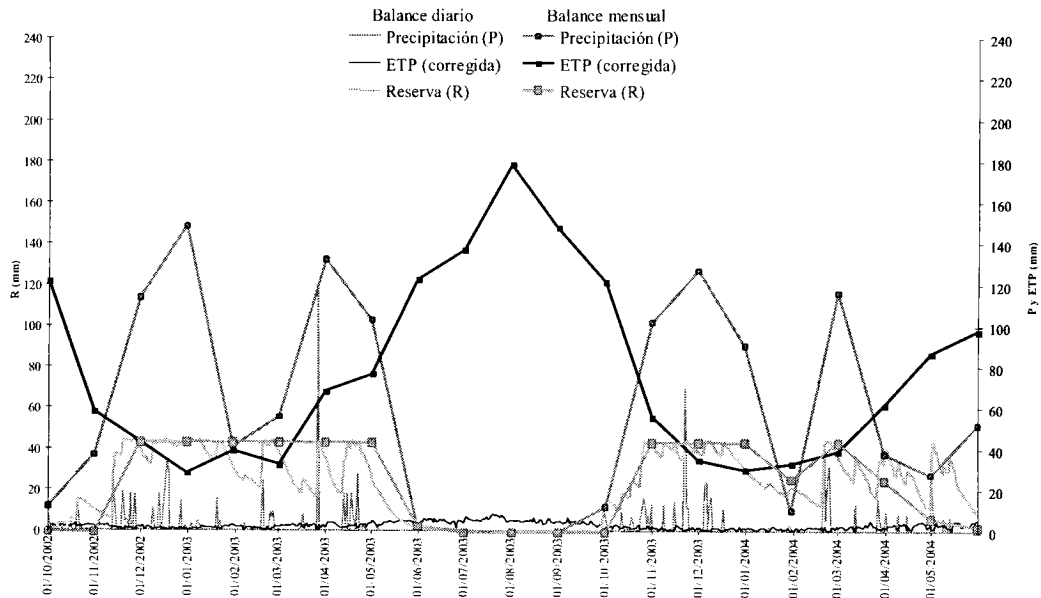


Figura 4.6: Comparación del balance mensual y diario, CRA baja

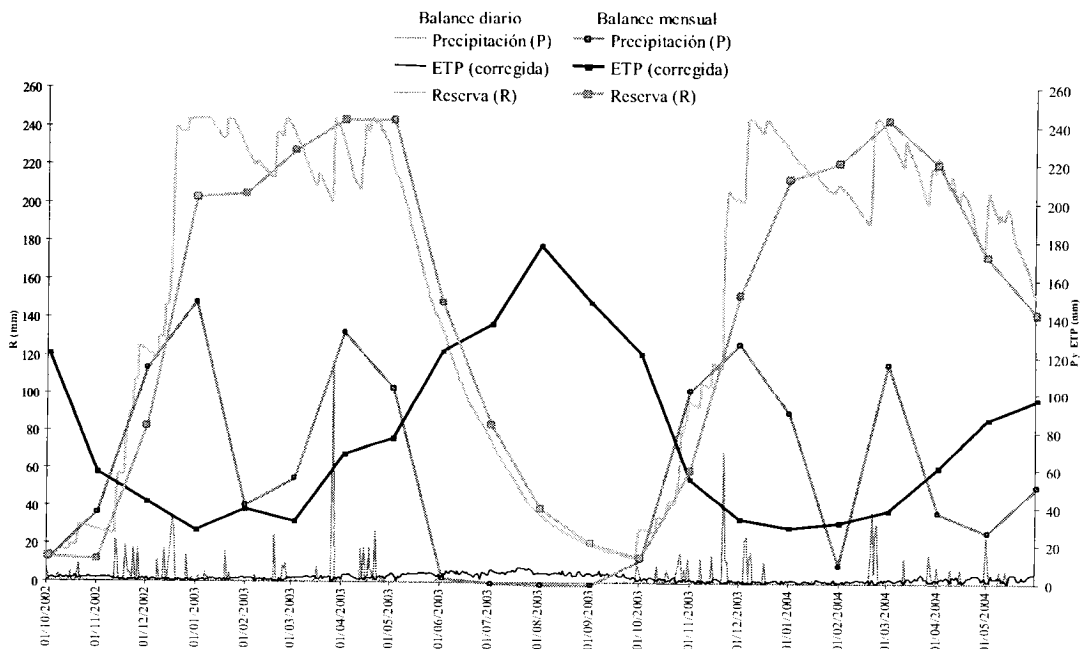


Figura 4.7: Comparación del balance mensual y diario, CRA alta

### 4.2.3. Estimación de la capacidad de retención de agua

La estimación de la capacidad de retención de agua se ha realizado tanto en su versión original (*CRA*), como en la modificada (*CRAM*) y disponible (*CRAD*).

#### 4.2.3.1. Método de cálculo de la *CRA* (Gandullo, 1985)

Este modelo estima la capacidad de campo en condiciones naturales teniendo en cuenta las características del drenaje que influyen sobre el retardo de la entrada de aire en los poros grandes del suelo.

El proceso de cálculo se desarrolla en varios apartados:

a) Estimación de los parámetros que condicionan la permeabilidad y las condiciones de drenaje del perfil.

La estimación de la permeabilidad se realiza mediante un método indirecto, a través de un parámetro relativo adimensional resultado de combinar otros dos parámetros, el coeficiente de capacidad de cementación (*CCC*) y el coeficiente de impermeabilidad de limo (*CIL*), que evalúan la posibilidad de encharcamiento y que se definen como:

$$CCC = \frac{(\% \text{ arcilla} - 4 \cdot \% \text{ MO}) \text{ en tierra fina}}{\% \text{ TF (en suelo natural)}} \quad 4.38$$

$$CIL = \frac{\% \text{ limo (en tierra fina)} \cdot \% \text{ TF (en suelo natural)}}{10^4} \quad 4.39$$

Donde: *CCC* es el coeficiente de capacidad de cementación

*% arcilla* es el porcentaje de arcilla en tierra fina

*% MO* es el porcentaje de materia orgánica en tierra fina

*% TF* es el porcentaje de tierra fina sobre una muestra de tierra natural secada al aire

*CIL* es el coeficiente de impermeabilidad del limo

*% limo* es el porcentaje de limo en tierra fina

Con dichos coeficientes se entra en la Figura 4.8, que clasifica la permeabilidad del horizonte (*Per<sub>i</sub>*) en cinco categorías crecientes (de 1 a 5).

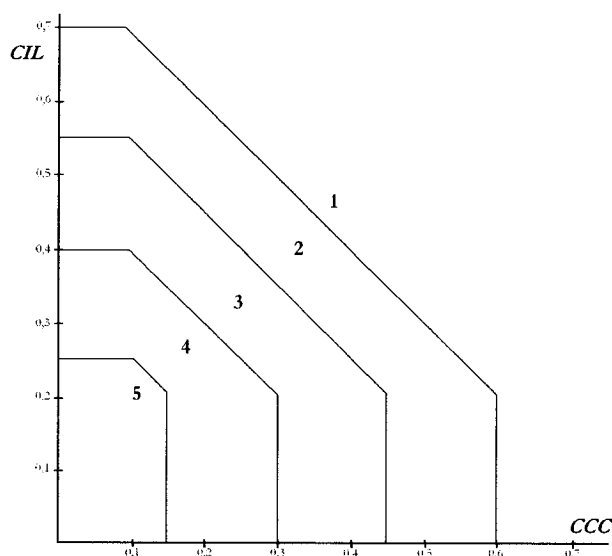


Figura 4.8: Valores del parámetro de permeabilidad ( $Per_j$ ) en función de CCC y CIL (Gandullo, 1985)

Se obtiene así un número natural que indica el grado de permeabilidad de cada horizonte ( $Per_j$ ), pudiéndose obtener un valor único para cada perfil mediante la media ponderada en función del espesor de cada horizonte.

b) Cálculo del equivalente de humedad ( $h_e$ ) del suelo sobre datos texturales y de materia orgánica.

El valor del equivalente de humedad se estima para muestras alteradas de tierra fina según la ecuación obtenida mediante regresión estadística por Sánchez y Blanco (1985):

$$h_e = 4,6 + 0,43 \cdot (\% \text{ arcilla}) + 0,25 \cdot (\% \text{ limo}) + 1,22 \cdot (\% \text{ MO}) \quad 4.40$$

Donde:  $h_e$  es el porcentaje de peso de agua sobre el peso de suelo seco, para una muestra de tierra fina, una vez eliminada el agua gravitacional

% arcilla es el porcentaje de arcilla en tierra fina

% limo es el porcentaje de limo en tierra fina

% MO es el porcentaje de materia orgánica en tierra fina

c) Corrección del equivalente de humedad ( $h_e$ ) a partir de los datos de drenaje y obtención del parámetro CRA.

Una vez determinado el valor equivalente de humedad del suelo ( $h_e$ ), Gandullo (1985) desarrolla un modelo físico para adaptar a la muestra de laboratorio algunas de las condiciones ecológicas reales en las que se encontraba el suelo. La estimación de la capacidad de campo se realiza mediante la siguiente expresión (Gandullo, 1994):

$$CRA = \left[ 12,5 \cdot h_e + \frac{12,5 \cdot (50 - h_e) \cdot k}{2} \right] \cdot \frac{c \cdot \%TF}{100} \quad 4.41$$

Donde:  $CRA$  es la capacidad de retención de agua de un horizonte de suelo (mm/m)

$h_e$  es el equivalente de humedad de la tierra fina de ese horizonte (ecuación 4.40)

$k$  es un coeficiente que depende de la permeabilidad de ese horizonte ( $Per_j$ ), de la permeabilidad del horizonte inmediatamente inferior ( $Per_{j+1}$ ) y de la pendiente del terreno

$c$  es el complemento a uno de la pendiente en que se encuentre dicho suelo, expresada la pendiente en tanto por uno

%  $TF$  es el porcentaje de tierra fina de ese horizonte, con respecto a la tierra natural

El coeficiente  $k$  vale cero cuando el horizonte inferior ( $Per_{j+1}$ ) es de igual o mayor permeabilidad que el superior ( $Per_j$ ) y, en caso contrario, varía entre cero y uno, tomando los valores deducidos de la siguiente expresión:

$$k = 1 - a_i - (1 + a_s) \cdot (1 - c) \quad 4.42$$

Donde:  $k$  es el coeficiente que depende de la permeabilidad de los horizontes

$a_i$  es un coeficiente que depende de la permeabilidad del horizonte inferior ( $Per_{j+1}$ )

$a_s$  es un coeficiente que depende de la permeabilidad del horizonte superior ( $Per_j$ )

$c$  es el complemento a uno de la pendiente en que se encuentre dicho suelo, expresada la pendiente en tanto por uno

Los coeficientes que dependen de la permeabilidad del horizonte  $j$ -ésimo toman los siguiente valores:

Tabla 4.14: Valores del coeficiente  $a_j$

Permeabilidad del horizonte $j$	$a_j$
1	0
2	0,2
3	0,4
4	0,6
5	0,8

#### 4.2.3.2. Estimación de la capacidad de retención de agua modificada (CRAM)

En distintos trabajos edafológicos realizados en la cuenca del embalse de El Sancho y en las proximidades de ésta (Domingo, 2002; Domingo *et al.*, 2002; Domingo *et al.*, 2003) se ha observado que, en un elevado número de casos, los valores calculados para la  $CRA$  según la metodología descrita anteriormente no se corresponden sobre el terreno con el estado general de los ecosistemas. Dichos autores han contrastado estas anomalías al obtener correlaciones

muy débiles entre variables tan relacionadas a priori como la capacidad de retención de agua y la productividad forestal.

Por esto, en el presente trabajo se ha optado por utilizar la capacidad de retención de agua modificada para la estimación de los balances hídricos de la cuenca del embalse de El Sancho.

La fórmula para determinar la capacidad de retención de agua modificada (*CRAM*) es la que se muestra a continuación (Domingo *et al*, 2006):

$$CRAM = \left[ 12,5 \cdot h_e + \frac{12,5 \cdot (50 - h_e) \cdot c \cdot k}{2} \right] \cdot \frac{\%TF}{100} \quad 4.43$$

Donde: *CRAM* es la capacidad de retención de agua modificada de un horizonte de suelo (mm/m)

$h_e$  es el equivalente de humedad de la tierra fina de ese horizonte (ecuación 4.40)

$k$  es un coeficiente que depende de la permeabilidad de ese horizonte ( $Per_j$ ), de la permeabilidad del horizonte inmediatamente inferior ( $Per_{j+1}$ ) y de la pendiente del terreno, y se puede calcular según la ecuación 4.42

$c$  es el complemento a uno de la pendiente en que se encuentre dicho suelo, expresada la pendiente en tanto por uno

$\% TF$  es el porcentaje de tierra fina de ese horizonte, con respecto a la tierra natural

#### 4.2.3.3. Estimación de la capacidad de retención de agua disponible (*CRAD*)

La obtención de este parámetro edáfico permite relacionar la capacidad de campo de un suelo (*CC*) o cantidad de agua por unidad de volumen presente en un suelo después de su llenado a saturación y posterior drenaje durante 48 horas, con el punto de marchitez permanente (*PMP*) o contenido en agua por debajo del cual las plantas mesofíticas no son capaces de extraer más agua del suelo.

En la Figura 4.9 se puede apreciar la relación entre la capacidad de campo, el punto de marchitez permanente y el agua disponible, que matemáticamente se puede expresar como:

$$CRAD = \sum_{i=1}^n (CC - PMP)_i \cdot e_i \quad 4.44$$

Donde: *CRAD* es la capacidad de retención de agua disponible

*CC* es la capacidad de campo, en mm de agua por m de espesor del horizonte  $i$

*PMP* es el punto de marchitez permanente, en mm de agua por m de espesor del horizonte  $i$

$e_i$  es el espesor en metros del horizonte  $i$

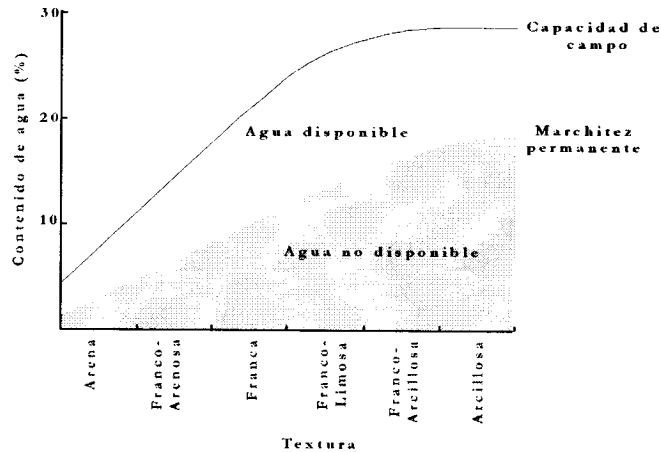


Figura 4.9: Relación entre el agua disponible, la CC y el PMP en función de la textura (traducido de Brandy y Weil, 1996)

El cálculo de la *CRAD* se realiza de forma similar al de la *CRAM*, pero con la siguiente ecuación:

$$CRAD = \left[ 12,5 \cdot h_e \cdot d + \frac{12,5 \cdot (50 - h_e) \cdot c \cdot k}{2} \right] \cdot \frac{\%TF}{100} \quad 4.45$$

Donde: *CRAD* es la capacidad de retención de agua disponible de un horizonte de suelo (mm/m)

$h_e$  es el equivalente de humedad de la tierra fina de ese horizonte (ecuación 4.40)

$d$  es el coeficiente de agua disponible en ese horizonte (tanto por uno)

$k$  es un coeficiente que depende de la permeabilidad de ese horizonte ( $Per_j$ ), de la permeabilidad del horizonte inmediatamente inferior ( $Per_{j-1}$ ) y de la pendiente del terreno, y se puede calcular según la ecuación 4.42

$c$  es el complemento a uno de la pendiente en que se encuentre dicho suelo, expresada la pendiente en tanto por uno

$\% TF$  es el porcentaje de tierra fina de ese horizonte, con respecto a la tierra natural

El valor del coeficiente  $d$  se estima a partir de la siguiente expresión:

$$d = \frac{\theta_{10} - \theta_{1500}}{\theta_{10}} \quad 4.46$$

Donde:  $\theta_{10}$  es el contenido de agua del suelo para un potencial de 10 kPa

$\theta_{1500}$  es el contenido de agua del suelo para un potencial de 1500 kPa o punto de marchitez permanente.

Los contenidos de agua para los distintos potenciales hídricos se pueden estimar, de forma sencilla, a través de fórmulas de regresión, como las establecidas por Saxton *et al.* (1986):

$$\theta_{\psi} = \left( \frac{\psi}{A} \right)^{1/B} \quad 4.47$$

Donde:  $\theta_{\psi}$  es el contenido de agua del suelo para el potencial hídrico  $\psi$

$\psi$  es el potencial hídrico para el que se desea estimar el contenido de humedad (kPa)

$A$  y  $B$  son los coeficientes de ajuste de la regresión, cuyas expresiones para potenciales comprendidos entre 10 y 1500 kPa son:

$$A = 100 \cdot e^{-4,396 - 0,0715 \cdot \text{arcilla} - 4,88 \cdot 10^{-4} \cdot \text{arena}^2 - 4,285 \cdot 10^{-5} \cdot \text{arena}^2 \cdot \text{arcilla}} \quad 4.48$$

$$B = -3,140 - 2,22 \cdot 10^{-3} \cdot \text{arcilla}^2 - 3,484 \cdot 10^{-5} \cdot \text{arena}^2 \cdot \text{arcilla} \quad 4.49$$

Donde: *arcilla* y *arena* son los porcentajes de arcilla y arena de cada horizonte.

#### 4.2.4. Estimación del estado antecedente de humedad

Una vez definido el balance hídrico del suelo a nivel diario es necesario establecer una relación entre la reserva de agua del suelo y lo que el modelo del número de curva llama condición antecedente de humedad del suelo. En el presente trabajo se han establecido dos posibles metodologías de estimación de dicho estado; una primera basada en el porcentaje de la reserva y una segunda basada en el contenido de agua del suelo.

##### 4.2.4.1. Estimación de AMC según el porcentaje de saturación de la reserva de agua en el suelo (%R)

Este método asume que un suelo que alcanza la capacidad de campo presenta su reserva de agua llena al 100% y, por tanto, se encuentra saturado y tiene una alta capacidad para producir escorrentía, puesto que la tasa de infiltración del suelo habrá decaído hasta su valor mínimo. Por el contrario, un suelo seco, con su reserva próxima a estar agotada, se encontrará en una situación en la que la tasa de infiltración se hace máxima.

Al suelo con la reserva de agua completamente llena se le asignaría una AMC de tipo III, mientras que el que tenga la reserva agotada (0%) estaría en AMC de tipo I. Entre medias de ambas condiciones existirían todos los valores posibles.

Por lo tanto, se pueden asignar los distintos porcentajes de la reserva a los distintos estados antecedentes de humedad y equipararlos a números reales comprendidos entre 1 y 3, como se puede ver en la Tabla 4.15.

Tabla 4.15: Relación entre los estados antecedentes de humedad y el porcentaje de reserva de agua del suelo

Estado antecedente de humedad (NRCS, 1972)	% de la reserva	Índice de humedad
---	--------------------	----------------------

Condición I	0	1
Condición II	50	2
Condición III	100	3

Correlacionando el porcentaje de la reserva con el índice de humedad se ha desarrollado una ecuación que transforma los porcentajes a valores continuos del índice de humedad, comprendidos entre 1 y 3, como se puede ver en la siguiente ecuación.

$$IH = 1 + 0,02 \cdot \%R \quad 4.50$$

Donde: *IH* es el índice de humedad asociado a la reserva

*%R* es el porcentaje de la reserva de agua en el suelo

Representando gráficamente la ecuación 4.50 se observa la relación existente entre el índice de humedad asociado a la reserva y el estado antecedente de humedad.

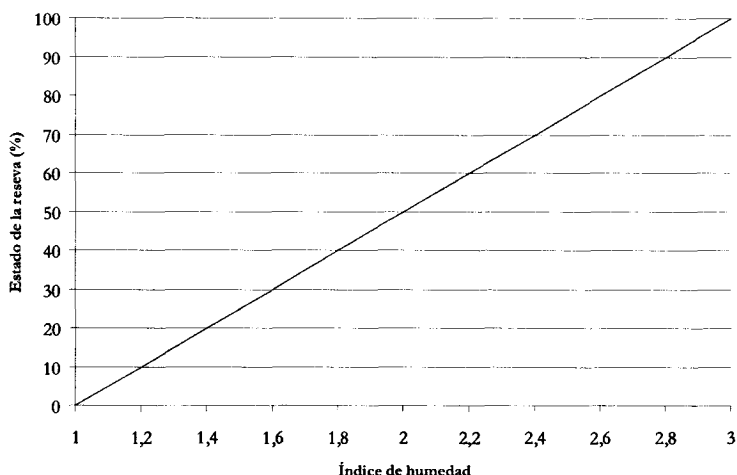


Figura 4.10: Relación entre el índice de humedad y el estado de la reserva de agua en el suelo

En epígrafes posteriores se relacionará el índice de humedad con el número de curva.

#### 4.2.4.2. Estimación de AMC según el contenido de agua disponible en el suelo (*I<sub>eh</sub>*)

En este caso se ha realizado la estimación de un parámetro en función del contenido de agua disponible en el suelo, asumiendo los siguientes supuestos:

- a) Se consideran suficientemente aproximadas las equivalencias de contenido de humedad del punto de marchitez permanente para el estado antecedente de humedad I y el de la capacidad de campo para el estado III (Tabla 4.16) dados por Neitsch *et al.* (2002) y Young *et al.* (2005).

Tabla 4.16: Relación entre los estados antecedentes de humedad y el contenido de agua del suelo

Estado antecedente de humedad (NRCS, 1972)	Contenido de agua del suelo Neitsch <i>et al.</i> y Young <i>et al.</i>
Condición I	Punto de marchitez permanente
Condición II	$\frac{PMP + CC}{2}$

- b) Dado que la determinación del número de curva en el estado antecedente de humedad medio (II) proviene de datos puntuales con cierto rango de variación, se asume que, para dicho estado de humedad, los valores del número de curva varían de forma proporcional a la humedad que contenga el suelo. Se considera que esta variación puede ser expresada a través de un índice de estado antecedente de humedad ( $I_{eh}$ ). Por lo tanto,  $I_{eh}$  puede tomar los valores: 1 para los estados antecedentes de humedad I (PMP); 3 para los estados antecedentes III (CC); un valor de variación lineal entre 1 y 3 para los estados antecedentes de humedad II, en función de la humedad que presenta el suelo (Figura 4.11), según la expresión:

$$\begin{cases} \text{Si } \theta_i < \theta_{PMP} \Rightarrow I_{eh} = 1 \\ \text{Si } \theta_{PMP} \leq \theta_i \leq \theta_{CC} \Rightarrow I_{eh} = 2 \cdot \frac{\theta_i - \theta_{PMP}}{\theta_{CC} - \theta_{PMP}} + 1 \\ \text{Si } \theta_{CC} < \theta_{PMP} \Rightarrow I_{eh} = 3 \end{cases} \quad 4.51$$

Donde :  $I_{eh}$  es el índice de estado antecedente de humedad

$\theta_i$  es el contenido de agua del suelo en el instante  $i$

$\theta_{PMP}$  es el contenido de agua del suelo en el punto de marchitez permanente

$\theta_{CC}$  es el contenido de agua del suelo a la capacidad de campo

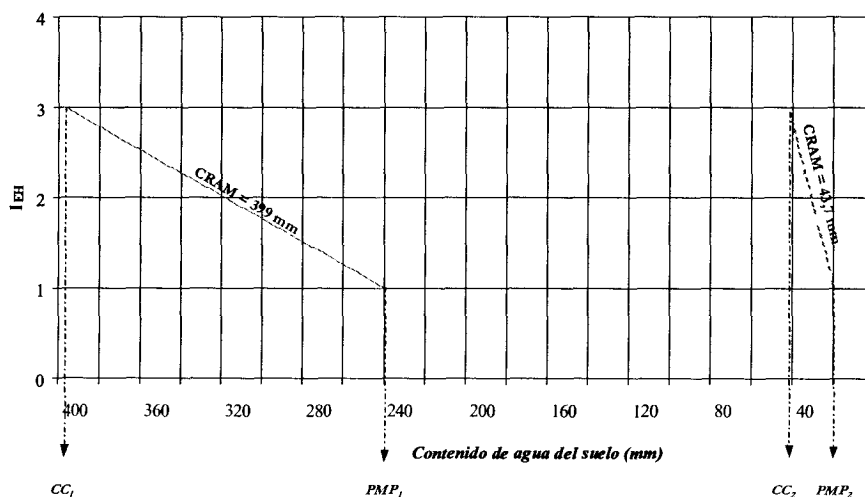


Figura 4.11: Comportamiento del índice de estado antecedente de humedad para dos suelos

Así se puede establecer una relación directa entre los estados antecedentes de humedad propuestos por Neitsch *et al.* (2002) y Young *et al.* (2005), y el índice de estado antecedente de humedad del suelo, como se expone a continuación:

Tabla 4.17: Relación entre los estados antecedentes de humedad del suelo y el índice de estado antecedente de humedad

Estado antecedente de humedad (NRCS, 1972)	Contenido de agua del suelo Neitsch <i>et al.</i> y Young <i>et al.</i>	Índice de estado antecedente de humedad
Condición I	Punto de marchitez permanente o menor	1
Condición II	$\frac{PMP + CC}{2}$	2
Condición III	Capacidad de campo	3

#### 4.2.5. Relación del índice de humedad ( $I_H$ ) y del índice de estado antecedente de humedad ( $I_{eh}$ ) con el número de curva

De los dos métodos propuestos para la estimación del estado antecedente de humedad se puede deducir que expresar el contenido de humedad a través de un índice continuo permite trabajar con números de curva para cualquier situación, no sólo para las tres condiciones antecedentes de humedad, sino que se puede estimar un número de curva para cualquiera de los valores adoptados.

Se debe admitir que las simplificaciones asumidas pueden conllevar errores, pero el conjunto constituye una aproximación de mayor precisión que la metodología discreta, en la que asumir un estado antecedente de humedad erróneo conlleva una fuerte variación en la determinación del número de curva. En esta nueva metodología continua los errores por la estimación del estado antecedente se minoran por la variación progresiva de los valores del  $I_H$  y  $I_{eh}$ .

Las ecuaciones de Hawkins *et al.* (1985), permiten transformar un número de curva para la AMC media (II) (o  $I_H=2$  ó  $I_{eh}=2$ ) a cualquiera de las condiciones extremas ( $AMC-I$  o  $AMC-III$ ). Si se aplican los índices continuos  $I_H$  e  $I_{eh}$  a estas ecuaciones se puede llegar a una expresión (4.52) que permite calcular el número de curva para cualquier valor de humedad edáfica .

$$\left\{ \begin{array}{l} CN_i = \frac{(2 - I_{eh}) \cdot CN_{II}}{2,281 - 0,01281 \cdot CN_{II}} + (I_{eh} - 1) \cdot CN_{II} \quad \text{Si } 1 \leq I_{eh} \leq 2 \\ CN_i = \frac{(I_{eh} - 2) \cdot CN_{II}}{0,427 + 0,00573 \cdot CN_{II}} + (3 - I_{eh}) \cdot CN_{II} \quad \text{Si } 2 \leq I_{eh} \leq 3 \end{array} \right. \quad 4.52$$

Donde :  $CN_i$  es el número de curva para cualquier contenido de agua del suelo

$I_{eh}$  es el índice de estado antecedente de humedad para el que se quiere conocer su número de curva. En el caso de trabajar con el índice de humedad ( $I_H$ ) se debe sustituir  $I_{eh}$  por el índice de humedad ( $I_H$ )

$N_{II}$  es el número de curva en condiciones medias o para un  $I_H$  ó  $I_{eh} = 2$

La variación del número de curva en función del valor del índice de estado antecedente de humedad se puede apreciar en el siguiente gráfico.

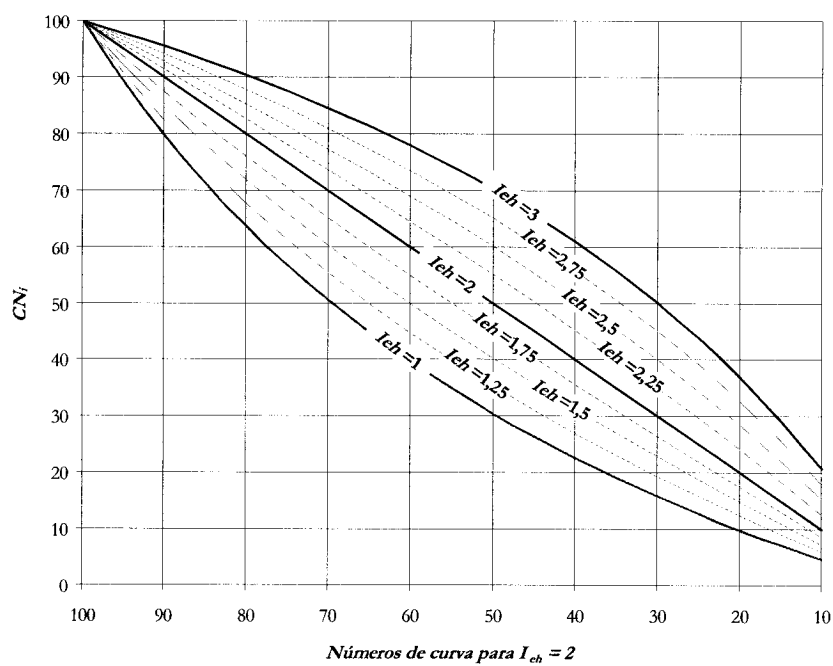


Figura 4.12: Relación entre los números de curva para distintos índices de estados antecedentes de humedad



## **CAPÍTULO 5: ADQUISICIÓN DE LA INFORMACIÓN BÁSICA PARA LA VALIDACIÓN DEL MODELO**

En los capítulos precedentes se ha realizado la descripción del método del número de curva analizando sus puntos fuertes y sus debilidades. Posteriormente se han planteado una serie de mejoras en la estimación de los parámetros del modelo, cuya validez debe ser contrastada. El contraste se realizará tomando como referencia los caudales reales obtenidos en una cuenca aforada.

En el presente capítulo se justifica la elección de la zona de trabajo y se describen las principales características de la cuenca. También se aborda la preparación de los datos meteorológicos, edafológicos y de usos del suelo necesarios para la obtención de los distintos parámetros de trabajo.

La información recopilada, filtrada, transformada y cartografiada se ha traspuesto a un sistema de información geográfica con el fin de establecer las relaciones espaciales entre todas las variables que intervienen en la estimación del número de curva y, así, al final del capítulo, calcular dicho parámetro en las distintas situaciones presentes en la cuenca.

### **5.1. ZONA DE ESTUDIO Y SUS CARACTERÍSTICAS GENERALES**

La elección de la cuenca piloto se realizó atendiendo al último objetivo de este trabajo: la validación de las mejoras propuestas al modelo del número de curva. Se necesitaba una cuenca aforada, con un buen registro de precipitaciones, con información edafológica con un nivel de detalle elevado y que no presentase infraestructuras de laminación de caudales o complejos kársticos de importancia que interfiriesen en los resultados.

A la vista de las necesidades se tomó como característica más limitante la existencia de información edafológica de detalle, puesto que es la más escasa y difícil de obtener y desarrollar. Diversas zonas de la provincia de Huelva presentan estudios de suelos con el nivel de detalle requerido.

La otra limitación viene dada por la disponibilidad de las estaciones de aforo de caudales. Se realizó un análisis de las estaciones de la Confederación Hidrográfica del Guadiana en la provincia de Huelva, apreciándose que o no ofrecían los datos necesarios para este trabajo o correspondían a cuencas en las que la red de drenaje está regulada o, simplemente, a cuencas excesivamente grandes.

Afortunadamente se tenía conocimiento de la existencia de datos de aforo del embalse de El Sancho, en la cuenca del río Meca. El titular de la explotación (Grupo Empresarial ENCE) cuenta con: un aforador automático de alta precisión del volumen de agua embalsada por la presa, un control exhaustivo de las salidas de agua (consumos y vertidos) y una red

automática de estaciones meteorológicas asociadas a la cuenca del embalse. Por otro lado, la información de suelos existente para la zona era bastante completa, pues sólo faltaba la cartografía edafológica de menos de 1.000 ha.

Por lo tanto se escogió la cuenca citada como zona de estudio para la comprobación y comparación de los modelos desarrollados.

### 5.1.1. Rasgos fisiográficos de la cuenca del embalse de El Sancho

La cuenca de aporte al embalse de El Sancho se encuentra en su totalidad dentro de la provincia de Huelva, en el cuadrante suroeste de esta provincia. La presa se sitúa sobre el río Meca en el término municipal de Gibraleón, próxima a la confluencia del Meca con el Odiel. Al ser el Meca un afluente por la derecha del Odiel, hidrográficamente se encuadra dentro de la cuenca del Guadiana (Figura 5.1).

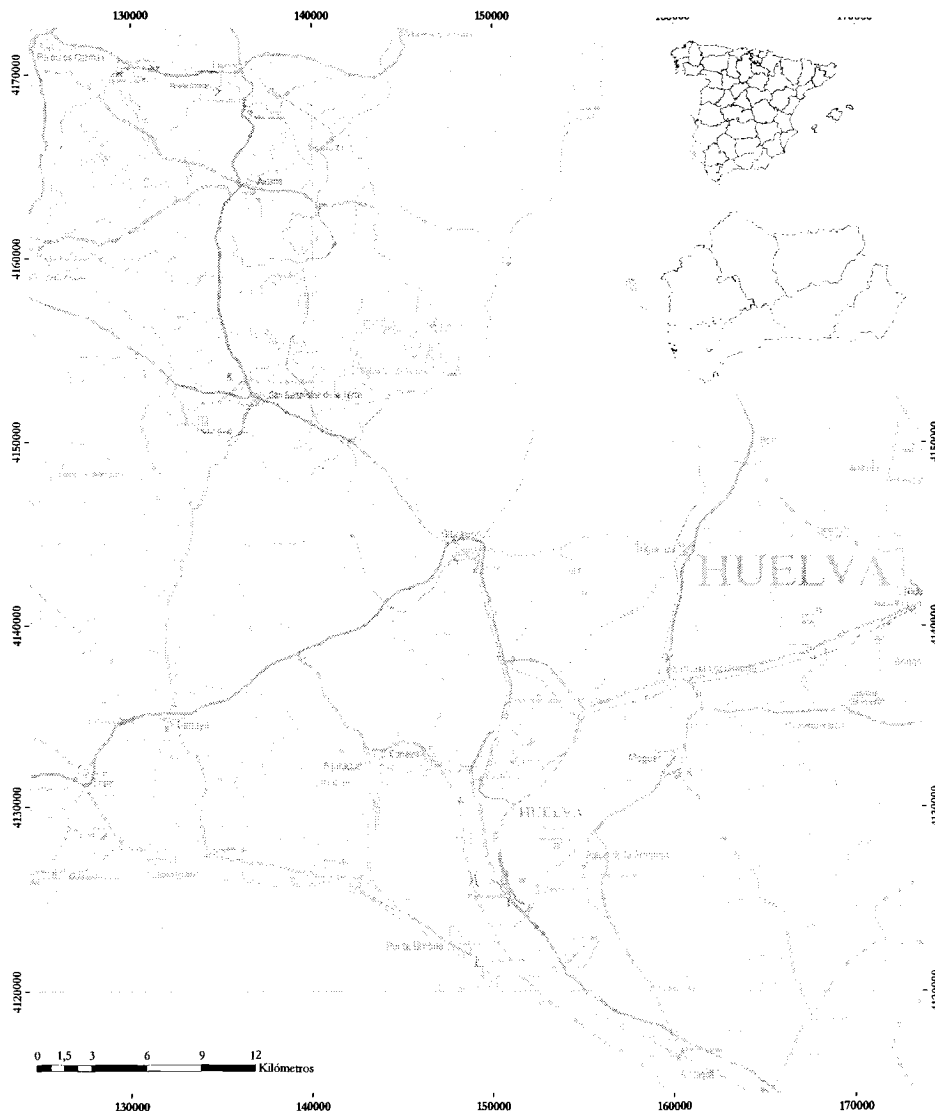


Figura 5.1: Mapa de situación del área de estudio

La cuenca del embalse de El Sancho presenta una superficie de aporte de 314 km<sup>2</sup>, repartiéndose entre los términos municipales de Alosno, Gibráleón, San Bartolomé de la Torre, Villanueva de los Castillejos, El Almendro y Puebla de Guzmán.

### 5.1.2. Relieve

La cota máxima de la cuenca alcanza los 394 m, mientras que la mínima es tan sólo de 47 m, siendo la altitud media de 152 m.

La cuenca posee un relieve suavemente ondulado, presentando el 80% de su superficie pendientes inferiores al 20%, como se puede ver en la Figura 5.2. Las mayores pendientes se localizan básicamente en tres grandes áreas: en la proximidades del vaso de la presa, en la zona centro y en el norte de la cuenca.

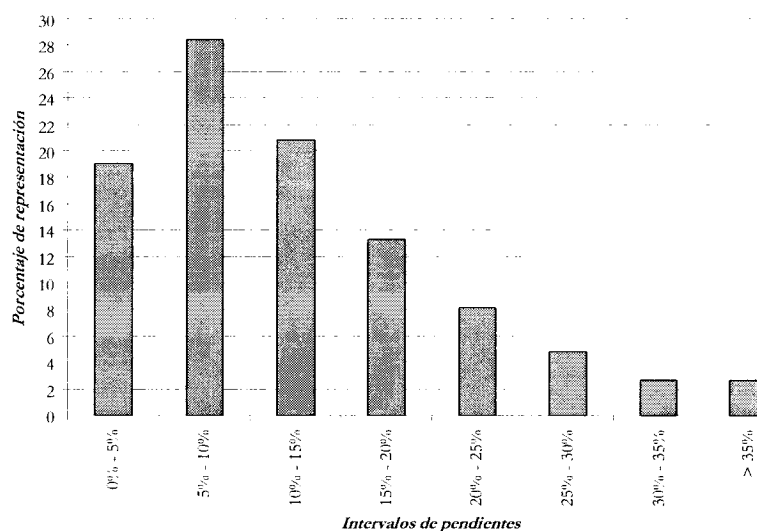


Figura 5.2: Distribución de las pendientes dentro de la cuenca

Las áreas de menor pendiente se concentran en la zona baja del sur y del suroeste, en concreto en los términos municipales de Villanueva de los Castillejos y en San Bartolomé de la Torre.

### 5.1.3. Climatología

Se puede decir que dos circunstancias principales rigen el clima en el entorno próximo de la cuenca: a) las altas presiones estivales del llamado anticiclón de las Azores, que implican una baja nubosidad y b) la llegada de borrascas atlánticas al SO de la península, que tiene lugar principalmente durante los meses fríos, de octubre a abril, dando lugar a una gran inestabilidad vertical, con lluvia y tormentas.

Los factores citados y algunos otros caracterizan la cuenca dentro del subtipo fitoclimático mediterráneo genuino fresco (Allué, 1990), caracterizado por la presencia de un periodo seco mayor de tres meses, temperatura media de las mínimas del mes más frío mayor de 5°C y menor de 9,5°C, y precipitaciones anuales por encima de los 500 mm, como se aprecia en la Figura 5.3.

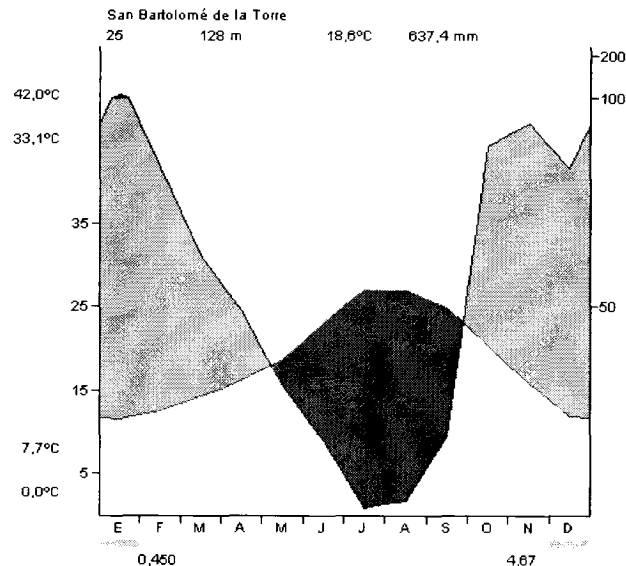


Figura 5.3: Climodiagrama de Walter-Lieth

Las lluvias y tormentas se concentran en el período octubre-abril, con máximos en los meses de diciembre y enero.

#### 5.1.4. Geología

La zona de estudio presenta dos grandes formaciones de relieve con una nítida separación en cuanto a los materiales geológicos que las componen. Al norte aparece el extremo meridional del desgastado macizo Hercínico; la parte sur de la cuenca está ocupada por sedimentos terciarios o cuaternarios de las cuencas fluviales asociadas a la costa de Huelva.

##### a) Materiales del macizo Hercínico

Estos materiales son netamente dominantes en la cuenca, al ocupar el 88,76% de la superficie total. Corresponden a la zona Sur-Portuguesa del plegamiento Hercínico (IGME, 1977), con relieves más aplanados que las zonas ubicadas más al norte. Geográficamente esta zona se identifica como el Andévalo onubense. La geología de la zona se encuentra marcada por una serie de episodios volcánicos que llevan a distinguir tres unidades (IGME, 1977; Díaz del Olmo, 1987):

- Formación PQ

Potente formación (grupo filito-cuarcítico) constituida por ritmitas cuarcítico-pizarrosas. Son materiales antiguos, muy resistentes, que ocupan el 28% de la superficie de la cuenca.

- Complejo Vulcano - Sedimentario (CVS)

Formación con numerosas intercalaciones de tobas (rocas piroclásticas) y de lavas de diversa composición, abundando los materiales espilíticos y los keratófidos-cuarcíferos. Estas

intercalaciones son especialmente potentes a lo largo de la denominada faja pirítica, que se extiende desde Caveira-Lousal hasta Aznalcollar y contiene los famosos yacimientos de este mineral, así como otros menos importantes de menas de manganeso. Pirita y otras menas alternan con pizarras silíceas, jaspes y, sólo en la parte superior del complejo, escasos bancos de caliza. Los materiales volcánicos son de variada composición, desde ácidos a básicos. Esta unidad ocupa el 26,7% de la cuenca.

- Formación Culm

Al NE de la zona de estudio se encuentra una potente formación de tipo flysch, constituida esencialmente por una alternancia de grauwacas y pizarras, con intercalaciones de conglomerados poligénicos en varios niveles. Las grauwacas contienen abundantes detritos volcánicos que proceden indudablemente del desgaste y sedimentación del Complejo Vulcano Sedimentario antes citado. Esta formación es la de mayor representación en la cuenca, con el 33,8% de la superficie total.

#### ***b) Materiales sedimentarios de las cuencas fluviales***

Materiales detríticos poco cohesivos que ocupan el 11,24% de la cuenca, en su extremo SO. La mayor parte corresponde a una sedimentación miopliocena con facies transgresivas que presenta las siguientes formaciones (Mayoral, 1989):

- Formaciones detrítico-carbonatadas: calcarenitas de Niebla y calizas conglomeráticas con arenas de Bembezar. Presentan niveles conglomeráticos discontinuos y de escaso espesor (<2 m), con numerosos clastos de rocas paleozoicas, del zócalo próximo.
- Formaciones margo-arcillosas: se conocen normalmente por el nombre de margas azules, arcillas azules, arcillas de Gibrleón, etc. Superficialmente no suelen superar los 50 m de potencia, pero en sondeos se han localizado estratos profundos que llegan hasta los 2000 m.
- Formaciones arenosas más o menos limosas que se disponen sobre las anteriores mediante tránsitos graduales (alternancia de arcillas/margas y arenas). Su potencia raramente supera la treintena de metros.
- Formaciones detríticas de edad Plioceno que están constituidas esencialmente por arenas amarillento-rojizas, en ocasiones arcillosas, que pasan gradualmente a niveles de arenas gruesas, conglomerados y/o gravas.
- Formaciones del Cuaternario: en la zona pueden diferenciarse:
  - Un conjunto inferior, de tonalidades rojas, que constituyen depósitos aluviales (gravas, arenas y/o conglomerados) atribuibles al Cuaternario antiguo y que actualmente forman un conjunto de terrazas elevadas.
  - Un conjunto superior constituido por arenas de origen eólico o de sedimentación reciente, conocido como arenas blancas.

En el epígrafe siguiente se presenta un resumen de las distintas litofacies distinguidas por la cartografía geológica de la zona, indicándose la formación principal a la que pertenecen.

### 5.1.5. Litología

La cartografía geológica "MAGNA" (IGME, 1982-a, 1982-b, 1982-c y 1983) indica 38 litofacies distintas para la zona de estudio (Tabla 5.1), entendiéndose como litofacies formaciones superficiales constituidas por una roca o la asociación de varias rocas. Al ser las coberturas litológicas la base para la elaboración de los mapas de suelos, sería necesario obtener un número significativo de muestras sobre cada tipo de roca para una correcta caracterización de los suelos de la zona.

Tabla 5.1: Litofacies presentes en la cuenca del embalse de El Sancho

Litologías (MAGNA)	Superficie (ha)	% Ocupación cuenca	Nº de polígonos
Arenas blancas	129,22	0,41	7
Arenas y gravas versicolores	967,29	3,07	3
Brechas, aglomerados, lavas, tobas y tufitas ácidas e intermedias (localmente básicas)	851,33	2,70	11
Conglomerados y arenas	61,94	0,20	2
Conglomerados, arenas y gravas rojas	33,85	0,11	8
Conglomerados, gravas y arenas con ostreas y calizas bioclásticas arenosas	980,57	3,11	16
Diabasas	86,73	0,28	23
Diabasas y facies de contacto	2,25	0,01	2
Diques de cuarzo	3,02	0,01	2
Embalse	378,21	1,20	1
Gabro – diabasas	1.184,29	3,76	70
Grauwacas y pizarras con posidonomia, goniatites y archaeocalamites	9.224,07	29,29	2
Jaspes	4,04	0,01	6
Lavas y tobas básicas espiliticas	80,57	0,26	5
Lavas y tobas cuarzoqueratofidicas	24,33	0,08	5
Lavas, aglomerados, brechas, tobas y tufitas ácidas	793,01	2,52	34
Lavas, aglomerados, brechas, tobas y tufitas ácidas, a veces abigarradas	1.450,40	4,61	20
Lavas, brechas, tobas y tufitas ácidas	238,29	0,76	16
Lavas, brechas, tobas y tufitas ácidas cuarzo queratofidicas	106,12	0,34	3
Lentejones de jaspe y chert	13,30	0,04	30
Margas, arenas y areniscas	1.149,36	3,65	2
Pizarras con nódulos y lentejones de calizas	3,81	0,01	1
Pizarras vinosas	23,51	0,07	2
Pizarras y algunas grauwacas con posidonomia, goniatites y archaeocalamites	1.366,59	4,34	3
Pizarras y cuarcitas	34,14	0,11	4
Pizarras y pizarras con grauwacas	52,82	0,17	6
Pizarras y tufitas con jaspes	4,53	0,01	6
Pizarras y tufitas moradas	37,03	0,12	10
Pizarras y tufitas violetas "pizarras moradas"	288,42	0,92	35
Pizarras, areniscas y cuarcitas	8.700,05	27,62	14
Pizarras, tufitas y tobas	2.829,24	8,98	51
Pizarras, areniscas y cuarcitas con nódulos y capillas de Fe y Mn	158,72	0,50	17
Ruditas, arenas y fangolitos	89,80	0,29	13
Sedimentos antrópicos	126,29	0,40	7
Sulfuros masivos polimetálicos	0,56	0,00	1
Tobas y lavas básicas abigarradas (hematíticas)	14,14	0,04	2
Tobas y tufitas ácidas	1,45	0,00	1

Litologías (MAGNA)	Superficie (ha)	% Ocupación cuenca	Nº de polígonos
Ultrabásicas	0,88	0,00	1
<b>TOTAL</b>	<b>31.494,16</b>	<b>100</b>	<b>442</b>

Para poder hacer abordable el citado estudio de los suelos, se debe reducir en la medida de lo posible el número de litofacies observadas. Esto se logra uniendo aquellas litofacies que presenten materiales de composición similar, a los que pueda atribuírseles una misma dinámica en la formación y composición de sus suelos. A la unión de varias litofacies MAGNA se le ha denominado “litofacies simplificada” y para su definición se ha adoptado la simplificación realizada por Domingo (2002), sobre la base de las condiciones de formación y la composición química de las distintas rocas de la zona de estudio. Esta simplificación permite pasar a 15 litofacies simplificadas, como base para el estudio distribuido de los suelos.

Las simplificaciones adoptadas, así como la presencia relativa de cada litofacies simplificada se esquematizan en la Tabla 5.2 y en la Figura 5.4.

Tabla 5.2: Litofacies simplificadas presentes en la cuenca del embalse de El Sancho

Litologías (MAGNA)	Código de litofacies simplificada	Formación	Superficie (ha) / % en la cuenca
Pizarras vinosas			
Pizarras y tufitas moradas	400	VS	348,96 / 1,11
Pizarras y tufitas violetas "pizarras moradas"			
Diques de cuarzo			
Lavas y tobas cuarzoqueratofidicas			
Lavas, aglomerados, brechas, tobas y tufitas ácidas	500	VS	1.164,76 / 3,70
Lavas, brechas, tobas y tufitas ácidas			
Lavas, brechas, tobas y tufitas ácidas cuarzo queratofidicas			
Pizarras y algunas grauwacas con posidonomia, goniatites y archaeocalamites	1100	CULM	1.366,59 / 4,34
Grauwacas y pizarras con posidonomia, goniatites y archaeocalamites	1200	CULM	9.276,88 / 29,46
Pizarras y pizarras con grauwacas			
Pizarras con nódulos y lentejones de calizas			
Pizarras y cuarcitas			
Pizarras, areniscas y cuarcitas	1300	PQ	8.896,72 / 28,25
Pizarras, areniscas y cuarcitas con nódulos y capillas de Fe y Mn			
Brechas, aglomerados, lavas, tobas y tufitas ácidas e intermedias (localmente básicas)	1400	VS	852,78 / 2,71
Tobas y tufitas ácidas			
Jaspes			
Lavas, aglomerados, brechas, tobas y tufitas ácidas, a veces abigarradas	1500	VS	1.467,74 / 4,66
Lentejones de jaspe y chert			
Lavas y tobas básicas espiliticas			
Tobas y lavas básicas abigarradas (hematíticas)	1700	VS	94,71 / 0,30
Diabasas	1800	VS	1.273,28 / 4,04

Litologías (MAGNA)	Código de litofacies simplificada	Formación	Superficie (ha) / % en la cuenca
<b>Diabasas y facies de contacto</b>			
<b>Gabro – diabasas</b>			
Conglomerados y arenas	1900	T-Q	151,74 / 0,48
Ruditas, arenas y fangolitas			
Pizarras y tufitas con jaspes	2000	VS	2.833,77 / 9,00
Pizarras, tufitas y tobas			
<b>Arenas blancas</b>			
Arenas y gravas versicolores	3100	T-Q	1.130,35 / 3,59
<b>Conglomerados, arenas y gravas rojas</b>			
Conglomerados, gravas y arenas con ostras y calizas bioclásticas arenosas	3150	T-Q	980,57 / 3,11
Margas, arenas y areniscas	3900	T-Q	1.149,36 / 3,65
<b>Sedimentos antrópicos</b>			
Sulfuros masivos polimetálicos	9000	T-Q	127,73 / 0,41
<b>Ultrabásicas</b>			

NOTA: los materiales en zonas de agua embalsada no se encuentran caracterizados (Litología simplificada 0).  
 Abreviaturas: VS: Complejo Vulcano-Sedimentario; CULM: Formación Culm; PQ: Formación PQ; T-Q: materiales sedimentarios del terciario y cuaternario.

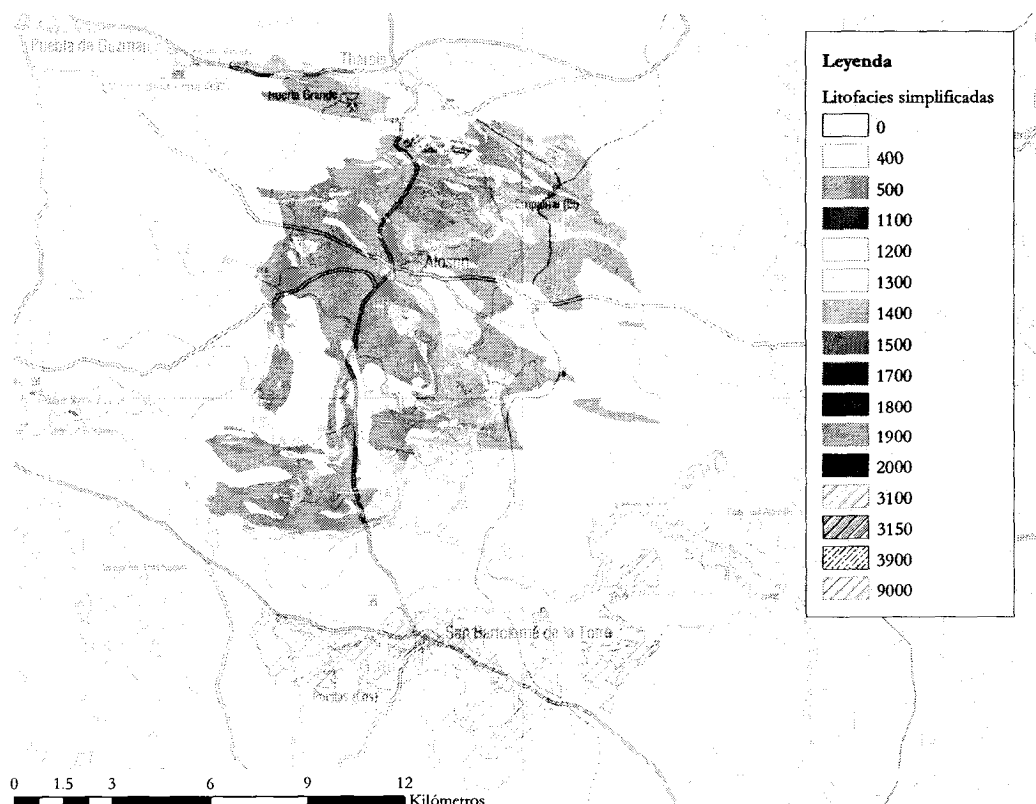


Figura 5.4: Distribución de las litofacies simplificadas presentes en la cuenca

En un epígrafe posterior se establecen las relaciones entre las litologías simplificadas y distintas variables edafológicas de interés para el trabajo.

### 5.1.6. Edafología

En esta reseña se da una visión general de los tipos de suelos que aparecen en la cuenca del embalse de El Sancho y de sus características. Dada la importancia que presenta la distribución de algunas propiedades edafológicas en el presente trabajo, estas propiedades (conductividad hidráulica y capacidad de retención de agua) serán tratadas de forma específica en epígrafes posteriores.

La información taxonómica se ha estructurado según las formaciones geológicas que se han señalado en los dos epígrafes anteriores; dentro de estas formaciones se han hecho distinciones según litofacies simplificadas cuando existen diferencias reseñables.

Se señala también el código de algunos perfiles que se han considerado representativos de la formación, denominados “perfiles tipo”. La descripción completa de estos perfiles se puede consultar en el Anejo I.

La tipificación de las propiedades edáficas (profundidad, pedregosidad, reacción, etc.) puede consultarse en el Anejo II.

#### *a) Suelos sobre formación Culm*

La formación Culm presenta de forma general suelos con bajos niveles de evolución, siendo los grupos taxonómicos más representados Regosoles y Leptosoles. Son perfiles abundantemente pedregosos, de profundidades medias a someras, muy condicionados por el sustrato de lenta meteorización. Es frecuente observar cierto nivel de organización horizontal, con acumulación profunda de arcillas, pero rara vez estas acumulaciones pueden clasificarse como horizontes árgicos, dada su pedregosidad, por encima del 50%.

Los taxones tipo son Regosoles Lepti-Esqueléticos y Leptosoles. En la litofacies 1100 son más frecuentes los Leptosoles Dístricos o Háplicos, mientras que en la 1200 aparecen Leptosoles Éutricos. Los contenidos minerales son similares en ambas litologías, pero la 1100 presenta texturas más finas y mayor capacidad de intercambio catiónico, por lo que aparece más insaturada.

En zonas más favorables pueden aparecer Cambisoles, aunque es más frecuente la aparición de Luvisoles, pues ya se ha indicado la tendencia precoz a la iluviación de arcilla. Por ello, en zonas menos pedregosas aparecen Luvisoles Lépticos y en partes bajas de ladera pueden aparecer Luvisoles Crómicos, estos últimos con más facilidad en la litofacies 1200.

Además de la diferencia textural, siempre en el entorno de las texturas francas (hacia franco-arcillosas en 1100), otra importante diferencia entre ambas litofacies es la friabilidad de la roca. Las pizarras Culm son más blandas y suelen aparecer muy fisuradas, con lo que se facilita la prospección del suelo por las raíces de las plantas. Por el contrario, las grauwacas presentan una mayor dureza y continuidad, lo que hace lenta y difícil su colonización. En consecuencia la profundidad útil de los suelos sobre pizarras suele ser algo mayor.

Los perfiles tipo definidos son:

959-81: Leptosol Éutrico

959-106: Regosol Endolepti-Epiesquelético

#### *b) Suelos sobre la formación PQ*

Estos suelos, formados sobre pizarras, cuarcitas y areniscas principalmente (litofacies 1300), presentan por lo general una fuerte acidez y escasa capacidad de intercambio catiónico de sus arcillas. Los grupos taxonómicos más representados son Acrisoles, Cambisoles y Regosoles.

Estos tres grupos parecen indicar que la formación de horizontes árgicos es progresiva, siempre dentro de fuertes condiciones de acidez. La progresión típica podría ser:

Regosol Lepti-Esquelético → Cambisol Lepti-Esquelético → Acrisol Lepti-Abruptico

Esta progresión aparece favorecida por condiciones de pendientes medias y condiciones de relieve que favorezcan la humedad del suelo y la acumulación de sedimentos.

Los dos primeros taxones son suelos de profundidades medias que pasan a profundidad media-alta al avanzar en su evolución. También se van haciendo menos pedregosos y más arcillosos, dentro de que los contenidos en gruesos son de frecuentes a abundantes y las texturas de francas a franco-arcillosas.

De forma dispersa aparecen también en la formación Luvisoles y Alisoles, en ambos casos con unidades Dístrico o Hiperdístrico.

Los perfiles tipo definidos son:

959-169: Acrisol Endolepti-Abruptico (Endoesquelético, Crómico)

959-166: Cambisol Lepti-Epiesquelético (Crómico, Epidístrico)

959-165: Regosol Lepti-Epiesquelético (Dístrico)

### ***c) Suelos sobre la formación Vulcano-Sedimentaria***

Los materiales del Complejo Vulcano - Sedimentario son muy variados y aparecen intercalados, de forma que la mayor parte de las litofacies que distingue el mapa geológico son asociaciones de 3 a 5 rocas distintas. Esto motiva que sobre esta formación aparezca un gran número de grupos taxonómicos de suelos. A priori, conviene diferenciar dentro de la formación entre los suelos formados sobre rocas ácidas y los que se asientan sobre materiales básicos o intermedios.

#### ***Suelos sobre materiales ácidos***

Estos materiales corresponden a las litofacies simplificadas 400, 500, 1400, 1500 y 2000. En algunas de ellas, especialmente la 1400, aparecen intrusiones de rocas intermedias o básicas, que pueden presentar suelos parecidos a los que se describirán en el siguiente subepígrafe.

Los grupos taxonómicos más representados son Regosoles, Luvisoles y Cambisoles. Son también frecuentes otros taxones con horizontes árgicos y fuerte acidez, como son los Alisoles y Lixisoles. La progresión evolutiva de estos materiales puede asemejarse al siguiente esquema:

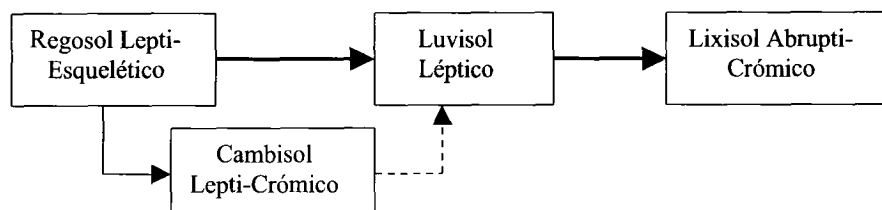


Figura 5.5: Esquema evolutivo de los suelos sobre materiales ácidos del Complejo Vulcano-Sedimentario

Según se ha observado, esta progresión tiene lugar con distinto ritmo e itinerario según las litofacies que se traten:

- En la litofacies 400 dominan los Regosoles, en consonancia con el carácter pizarroso de la roca. Las texturas son mayoritariamente francas, la pedregosidad frecuente a abundante y la profundidad media.
- En 500 hay presencia mayoritaria de Luvisoles y Lixisoles. Aparecen también Regosoles, pero principalmente sobre rocas de tendencia básica o intermedia. Los suelos más ácidos (Lixisoles) presentan texturas finas entre franco-arcillosa y arcillosa, y son perfiles profundos a muy profundos; los de reacción menos ácida (Luvisoles y Regosoles) presentan texturas francas y, en general, son profundos. En todos los casos la pedregosidad de los perfiles suele ser de frecuente a abundante.
- En 1400 las rocas tienen tendencia a una menor acidez y esto se pone de manifiesto en un menor movimiento de las arcillas, con lo que los perfiles más característicos son los Cambisoles y Regosoles, aunque también aparecen Luvisoles e, incluso, un Lixisol. Las texturas son francas en general, franco-limosas en los perfiles con horizonte árgico y en algunos Cambisoles. La profundidad de los suelos es media y la pedregosidad va de frecuente a abundante (Regosoles).
- En 1500 se aprecia un equilibrio entre perfiles poco evolucionados, Regosoles y Cambisoles, y otros más evolucionados, Luvisoles y Alisoles. Los primeros presentan texturas francas y profundidades medias, mientras que la textura de los segundos es franco-arcillosa y son suelos muy profundos. La pedregosidad es muy variable, aunque entre los perfiles muestreados domina el tipo abundante.
- En 2000 aparecen también Regosoles como perfiles poco evolucionados y Luvisoles y Alisoles los más evolucionados. Los Regosoles son someros (aparece incluso un Leptosol), con texturas francas y de pedregosidad media a alta. Los Luvisoles presentan profundidades entre media y muy alta, pedregosidad frecuente y texturas más finas (franco-arcillosa o franco-arcillo-limosa). Los perfiles característicos de esta litofacies se asemejan notablemente a los de 1500, por lo que se les asignan los mismos perfiles tipo.

Los perfiles tipo definidos son:

Litofacies 400 → 959-180: Regosol Lepti-Esquelético (Dístrico)

Litofacies 500 → 959-87: Luvisol Endolético; 959-172: Lixisol Abrupti-Crómico

Litofacies 1400 → 959-82: Cambisol Lepti-Crómico (Éútrico)

Litofacies 1500 y 2000 → 959-157: Regosol Epilepti-Esquelético (Dístrico); 959-154: Alisol Hiperdistri-Crómico

### ***Suelos sobre materiales básicos***

Estos materiales corresponden a las litofacies simplificadas 1700 y 1800, aunque pueden presentar inclusiones en el resto de la formación vulcano-sedimentaria.

Los grupos taxonómicos más representados son Regosoles y Cambisoles, apareciendo también Luvisoles en zonas o materiales más favorables para alcanzar este nivel evolutivo. La progresión evolutiva de estos materiales puede asemejarse al siguiente esquema:

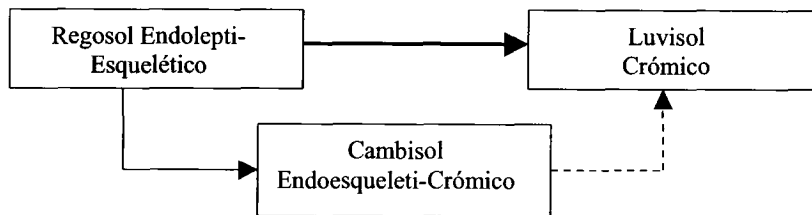


Figura 5.6: Esquema evolutivo de los suelos sobre materiales básicos del Complejo Vulcano-Sedimentario

Son suelos ricos en bases minerales, con texturas finas, franco-arcillosas en general, con profundidad media a alta y pedregosidad frecuente a abundante.

Los perfiles tipo definidos son:

959-163: Regosol Endolepti-Epiesquelético (Hiperéutrico)

959-164: Luvisol Crómico

959-159: Cambisol Endoesqueleti-Crómico (Hiperéutrico)

#### **d) Suelos sobre materiales terciarios y cuaternarios**

Los materiales terciarios y cuaternarios provienen de sedimentación reciente marina, fluvial, lacustre o terrestre (eólica), por lo que suelen presentar un bajo grado de consolidación. La morfogénesis de estos suelos es totalmente distinta de la que tiene lugar en el zócalo paleozoico, ya que no es preciso un proceso previo de meteorización de la roca. El suelo se forma sobre la roca incoherente, con lo que los procesos geológicos y de edafogénesis se confunden.

El relieve de la zona es bastante plano y tiene escasa influencia en la edafogénesis, aunque sí puede condicionar el tipo de materiales que aparecen, según el nivel estratigráfico, y algunos fenómenos de erosión-sedimentación.

La ausencia de frontera consolidada en su base hace que estos suelos puedan llegar a ser muy profundos y, en general, poco o muy poco pedregosos. En la zona de estudio dominan las arenas y gravas, lo que favorece la circulación del agua en los perfiles y, con ello, la eluviación de arcillas. Por tanto, son frecuentes los horizontes árgicos y los grupos taxonómicos asociados, Luvisoles principalmente, aunque también aparecen Alisoles y Acrisoles. Los depósitos más recientes de arenas eólicas suelen originar Arenosoles.

Frecuentemente el salto textural de los horizontes árgicos es abrupto, lo que origina capas de baja conductividad hidráulica en profundidad. Otra característica frecuente es la presencia de capas cementadas por oxihidróxidos de hierro, que pueden llegar a formar horizontes plínticos. Estas dos situaciones o su combinación pueden dar lugar a que la profundidad útil del perfil se vea notablemente reducida.

En las zonas de relieve algo más prominente es frecuente que estos horizontes endurecidos afloren. Su colonización por la vegetación es difícil, a menos que se rompa mecánicamente esta capa endurecida.

Los perfiles tipo definidos son:

981-186: Acrisol Plinti-Abrúptico (Hiperdístico, Crómico)

981-110: Luvisol Profondi-Crómico (Dístico)

981-125: Luvisol Areni-Profúndico (Crómico)

981-43: Arenosol Dístico

## 5.2. TRATAMIENTO DE LOS DATOS METEOROLÓGICOS

Los datos meteorológicos necesarios para la elaboración de este trabajo han sido obtenidos de la red de estaciones automáticas que el grupo *ENCE* tiene instalada en la provincia de Huelva, que consta de seis estaciones termo-pluviométricas (cinco dentro de la propia cuenca de aportación del Sancho) capaces de capturar datos diez-minutales.

En la Figura 5.7 se puede observar la posición relativa de las estaciones respecto a la zona de trabajo, mientras que en la Tabla 5.3 pueden apreciarse las principales características de las seis estaciones que componen la red.

Tabla 5.3: Características de las estaciones de la red meteorológica

Nombre de la estación	Coordenadas UTM (Huso30)			En la cuenca	Medida evapotranspiración
	X (m)	Y (m)	Z (m)		
Vivero	157081	4135801	5	No	Sí
Presa	147645	4153670	57	Sí	Sí
Alosno	136741	4152340	178	Sí	No
San Bartolomé	136603	4163941	128	Sí	No
La Burrilla	129309	4160991	195	Sí	No
La Peña	129185	4169921	310	Sí	No

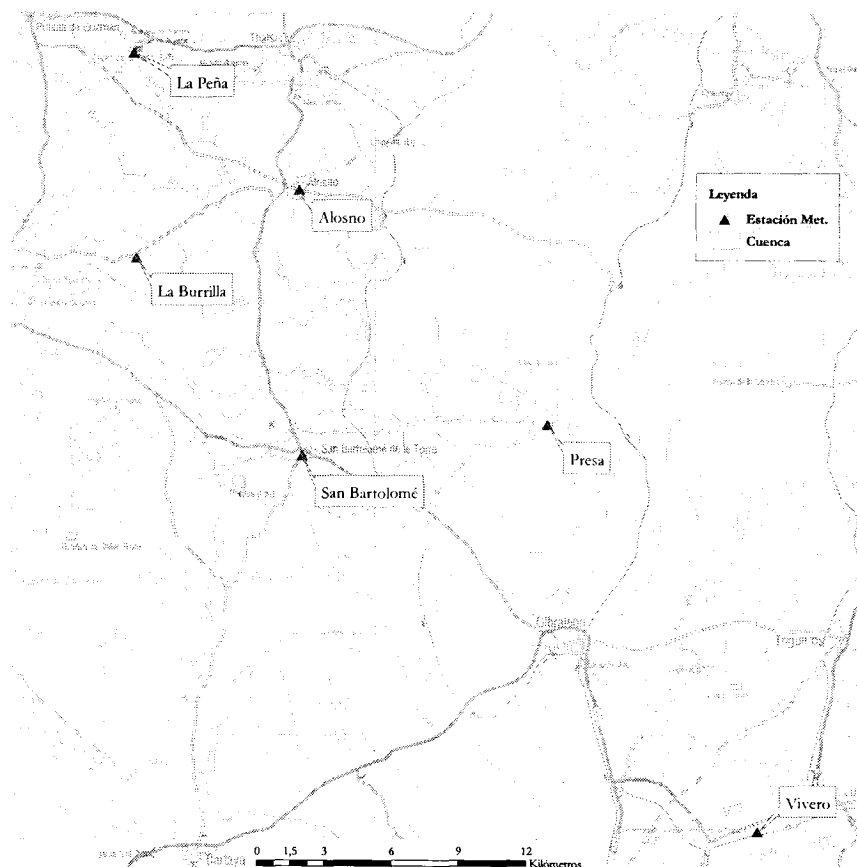


Figura 5.7: Croquis de la red automática de estaciones meteorológicas

### 5.2.1. Corrección y relleno de series diarias meteorológicas

Aunque las seis estaciones presentan una fiabilidad y una consistencia alta, al tratarse de estaciones automáticas, se han detectado algunos errores, así como la existencia de fallos en el almacenamiento de los datos, lo que provoca la falta de registros pluviométricos y de evapotranspiración en algunas fechas concretas.

La estación de mayor fiabilidad y con menor número de fallos es la del Vivero, probablemente debido a que es la que más años lleva funcionando, además de estar vigilada constantemente, por lo que esta estación se ha tomado como la de referencia para la corrección de fallos en las otras estaciones.

#### 5.2.1.1. Preparación de los datos

De forma previa a la corrección y relleno de los datos de precipitaciones y de evapotranspiraciones, ha sido necesario su tratamiento, consistente en la transformación por agrupación de los valores diez-minutales en registros horarios y diarios. Esto se ha hecho para todos los datos capturados por las estaciones desde el 1 de octubre de 2002 hasta el 30 de mayo de 2004, obteniendo un total de 610 registros para cada estación.

En un análisis posterior se eliminaron aquellos días que presentaban fallos o errores en alguna de las seis estaciones, reduciéndose el conjunto de los datos a 461 registros para cada una de las estaciones, por lo que existe un total de 149 días con alguna anomalía de lectura, si

bien se puede destacar que en ningún momento se produce un fallo generalizado de la red y en muy contadas ocasiones existe un error simultáneo en más de tres estaciones. Se trata, por lo tanto, de una situación muy ventajosa para proceder al procesado de las series diarias de datos.

Antes de realizar la corrección y relleno de las seis estaciones se ha estimado la correlación de Pearson partiendo de la hipótesis nula ( $H_0$ ), en la que las variables a analizar son independientes, evaluándose a través del coeficiente de correlación de Pearson, cuya expresión se muestra en la siguiente ecuación.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad 5.1$$

Donde:  $r$  es el coeficiente de correlación de Pearson

$x_i$  e  $y_i$  son los valores de las dos variables estudiadas

$\bar{x}$  e  $\bar{y}$  los valores medios de cada una de las variables

$n$  es el número de elementos de la muestra

En la Tabla 5.4 se pueden apreciar los coeficientes de correlación de las precipitaciones diarias para los distintos cruces entre las estaciones meteorológicas.

Tabla 5.4: Coeficientes de correlación de Pearson para la precipitación diaria de las estaciones (a un nivel de significación  $\alpha=0,05$ )

		Vivero	Presa	San Bartolomé	Alosno	La Burrilla
Presa	$r$	0,763				
	$P$ -valores	0,000				
San Bartolomé	$r$	0,753	0,726			
	$P$ -valores	0,000	0,000			
Alosno	$r$	0,785	0,762	0,942		
	$P$ -valores	0,000	0,000	0,000		
La Burrilla	$r$	0,817	0,644	0,860	0,924	
	$P$ -valores	0,000	0,000	0,000	0,000	
La Peña	$r$	0,810	0,642	0,832	0,874	0,919
	$P$ -valores	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

La correlación de Pearson analiza la relación lineal entre las variables estudiadas, de tal forma que aquellas variables que presentan un coeficiente de correlación igual a  $|1|$  tienen una correlación perfecta, por lo que casi todas las estaciones meteorológicas presentan una tendencia alta a la relación lineal entre sí, destacando la de San Bartolomé con Alosno.

En cuanto a la relación de la evapotranspiración del Vivero y de la Presa se puede definir como alta, puesto que el coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) toma el valor de 0,862.

Este análisis de correlaciones da una noción clara de cuál es la estación que, en cada caso, debe emplearse para rellenar una segunda con error.

### 5.2.1.2. Relleno de los datos ausentes de precipitaciones diarias

El relleno de los datos faltantes de las precipitaciones diarias se ha realizado mediante el cálculo de rectas de regresión lineal multivariante, en aquellos casos en los que el fallo se produce en una o dos de las estaciones, o univariante, cuando el fallo es generalizado en la red y tan sólo hay datos en un punto de la cuenca.

#### a) Relleno de una estación mediante regresión multivariante

En todos aquellos casos en los que se ha producido el fallo de una o, a lo sumo, de dos de las estaciones de la red, se ha procedido a completar estos huecos mediante la aplicación de ecuaciones de regresión lineal multivariante. Para cada dato incompleto de la estación se han tomado las estaciones mejor correlacionadas, estableciendo el modelo de regresión mediante un proceso de selección a posteriores o “regresión hacia atrás” (*backwards*) con un nivel de significación del 95% ( $p < 0,05$ ).

Los parámetros de las ecuaciones de regresión para las distintas estaciones se pueden consultar en la Tabla 5.5:

Tabla 5.5: Regresión multivariante y coeficientes de determinación

Estación respuesta (y)	Estación predictiva (x)	$\beta_i$	$\beta_0$	$r^2$ (%)
Vivero	La Presa	0,519	-0,246	78,7
	San Bartolomé	No significativa		
	Alosno	-0,565		
	La Burrilla	0,988		
	La Peña	No significativa		
Presa	Vivero	0,519	-0,059	72,8
	San Bartolomé	No significativa		
	Alosno	1,18		
	La Burrilla	-1,084		
	La Peña	No significativa		
La Peña	Vivero	0,0842	0,211	85,9
	Presa	No significativa		
	San Bartolomé	0,0849		
	Alosno	No significativa		
	La Burrilla	0,588		

Nota: la ecuación de regresión multivariante corresponde con  $y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \beta_3 \cdot x_3$

#### b) Relleno de una estación mediante regresión univariante

La estimación de datos de precipitación vacíos en aquellos días en los que la red ha sufrido un fallo generalizado (tan sólo una estación ha registrado datos), se ha realizado mediante el cálculo de rectas de regresión univariante del tipo:

$$y = b + m \cdot x \quad 5.2$$

Donde:  $y$  es el valor estimado de la precipitación en función de  $x$

$b$  es el parámetro de la recta

$m$  es la pendiente de la recta

$x$  es el valor conocido de la precipitación

Una vez obtenidas las rectas de regresión se ha comprobado la bondad del ajuste mediante el coeficiente de determinación ( $r^2$ ), estimado según la siguiente ecuación:

$$r^2 = \frac{b \cdot \sum_{i=1}^n y_i + m \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i - n \cdot \bar{y}^2}{\sum_{i=1}^n y_i^2 - n \cdot \bar{y}^2} \quad 5.3$$

Los coeficientes obtenidos para cada estación se muestran en la Tabla 5.6

Tabla 5.6: Rectas de regresión simple y coeficiente de determinación

Estación predictiva (x)	Estación respuesta (y)	b	m	$r^2$ (%)
Vivero	Presa	0,207	0,640	58,3
	San Bartolomé	0,348	0,604	56,7
	Alosno	0,486	0,561	61,5
	La Burrilla	0,284	0,499	<b>66,7</b>
	La Peña	0,408	0,429	65,5
Presa	Vivero	0,995	0,910	<b>58,2</b>
	San Bartolomé	0,655	0,694	52,7
	Alosno	0,764	0,649	57,9
	La Burrilla	0,749	0,469	41,4
	La Peña	0,804	0,406	41,4
San Bartolomé	Vivero	0,901	0,939	56,6
	Presa	0,457	0,760	52,7
	Alosno	0,347	0,840	<b>88,8</b>
	La Burrilla	0,349	0,655	73,8
	La Peña	0,492	0,550	69,1
Alosno	Vivero	0,554	1,10	61,5
	Presa	0,165	0,894	57,9
	San Bartolomé	-0,136	1,06	<b>88,8</b>
	La Burrilla	0,059	0,790	85,3
	La Peña	0,279	0,648	76,3
La Burrilla	Vivero	0,565	1,34	66,6
	Presa	0,520	0,884	41,5
	San Bartolomé	0,144	1,13	73,9
	Alosno	0,242	1,08	<b>85,3</b>
	La Peña	0,271	0,797	84,4
La Peña	Vivero	0,351	1,53	65,5
	Presa	0,371	1,02	41,2
	San Bartolomé	0,015	1,26	69,2
	Alosno	0,161	1,18	76,4
	La Burrilla	-0,023	1,06	<b>84,5</b>

Analizando los resultados mostrados en la Tabla 5.5 y Tabla 5.6, se comprueba que un número importante de las ecuaciones de regresión presentan un coeficiente de determinación ( $r^2$ ) mayor de 70, valor considerado como el límite de la bondad del ajuste de la regresión para el completado de series climatológicas a nivel mensual (González Hidalgo *et al.*, 2002). Sin embargo, no hay que olvidar que en este caso se está trabajando con series de precipitación diarias mucho más inestables, por lo que se podrían aceptar valores algo menores de 70 como ajustes válidos.

En el relleno de los datos hay que tener en cuenta dos cuestiones: la primera es que en una estación no se pueden registrar precipitaciones negativas, por lo tanto, cuando ha resultado un valor negativo de la aplicación de una recta de regresión se le ha asignado el valor cero; la segunda es que si en dos o más estaciones de la cuenca no se ha registrado precipitación el valor estimado también es cero.

Con las ecuaciones de regresión mostradas en la Tabla 5.5 y Tabla 5.6, y sobre las premisas anteriormente indicadas, se ha procedido al relleno de los datos vacíos de precipitaciones diarias de las estaciones de la red automática.

### 5.2.1.3. Relleno de los datos ausentes de evapotranspiraciones diarias

En el caso de la evapotranspiración diaria se ha procedido de igual forma que para las precipitaciones, si bien sólo presentan registros dos estaciones (Vivero y Presa), con un coeficiente de correlación de 0,862. En la Tabla 5.7 se muestran los valores de los coeficientes de las dos rectas de regresión posibles, así como el coeficiente de determinación obtenido.

Tabla 5.7: Rectas de regresión y coeficientes de correlación para la evapotranspiración

Estación predictiva (x)	Estación respuesta (y)	b	m	r <sup>2</sup> (%)
Vivero	Presa	-0,412	1,43	74,4
Presa	Vivero	0,885	0,520	74,4

El coeficiente de determinación supera el 70% o valor límite en climatología para aceptar la bondad del ajuste a nivel mensual.

### 5.2.2. Elección de los eventos tormentosos destinados a la validación del modelo

Una vez analizados y completados los datos meteorológicos de las seis estaciones, se ha procedido a la selección de los eventos tormentosos que en fases posteriores del trabajo han de servir para validar y contrastar los distintos modelos del número de curva con la realidad de la cuenca.

Los criterios de selección de los distintos eventos han sido:

- Que las cinco estaciones meteorológicas asociadas a la cuenca presentasen datos de precipitación.
- Que ninguna de las estaciones presentase errores de medida a lo largo del evento tormentoso.
- Que la cantidad de agua precipitada fuese lo suficientemente grande como para producir una aportación de agua al embalse, por escorrentía superficial, tal que los sensores de volumen la registrasen.

Estudiando los registros pluviométricos de las estaciones, según los criterios expuestos, se han encontrado ocho eventos, que se describen a continuación.

#### 5.2.2.1. Tormenta de 16 de diciembre de 2002 (Tormenta 1)

Como se puede observar en la Figura 5.8 y en la Tabla 5.8, el evento tormentoso tuvo una duración efectiva aproximada de tres días, distribuyéndose la precipitación de forma muy

homogénea por todas las estaciones, presentando una intensidad máxima horaria de 17,27 mm/h para la estación de San Bartolomé.

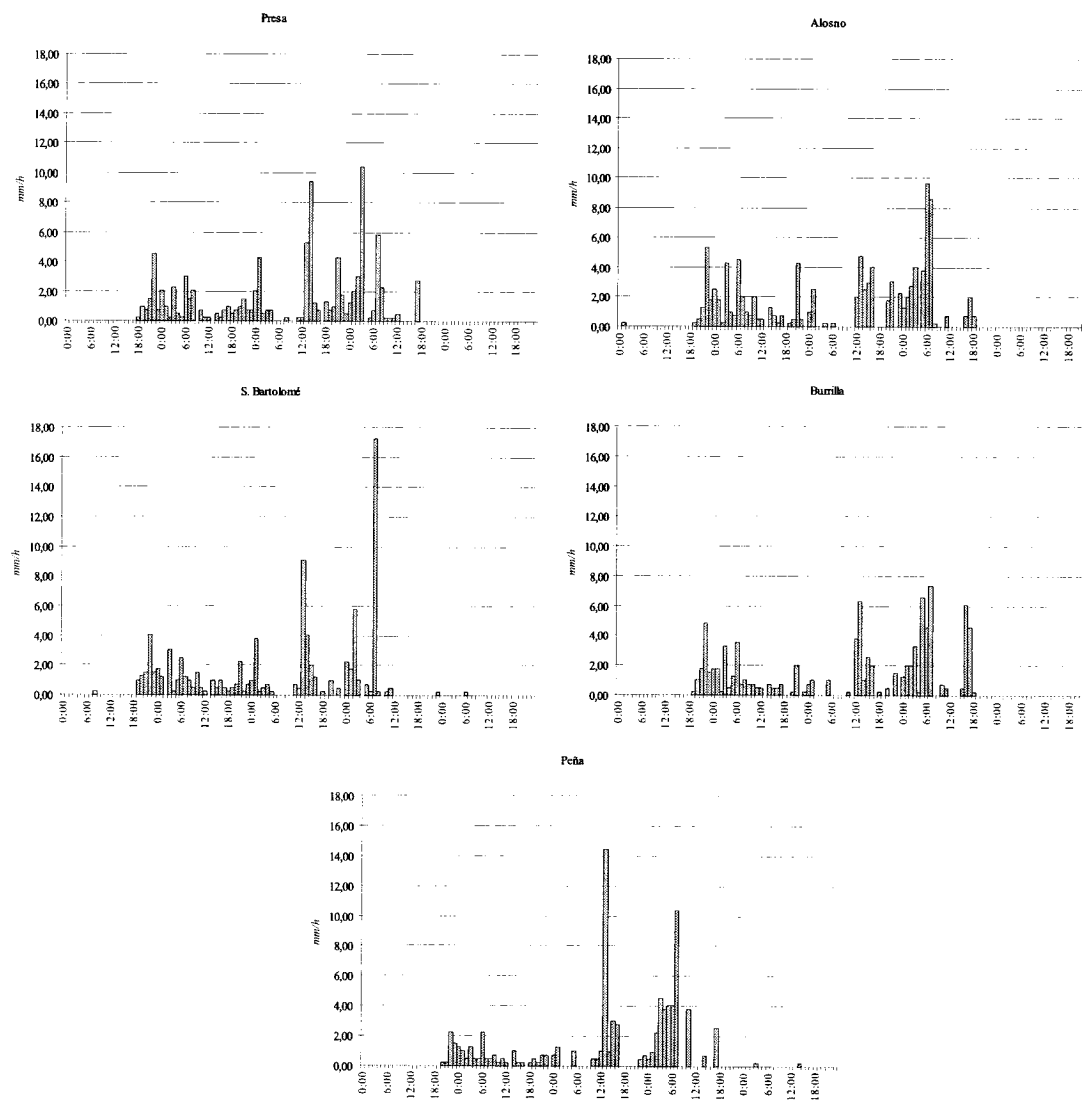


Figura 5.8: Hietogramas de la tormenta de 16 de diciembre de 2002 (Tormenta 1)

Tabla 5.8: Principales características de la tormenta de 16/12/2002 (Tormenta 1)

Variables	Estación				
	Presa	Alosno	Bartolomé	La Burrilla	La Peña
<i>Fecha de inicio</i>	16/12/2002	16/12/2002	16/12/2002	17/12/2002	18/12/2002
<i>Fecha de fin</i>	19/12/2002	20/12/2002	20/12/2002	19/12/2002	20/12/2002
<i>Duración (h)</i>	67	65	65	65	63
<i>Precipitación total (mm)</i>	96,19	104,61	89,08	92,17	84,3
<i>Intensidad máxima (mm/h)</i>	10,41	9,64	17,27	7,36	14,10
<i>Fecha i maxima</i>	19/12/2002	19/12/2002	19/12/2002	19/12/2002	19/12/2002
<i>Intensidad media (mm/h)</i>	1,44	1,61	1,37	1,42	1,34
<i>Duración efectiva (h)</i>	59	52	55	51	50
<i>I. media efectiva (mm/h)</i>	1,63	2,01	1,62	1,81	1,69
<i>Precipitación 5 días anteriores</i>	20,1	28,3	32,3	20,7	7,2

### 5.2.2.2. Tormenta de 24 de febrero de 2003 (Tormenta 2)

Analizando la Tabla 5.9 y la Figura 5.9 se puede observar que la duración del evento es de dos días y medio, con un periodo intermedio de unas ocho horas en el que cesa la precipitación; en este caso la precipitación no se reparte espacialmente por la cuenca de forma tan homogénea, puesto que las estaciones de Alosno y San Bartolomé registran una precipitación muy superior a las demás.

La intensidad máxima horaria corresponde a la estación de San Bartolomé, con un valor de 20,83 mm/h.

Tabla 5.9: Principales características de la tormenta de 24/2/2003 (Tormenta 2)

Variables	Estación				
	Presa	Alosno	Bartolomé	La Burrilla	La Peña
<i>Fecha de inicio</i>	24/02/2003	24/02/2003	24/02/2003	24/02/2003	24/02/2003
<i>Fecha de fin</i>	26/02/2003	26/02/2003	27/02/2003	27/02/2003	27/02/2003
<i>Duración (h)</i>	50	52	52	53	53
<i>Precipitación total (mm)</i>	25,54	68,48	71,05	31,17	24,29
<i>Intensidad máxima (mm/h)</i>	4,06	14,98	20,83	5,58	4,06
<i>Fecha i maxima</i>	26/02/2003	24/02/2003	24/02/2003	25/02/2003	24/02/2003
<i>Intensidad media (mm/h)</i>	0,51	1,32	1,37	0,59	0,46
<i>Duración efectiva (h)</i>	25	24	26	23	19
<i>I. media efectiva (mm/h)</i>	1,02	2,85	2,73	1,35	1,28
<i>Precipitación 5 días anteriores</i>	25,4	35,9	32,5	27,6	35,5

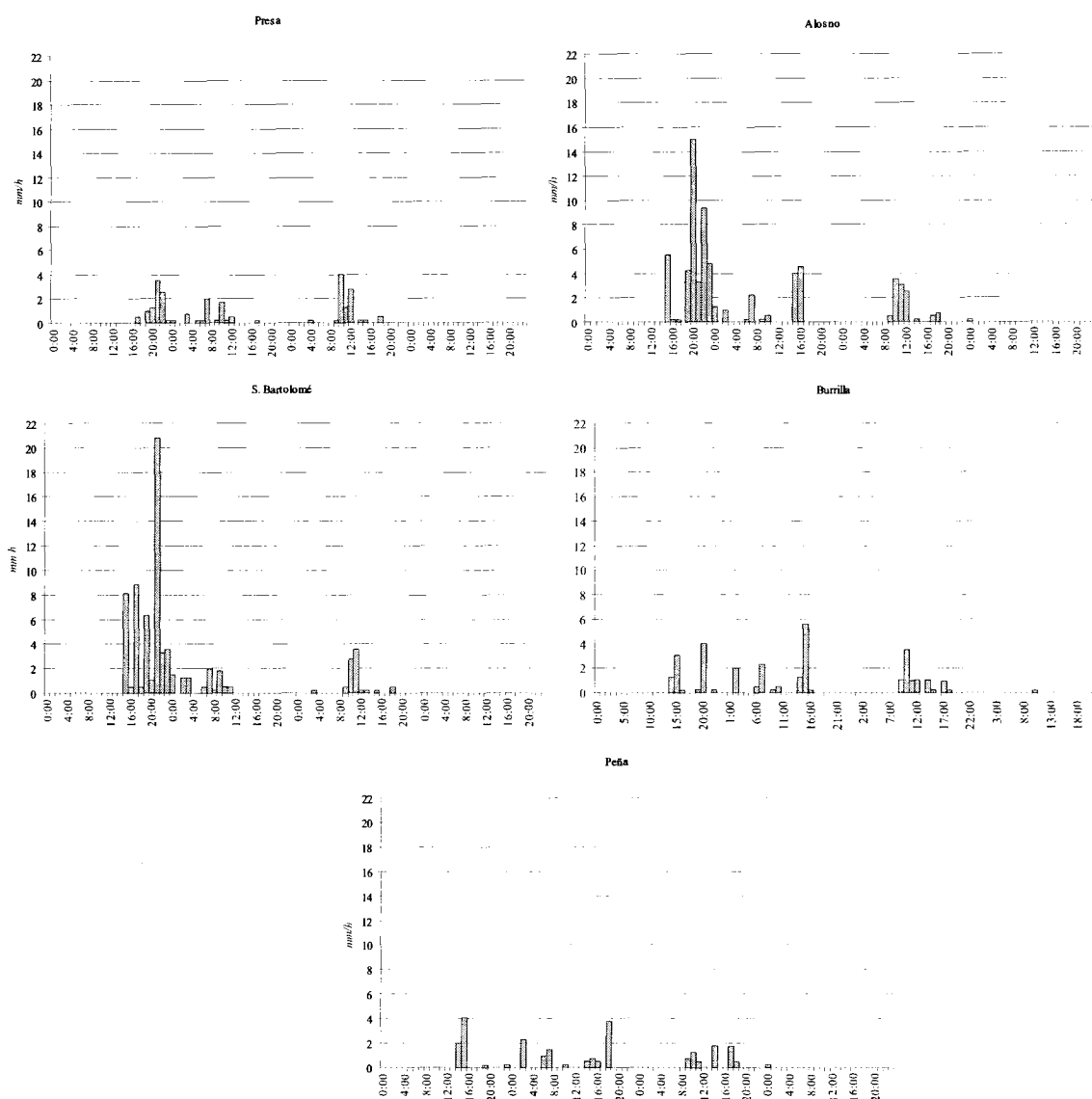


Figura 5.9: Hietogramas de la tormenta de 24 de febrero de 2003 (Tormenta 2)

### 5.2.2.3. Tormenta de 27 de marzo de 2003 (Tormenta 3)

La precipitación de este evento se concentró en la parte baja de la cuenca, en las proximidades de la Presa, como se puede ver en la Figura 5.10 y Tabla 5.10, originando un reparto espacial muy desigual de la precipitaciones.

Se puede decir que la precipitación fue muy corta pero de gran intensidad, alcanzándose intensidades de 34,54 mm/h en la estación de la Presa, en contraste con la intensidad máxima registrada en los pluviógrafos de La Peña y de La Burrilla, donde escasamente se superan los 5 mm/h.

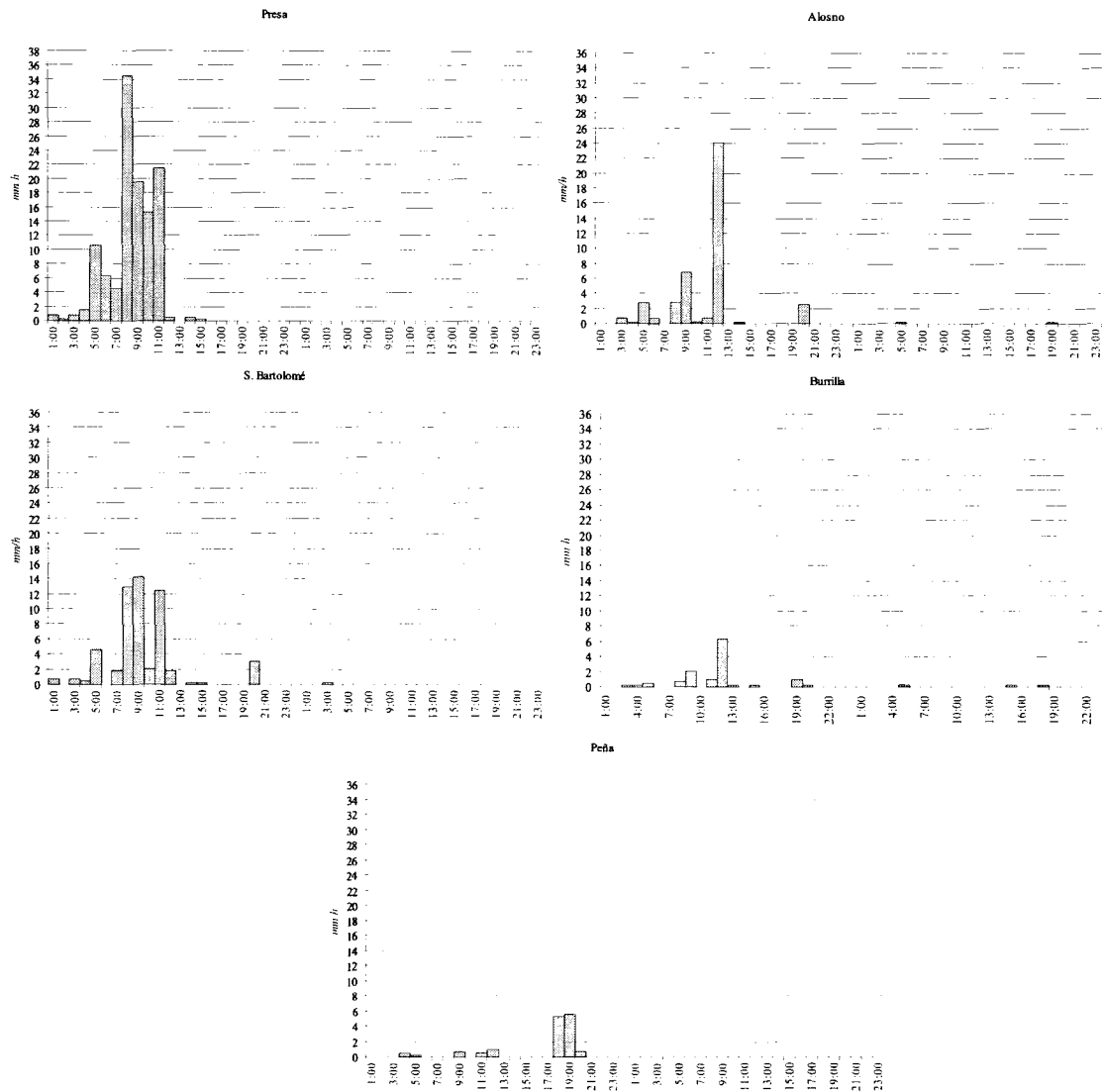


Figura 5.10: Hietogramas de la tormenta de 27 de marzo de 2003 (Tormenta 3)

Tabla 5.10: Principales características de la tormenta de 27/3/2003 (Tormenta 3)

Variables	Estación				
	Presa	Alosno	San Bartolomé	La Burrilla	La Peña
<i>Fecha de inicio</i>	27/03/2003	27/03/2003	27/03/2003	27/03/2003	27/03/2003
<i>Fecha de fin</i>	28/03/2003	28/03/2003	28/03/2003	28/03/2003	28/03/2003
<i>Duración (h)</i>	19	20	19	18	16
<i>Precipitación total (mm)</i>	117,02	42,14	55,37	12,91	14,69
<i>Intensidad máxima (mm/h)</i>	34,54	24	14,24	6,34	5,59
<i>Fecha i maxima</i>	27/03/2003	27/03/2003	27/03/2003	27/03/2003	27/03/2003
<i>Intensidad media (mm/h)</i>	6,30	2,29	3,06	0,93	1,15
<i>Duracion efectiva (h)</i>	14	13	14	14	8
<i>I. media efectiva (mm/h)</i>	8,56	3,53	4,15	1,29	2,30
<i>Precipitación 5 días anteriores</i>	0,0	0,0	0,3	0,8	0,5

#### 5.2.2.4. Tormenta de 22 de abril de 2003 (Tormenta 4)

Este evento presenta un precipitación corta y de carácter moderado, registrándose la máxima intensidad horaria en la estación de Alosno con un valor de 19,56 mm/h.

Como se puede observar en la Figura 5.11 y en la Tabla 5.11 la distribución espacial de la precipitación es bastante homogénea, si bien cabe destacar que, respecto a las tormentas anteriores, la tendencia de precipitación se invierte ligeramente, al concentrarse las mayores precipitaciones en la zona alta de la cuenca.

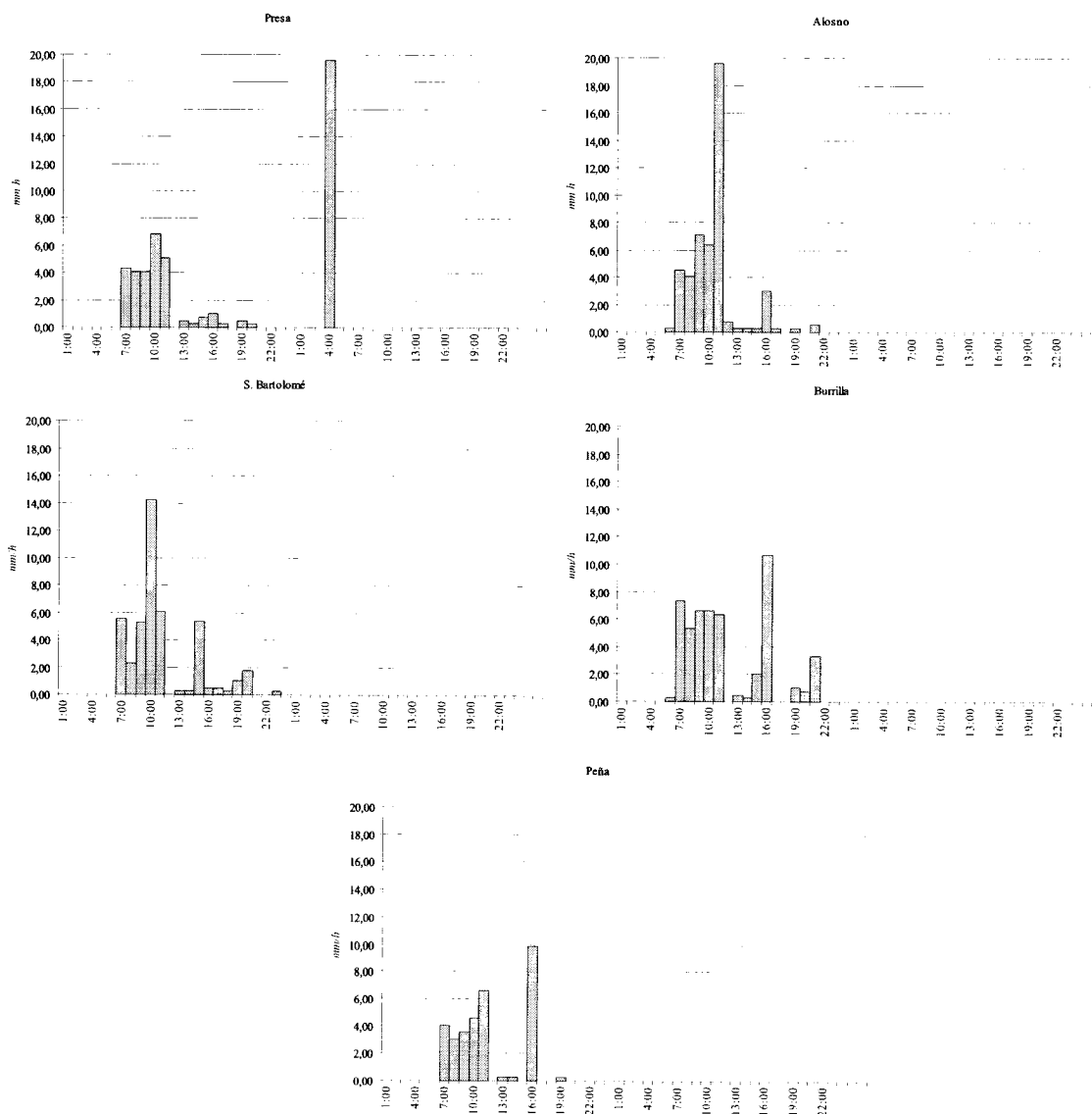


Figura 5.11: Hietogramas de la tormenta de 22 de abril de 2003 (Tormenta 4)

Tabla 5.11: Principales características de la tormenta de 22/4/2003 (Tormenta 4)

Variables	Estación				
	Presa	Alosno	San Bartolomé	La Burrilla	La Peña
<i>Fecha de inicio</i>	22/04/2003	22/04/2003	22/04/2003	22/04/2003	22/04/2003
<i>Fecha de fin</i>	22/04/2003	22/04/2003	22/04/2003	22/04/2003	22/04/2003
<i>Duración (h)</i>	14	16	14	16	13
<i>Precipitación total (mm)</i>	27,86	47,49	43,61	50,98	32,49
<i>Intensidad máxima (mm/h)</i>	6,85	19,56	14,22	10,67	9,91
<i>Fecha i maxima</i>	22/04/2003	22/04/2003	22/04/2003	22/04/2003	22/04/2003
<i>Intensidad media (mm/h)</i>	1,99	2,97	3,11	3,19	2,50
<i>Duración efectiva (h)</i>	12	14	14	13	9
<i>I. media efectiva (mm/h)</i>	2,32	3,39	3,11	3,92	3,61
<i>Precipitación 5 días anteriores</i>	32,0	10,4	12,0	12,7	10,9

### 5.2.2.5. Tormenta de 5 de diciembre de 2003 (Tormenta 5)

Aguacero de duración corta y de intensidad baja, con intensidad horaria máxima de 11,20 mm/h para la estación de la Presa.

De la Tabla 5.12 y de la Figura 5.12 se desprende que es un evento que presenta gran homogeneidad espacial y temporal, manteniéndose la tendencia de descenso de la precipitación hacia las zonas altas de la cuenca (La Peña).

Tabla 5.12: Principales características de la tormenta de 5/12/2003 (Tormenta 5)

Variables	Estación				
	Presa	Alosno	San Bartolomé	La Burrilla	La Peña
<i>Fecha de inicio</i>	05/12/2003	05/12/2003	05/12/2003	05/12/2003	05/12/2003
<i>Fecha de fin</i>	06/12/2003	06/12/2003	06/12/2003	06/12/2003	06/12/2003
<i>Duración (h)</i>	35	39	36	37	36
<i>Precipitación total (mm)</i>	24,60	32,24	25,62	27,90	14,20
<i>Intensidad máxima (mm/h)</i>	11,2	7,12	9,39	7,36	4,32
<i>Fecha i maxima</i>	06/12/2003	06/12/2003	06/12/2003	06/12/2003	05/12/2003
<i>Intensidad media (mm/h)</i>	1,02	1,04	1,07	0,93	0,35
<i>Duración efectiva (h)</i>	19	22	18	19	19
<i>I. media efectiva (mm/h)</i>	2,46	2,68	2,33	2,79	0,70
<i>Precipitación 5 días anteriores</i>	3,0	3,1	3,6	3,8	4,2

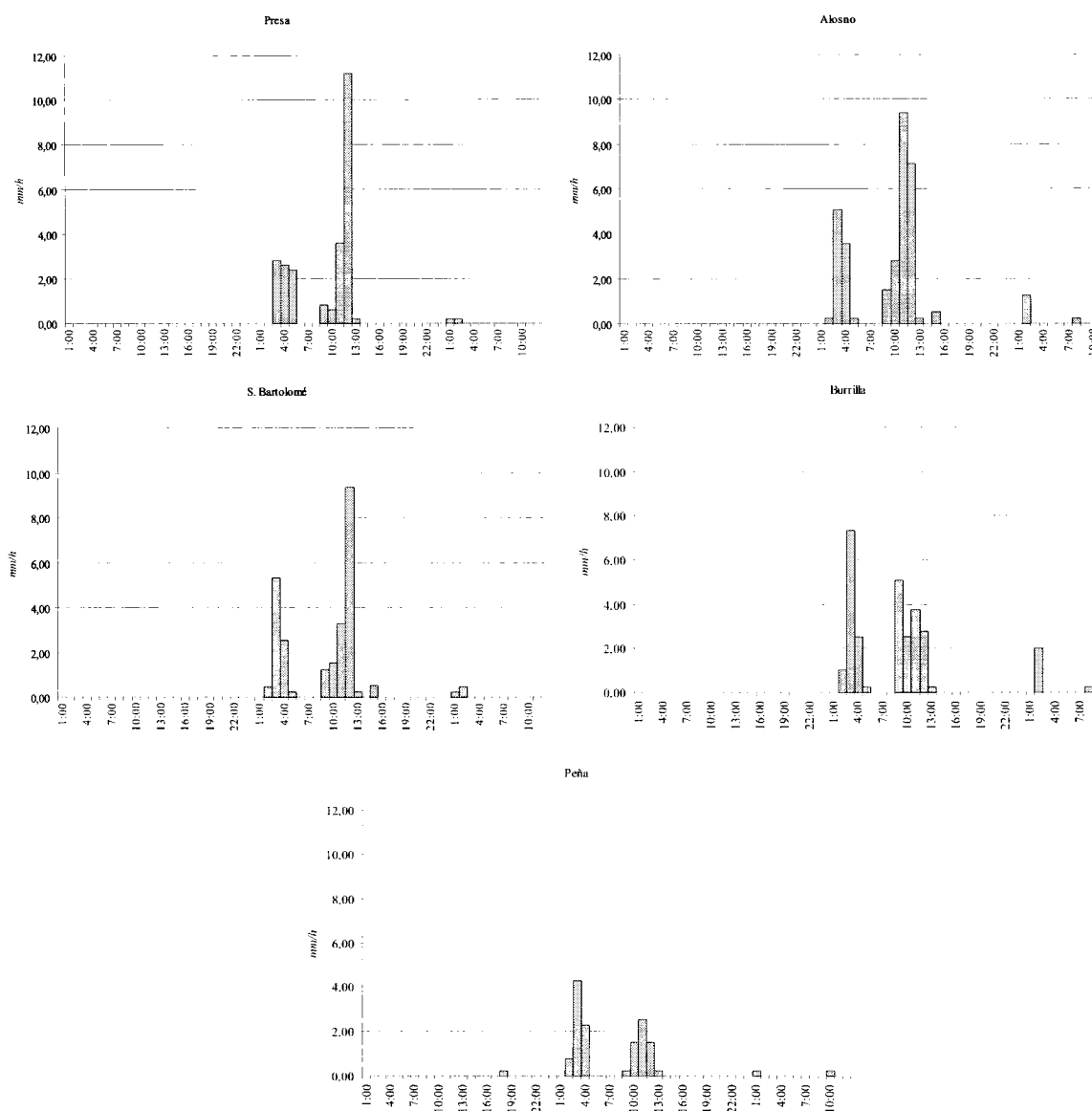


Figura 5.12: Hietogramas de la tormenta de 5 de diciembre de 2003 (Tormenta 5)

### 5.2.2.6. Tormenta de 8 de diciembre de 2003 (Tormenta 6)

El presente episodio tormentoso es continuación de la tormenta 5, pues tan sólo transcurre un día entre las precipitaciones.

Como se aprecia en la Figura 5.13 y en la Tabla 5.13 el evento está dividido en dos tramos de precipitación, presentando los dos una gran homogeneidad espacial y temporal, pudiendo calificarlo como de baja intensidad.

La intensidad máxima horaria que presenta el aguacero es de 8,64 mm/h produciéndose en la primera fase de la tormenta en las estaciones de Alosno y la Burrilla.

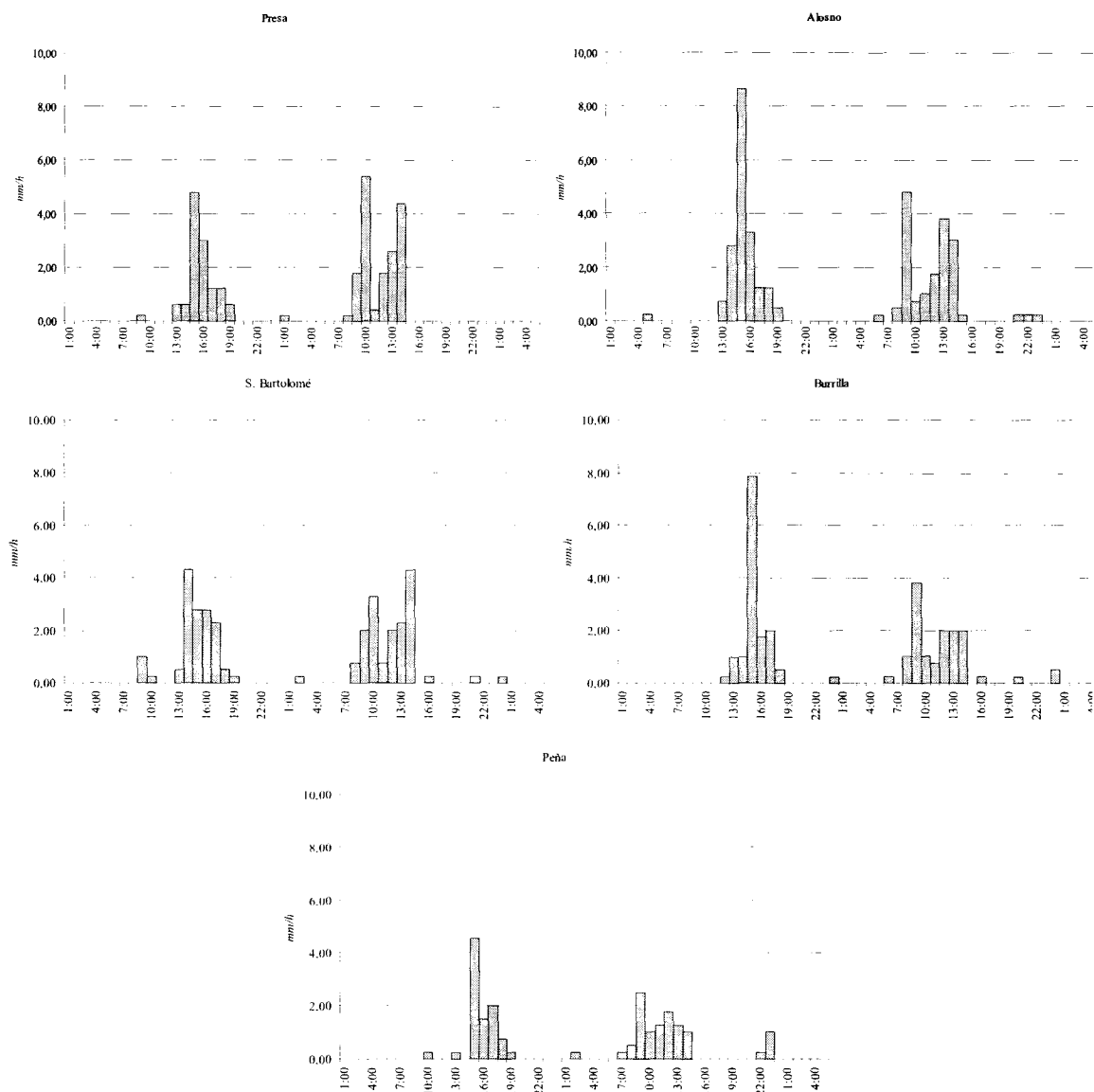


Figura 5.13: Hietogramas de la tormenta de 8 de diciembre de 2003 (Tormenta 6)

Tabla 5.13: Principales características de la tormenta de 8/12/2003 (Tormenta 6)

Variables	Estación				
	Presa	Alosno	Bartolomé	La Burrilla	La Peña
<b>Fecha de inicio</b>	08/12/2003	08/12/2003	08/12/2003	08/12/2003	08/12/2003
<b>Fecha de fin</b>	09/12/2003	09/12/2003	10/12/2003	10/12/2003	10/12/2003
<b>Duración (h)</b>	30	27	32	29	29
<b>Precipitación total (mm)</b>	29	35,68	31,12	28,56	20,68
<b>Intensidad máxima (mm/h)</b>	5,4	8,64	4,32	7,88	4,57
<b>Fecha i maxima</b>	09/12/2003	08/12/2003	08/12/2003	08/12/2003	08/12/2003
<b>Intensidad media (mm/h)</b>	0,97	1,28	0,96	0,969	0,67
<b>Duración efectiva (h)</b>	16	20	18	19	18
<b>I. media efectiva (mm/h)</b>	1,81	1,73	1,701	1,46	1,07
<b>Precipitación 5 días anteriores</b>	49,0	47,7	43,7	43,3	26,9

5.2.2.7. Tormenta de 20 de febrero de 2004 (Tormenta 7)

Analizando las características principales de la tormenta (Tabla 5.14) y los hietogramas correspondientes (Figura 5.14) se puede decir que es un evento de gran homogeneidad espacio-temporal dentro de la cuenca, con intensidades moderadas, puesto que la máxima horaria alcanza el valor de 11 mm/h.

Figura 5.14: Hietogramas de la tormenta de 20 de febrero de 2004 (Tormenta 7)

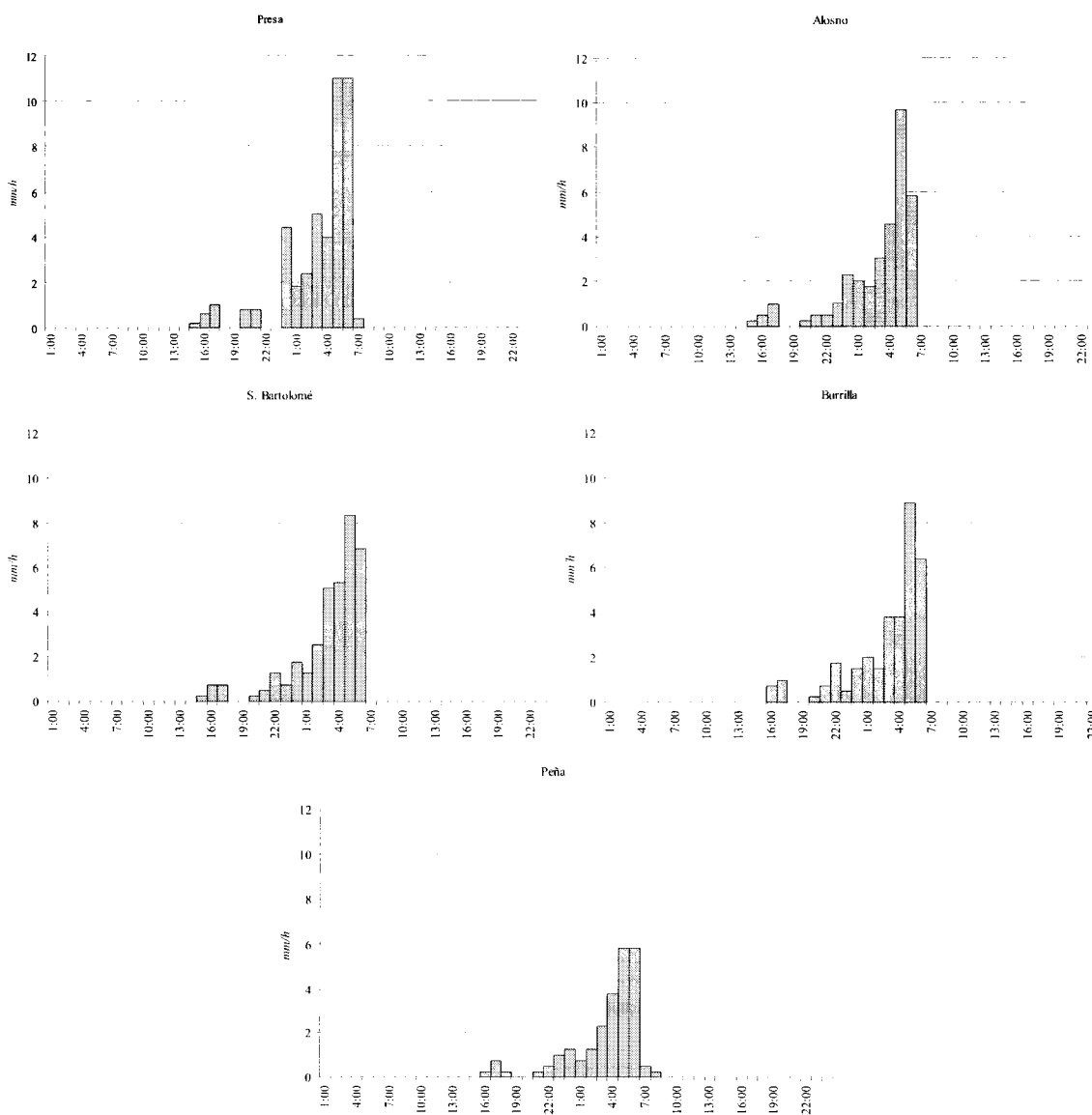


Tabla 5.14: Principales características de la tormenta de 20/02/2004 (Tormenta 7)

Variables	Estación				
	Presa	Alosno	San Bartolomé	La Burrilla	La Peña
<i>Fecha de inicio</i>	20/02/2004	20/02/2004	20/02/2004	20/02/2004	20/02/2004
<i>Fecha de fin</i>	21/02/2004	21/02/2004	21/02/2004	21/02/2004	21/02/2004
<i>Duración (h)</i>	17	16	16	15	17
<i>Precipitación total (mm)</i>	43,4	33,18	35,72	32,93	24,81
<i>Intensidad máxima (mm/h)</i>	11	9,64	8,37	8,89	5,85
<i>Fecha i maxima</i>	21/02/2004	08/12/2004	08/12/2004	08/12/2004	08/12/2004
<i>Intensidad media (mm/h)</i>	2,5	2,07	2,23	2,19	1,46
<i>Duracion efectiva (h)</i>	13	14	14	13	15
<i>I. media efectiva (mm/h)</i>	3,34	2,37	2,55	2,53	1,65
<i>Precipitación 5 días anteriores</i>	0,2	0,6	0,9	1,4	0,9

## 5.2.2.8. Tormenta de 23 de febrero de 2004 (Tormenta 8)

Este evento de precipitación es prácticamente continuación del anterior, tratándose de una precipitación relativamente larga, de gran homogeneidad espacial y con intensidades moderadas (intensidad máxima horaria de 9,66 mm/h), como se aprecia en la Tabla 5.15 y en la Figura 5.15.

Tabla 5.15: Principales características de la tormenta de 23/02/2004 (Tormenta 8)

Variables	Estación				
	Presa	Alosno	San Bartolomé	La Burrilla	La Peña
<i>Fecha de inicio</i>	23/02/2003	23/02/2003	23/02/2003	23/02/2003	23/02/2003
<i>Fecha de fin</i>	24/02/2003	24/02/2003	24/02/2003	24/02/2003	24/02/2003
<i>Duración (h)</i>	55	55	55	55	28
<i>Precipitación total (mm)</i>	49,8	50,39	48,86	41,47	24,75
<i>Intensidad máxima (mm/h)</i>	7,4	9,66	7,37	6,35	4,82
<i>Fecha i maxima</i>	23/02/2003	24/02/2003	23/02/2003	24/02/2003	24/02/2003
<i>Intensidad media (mm/h)</i>	0,9045	0,91	0,88	0,75	0,8871
<i>Duracion efectiva (h)</i>	28	29	30	26	22
<i>I. media efectiva (mm/h)</i>	1,78	1,73	1,62	1,59	1,12
<i>Precipitación 5 días anteriores</i>	52,2	40,1	44,2	42,7	30,8

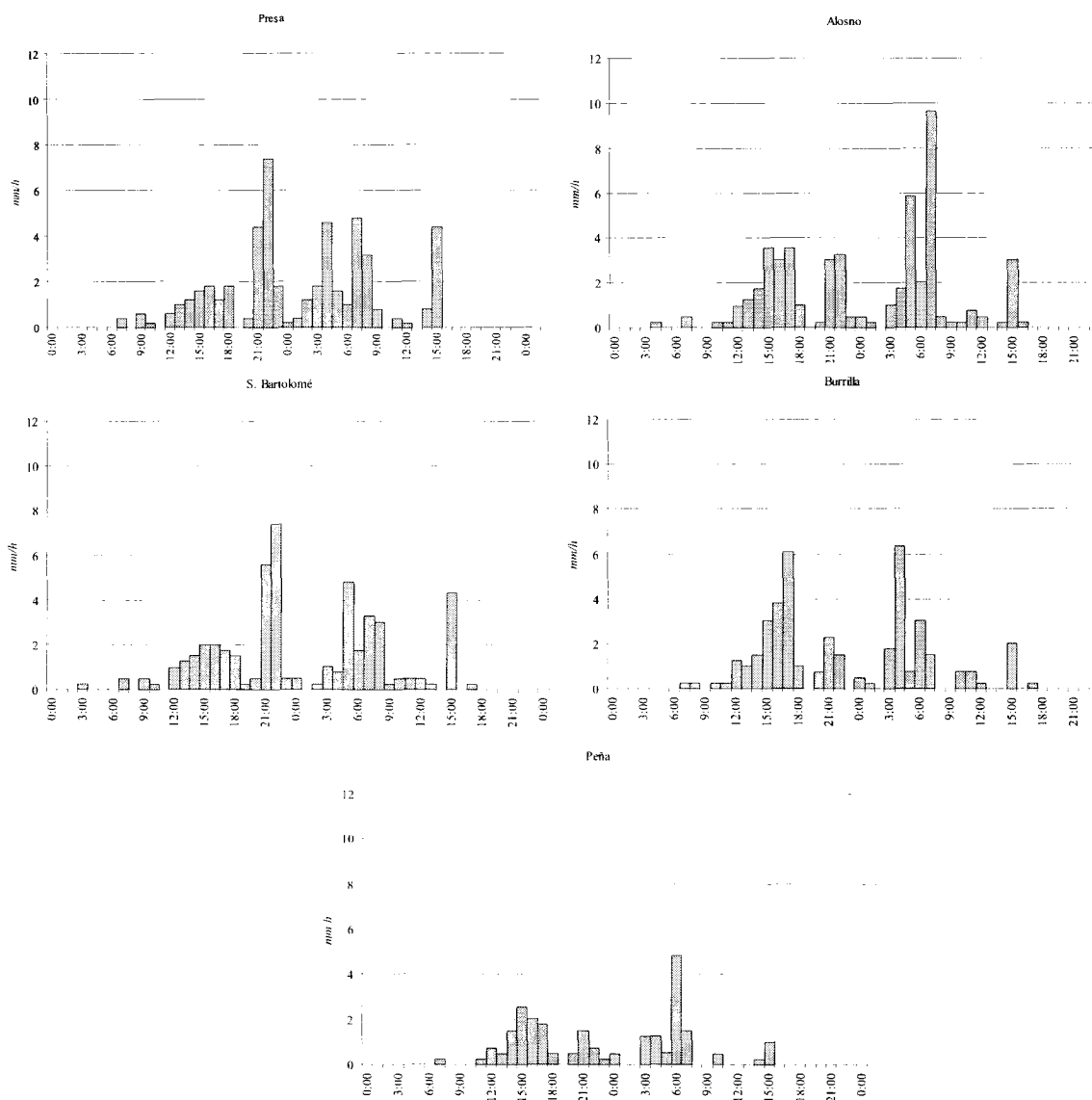


Figura 5.15: Hietogramas de la tormenta de 23 de febrero de 2004 (Tormenta 8)

### 5.3. ESTUDIO DE LOS SUELOS DE LA CUENCA VERTIENTE DEL EMBALSE DE EL SANCHO

El conocimiento de los suelos de la cuenca vertiente del río Meca hasta la presa de El Sancho constituye una de las piezas básicas del presente trabajo. La información que se precisa va más allá de la que puede proporcionar un mapa convencional de taxonomías de suelos, ya que se necesita información cuantitativa relativa a la capacidad de retención de agua y a la conductividad hidráulica de los distintos horizontes, con el fin de localizar espacialmente los grupos hidrológicos de suelos y la ya mencionada capacidad hídrica.

La cartografía de los citados parámetros edafológicos se ha generado a partir de los trabajos de Domingo (2002), Domingo *et al.* (2002) y Domingo *et al.* (2003), centrados en la caracterización edafológica de distintas zonas de la provincia de Huelva. Estas zonas coinciden en gran medida con la cuenca del presente estudio, pudiéndose apuntar los siguientes niveles de coincidencia:

- Muestras dentro de la cuenca: 33
- Muestras fuera de la cuenca localizados sobre zonas de litología y climatología similar, y a una distancia inferior a 25 km: 77

Esta información se ha visto completada con el levantamiento de 4 perfiles de suelo sobre una zona cuya litofacies no estaba suficientemente informada por los trabajos citados, con lo que para la cartografía paramétrica de la cuenca estudiada se ha dispuesto de los datos de 114 perfiles edafológicos.

El procesado de la información edafológica para la obtención de la cartografía paramétrica ha seguido el procedimiento planteado por Domingo (2002), con algunas modificaciones. En la Figura 5.16 se esquematiza el procedimiento de trabajo y en los epígrafes que siguen se describen de forma sucinta los aspectos más relevantes. Esta metodología no ha sido aplicable a la parte sur de la cuenca (materiales terciarios y cuaternarios), para la que se presenta directamente la cartografía dada por Domingo *et al.* (2003) a partir de 26 perfiles edafológicos.

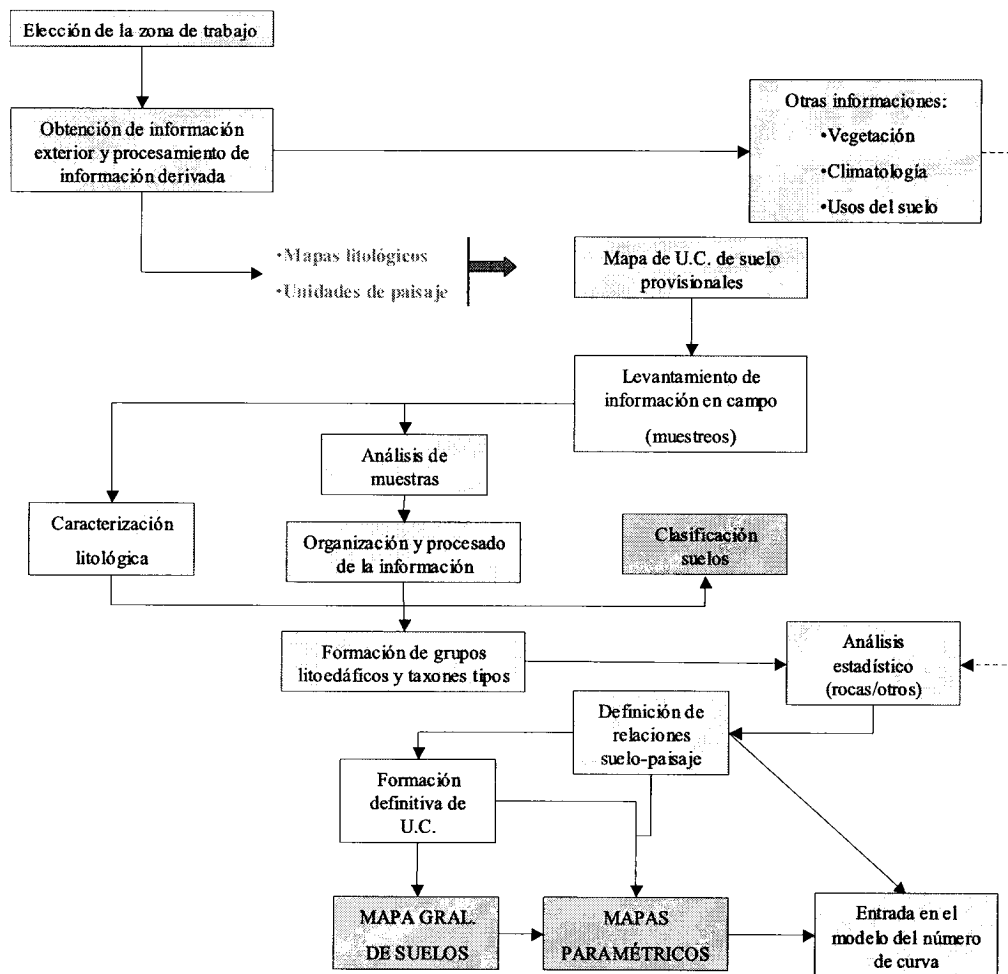


Figura 5.16: Esquema metodológico seguido para la determinación de la cartografía paramétrica de suelos

### 5.3.1. Litofacies simplificadas

Una vez definidas las litofacies simplificadas presentes en la cuenca, según la metodología descrita en el Epígrafe 5.1.5, en la siguiente tabla se muestra la distribución relativa de las mismas en la cuenca de El Sancho.

Tabla 5.16: Distribución de litofacies simplificadas en la cuenca del embalse de El Sancho

Litofacies simplificadas	Superficie (ha)	% Ocupación cuenca	Nº de polígonos
0- Embalse	378,21	1,20	1
400 - Pizarras y tufitas moradas o vinosas	348,96	1,11	47
500 - Lavas, aglomerados, brechas, tobas y tufitas ácidas	1.164,76	3,70	60
1100 - Pizarras y algunas grauwacas con Posidonomia, Goniatites y Archaeocalamites	1.366,59	4,34	3
1200 - Grauwacas y pizarras con Posidonomia, Goniatites y Archaeocalamites	9.276,88	29,46	8
1300 - Pizarras, areniscas y cuarcitas	8.896,72	28,25	36
1400 - Brechas, aglomerados, lavas, tobas y tufitas ácidas e intermedias	852,78	2,71	12
1500 - Lavas, aglomerados, brechas, tobas y tufitas ácidas, a veces abigarradas	1.467,74	4,66	56
1700 - Lavas y tobas básicas espilíticas	94,71	0,30	7
1800 - Gabro-diabasas	1.273,28	4,04	95
1900 - Conglomerados y arenas	151,74	0,48	15
2000 - Pizarras, tufitas y tobas	2.833,77	9,00	57
3100 - Arenas blancas	1.130,35	3,59	18
3150 - Conglomerados, gravas y arenas con ostreas y calizas bioclásticas arenosas	980,57	3,11	16
3900 - Margas, arenas y areniscas	1.149,36	3,65	2
9000 - Sedimentos antrópicos	127,73	0,41	9
<b>TOTAL</b>	<b>31.494,16</b>	<b>100</b>	<b>442</b>

### 5.3.2. Definición de unidades de paisaje

La estructuración del territorio en unidades de paisaje trata de dar un enfoque global al estudio del conjunto de procesos naturales que tienen lugar en una zona.

Las unidades de paisaje se componen teniendo en cuenta las características litológicas, las formas de relieve, la red hidrográfica, el suelo, la vegetación y el uso humano (Bellinfante *et al.*, 2000).

La gran ventaja del uso de las unidades de paisaje para la delimitación de unidades cartográficas de suelos, es que integran los pedones en un entorno más amplio de lo que pueden ser unos valores puntuales de pendiente, orientación, etc., puesto que las correlaciones que se obtienen entre el suelo y los parámetros físicos del medio no siempre son lineales y, a menudo, son difíciles de identificar, debido a las interacciones entre diversos factores formadores (Lagacherie y Voltz, 2000).

En consecuencia, la interpretación de la dinámica edafológica entre los distintos puntos de una unidad de paisaje puede ser clave para una buena predicción de la distribución de los suelos.

La forma óptima de definición de estas unidades es la interpretación sobre pares estereoscópicos de fotografías aéreas, que ofrecen información simultánea sobre la vegetación, los conjuntos de relieve y los tipos de morfogénesis.

Se trata, por lo tanto, de una fase “manual”, con los errores o interpretaciones humanas que esto conlleva. Existen también programas de clasificación automática del paisaje desarrollados sobre un sistema de información geográfica (Robbez-Masson, 1998; Robbez-Masson, 2000), que pueden reducir notablemente el proceso de fotointerpretación, aunque, por otro lado, producen una fragmentación del espacio que precisa una depuración o revisión posterior. Esto nos ha llevado a que, por el momento, se haya optado por la clasificación

manual del territorio en unidades de paisaje considerando la mayor capacidad de síntesis del ser humano, en menoscabo de la mayor capacidad de análisis de un ordenador.

Por lo tanto, la zona de estudio se ha dividido en unidades de paisaje, caracterizadas por mantener una cierta homogeneidad en cuanto a las características del relieve y de la vegetación, evitando la fragmentación excesiva que pudiera separar suelos relacionados espacialmente entre sí.

Las unidades de paisaje obtenidas han sido tipificadas según sus distintos atributos, con el fin de poder agrupar unidades de características cercanas.

Las unidades de paisaje obtenidas se han sometido a un preanálisis estadístico buscando correlaciones de relieve y vegetación con las propiedades de los suelos muestreados. Este preanálisis ha indicado la ausencia de correlaciones significativas entre las coberturas vegetales y las propiedades edafológicas, mientras que sí se han encontrado variaciones significativas relativas al relieve. En consecuencia, en este trabajo se ha reducido la delimitación de las unidades de paisaje a unidades de relieve y se han establecido los siguientes tipos de unidades:

*Tabla 5.17: Tipos de relieve presentes en la zona de estudio*

Tipo de relieve	Altura de relieve	Código-Ordinal	Características dominantes del relieve
Agudamente recortado	Colinado	ARC – 1	Pendientes de moderadas a muy fuertes y longitudes de ladera largas
Agudamente recortado	Ondulado	ARO – 2	Pendientes de moderadas a muy fuertes y longitudes de ladera cortas
Suavemente recortado	Colinado	SRC – 3	Pendientes de suaves a moderadas y longitudes de ladera largas
Suavemente recortado	Plano	SRP – 4	Pendientes de llanas a suaves y longitudes de ladera variables
Suavemente recortado	Ondulado	SRO – 4	Pendientes de suaves a moderadas y longitudes de ladera cortas
Aterrazado	Cualquiera	AT – 5	Pendientes y longitudes de ladera modificadas por el aterrazamiento
Estructuras antópicas	Cualquiera	--	Aquellas unidades en las que el relieve es imposible de definir por estar fuertemente alterado por la actividad antrópica

Para la caracterización del relieve se ha seguido la clasificación dada por MOPT (1992). A cada tipo de relieve se le ha dado un código de letras y un ordinal para su uso en el análisis estadístico. En la Tabla 5.18 y en la Figura 5.17 se pueden ver las distintas unidades de paisaje presentes, así como su distribución dentro de la cuenca.

*Tabla 5.18: Distribución de las unidades de paisaje dentro de la cuenca*

Código-Ordinal de la Unidad de paisaje	% de representación
ARC-1	0,09
ARO-2	19,60
SRO-4	78,31
Estructura antrópica	2,00

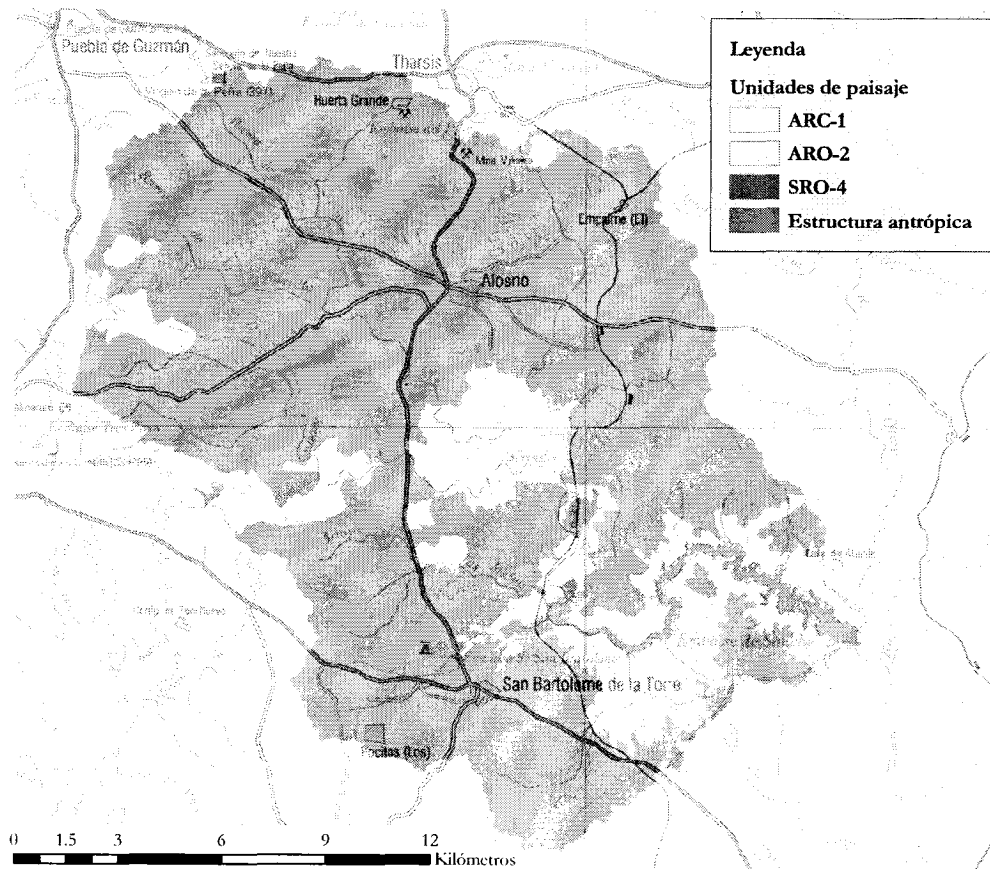


Figura 5.17: Unidades de paisaje definidas en la cuenca del embalse de El Sancho

Por último, hay que señalar que la **zona correspondiente a las litofacies 3100 recibirá un tratamiento distinto**. Ello es debido a que se trata de sedimentos recientes (pliocuaternarios) en los que el relieve es muy escaso y está constituido por fenómenos erosivos, por lo que apenas tendrá relevancia en la formación de los suelos. Por otro lado, la distribución de los sedimentos es en ocasiones muy dispersa, difícil de cartografiar desde un punto de vista geológico; por ello, se ha tomado la cartografía de unidades litoedáficas realizada por Domingo *et al.* (2003) mediante puntos de muestreo sistemáticos, además de los típicos muestreos dirigidos que se realizan en cartografía de suelos. En el citado trabajo se hicieron 26 muestreos sobre la litofacies 3100.

Por lo tanto, se ha trasladado directamente del trabajo citado la información de suelos para la litofacies 3100, sin que se considere necesario un análisis estadístico complementario.

### 5.3.3. Definición de relaciones suelo-paisaje

Una vez realizada la delimitación de unidades de paisaje (relieve), estas pasan a ser una variable más para el análisis conducente a establecer relaciones medias del suelo con la roca, los factores del relieve y otros factores formadores. El análisis realizado se compone de técnicas estadísticas básicas sobre el conjunto de muestreos de suelo, a excepción de los de la litofacies simplificada 3100 (arenas cuaternarias).

El procedimiento analítico ha seguido los siguientes pasos:

- Análisis de relaciones entre variables categóricas mediante tablas de contingencia, realizando pruebas de independencia chi cuadrado y de razón de verosimilitud.
- Tipificación de valores según las medias de cada litofacies o grupo litoedáfico.
- Análisis de correlaciones de las variables del medio físico frente a las variables edafológicas tipificadas y no tipificadas.
- Análisis de los casos en los cuales se considera que puede existir influencia del relieve (muestreos con relieve tipo 1 a 2).
- Comparación de medias y definición de las litofacies que aparecen más influenciadas por el relieve.

El conjunto de variables analizadas se presenta en la Tabla 5.19, Tabla 5.20, Tabla 5.21, Tabla 5.22, Tabla 5.23, Tabla 5.24 y Tabla 5.25.

Tabla 5.19: Variables categóricas del medio

Variables por categorías	Código
Litofacies simplificada	<i>lito_simp</i>
Tipo de relieve según unidades de paisaje	<i>UP_tipo_rel</i>
Tipo de pendiente	<i>Tipo_pte</i>
Tipo de concentración de flujo*	<i>Cod_Concentrac</i>
Tipo de vegetación dominante*	<i>Cod_VegDom</i>

Tabla 5.20: Variables continuas del medio

Variables continuas	Código
Pendiente (%)	<i>Pte</i>
Índice de Humedad*	<i>WI</i>
Área de drenaje específico*	<i>A_drje</i>
Longitud de ladera	<i>Long_lad</i>

Tabla 5.21: Variables categóricas del perfil completo

Variables por categorías	Código
Profundidad tipo*	<i>TipoProfUtil</i>
Capacidad de retención de agua disponible tipo*	<i>TipoCradU</i>
Capacidad de retención de agua total tipo*	<i>TipoCram</i>
Grupo taxonómico FAO*	<i>Cod_FaoRes</i>
Grupo hidrológico de suelo (en valor discreto)*	<i>ghs_perfil</i>

Tabla 5.22: Variables continuas del perfil completo

Variables continuas	Código
Profundidad útil (cm)	<i>Prof_util</i>
Capacidad de retención de agua disponible (mm)	<i>CRAD</i>
Capacidad de retención de agua total (mm)	<i>CRAM</i>
Capacidad de retención de agua disponible hasta <i>Prof_util</i> (mm)	<i>CRADu</i>
Conductividad hidráulica de Brakensiek mínima hasta 50 cm de profundidad	<i>KBrakMin50</i>
Conductividad hidráulica de Brakensiek mínima hasta 100 cm de profundidad	<i>KBrak100</i>
Conductividad hidráulica de Brakensiek mínima 10 cm de profundidad	<i>K_brak_10</i>
Grupo hidrológico de suelo en expresión continua	<i>Ig</i>
Pedregosidad superficial (%)	<i>Pedr_sup</i>

Tabla 5.23: Variables por categorías del perfil obtenidas como valores medios de los horizontes

VARIABLES POR CATEGORÍAS	CÓDIGO
Índice textural logarítmico entero*	Tipo <i>Itex ln</i>

Tabla 5.24: Variables continuas del perfil obtenidas como valores medios de los horizontes

VARIABLES CONTINUAS	CÓDIGO
Índice textural logarítmico continuo	<i>Itex ln pf</i>
Conductividad hidráulica de Brakensiek media del perfil (Russel-Moore)	<i>K_Brak_RM</i>
Desviación típica mediocuadrática del tamaño de partículas en tierra fina para todo el perfil	<i>SigmaPF_TF</i>
Media del % de arcilla en el perfil ponderada por el espesor del horizonte	<i>M_arcilla</i>
Media en el perfil del contenido de K ponderado según Russel-Moore (ppm)	<i>M_RM_K</i>
Media en el perfil del contenido de Na ponderado según Russel-Moore (ppm)	<i>M_RM_Na</i>
Media en el perfil del contenido de M Prado según Russel-Moore (ppm)	<i>M_RM_Mg</i>
Media en el perfil de la capacidad de intercambio catiónico ponderado según Russel-Moore (meq/100 g TF)	<i>M_RM_CIC</i>
Media en el perfil del pH de cambio ponderado según Russel-Moore	<i>M_RM_pH_Kcl</i>

\* Las categorías definidas para estas variables se encuentran en el anejo II y III

Como se verá, la dominancia de la roca para determinar la variación de los suelos es muy alta. Esto ha motivado que, siguiendo el trabajo realizado por Domingo (2002), se haya hecho una tipificación de las principales variables edafológicas según la media de la litofacies sobre la que se asientan. Las variables tipificadas se han afectado de un sufijo "LT" que hace alusión a su normalización a través de las medias litológicas.

Tabla 5.25: Variables tipificadas

VARIABLES TIPIFICADAS	CÓDIGO
Profundidad útil tipificada	<i>ProfU_LT</i>
Capacidad de retención de agua total	<i>CRAM_LT</i>
Capacidad de retención de agua disponible	<i>CRADuLT</i>
Conductividad hidráulica de Brakensiek media del perfil (Russel-Moore) tipificada	<i>K_Brak_RMLT</i>
Índice textural logarítmico tipificado	<i>Itex lnLTF</i>
Conductividad hidráulica de Brakensiek mínima hasta 50 cm de profundidad tipificada	<i>KBrak50LT</i>
Conductividad hidráulica de Brakensiek mínima hasta 100 cm de profundidad tipificada	<i>kBrak100LT</i>
Grupo hidrológico de suelo en expresión continua tipificado	<i>Ig_PjLT</i>
Pedregosidad superficial tipificada	<i>Pedreg_LT</i>
Pendiente tipificada	<i>Pte_LT</i>
Longitud de ladera tipificada	<i>LongL_LT</i>
Área de drenaje tipificada	<i>ADrj_LT</i>
Índice de humedad tipificado	<i>WI_LT</i>
Materia orgánica a 1º cm de profundidad	<i>MO_10LT</i>

Se exponen a continuación los principales resultados del análisis estadístico.

### 5.3.3.1. Análisis de relaciones entre variables categóricas

Con el fin de poder analizar la influencia de algunas variables cualitativas sobre las características del suelo se ha procedido a la discretización de las variables cuantitativas por tipos o categorías. La principal variable categórica (cualitativa pura) es el tipo de roca.

La influencia de unas variables categóricas sobre otras se ha analizado mediante tablas de contingencia, realizando pruebas de independencia chi cuadrado y de razón de verosimilitud. Los resultados de este análisis se resumen en la Tabla 5.26, Tabla 5.27 y Tabla

5.28. Se exponen los resultados de la prueba de chi-cuadrado y sólo cuando aparecen contradicciones con la prueba de razón de verosimilitud se hace referencia a esta.

Tabla 5.26: Resultados del análisis mediante tablas de contingencia de las relaciones entre la variable "lito\_simp" (litofacies simplificadas) y el resto de variables categorizadas

Variable	Valor $\chi^2$	Signif	Observaciones
TipoProfUtil	58,596	0,004	
TipoCram	70,558	0,007	
TipoCradU	85,844	0,000	
ghs_perfil	34,963	0,039	
tipo_itex_ln	154,722	0,000	
UP_tipo_rel	105,835	0,000	
Tipo_pte	56,687	0,412	No significativo
Cod_Concentrac	41,157	0,594	No significativo
Cod_VegDom	102,814	0,000	
Cod_FaoRes	145,305	0,000	

Tabla 5.27: Resultados del análisis mediante tablas de contingencia de las relaciones entre la variable "TipoProfUtil" (categorías de profundidad útil) y el resto de variables categorizadas

Variable	Valor $\chi^2$	Signif	Observaciones
Tipo_itex_ln	24,481	0,270	No significativo
UP_tipo_rel	23,428	0,024	
Tipo_pte	17,531	0,288	No significativo
Cod_Concentrac	8,850	0,716	No significativo
Cod_VegDom	30,890	0,009	
Cod_FaoRes	67,929	0,000	

Tabla 5.28: Resultados del análisis mediante tablas de contingencia de las relaciones entre las variables "TipoCram" / "TipoCradU" (categorías de capacidad de retención de agua total y útil) y el resto de variables categorizadas

Variable	Valor $\chi^2$	Signif	Observaciones
UP_tipo_rel	22,036 / 21,309	0,142 / 0,167	Poco significativo
Tipo_pte	34,650 / 26,922	0,022 / 0,137	La CRAM presenta una relación significativa por la pendiente que puede deberse en parte a la presencia de la pendiente en el modelo de cálculo de la capacidades de retención
Cod_Concentrac	17,037 / 25,752	0,383 / 0,058	La CRADU presenta una relación significativa, pero no es significativa en cuanto a la razón de verosimilitud. La CRAM no es significativa.
Cod_VegDom	30,996 / 37,285	0,055 / 0,011	
Cod_FaoRes	92,588 / 93,792	0,000	

Como puede apreciarse en los resultados expuestos existe una importante influencia del tipo de roca sobre las características de los suelos, tal como ya quedó expuesto en los estudios edafológicos que se han hecho en la zona (Domingo, 2002).

También es destacable la influencia del tipo de relieve, que resulta significativa tanto sobre la profundidad del suelo como sobre su capacidad hídrica.

El tipo de vegetación también aparece relacionado de forma significativa con estas propiedades de los suelos, si bien las relaciones parecen ser debidas a la actuación humana, que modifica las cubiertas vegetales según los tipos de suelo. De esta forma, se aprecia que los pinares van asociados a suelos someros o de profundidad media, lo que es debido a que las repoblaciones con pinos se realizan sobre terrenos fuertemente degradados. Las quercíneas y el eucaliptal aparecen sobre todas las profundidades, aunque dominan las medias-altas, lo cual es también lógico dado que se espera una renta productiva de estos terrenos forestales. En

trabajos anteriores que analizan en mayor detalle la influencia de la vegetación sobre las características del suelo (Domingo, 2002), no se han identificado relaciones significativas entre la calidad de la cubierta vegetal y el suelo en la zona de trabajo. El alto nivel de intervención que presentan las cubiertas vegetales puede explicar estos resultados, por lo que la vegetación no será tratada como una variable de referencia para los suelos; por otro lado, su importancia directa en el modelo hidrológico de escorrentía aconseja también que no sea considerada dentro de los suelos para evitar posibles situaciones de colinealidad.

Otros factores ecológicos, como la pendiente y la concentración de flujo, parecen presentar una influencia mucho más débil sobre las propiedades de los suelos que, en caso de existir, queda enmascarada por la dominancia del factor roca.

### ***5.3.3.2. Tipificación de valores según las medias de cada litofacies o grupo litoedáfico***

Demostrada la dominancia de la roca sobre las características del suelo, es preciso identificar otras variables influyentes. Para ello, lo más sencillo sería realizar un análisis estadístico dentro de los muestreos de cada litología, si bien, esta vía de trabajo presenta los siguientes obstáculos:

- Algunas litofacies presentan variabilidad interna en los tipos de rocas, por lo que también se puede enmascarar la influencia de otros factores ecológicos.
- El número de muestreos obtenidos para cada litofacies es pequeño, entre 2 y 15, según la abundancia relativa de la roca.
- Los muestreos realizados en cada litología no cubren todas las posibles situaciones de variación de parámetros ecológicos.
- La roca es una variable cualitativa pura. Existe un buen número de variables cuantitativas que no pueden ser evaluadas correctamente en el análisis de contingencia realizado.

En consecuencia, resultaría conveniente realizar el análisis estadístico para el conjunto de muestreos tomados sobre todas las litofacies, transformando los datos para corregir la influencia de la roca sobre la que se asiente cada muestreo. Para ello, se ha procedido a la obtención de valores medios por litologías de todos los parámetros edáficos y ecológicos. A continuación se ha tipificado el valor de cada muestreo dividiéndolo por la media obtenida para esa litología.

Los valores de las medias obtenidas para las variables principales se muestran en la Tabla 5.29, mientras que para el total de las variables se se pueden consultar en el ANEJO IV.

Tabla 5.29: Medias por litologías simplificadas para las variables principales estudiadas

Litologías simplificadas	Estadístico	Prof_util	CRAM	CRAD	CRADutil	K_Brak_10	KBrakMin50	ghs_cont_perfil
400	Media	53,75	83,00	47,25	54,25	1,32	0,56	2,58
	Error típ.	4,27	18,73	9,29	13,36	0,40	0,13	0,09
500*	Ponderada	108,50	213,10	99,77	98,47	2,89	0,25	3,43
1100	Media	48,00	53,90	27,10	33,90	1,43	1,05	2,44
	Error típ.	7,93	13,06	6,27	7,37	0,21	0,24	0,15
1200	Media	34,00	56,92	30,17	33,08	1,64	1,26	2,30
	Error típ.	4,15	11,34	5,61	5,61	0,19	0,21	0,11
1300	Media	58,40	127,60	65,20	66,53	1,53	0,32	3,00
	Error típ.	5,46	18,34	8,91	9,32	0,25	0,06	0,16
1400	Media	55,00	102,63	59,25	62,25	1,82	0,77	2,55
	Error típ.	5,09	12,09	5,78	5,47	0,41	0,23	0,13
1500	Media	90,83	189,83	95,83	105,83	1,17	0,48	3,01
	Error típ.	13,13	41,20	17,10	19,14	0,42	0,16	0,32
1700	Media	80,00	176,75	77,75	80,75	0,43	0,11	3,61
	Error típ.	8,42	12,55	7,60	6,75	0,15	0,06	0,40
1800	Media	85,00	193,50	91,00	89,50	1,88	0,06	3,50
	Error típ.	15,00	63,50	26,00	27,50	0,53	0,01	0,08
1900	Media	113,00	399,00	158,00	159,50	0,22	0,04	4,57
	Error típ.	13,00	4,00	2,00	0,50	0,12	0,04	0,29
2000	Media	59,90	150,20	71,20	73,70	1,66	0,43	3,07
	Error típ.	11,30	38,79	16,67	16,59	0,38	0,14	0,23
3150	Media	88,75	168,75	79,00	85,25	8,49	0,85	2,69
	Error típ.	10,48	40,90	17,36	10,40	1,19	0,46	0,34

\* El valor de la litofacies 500 proviene de la media ponderada de dos subgrupos que no se describen en este trabajo

### 5.3.3.3. Análisis de correlaciones de las variables del medio físico frente a las variables edafológicas

Un análisis de regresión permite identificar correspondencias matemáticas entre las variables del suelo y las del medio físico. De forma previa es conveniente la realización de un análisis de correlaciones dos a dos que identifique el grado de variación conjunta entre dos variables.

El análisis de correlaciones se ha realizado para todo el conjunto de variables estudiadas, tanto las del medio como las del suelo, y tanto las tipificadas según las litologías como las variables en bruto.

Se resumen a continuación los resultados de mayor interés:

Tabla 5.30: Correlaciones más significativas de las variables de profundidad del suelo (*Prof\_util*) y profundidad tipificada (*ProfU\_LT*)

Variable	Estadístico	<i>Prof_util</i>	<i>ProfU_LT</i>
<i>SigmagPf_TF</i>	Corr.Pears	-0,6407	-0,4006
	Sig. (bilat)	0,0000	0,0001
<i>M_arcilla</i>	Corr.Pears	0,5397	0,2640
	Sig. (bilat)	0,0000	0,0135
<i>KBrakMin50</i>	Corr.Pears	-0,5315	-0,3626
	Sig. (bilat)	0,0000	0,0006
<i>M_RM_K</i>	Corr.Pears	-0,3167	
	Sig. (bilat)	0,0028	
<i>M_RM_Na</i>	Corr.Pears	0,3143	
	Sig. (bilat)	0,0030	
<i>Itxt_ln_Pf</i>	Corr.Pears	0,4980	0,2595
	Sig. (bilat)	0,0000	0,0152
<i>Pedr_sup</i>	Corr.Pears		-0,2935
	Sig. (bilat)		0,0058
<i>Long_lad</i>	Corr.Pears	<b>0,3031</b>	
	Sig. (bilat)	<b>0,0043</b>	
<i>WI</i>	Corr.Pears	<b>0,2230</b>	
	Sig. (bilat)	<b>0,0379</b>	
<i>Itxt_lnLTF</i>	Corr.Pears	0,2470	0,4287
	Sig. (bilat)	0,0211	0,0000
<i>Pedreg_LT</i>	Corr.Pears		-0,3229
	Sig. (bilat)		0,0023
La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).			
La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).			

De la Tabla 5.30 se deduce que la influencia de la roca es muy importante, ya que las variables edáficas que presentan correlación con la profundidad están vinculadas a la roca: textura, pedregosidad superficial y nutrientes (K y Na).

Únicamente las dos variables de relieve “longitud de ladera” e “índice de humedad” presentan correlación significativa frente a la profundidad del suelo. Aunque se trata de una correlación débil será preciso tomar estas variables en consideración.

Tabla 5.31: Correlaciones más significativas de las variables de capacidad de retención de agua del suelo total (*CRAM*) y útil (*CRADutil*)

Variable	Estadístico	<i>CRAM</i>	<i>CRADu</i>
<i>M_RM_K</i>	Corr.Pears	-0,3976	-0,3878
	Sig. (bilat)	0,0001	0,0002
<i>M_RM_Na</i>	Corr.Pears	0,2968	0,3072
	Sig. (bilat)	0,0053	0,0038
<i>Pte</i>	Corr.Pears		<b>-0,2571</b>
	Sig. (bilat)		<b>0,0162</b>
<i>Long_lad</i>	Corr.Pears	<b>0,2590</b>	<b>0,3107</b>
	Sig. (bilat)	<b>0,0154</b>	<b>0,0034</b>
<i>WI</i>	Corr.Pears	<b>0,2483</b>	<b>0,3204</b>
	Sig. (bilat)	<b>0,0204</b>	<b>0,0025</b>

La capacidad hídrica del suelo también se ve notablemente influida por las variables vinculadas a la roca (nutrientes K y Na), así como por las variables de relieve.

Tabla 5.32: Correlaciones más significativas de las variables de conductividad hasta 50 cm de profundidad (*KBrakMin50* y *KBrak50LT* para la tipificada) y del parámetro continuo del grupo hidrológico de suelos (*Ig* y *Ig\_PfLT* para la tipificada)

Variable	Estadístico	<i>KbrakMin50</i>	<i>Ig</i>	<i>KBrak50LT</i>	<i>Ig_PfLT</i>
<i>Prof_util</i>	Corr.Pears	<b>-0,5315</b>	0,6119	-0,2389	0,2646
	Sig. (bilat)	<b>0,0000</b>	0,0000	0,0259	0,0133
<i>M_RM_pHKCl</i>	Corr.Pears	<b>0,2931</b>	<b>-0,2422</b>	<b>0,2331</b>	<b>-0,2431</b>
	Sig. (bilat)	<b>0,0059</b>	<b>0,0238</b>	<b>0,0298</b>	<b>0,0233</b>
<i>M_RM_Mg</i>	Corr.Pears	<b>-0,2620</b>	0,2809		
	Sig. (bilat)	<b>0,0142</b>	0,0084		
<i>M_RM_K</i>	Corr.Pears	<b>0,5232</b>	-0,4925	<b>0,2320</b>	<b>-0,2230</b>
	Sig. (bilat)	<b>0,0000</b>	0,0000	<b>0,0306</b>	<b>0,0378</b>
<i>M_RM_Na</i>	Corr.Pears	<b>-0,3049</b>	0,4164	<b>-0,2220</b>	<b>0,2247</b>
	Sig. (bilat)	<b>0,0041</b>	0,0001	<b>0,0387</b>	<b>0,0364</b>
<i>M_RM_CIC</i>	Corr.Pears	<b>-0,2841</b>	0,2979		
	Sig. (bilat)	<b>0,0077</b>	0,0051		
<i>UP_tipo_rel</i>	Corr.Pears			<b>-0,2835</b>	<b>0,2278</b>
	Sig. (bilat)			<b>0,0078</b>	<b>0,0338</b>
<i>Pte</i>	Corr.Pears		<b>-0,2345</b>	<b>0,2456</b>	<b>-0,2238</b>
	Sig. (bilat)		<b>0,0288</b>	<b>0,0218</b>	<b>0,0372</b>
<i>Pedr_sup</i>	Corr.Pears	<b>0,2346</b>		<b>0,3309</b>	<b>-0,3194</b>
	Sig. (bilat)	<b>0,0287</b>		<b>0,0017</b>	<b>0,0026</b>
<i>Long_lad</i>	Corr.Pears		<b>0,2270</b>		
	Sig. (bilat)		<b>0,0345</b>		
<i>WI</i>	Corr.Pears	<b>-0,2192</b>	0,2179	<b>-0,2241</b>	<b>0,2304</b>
	Sig. (bilat)	<b>0,0414</b>	0,0426	<b>0,0369</b>	<b>0,0318</b>
<i>ProfU_LT</i>	Corr.Pears	-0,3626	0,2803	<b>-0,4012</b>	<b>0,4626</b>
	Sig. (bilat)	0,0006	0,0086	<b>0,0001</b>	<b>0,0000</b>
<i>MO_10LT</i>	Corr.Pears			<b>-0,2544</b>	<b>0,2321</b>
	Sig. (bilat)			<b>0,0174</b>	<b>0,0305</b>
<i>Pedreg_LT</i>	Corr.Pears			<b>0,3755</b>	<b>-0,3729</b>
	Sig. (bilat)			<b>0,0003</b>	<b>0,0004</b>
<i>Pte_LT</i>	Corr.Pears		<b>-0,2248</b>	<b>0,2633</b>	<b>-0,2326</b>
	Sig. (bilat)		<b>0,0363</b>	<b>0,0138</b>	<b>0,0301</b>
<i>ADrj_LT</i>	Corr.Pears				<b>0,2121</b>
	Sig. (bilat)				<b>0,0486</b>
<i>WI_LT</i>	Corr.Pears			<b>-0,2451</b>	<b>0,2538</b>
	Sig. (bilat)			<b>0,0221</b>	<b>0,0177</b>

Según se aprecia en la Tabla 5.32 las variables de relieve presentan correlaciones significativas con el grupo hidrológico de suelos del parámetro número de curva, si bien, los coeficientes de correlación son bajos.

Las variables vinculadas a la roca, como la pedregosidad o los contenidos catiónicos, presentan correlaciones mayores y más significativas, siguiendo la tendencia ya detectada en el resto del análisis de datos.

A la vista de este primer análisis de correlaciones se procedió a realizar un análisis de regresión lineal multivariante “paso a paso” buscando expresiones lineales que estimen los valores edáficos a partir de variables del medio. Con la información disponible, los resultados obtenidos de estas regresiones son muy pobres, por lo que no se considera adecuado realizar estimaciones de variables edáficas por esta vía.

#### 5.3.3.4. Análisis de los casos en los cuales puede existir influencia del relieve

Como se ha visto el relieve, junto con la roca madre, resulta un elemento de influencia significativa sobre las características edáficas condicionantes del grupo hidrológico. Por otro lado, existe abundante información sobre la diferente dinámica de los suelos en zonas accidentadas respecto de las zonas llanas (Conacher y Dalrymple, 1977; Birkeland, 1999; Gandullo, 1994). Este conjunto de circunstancias ha aconsejado analizar las zonas de relieve accidentado como un subgrupo del resto. Se han considerado zonas de relieve accidentado las que cumplan alguna de las siguientes condiciones:

- Unidades de relieve tipo 1, 2 ó 3, esto es, todas las zonas con relieve agudamente recortado más las zonas de relieve suavemente recortado con desniveles importantes (colinado).
- Puntos de muestreo con pendiente mayor o igual de 15%, independientemente del tipo de unidad de relieve en donde se encuentren.

De los 87 muestreos disponibles en la zona, 61 cumplen las condiciones indicadas.

Al igual que para el conjunto total de datos, se ha hecho un análisis de correlaciones de las que se indican las más significativas en las Tabla 5.33 y Tabla 5.34.

Tabla 5.33: Principales correlaciones entre variables del suelo-medio y las variables objetivo, para las zonas de relieve accidentado

Variable	Estadístico	Prof_util	CRAM	CRADu	KBrakMi50	Ig
<i>M_RM_Mg</i>	Corr.Pears	0,3083	0,3231		-0,3228	0,4913
	Sig. (bilat)	0,0350	0,0267		0,0269	0,0005
<i>M_RM_K</i>	Corr.Pears	-0,3599	-0,3998	-0,3821	0,5188	-0,4952
	Sig. (bilat)	0,0130	0,0054	0,0080	0,0002	0,0004
<i>M_RM_Na</i>	Corr.Pears	0,3347	0,3380		-0,3658	0,5450
	Sig. (bilat)	0,0215	0,0201		0,0115	0,0001
<i>Pedr_sup</i>	Corr.Pears					
	Sig. (bilat)					
<i>Long_lad</i>	Corr.Pears	0,4071	0,3791	0,4097		
	Sig. (bilat)	0,0045	0,0086	0,0042		
<i>A_drje</i>	Corr.Pears	0,3288		0,2992		
	Sig. (bilat)	0,0240		0,0411		
<i>Pedreg_LT</i>	Corr.Pears					
	Sig. (bilat)					
<i>ADrj_LT</i>	Corr.Pears					
	Sig. (bilat)					

Tabla 5.34: Principales correlaciones entre variables del suelo-medio y las variables objetivo tipificadas según la media de su litología, para las zonas de relieve accidentado

Variable	Estadístico	ProfU_LT	CRAM_LT	CRADuLT	KBrak50LT	Ig_PfLT
<i>M_RM_Mg</i>	Corr.Pears Sig. (bilat)					
<i>M_RM_K</i>	Corr.Pears Sig. (bilat)		-0,3939 0,0062	-0,4127 0,0039		-0,2880 0,0497
<i>M_RM_Na</i>	Corr.Pears Sig. (bilat)					
<i>Pedr_sup</i>	Corr.Pears Sig. (bilat)	-0,3705 0,0104			0,3536 0,0148	-0,3630 0,0122
<i>Long_lad</i>	Corr.Pears Sig. (bilat)					
<i>A_drje</i>	Corr.Pears Sig. (bilat)	0,3460 0,0172	0,3195 0,0286	0,3050 0,0371		
<i>Pedreg_LT</i>	Corr.Pears Sig. (bilat)	-0,4088 0,0043	-0,2985 0,0416	-0,3217 0,0274	0,3570 0,0138	-0,3770 0,0090
<i>ADrj_LT</i>	Corr.Pears Sig. (bilat)	0,3130 0,0322	0,3293 0,0238	0,3344 0,0216		

De nuevo las variables edáficas fuertemente ligadas a la roca, como la pedregosidad y los contenidos catiónicos, presentan correlaciones importantes con los parámetros edáficos que se tratan de estimar. También es destacable que las variables relacionadas con el relieve presentan mejores correlaciones, en especial la longitud de ladera, que presenta correlaciones superiores a 0,4 altamente significativas.

Dada la demostrable influencia del relieve y de la roca sobre las variables edáficas que condicionan el número de curva, se decide hacer la estimación de estas variables con el procedimiento siguiente:

- Zonificación según las litofacies simplificadas
- Comparación de medias, dentro de cada litofacies, de los muestreos en zonas de relieve accidentado con la media general del grupo.
- En caso de existir diferencias significativas entre las medias comparadas se separarán las zonas de relieve accidentado del resto para la estimación de las variables edáficas. Si la diferencia entre las medias es inferior al 15% se asigna la misma media a toda la litofacies simplificada.
- Cuando existan diferencias significativas de las medias, a las zonas de relieve plano se le asigna la media de todas las muestras, ya que, en general, el número de muestreos en zona llana es insuficiente para estimar una media fiable.

Estas estimaciones pueden presentar notables imprecisiones de forma puntual, pero se han considerado aceptables dado que se busca obtener un valor medio para cada zona

geomorfolitológica, lo cual se considera suficiente para el modelo distribuido del número de curva que se plantea.

### 5.3.3.5. Comparación de medias y definición de las litofacies más influenciadas por el relieve

Se definen aquí las litofacies simplificadas en las que será conveniente separar unidades de relieve accidentado de las unidades llanas o poco accidentadas. Para ello se ha hecho una comparación relativa de las medias, seleccionando las que presentan diferencias superiores al 15%. El resultado de la comparación puede apreciarse en la Tabla 5.35.

Tabla 5.35: Variables y litofacies que presentan diferencias superiores al 15% en las medias de las zonas de relieve accidentado frente a la media general de toda la litología

Litofacies simplificada	Prof_util	CRAM	CRAD	CRADu	K_Brak_10	KBrakMin50	Ig
400		0,2129	0,1817	0,2381			
500* (ponderado)					-0,1989		
1100		0,1878	0,1718	0,1577			
1200							
1300		0,3182	0,3137	0,3143		-0,4025	
1400						-0,2936	
1500						-0,1960	
1700							
1820	0,1765	0,3282	0,2857	0,3073	-0,2817	-0,1790	
1900					0,5301	-0,9335	
2000					-0,3072	-0,3191	
3150	0,3239	0,6622	0,6329	0,3431	-0,1704	-1,3298	0,2555
3900							

Diferencias de la medias en tanto por uno.

\*El subgrupo 500 proviene de la ponderación de subgrupos que no se describen en este trabajo.

A la vista de la tabla se pueden hacer los siguientes comentarios y aclaraciones:

- El muestreo en zona de relieve accidentado para el subgrupo litológico 3150 se puede descartar a efectos de separación de zonas de relieve accidentado, pues este tipo de zonas tienen una presencia insignificante en las litofacies.
- Para el grupo litológico 500 se han diferenciado dos subgrupos en función de la composición de las rocas. Sin embargo, se desconoce la distribución geográfica de cada subgrupo dentro de las litofacies, por lo que se toma el valor medio ponderado.
- Aunque las conductividades hidráulicas sí presentan diferencias con el relieve, el grupo hidrológico de suelos resultante no las presenta, por lo que sólo se tendrá en cuenta la influencia del relieve para las variables de capacidad de retención de agua. Para ellas, los valores porcentuales de variación entre relieves suaves y relieves accidentados se presentan en la Tabla 5.36.

Tabla 5.36: Porcentaje de variación de las medias totales de la CRAM, CRAD y PMP respecto a las medias de las variables del relieve accidentado

Litofacies simplificadas	% variación CRAM	% variación CRAD	% variación PMP
400 - Pizarras y tufitas moradas o vinosas	21,3	18,2	25,4
500 - Lavas, aglomerados, brechas, tobas y tufitas ácidas	5,3	4,8	16,1
1100 - Pizarras y algunas grauwacas con Posidonomia, Goniatites y Archaeocalamites	18,8	17,2	20,4
1200 - Grauwacas y pizarras con Posidonomia, Goniatites y Archaeocalamites	4,0	3,9	4,0
1300 - Pizarras, areniscas y cuarcitas	31,8	31,4	32,3
1400 - Brechas, aglomerados, lavas, tobas y tufitas ácidas e intermedias	9,0	8,2	10,1
1500 - Lavas, aglomerados, brechas, tobas y tufitas ácidas, a veces abigarradas	11,3	9,0	13,6
1700 - Lavas y tobas básicas espilíticas	0,0	0,0	0,0
1800 - Gabro-diabasas	32,8	28,6	36,6
1900 - Conglomerados y arenas	1,0	1,3	2,5
2000 - Pizarras, tufitas y tobas	4,5	2,4	6,3
3150 - Conglomerados, gravas y arenas con ostras y calizas bioclásticas arenosas	66,2	63,3	68,8
3900 - Margas, arenas y areniscas	0,0	0,0	0,0

Como se observa en la Tabla 5.36, las litofacies simplificadas 400, 1100, 1300, 1800 y 3150 presentan variaciones significativas entre las zonas de relieve accidentado y el resto de las zonas, por lo que a la hora de transponer los valores de las variables a la cartografía hay que tener en cuenta que para una misma litofacies simplificada existen dos valores posibles de capacidades de retención y de punto de marchitez permanente en función de la topografía.

### 5.3.4. Valores de interés hidrológico relativos a los suelos de la cuenca

#### 5.3.4.1. Estimación del grupo hidrológico de suelo (discreto)

Aplicando la misma metodología que para la estimación de la CRAM, CRAD y PMP, pero a los datos de conductividad hidráulica saturada del suelo, y aplicando la definición de grupo hidrológico de suelo para el perfil según la metodología descrita por el *soil survey manual* (Epígrafe 3.3.1.3), los resultados obtenidos son los que se resumen a continuación:

##### a) Estimación para las litofacies con fuerte dependencia roca-suelo

Se indican a continuación (Tabla 5.37) los valores de trabajo del grupo hidrológico de suelo para el perfil edáfico, teniendo en cuenta que al tratarse de valores discretos se ha trabajado con la moda. En los casos en los que se han apreciado diferencias entre la media general y la del relieve accidentado se indican valores distintos.

Tabla 5.37: Valores del grupo hidrológico de suelo por litofacies simplificadas y tipo de relieve

Litofacies simplificadas	Relieve	Grupo hidrológico de suelo
400 - Pizarras y tufitas moradas o vinosas	General Accidentado	C
500 - Lavas, aglomerados, brechas, tobas y tufitas ácidas	General Accidentado	C
1100 - Pizarras y algunas grauwacas con Posidonomia, Goniatites y Archaeocalamites	General Accidentado	C
1200 - Grauwacas y pizarras con Posidonomia, Goniatites y Archaeocalamites	General Accidentado	C
1300 - Pizarras, areniscas y cuarcitas	General Accidentado	C
1400 - Brechas, aglomerados, lavas, tobas y tufitas ácidas e intermedias	General Accidentado	C
1500 - Lavas, aglomerados, brechas, tobas y tufitas ácidas, a veces abigarradas	General Accidentado	C
1700 - Lavas y tobas básicas espiliticas	General Accidentado	D
1800 - Gabro-diabasas	General Accidentado	D
1900 - Conglomerados y arenas	General Accidentado	D
2000 - Pizarras, tufitas y tobas	General Accidentado	C
3150 - Conglomerados, gravas y arenas con ostreas y calizas bioclásticas arenosas	General Accidentado	D
3900 - Margas , arenas y areniscas	General Accidentado	B

En la siguiente figura se puede apreciar el gráfico de cajas de la estimación para el grupo hidrológico de suelo del perfil.

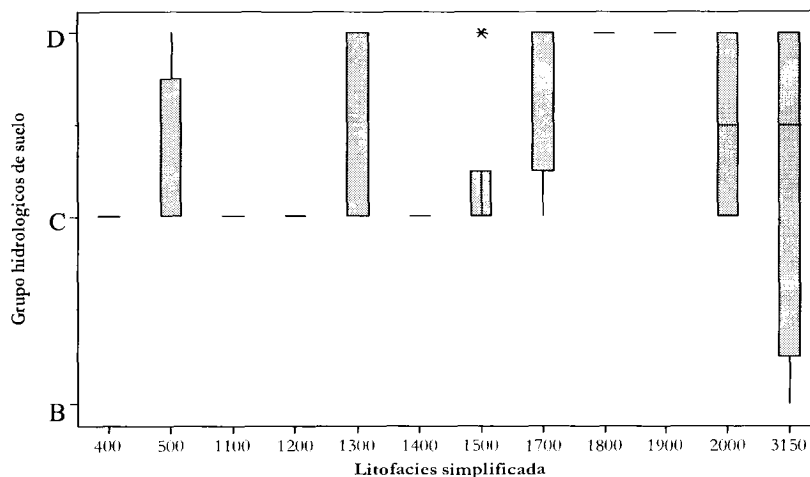


Figura 5.18: Gráfico de cajas que caracteriza las distintas litofacies simplificadas frente al grupo hidrológico de suelo para litofacies con fuerte dependencia roca-suelo

Para la litofacies 3100, sin dependencia clara entre la geología y el suelo, se indican los mismos valores en el siguiente punto.

**b) Estimación del grupo hidrológico de suelo para las unidades sin fuerte dependencia roca-suelo**

Para la litofacies 3100 se ha utilizado la cartografía paramétrica existente, basada en la definición de unidades litoedáficas, en la que a cada unidad se le asociann los valores de las distintas variables edafológicas en función de los tipos de suelo (Domingo *et al.*, 2003), como se puede ver a continuación:

Tabla 5.38: Unidades litoedáficas presentes en la cuenca de El Sancho (Domingo *et al.*, 2003)

Unidad litoedáfica	Grupo FAO	Clasificación FAO	LITOFACIES	Superficie (ha)	% de ocupación
3- Luvisol	Luvisol	Luvisoles arénicos	Arenas y gravas versicolores Conglomerados, arenas y gravas rojas	504,11	1,60
4- Profondiluvicos	Luvisol	Luvisoles profódicos con inclusiones de plintosoles y alisoles	Arenas blancas Arenas y gravas versicolores Conglomerados, arenas y gravas rojas	625,47	1,99
6- Arenosoles	Arenosol	Arenosol	Arenas y gravas versicolores	0,76	0,00
<b>TOTAL</b>				1.30,35	3,59

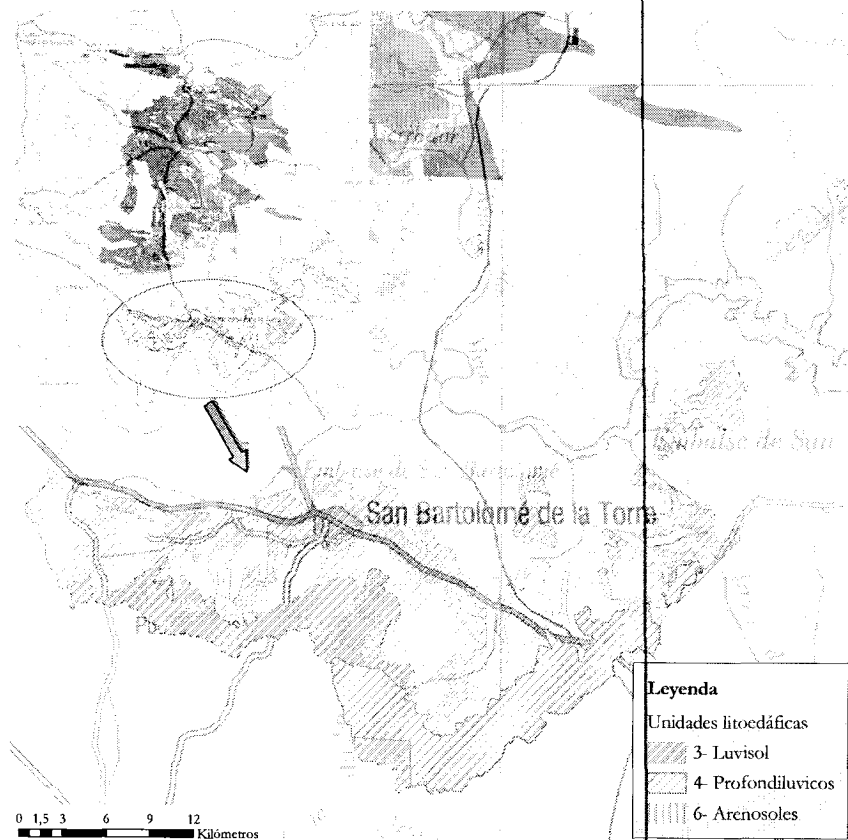


Figura 5.19: Detalle de la distribución de las unidades litoedáficas en la cuenca del embalse de El Sancho

Tabla 5.39: Resultado de los grupos hidrológicos de suelo por unidades litoedáficas

Unidad litoedáfica	Grupo FAO	Clasificación FAO	LITOFACIES	Grupo hidrológico de suelo
3- Luvisol	Luvisol	Luvisoles arénicos	Arenas y gravas versicolores Conglomerados, arenas y gravas rojas	B
4- Profundiluvicos	Luvisol	Luvisoles profundos con inclusiones de plintosoles y alisoles	Arenas blancas Arenas y gravas versicolores Conglomerados, arenas y gravas rojas	B
6- Arenosoles	Arenosol	Arenosol	Arenas y gravas versicolores	B

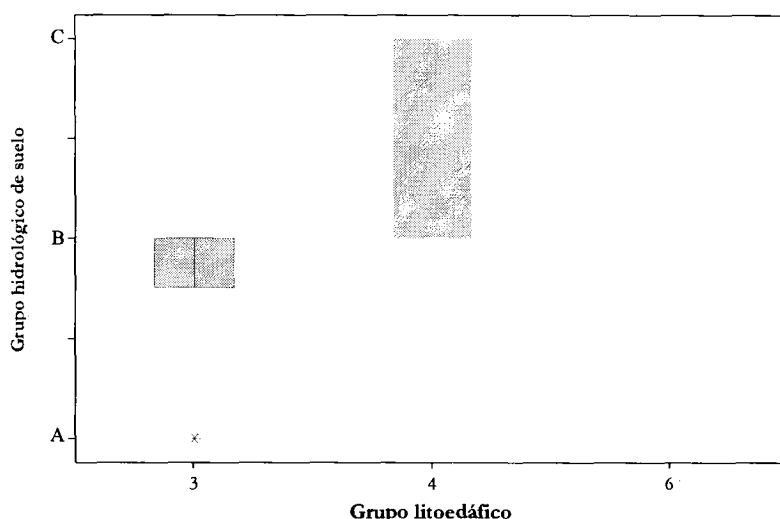


Figura 5.20: Gráfico de cajas que caracteriza los distintos grupos litoedáficos frente al grupo hidrológico de suelo para litofacies sin fuerte dependencia roca-suelo

Para la litofacies 9000 no se disponen de datos, puesto que en su mayor parte corresponden con las escombreras mineras asociadas a los yacimientos mineros de la faja pirítica, con una representación superficial prácticamente despreciable, por lo que se ha decidido asignar la moda de los grupos hidrológicos presentes en la cuenca

Tabla 5.40: Resultado de los grupos hidrológicos de suelo para la litofacies 9000

Litofacies	Grupo hidrológico de suelo
9000 - Sedimentos antrópicos	B

#### 5.3.4.2. Estimación del Índice de grupo hidrológico (I<sub>g</sub>)

Al igual que en el apartado anterior y siguiendo la misma sistemática ya descrita se ha cálculo el índice de grupo hidrológico de suelo (I<sub>g</sub>), estimado según la metodología descrita en el Epígrafe 4.1.1. Los resultados obtenidos son los que se resumen a continuación:

##### a) Estimación para las litofacies con fuerte dependencia roca-suelo

Se indican a continuación (Tabla 5.41) los valores de trabajo del índice de grupo (o grupo hidrológico de suelo continuo) para el perfil edáfico. En los casos en los que se han apreciado diferencias entre la media general y la del relieve accidentado se indican valores distintos.

Tabla 5.41: Valores medios del índice de grupo hidrológico de suelo por litofacies simplificadas y tipo de relieve

Litofacies simplificadas	Relieve	Ig
400 - Pizarras y tufitas moradas o vinosas	General Accidentado	2,58
500 - Lavas, aglomerados, brechas, tobas y tufitas ácidas	General Accidentado	2,83
1100 - Pizarras y algunas grauwacas con Posidonomia, Goniatites y Archaeocalamites	General Accidentado	2,44
1200 - Grauwacas y pizarras con Posidonomia, Goniatites y Archaeocalamites	General Accidentado	2,97
1300 - Pizarras, areniscas y cuarcitas	General Accidentado	3,01
1400 - Brechas, aglomerados, lavas, tobas y tufitas ácidas e intermedias	General Accidentado	2,55
1500 - Lavas, aglomerados, brechas, tobas y tufitas ácidas, a veces abigarradas	General Accidentado	3,01
1700 - Lavas y tobas básicas espilíticas	General Accidentado	3,61
1800 - Gabro-diabasas	General Accidentado	3,50
1900 - Conglomerados y arenas	General Accidentado	4,57
2000 - Pizarras, tufitas y tobas	General Accidentado	3,07
3150 - Conglomerados, gravas y arenas con ostras y calizas bioclásticas arenosas	General Accidentado	2,68
3900 - Margas, arenas y areniscas	General Accidentado	2,68

En la siguiente figura se puede apreciar el gráfico de cajas de la estimación de Ig en función de las litofacies simplificadas.

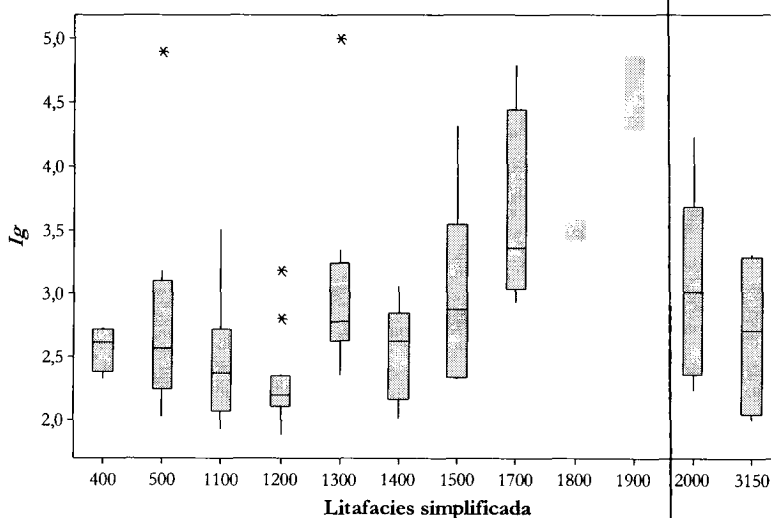


Figura 5.21: Gráfico de cajas que caracteriza las distintas litofacies simplificadas frente al índice de grupo de suelo para litofacies con fuerte dependencia roca-suelo

Para la litofacies 3100, sin dependencia clara entre la geología y el suelo, se indican los mismos valores en el siguiente punto.

**b) Estimación para las unidades sin fuerte dependencia roca-suelo**

Aplicando la metodología ya descrita a los grupos litoedáficos presentes en la cuenca se obtienen los resultados que se muestran a continuación.

Tabla 5.42: Resultado del índice de grupo hidrológico de suelo por unidades litoedáficas

Unidad litoedáfica	Grupo FAO	Clasificación FAO	LITOFACIES	Índice de grupo hidrológico (I <sub>g</sub> )
3- Luvisol	Luvisol	Luvisoles arénicos	Arenas y gravas versicolores Conglomerados, arenas y gravas rojas	1,19
4- Profundiluvicos	Luvisol	Luvisoles profundos con inclusiones de plintsoles y alisoles	Arenas blancas Arenas y gravas versicolores Conglomerados, arenas y gravas rojas	1,94
6- Arenosoles	Arenosol	Arenosol	Arenas y gravas versicolores	1,21

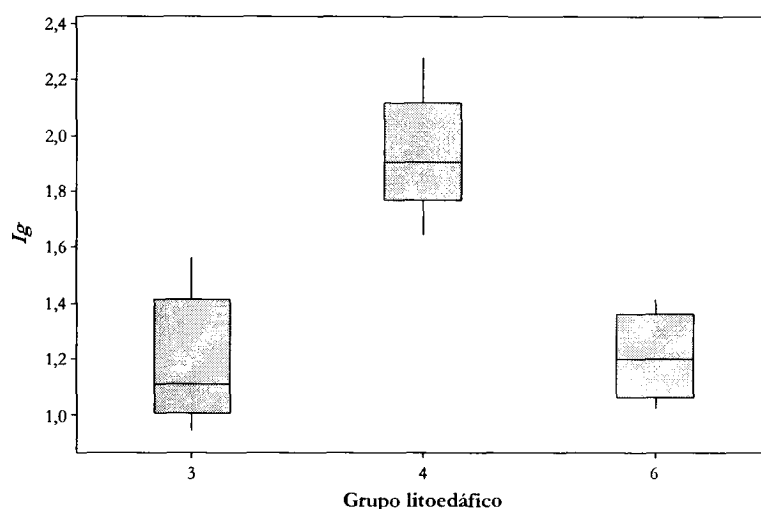


Figura 5.22: Gráfico de cajas que caracteriza los distintos grupos litoedáficos frente al índice de grupo hidrológico de suelo para litofacies sin fuerte dependencia roca-suelo

Para la litofacies 9000 no se disponen de datos, puesto que en su mayor parte corresponden con las escombreras mineras asociadas a los yacimientos mineros de la faja pirítica, con una representación superficial prácticamente despreciable, por lo que se ha decidido asignar la media de los grupos hidrológicos presentes en la cuenca

Tabla 5.43: Resultado del índice de grupo hidrológico de suelo para la litofacies 9000

Litofacies	Grupo hidrológico de suelo
9000 - Sedimentos antrópicos	2,75

**5.3.4.3. Estimación de la CRAM, CRAD, PMP**

**a) Estimación para las litofacies con fuerte dependencia roca-suelo**

Se indican a continuación (Tabla 5.44) los valores de trabajo de las variables edafológicas relativas a la capacidad hídrica del suelo y al punto de marchitez permanente. En los casos en los que se han apreciado diferencias entre la media general y la del relieve accidentado se indican valores distintos.

Tabla 5.44: Valores de CRAM, CRAD y PMP por litofacies simplificadas y tipo de relieve

Litofacies simplificadas	Relieve	CRAM (mm/m)	CRAD (mm/m)	PMP (mm/m)
400 - Pizarras y tufitas moradas o vinosas	General	83,00	47,25	35,75
	Accidentado	65,33	38,67	26,67
500 - Lavas, aglomerados, brechas, tobas y tufitas ácidas	General	163,40	84,60	78,80
	Accidentado			
1100 - Pizarras y algunas grauwacas con Posidonomia, Goniatites y Archaeocalamites	General	53,90	27,10	26,80
	Accidentado	43,78	22,44	21,33
1200 - Grauwacas y pizarras con Posidonomia, Goniatites y Archaeocalamites	General	56,90	30,17	26,75
	Accidentado			
1300 - Pizarras, areniscas y cuarcitas	General	127,60	65,20	62,40
	Accidentado	87,00	44,75	42,25
1400 - Brechas, aglomerados, lavas, tobas y tufitas ácidas e intermedias	General	102,60	59,25	43,38
	Accidentado			
1500 - Lavas, aglomerados, brechas, tobas y tufitas ácidas, a veces abigarradas	General	189,80	95,80	94,00
	Accidentado			
1700 - Lavas y tobas básicas espiliticas	General	176,80	77,75	99,00
	Accidentado			
1800 - Gabro-diabasas	General	193,50	91,00	102,50
	Accidentado	130,00	65,00	65,00
1900 - Conglomerados y arenas	General	399,00	158,00	241,00
	Accidentado			
2000 - Pizarras, tufitas y tobas	General	150,20	71,20	79,00
	Accidentado			
3150 - Conglomerados, gravas y arenas con ostras y calizas bioclásticas arenosas	General	168,80	79,00	89,80
	Accidentado	57,00	29,00	28,00
3900 - Margas, arenas y areniscas	General	227,80	115	112,8
	Accidentado			

En las siguientes figuras se pueden apreciar los gráficos de cajas de la estimación para las distintas variables tratadas en función de las litofacies simplificadas

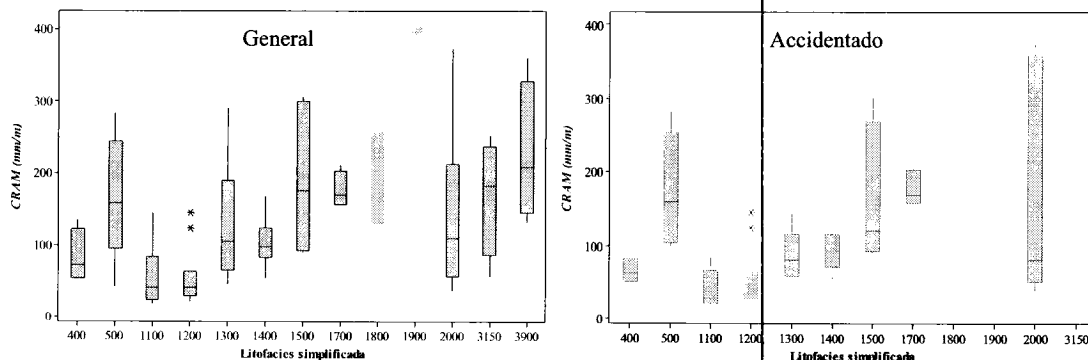


Figura 5.23: Gráfico de cajas que caracteriza las distintas litofacies simplificadas frente a la CRAM

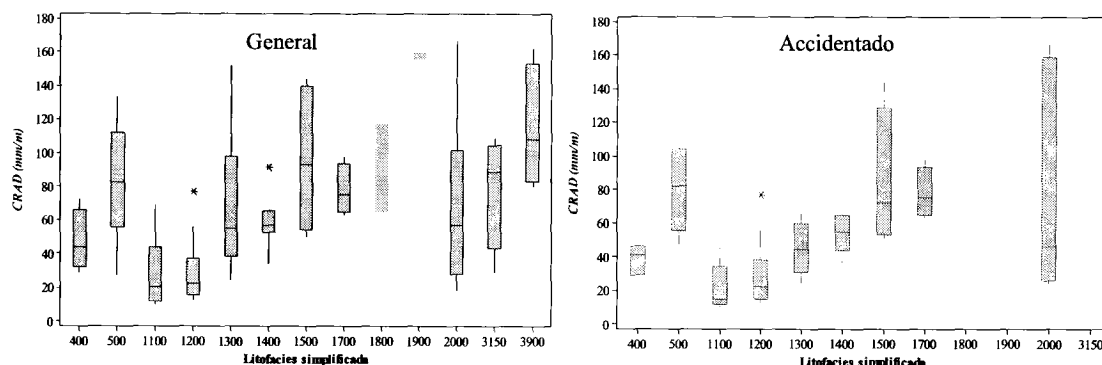


Figura 5.24: Gráfico de cajas que caracteriza las distintas litofacies simplificadas frente a la CRAD

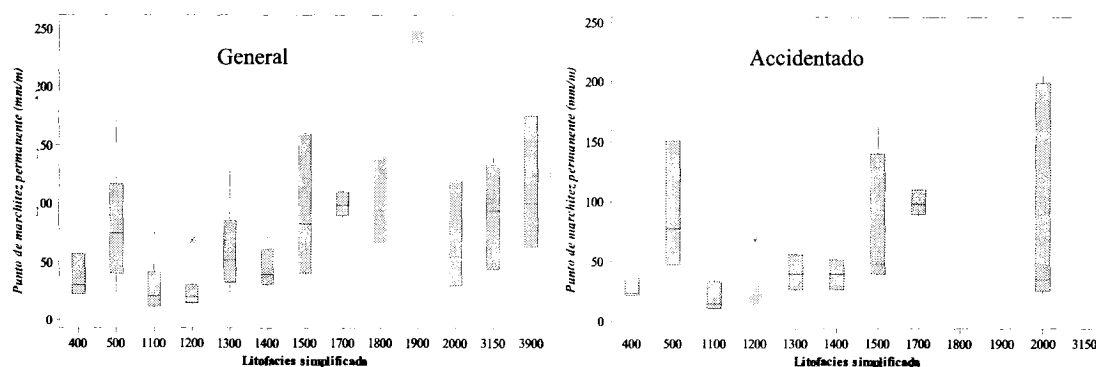


Figura 5.25: Gráfico de cajas que caracteriza las distintas litofacies simplificadas frente al PMP

Para la litofacies 3100, sin dependencia clara entre la geología y el suelo se indican los mismos valores en el siguiente punto.

**b) Estimación de la variables CRAM, CRAD y PMP para las unidades sin fuerte dependencia roca-suelo**

Los estadísticos que dan los autores citados (Domingo *et al.*, 2003) para cada tipo de unidad litoedáfica son:

Tabla 5.45: Resultado de la CRAM, CRAD y PMP por unidades litoedáficas

Variable	Unidad litoedáfica	Nº de datos	Estadísticos					
			Media	Error típico media	Desviación típica	Mínimo	Máximo	Rango
CRAM	3	6	233,3	27,3	66,9	171	360	189
	4	9	244,2	12,7	38,2	188	306	118
	6	4	234,5	67,4	134,7	98	398	300
CRAD	3	6	138,0	23,0	56,2	95	250	155
	4	9	118,7	5,9	17,6	90	140	50
	6	4	153,0	47,2	94,4	68	263	195
PMP	3	6	95,3	6,6	16,1	75	110	35
	4	9	125,6	7,8	23,3	96	169	75
	6	4	81,5	21,6	43,2	30	135	105

Para la litofacies 9000 no se disponen de datos, por lo que se ha decidido asignar las capacidades de retención y el punto de marchitez permanente correspondiente a la media ponderada del resto de las litofacies presentes en la cuenca.

Tabla 5.46: Resultado de la CRAM, CRAD y PMP para la litofacies 9000

Litofacies	CRAM	CRAD	PMP
9000 - Sedimentos antrópicos	105,65	53,84	51,81

#### 5.4. Estimación del estado antecedente de humedad en la cuenca del embalse de El Sancho

Antes de abordar este epígrafe hay que tener en cuenta que es necesario transformar los datos puntuales de precipitación diaria ofrecidos por cada una de la estaciones meteorológicas de la cuenca en datos distribuidos de precipitación, para así poder tener conocimiento del estado antecedente de humedad de cada uno de los puntos de la cuenca. Esta transformación se ha realizado mediante polígonos de Thiessen, asignando a cada estación un área de influencia dentro de la cuenca (Figura 5.26).

La asignación de las áreas de influencia de cada estación es constante para los tres métodos de estimación del estado antecedente de humedad expuestos a continuación.

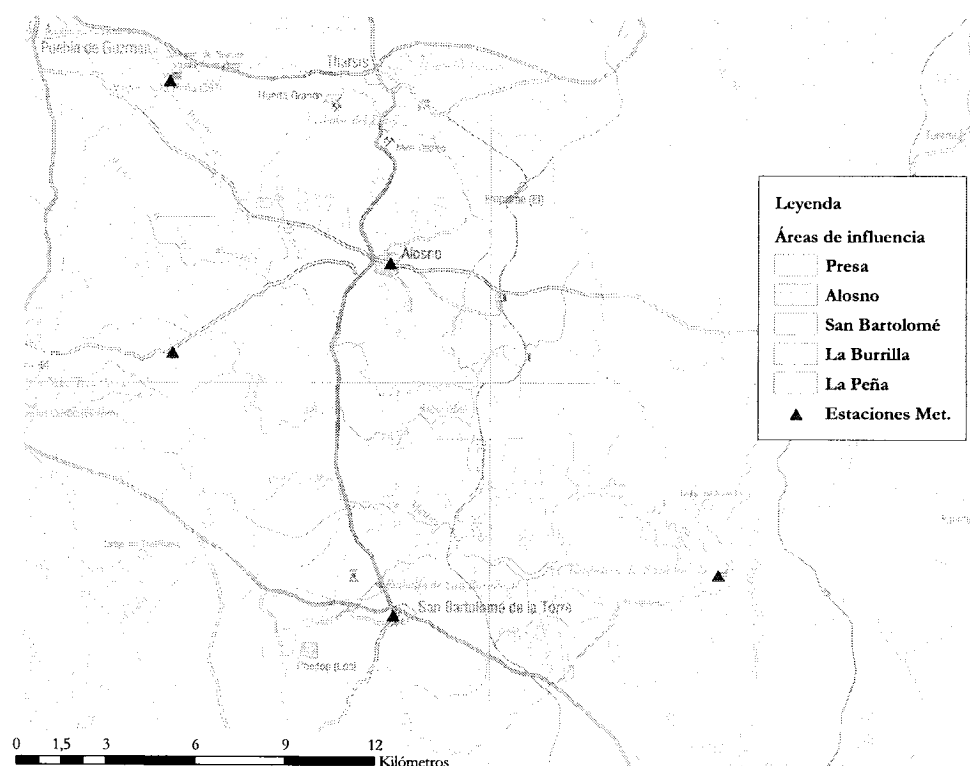


Figura 5.26: Áreas de influencia de las estaciones meteorológicas de la cuenca

### 5.4.1. Estimación de la condición antecedente de humedad

Dado que uno de los objetivos del presente trabajo es validar las mejoras propuestas al método del número de curva y valorarlas respecto a la concepción original, antes de estimar las condiciones de humedad de la cuenca para las distintas tormentas se ha determinado la condición antecedente de humedad a través de la metodología propuesta por el NRCS y que se expresó en el Epígrafe 2.2.5.

Para las distintas zonas de influencia de las estaciones meteorológicas y cada una de las tormentas seleccionadas para la validación, se ha calculado la precipitación acumulada en los cinco días previos a la tormenta, comparándose el valor obtenido con las indicaciones ofrecidas por el NRCS, según se indica en la Tabla 2.9.

Los resultados obtenidos son:

Tabla 5.47: Condición de humedad para cada una de las zonas de influencia y para los distintos eventos de precipitación estudiados

Evento	Área de influencia				
	Presa	Alosno	San Bartolomé	La Burrilla	La Peña
<i>Tormenta 1</i>	II	III	III	II	I
<i>Tormenta 2</i>	II	III	III	II	III
<i>Tormenta 3</i>	I	I	I	I	I
<i>Tormenta 4</i>	II	I	I	I	I
<i>Tormenta 5</i>	I	I	I	I	I
<i>Tormenta 6</i>	III	III	III	III	III
<i>Tormenta 7</i>	I	I	I	I	I
<i>Tormenta 8</i>	III	III	III	III	III

En la Tabla 5.47 se puede observar una gran homogeneidad del parámetro dentro de cada tormenta, presentando una mayor irregularidad para las tormentas 1 y 2. Así mismo, destacar la condición de humedad tan alta que presenta la cuenca para las tormentas 6 y 8.

### 5.4.2. Modelos propuestos para la estimación de la condición antecedente de humedad

Antes de poder aplicar a la cuenca del embalse de El Sancho las dos metodologías propuestas de estimación del estado antecedente de humedad, es necesario el cálculo del estado de la reserva de agua del suelo el día antes al evento tormentoso. Para ello, hay que aplicar a los datos meteorológicos de las distintas estaciones el balance diario desarrollado en el Epígrafe 4.2.2, en conjunción con la estimación de la *CRAM*, *CRAD* y *PMP* de los distintos suelos presentes en la cuenca (parámetros calculados en el Epígrafe 5.3.4.3).

#### 5.4.2.1. Cálculo de los balances hídricos diarios para las distintas zonas de influencia y diversas *CRAM*

Puesto que los episodios de lluvia utilizados en este trabajo abarcan un periodo de tiempo superior al año (desde el 1 de septiembre de 2002 hasta el 30 de mayo de 2004) es necesario conocer la evolución diaria de la reserva de agua en el suelo durante esos 638 días.

Para iniciar el cálculo es necesario conocer la reserva ( $R_t$ ) o, en su defecto, la pérdida potencial acumulada de agua ( $PPA_t$ ) del día 1 de septiembre. Aparentemente este día está próximo a la reserva mínima de agua de cualquier año, pues en dicho mes se inicia la

temporada de lluvias tras la sequía estival. Con el fin de poder conocer la situación de la reserva en ese instante, se ha calculado el balance hídrico mensual de Thornthwaite-Matter para el año 2003 con los datos de precipitación y evapotranspiración registrados por las estaciones meteorológicas para las distintas CRAM existentes en las áreas de influencia, estimadas mediante los polígonos de Thiessen, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 5.48: CRAM por áreas de influencia de las estaciones meteorológicas, en función de tipo de suelo

Litofacies simplificadas	CRAM (mm/m)				
	Presa	Alosno	San Bartolomé	La Burrilla	La Peña
1100 accidentado	43,78	43,78	-----	-----	-----
1200 gen./acc	56,90	56,90	56,90	56,90	-----
3150 accidentado	57,00	-----	57,00	-----	-----
400 accidentado	-----	65,33	65,33	65,33	65,33
400 general	-----	-----	83,00	-----	-----
1300 accidentado	-----	87,00	87,00	87,00	87,00
1400 gen./acc	-----	102,60	102,60	102,60	-----
900	-----	105,60	-----	-----	-----
1300 general	-----	127,60	127,60	127,60	127,60
1800 accidentado	-----	130,00	130,00	130,00	130,00
2000 general	-----	150,20	150,20	150,20	150,20
500 gen./acc	-----	163,40	163,40	163,40	-----
3150 general	168,80	-----	168,80	-----	-----
1700 gen./acc	-----	176,80	-----	176,80	-----
1500 gen./acc	-----	189,80	189,80	189,80	189,80
1800 general	-----	193,50	-----	193,50	-----
3900 gen./acc	-----	-----	227,80	-----	-----
3	-----	-----	233,30	-----	-----
6	-----	-----	234,50	-----	-----
4	244,20	-----	244,20	-----	-----
1900 gen./acc	399,00	399,00	399,00	399,00	-----

En la Tabla 5.49, Tabla 5.50, Figura 5.27 y Figura 5.28, se muestran dos ejemplos de balance mensual.

Tabla 5.49: Balance hídrico mensual del año 2003 para la estación de la Presa y CRAM de 43,78 mm/m (valores en mm)

Mes	P	ETP	ETP (corregida)	Superávits	Déficits	PPA	Reserva
Enero	41,7	57,0	39,9	1,8	0,0	0,0	43,8
Febrero	56,2	47,5	33,2	23,0	0,0	0,0	43,8
Marzo	133,3	98,3	68,8	64,5	0,0	0,0	43,8
Abril	104,0	110,6	77,4	26,6	0,0	0,0	43,8
Mayo	3,1	176,8	123,8	0,0	120,7	120,7	2,8
Junio	0,8	197,4	138,2	0,0	137,4	258,1	0,1
Julio	0,0	256,3	179,4	0,0	179,4	437,5	0,0
Agosto	0,0	212,9	149,1	0,0	149,1	586,6	0,0
Septiembre	12,8	174,6	122,2	0,0	109,4	696,0	0,0
Octubre	37,8	84,3	59,0	0,0	21,2	717,2	0,0
Noviembre	114,4	62,4	43,6	70,8	0,0	0,0	43,8
Diciembre	149,2	41,3	28,9	120,3	0,0	0,0	43,8

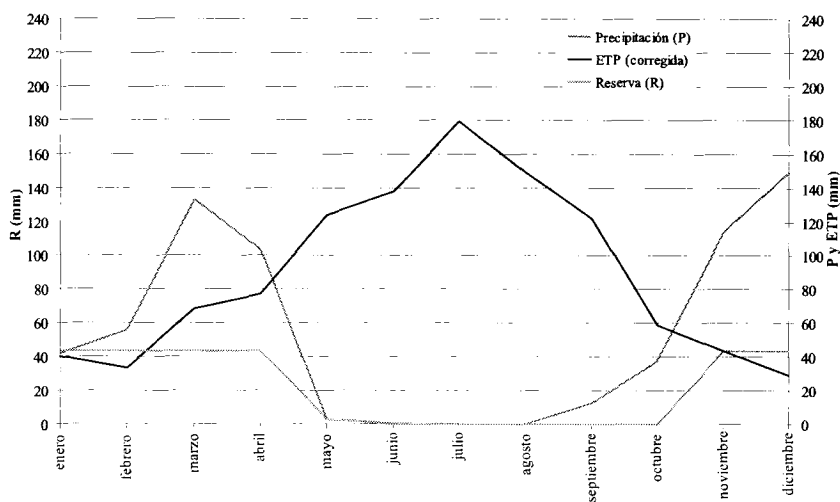


Figura 5.27: Balance hídrico mensual del año 2003 para la estación de la Presa y CRAM de 43,78 mm/m

Tabla 5.50: Balance hídrico mensual del año 2003 para la estación de la Presa y CRAM de 244,2mm/m (valores en mm)

Mes	P	ETP	ETP (corregida)	Superávits	Déficits	PPA	Reserva
Enero	41,7	57,0	39,9	1,8	0,0	0,0	205,8
Febrero	56,2	47,5	33,2	23,0	0,0	0,0	228,8
Marzo	133,3	98,3	68,8	64,5	0,0	0,0	244,2
Abril	104,0	110,6	77,4	26,6	0,0	0,0	244,2
Mayo	3,1	176,8	123,8	0,0	120,7	120,7	149,0
Junio	0,8	197,4	138,2	0,0	137,4	258,1	84,9
Julio	0,0	256,3	179,4	0,0	179,4	437,5	40,7
Agosto	0,0	212,9	149,1	0,0	149,1	586,6	22,1
Septiembre	12,8	174,6	122,2	0,0	109,4	696,0	14,1
Octubre	37,8	84,3	59,0	0,0	21,2	717,2	12,9
Noviembre	114,4	62,4	43,6	70,8	0,0	0,0	83,7
Diciembre	149,2	41,3	28,9	120,3	0,0	0,0	204,0

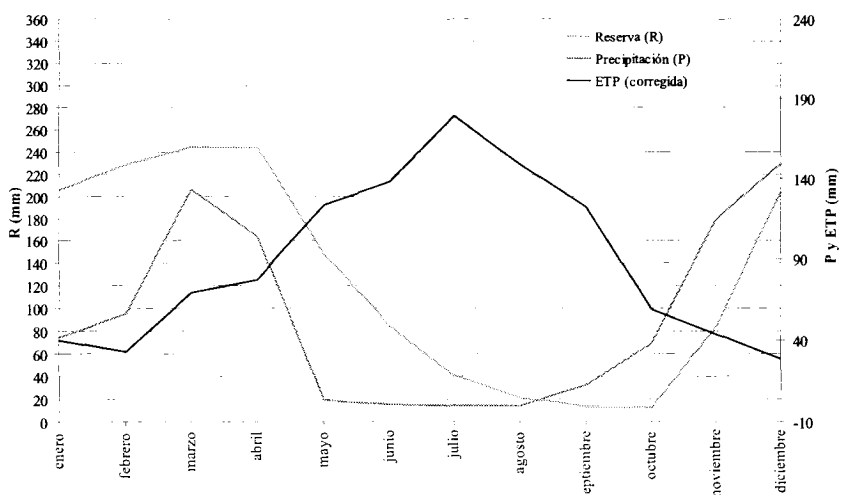


Figura 5.28: Balance hídrico mensual del año 2003 para la estación de la Presa y CRAM de 220,8

Para la estimación del balance hídrico se ha utilizado la evapotranspiración corregida a partir del dato ofrecido por la estación meteorológica, que corresponde a la lectura del tanque evaporímetro (valor del poder evaporante de la atmósfera). Para transformar este valor en tasas de evaporación se ha multiplicado por un coeficiente reductor (Maidment, 1992) que depende de la velocidad del viento, de la humedad relativa del aire y del tipo de tanque de evaporación usado, variando desde 0,4 hasta 0,8. En este caso se ha optado por usar un valor de 0,7, según las indicaciones que muestra la tabla Tabla 5.51.

Tabla 5.51: Coeficientes de reducción del poder evaporante de la atmósfera (Martínez de Azagra, 1996)

Tipo de Tanque	Coeficiente
Tanque sobre el suelo	0,7
Tanque enterrado (mod. Colorado)	0,8
Tanque flotante (mod. Colorado)	0,8

Las reservas de agua en el día 1 de octubre para las áreas de influencia de las estaciones meteorológicas, en función de las CRAM de las litofacies simplificadas, tras haber aplicado el balance hídrico mensual, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5.52: Reserva del día 1 de septiembre para las distintas estaciones en función de la CRAM

Litofacies simplificada	CRAM (mm/m)	Reserva de agua (mm/m)				
		Presa	Alosno	San Bartolomé	La Burrilla	La Peña
1100 accidentado	43,78	0,00	0,00	----	----	----
1200 gen./acc	56,90	0,00	0,00	0,00	0,00	----
3150 accidentado	57,00	0,00	0,00	0,00	----	----
400 accidentado	65,33	----	----	0,00	0,00	0,00
400 general	83,00	----	----	0,02	----	----
1300 accidentado	87,00	----	0,04	0,04	0,03	0,02
1400 gen./acc	102,60	----	0,15	0,14	0,11	----
900	105,60	----	0,19	----	----	----
1300 general	127,60	----	0,67	0,64	0,51	0,43
1800 accidentado	130,00	----	0,75	0,72	0,58	0,49
2000 general	150,20	----	1,74	1,67	1,38	1,20
500 gen./acc	163,40	----	2,79	2,62	2,20	----
3150 general	168,80	2,73	----	3,08	----	----
1700 gen./acc	176,80	----	4,01	----	3,30	----
1500 gen./acc	189,80	----	5,58	5,40	4,65	4,15
1800 general	193,50	----	6,09	----	5,08	----
3900 gen./acc	227,80	----	----	11,74	----	----
3	233,30	----	----	12,90	----	----
6	234,50	----	----	13,15	----	----
4	244,20	14,13	----	15,36	----	----
1900 gen./acc	399,00	69,73	74,56	74,41	68,33	----

Conocida la precipitación diaria, la evapotranspiración corregida diaria, la CRAM y la reserva inicial, se han aplicado las fórmulas del Epígrafe 4.2.2 obteniéndose los balances hídricos diarios que se muestran en el Anejo V, que permiten estimar el estado de la reserva a nivel diario (en mm/m de agua), calculándose los valores que aparecen en la Tabla 5.53.

Tabla 5.53: Estado de la reserva de agua del suelo previa a las tormentas (mm/m)

Estación	R máx	Reserva del día (mm)							
	mm/m	16/12/2002	24/2/2003	27/3/2003	22/4/2003	5/12/2003	8/12/2003	20/2/2004	23/2/2004
Presa	43,78	42,59	41,27	16,45	40,84	37,38	43,78	12,04	43,78
	56,90	55,71	53,76	25,90	53,94	50,34	56,90	20,31	56,90
	57,00	55,81	53,85	25,97	54,04	50,44	57,00	20,37	57,00
	168,80	133,22	159,86	126,62	165,78	161,86	168,80	116,48	168,80
	244,20	146,18	234,16	199,77	241,18	200,80	244,20	188,55	241,32
	399,00	319,68	303,57	395,97	254,61	301,56	286,34	339,10	339,10
Alosno	43,78	42,88	43,34	17,68	40,79	40,02	43,78	20,21	43,78
	56,90	56,00	56,46	27,07	53,81	53,02	56,90	30,19	56,90
	65,33	64,43	64,89	33,65	62,19	61,39	65,33	37,04	65,33
	87,00	86,10	86,56	51,80	82,92	82,97	87,00	55,67	87,00
	102,60	101,70	102,16	65,60	97,59	98,52	102,60	69,69	102,60
	105,60	104,70	105,16	68,30	100,44	101,52	105,60	72,43	105,60
	127,60	112,01	127,16	88,48	121,49	123,48	127,60	92,82	127,60
	130,00	112,38	129,56	90,71	123,81	125,87	130,00	95,07	130,00
	150,20	115,35	149,62	109,69	143,37	146,05	150,20	114,18	150,20
	163,40	117,24	162,48	122,23	156,23	159,23	163,40	126,79	163,40
	176,80	119,21	175,59	135,05	169,33	172,62	176,80	139,67	176,80
	189,80	121,23	188,34	147,56	182,08	185,61	189,80	152,23	189,80
193,50	121,84	191,97	151,13	185,71	189,31	193,50	155,82	193,50	
399,00	184,60	327,84	348,39	387,00	282,98	332,63	336,45	378,62	
San Bartolomé	56,90	55,80	56,46	28,09	53,94	53,99	56,90	23,41	56,90
	57,00	55,90	56,56	28,16	54,04	54,09	57,00	23,48	57,00
	65,33	55,90	56,56	28,16	54,04	54,09	57,00	23,48	57,00
	83,00	81,90	81,32	49,57	78,33	79,96	83,00	43,95	83,00
	87,00	85,90	85,02	53,06	82,02	83,95	87,00	47,32	87,00
	102,60	95,00	99,63	66,94	96,61	99,51	102,60	60,83	102,60
	127,60	98,39	123,49	89,92	120,42	124,46	127,60	83,35	127,32
	130,00	98,68	125,80	92,16	122,72	126,86	130,00	85,55	129,52
	150,20	101,04	145,35	111,20	142,24	147,04	150,20	104,31	148,28
	163,40	102,60	158,21	123,77	155,07	160,22	163,40	116,73	160,70
	168,80	103,26	163,49	128,94	160,33	165,62	168,80	121,85	165,82
	189,80	106,03	184,06	149,15	180,87	186,60	189,80	141,87	185,84
	227,80	112,24	221,48	186,06	218,23	224,58	227,80	178,51	222,48
	233,30	113,30	226,91	191,43	223,65	230,08	233,30	183,85	227,81
234,50	113,53	228,10	192,60	224,84	231,28	234,50	185,01	228,98	
244,20	115,52	234,73	202,09	234,41	240,97	244,20	194,44	238,41	
399,00	166,55	297,95	326,85	375,79	317,10	358,35	339,72	383,69	
La Burrilla	56,90	55,51	54,06	29,21	45,42	52,61	56,90	23,99	56,90
	65,33	63,94	61,30	35,89	51,46	60,99	65,33	30,44	65,33
	87,00	83,29	80,77	54,22	68,12	82,57	87,00	48,35	87,00
	102,60	85,87	95,27	68,10	80,90	98,12	102,60	62,02	102,60
	127,60	89,02	119,00	91,09	102,34	123,07	127,60	84,75	127,32
	130,00	89,28	121,30	93,33	104,45	125,47	130,00	86,97	129,54
	150,20	91,43	140,78	112,36	122,47	145,64	150,20	105,86	148,43
	163,40	92,82	153,59	124,93	134,46	158,83	163,40	118,35	160,92
	176,80	94,30	166,65	137,78	146,78	171,32	176,80	131,13	173,70
	189,80	95,86	179,37	150,31	158,85	174,06	189,80	143,60	186,17
	193,50	96,34	182,99	153,88	162,30	174,84	193,50	147,16	189,73
	399,00	151,97	268,17	267,61	282,25	232,28	273,33	267,66	310,22

Estación	R máx mm/m	Reserva del día (mm)							
		16/12/2002	24/2/2003	27/3/2003	22/4/2003	5/12/2003	8/12/2003	20/2/2004	23/2/2004
La Peña	65,33	61,31	65,19	29,86	37,46	60,10	65,33	35,11	63,38
	87,00	65,93	86,86	47,77	52,58	81,68	87,00	53,88	82,15
	127,60	71,07	127,46	84,21	84,98	122,20	127,60	91,28	119,55
	130,00	71,30	129,86	86,43	87,01	124,60	130,00	93,55	121,82
	150,20	73,22	150,06	105,33	104,44	144,77	150,20	112,75	141,02
	189,80	77,23	189,76	143,21	140,06	184,44	189,90	151,05	179,31

Conocido el estado de la reserva de agua del suelo el día previo al evento tormentoso estudiado, se pueden aplicar las metodologías descritas para el cálculo del estado antecedente de humedad (AMC).

#### 5.4.2.2. Modelo de estimación de AMC según el porcentaje de saturación de la reserva de agua en el suelo (%R)

Transformando la reserva estimada en la Tabla 5.53 en porcentaje respecto a la reserva total se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 5.54: Porcentaje de la reserva de agua del suelo respecto a la reserva máxima en el día previo a las tormentas

Estación	R máx mm/m	% de reserva respecto a la máxima							
		16/12/2002	24/2/2003	27/3/2003	22/4/2003	5/12/2003	8/12/2003	20/2/2004	23/2/2004
Presa	43,78	97,28	94,27	37,57	93,29	85,39	100,00	27,49	100,00
	56,90	97,90	94,48	45,51	94,79	88,47	100,00	35,69	100,00
	57,00	97,90	94,47	45,56	94,80	88,49	100,00	35,74	100,00
	168,80	78,92	94,71	75,01	98,21	95,89	100,00	69,01	100,00
	244,20	59,86	95,89	81,81	98,76	82,23	100,00	77,21	98,82
	399,00	80,12	76,08	99,24	63,81	75,58	71,76	84,99	84,99
Alosno	43,78	97,95	98,99	40,37	93,18	91,42	100,00	46,17	100,00
	56,90	98,42	99,22	47,58	94,56	93,17	100,00	53,07	100,00
	65,33	98,62	99,32	51,51	95,19	93,97	100,00	56,70	100,00
	87,00	98,96	99,49	59,54	95,31	95,36	100,00	63,99	100,00
	102,60	99,12	99,57	63,94	95,12	96,03	100,00	67,93	100,00
	105,60	99,14	99,58	64,68	95,11	96,13	100,00	68,59	100,00
	127,60	87,78	99,65	69,34	95,21	96,77	100,00	72,74	100,00
	130,00	86,45	99,66	69,78	95,24	96,82	100,00	73,13	100,00
	150,20	76,80	99,61	73,03	95,45	97,23	100,00	76,02	100,00
	163,40	71,75	99,44	74,80	95,61	97,45	100,00	77,60	100,00
	176,80	67,43	99,31	76,38	95,77	97,64	100,00	79,00	100,00
	189,80	63,88	99,23	77,74	95,93	97,79	100,00	80,21	100,00
	193,50	62,96	99,21	78,10	95,97	97,83	100,00	80,53	100,00
399,00	46,27	82,16	87,32	96,99	70,92	83,37	84,32	94,89	
San Bartolomé	56,90	98,07	99,22	49,36	94,79	94,89	100,00	41,13	100,00
	57,00	98,08	99,22	49,41	94,80	94,90	100,00	41,19	100,00
	65,33	85,57	86,57	43,11	82,71	82,80	87,25	35,94	87,25
	83,00	98,67	97,98	59,73	94,37	96,34	100,00	52,95	100,00
	87,00	98,74	97,72	60,98	94,28	96,50	100,00	54,39	100,00
	102,60	92,59	97,10	65,24	94,16	96,99	100,00	59,28	100,00

Estación	<i>R</i> máx mm/m	% de reserva respecto a la máxima							
		16/12/2002	24/2/2003	27/3/2003	22/4/2003	5/12/2003	8/12/2003	20/2/2004	23/2/2004
	127,60	77,11	96,78	70,47	94,37	97,54	100,00	65,32	99,78
	130,00	75,91	96,77	70,89	94,40	97,59	100,00	65,81	99,63
	150,20	67,27	96,77	74,03	94,70	97,89	100,00	69,45	98,72
	163,40	62,79	96,83	75,75	94,90	98,06	100,00	71,44	98,35
	168,80	61,17	96,85	76,39	94,98	98,11	100,00	72,18	98,23
	189,80	55,86	96,98	78,58	95,29	98,31	100,00	74,75	97,91
	227,80	49,27	97,23	81,68	95,80	98,59	100,00	78,36	97,66
	233,30	48,56	97,26	82,05	95,86	98,62	100,00	78,80	97,65
	234,50	48,41	97,27	82,13	95,88	98,63	100,00	78,90	97,65
	244,20	47,31	96,12	82,76	95,99	98,68	100,00	79,62	97,63
	399,00	41,74	74,67	81,92	94,18	79,47	89,81	85,14	96,16
	56,90	97,56	95,01	51,34	79,82	92,47	100,00	42,15	100,00
	65,33	97,87	93,83	54,93	78,78	93,36	100,00	46,59	100,00
	87,00	95,73	92,84	62,32	78,30	94,90	100,00	55,58	100,00
	102,60	83,69	92,86	66,38	78,85	95,64	100,00	60,45	100,00
	127,60	69,76	93,26	71,38	80,21	96,45	100,00	66,42	99,78
La Burrilla	130,00	68,68	93,31	71,79	80,35	96,52	100,00	66,90	99,65
	150,20	60,87	93,73	74,81	81,54	96,97	100,00	70,48	98,82
	163,40	56,80	94,00	76,46	82,29	97,20	100,00	72,43	98,48
	176,80	53,34	94,26	77,93	83,02	96,90	100,00	74,17	98,24
	189,80	50,51	94,50	79,19	83,69	91,70	100,00	75,66	98,09
	193,50	49,79	94,57	79,53	83,87	90,36	100,00	76,05	98,05
	399,00	38,09	67,21	67,07	70,74	58,22	68,50	67,08	77,75
	65,33	93,85	99,78	45,70	57,34	91,99	100,00	53,74	97,01
	87,00	75,78	99,83	54,91	60,43	93,89	100,00	61,93	94,43
La Peña	127,60	55,70	99,89	65,99	66,60	95,77	100,00	71,54	93,69
	130,00	54,85	99,89	66,48	66,93	95,85	100,00	71,96	93,70
	150,20	48,75	99,90	70,13	69,53	96,39	100,00	75,07	93,89
	189,80	40,69	99,98	75,45	73,79	97,18	100,00	79,58	94,48

Analizando los resultados podemos destacar que, para una misma zona de influencia, el contenido de agua en el suelo varía considerablemente para la misma fecha. Así, suelos con capacidades de retención de agua bajas se desecan y saturan rápidamente, mientras que los suelos con *CRAM* altas poseen una inercia mucho mayor para la variación relativa de la reserva.

Aplicando la metodología de cálculo que permite transformar el porcentaje de la reserva en el índice de humedad (*IH*), expuesta en el ya mencionado Epígrafe 4.2.4.1, se obtiene dicho índice, cuyos valores se muestran a continuación:

Tabla 5.55: Índice de humedad para las tormentas estudiadas y los distintos suelos de la cuenca

Estación	R máx mm/m	Índice de humedad							
		16/12/2002	24/2/2003	27/3/2003	22/4/2003	5/12/2003	8/12/2003	20/2/2004	23/2/2004
Presa	43,78	2,95	2,89	1,75	2,87	2,71	3,00	1,55	3,00
	56,90	2,96	2,89	1,91	2,90	2,77	3,00	1,71	3,00
	57,00	2,96	2,89	1,91	2,90	2,77	3,00	1,71	3,00
	168,80	2,58	2,89	2,50	2,96	2,92	3,00	2,38	3,00
	244,20	2,20	2,92	2,64	2,98	2,64	3,00	2,54	2,98
	399,00	2,60	2,52	2,98	2,28	2,51	2,44	2,70	2,70
Alosno	43,78	2,96	2,98	1,81	2,86	2,83	3,00	1,92	3,00
	56,90	2,97	2,98	1,95	2,89	2,86	3,00	2,06	3,00
	65,33	2,97	2,99	2,03	2,90	2,88	3,00	2,13	3,00
	87,00	2,98	2,99	2,19	2,91	2,91	3,00	2,28	3,00
	102,60	2,98	2,99	2,28	2,90	2,92	3,00	2,36	3,00
	105,60	2,98	2,99	2,29	2,90	2,92	3,00	2,37	3,00
	127,60	2,76	2,99	2,39	2,90	2,94	3,00	2,45	3,00
	130,00	2,73	2,99	2,40	2,90	2,94	3,00	2,46	3,00
	150,20	2,54	2,99	2,46	2,91	2,94	3,00	2,52	3,00
	163,40	2,43	2,99	2,50	2,91	2,95	3,00	2,55	3,00
	176,80	2,35	2,99	2,53	2,92	2,95	3,00	2,58	3,00
	189,80	2,28	2,98	2,55	2,92	2,96	3,00	2,60	3,00
193,50	2,26	2,98	2,56	2,92	2,96	3,00	2,61	3,00	
399,00	1,93	2,64	2,75	2,94	2,42	2,67	2,69	2,90	
San Bartolomé	56,90	2,96	2,98	1,99	2,90	2,90	3,00	1,82	3,00
	57,00	2,96	2,98	1,99	2,90	2,90	3,00	1,82	3,00
	65,33	2,71	2,73	1,86	2,65	2,66	2,74	1,72	2,74
	83,00	2,97	2,96	2,19	2,89	2,93	3,00	2,06	3,00
	87,00	2,97	2,95	2,22	2,89	2,93	3,00	2,09	3,00
	102,60	2,85	2,94	2,30	2,88	2,94	3,00	2,19	3,00
	127,60	2,54	2,94	2,41	2,89	2,95	3,00	2,31	3,00
	130,00	2,52	2,94	2,42	2,89	2,95	3,00	2,32	2,99
	150,20	2,35	2,94	2,48	2,89	2,96	3,00	2,39	2,97
	163,40	2,26	2,94	2,51	2,90	2,96	3,00	2,43	2,97
	168,80	2,22	2,94	2,53	2,90	2,96	3,00	2,44	2,96
	189,80	2,12	2,94	2,57	2,91	2,97	3,00	2,49	2,96
	227,80	1,99	2,94	2,63	2,92	2,97	3,00	2,57	2,95
	233,30	1,97	2,95	2,64	2,92	2,97	3,00	2,58	2,95
234,50	1,97	2,95	2,64	2,92	2,97	3,00	2,58	2,95	
244,20	1,95	2,92	2,66	2,92	2,97	3,00	2,59	2,95	
399,00	1,83	2,49	2,64	2,88	2,59	2,80	2,70	2,92	
La Burrilla	56,90	2,95	2,90	2,03	2,60	2,85	3,00	1,84	3,00
	65,33	2,96	2,88	2,10	2,58	2,87	3,00	1,93	3,00
	87,00	2,91	2,86	2,25	2,57	2,90	3,00	2,11	3,00
	102,60	2,67	2,86	2,33	2,58	2,91	3,00	2,21	3,00
	127,60	2,40	2,87	2,43	2,60	2,93	3,00	2,33	3,00
	130,00	2,37	2,87	2,44	2,61	2,93	3,00	2,34	2,99
	150,20	2,22	2,87	2,50	2,63	2,94	3,00	2,41	2,98

Estación	<i>R</i> máx mm/m	Índice de humedad							
		16/12/2002	24/2/2003	27/3/2003	22/4/2003	5/12/2003	8/12/2003	20/2/2004	23/2/2004
	163,40	2,14	2,88	2,53	2,65	2,94	3,00	2,45	2,97
	176,80	2,07	2,89	2,56	2,66	2,94	3,00	2,48	2,96
	189,80	2,01	2,89	2,58	2,67	2,83	3,00	2,51	2,96
	193,50	2,00	2,89	2,59	2,68	2,81	3,00	2,52	2,96
	399,00	1,76	2,34	2,34	2,41	2,16	2,37	2,34	2,56
	65,33	2,88	3,00	1,91	2,15	2,84	3,00	2,07	2,94
	87,00	2,52	3,00	2,10	2,21	2,88	3,00	2,24	2,89
La Peña	127,60	2,11	3,00	2,32	2,33	2,92	3,00	2,43	2,87
	130,00	2,10	3,00	2,33	2,34	2,92	3,00	2,44	2,87
	150,20	1,97	3,00	2,40	2,39	2,93	3,00	2,50	2,88
	189,80	1,81	3,00	2,51	2,48	2,94	3,00	2,59	2,89

Analizando la Tabla 5.55 se puede observar que la primera tormenta presenta una variación muy grande del índice de humedad, mientras que el resto de tormentas muestran una variación baja de este parámetro. También hay que destacar que aquellas zonas que presentan valores bajos de la reserva máxima (*R*máx) ofrecen variaciones relativamente bajas del índice de humedad para las diferentes tormentas, mientras que aquellos suelos con valores altos de la reserva presentan oscilaciones más altas del parámetro.

#### 5.4.2.3. Modelo de estimación de AMC basado en el contenido de agua en el suelo (*I<sub>eh</sub>*)

Aplicando la metodología de cálculo del índice de estado antecedente de humedad (*I<sub>eh</sub>*) a las reservas de agua que se muestran en la Tabla 5.53, se obtienen los distintos estados antecedentes de humedad del suelo para el día previo a cada una de las tormentas estudiadas, como se muestra a continuación:

Tabla 5.56: Valores del índice de estado antecedente de humedad el día antes del evento estudiado

Estación	<i>R</i> máx mm/m	Índice de estado antecedente de humedad							
		16/12/2002	24/2/2003	27/3/2003	22/4/2003	5/12/2003	8/12/2003	20/2/2004	23/2/2004
	43,78	2,89	2,78	1,00	2,74	2,43	3,00	1,00	3,00
	56,90	2,92	2,79	1,00	2,80	2,56	3,00	1,00	3,00
Presa	57,00	2,92	2,78	1,00	2,80	2,55	3,00	1,00	3,00
	168,80	2,10	2,77	1,93	2,92	2,82	3,00	1,68	3,00
	244,20	1,35	2,83	2,25	2,95	2,27	3,00	2,06	2,95
	399,00	2,22	2,06	2,97	1,57	2,04	1,89	2,41	2,41
Alosno	43,78	2,92	2,96	1,00	2,73	2,67	3,00	1,00	3,00
	56,90	2,94	2,97	1,02	2,79	2,74	3,00	1,23	3,00
	65,33	2,95	2,98	1,36	2,84	2,80	3,00	1,54	3,00
	87,00	2,96	2,98	1,43	2,82	2,82	3,00	1,60	3,00
	102,60	2,97	2,99	1,75	2,83	2,86	3,00	1,89	3,00
	105,60	2,97	2,98	1,61	2,81	2,85	3,00	1,77	3,00
	127,60	2,52	2,99	1,80	2,81	2,87	3,00	1,93	3,00
	130,00	2,46	2,99	1,79	2,81	2,87	3,00	1,93	3,00
	150,20	2,02	2,98	1,86	2,81	2,88	3,00	1,99	3,00
	163,40	1,91	2,98	2,03	2,83	2,90	3,00	2,13	3,00
	176,80	1,52	2,97	1,93	2,81	2,89	3,00	2,05	3,00
	189,80	1,57	2,97	2,12	2,84	2,91	3,00	2,22	3,00

Estación	R máx mm/m	Índice de estado antecedente de humedad							
		16/12/2002	24/2/2003	27/3/2003	22/4/2003	5/12/2003	8/12/2003	20/2/2004	23/2/2004
	193,50	1,42	2,97	2,07	2,83	2,91	3,00	2,17	3,00
	399,00	1,00	2,10	2,36	2,85	1,53	2,16	2,21	2,74
	56,90	2,93	2,97	1,09	2,80	2,81	3,00	1,00	3,00
	57,00	2,92	2,97	1,01	2,80	2,80	3,00	1,00	3,00
	65,33	2,51	2,55	1,08	2,42	2,42	2,57	1,00	2,57
	83,00	2,95	2,93	1,59	2,80	2,87	3,00	1,00	3,00
	87,00	2,95	2,91	1,48	2,78	2,86	3,00	1,23	3,00
	102,60	2,74	2,90	1,80	2,80	2,90	3,00	1,59	3,00
	127,60	2,10	2,87	1,84	2,78	2,90	3,00	1,64	2,99
	130,00	2,04	2,87	1,84	2,78	2,90	3,00	1,63	2,99
San Bartolomé	150,20	1,62	2,86	1,90	2,78	2,91	3,00	1,71	2,95
	163,40	1,56	2,88	2,06	2,80	2,92	3,00	1,90	2,94
	168,80	1,34	2,87	1,99	2,79	2,92	3,00	1,81	2,92
	189,80	1,25	2,88	2,15	2,81	2,93	3,00	2,00	2,92
	227,80	1,00	2,89	2,27	2,83	2,94	3,00	2,14	2,91
	233,30	1,26	2,91	2,39	2,86	2,95	3,00	2,28	2,92
	234,50	1,42	2,92	2,45	2,87	2,96	3,00	2,35	2,93
	244,20	1,00	2,84	2,29	2,83	2,95	3,00	2,16	2,90
	399,00	1,00	1,72	2,09	2,71	1,96	2,49	2,25	2,81
	56,90	2,91	2,81	1,16	2,24	2,72	3,00	1,00	3,00
	65,33	2,93	2,79	1,48	2,28	2,78	3,00	1,19	3,00
	87,00	2,83	2,72	1,53	2,16	2,80	3,00	1,27	3,00
	102,60	2,43	2,75	1,83	2,27	2,85	3,00	1,63	3,00
	127,60	1,82	2,74	1,88	2,23	2,86	3,00	1,69	2,99
	130,00	1,75	2,73	1,87	2,21	2,86	3,00	1,68	2,99
La Burrilla	150,20	1,35	2,74	1,94	2,22	2,87	3,00	1,75	2,95
	163,40	1,33	2,77	2,09	2,32	2,89	3,00	1,94	2,94
	176,80	1,00	2,74	2,00	2,23	2,86	3,00	1,83	2,92
	189,80	1,04	2,78	2,18	2,35	2,67	3,00	2,04	2,92
	193,50	1,00	2,77	2,13	2,31	2,59	3,00	1,98	2,92
	399,00	1,00	1,34	1,34	1,52	0,89	1,41	1,34	1,88
	65,33	2,79	2,99	1,16	1,56	2,73	3,00	1,44	2,90
	87,00	2,06	2,99	1,25	1,46	2,76	3,00	1,52	2,78
La Peña	127,60	1,27	3,00	1,67	1,69	2,83	3,00	1,89	2,75
	130,00	1,19	3,00	1,66	1,68	2,83	3,00	1,88	2,75
	150,20	1,00	3,00	1,74	1,71	2,85	3,00	1,95	2,74
	189,80	1,00	3,00	2,03	1,96	2,89	3,00	2,19	2,78

Se puede observar que, para las dos primeras tormentas estudiadas, la variabilidad del índice es muy alta, existiendo suelos en los tres estados, mientras que, para el resto de los eventos, el índice nos indica una variación entre dos estados de humedad del suelo.

## **5.5. ESTIMACIÓN DE LOS USOS DEL SUELO PARA EL MODELO DEL NÚMERO DE CURVA**

Durante los años 70 y en la primera mitad de la década de los 80, la valoración de los distintos usos del suelo que existen sobre un territorio determinado se realizaba sobre los mapas de cultivos y aprovechamientos a escala 1:50.000, 1:200.000 y 1:1.000.000, publicados por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA). Esta cartografía temática ha quedado obsoleta, al sufrir el territorio nacional una fuerte dinámica de transformaciones, cambios y apariciones de nuevos usos.

En la actualidad este problema queda solventado a través de las técnicas de teledetección, gracias a las cuales la información capturada por las distintas plataformas satelitales es trasformada en datos de coberturas vegetales y de usos del suelo, información que puede ser empleada para la determinación del número de curva.

Las técnicas de teledetección son la base de trabajo para la confección del “Mapa de usos y coberturas vegetales de Andalucía”, que constituye la fuente cartográfica utilizada en el presente trabajo para la asignación de usos del suelo.

La información disponible sobre usos del suelo presenta el problema de adaptar las nomenclaturas a los tipos de usos descritos por el SCS, por lo que en el presente capítulo se pretende hacer una adaptación lo más ajustada posible entre las dos clasificaciones. Para ello es preciso conocer los criterios con los que se han elaborado y la información que contienen.

### **5.5.1. Fuente cartográfica para la determinación de los usos del suelo**

#### ***5.5.1.1. Breve evolución histórica de la cartografía de usos del suelo en Andalucía***

La región andaluza es una de las zonas del Estado Español donde se suceden de forma más rápida los cambios de uso del suelo, a causa de la intensa actividad económica existente. La Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía lleva a cabo un programa de control y seguimiento de los usos del suelo en el cual se plasma, en forma de cartografía digital, la evolución temporal de los mismos.

Los antecedentes más próximos a este programa de control y seguimiento de los usos del suelo se encuentran en el ya citado mapa de cultivos y aprovechamientos publicado por el MAPA en torno al año 1976 a una escala 1:50.000. Con posterioridad, en el año 1987, el programa *CORINE Land Cover* de la Comunidad Europea genera, a escala 1:100.000, un mapa para el sur de España gracias a la interpretación de ortoimágenes satelitales Landsat-TM.

Con estos dos documentos como referencia se ha realizado una actualización de la información cada cuatro años, lo que ha originado la creación de mapas vectoriales (formato ARC/INFO) de las coberturas vegetales y de los usos del suelo en los años 1991, 1996 y 1999, siendo este último el más interesante para el presente trabajo, por la proximidad temporal a los eventos tormentosos estudiados.

#### ***5.5.1.2. Descripción de la cartografía de usos y coberturas vegetales de 1999***

El mapa de usos y coberturas vegetales de Andalucía constituye una adaptación de la metodología *CORINE* y sus principales características son (Junta de Andalucía, 1999):

- Elaboración por fotointerpretación de ortoimágenes producto de la fusión de datos *Landsat-TM* (30 metros de resolución espacial y 7 bandas espectrales) e *IRS-Pan* (*Indian Remote Sensing*) (5 metros de resolución espacial y una sola banda espectral pancromática), a escala 1:50.000.
- Las fechas de adquisición de las imágenes corresponden al verano de 1999 en el caso de *Landsat-TM* y al verano de 1998 en las del *IRS-Pan*. Igualmente se utilizó como documento de apoyo a la fotointerpretación de las imágenes el vuelo fotogramétrico en color a escala 1:60.000 de 1999 de Andalucía (ampliado a escala 1:30.000).
- La leyenda del mapa de usos y coberturas vegetales de Andalucía se basa en las 44 clases del proyecto *CORINE*, pero las desarrolla hasta llegar a 166, al incluir las diferentes estructuras que puede presentar el tapiz vegetal (arbórea, arbustiva, herbácea) y sus asociaciones, junto a criterios de densidades de las diferentes estructuras presentes.
- La leyenda se organiza en distintos niveles jerárquicos de información, de tal forma que en el nivel I se muestra información muy general (superficies edificadas e infraestructuras, territorios agrícolas, áreas forestales y naturales, etc.) y en los niveles IV y V se llega a dar información taxonómica y cuantitativa de la vegetación existente (olivar, viñedo, cítricos, matorral denso con arbolado disperso de quercíneas, etc.), como se puede ver en la Figura 5.29 y en la Tabla 5.57, Tabla 5.58, Tabla 5.59 y Tabla 5.60



Tabla 5.57: Nomenclatura utilizada en el mapa de usos y coberturas vegetales del suelo de Andalucía para superficies construidas y alteradas (Junta de Andalucía, 1999)

---

**1. SUPERFICIES CONSTRUIDAS Y ALTERADAS.**

**1.1. Zonas urbanas.**

- 1.1.1. Núcleos urbanos.
- 1.1.2. Zonas residenciales.

**1.2. Zonas industriales y comerciales.**

**1.3. Infraestructuras de comunicaciones.**

- 1.3.1. Autovías, autopistas y enlaces viarios.
- 1.3.2. Complejos ferroviarios.
- 1.3.3. Zonas portuarias.
- 1.3.4. Aeropuertos.

**1.4. Zonas mineras, vertederos y áreas en construcción.**

- 1.4.1. Zonas mineras.
- 1.4.2. Escombreras y vertederos.
- 1.4.3. Zonas en construcción.

**1.5. Zonas verdes y espacios de ocio.**

- 1.5.1. Zonas verdes urbanas.
  - 1.5.2. Equipamiento deportivo y recreativo.
- 

Tabla 5.58: Nomenclatura utilizada en el mapa de usos y coberturas vegetales del suelo de Andalucía para zonas húmedas y superficies de agua (Junta de Andalucía, 1999)

---

**2. ZONAS HUMEDAS Y SUPERFICIES DE AGUA.**

**2.1. Zonas húmedas y superficies de agua litorales.**

- 2.1.1. Marismas.
  - 2.1.1.1. Marisma colonizada por vegetación.
    - 2.1.1.1.1. *Marisma mareal.*
    - 2.1.1.1.2. *Marisma no mareal.*
  - 2.1.1.2. Marisma reciente no colonizada por vegetación.
- 2.1.2. Salinas y parques de cultivos acuáticos.
  - 2.1.2.1. Salinas tradicionales.
  - 2.1.2.2. Salinas industriales y parques de cultivos acuáticos.
- 2.1.3. Lagunas litorales.
  - 2.1.3.1. Lagunas litorales: lamina de agua.
  - 2.1.3.2. Lagunas litorales: vegetación riparia.
- 2.1.4. Mares y océanos.
- 2.1.5. Estuarios y canales de marea.

**2.2. Zonas húmedas y superficies de agua continentales.**

- 2.2.1. Ríos y cauces.
    - 2.2.1.1. Ríos y cauces naturales: lamina de agua.
    - 2.2.1.2. Ríos y cauces naturales: vegetación riparia.
      - 2.2.1.2.1. *Bosque galería.*
      - 2.2.1.2.2. *Otras formaciones riparias.*
  - 2.2.2. Canales artificiales.
    - 2.2.2.1. Canales artificiales: lamina de agua.
    - 2.2.2.2. Canales artificiales: vegetación riparia.
  - 2.2.3. Lagunas continentales.
    - 2.1.3.1. Lagunas continentales: lamina de agua.
    - 2.1.3.2. Lagunas continentales: vegetación riparia.
  - 2.2.4. Embalses.
-

Tabla 5.59: Nomenclatura utilizada en el mapa de usos y coberturas vegetales del suelo de Andalucía para superficies agrícolas (Junta de Andalucía, 1999)

---

### 3. SUPERFICIES AGRÍCOLAS Y FORESTALES.

#### 3.1. Unidades agrícolas homogéneas.

- 3.1.1. Unidades agrícolas homogéneas en secano.
  - 3.1.1.1. Cultivos herbáceos en secano.
  - 3.1.1.2. Cultivos leñosos en secano.
    - 3.1.1.2.1. *Olivar.*
    - 3.1.1.2.2. *Viñedo.*
    - 3.1.1.2.3. *Otros cultivos leñosos en secano.*
- 3.1.2. Unidades agrícolas homogéneas en regadío.
  - 3.1.2.1. Cultivos herbáceos en regadío.
    - 3.1.2.1.1. *Arrozales.*
    - 3.1.2.1.2. *Cultivos forzados bajo plástico.*
    - 3.1.2.1.3. *Otros cultivos herbáceos en regadío.*
  - 3.1.2.2. Cultivos leñosos en regadío.
    - 3.1.2.2.1. *Cítricos.*
    - 3.1.2.2.2. *Frutales tropicales.*
    - 3.1.2.2.3. *Otros frutales en regadío.*

#### 3.2. Áreas agrícolas heterogéneas.

- 3.2.1. Unidades agrícolas heterogéneas en secano.
    - 3.2.1.1. De cultivos herbáceos y leñosos.
    - 3.2.1.2. De cultivos leñosos.
      - 3.2.1.2.1. *Olivar-viñedo.*
      - 3.2.1.2.2. *Otros.*
  - 3.2.2. Unidades agrícolas heterogéneas en regadío.
    - 3.2.2.1. De cultivos herbáceos y leñosos.
    - 3.2.2.2. De cultivos leñosos.
  - 3.2.3. Mosaicos de cultivos en secano y regadío.
    - 3.2.3.1. De cultivos herbáceos y leñosos.
    - 3.2.3.2. De cultivos leñosos.
    - 3.2.3.3. De cultivos herbáceos.
  - 3.2.4. Mosaicos de cultivos con espacios de vegetación natural.
    - 3.2.4.1. De cultivos herbáceos y vegetación leñosa.
    - 3.2.4.2. De cultivos leñosos y vegetación leñosa.
    - 3.2.4.3. Otros mosaicos de cultivos y vegetación natural.
    - 3.2.4.4. Cultivos abandonados.
      - 3.2.4.4.1. *Olivar abandonado.*
      - 3.2.4.4.2. *Otros cultivos leñosos abandonados.*
- 

Tabla 5.60: Nomenclatura utilizada en el mapa de usos y coberturas vegetales del suelo de Andalucía para superficies forestales y naturales (Junta de Andalucía, 1999)

---

### 4. SUPERFICIES FORESTALES Y NATURALES.

#### 4.1. Zonas forestales y naturales arboladas.

- 4.1.1. Formaciones arboladas densas.
  - 4.1.1.1. De quercíneas.
  - 4.1.1.2. De coníferas.
  - 4.1.1.3. De eucaliptos.
  - 4.1.1.4. De otras frondosas.
  - 4.1.1.5. De quercíneas y coníferas.
  - 4.1.1.6. De quercíneas y eucaliptos.
  - 4.1.1.7. De coníferas y eucaliptos.
  - 4.1.1.8. Otras formaciones arboladas densas mixtas.
- 4.1.2. Formaciones de matorral denso con arbolado.
  - 4.1.2.1. De quercíneas.
  - 4.1.2.2. De coníferas.

- 4.1.2.3. De eucaliptos.
  - 4.1.2.4. De otras frondosas.
  - 4.1.2.5. De quercíneas y coníferas.
  - 4.1.2.6. De quercíneas y eucaliptos.
  - 4.1.2.7. De coníferas y eucaliptos.
  - 4.1.2.8. Otras formaciones arboladas mixtas.
  - 4.1.3. Formaciones de matorral disperso con arbolado.
    - 4.1.3.1. De quercíneas.
      - 4.1.3.1.1. *Con arbolado denso de quercíneas.*
      - 4.1.3.1.2. *Con arbolado disperso de quercíneas.*
    - 4.1.3.2. De coníferas.
      - 4.1.3.2.1. *Con arbolado denso de coníferas.*
      - 4.1.3.2.2. *Con arbolado disperso de coníferas.*
    - 4.1.3.3. De eucaliptos.
    - 4.1.3.4. De otras frondosas.
    - 4.1.3.5. De quercíneas y coníferas.
    - 4.1.3.6. De quercíneas y eucaliptos.
    - 4.1.3.7. De coníferas y eucaliptos.
    - 4.1.3.8. Otras formaciones arboladas mixtas.
  - 4.1.4. Formaciones de pastizal con arbolado.
    - 4.1.4.1. De quercíneas.
      - 4.1.4.1.1. *Con arbolado denso de quercíneas.*
      - 4.1.4.1.2. *Con arbolado disperso de quercíneas.*
    - 4.1.4.2. De coníferas.
      - 4.1.4.2.1. *Con arbolado denso de coníferas.*
      - 4.1.4.2.2. *Con arbolado disperso de coníferas.*
    - 4.1.4.3. De eucaliptos.
    - 4.1.4.4. De otras frondosas.
    - 4.1.4.5. De quercíneas y coníferas.
    - 4.1.4.6. De quercíneas y eucaliptos.
    - 4.1.4.7. De coníferas y eucaliptos.
    - 4.1.4.8. Otras formaciones arboladas mixtas.
  - 4.1.5. Cultivos herbáceos con arbolado de quercíneas.
    - 4.1.5.1. Con arbolado denso.
    - 4.1.5.2. Con arbolado disperso.
  - 4.1.6. Talas y plantaciones forestales recientes.
- 4.2. Matorral sin arbolado.**
- 4.2.1. Matorral denso.
  - 4.2.2. Matorral disperso.
    - 4.2.2.1. Matorral disperso con pastizal.
    - 4.2.2.2. Matorral disperso con pasto y roca o suelo.
- 4.3. Pastizales.**
- 4.3.1. Pastizales continuos.
  - 4.3.2. Pastizales con claros (pasto, roca, suelo).
- 4.4. Espacios abiertos con poca o sin vegetación.**
- 4.4.1. Playas, dunas y arenales.
  - 4.4.2. Roquedos y canchales.
  - 4.4.3. Nieves permanentes.
  - 4.4.4. Espacios orófilos con vegetación escasa.
  - 4.4.5. Areas con fuertes procesos erosivos.
  - 4.4.6. Zonas quemadas.
  - 4.4.7. Otras zonas de vegetación escasa.
  - 4.4.8. Zonas sin vegetación por roturación.
-

### 5.5.1.3. Descripción de las principales unidades cartográficas del mapa

A continuación se ha realizado una descripción de las principales unidades cartográficas del mapa de usos y coberturas vegetales de Andalucía para facilitar la comprensión de su morfología y composición, con el objetivo de permitir su trasposición a los usos del suelo descritos en las tablas del SCS.

#### a) Superficies construidas y alteradas

En este grupo se incluyen las zonas urbanas densas, residenciales con edificaciones discontinuas, industriales, comerciales, las infraestructuras de transporte (bien sean terrestre, marítimo, fluvial o aéreo), las áreas mineras (incluidas las escombreras y vertederos), las zonas en construcción y las áreas verdes y de uso recreativo.

#### b) Zonas húmedas y superficies de agua

Engloban todo tipo de aguas, tanto las continentales como las de influencia marina, por lo que en la presente clase se citan los cursos naturales, las canalizaciones superficiales, las lagunas, los embalses, las balsas, las marismas, los mares y la vegetación riparia asociada a dichas formaciones.

#### c) Superficies agrícolas y forestales

Comprende las superficies cultivadas, las asociaciones, los mosaicos de cultivos y los cultivos abandonados; se distingue entre los cultivos homogéneos y los heterogéneos.

Los cultivos homogéneos son aquellos que presentan una continuidad del tipo de uso sin mezclas de clases diferentes (Junta de Andalucía, 1999). Dentro de esta categoría se encuentran los usos que se definen en la tabla siguiente:

Tabla 5.61: Cultivos agrícolas homogéneos

Clase	Definición
Cultivos herbáceos en secano	Cultivos anuales que no reciben aportes artificiales de agua, se incluyen barbechos y rastrojeras (cereales y algunas leguminosas de grano)
Cultivos leñosos en secano	Cultivos extensivos de olivares, viñedos y árboles frutales de secano (almendros, higueras)
Cultivos herbáceos en regadío	Cultivos anuales que reciben sistemáticamente agua de riego (arrozales, cultivos bajo plástico, fresas, girasol, maíz....)
Cultivos leñosos en regadío	Cultivos de cítricos, frutas tropicales y otros frutales en regadío

Los cultivos agrícolas heterogéneos corresponden a las asociaciones y mosaicos de las unidades agrícolas homogéneas antes citadas, así como los mosaicos de cultivos agrícolas con manchas de vegetación natural de tamaño lo suficientemente pequeño como para no definir una unidad cartográfica por sí misma.

#### d) Superficies forestales y naturales

Esta clase corresponde a las áreas cubiertas de especies arbóreas, arbustivas, de matorral o herbáceas, bien sean de origen natural o procedentes de siembra o plantación, que cumplen funciones ecológicas, protectoras, productoras, paisajísticas o recreativas, y que no

hayan sido incluidas en ninguna otra categoría anterior. Las clases dentro de este grupo se establecen en función de la cobertura ofrecida al suelo por la especie dominante, como se muestra en la Tabla 5.62:

Tabla 5.62: Especificaciones de las formaciones forestales (Junta de Andalucía, 1999)

Tipo de zona	Tipología estructural	Cobertura	
Zonas forestales y naturales arboladas (cobertura arbórea > 5%)	Formaciones arboladas densas	Cobertura arbórea	> 50%
	Formación de matorral denso con arbolado	Cobertura arbórea	5 – 50 %
		Cobertura matorral	> 50%
	Formación de matorral disperso con arbolado	Cobertura arbórea	5 – 50 %
		Cobertura matorral	20 – 50 %
	Formación de pastizal con arbolado	Cobertura arbórea	5 – 50 %
Cobertura matorral		< 20 %	
Zonas forestales y naturales no arboladas (cobertura arbórea < 5%)	Formación de matorral denso no arbolado	Cobertura arbórea	< 5 %
		Cobertura matorral	> 50 %
	Formación de matorral disperso no arbolado	Cobertura arbórea	< 5 %
		Cobertura matorral	20 – 50 %
	Formación de pastizales no arbolado	Cobertura arbórea	< 5%
		Cobertura matorral	< 20 %
			Cobertura herbácea
	Espacios abiertos con poca o sin vegetación	Cobertura herbácea	< 20 %

### 5.5.2. Los usos del suelo presentes en la cuenca de El Sancho

La información ofrecida por el “Mapa de usos y coberturas” no aparece con el mismo número de niveles para todas las coberturas. Por otro lado, la búsqueda de equivalencias con las clases del SCS precisa una leyenda unificada. Para la fabricación de esta leyenda se han ido juntando niveles a partir del primero que posee información, como se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 5.30.

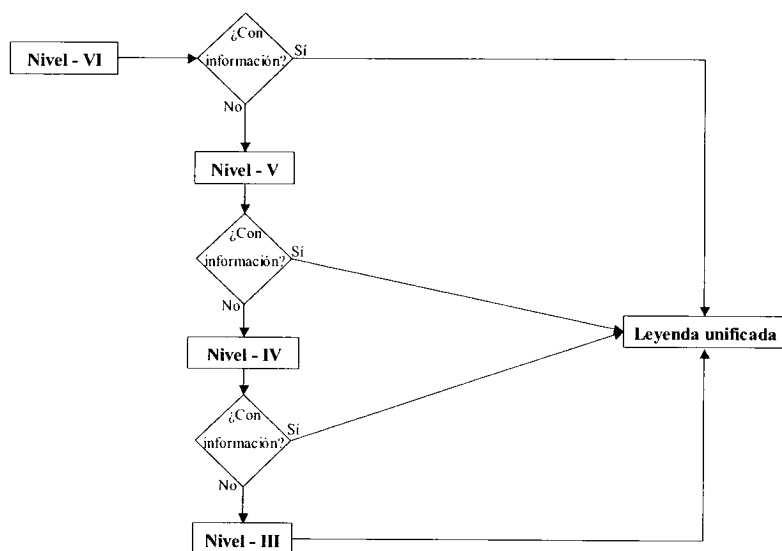


Figura 5.30: Diagrama de flujo del proceso de unificación de la leyenda de usos del suelo (elaboración propia)

Los usos del suelo presentes en la cuenca de aportación del embalse de El Sancho son los enumerados en la siguiente tabla:

Tabla 5.63: Usos del suelo presentes en la cuenca del embalse de El Sancho

Nivel 1	Nivel 2	Leyenda unificada	Superficie (ha)	Nº de polígonos	
Áreas forestales y naturales	Espacios abiertos con poca o sin vegetación	Roquedos y suelo desnudo	0,05	1	
		Zonas sin vegetación por roturación	1.995,66	51	
	Matorral sin arbolado	Matorral denso	1.018,73	54	
		Matorral disperso con pastizal	1.703,82	49	
		Matorral disperso con pasto y roca o suelo	181,80	3	
	Pastizales no arbolados	Pastizal continuo	2.706,28	59	
		Cultivo herbáceo arbolado: quercíneas denso	53,11	4	
		Cultivo herbáceo arbolado: quercíneas disperso	264,67	13	
		For. arbol. densa: coníferas	99,65	12	
		For. arbol. densa: coníferas+eucaliptos	1,67	2	
		For. arbol. densa: eucaliptos	553,92	12	
		For. arbol. densa: otras mezclas	1,89	1	
		For. arbol. densa: quercíneas	4,47	1	
		Matorral denso arbolado: coníferas dispersas	32,29	3	
		Matorral denso arbolado: eucaliptos	1.755,76	24	
		Matorral denso arbolado: otras mezclas	6,25	1	
		Zonas forestales y naturales arboladas	Matorral denso arbolado: quercíneas densas	359,88	8
			Matorral denso arbolado: quercíneas dispersas	776,12	35
			Matorral disp. arbolado: coníferas disperso	41,36	1
			Matorral disp. arbolado: eucaliptos	3.211,30	29
			Matorral disp. arbolado: quercíneas denso	5.202,17	36
			Matorral disp. arbolado: quercíneas disperso	999,19	21
			Matorral disp. arbolado: quercíneas+coníferas	41,83	2
	Pastizal arbolado: coníferas disperso		4,96	1	
	Pastizal arbolado: eucaliptos		352,24	2	
	Pastizal arbolado: quercíneas denso		2.236,25	30	
	Pastizal arbolado: quercíneas. disperso	753,61	28		
	Talas y plantaciones forestales recientes	3.487,60	48		
Superficies edificadas e infraestructuras	Zonas industriales y comerciales e infraestructuras técnicas	Otras infraestructuras técnicas	0,02	1	
		Zonas industriales y comerciales	6,54	2	
	Zonas mineras, vertederos y áreas en construcción	Zonas en construcción	1,56	1	
		Zonas mineras	145,19	3	
		Tejido urbano	102,49	3	
Zonas urbanas	Urbanizaciones residenciales	8,51	3		
Territorios agrícolas	Áreas agrícolas heterogéneas	Con cultivos herbáceos y leñosos	48,70	3	
		Cultivos herbáceos y leñosos en seco	596,65	3	
		Cultivos herbáceos y pastizales	447,91	1	
		Cultivos herbáceos y vegetación natural leñosa	52,67	1	
		Cultivos leñosos y vegetación natural leñosa	23,22	1	
		Olivar abandonado	0,00	1	
		Otros cultivos leñosos abandonados	1,23	1	
		Otros mosaicos de cultivos y vegetación natural	43,10	2	
	Áreas agrícolas homogéneas	Cítricos	181,29	7	
		Cultivos herbáceos en seco	723,13	43	
		Olivar	331,93	30	
		Otros cultivos herbáceos regados	2,30	1	
		Otros cultivos leñosos en seco	11,20	1	
		Parcialmente regados o no regados	440,91	16	
Zonas húmedas y superficies de agua	Zonas húmedas y superficies de agua continentales	Balsas de riego y ganaderas	20,17	13	
		Embalses	454,28	33	
		Ríos y cauces nat.: otras form. riparias	4,66	1	
<b>TOTAL</b>			<b>31.494,16</b>	<b>702</b>	

### 5.5.3. Equivalencias entre los usos del suelo presentes en la cuenca y los propuestos en las tablas del SCS

Como ya se ha mencionado anteriormente, uno de los mayores problemas para la determinación del número de curva de un terreno consiste en establecer equivalencias adecuadas entre las descripciones ofrecidas por los mapas de usos y coberturas, y las definiciones de éstos en las tablas americanas del SCS, puesto que no corresponden, en la mayoría de los casos, con los cultivos agrícolas o con la vegetación presentes en la Europa Mediterránea.

En esta línea, en España existen dos trabajos: el primero corresponde a Témez (1987), en él se facilita una equivalencia con los usos más habituales en el territorio español, pero quedan sin definir muchos otros y no aparecen usos de difusión reciente (como el cultivo de cítricos o de fresas); el segundo trabajo, que pertenece a Ferrer (2003), establece una correspondencia entre los usos indicados en el proyecto CORINE *Land-Cover* y las tablas del umbral de escorrentía de Témez (1987), por lo que estas correspondencias serán la base de partida, ya que la información del “Mapa de usos y coberturas del terreno de la Junta de Andalucía” es la leyenda de 44 usos propuesta por el proyecto CORINE, aunque ampliada hasta 166 clases.

#### 5.5.3.1. Equivalencias entre el mapa de usos y las tablas del SCS

Analizando las definiciones de los usos del suelo realizadas por el SCS (Epígrafe 2.2.1), las descripciones del mapa de usos y coberturas vegetales de Andalucía y la propuesta de Ferrer (2003), las equivalencias propuestas son las que se muestran a continuación:

Tabla 5.64: Equivalencias entre la leyenda del mapa de usos y las tablas del número de curva del SCS

Nivel 2	Leyenda unificada	Uso SCS	Condición hidrológica
Espacios abiertos con poca o sin vegetación	Roquedos y suelo desnudo	Barbecho	--
	Zonas sin vegetación por roturación	Barbecho	--
Matorral sin arbolado	Matorral denso	Matorral con vegetación herbácea	Buena
	Matorral disperso con pastizal	Matorral con vegetación herbácea	Regular
	Matorral disperso con pasto y roca o suelo	Matorral con vegetación herbácea	Pobre
Pastizales no arbolados	Pastizal continuo	Pastos o pastizales	Regular
Zonas forestales y naturales arboladas	Cultivo herbáceo arbolado: quercíneas. denso	Mezcla de árboles con hierba	Regular
	Cultivo herbáceo arbolado: quercíneas. disperso	Mezcla de árboles con hierba	Pobre
	For. Arbolada densa: coníferas	Pinares	Fcc 75%
	For. Arbolada densa: coníferas+eucaliptos	Masa forestales	1
	For. Arbolada densa: eucaliptos	Masa forestales	1
	For. Arbolada densa: otras mezclas	Masa forestales	1
	For. Arbolada densa: quercíneas	Masa forestales	1
	Matorral denso arbolado: coníferas dispersas	Matorral de montaña	Fcc 75%
	Matorral denso arbolado: eucaliptos	Matorral de montaña	Fcc 75%
	Matorral denso arbolado: otras mezclas	Matorral de montaña	Fcc 75%
	Matorral denso arbolado: quercíneas densas	Matorral de montaña	Fcc 75%
	Matorral denso arbolado: quercíneas dispersas	Matorral de montaña	Fcc 75%
	Matorral disp. arbolado: coníferas. disperso	Matorral de montaña	Fcc 50 %
	Matorral disp. arbolado: eucaliptos	Matorral de montaña	Fcc 50 %
	Matorral disp. arbolado: quercíneas. denso	Matorral de montaña	Fcc 50 %

Adquisición de la información básica para la validación del modelo

Nivel 2	Leyenda unificada	Uso SCS	Condición hidrológica
	Matorral disp. arbolado: quercíneas. disperso	Matorral de montaña	Fcc 50 %
	Matorral disp. arbolado: quercíneas+coníferas	Matorral de montaña	Fcc 50 %
	Pastizal arbolado: coníferas. disperso	Mezcla de árboles con hierba	Regular
	Pastizal arbolado: eucaliptos	Mezcla de árboles con hierba	Regular
	Pastizal arbolado: quercíneas. denso	Mezcla de árboles con hierba	Buena
	Pastizal arbolado: quercíneas. disperso	Mezcla de árboles con hierba	Regular
	Talás y plantaciones forestales recientes	Barbecho	--
Zonas industriales y comerciales e infraestructuras técnicas	Otras infraestructuras técnicas	Impermeable	--
	Zonas industriales y comerciales	Industrial	--
Zonas mineras, vertederos y áreas en construcción	Zonas en construcción	Explanaciones	--
	Zonas mineras	Explanaciones	--
Zonas urbanas	Tejido urbano	Áreas completamente desarrolla.	Regular
	Urbanizaciones residenciales	Zonas residenciales (65% imper.)	
Áreas agrícolas heterogéneas	Cultivos herbáceos y leñosos	Matorral con vegetación herbácea	Pobre
	Cultivos herbáceos y leñosos en secano	Matorral con vegetación herbácea	Pobre
	Cultivos herbáceos y pastizales	Pastos o pastizales	Pobre
	Cultivos herbáceos y vegetación natural leñosa	Matorral con vegetación herbácea	Pobre
	Cultivos leñosos y vegetación natural leñosa	Pequeñas arboledas	Regular
	Olivar abandonado	Mezcla de árboles con hierba	Buena
	Otros cultivos leñosos abandonados	Mezcla de árboles con hierba	Buena
	Otros mosaicos de cultivos y vegetación natural	Mezcla de árboles con hierba	Regular
Áreas agrícolas homogéneas	Cítricos	Mezcla de árboles con hierba	Pobre
	Cultivos herbáceos en secano	Cultivo de grano pequeño	Regular
	Olivar	Mezcla de árboles con hierba	Pobre
	Otros cultivos herbáceos regados	Rotación de cultivos	Regular
	Otros cultivos leñosos en secano	Mezcla de árboles con hierba	Regular
	Parcialmente regados o no regados	Cultivos en hileras	Pobre
Zonas húmedas y superficies de agua continentales	Balsas de riego y ganaderas	Impermeable	--
	Embalses	Impermeable	--
	Ríos y cauces nat.: otras form. riparias	Pequeñas arboledas	Regular

Por lo tanto los usos del suelo, según las tablas del SCS, presentes en la cuenca y su representación porcentual son los que se muestran en la Tabla 5.65 y en la Figura 5.31:

Tabla 5.65: Distribución de los usos del suelo (SCS) en la cuenca de El Sancho

Usos (SCS)	Condición	Superficie (ha)	% Ocupación cuenca
Barbecho	--	5.483,31	17,41
Cultivo de grano pequeño	Regular	723,13	2,30
Cultivos en hileras	Pobre	440,91	1,40
Rotación de cultivos	Regular	2,30	0,01
Matorral con vegetación herbácea	Pobre	1.703,82	5,41
	Regular	879,82	2,79
	Buena	1.018,73	3,23
Matorral de montaña	Fcc 50%	9.495,85	30,15

Usos (SCS)	Condición	Superficie (ha)	% Ocupación cuenca
	Fcc 75 %	2.930,30	9,30
Mezcla de árboles con hierba	Pobre	777,89	2,47
	Regular	1.218,22	3,87
	Buena	2.237,48	7,10
	Pobre	447,91	1,42
Pastos o pastizales	Regular	2.706,28	8,59
Pequeñas arboledas	Regular	27,88	0,09
Pinares	Fcc 75%	99,65	0,32
Masa forestales		561,95	1,78
Áreas completamente desarrolla.	Regular	102,49	0,33
Zonas residenciales (65% imper.)	--	8,51	0,03
Industrial	--	6,54	0,02
Explanaciones	--	146,75	0,53
Impermeable	--	474,46	1,54
<b>TOTAL</b>		<b>31.494,16</b>	<b>100</b>

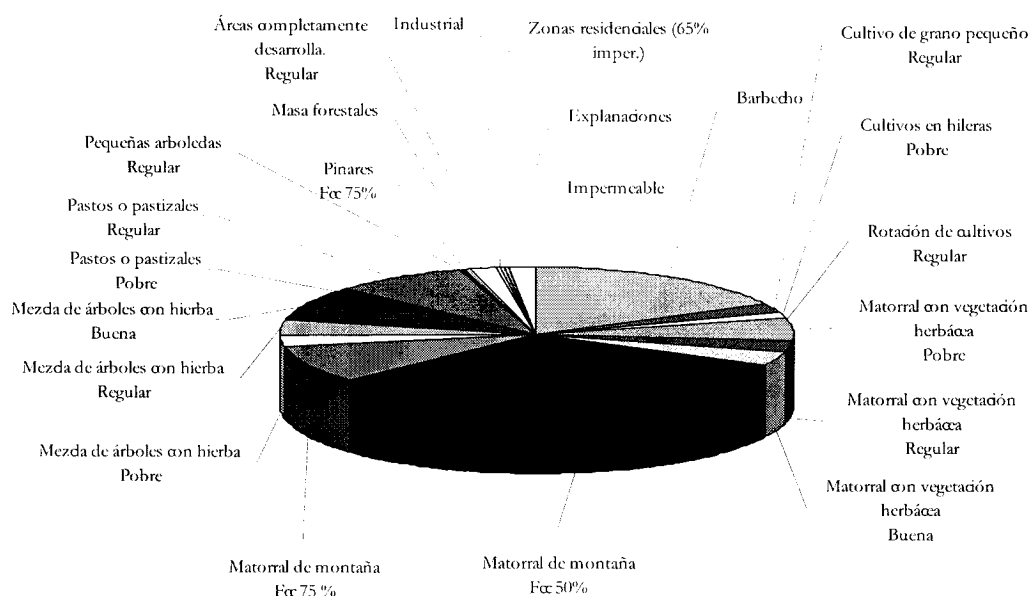


Figura 5.31: Distribución de usos del suelo (SCS) en la cuenca de El Sancho

### 5.5.3.2. Equivalencias entre el mapa de usos y las tablas del método del umbral de escorrentía (Témez)

Témez en 1987 adaptó y modificó las tablas del número de curva del SCS a las condiciones del territorio nacional (Tabla 2.18). Posteriormente, diversos autores (Generalitat de Catalunya, 2001; Ferrer, 2003) establecieron una serie de equivalencias entre las categorías propuestas por el programa CORINE y los trabajos de Témez, como se puede observar en la Tabla 5.66 y en la Tabla 5.67.

Tabla 5.66: Equivalencias entre los usos del suelo y las categorías de Témex (Generalitat de Catalunya, 2001)

Usos	Usos método umbral de escorrentia (Témex, 1987)
Agua Continental	Zona Impermeable
Agua marina	Zona Impermeable
Acumulaciones nivales	Zona Impermeable
Infraestructura viales	Zona Impermeable
Urbanizaciones	Zona Impermeable
Núcleos urbanos	Zona Impermeable
Zonas industriales y comerciales	Zona Impermeable
Cultivos herbáceos de secano	Cereales de invierno
Cultivos herbáceos de regadío	Rotación de cultivos densos
Frutales de secano	Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal (pobre)
Frutales de regadío	Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal (media)
Viñedos	Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal (pobre)
Pastizales y praderas	Pradera pobre
Matorral con pasto	Masa forestal
Bosque esclerófilo	Masa forestal
Bosque caducifolio	Masa forestal
Bosque de coníferas	Masa forestal
Vegetación de zonas húmedas	Roca permeable
Suelo con escasa vegetación o desnudo	Barbecho
Zonas incendiadas	Barbecho
Zonas de talas y plantaciones	Barbecho

Tabla 5.67: Equivalencias entre los usos del suelo y las categorías de Témex (Ferrer, 2003)

Usos (CORINE)	Usos método umbral de escorrentia (Témex, 1987)	Características Hidrológicas
<b>ZONAS URBANAS Y ANTRÓPICAS</b>		
Tejido urbano continuo	Áreas impermeables	
Tejido urbano discontinuo	Rocas permeables	
Urbanizaciones externas y/o ajardinadas	Rocas permeables	
Estructura urbana laxa	Rocas permeables	
Zonas industriales y comerciales	Áreas impermeables	
Red viaria y ferroviaria	Áreas impermeables	
Zonas portuarias	Áreas impermeables	
Aeropuertos	Áreas impermeables	
Zonas de extracción minera	Barbechos	
Escombreras y vertederos	Barbechos	
Zonas en construcción	Barbechos	
Zonas verde urbanas	Praderas	Medias
Instalaciones deportivas	Praderas	Pobre
<b>ZONAS AGRARIAS</b>		
Tierras de labor de secano	Cereales de invierno	
Terrenos regados permanentemente	Rotación de cultivos densos	
Cultivos herbáceos en regadío	Rotación de cultivos densos	

Usos (CORINE)	Usos método umbral de escorrentía (Témez, 1987)	Características Hidrológicas
Otras zonas de irrigación	Rotación de cultivos densos	
Arrozales	Rotación de cultivos densos	
Viñedos	Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal	Pobre
Frutales y plantaciones de bayas	Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal	Pobre
Frutales de secano	Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal	Pobre
Cítricos	Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal	Media
Frutales tropicales (regadío)	Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal	Media
Otros frutales en regadío	Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal	Media
Olivares	Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal	Pobre
Praderas	Pradera	Buena
Cultivos anuales asociados a cultivos permanentes	Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal	Media
Mosaico de cultivos	Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal	Pobre
Mosaico de cultivos anuales con praderas	Cereales de invierno	
Mosaico de cultivos permanentes	Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal	Pobre
Terrenos principalmente agrícolas con vegetación natural	Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal	Pobre
<b>ZONAS NATURALES Y FORESTALES</b>		
Sistemas agroforestales	Pradera	Media
Bosque de frondosas	Masa forestal	Espesa
Perennifolias y quejigales	Masa forestal	Espesa
Caducifolias y rebollares	Masa forestal	Espesa
Otras frondosas de plantación	Masa forestal	Muy espesa
Perennifolias esclerófilas y quejigales	Masa forestal	Espesa
Laurisilva macaronésica	Masa forestal	Muy espesa
Bosque de coníferas	Masa forestal	Espesa
Pináceas	Masa forestal	Espesa
Sabinares y enebrales	Masa forestal	Espesa
Bosque mixto	Masa forestal	Muy espesa
Pastizales naturales	Pradera	Media
Pastizales supraforestales	Pradera	Pobre
Otros pastizales	Pradera	Pobre
Landas y matorrales	Masa forestal	Media
Landas y matorrales templado-oceánicos	Masa forestal	Media
Fayal-brezal macaronésico	Masa forestal	Media
Vegetación esclerófila	Masa forestal	Media
Formación de matorral denso o medianamente denso	Masa forestal	Media
Matorral subarbusivo o arbustivo poco denso	Masa forestal	Muy clara
Matorrales xerófilos macaronésicos	Masa forestal	Media
Matorral boscoso de transición	Masa forestal	Media
<b>ZONAS CON ESCASA VEGETACIÓN</b>		
Playas, dunas y arenas	Barbecho	
Roquedos	Áreas impermeables	
Roca desnuda	Áreas impermeables	
Suelos desnudo	Barbechos	
Coladas lávicas cuaternarias	Rocas permeables	

## Adquisición de la información básica para la validación del modelo

Usos (CORINE)	Usos método umbral de escorrentía (Témez, 1987)	Características Hidrológicas
Espacios con escasa vegetación	Pradera	Pobre
Xeroestepa subdesértica	Pradera	Pobre
Cárcavas y zonas en procesos erosivo	Barbecho	
Espacios orófilos altitudinales con vegetación escasa	Pradera	Pobre
Zonas quemadas	Barbecho	
Glaciares y nieves permanentes	Áreas impermeables	
Humedales y zonas pantanosas	Rocas permeables	
Turberas	Rocas permeables	
Marismas	Rocas permeables	
Salinas	Rocas permeables	
Zonas llanas intermareales	Rocas permeables	
Cursos de agua	Áreas impermeables	
Ríos y cauces naturales	Áreas impermeables	
Canales artificiales	Áreas impermeables	
Láminas de agua	Áreas impermeables	
Lagos, lagunas	Áreas impermeables	
Embalses	Áreas impermeables	
Estuarios	Áreas impermeables	
Mares y océanos	Áreas impermeables	

Aplicando el criterio mostrado en la Tabla 5.66 y Tabla 5.67 a los usos presentes en la zona de trabajo, los resultados obtenidos son:

Tabla 5.68: Equivalencias entre la leyenda del mapa de usos y las tablas del método de Témez (elaboración propia)

Leyenda unificada	Usos método umbral de escorrentía (Témez, 1987)	Condición hidrológica
Roquedos y suelo desnudo	Área impermeable	--
Zonas sin vegetación por roturación	Barbecho	--
Matorral denso	Masa forestal	Media
Matorral disperso con pastizal	Masa forestal	Media
Matorral disperso con pasto y roca o suelo	Masa forestal	Clara
Pastizal continuo	Pradera	Media
Cultivo herbáceo arbolado: quercíneas. denso	Masa forestal	Media
Cultivo herbáceo arbolado: quercíneas. disperso	Pradera	Media
For. arbol. densa: coníferas	Masa forestal	Espesa
For. arbol. densa: coníferas+eucaliptos	Masa forestal	Espesa
For. arbol. densa: eucaliptos	Masa forestal	Espesa
For. arbol. densa: otras mezclas	Masa forestal	Espesa
For. arbol. densa: quercíneas	Masa forestal	Espesa
Matorral denso arbolado: coníferas dispersas	Masa forestal	Media
Matorral denso arbolado: eucaliptos	Masa forestal	Media
Matorral denso arbolado: otras mezclas	Masa forestal	Media
Matorral denso arbolado: quercíneas densas	Masa forestal	Media
Matorral denso arbolado: quercíneas dispersas	Masa forestal	Media
Matorral disp. Arbolado: coníferas. disperso	Masa forestal	Clara
Matorral disp. Arbolado: eucaliptos	Masa forestal	Clara

<b>Leyenda unificada</b>	<b>Usos método umbral de escorrentia (Témez, 1987)</b>	<b>Condición hidrológica</b>
Matorral disp. arbolado: quercíneas. aenso	Masa forestal	Clara
Matorral disp. arbolado: quercíneas. aispero	Masa forestal	Clara
Matorral disp. arbolado: quercíneas+coníferas	Masa forestal	Clara
Pastizal arbolado: coníferas. aispero	Masa forestal	Clara
Pastizal arbolado: eucaliptos	Pradera	Media
Pastizal arbolado: quercíneas. aenso	Masa forestal	Media
Pastizal arbolado: quercíneas. aispero	Pradera	Media
Talas y plantaciones forestales recientes	Barbecho	--
Otras infraestructuras técnicas	Área impermeable	--
Zonas industriales y comerciales	Área impermeable	--
Zonas en construcción	Barbecho	--
Zonas mineras	Área impermeable	--
Tejido urbano	Área impermeable	Regular
Urbanizaciones residenciales	Roca permeable	
Cultivos herbáceos y leñosos	Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal	Media
Cultivos herbáceos y leñosos en secano	Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal	Pobre
Cultivos herbáceos y pastizales	Cereales de invierno	Pobre
Cultivos herbáceos y vegetación natural leñosa	Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal	Pobre
Cultivos leñosos y vegetación natural leñosa	Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal	Pobre
Olivar abandonado	Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal	Media
Otros cultivos leñosos abandonados	Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal	Media
Otros mosaicos de cultivos y vegetación natural	Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal	Pobre
Cítricos	Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal	Media
Cultivos herbáceos en secano	Cereales de invierno	Pobre
Olivar	Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal	Pobre
Otros cultivos herbáceos regados	Rotación de cultivos densos	--
Otros cultivos leñosos en secano	Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal	Pobre
Parcialmente regados o no regados	Rotación de cultivos pobre	--
Balsas de riego y ganaderas	Área impermeable	--
Embalses	Área impermeable	--
Ríos y cauces nat.: otras form. riparias	Roca permeable	--

Por lo tanto, los usos del suelo según las tablas del método de Témez (1987) presentes en la cuenca y su representación porcentual son los que se muestran en la Tabla 5.69 y en la Figura 5.32.

Tabla 5.69: Distribución de los usos del suelo (umbral de escorrentia) en la cuenca de El Sancho

Usos método umbral de escorrentia (Témez, 1987)	Característica hidrológica	Superficie (ha)	% Ocupación cuenca
Área impermeable		728,74	2,31
Barbecho		5.484,81	17,42
Cereales de invierno	Pobre	1.171,04	3,72
	Clara	9.682,61	30,74
Masa forestal	Media	661,60	2,10
	Espesa	7.942,21	25,22
	Pobre	231,21	0,73
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal	Regular	1.058,78	3,36
	Media	4.076,79	12,94
Rotación de cultivos densos		2,30	0,01
Rotación de cultivos pobre		440,91	1,40
Roca permeable		13,16	0,04
<b>TOTAL</b>		<b>31.494,14</b>	<b>100</b>

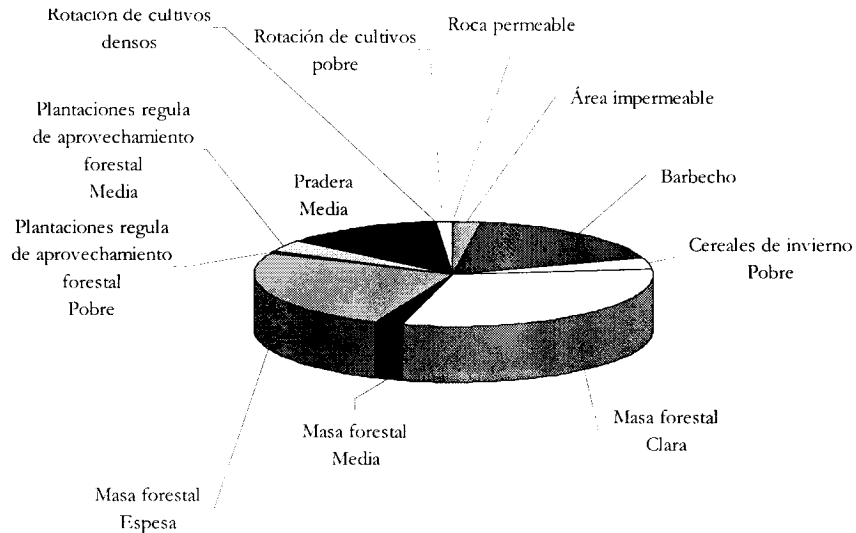


Figura 5.32: Distribución de usos del suelo según el método de Témez en la cuenca de El Sancho

## 5.6. ESTIMACIÓN DE LOS NÚMEROS DE CURVA EN LA CUENCA DEL EMBALSE DE EL SANCHO

Una vez cartografiadas las variables de trabajo e implementado el sistema de información geográfica, se ha procedido al cruce de la información con el fin de obtener la distribución de números de curva para cada una de las tormentas. El esquema seguido es el siguiente:

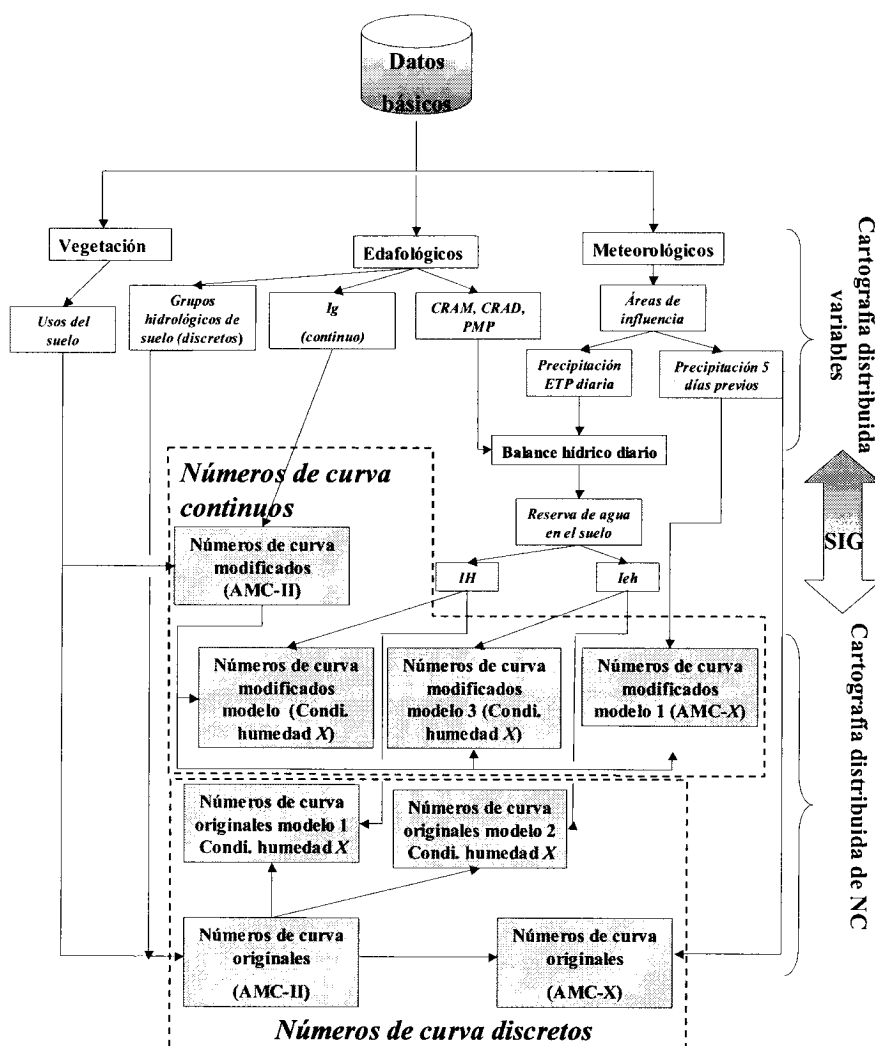


Figura 5.33: Flujo de trabajo para la determinación de los números de curva según los distintos modelos

Como se puede ver en la Figura 5.33, se han estimado los números de curva con las distintas combinaciones posibles de determinación del grupo hidrológico de suelo y de la condición antecedente de humedad del suelo, con el único objetivo de poder valorar, en epígrafes posteriores, las modificaciones introducidas por cada uno de los modelos de cálculo.

Dado que el volumen de información resultante es muy elevado, se ha optado por mostrar a continuación la variación del número de curva medio (ponderado) para cada una de las ocho tormentas estudiadas.

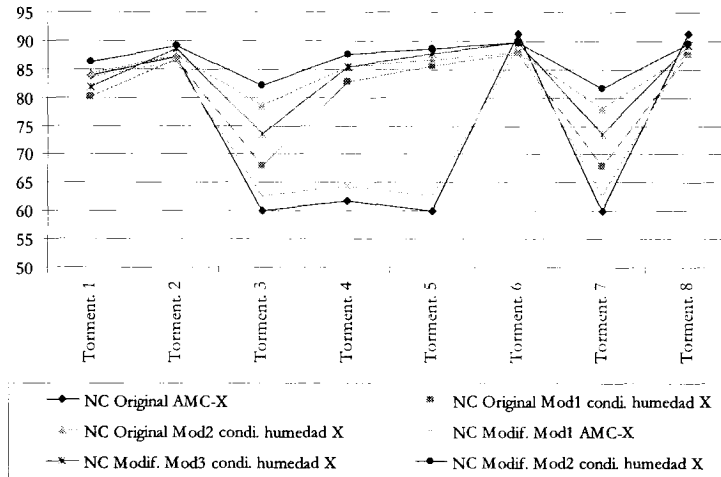


Figura 5.34: Números de curva medios de la cuenca del embalse de El Sancho según los distintos modelos ensayados

El esquema metodológico mostrado en la Figura 5.33 es aplicable a la modificación propuesta por Témez (1987) para el territorio español, obteniéndose los números de curva que se muestran en la siguiente figura:

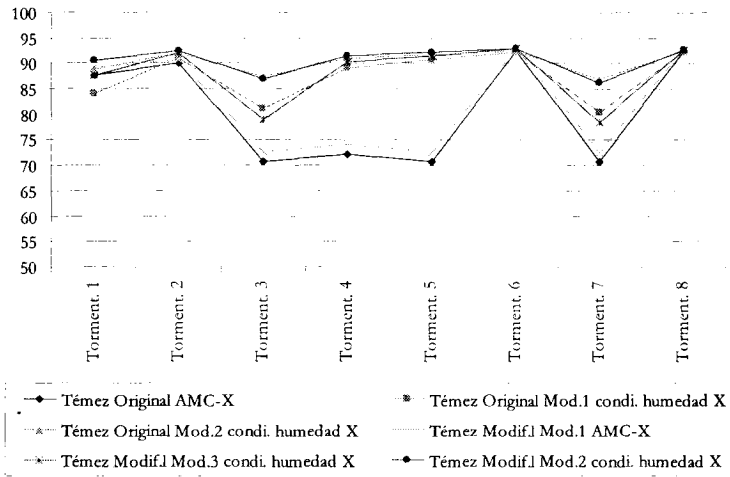


Figura 5.35: Números de curva medios según Témez (1987) en la cuenca del embalse de El Sancho según los distintos modelos ensayados

## **CAPÍTULO 6: METODOLOGÍA DE VALIDACIÓN DE LOS MODELOS PROPUESTOS**

Las mejoras propuestas en la determinación del número de curva precisan ser contrastadas frente a eventos reales. Estos eventos corresponden a datos de escorrentía superficial recibida en el embalse de El Sancho. Los datos brutos registrados por los sensores instalados en la presa de El Sancho corresponden a la variación de la cota de agua embalsada y deben transformarse, mediante un balance temporal de entradas y salidas, en hidrogramas de caudal de escorrentía superficial.

Conocidos los valores de los sensores implicados en el balance hídrico de la presa, se ha establecido el gasto de entrada-salida y su evolución temporal, con lo que puede obtenerse el hidrograma relacionado con un evento tormentoso determinado.

Posteriormente se ha generado un modelo hidrológico distribuido de la cuenca basado en la transformación de lluvia en escorrentía a través del número de curva, que conduce a la obtención de los hidrogramas simulados de cada tormenta.

Una vez definidos los hidrogramas observados y los simulados, se ha procedido a su comparación visual, así como a la evaluación de la calidad de las estimaciones a través de diversos indicadores que lleven a la determinación de los modelos que más se ajustan a la realidad.

### **6.1. ESTIMACIÓN DE LOS HIDROGRAMAS REALES DE ESCORRENTÍA SUPERFICIAL REGISTRADOS POR LA PRESA**

El embalse de El Sancho recoge las aguas de escorrentía superficial y subsuperficial de la cuenca del río Meca, y por tanto, se puede aplicar sobre él la ecuación de continuidad con las componentes que se muestran en la Figura 6.1. Así, si se conocen las variables de operación de la presa, se podrá calcular la cantidad de flujo circulante a lo largo del tiempo o, lo que es lo mismo, el hidrograma de entrada de agua al embalse.

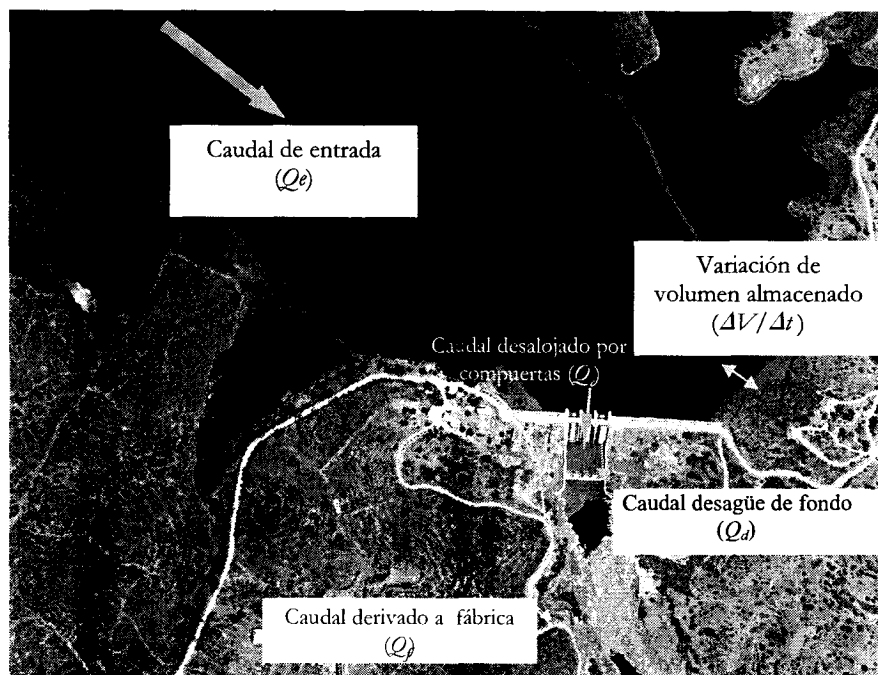


Figura 6.1: Esquema de circulación de flujos en la presa de El Sancho

Para conseguir estimar el hidrograma de entrada de un evento de precipitación concreto, tan sólo hay que aplicar un balance hídrico a lo largo del tiempo sobre el sistema de la presa; se puede escribir la siguiente ecuación:

$$Q_e = \frac{\Delta V}{\Delta t} + Q_s \quad 6.1$$

Donde:  $Q_e$  es el caudal de agua entrante en el instante  $t$

$\Delta V/\Delta t$  es la variación del agua almacenada en el sistema en un incremento de tiempo  $t$

$Q_s$  es el caudal de salida del sistema en el instante  $t$

En el caso del embalse de El Sancho, el caudal de salida ( $Q_s$ ) estará formado: por el caudal aliviado por cada una de las tres compuertas que componen el sistema de aliviaderos de la presa ( $Q_c$ ); el caudal evacuado por el desagüe de fondo ( $Q_d$ ) y el agua derivada para los procesos productivos de la fábrica del grupo ENCE ( $Q_f$ ). Por lo tanto, el caudal de salida del embalse se puede expresar mediante la siguiente suma:

$$Q_s = \sum_{i=1}^3 Q_{c_i} + Q_d + Q_f \quad 6.2$$

## 6.1.1. Estimación de las variables del balance hídrico

### 6.1.1.1. Cálculo del caudal emitido por el aliviadero

El aliviadero de la presa de El Sancho es del tipo creager (Blanquer, 2002), con una longitud total de 36 m, dividido en tres pilas de vertido controladas por tres compuertas de tipo taintor independientes (Figura 6.2), por lo que el vertido del agua se puede realizar por una, por dos o por las tres pilas de vertido.

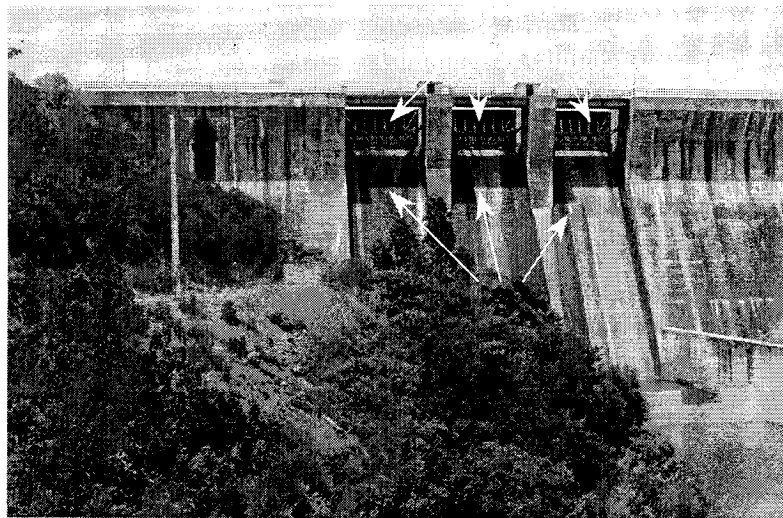


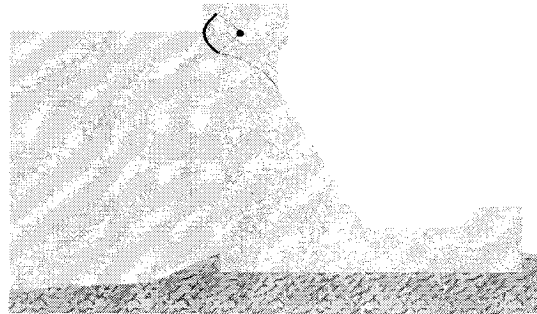
Figura 6.2: Aliviadero de la Presa de El Sancho (fuente: ENCE)

La estimación de los caudales aliviados se ha efectuado con los datos (suministrados por ENCE) de la altura de maniobra de cada compuerta y de la cota de la lámina de agua almacenada en el embalse (con un intervalo de lectura de diez minutos), registrados por el sistema automático de gestión de la presa.

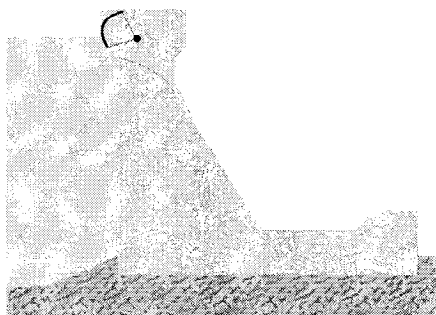
Desde el punto de vista del cálculo hidráulico del caudal emitido por los aliviaderos, hay que distinguir dos situaciones muy distintas: el vertido de agua bajo compuerta y el vertido en lámina libre, que a continuación se detallan, empleando las ecuaciones ajustadas para la presa de El Sancho por INITEC (1996).

#### a) Vertido en lámina libre

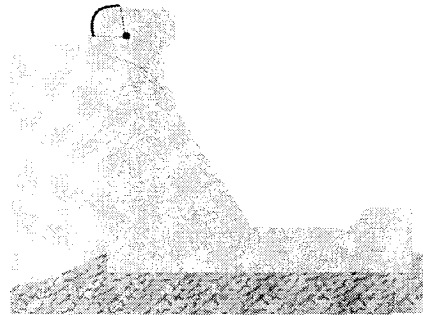
Que la presa opere bajo esta situación depende de la cota de la lámina libre de agua almacenada y de la apertura de la compuerta, como se puede ver en la Figura 6.3 y en la Figura 6.4.



Situación de compuerta cerrada y cota embalse 54,30 m



Situación vertido bajo compuerta abierta (< 5 m) y cota embalse 54,30 m



Situación vertido libre compuerta abierta (>de 5 m) y cota de embalse 54,30 m

Figura 6.3: Esquema de funcionamiento de las compuertas de la presa

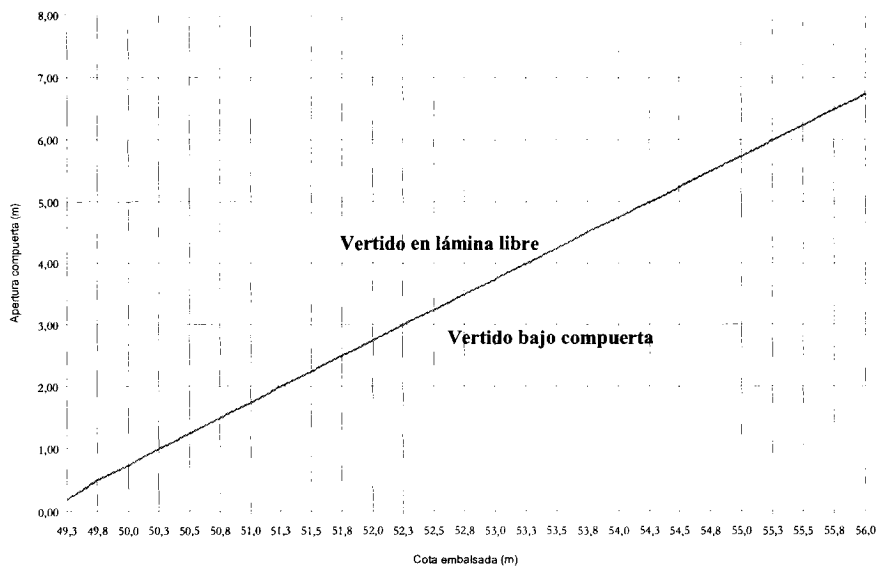


Figura 6.4: Límite de vertido bajo compuerta-lámina libre para el embalse de El Sancho (elaboración propia)

El caudal evacuado por una compuerta bajo esta situación se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$Q_c = C \cdot L_u \cdot H_e^{3/2} \quad 6.3$$

Donde:  $Q_c$  es el caudal evacuado en  $m^3/s$

$C$  es el coeficiente de desagüe, que depende de la cota de la lámina libre de agua embalsada

$L_u$  es la longitud útil de vertido (m)

$H_e$  es la carga de vertido sobre el vertedero (m)

El coeficiente de desagüe ( $C$ ) para esta situación se ha estimado según la ecuación simplificada que se muestra a continuación (García, 2003):

$$C \approx -0,0049514 \cdot z^2 + 0,58922 \cdot z - 15,278 \quad 6.4$$

Donde:  $z$  es la cota de la lámina libre de agua embalsada (m)

La longitud útil ( $L_u$ ) de vertido se corresponde con la longitud total de vertido reducida por el efecto de contracción de las pilas de los vertederos y de los estribos de las compuertas, y se calcula según la expresión:

$$L_u = L_t - 2 \cdot (n \cdot K_p + K_a) \cdot H_e \quad 6.5$$

Donde:  $L_u$  es la longitud útil de vertido (m)

$L_t$  es la longitud total de vertido (m) (función del número de compuertas abiertas)

$n$  es el número de pilas en funcionamiento (1, 2 ó 3)

$K_p$  es el coeficiente de contracción por pilas (0,01) (INITEC, 1996)

$K_a$  es el coeficiente de contracción por los estribos (0,18) (INITEC, 1996)

$H_e$  es la carga de vertido sobre el aliviadero (m)

### b) Vertido bajo compuerta

En esta situación el cálculo del caudal vertido por una compuerta se estima a través de la siguiente ecuación:

$$Q_c = \frac{2}{3} \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot C_d \cdot L_u \cdot (H_e^{3/2} - H_c^{3/2}) \quad 6.6$$

Donde:  $Q_c$  es el caudal evacuado en  $m^3/s$

$g$  es la aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )

$C_d$  es el coeficiente de desagüe, que depende de la relación: apertura de la compuerta-carga de vertido

$L_u$  es la longitud útil de vertido (m), según la ecuación 6.5

$H_e$  es la carga de vertido sobre el vertedero (m)

$H_c$  es la carga de vertido sobre el borde inferior de la compuerta ( $H_c = 6 + H_e$ ) (m)

El coeficiente de desagüe bajo compuerta ( $C_d$ ) varía en función de la relación que haya entre la elevación de la compuerta y la carga de vertido, que se estima según las siguientes ecuaciones:

$$C_d \approx 0,66443 \cdot \left( \frac{b}{H_e} \right)^{-0,03084} \quad \text{Si } \frac{b}{H_e} \leq 0,2$$

$$C_d \approx -0,114 \cdot \left( \frac{b}{H_e} \right) + 0,721 \quad \text{Si } \frac{b}{H_e} \geq 0,2$$
6.7

Donde:  $C_d$  es el coeficiente de desagüe bajo compuerta

$b$  es la apertura o elevación de la compuerta (m)

$H_e$  es la carga de vertido en el vertedero (m)

La elevación de cada compuerta es registrada y almacenada de forma automática por un sensor cada diez minutos.

#### 6.1.1.2. Vertido por el desagüe de fondo

El desagüe de fondo consiste en una abertura circular ( $\phi = 1$  m) en el paramento de aguas arriba de la presa, situado a la cota 18,5 m. Consta de 2 compuertas alojadas en una cámara, en la que se produce una reducción del diámetro de la tubería hasta los 0,8 m. El caudal emitido por el desagüe se calcula según la expresión:

$$Q_d = K \cdot (z - 18,5)$$
6.8

Donde:  $Q_d$  es el caudal emitido en  $\text{m}^3/\text{s}$

$K$  es el coeficiente de descarga (1,438 para compuertas abiertas totalmente)

$z$  es la cota de la lámina libre del agua embalsada (m)

Por lo que la relación entre la cota de embalse y el caudal emitido se puede expresar en el gráfico siguiente:

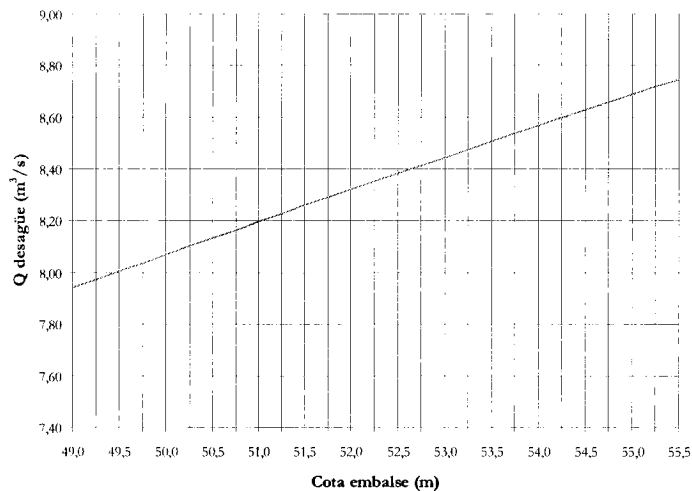


Figura 6.5: Relación entre la cota de agua embalsada y el caudal emitido por el desagüe de fondo totalmente abierto (elaboración propia)

### 6.1.1.3. Caudal derivado a fábrica

La presa de El Sancho dispone de cinco tomas de agua en el estribo derecho para la derivación de agua a la factoría de San Juan del Puerto, con cotas de 31, 36, 40, 43 y 46 m. Cada una dispone de una compuerta en el paramento de aguas arriba cuyo accionamiento se realiza desde coronación. Los conductos de las cinco tomas se unen en una tubería descendente hasta la cota 28 m, siguiendo un tramo horizontal con posterior bifurcación para llegar a la cámara de válvulas.

El caudal derivado hacia la fábrica oscila entre los 0,19 y 0,20 m³/s, de forma más o menos continuada.

### 6.1.1.4. Variación del volumen almacenado en el embalse

El embalse consta de dos medidores automáticos del nivel de agua embalsada, situados a diferente cota, que registran la altura de la lámina libre de agua cada diez minutos.

El volumen de agua almacenado en el embalse se ha estimado a través de la función del vaso, cuya expresión es (ENCE, 2001):

$$V_i = 0,0154 \cdot z_i^2 + 2,8005 \cdot z_i - 141,93 \quad 6.9$$

Donde:  $V_i$  es el volumen de agua almacenada en el instante de tiempo  $i$  (hm³)

$z_i$  es la cota de agua embalsada en el instante de tiempo  $i$  (m)

Por lo que la variación volumétrica en un intervalo de tiempo  $t$  se puede calcular como:

$$\Delta V = V_i - V_{i+t} \quad 6.10$$

Donde:  $\Delta V$  es la variación del volumen almacenado en el intervalo de tiempo  $t$

$V_i$  es el volumen de agua almacenada en el instante de tiempo  $i$

$V_{i+t}$  es el volumen de agua almacenada trascurrido el intervalo de tiempo  $t$

Para transformar la variación del volumen de agua almacenada en unidades de caudal (volumen por unidad de tiempo), hay que dividir la variación del volumen almacenado entre el tiempo en el que se produce la variación.

### 6.1.2. Estimación de los hidrogramas de entrada

Los caudales entrantes a la presa pueden ser estimados gracias a los registros de operación de las compuertas, desagüe de fondo y consumos de fábrica, así como de los datos de la cota de agua embalsada, a través de la ecuación 6.1. Existe una resolución temporal muy alta, al contar con registros diez-minutales, pero de escaso interés por la poca sensibilidad del sensor encargado de medir la cota de la lámina libre de agua embalsada (precisión centimétrica); esto aconseja trabajar con intervalos de tiempo mayores, para poder apreciar variaciones significativas del volumen almacenado.

En este caso se ha optado por estimar los hidrogramas de entrada de la cuenca en incrementos temporales horarios ( $t=1h$ ); por lo tanto, se ha estimado el caudal medio horario emitido por las compuertas, el desagüe de fondo y el consumido por la fábrica, así como la variación horaria de volumen de agua almacenada por el embalse.

Para la determinación de los hidrogramas se han analizado los datos diez-minutales desde octubre de 2002 hasta abril de 2004, centrando el trabajo en aquellos episodios de lluvia lo suficientemente grandes como para producir una variación en el volumen de agua almacenada en el vaso del embalse.

A continuación se expresan los episodios de lluvia estudiados y sus hidrogramas:

#### 6.1.2.1. Tormenta de 16 de diciembre de 2002 (Tormenta 1)

Como se puede observar en la Figura 6.6, el evento tormentoso tuvo una duración efectiva aproximada de tres días, distribuyéndose la precipitación de forma muy homogénea.

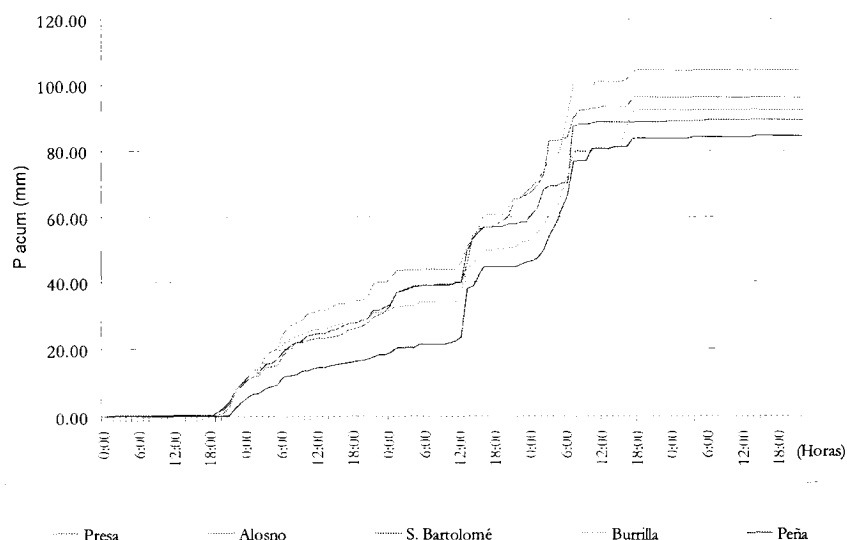


Figura 6.6: Pluviograma de la tormenta de 16 de diciembre de 2002 (Tormenta 1)

La tormenta genera una escorrentía con una duración aproximada de 4 días, aportando un total de 17,27 hm<sup>3</sup> de agua y con un caudal máximo en el hidrograma de 220,5 m<sup>3</sup>/s, como se puede apreciar en la Figura 6.7 y en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1: Datos de la tormenta de 16 de diciembre de 2002 (Tormenta 1)

DÍA	APORTES hm <sup>3</sup>	PRECIPITACIÓN (mm)				
		Presa	Alosno	San Bartolomé	La Burrilla	La Peña
16-dic-02	0,12	8,86	9,36	9,63	9,37	4,28
17-dic-02	1,86	21,93	30,59	22,72	21,7	14,1
18-dic-02	4,59	36,75	28,9	28,33	22,3	28,11
19-dic-02	8,90	28,65	35,51	28,15	38,8	37,31
20-dic-02	1,80	0,00	0,25	0,25	0,00	0,5
<b>Total</b>	<b>17,27</b>	<b>96,19</b>	<b>104,61</b>	<b>89,08</b>	<b>92,17</b>	<b>84,30</b>

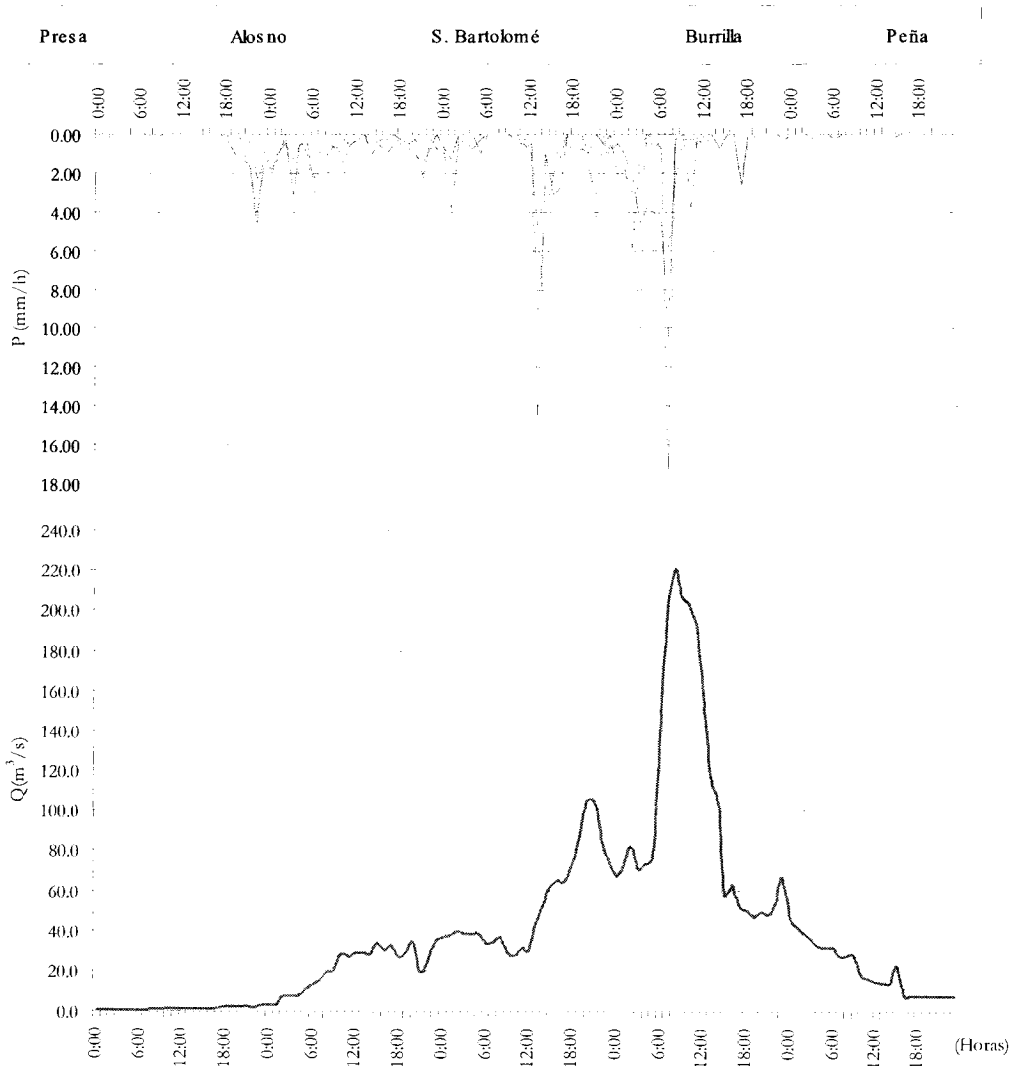


Figura 6.7: Hidrograma de la tormenta de 16 de diciembre de 2002 (Tormenta 1)



**6.1.2.2. Tormenta de 24 de febrero de 2003 (Tormenta 2)**

Analizando la Figura 6.8 se puede observar que la duración del evento es de dos días y medio, con un periodo intermedio de unas ocho horas en el que cesa la precipitación. En este caso la precipitación registrada en Alosno y San Bartolomé es muy superior a las demás.

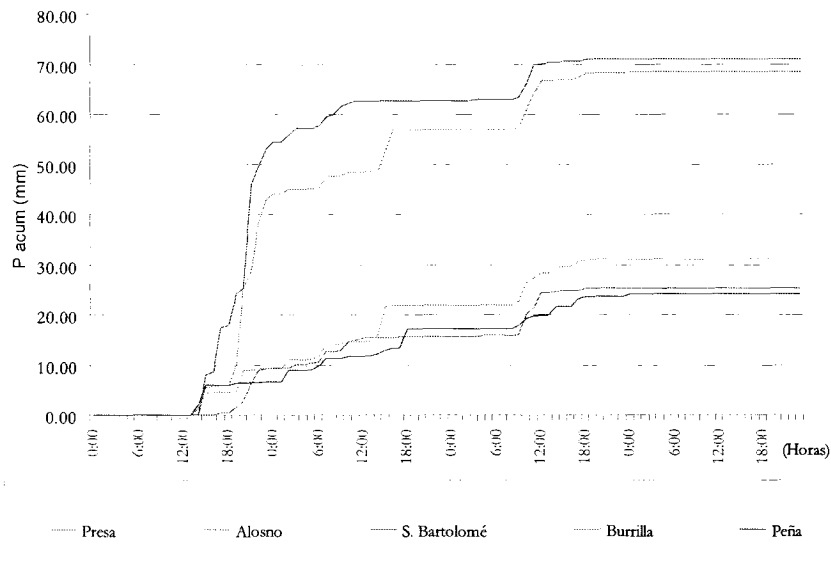


Figura 6.8: Pluviograma de 24 de febrero de 2003 (Tormenta 2)

El evento de precipitación generó un hidrograma con una duración efectiva de unos tres días, realizando un aporte al embalse de 9,78 hm<sup>3</sup>, con un caudal punta o máximo de 160,3 m<sup>3</sup>/s, datos que se recogen en la Tabla 6.2 y en la Figura 6.9.

Tabla 6.2: Datos de la tormenta de 24 de febrero de 2003 (Tormenta 2)

DÍA	APORTES hm <sup>3</sup>	PRECIPITACIÓN (mm)				
		Presa	Alosno	San Bartolomé	La Burrilla	La Peña
24-feb-03	1,15	9,11	42,88	53,07	9,11	6,58
25-feb-03	5,43	6,56	14,18	9,63	12,68	10,62
26-feb-03	2,18	9,62	11,17	8,35	9,13	6,59
27-feb-03	1,02	0,00	0,25	0,00	0,25	0,25
<b>Total</b>	<b>9,78</b>	<b>25,54</b>	<b>68,48</b>	<b>71,05</b>	<b>31,17</b>	<b>24,29</b>

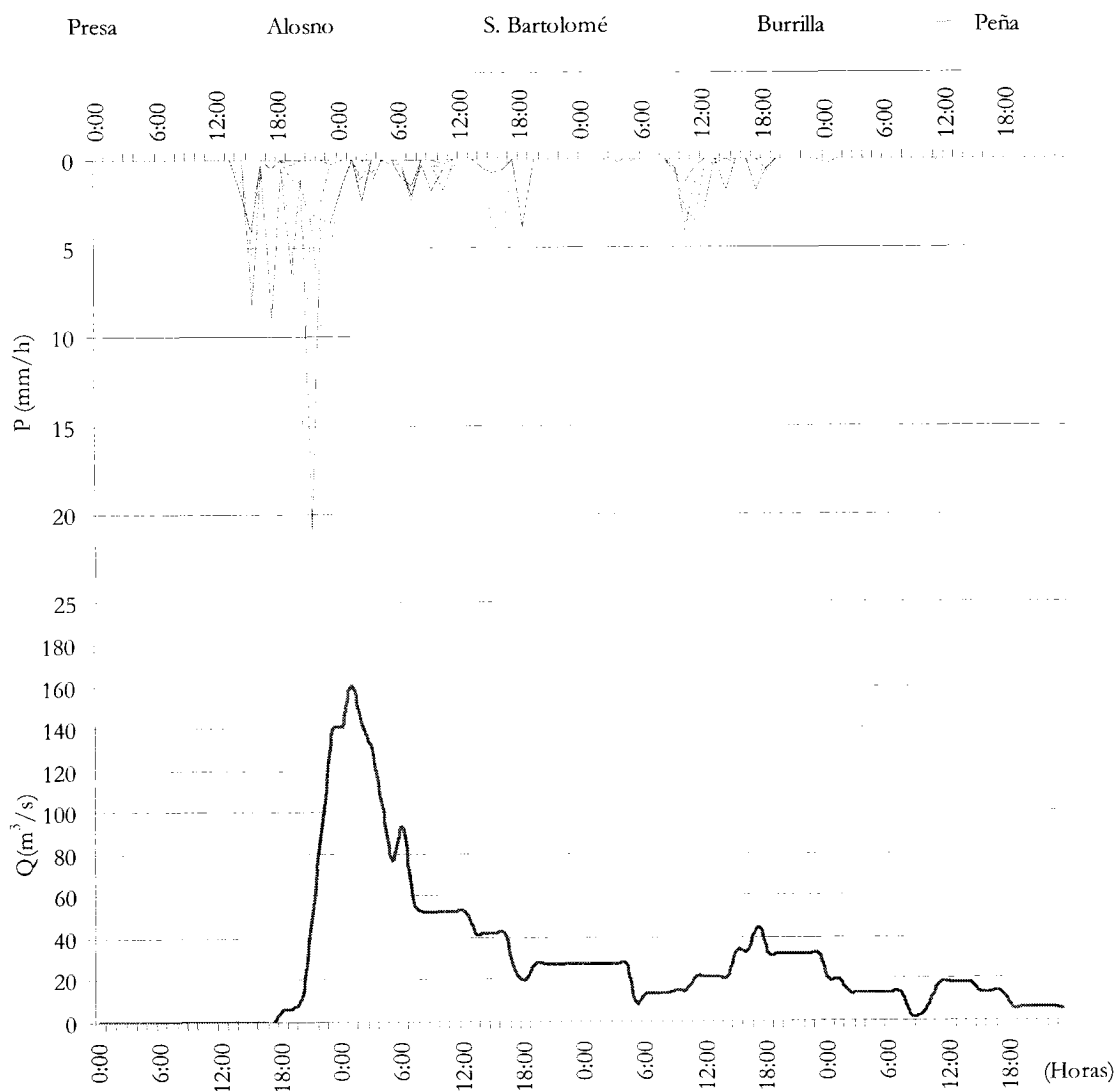


Figura 6.9: Hidrograma de la tormenta de 2 de febrero de 2003 (Tormenta 2)

**6.1.2.3. Tormenta de 27 de marzo de 2003 (Tormenta 3)**

La precipitación de este evento se concentró en la parte baja de la cuenca, en las proximidades de la Presa, como se puede ver en la Figura 6.10, originando un reparto espacial muy desigual de la precipitaciones.

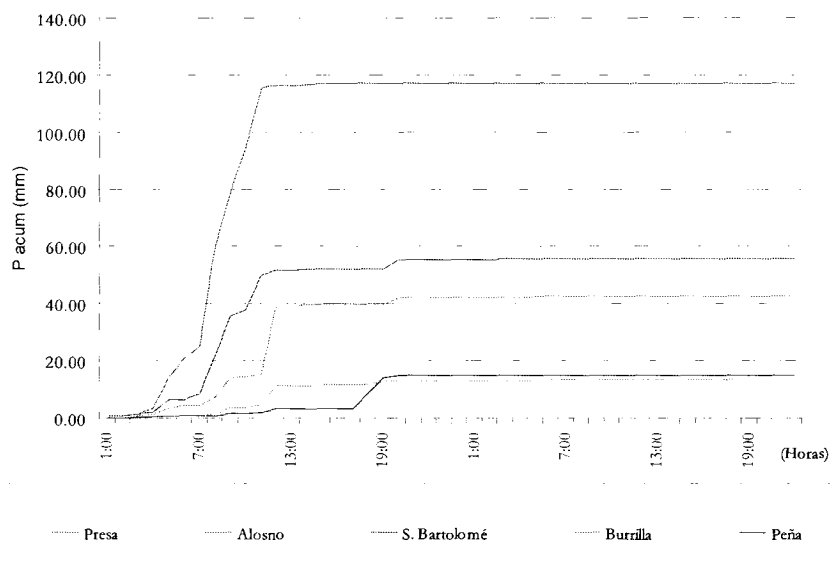


Figura 6.10: Pluviograma de la tormenta de 27 de marzo de 2003 (Tormenta 3)

Esta tormenta genera una respuesta muy rápida de la cuenca, con un volumen de escorrentía aportado de 3,56 hm<sup>3</sup> y un caudal punta de 209,5 m<sup>3</sup>/s, como se recoge en la Tabla 6.3 y en la Figura 6.11.

Tabla 6.3: Datos de la tormenta de 27 de marzo de 2003 (Tormenta 3)

DÍA	APORTES hm <sup>3</sup>	PRECIPITACIÓN (mm)				
		Presa	Alosno	San Bartolomé	La Burrilla	La Peña
27-marz-03	3,48	117,02	42,14	55,37	12,91	14,69
28-marz-03	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Total</b>	<b>3,56</b>	<b>117,02</b>	<b>42,14</b>	<b>55,37</b>	<b>12,91</b>	<b>14,69</b>

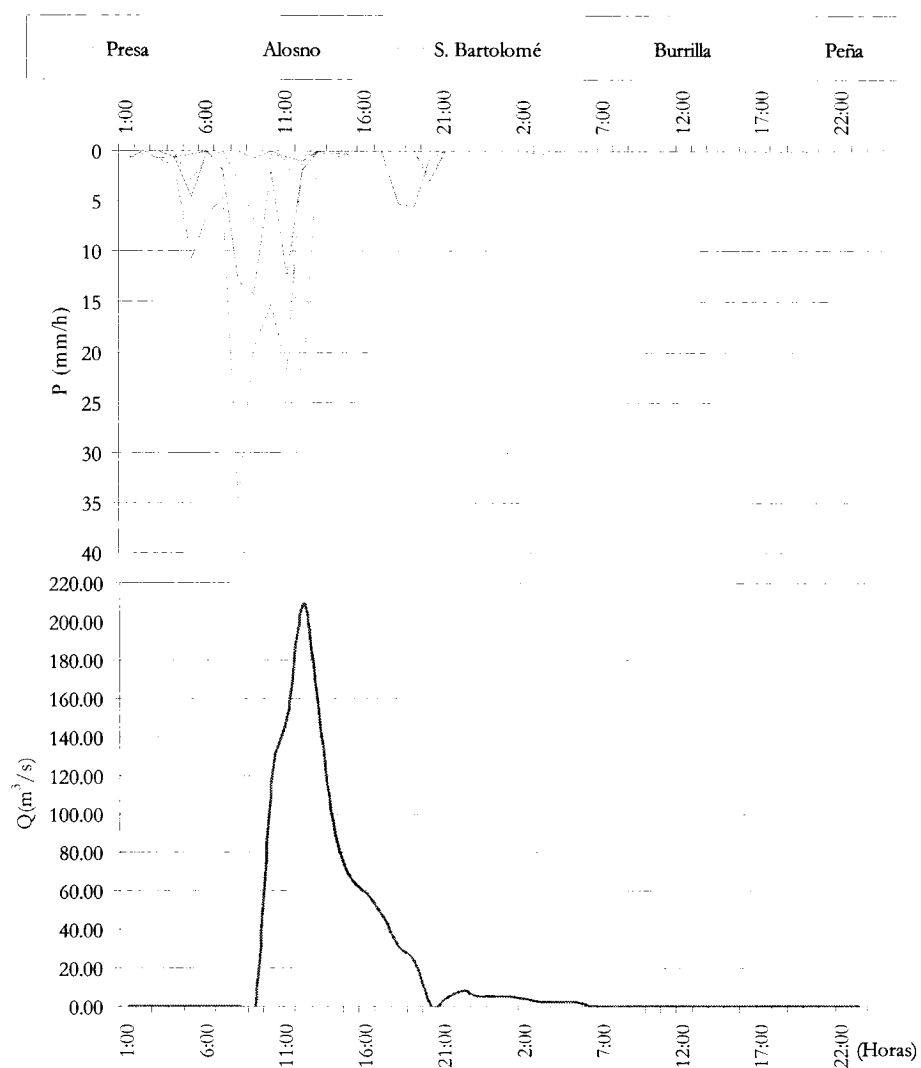


Figura 6.11: Hidrograma de la tormenta de 27 de marzo de 2003 (Tormenta 3)

#### 6.1.2.4. Tormenta de 22 de abril de 2003 (Tormenta 4)

Este evento presenta un precipitación corta y de carácter moderado, registrándose la máxima intensidad horaria en la estación de Alosno con un valor de 19,56 mm/h.

Como se puede observar en la Figura 6.12, la distribución espacial de la precipitación es bastante homogénea, si bien cabe destacar que, respecto a las tormentas anteriores, la tendencia de precipitación se invierte ligeramente, al concentrarse las mayores precipitaciones en la zona alta de la cuenca.

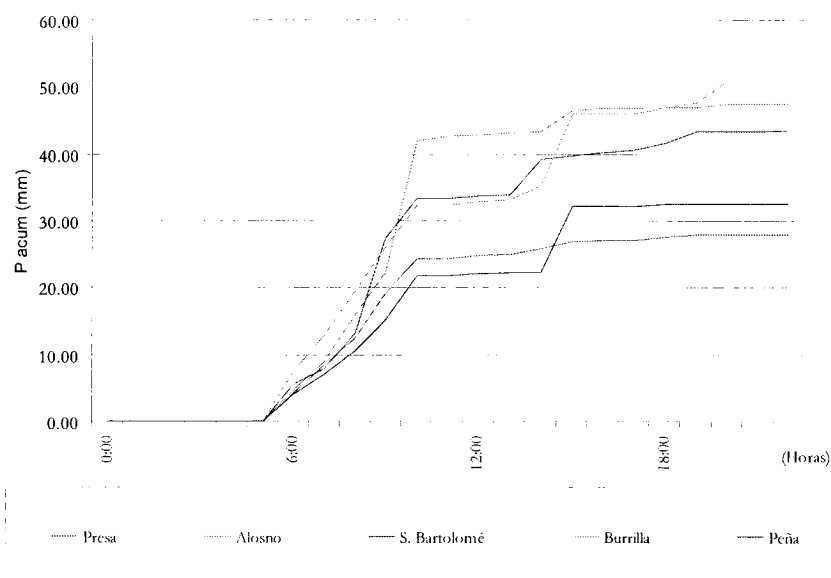


Figura 6.12: Pluviograma de la tormenta de 22 de abril de 2003 (Tormenta 4)

La respuesta de la cuenca ante este evento de precipitación se traduce en un caudal punta de 114,95 m<sup>3</sup>/s y un volumen de escorrentía superficial de 5,74 hm<sup>3</sup>, aportado a lo largo de un día, como se observa en la Tabla 6.4 y en la Figura 6.13.

Cabe destacar la forma que presenta el hidrograma, con una respuesta relativamente rápida, pero con una curva de recesión mantenida en el tiempo hasta que finaliza el aguacero, momento en el que se agota rápidamente el caudal. Posiblemente esta circunstancia está originada por el desfase de la precipitación en las distintas estaciones, puesto que llueve intensamente en los primeros momentos sobre Alosno y San Bartolomé para, pasado un tiempo, invertirse la situación y producirse una lluvia moderadamente intensa en la Burrilla y la Peña.

Tabla 6.4: Datos de la tormenta de 22 de abril de 2003 (Tormenta 4)

DÍA	APORTES hm <sup>3</sup>	PRECIPITACIÓN (mm)				
		Presa	Alosno	San Bartolomé	La Burrilla	La Peña
22-abr-03	5,74	27,86	47,49	43,61	50,98	32,49
<b>Total</b>	<b>5,74</b>	<b>27,86</b>	<b>47,49</b>	<b>43,61</b>	<b>50,98</b>	<b>32,49</b>

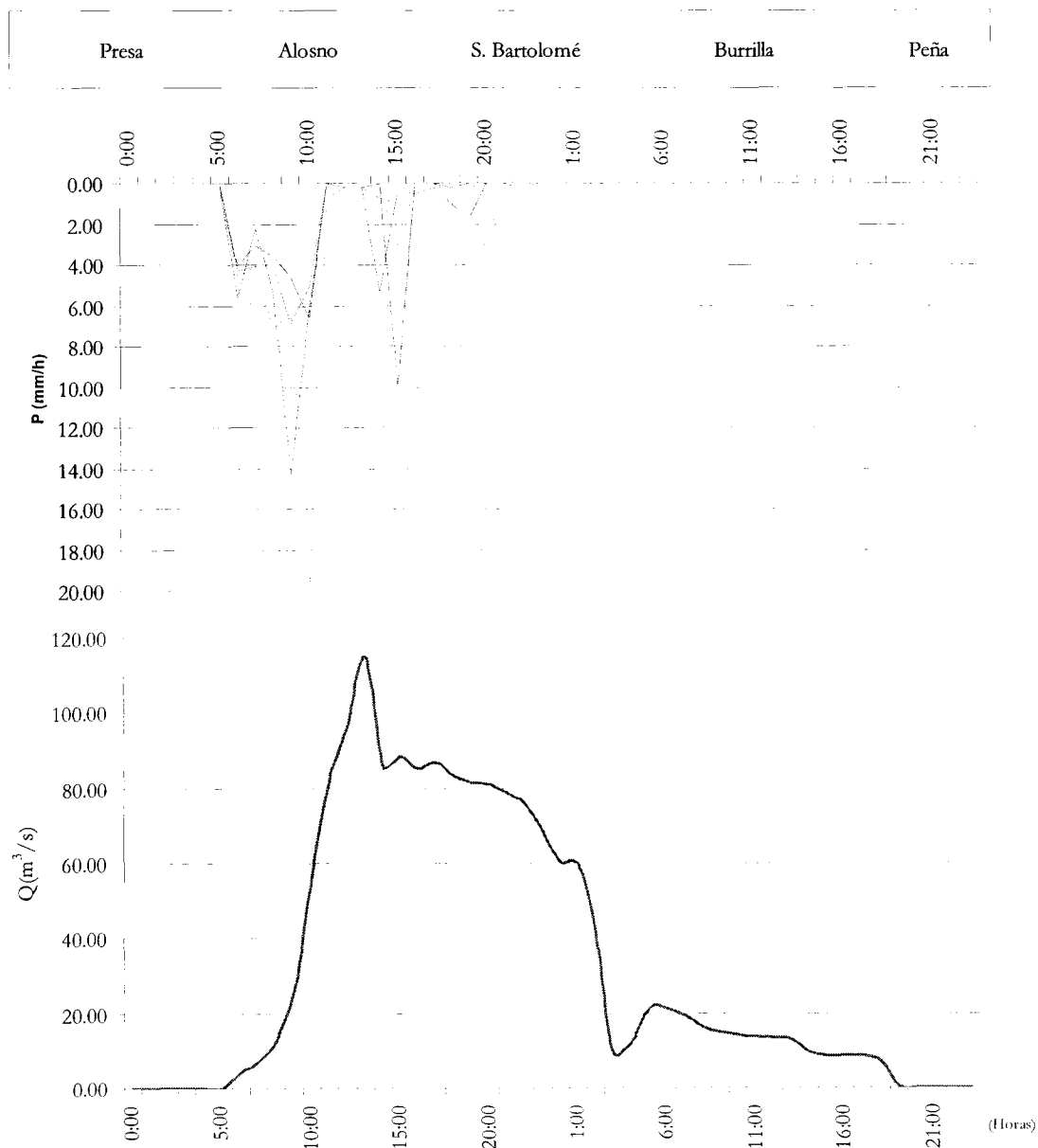


Figura 6.13: Hidrograma de la tormenta de 22 de abril de 2003 (Tormenta 4)

### 6.1.2.5. Tormenta de 5 de diciembre de 2003 (Tormenta 5)

Aguacero de duración corta y de intensidad baja, presentando una máxima horaria de 11,20 mm/h para la estación de la Presa.

De la Figura 6.14 se desprende que es un evento que presenta gran homogeneidad espacial y temporal, manteniéndose la tendencia de descenso de la precipitación hacia las zonas altas de la cuenca (La Peña).

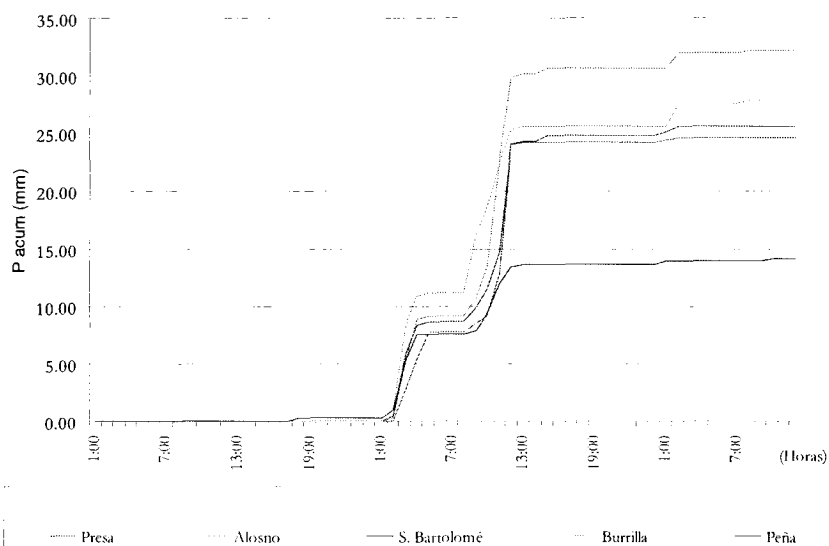


Figura 6.14: Pluviograma de la tormenta de 5 de diciembre de 2003 (Tormenta 5)

La respuesta de la cuenca se traduce en un hidrograma que aporta 4,47 hm<sup>3</sup> con un pico único que alcanza el valor de 91,967 m<sup>3</sup>/s. Presenta una duración aproximadamente de un día, como se refleja en la Tabla 6.5 y en la Figura 6.15.

Tabla 6.5: Datos de la tormenta de 5 de diciembre de 2003 (Tormenta 5)

DÍA	APORTES hm <sup>3</sup>	PRECIPITACIÓN (mm)				
		Presa	Alosno	San Bartolomé	La Burrilla	La Peña
05-dic-03	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25
06-dic-03	3,49	24,20	30,72	24,87	25,62	13,45
07-dic-03	0,88	0,40	1,52	0,75	2,28	0,50
<b>Total</b>	<b>4,47</b>	<b>24,60</b>	<b>32,24</b>	<b>25,62</b>	<b>27,90</b>	<b>14,20</b>

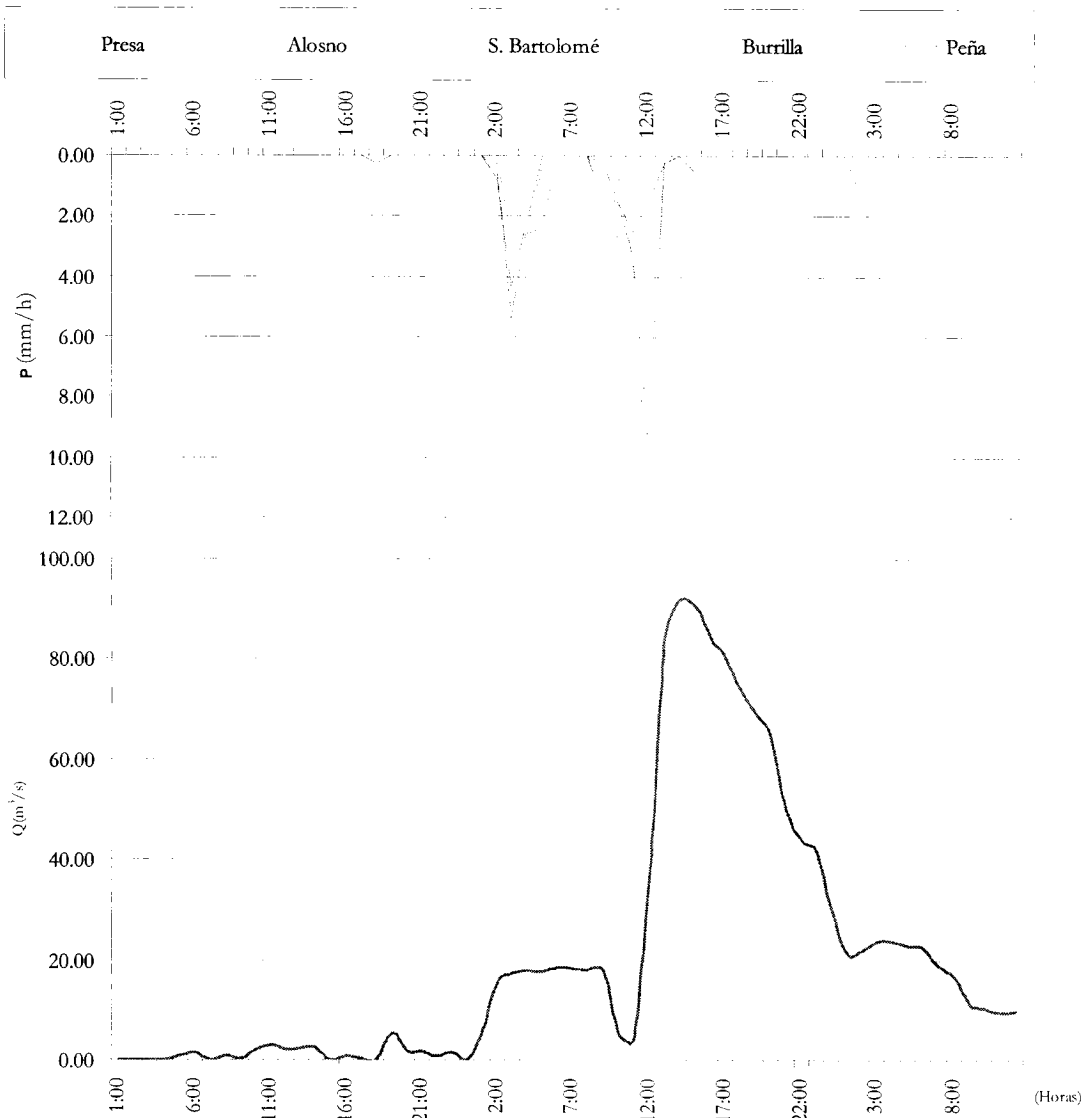


Figura 6.15: Hidrograma de la tormenta de 5 de diciembre de 2003 (Tormenta 5)

### 6.1.2.6. Tormenta de 8 de diciembre de 2003 (Tormenta 6)

El presente episodio tormentoso es continuación de la tormenta 5, pues tan sólo transcurre un día entre las precipitaciones.

Como se aprecia en la Figura 6.16, el evento está dividido en dos tramos de precipitación, ambos con una gran homogeneidad espacial y temporal, y pudiendo calificarlo como de baja intensidad.

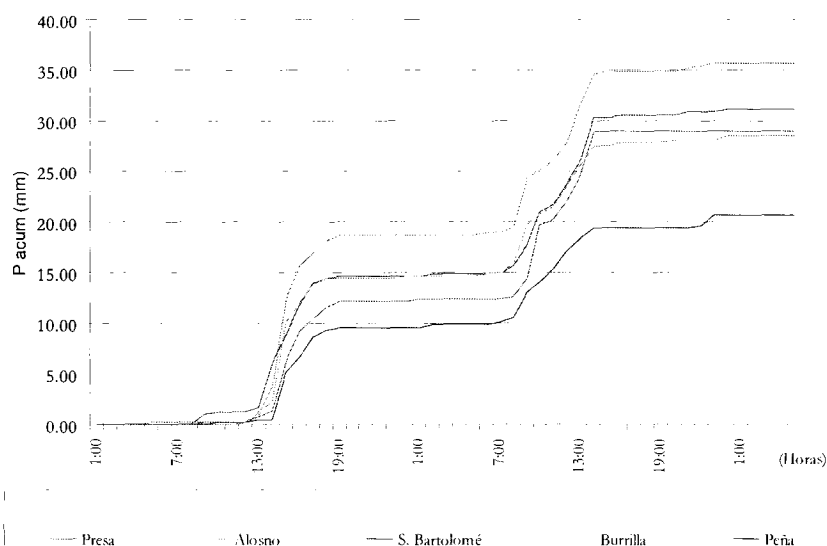


Figura 6.16: Pluviograma de la tormenta de 8 de diciembre de 2003 (Tormenta 6)

Al tratarse de un aguacero de escasa intensidad, la respuesta de la cuenca es relativamente suave, aportándose un volumen de agua de  $6,26 \text{ hm}^3$ , como se puede observar en la Tabla 6.6.

Debido a las partes bien diferenciadas de precipitación que aparecen en el desarrollo del evento, se pueden apreciar en el hidrograma dos picos consecutivos, si bien el más interesante es el mayor de ellos, que presenta un caudal de  $94,97 \text{ m}^3/\text{s}$  (Figura 6.17).

La proximidad de este evento con el anterior puede provocar que exista un flujo de escorrentía subsuperficial mayor de lo esperado, al no haber habido tiempo suficiente para que este tipo de escorrentía diferida entre en recesión, por lo que los caudales registrados en la presa pueden verse incrementados.

Tabla 6.6: Datos de la tormenta de 8 de diciembre de 2003 (Tormenta 6)

DÍA	APORTES $\text{hm}^3$	PRECIPITACIÓN (mm)				
		Presa	Alosno	San Bartolomé	La Burrilla	La Peña
08-dic-03	1,73	12,20	18,73	14,69	14,41	9,59
09-dic-03	4,28	16,80	16,95	16,18	13,64	11,09
10-dic-03	0,25	0,00	0,00	0,25	0,51	0,00
<b>Total</b>	<b>6,26</b>	<b>29,00</b>	<b>35,68</b>	<b>31,12</b>	<b>28,56</b>	<b>20,68</b>

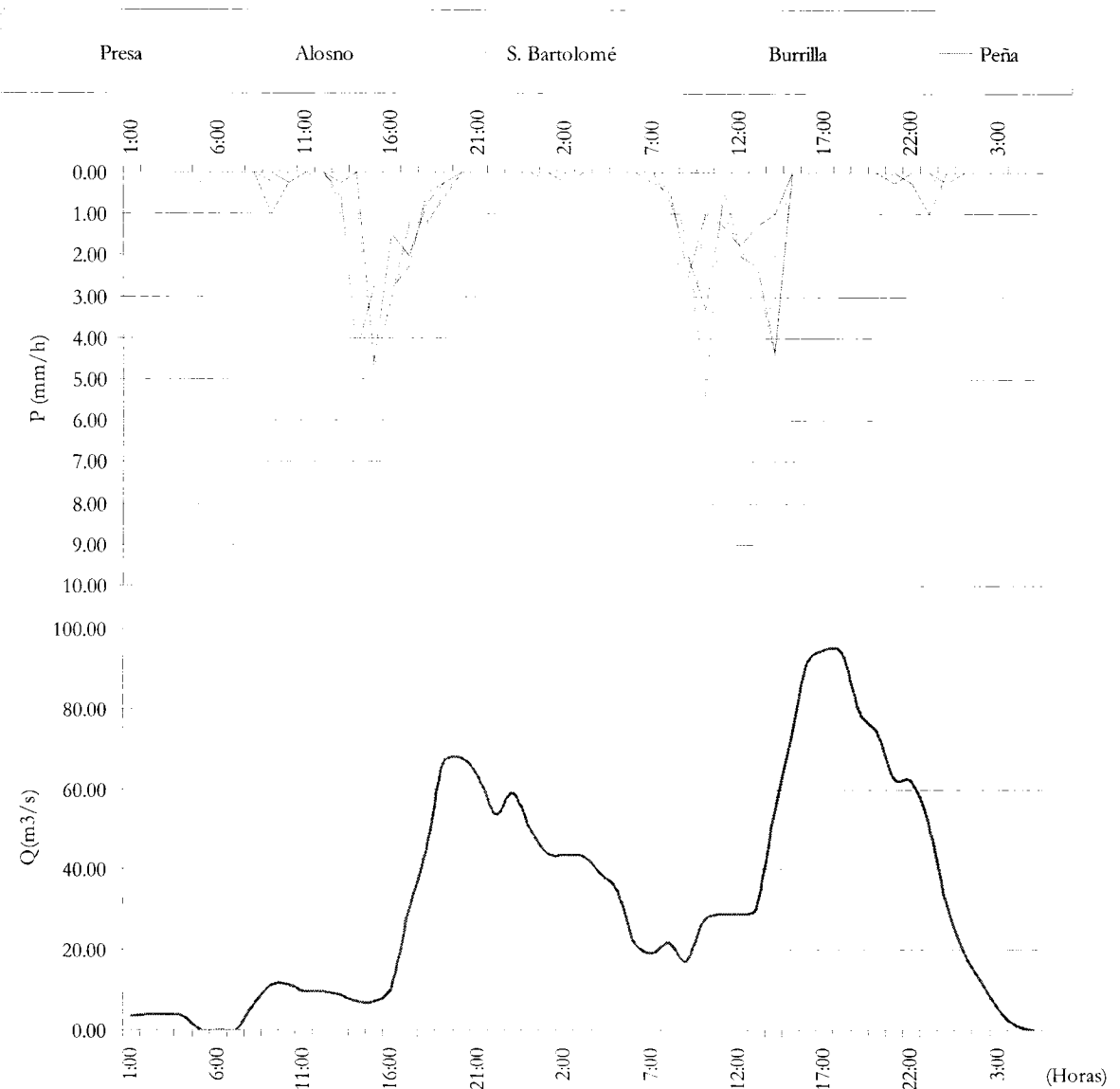


Figura 6.17: Hidrograma de la tormenta de 8 de diciembre de 2003 (Tormenta 6)

**6.1.2.7. Tormenta de 20 de febrero de 2004 (Tormenta 7)**

Analizando el pluviograma de la tormenta (Figura 6.18) se puede decir que es un evento de gran homogeneidad espacio-temporal dentro de la cuenca, con intensidades moderadas pero concentradas en el tiempo.

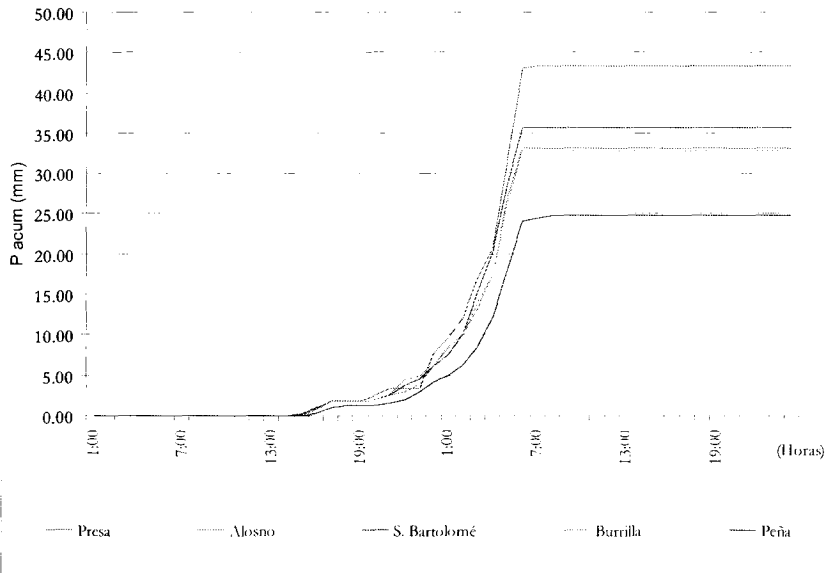


Figura 6.18: Pluviograma de la tormenta de 20 de febrero de 2004 (Tormenta 7)

La concentración de la precipitación provoca una respuesta rápida de la cuenca, con un caudal punta que alcanza los 92,36 m<sup>3</sup>/s, y un volumen de escorrentía moderado de 2,85 hm<sup>3</sup>, como se recoge en la Tabla 6.7 y en la Figura 6.19.

Tabla 6.7: Datos de la tormenta de 20 de febrero de 2004 (Tormenta 7)

DÍA	APORTES hm <sup>3</sup>	PRECIPITACIÓN (mm)				
		Presa	Alosno	San Bartolomé	La Burrilla	La Peña
20-feb-04	0,05	3,40	4,01	4,51	5,02	3,00
21-feb-04	2,79	40,00	29,17	31,21	27,91	21,81
<b>Total</b>	<b>2,85</b>	<b>43,40</b>	<b>33,18</b>	<b>35,72</b>	<b>32,93</b>	<b>24,81</b>

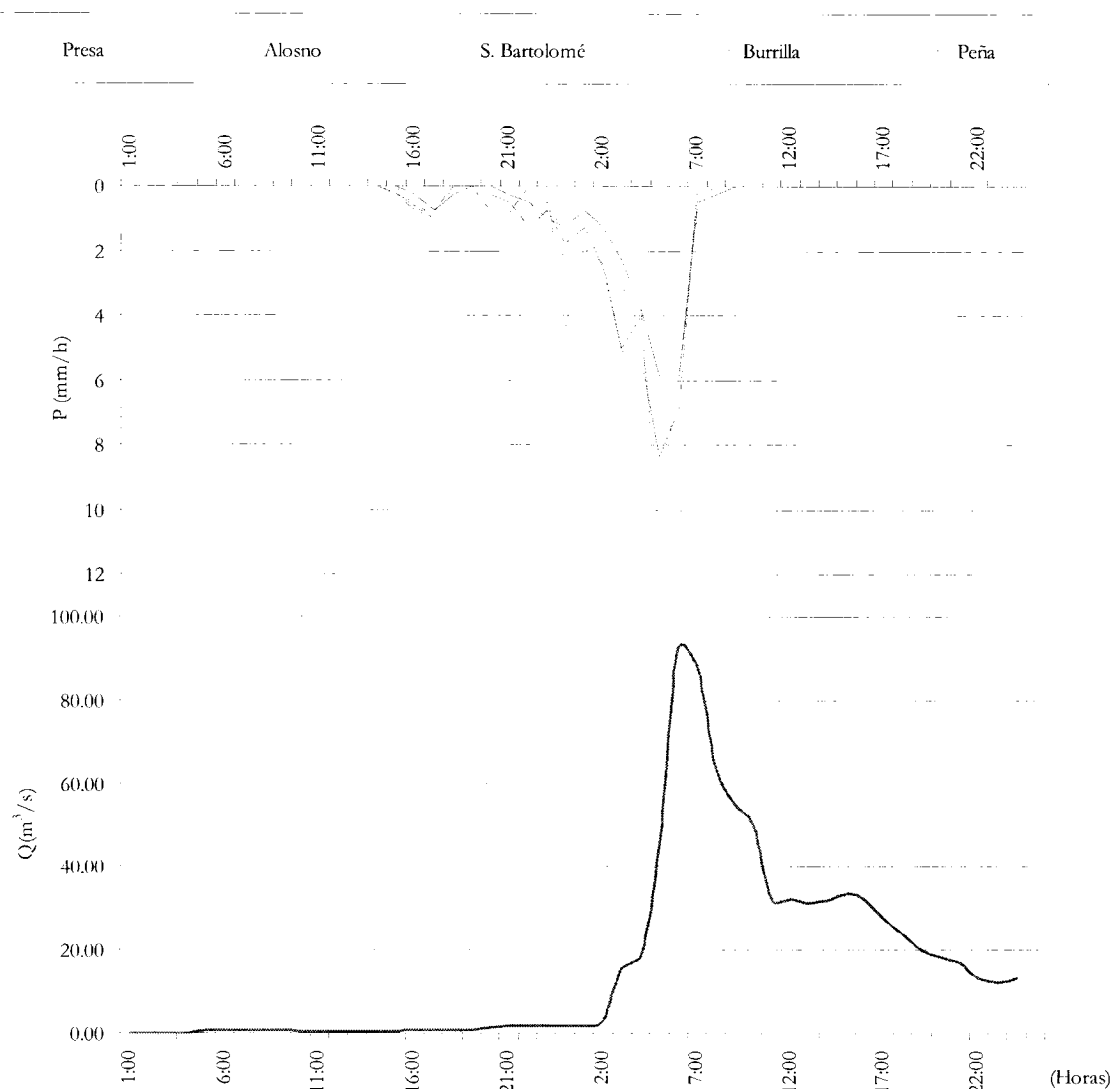


Figura 6.19: Hidrograma de la tormenta de 20 de febrero de 2004 (Tormenta 7)

### 6.1.2.8. Tormenta de 23 de febrero de 2004 (Tormenta 8)

Este evento de precipitación es prácticamente continuación del anterior, tratándose de una precipitación relativamente larga de gran homogeneidad espacial y con intensidades moderadas.

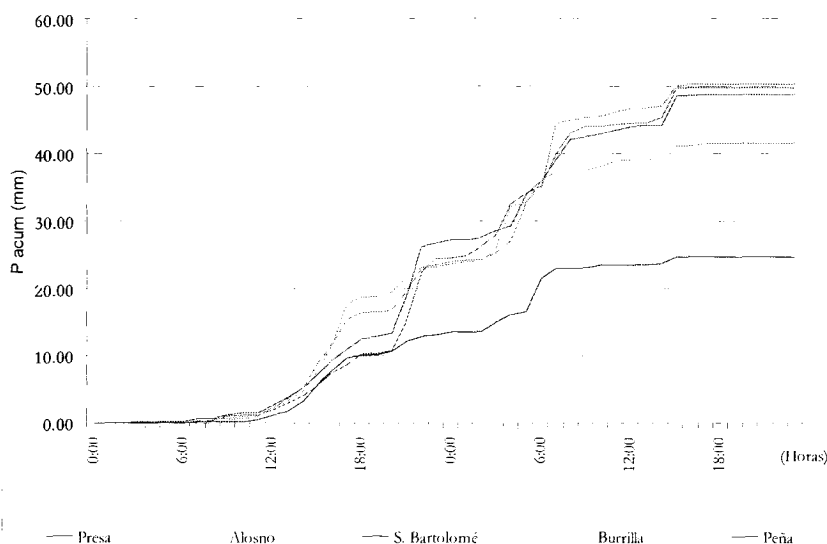


Figura 6.20: Pluviograma de la tormenta de 23 de febrero de 2004 (Tormenta 8)

La respuesta de la cuenca es moderada, presentando dos pico de caudal, debido a las bajas intensidades de precipitación que se registran en el tramo central de la tormenta.

En la Tabla 6.8 y en la Figura 6.21 se puede observar que el caudal punta máximo alcanza el valor de  $186,17 \text{ m}^3/\text{s}$ . El volumen de escorrentía aportado es de  $8,26 \text{ hm}^3$ .

Hay que destacar que la proximidad entre la tormenta 7 y la 8 puede provocar una ligera distorsión del hidrograma por la probable existencia de volúmenes de escorrentía subsuperficial mayores de lo previsible.

Tabla 6.8: Datos de la tormenta de 23 de febrero de 2004 (Tormenta 8)

DÍA	APORTES $\text{hm}^3$	PRECIPITACIÓN (mm)				
		Presa	Alosno	San Bartolomé	La Burrilla	La Peña
23-feb-04	1,12	24,40	23,53	26,80	23,25	13,12
24-feb-04	7,11	25,40	26,86	22,06	18,22	11,63
25-feb-04	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Total</b>	<b>8,26</b>	<b>49,80</b>	<b>50,39</b>	<b>48,86</b>	<b>41,47</b>	<b>24,75</b>

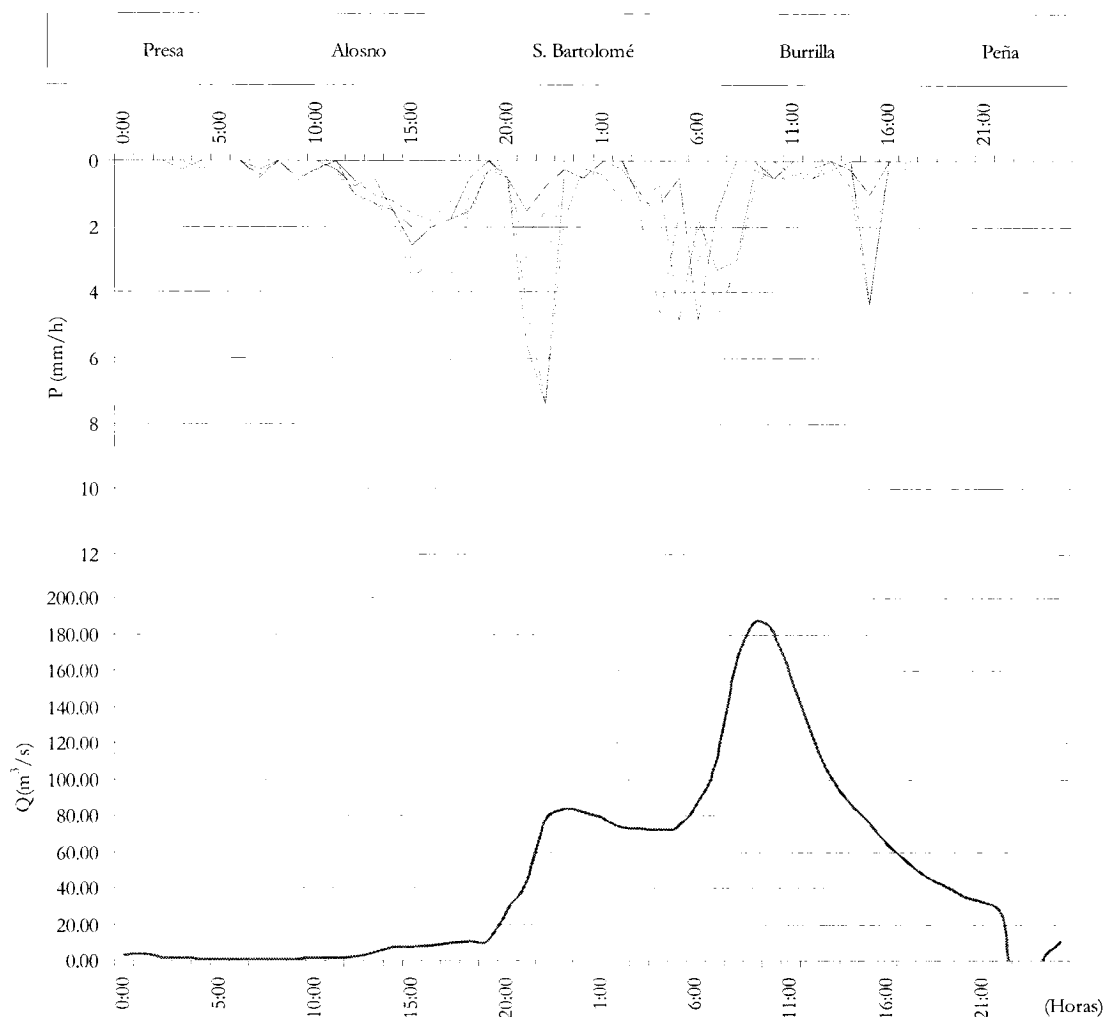


Figura 6.21: Hidrograma de la tormenta de 23 de febrero de 2004 (Tormenta 8)

## 6.2. CARACTERIZACIÓN Y MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DE EL SANCHO

El presente epígrafe describe el modelo hidrológico utilizado para la estimación de caudales de entrada al embalse, a partir de los datos distribuidos de lluvia-escorrentía, para los eventos tormentosos ya descritos.

El modelo ha hecho uso, a través de un sistema de información geográfica, de toda la información hidrológica disponible, tanto de los episodios de lluvia registrados por la red de estaciones automáticas en la cuenca del embalse, como de la información geomorfológica y cartográfica.

Para la transformación lluvia-escorrentía se ha utilizado un modelo conceptual distribuido incorporado en el programa informático HEC-HMS 2.2.2 (*Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System*), desarrollado por el *U.S. Army Corps of Engineers*, que simula los procesos de precipitación-escorrentía mediante diversos submodelos (producción de escorrentía directa, transformación del hietograma neto en escorrentía y propagación en

cauces) que se corresponden con las distintas fases del proceso de generación de hidrogramas (USACE, 2000).

### 6.2.1. Caracterización física e hidromorfométrica de la cuenca de El Sancho

La caracterización del sistema hidrológico vertiente a la presa de El Sancho se ha efectuado a través de un sistema de información geográfica basado en el programa ArcGis (ESRI, 2000) y apoyado en la herramienta de procesado hidrológico ArcHydro, que permite conocer las principales variables hidrológicas.

El trabajo de caracterización hidrológica de la cuenca requiere como único dato de partida un modelo digital de elevaciones (MDE), definiéndose como un conjunto de datos numéricos georreferenciados que representan la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno (Felicísimo, 1994). En este caso se ha utilizado el MDE de precisión, en formato raster de resolución 10 x 10 metros, de la Junta de Andalucía, creado en 2005 a partir del procesado y ortorectificado de un vuelo fotogramétrico.

Las labores de caracterización de la cuenca de El Sancho se pueden dividir en dos etapas: una primera de creación de un MDE hidrológicamente correcto y una segunda de caracterización hidrológica de la cuenca vertiente, como se puede ver en la Figura 6.22.

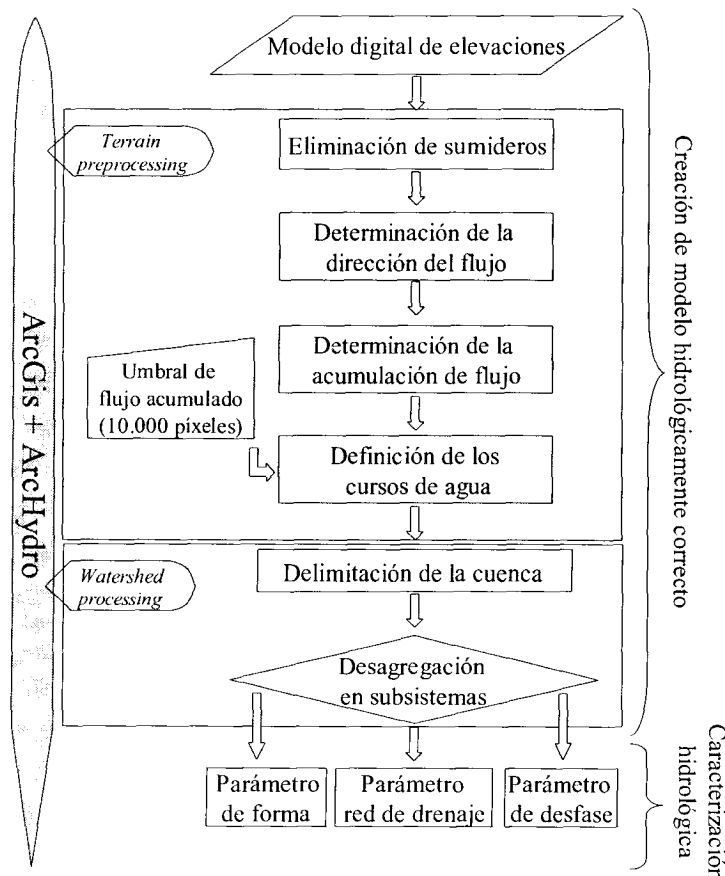


Figura 6.22: Diagrama de flujo de la caracterización física e hidromorfométrica de la cuenca de El Sancho

### 6.2.1.1. Creación de un modelo hidrológicamente correcto

La creación de un modelo hidrológicamente correcto es una fase fundamental, puesto que condiciona la calidad del resto de capas de información derivadas de él y, por tanto, la fiabilidad de los parámetros que caracterizan al sistema hidrológico estudiado: mayor precisión en el trazado de las divisorias topográficas de las cuencas, mejor determinación de las superficies y una mayor precisión en la estimación de la red de drenaje asociada al sistema.

El esquema operativo seguido por los módulos “*Terrain preprocessing*” y “*Watershed processing*” de ArcHydro se describe, de forma resumida, a continuación:

#### a) Eliminación de sumideros

En esta fase se eliminan aquellas pequeñas imperfecciones del MDE que provocan una interrupción del flujo de agua sobre la superficie del terreno, lo que se conoce como píxeles sumideros. Son puntos del territorio con cota más baja que todos aquellos que les rodean y que, por tanto, atrapan el flujo de escorrentía y dan como resultado una red de drenaje discontinua. Dicho proceso de corrección se muestra en la Figura 6.23 y básicamente consiste en una corrección de la cota del sumidero hasta igualar el siguiente píxel más bajo.

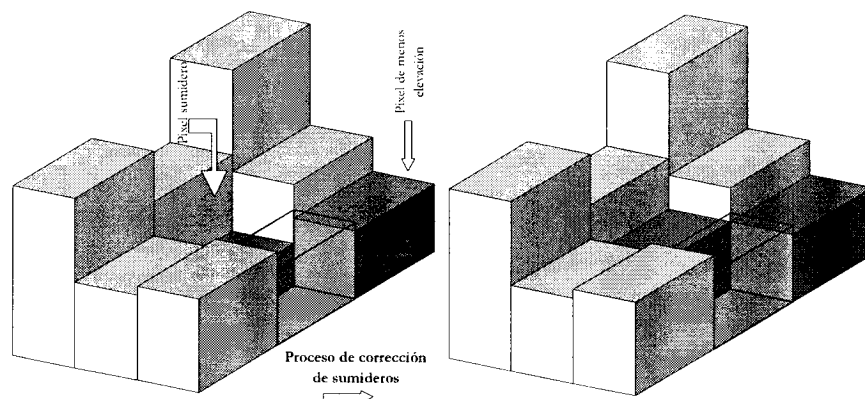


Figura 6.23: Representación gráfica del proceso de corrección de un sumidero

#### b) Determinación de la dirección del flujo superficial

Una vez obtenido un modelo digital de elevaciones en el que el flujo de agua superficial es continuo, se puede determinar la dirección de ese flujo. Esta operación reporta una imagen raster en la cual el valor digital almacenado en cada píxel representa la dirección de vertido del flujo superficial según la línea de máxima pendiente, como se puede ver en la Figura 6.24.

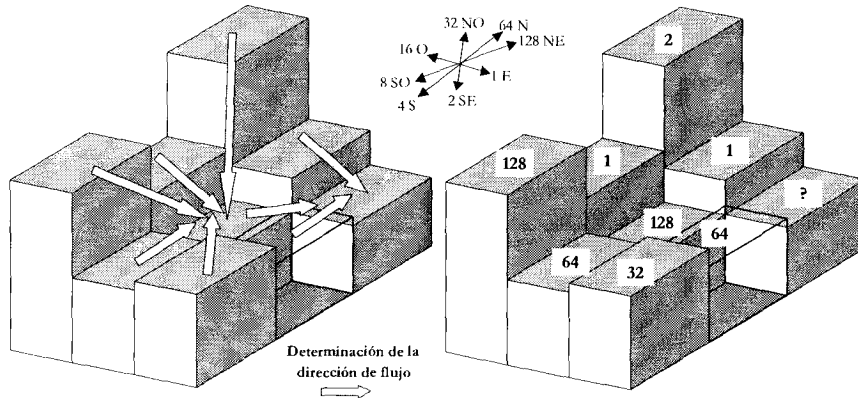


Figura 6.24: Determinación de la dirección de flujo superficial

**c) Determinación de la acumulación de flujo sobre la superficie del terreno**

Mediante esta operación se crea una imagen raster en la cual el valor digital almacenado en cada píxel representa el número de celdas totales que vierten su escorrentía superficial a esa celda o el valor del área drenada por cada celda, en número de píxeles, como se puede ver en la Figura 6.25.

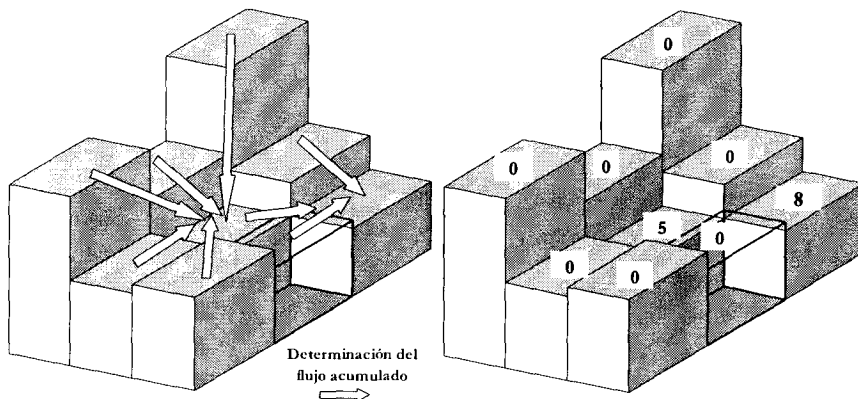


Figura 6.25: Determinación del flujo acumulado

**d) Definición de los cursos de agua**

Una vez corregido el modelo y conocida la dirección y la acumulación del flujo se ha procedido a determinar las zonas de mayor acumulación o concentración de flujo. Se ha fijado como umbral de definición de la red de drenaje 10.000 píxeles, equivalente a una superficie de 1 km<sup>2</sup>, obteniéndose el esquema de la red de drenaje de la cuenca que se muestra en la Figura 6.26.

**e) Delimitación de la cuenca asociada a la red de drenaje**

A partir del MDE corregido y con las herramientas incorporadas en el sistema de información geográfica, así como del módulo “*Watershed processing*” de ArcHydro, se ha determinado la cuenca vertiente al embalse de El Sancho, considerando como punto de desagüe de la misma el muro de la presa, definido por las siguientes coordenadas UTM del huso 30: 147.814 m E y 4.153.807 m N.

En la Figura 6.26 se puede apreciar la divisoria topográfica correspondiente, de la que se derivan las siguientes características morfométricas:

- Superficie de la cuenca: 314,94 km<sup>2</sup>
- Perímetro de la cuenca: 128,94 km

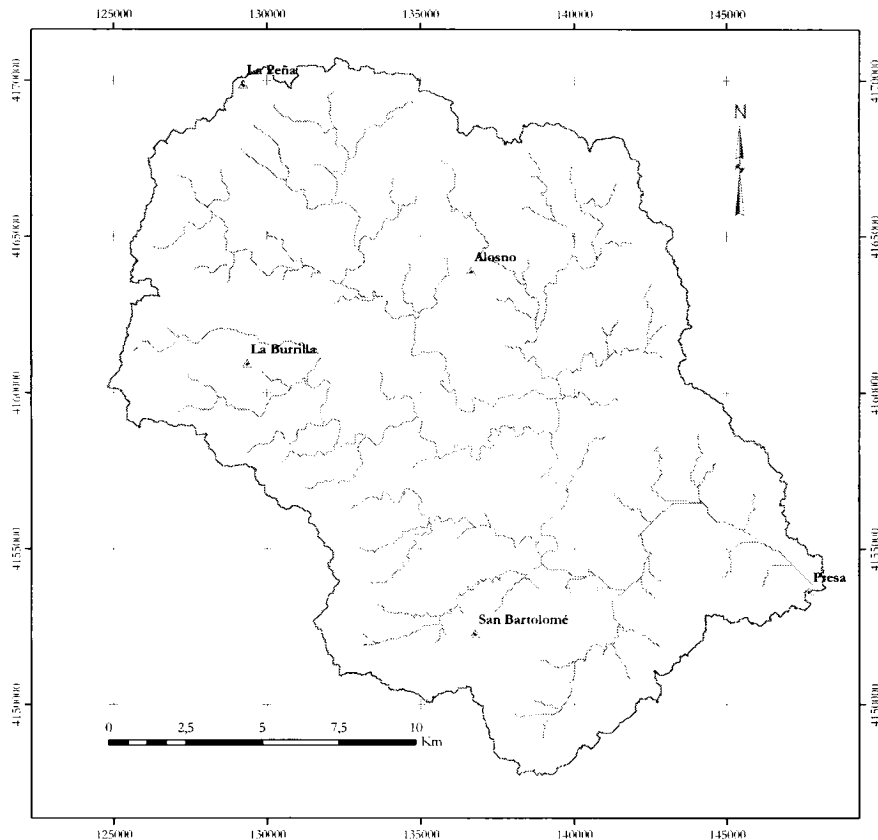


Figura 6.26: Cuenca del embalse de El Sancho y su red de drenaje

Con el fin de conocer de forma más precisa el comportamiento y la parametrización del sistema hidrológico, se ha procedido a la fragmentación del mismo en diversos subsistemas hidrológicos de menor entidad, denominados subcuencas (SC). Esta desagregación se ha realizado procurando disminuir al mínimo las intercuenas o subcuencas intermedias (SIC).

El resultado de la fragmentación del sistema es el que se muestra en la Figura 6.27, obteniéndose para cada subsistema las características morfométricas mostradas en la tabla siguiente.

Tabla 6.9: Características morfométricas de los subsistemas hidrológicos del embalse de El Sancho

Subsistema	Superficie (km <sup>2</sup> )	Perímetro (km)
SC-1	33,93	41,46
SC-2	54,13	50,38
SC-3	23,26	35,98
SC-4	22,95	33,88
SC-5	19,48	32,66
SC-6	37,17	40,00
SC-7	26,49	33,56
SIC-1	26,89	53,70
SIC-2	15,21	34,32
SIC-3	10,25	25,58
SIC-4	6,23	21,36
SIC-5	38,95	43,10

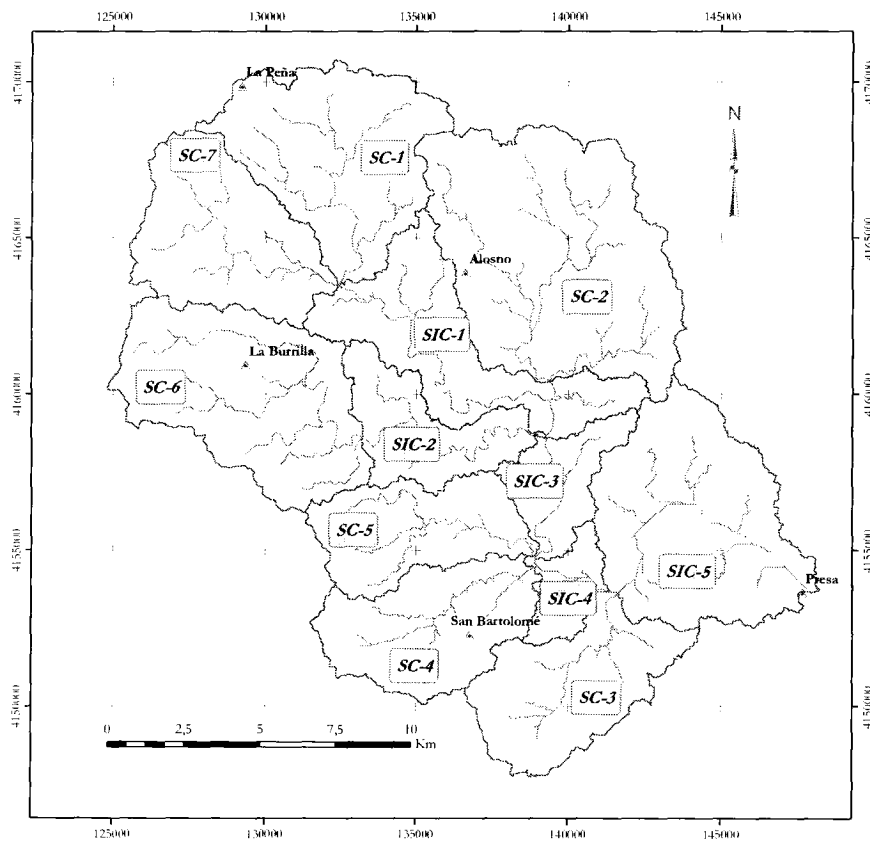


Figura 6.27: Subsistemas resultantes de la fragmentación de la cuenca del embalse de El Sancho

### 6.2.1.2. Caracterización hidrológica de la cuenca

Una vez concluida la fase de corrección y definición del sistema hidrológico del embalse de El Sancho se puede iniciar la caracterización hidrológica de la cuenca a través de los distintos parámetros hidromorfométricos, puesto que éstos tienen una influencia decisiva en los mecanismos de propagación de la escorrentía superficial.

#### a) Parámetro de forma

El parámetro más habitual para estimar la forma de la cuenca es el coeficiente de compacidad ( $K_c$ ) o índice de Gravelius, que es la relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo de igual área que la cuenca (Monsalve, 1999), de tal forma que:

$$K_c = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad 6.11$$

Donde:  $K_c$  es el índice de compacidad

$P$  es el perímetro de la cuenca (km)

$A$  es el área de la cuenca (km<sup>2</sup>)

La forma de la cuenca se define en función de los valores que toma el índice de compacidad, como se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 6.10: Interpretación del índice de compacidad (Monsalve, 1999)

Valores de $K_c$	Forma de la cuenca
$1,00 \leq K_c < 1,25$	Cuenca redonda
$1,25 \leq K_c < 1,50$	Cuenca ovalada
$1,5 \leq K_c < 1,75$	Cuenca oblonga
$K_c \geq 1,75$	Cuenca muy alargada

Aplicando la Fórmula 6.11 y los criterios de la Tabla 6.10 a los datos de las distintas subcuencas se obtienen los resultados que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 6.11: Índice de compacidad de las distintas subcuencas del sistema del embalse de El Sancho

Subsistema	$K_c$	Forma
SC-1	1,99	Muy alargada
SC-2	1,92	Muy alargada
SC-3	2,09	Muy alargada
SC-4	1,98	Muy alargada
SC-5	2,07	Muy alargada
SC-6	1,84	Muy alargada
SC-7	1,83	Muy alargada
SIC-1	2,90	Muy alargada
SIC-2	2,46	Muy alargada
SIC-3	2,24	Muy alargada
SIC-4	2,40	Muy alargada
SIC-5	1,93	Muy alargada
Sancho	2,03	Muy alargada

### b) Parámetros de la red de drenaje

La caracterización de la red de drenaje se ha realizado a través de la clasificación de Horton–Strahler y de la longitud del recorrido principal.

La clasificación de Horton–Strahler establece las siguientes premisas: la cuenca tiene un único punto de desagüe; los puntos en los que se unen dos segmentos de la red de drenaje son los nudos internos; los nudos externos son aquellos donde se origina un tramo de la red de drenaje y los tramos se jerarquizan según los siguientes criterios (Strahler, 1964, en Chow, 1994):

- i) Los tramos originados en un nudo externo son de primer orden
- ii) Cuando dos tramos de mismo orden se unen dan lugar a un tramo de orden superior
- iii) Cuando se unen dos tramos de distinto orden dan lugar a un tramo que conserva el mayor de los órdenes
- iv) El orden de la cuenca es el del tramo de mayor orden

Se ha obtenido la clasificación de la red de drenaje del sistema hidrológico estudiado, según se muestra en la siguiente figura:

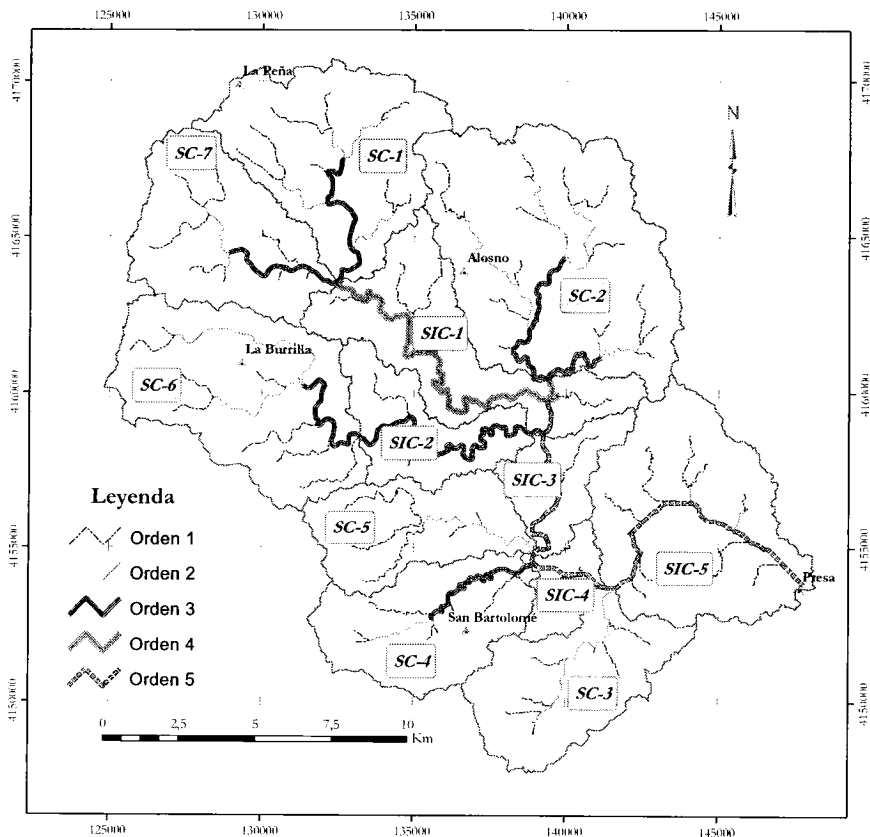


Figura 6.28: Clasificación de Horton-Strahler de la cuenca del embalse de El Sancho

Analizando la clasificación para cada uno de los subsistemas en los que queda dividida la cuenca, se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 6.12: Clasificación de Horton-Strahler de los subsistemas hidrológicos

Subcuenca	Nº de tramos de orden i					Orden de la subcuenca
	1	2	3	4	5	
SC-1	9	4	3	-	-	3
SC-2	16	10	2	-	-	3
SC-3	8	6	-	-	-	2
SC-4	9	3	4	-	-	3
SC-5	5	2	-	-	-	2
SC-7	7	3	2	-	-	3
SC-8	8	3	3	-	-	3
SIC-1	4	1	4	5	1	4
SIC-2	3	-	4	-	-	3
SIC-3	7	3	-	-	2	5
SIC-4	3	2	1	-	6	5
SIC-5	12	3	-	-	12	5
<b>Total de la cuenca</b>	<b>86</b>	<b>38</b>	<b>23</b>	<b>5</b>	<b>21</b>	<b>5</b>

En cuanto al recorrido del cauce principal (o de mayor longitud) de cada subcuenca, los resultados son los que se muestran en la Figura 6.29 y en la Tabla 6.13.

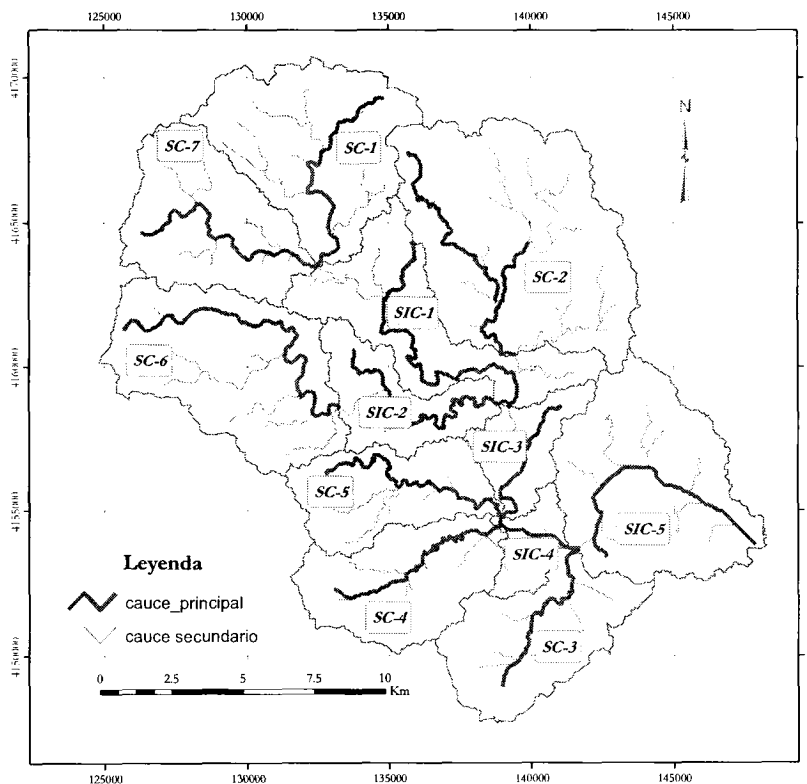


Figura 6.29: Cauces principales de los subsistemas hidrológicos

Tabla 6.13: Relación de longitudes de los cauces principales

Subsistema	Longitud del cauce principal (km)
SC-1	9,42
SC-2	11,03
SC-3	7,64
SC-4	8,39
SC-5	9,42
SC-6	12,78
SC-7	8,46
SIC-1	12,96
SIC-2	10,33
SIC-3	6,05
SIC-4	4,18
SIC-5	9,08
Sancho	43,31

### c) Parámetros de desfase: tiempo de concentración

El tiempo de concentración ( $T_c$ ) es el parámetro fundamental de caracterización de un sistema hidrológico y han sido numerosos los autores que han obtenido formulaciones del mismo a partir de características morfológicas y geométricas de la cuenca. De todas ellas destaca la fórmula de Témez, recomendada para España (MOPU, 1990), que deriva de la formulación propuesta para este parámetro por el *U.S. Army Corps of Engineers* (Témez, 1987), cuya expresión es:

$$T_c = 0,3 \cdot \left( \frac{L}{J^{1/4}} \right)^{0,76} \quad 6.12$$

Donde:  $T_c$  es el tiempo de concentración de la cuenca en horas

$L$  es la longitud del cauce principal en kilómetros

$J$  es la pendiente media del cauce principal en tanto por uno y que se calcula como (Martínez de Azagra *et al.*, 1996):

$$J = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{L} \quad 6.13$$

Donde:  $H_{\max}$  es la cota máxima del cauce principal o cota del nacimiento (m)

$H_{\min}$  es la cota mínima del cauce principal o cota de la sección de cierre (m)

$L$  es la longitud del cauce principal en metros

Aplicando las Ecuaciones 6.12 y 6.13 a los subsistemas hidrológicos de la cuenca del embalse de El Sancho se obtienen los distintos tiempos de concentración (Tabla 6.14).

Tabla 6.14: Tiempo de concentración de los distintos subsistemas

Subsistema	$H_{max}-H_{min}$ (m)	$L$ (m)	$J$ (m/m)	$T_c$ (h)
SC-1	102,20	9.418,84	0,011	3,90
SC-2	105,93	11.030,27	0,010	4,50
SC-3	89,87	7.638,93	0,012	3,27
SC-4	82,87	8.388,88	0,010	3,63
SC-5	109,36	9.423,39	0,012	3,85
SC-6	174,23	12.778,63	0,014	4,70
SC-7	101,00	8.464,66	0,012	3,53
SIC-1	105,21	12.962,68	0,008	5,25
SIC-2	107,13	10.331,74	0,010	4,22
SIC-3	67,62	6.051,38	0,011	2,77
SIC-4	54,42	4.184,78	0,013	2,03
SIC-5	55,67	9.081,84	0,006	4,22
Sancho	173,80	43.310,96	0,004	15,01

### 6.2.2. Modelo conceptual lluvia-escorrentía, el programa HEC-HMS 2.2.2

Como ya se ha mencionado en apartados anteriores, para abordar la simulación de la transformación lluvia-escorrentía se ha utilizado un modelo conceptual distribuido incorporado en el programa informático HEC-HMS 2.2.2. desarrollado por el *U.S. Army Corps of Engineers*.

En los siguientes epígrafes se abordan las características más singulares del programa HEC-HMS, así como el esquema conceptual del sistema hidrológico de la presa de El Sancho y los fundamentos teóricos de los modelos adoptados para la simulación de las distintas fases del proceso de hidrológico.

La herramienta informática HEC-HMS está diseñada para simular los procesos de precipitación-escorrentía en sistemas hidrológicos mediante un completo entorno de trabajo que integra: bases de datos, utilidades de entrada y manipulación de datos, simulación y herramientas interactivas de consulta de los resultados (USACE, 2001), todo ello bajo un sencillo conjunto de menús.

El programa divide el sistema hidrológico en tres componentes: modelo de cuenca, modelo meteorológico y parámetros de control. Cada componente queda a su vez dividido en submodelos de simulación. Se describen a continuación los elementos principales.

#### a) Componente: modelo de cuenca

Corresponde con la representación conceptual de las subcuencas y de la red de drenaje. Los distintos elementos que se pueden definir son: subcuencas, tramos de propagación, embalses, confluencias de flujo, divergencias de flujo o bifurcaciones, fuentes o entradas de flujo en el sistema y sumideros o salidas del sistema. Estos elementos hidrológicos están interconectados a través de una red para permitir la simulación del proceso de escorrentía (USACE, 2001).

Este componente se subdivide en cuatro submodelos de simulación hidrológica:

- 1) Submodelo de pérdidas o producción: destinado a evaluar las pérdidas de lluvia en infiltración con el fin de determinar la lluvia neta o efectiva de la simulación. Los modelos disponibles son: umbral inicial y posterior con infiltración constante, déficit de infiltración constante, modelo de infiltración de Green y Ampt, modelo del número de curva (agregado y distribuido) y modelo de simulación continua de cinco variables.
- 2) Submodelo de transformación de lluvia-escorrentía: se incluyen los siguientes métodos: los hidrogramas unitarios de Clark, de Snyder, del SCS y el modificado de Clark para la simulación distribuida de la escorrentía.
- 3) Submodelo de flujo base: el flujo base puede modelarse como una constante mensual, mediante embalse lineal o con una curva de recesión.
- 4) Submodelo de propagación en cauces: el programa permite simular el tránsito de avenidas mediante los siguientes métodos: onda cinemática, retardo (*lag*), Pulse modificado, Muskingum y Muskingum-Cunge.

El sistema hidrológico de la cuenca del embalse de El Sancho se ha dividido en 12 subcuencas, 7 de ellas en cabecera y 5 intercuencas, como ya se vio anteriormente cuando se caracterizó hidrológicamente la cuenca.

Así, el sistema hidrológico queda representado mediante los siguientes elementos del modelo: 12 subcuencas, 8 nudos de confluencia de flujo, 8 tramos de propagación y 1 sumidero o desagüe, que corresponde con la presa, como puede verse en el esquema de la Figura 6.30.

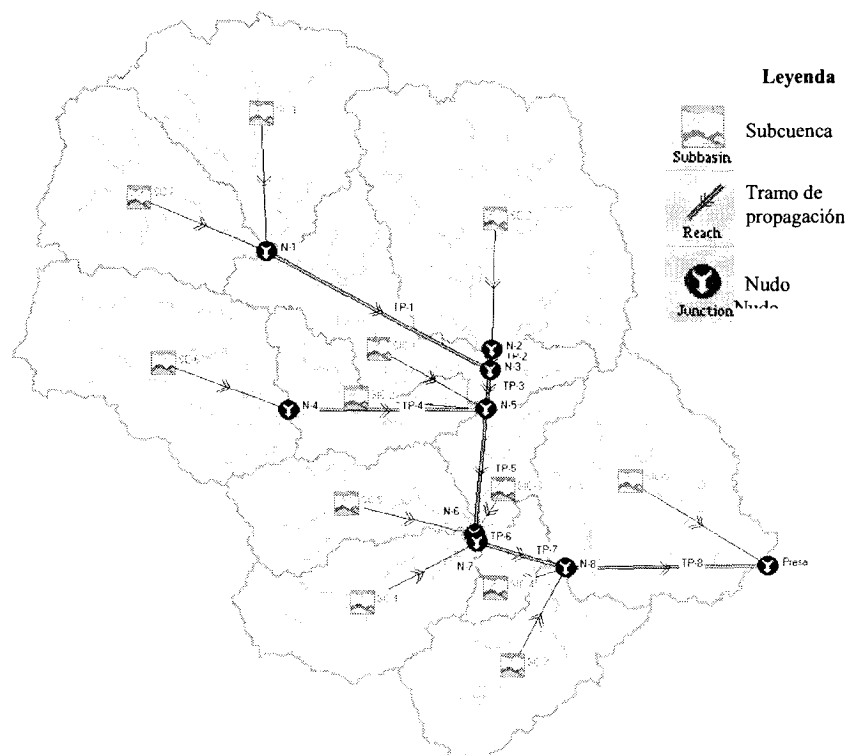


Figura 6.30: Esquema de la cuenca del embalse de El Sancho aplicado en la simulación

La conexión entre el modelo hidrológicamente correcto (Epígrafe 6.2.1.1) y el sistema HEC-HMS se ha realizado a través del sistema de información geográfica ArcView 3.2 (ESRI, 1998) y la extensión HEC-GeoHMS 1.1 del *U.S. Army Corps of Engineers*, puesto que todavía no ha sido totalmente implementada la herramienta para el sistema ArcGis (HEC- GeoHMS 2,0).

La herramienta HEC-GeoHMS está diseñada para generar las bases de datos en formato HEC, que contienen los datos para la modelización de los sistemas hidrológicos, tanto para los modelos agregados como distribuidos, así como los esquemas de representación del modelo de cuenca con todos los parámetros hidrológicos derivados (USACE, 2003).

Los submodelos que forman parte del modelo de cuenca serán desarrollados en epígrafes posteriores, puesto que son la base de la simulación realizada y requieren un mayor detalle en su descripción.

#### **b) Componente: modelo meteorológico**

Implementa el análisis de los datos meteorológicos, incluyendo la precipitación y la evapotranspiración (para modelos de simulación multicapa). Así los submodelos en los que queda dividida la componente son:

- 1) Submodelo de precipitaciones: el programa dispone de un gran número de métodos para introducir en el sistema la precipitación: hietogramas y datos introducidos por el usuario, datos ponderados por el inverso de la distancia al cuadrado (para completar datos faltantes), ponderación de Thiessen e ,incluso, valores de precipitación distribuidos espacialmente en celdas, procedentes de estimaciones de radar o creadas por el usuario.
- 2) Submodelo de evapotranspiración

En este trabajo se ha utilizado el submodelo de precipitaciones distribuidas, puesto que la red de estaciones automáticas se ha considerado lo suficientemente densa como para permitir una interpolación espacial.

Por lo tanto, para el total de las tormentas estudiadas se ha creado un fichero en formato HEC-DSS (*Hydrologic Engineering Center Data Storage System*) que contiene el valor de la precipitación para cada punto del territorio de la cuenca, con una resolución temporal de una hora y una resolución espacial de 30 m.

El modelo distribuido de precipitación asociado a la cuenca del embalse de El Sancho se ha construido a través del sistema de información geográfica (ArcGis) y la herramienta CRREL (*Gage analyst and Storm Transformation*), que permite convertir las series temporales de datos puntuales (pluviógrafos de las estaciones meteorológicas) en mapas distribuidos de series temporales de precipitaciones, para observar la variación local de la variable climatológica estudiada (Ochs, 2003).

La interpolación espacial aplicada está basada en la ponderación en función del inverso de la distancia (inverse distace weighted IDW). La técnica calcula el valor del punto problema asignando pesos a los datos del entorno en función inversa de la distancia que los separa del punto problema. Se establece, por tanto, que los puntos más cercanos tienen un peso mayor en el cálculo, aunque la relación no tiene porqué ser lineal.

La fórmula general de la interpolación en función inversa de la distancia se define como (Figura 6.31):

$$\hat{p}_j = \sum_{i=1}^n k_{ij} \cdot p_i \quad 6.14$$

Donde:  $\hat{p}_j$  es el valor de la precipitación estimada para el punto  $j$

$n$  es el número de puntos usados en la interpolación (5 para este caso)

$p_i$  es el valor de la precipitación en el punto  $i$ -ésimo

$k_{ij}$  es el valor del peso de ponderación asociado al punto  $i$ -ésimo para el nodo  $j$ . Estos pesos de ponderación varían entre 0 y 1 para cada punto  $i$ -ésimo y la suma de todos es la unidad.

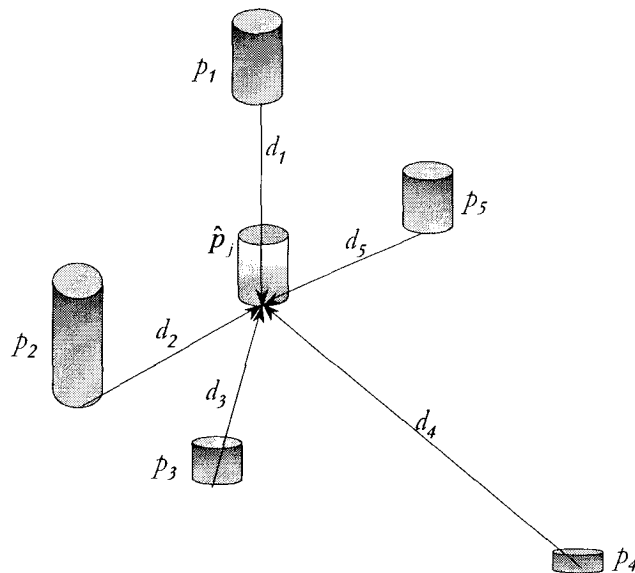


Figura 6.31: Esquema de interpolación en función de la inversa de la distancia para el nodo  $j$

La estimación de los pesos de ponderación  $k_{ij}$  se realiza mediante la siguiente expresión:

$$k_{ij} = \frac{1}{d_i^\beta + \frac{1}{d_{i+1}^\beta} + \dots + \frac{1}{d_n^\beta}} \quad 6.15$$

Donde:  $k_{ij}$  es el peso de ponderación asociado el punto  $i$ -ésimo para el nodo  $j$

$d_i$  es la distancia euclídea entre el punto  $i$ -ésimo y el nodo  $j$

$\beta$  es un exponente de ponderación. Este parámetro controla la forma en la que el peso disminuye con la distancia. En el caso de valer 0, el valor estimado será

la media aritmética de los datos; en el caso de valer 1, el peso disminuye linealmente con la distancia; para valores superiores, la influencia de los puntos cercanos se hace mucho mayor que la de los lejanos.

En este caso se ha aplicado la ponderación inversa del cuadrado de la distancia,  $\beta=2$ .

Gracias al sistema de información geografía y a la herramienta CRREL, se han generado las 684 imágenes raster de precipitación distribuida, que corresponden a los eventos de precipitación utilizados para la modelización, con resolución temporal de una hora. Posteriormente, estas imágenes, han sido transformadas a una base de datos en formato HEC-DSS, que constituye el submodelo de precipitaciones del componente meteorológico de la simulación. El esquema metodológico seguido se puede ver en la Figura 6.32.

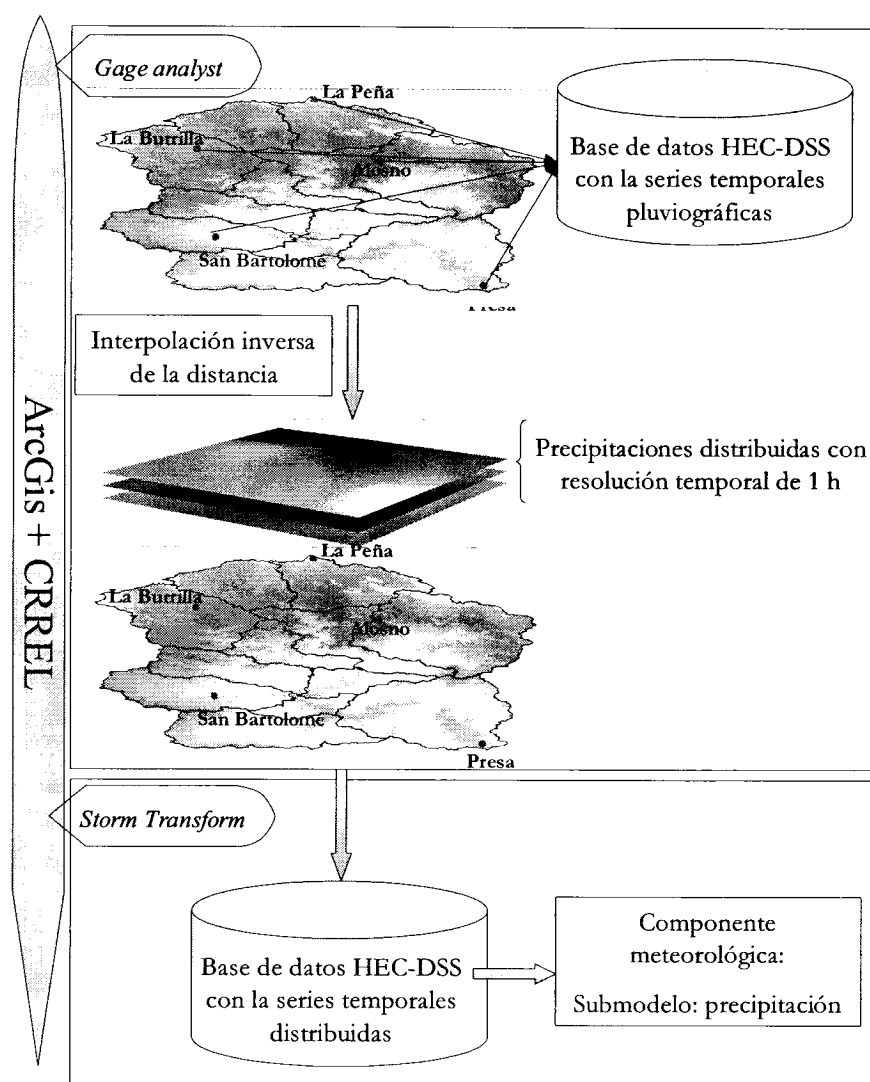


Figura 6.32: Esquema metodológico de generación del modelo meteorológico de precipitaciones distribuida

### ***c) Componente: parámetros de control***

Una vez conceptualizada la cuenca y generado el modelo meteorológico, el programa requiere que se asignen los parámetros de control o temporales de la simulación: fecha y hora de inicio de la simulación, fecha y hora de finalización de la simulación y lapso de tiempo computacional o intervalo de simulación.

En este caso las fechas y horas de inicio y finalización son las de las tormentas de estudio, mientras que el lapso de tiempo computacional es coincidente con la resolución temporal del modelo meteorológico de una hora.

### **6.2.3. Caracterización de los submodelos de simulación hidrológica empleados**

Los submodelos que forman parte de la componente “modelo de cuenca” han sido desarrollados en un epígrafe separado, puesto que son la base de la simulación realizada y requieren un mayor detalle en su desarrollo. El trabajo se centra en los submodelos de transformación de lluvia-escorrentía y en el de propagación en cauces.

En cuanto al submodelo de pérdidas o producción, aunque fundamental en la modelización de la cuenca, éste corresponde con el del número de curva distribuido, tanto en la concepción original del SCS como con las distintas innovaciones propuestas en el presente trabajo, por lo que se considera suficientemente desarrollado.

La generación de los submodelos de pérdidas distribuidos se ha realizado a través del sistema de información geográfica, generándose un mapa raster de distribución del número de curva para las distintas versiones (original y propuesta por este autor); posteriormente se han transformado las capas, mediante la herramienta HEC-GeoHMS, en un fichero de información distribuida en formato HEC-HMS.

Respecto al submodelo de flujo base, se ha desestimado su aplicación puesto que se desconoce el caudal base que circula en los instantes previos a la tormenta y por carecer de interés para este trabajo, ya que se centra en la escorrentía superficial y no en la subterránea, responsable del flujo base.

Por tanto, los siguientes epígrafes se han dedicado a la descripción de aquellas partes del modelo hidrológico que son cruciales y que aún no han sido desarrolladas profundamente.

#### ***6.2.3.1. Submodelo de transformación lluvia-escorrentía***

El proceso de transformación lluvia-escorrentía en todas las subcuencas del sistema de El Sancho ha sido caracterizado a través de la teoría lineal de los sistemas hidrológicos, según la cual un sistema lineal se caracteriza únicamente por su función impulso - respuesta (Chow *et al.*, 1994).

Si un sistema recibe una entrada unitaria neta instantáneamente o pulso unitario en el tiempo  $\tau$ , la respuesta del sistema en un tiempo posterior  $t$  está descrita por la función respuesta del impulso unitario  $u(t-\tau)$  (Chow, 1994). En el caso de recibir una entrada no unitaria la respuesta del sistema es proporcional a dicha entrada, lo que queda expresado mediante la llamada integral de convolución (Ecuación 6.16):

$$Q(t) = \int_0^t I(\tau) \cdot u(t - \tau) \cdot d\tau \quad 6.16$$

Donde:  $Q(t)$  es la variación del caudal a lo largo del tiempo o hidrograma

$I(\tau)$  es la intensidad de precipitación neta en un lapso de tiempo  $\tau$

$u(t-\tau)$  es la función de respuesta

La función de respuesta ante el pulso unitario tradicionalmente se conoce como el hidrograma unitario y se define como el que se obtiene en el desagüe de la cuenca como consecuencia de un exceso de lluvia de magnitud unitaria o precipitación neta unitaria de 1 mm, 1 cm ó 1 pulgada, que se produce de manera uniforme sobre toda el área de la cuenca y con una intensidad constante dentro de un tiempo determinado (Sherman, 1932, en Muñoz y Ritter, 2005). Por lo que si se conoce el hidrograma unitario de una cuenca para una duración determinada, es posible hallar el hidrograma para cualquier otra precipitación neta, sea cual sea su magnitud y su duración.

La determinación del hidrograma unitario (HU) se puede efectuar a través de diversos métodos, entre los que destacan los sintéticos, que se basan en relacionar los parámetros del modelo HU con las características hidromorfológicas de la cuenca estudiada, frente a los paramétricos, que definen las propiedades del HU a través de una o más ecuaciones que calculan el caudal punta unitario y el tiempo en el que se produce.

En el presente trabajo se ha optado por la determinación del hidrograma unitario sintético modificado de Clark, basado en el HU de Clark, puesto que de todos los que presenta el programa HEC-HMS es el único que puede ser adaptado a un modelo distribuido como el que se ha generado con el sistema de información geográfica para las precipitaciones y el submodelo de pérdidas del número de curva.

### ***Fundamentos del hidrograma unitario de Clark***

El modelo de Clark se basa en considerar que el proceso de transformación del exceso de precipitación de una cuenca en hidrograma de escorrentía superficial, en el punto de desagüe de la misma, está regulado por dos procesos (Straub *et al.*, 2000):

- 1) Una traslación o movimiento del exceso de agua desde el punto en que se origina hasta el punto de desagüe de la cuenca a través de la red de drenaje de la misma como respuesta a la acción de la gravedad.
- 2) Una laminación o reducción del caudal punta del hidrograma debido al almacenamiento transitorio del agua en el conjunto de la cuenca y a las fuerzas de fricción que se oponen a la traslación.

Clark (1945) asume que la traslación del flujo a lo largo de toda la cuenca puede ser descrita a través de la curva área-tiempo de ésta, que corresponde al área encerrada entre las isocronas de la cuenca, por lo que la curva área-tiempo es definida en el tiempo por el parámetro de la cuenca tiempo de concentración ( $T_c$ ).

El tiempo de concentración de Clark es diferente conceptualmente del tiempo de concentración utilizado en otros métodos. Clark lo define como el tiempo que transcurre desde la finalización de la precipitación neta hasta que se alcanza el punto de inflexión en la curva de recesión del hidrograma. De forma general, el tiempo de concentración se define como el tiempo de viaje que invierte la primera gota de precipitación neta caída en el punto más distante hidráulicamente hasta alcanzar la sección de cierre de la cuenca (Straub *et al.*, 2000) (Figura 6.33).

El punto de inflexión de la curva de recesión del hidrograma corresponde con el instante en el que cesa el flujo superficial de agua hacia la red de drenaje y, por tanto, el caudal circulante a partir de dicho instante es ocasionado por el agua almacenada o retenida por la propia red de drenaje.

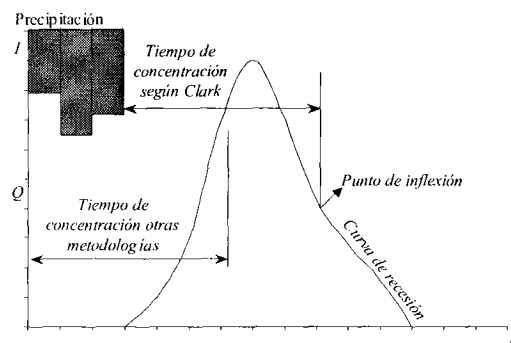


Figura 6.33: Interpretación de los tiempos de concentración según diversos métodos

Se deduce, de la definición del tiempo de concentración y de la Figura 6.33, que el almacenamiento temporal que tiene lugar a corto plazo en la superficie del terreno y en los cauces juega un papel importante en la transformación del exceso de precipitación en escorrentía. Uno de los procedimientos habitualmente empleados para representarlo es la utilización de un modelo de depósito lineal (Figura 6.34).

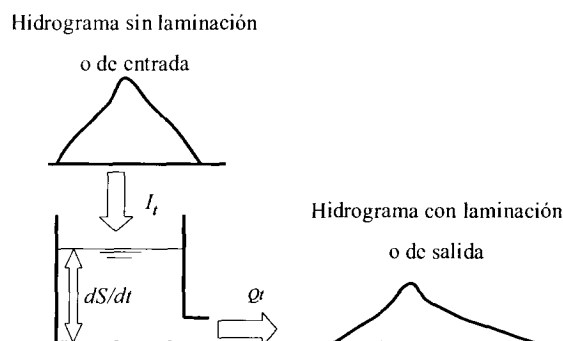


Figura 6.34: Esquema del modelo de depósito lineal empleado en el hidrograma de Clark

Siguiendo la notación habitual en el modelo y partiendo de la ecuación de continuidad, el almacenamiento temporal se puede expresar como:

$$\frac{dS}{dt} = I_t - Q_t \quad 6.17$$

Donde:  $dS/dt$  es la variación en el tiempo del volumen de agua almacenada en el depósito lineal

$I_t$  es el caudal entrante en el instante  $t$

$Q_t$  es el caudal saliente en el instante  $t$

Admitiendo la hipótesis de depósito lineal, el almacenamiento en el instante  $t$  ( $S_t$ ) se relaciona con el caudal saliente en dicho instante mediante la expresión:

$$S_t = R \cdot Q_t \quad 6.18$$

Donde:  $R$  es el coeficiente de almacenamiento, que es un parámetro de valor constante que caracteriza al mencionado depósito

Combinando las ecuaciones anteriores (6.17 y 6.18) y resolviendo el sistema a través de un método de diferencias finitas, se llega a (USACE, 2001):

$$Q_t = C_A \cdot I_t + C_B \cdot I_{t-1} \quad 6.19$$

Donde:  $Q_t$  es el caudal saliente en el instante  $t$

$I_t$  es el caudal entrante en el instante  $t$

$I_{t-1}$  es el caudal entrante en el instante previo ( $t-1$ )

$C_A$  y  $C_B$  son dos coeficientes de enrutamiento que se determinan mediante la resolución de las siguientes expresiones:

$$C_A = \frac{\Delta t}{R + 0,5 \cdot \Delta t} \quad 6.20$$

$$C_B = 1 - C_A \quad 6.21$$

Siendo  $\Delta t$  el incremento de tiempo de cálculo.

Por otro lado, el caudal medio desaguado durante el citado incremento de tiempo se define como (USACE, 2001):

$$Q_{tm} = \frac{Q_t + Q_{t-1}}{2} \quad 6.22$$

Resolviendo las Ecuaciones 6.19, 6.20, 6.21 y 6.22 de manera recurrente, se obtienen los valores correspondientes de  $Q_{tm}$  en los diferentes intervalos de tiempo, siendo interesante resaltar, además, que se puede considerar, desde un punto de vista conceptual, que el depósito lineal está situado junto al punto de desagüe de la cuenca.

Además de este modelo de almacenamiento, de tipo agregado, el modelo de Clark tiene en cuenta el tiempo que tarda el agua en alcanzar el citado punto de desagüe de la cuenca, estimando la curva área-tiempo de la cuenca calculada en el programa HEC-HMS, a través de un histograma típico área-tiempo, definido mediante las siguientes ecuaciones (USACE, 2001):

$$\begin{aligned} \frac{A_t}{A} &= 1,414 \cdot \left( \frac{t}{T_c} \right)^{1,5} && \text{si } t \leq \frac{T_c}{2} \\ \frac{A_t}{A} &= 1 - 1,414 \cdot \left( 1 - \frac{t}{T_c} \right)^{1,5} && \text{si } t \geq \frac{T_c}{2} \end{aligned} \quad 6.23$$

Donde:  $A_t$  es el área acumulada de la cuenca que contribuye al caudal desaguado en el instante  $t$

$A$  el área total de la cuenca

$T_c$  el tiempo de concentración de la misma

Por lo tanto, el hidrograma de Clark queda definido por el tiempo de concentración y por el coeficiente de almacenamiento de la cuenca, parámetros que caracterizan el comportamiento hídrico de la cuenca y que, por tanto, se deben conocer. El tiempo de concentración de Clark, aunque conceptualmente es distinto al propuesto por otros autores, en valor numérico es coincidente, por lo que para este trabajo se han adoptado los obtenidos con la ya citada fórmula de Témez (Ecuación 6.12).

En cuanto al coeficiente de almacenamiento ( $R$ ), su determinación es más compleja, puesto que realmente es necesario conocer la variación real del caudal en el punto de inflexión de la curva de recesión de los hidrogramas de cada cuenca (Nurünnisa and Nusa, 2002) (Figura 6.35), lo cual es casi imposible, salvo en cuencas aforadas.

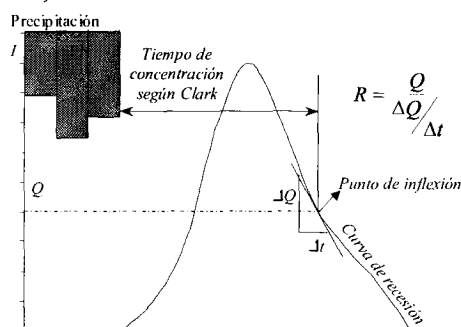


Figura 6.35: Determinación del coeficiente de almacenamiento ( $R$ ) de una cuenca

Otra opción para determinar el coeficiente de almacenamiento es aplicar los métodos empíricos que tratan de relacionar distintas características físicas de la cuenca con dicha variable (Straub *et al.*, 2000; Bedient y Huber, 2002). Se ha escogido la siguiente expresión empírica, de uso habitual (Hoggan, 1996):

$$\frac{R}{R + T_c} = \lambda \quad 6.24$$

Donde:  $R$  es el coeficiente de almacenamiento de la cuenca (h)

$T_c$  es el tiempo de concentración de la cuenca (h)

$\lambda$  es un parámetro comprendido entre los valores 0,1 a 0,9 y que depende de las características de la cuenca, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 6.15: Valores de  $\lambda$  en función del tipo de cuenca

$\lambda$	Tipo de cuenca
0,10	Cuencas impermeables
0,25	Cuencas fuertemente desarrolladas, industrializadas o con superficies comerciales
0,30	Cuencas con fuerte desarrollo urbanístico (residencial)
0,35	Cuencas con alto desarrollo residencial
0,45	Cuencas naturales aterrazadas
0,60	Cuencas naturales de poca pendiente
0,70	Cuencas planas de poca pendiente y pantanosas

Para todas las subcuencas del modelo se ha utilizado un valor intermedio de  $\lambda=0,4$ , que podría corresponder con cuencas naturales de pendientes moderadas a elevadas, por lo que tomando los tiempos de concentración de la Tabla 6.14 y despejando  $R$  de la Ecuación 6.24 se obtienen los distintos valores del coeficiente de almacenamiento:

Tabla 6.16: Coeficientes de almacenamiento ( $R$ ) para las distintas subcuencas del embalse de El Sancho

Subsistema	$T_c$ (h)	$R$ (h)
SC-1	3,90	2,60
SC-2	4,50	3,00
SC-3	3,27	2,18
SC-4	3,63	2,42
SC-5	3,85	2,57
SC-6	4,70	3,14
SC-7	3,53	2,35
SIC-1	5,25	3,50
SIC-2	4,22	2,81
SIC-3	2,77	1,85
SIC-4	2,03	1,35
SIC-5	4,22	2,82
Sancho	15,01	10,00

Realmente el hidrograma de Clark no es un modelo hidrológico distribuido, por lo que se ha aplicado la metodología conocida como el modelo modificado de Clark, en el que la cuenca queda dividida en celdas cuadradas de dimensiones conocidas, de tal forma que para cada una de ellas se sabe el excedente de lluvia (escorrentía) a lo largo del tiempo o el hidrograma de escorrentía.

Conocida la producción de escorrentía a lo largo del tiempo para las distintas celdas que componen la cuenca, es posible conocer el caudal emitido por esta, puesto que corresponde con la suma, en el tiempo, de los caudales elementales de cada celda. Por lo tanto, es necesario conocer el tiempo que tarda el agua de escorrentía de cada celda en alcanzar la sección de cierre de la cuenca o lo que se conoce como tiempo de viaje de cada celda, que ha de ser función del tiempo de concentración de la cuenca y que se puede estimar mediante la siguiente ecuación (Kull y Feldman, 1998):

$$T_{celda} = T_c \cdot \frac{l_{celda}}{l_{máxima}} \quad 6.25$$

Donde:  $T_{celda}$  es el tiempo de viaje de la celda  $i$

$T_c$  es el tiempo de concentración de la cuenca

$l_{celda}$  es la distancia recorrida por la escorrentía desde la celda  $i$  hasta la sección de cierre de la cuenca

$l_{máxima}$  es la distancia recorrida por la escorrentía desde la celda más alejada de la sección de cierre hasta la misma

Para completar el modelo hay que tener en cuenta que el tiempo de viaje de cada celda solamente hace referencia al primer principio enunciado por Clark (traslación o movimiento) y que, por tanto, cuando la escorrentía se desplaza por la red de drenaje de la cuenca está afectada por el proceso de almacenamiento (o laminación) y el hidrograma real de la cuenca ha de ser corregido por el coeficiente de almacenamiento ( $R$ ).

Como se observa en la Figura 6.36, las variables que caracterizan cada una de las celdas en las que se descompone el sistema hidrológico y que permiten aplicar el modelo modificado de Clark son las que se muestran a continuación:

- Número de curva de cada celda, para estimar la producción de escorrentía
- Subcuenca a la que pertenece la celda
- Área de la subcuenca representada por la celda
- Distancia de la celda a la sección de cierre de la subcuenca
- Distancia máxima de recorrido de la escorrentía en la subcuenca

Y para cada subcuenca en la que se divide el sistema hidrológico:

- Tiempo de concentración
- Coeficiente de almacenamiento

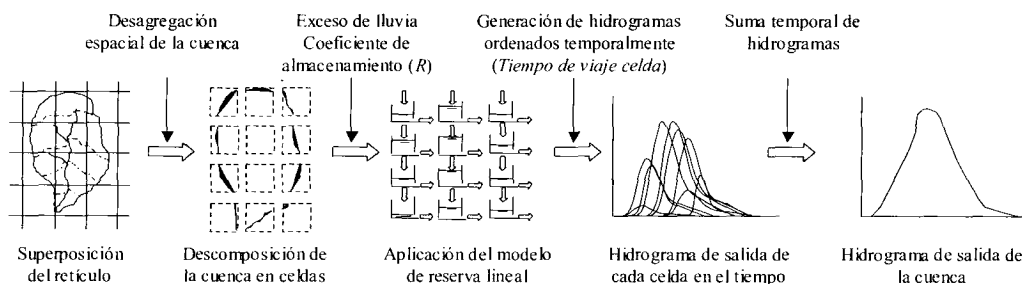


Figura 6.36: Esquema de aplicación del modelo modificado de Clark (modificado de Kull y Feldman, 1998)

El retículo de desagregación del subsistema y el fichero que contiene las distintas variables de cada celda se han generado a partir de la información almacenada en el sistema de información geográfica ArcView y con la herramienta HEC-GeoHMS según el proceso que se describe en la Figura 6.37.

Ni el modelo modificado de Clark ni el programa HEC-HMS presentan limitación en cuanto al tamaño de la celda del retículo de desagregación, pero en la implementación del modelo ha surgido un problema de desbordamiento en los sistemas de información geográfica y el tamaño de la celda ha tenido que ser ampliado hasta los 140 x 140 metros, por lo que la cuenca del embalse de El Sancho ha quedado dividida en 18.217 celdas con una superficie máxima de 1,96 ha.

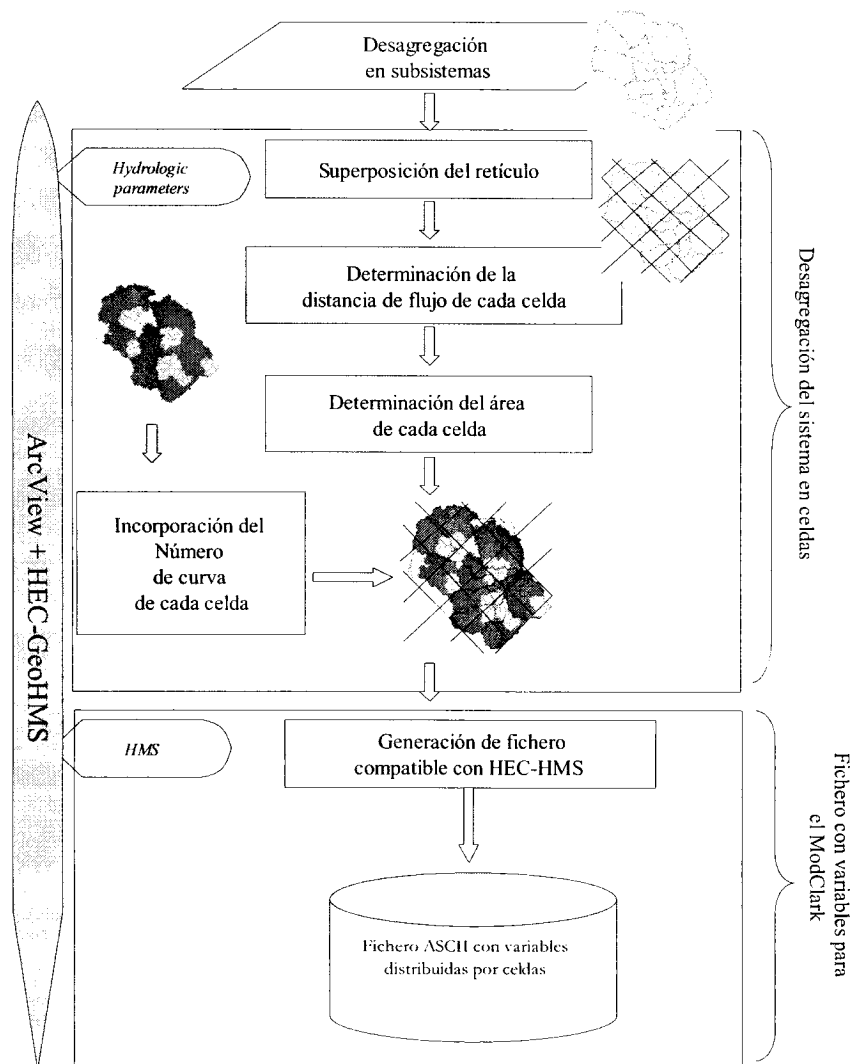


Figura 6.37: Diagrama de flujo para la generación de un fichero compatible con programa HEC-HMS que contenga las variables necesarias para el modelo modificado de Clark

### 6.2.3.2. Submodelo de propagación en cauces

Para estimar la propagación del hidrograma de crecida a través de la red fluvial se ha empleado el modelo de Muskingum, por ser el más empleado en hidrología. Dicho modelo pertenece a la categoría de los denominados hidrológicos, que resuelven el problema de tránsito de hidrogramas utilizando exclusivamente la ecuación de continuidad del flujo:

$$\frac{dS}{dt} = I_t - Q_t \quad 6.26$$

Donde:  $dS/dt$  es la variación en el tiempo del volumen de agua almacenada en el depósito lineal

$I_t$  es el caudal entrante en el instante  $t$

$Q_t$  es el caudal saliente en el instante  $t$

Este modelo representa el volumen de almacenamiento constituido por dos sumandos: uno de almacenamiento en prisma y otro en cuña, tal como se esquematiza en la Figura 6.38. Durante la fase de crecimiento del hidrograma el caudal de entrada es mayor que el caudal de salida, produciéndose un almacenamiento en forma de cuña positiva. Por el contrario, durante la fase de recesión el caudal de salida es mayor que el de entrada, dando como resultado el desarrollo de una cuña negativa. Adicionalmente, existe un almacenamiento en prisma a lo largo de la longitud del cauce (Chow, 1994).

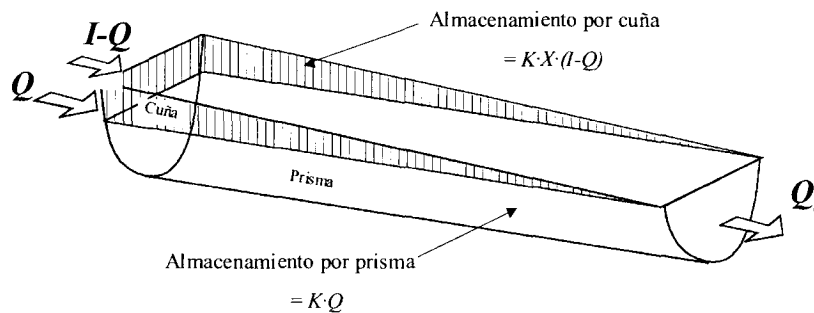


Figura 6.38: Almacenamiento por prisma y por cuña en un tramo de un canal (modificada de Chow, 1994)

Suponiendo que el área de la sección transversal del flujo de crecida es directamente proporcional al caudal circulante, el volumen de almacenamiento por prisma resulta igual a  $K \cdot Q$ , siendo  $K$  un coeficiente de proporcionalidad. En cuanto al volumen de almacenamiento en cuña, su valor es igual a  $K \cdot X (I - Q)$ , en donde  $X$  es un factor de ponderación dependiente de la forma de almacenamiento por cuña ( $0 \leq X \leq 0,5$ ). El almacenamiento total se puede poner, por lo tanto, en la forma (Chow 1994):

$$S = K[X \cdot I + (1 - X) \cdot Q_t] \quad 6.27$$

Donde:  $S$  es el almacenamiento

$K$  es el tiempo de viaje de la onda a través del tramo del cauce

$X$  es el coeficiente de forma dependiente de la cuña modelada

$I$  es el caudal entrante

$Q_t$  es el caudal saliente

El valor del parámetro  $X$  varía de cero (para un almacenamiento tipo embalse) a 0,5 para una cuña completamente desarrollada. En cauces naturales,  $X$  se encuentra entre 0 y 0,3 con un valor medio cercano a 0,2; en cualquier caso los resultados obtenidos por este método son relativamente insensibles al valor de este parámetro. Ambos coeficientes dependen de la magnitud del caudal circulante, pero en el tránsito agregado de crecientes se suponen constantes para todo el rango de flujo (Chow, 1994).

Avanzando un poco más en el desarrollo del modelo, cabe señalar que, expresando la ecuación de continuidad (Ecuación 6.26) con discretización centrada, puede expresarse como:

$$I - Q = \frac{dS}{dt} \rightarrow \frac{I_{t+1} + I_t}{2} - \frac{Q_{t+1} + Q_t}{2} = \frac{S_{t+1} - S_t}{\Delta t} \quad 6.28$$

Y sustituyendo la ecuación de almacenamiento (Ecuación 6.27) en la de continuidad (Ecuación 6.28), resulta finalmente la ecuación de tránsito para el método de Muskingum:

$$Q_{t+1} = C_o \cdot I_{t+1} + C_1 \cdot I_t + C_2 \cdot Q_t \quad 6.29$$

Donde:

$$C_o = \frac{\Delta t - 2KX}{2K \cdot (1 - X) + \Delta t} ; C_1 = \frac{\Delta t + 2KX}{2K \cdot (1 - X) + \Delta t} ; C_2 = 1 - C_o - C_1 \quad 6.30$$

Por lo tanto, el modelo de propagación en cauces requiere la determinación del parámetro  $X$  y del tiempo de viaje de la onda a través del tramo de cauce ( $K$ ). A  $X$  se le puede asignar un valor medio de 0,2 para los cauces naturales y de 0 para los tramos afectados por el embalse. El problema se presenta en la determinación de  $K$ , puesto que, como se deduce de las ecuaciones, es necesario conocer el caudal de entrada y de salida en el tramo de cauce estudiado, por lo que salvo en tramos aforados este valor es imposible de conocer.

Existen varias formas de determinar el parámetro  $K$  de un cauce, aunque casi todas pasan por establecer la sección mojada para un caudal determinado y estimar la velocidad de la onda de avenida como una proporción de la velocidad media de flujo en el cauce (USACE, 1994), como se puede ver en la siguiente ecuación

$$K = \frac{L}{V_w} \quad 6.31$$

Donde:  $K$  es el tiempo de viaje de la onda de avenida a través del tramo del cauce (h)

$L$  es la longitud del tramo de cauce de propagación (m)

$V_w$  es la velocidad de propagación de la onda de avenida a través del cauce

La velocidad de propagación de la onda de avenida es función de la velocidad media del flujo ( $V$ ) y de la forma de la sección transversal del cauce, de tal forma que la relación entre  $V_w/V$  presenta los siguiente valores:

Tabla 6.17: Relación  $V_w/V$  (USACE, 1994)

$V_w/V$	Forma de la sección transversal del cauce
1,64	Rectangular ancha
1,44	Parabólica ancha
1,33	Triangular
1,50	Cauces naturales

El problema radica en la determinación de las velocidades medias de las secciones transversales de los tramos de propagación para los distintos caudales circulantes, por lo que en el presente trabajo se ha realizado una estimación de la misma y se ha supuesto constante para los distintos eventos de precipitación.

La estimación se ha llevado a cabo a través de la caracterización de los tramos fluviales que ha realizado la Junta de Andalucía, que para los tramos de propagación de la cuenca de El Sancho es la mostrada en la siguiente tabla:

Tabla 6.18: Caracterización de los regímenes hidráulicos para los tramos de propagación de la cuenca del embalse de El Sancho (Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía, 2003)

Tramo de propagación	Caracterización del régimen hídrico
TP-1	Rápido
TP-2	Rápido
TP-3	Rápido
TP-4	Rápido
TP-5	Rápido
TP-6	Rápido
TP-7	Tranquilo
TP-8	Tranquilo

Asignando una velocidad media de 1,5 m/s para los tramos rápidos y de 0,5 m/s para los tramos tranquilos, una relación  $V_w/V$  de 1,50 y aplicando la Ecuación 6.31 se obtienen los siguientes valores del parámetro  $K$ .

Tabla 6.19: Valores estimados para los tiempos de viaje de la onda de avenida ( $V_w$ )

Tramos de propagación	$L$ (m)	$V$ (m/s)	$V_w$ (m/s)	$K$ (h)
TP-1	13.816,8	1,5	2,25	1,70
TP-2	1.212,3	1,5	2,25	0,14
TP-3	1.392,3	1,5	2,25	0,17
TP-4	11.614,6	1,5	2,25	1,43
TP-5	3.038,6	1,5	2,25	0,37
TP-6	299,7	1,5	2,25	0,04
TP-7	3.009,7	0,5	0,75	0,37
TP-8	9.611,2	0,5	0,75	3,56

Valores muy similares a los obtenidos por calibración en los trabajos de simulación hidrológica realizados en la cuenca con el fin de optimizar la gestión de la presa (ENCE S.A., 2001).

Con el objeto de simplificar la simulación, los tramos de propagación inferiores a dos kilómetros han sido eliminados, puesto que tienen una capacidad de almacenamiento de agua muy limitada; por lo tanto, los valores empleados finalmente han sido:

Tabla 6.20: Valores de los parámetros de Muskingum para los distintos tramos de propagación

Tramos de propagación	$K$ (h)	$X$
TP-1	1,70	0,2
TP-4	1,43	0,2
TP-5	0,37	0,2
TP-7	0,37	0
TP-8	3,56	0

En la Figura 6.39, a modo de resumen, se incluye un esquema sobre la organización del programa de simulación hidrológica empleado, las variables necesarias y la conexión con las demás herramientas empleadas.

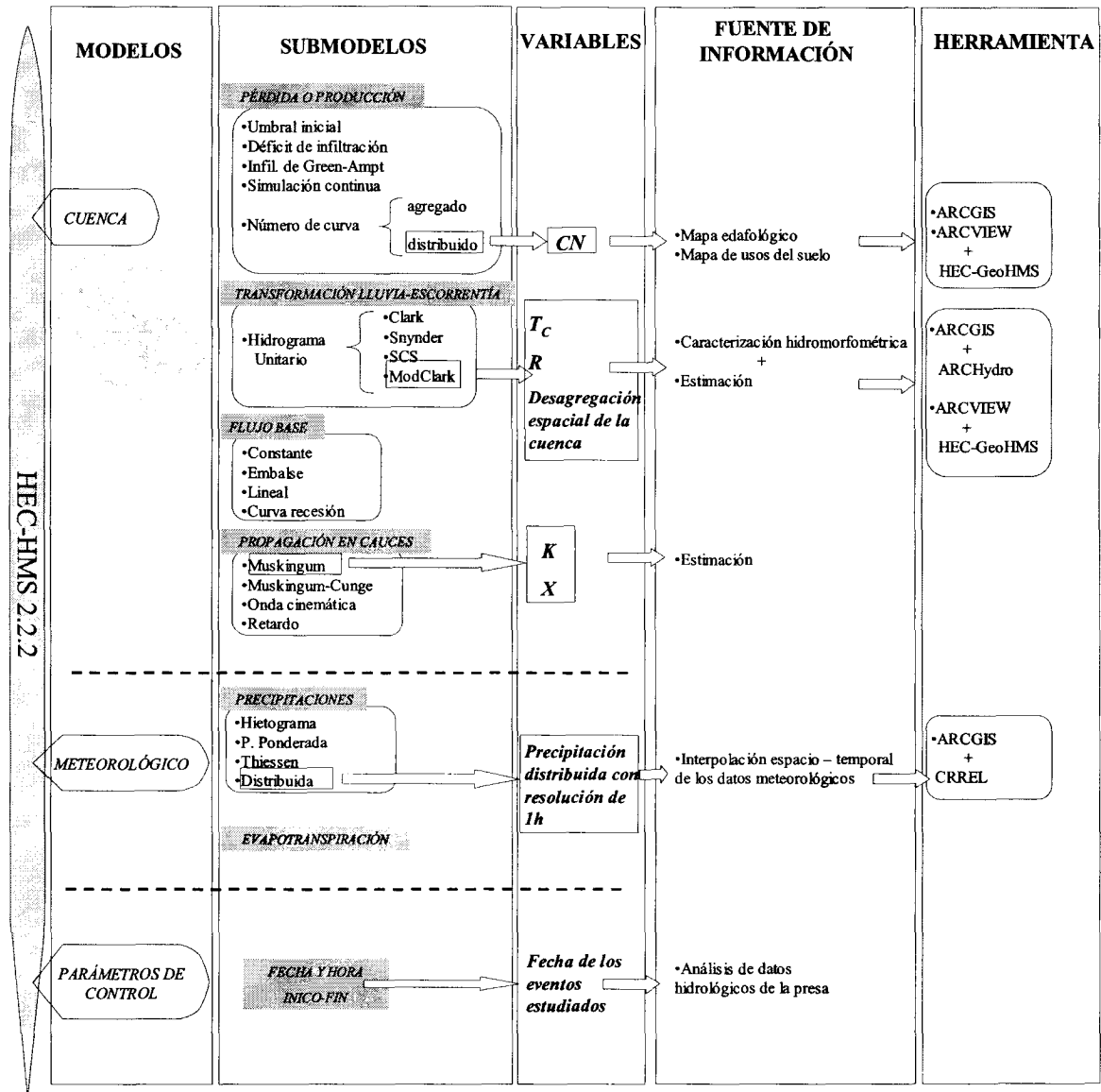


Figura 6.39: Esquema del programa HEC-HMS, variables de simulación y conexión con las demás herramientas empleadas

### 6.3. ALTERNATIVAS DE OBTENCIÓN DEL NÚMERO DE CURVA ENSAYADAS

Con el objeto de poder evaluar la eficacia de las mejoras propuestas al método del número de curva, se han construido distintas combinaciones de los diferentes parámetros distribuidos que definen la variable de producción de escorrentía, obteniéndose los modelos de simulación que se describen a continuación:

#### **Modelo original del número de curva (NC\_O\_CAH)**

Este modelo se basa en la aplicación distribuida del modelo del número de curva en su concepción original, es decir, teniendo en cuenta los usos del suelo, las prácticas culturales, la condición hidrológica, los cuatro grupos hidrológicos de suelo (A, B, C y D) y la condición antecedente de humedad (I, II, III) dependiente de la precipitación acumulada en los cinco días precedentes a la tormenta estudiada.

#### **Modelo original del número de curva con variación del índice de estado antecedente de humedad ( $I_{eh}$ ) (NC\_O\_IEH)**

Aplicación distribuida del número de curva en su concepción original en cuanto a los usos del suelo y grupos hidrológicos de suelo (A, B, C y D), y variación del contenido de humedad del mismo basado en el índice de estado antecedente de humedad ( $I_{eh}$ ) (Véase Epígrafe 4.2.4.2).

#### **Modelo original del número de curva con variación del porcentaje de reserva de agua en el suelo (NC\_O\_%R)**

Modelo análogo al anterior pero introduciendo como modificador del estado antecedente de humedad el porcentaje de saturación de la reserva de agua en el suelo calculado a través del balance hídrico del suelo y de la capacidad de retención de agua (*CRAM*).

#### **Modelo modificado del número de curva con estado antecedente de humedad (NC\_MOD\_CAH)**

Modelo resultado de la aplicación distribuida de los usos del suelo sobre la estimación de los grupos hidrológicos de suelo continuos (estimados a través del índice de grupo ( $I_g$ ), según la metodología propuesta en el Epígrafe 4.1) y con la condición antecedente de humedad derivada del método original, basado en la precipitación de los cinco días precedentes al evento.

#### **Modelo modificado del número de curva con variación del índice de estado antecedente de humedad ( $I_{eh}$ ) (NC\_MOD\_IEH)**

Aplicación distribuida del número de curva en su concepción original en cuanto a los usos del suelo, pero con la estimación continua de los grupos hidrológicos de suelo (índice de grupo) y variación del contenido de humedad del suelo basado en el índice de estado antecedente de humedad ( $I_{eh}$ ).

### **Modelo modificado del número de curva con variación del porcentaje de reserva de agua en el suelo (NC\_MOD\_%R)**

Modelo análogo al anterior pero introduciendo como modificador del estado antecedente de humedad el porcentaje de saturación de la reserva de agua en el suelo, calculado a través del balance hídrico del suelo y la capacidad de retención de agua (*CRAM*).

### **Modelo de Témez original (Témez\_O\_CAH)**

Este modelo se basa en la aplicación distribuida de la modificación original propuesta por Témez del modelo del número de curva, es decir, teniendo en cuenta los usos del suelo, los cuatro grupos hidrológicos de suelo (A, B, C y D) y la condición antecedente de humedad (I, II y III) dependiente de la precipitación acumulada en los cinco días precedentes a la tormenta estudiada (véase Epígrafe 2.2.5).

### **Modelo de Témez con variación del índice de estado antecedente de humedad ( $I_{eh}$ ) (Témez\_O\_IEH)**

Aplicación distribuida del modelo de Témez en su concepción original en cuanto a los usos del suelo y grupos hidrológicos de suelo (A,B,C y D), y variación del contenido de humedad del suelo basado en el índice de estado antecedente de humedad ( $I_{eh}$ ).

### **Modelo de Témez con variación del porcentaje de reserva de agua en el suelo (Témez\_O\_%R)**

Modelo similar al anterior pero introduciendo como modificador del estado antecedente de humedad el porcentaje de saturación de la reserva de agua en el suelo, calculado a través del balance hídrico del suelo y la capacidad de retención de agua (*CRAM*).

### **Modelo modificado de Témez con estado antecedente de humedad (Témez\_MOD\_CAH)**

Modelo resultado de la aplicación distribuida de los usos del suelo sobre la estimación de los grupos hidrológicos de suelo continuos (calculados a través del índice de grupo ( $I_g$ )) a las tablas del modelo de Témez y con la condición antecedente de humedad derivada del método original, basado en la precipitación de los cinco días precedentes al evento.

### **Modelo modificado de Témez con variación del índice de estado antecedente de humedad ( $I_{eh}$ ) (Témez\_MOD\_IEH)**

Aplicación distribuida del modelo de Témez en su concepción original en cuanto a los usos del suelo, pero con la estimación de los grupos hidrológicos de suelo continua (índice de grupo) y variación del contenido de humedad del suelo basado en el índice de estado antecedente de humedad ( $I_{eh}$ ).

### **Modelo modificado de Témez con variación del porcentaje de reserva de agua en el suelo (Témez\_MOD\_%R)**

Modelo análogo al anterior pero introduciendo como modificador del estado antecedente de humedad el porcentaje de saturación de la reserva de agua en el suelo calculado a través del balance hídrico del suelo y la capacidad de retención de agua (*CRAM*).

Con el fin de facilitar la comprensión de las diferencias conceptuales entre los distintos modelos, a continuación se ofrece una tabla resumen:

Tabla 6.21: Resumen de las características de las distintas combinaciones de obtención del número de curva

NOMBRE DEL MODELO	VARIACIONES						
	Usos del suelo		Grupo hidrológico de suelo		Humedad del suelo		
	Número de curva	Témez	Discreto	Continuo	CAH	I <sub>eh</sub>	%R
NC O CAH	♦		♦		♦		
NC O IEH	♦		♦			♦	
NC O %R	♦		♦				♦
NC MOD CAH	♦			♦	♦		
NC MOD IEH	♦			♦		♦	
NC MOD %R	♦			♦			♦
Témez O CAH		♦	♦		♦		
Témez O IEH		♦	♦			♦	
Témez O %R		♦	♦				♦
Témez MOD CAH		♦		♦	♦		
Témez MOD IEH		♦		♦		♦	
Témez MOD %R		♦		♦			♦

CAH: Condición antecedente de humedad; I<sub>eh</sub>: Índice antecedente de humedad; %R: Porcentaje saturación reserva del suelo

Aplicando estos 12 modelos a las 8 tormentas estudiadas se han obtenidos los 96 hidrogramas de escorrentía superficial que han sido comparados con los hidrogramas observados en la presa para cada uno de los 8 eventos (Epígrafe 6.1.2).

### 6.3.1. Metodología de evaluación de la precisión de los distintos modelos propuestos

Con el fin de evaluar la eficiencia de los distintos modelos, los hidrogramas resultantes se han comparado entre sí y con el hidrograma observado (OBS), realizándose la comparación a través de:

- Una evaluación visual.
- De forma paramétrica a través de variables propias del hidrograma como: el volumen de escorrentía total generado, la diferencia de volumen respecto al hidrograma real, el caudal punta máximo, la diferencia respecto al caudal punta máximo real, el tiempo punta (o instante en el que se produce el máximo caudal del evento) y el desfase entre los modelos y la realidad en la producción del caudal punta.
- A través de estadísticos como:

c.1-Error relativo del caudal punta, calculado como:

$$E.Qp = \frac{Qp_{obs} - Qp_{sim}}{Qp_{obs}} \cdot 100 \quad 6.32$$

Donde:  $E.Qp$  es el error relativo del caudal punta en porcentaje para un evento

$Qp_{obs}$  es el caudal punta observado para un evento en la presa

$Qp_{sim}$  es el caudal punta simulado por el modelo para un evento

c.2-Error medio cuadrático (Hogue *et al.*, 2006):

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Q_{obs,(t)} - Q_{sim,(t)})^2} \quad 6.33$$

Donde: *RMS* es el error medio cuadrático del evento

$Q_{obs,(t)}$  es el caudal observado en el instante “*t*” para un evento en la presa

$Q_{sim,(t)}$  es el caudal simulado por el modelo en el instante “*t*” de un evento

*n* es el número de instantes “*t*” registrados por el hidrograma

c.3-Error relativo del caudal (Hogue *et al.*, 2006):

$$E.Q = \left[ \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{sim,(t)} - Q_{obs,(t)})}{\sum_{t=1}^n Q_{obs,(t)}} \right] \cdot 100 \quad 6.34$$

Donde: *E.Q* es el error relativo del caudal en porcentaje

$Q_{sim,(t)}$  es el caudal simulado por el modelo en el instante “*t*” de un evento

$Q_{obs,(t)}$  es el caudal observado en el instante “*t*” para un evento en la presa

*n* es el número de instantes “*t*” registrados por el hidrograma

c.4-Parámetro de eficiencia (Nash y Sutcliffe, 1970):

$$NSE = 1 - \left( \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{sim,(t)} - Q_{obs,(t)})^2}{\sum_{t=1}^n (Q_{obs,(t)} - Q_{obs})^2} \right) \quad 6.35$$

Donde: *NSE* es el parámetro de eficiencia de Nash- Sutcliffe

$Q_{sim,(t)}$  es el caudal simulado por el modelo en el instante “*t*” de un evento

$Q_{obs,(t)}$  es el caudal observado en el instante “*t*” para un evento en la presa

$Q_{obs}$  es el caudal medio observado para un evento en la presa

*n* es el número de instantes “*t*” registrados por el hidrograma

Este parámetro adimensional está ampliamente aceptado en hidrología como un evaluador de la eficacia de los modelos hidrológicos (Green y Stephenson, 1986), pudiendo tomar valores comprendidos entre cero y uno con un significado similar a los valores obtenidos por el coeficiente de determinación, por lo que los valores próximos a uno indican un ajuste excelente a la realidad en cuanto a la forma de la curva que representa el hidrograma.

El parámetro de eficiencia puede alcanzar valores negativos en aquellos casos en los que el numerador sea mayor que el denominador, lo que implica que la varianza entre los valores observados y los simulados es mayor que la varianza de las observaciones y, por tanto, la media de los datos observados es más representativa que el propio modelo (Mishra *et al.*, 2006).

c.5-La media de diversos parámetros, con el fin de poder comparar los distintos modelos entre sí.

$$Vol = \frac{\sum_{i=1}^n |VOL_i|}{n} \quad 6.36$$

Donde:  $Vol$  es la media de la diferencia entre el volumen observado y el estimado para todas las tormentas simuladas en un modelo, en  $hm^3$

$|VOL_i|$  es la diferencia en valor absoluto entre el volumen observado y el estimado para la tormenta  $i$ -ésima de una simulación

$n$  es el número de tormentas ensayadas en una simulación

$$E.Qp = \frac{\sum_{i=1}^n |E.Qp_i|}{n} \quad 6.37$$

Donde:  $E.Qp$  es la media del error relativo del caudal punta para las tormentas simuladas en un modelo, en %

$|E.Qp_i|$  es el error relativo del caudal punta en valor absoluto para la tormenta  $i$ -ésima de una simulación

$n$  es el número de tormentas ensayadas en una simulación

$$RMS = \frac{\sum_{i=1}^n RMS_i}{n} \quad 6.38$$

Donde:  $RMS$  es la media del error medio cuadrático para las tormentas simuladas en un modelo, en  $m^3/s$

$RMS_i$  es el error medio cuadrático para la tormenta  $i$ -ésima de una simulación

$n$  es el número de tormentas ensayadas en una simulación

$$E.Q = \frac{\sum_{i=1}^n |E.Q_i|}{n} \quad 6.39$$

Donde:  $\overline{EQ}$  es la media del error relativo del caudal para las tormentas simuladas en un modelo, en porcentaje

$|EQ_i|$  es el error relativo del caudal en valor absoluto para la tormenta  $i$ -ésima de una simulación

$n$  es el número de tormentas ensayadas en una simulación

$$NSE = \frac{\sum_{i=1}^n NSE_i}{n} \quad 6.40$$

Donde:  $\overline{NSE}$  es la media del parámetro de eficiencia de Nash-Sutcliffe para las tormentas simuladas en un modelo

$NSE_i$  es el parámetro de eficiencia de Nash- Sutcliffe para la tormenta  $i$ -ésima de una simulación

$n$  es el número de tormentas ensayadas en una simulación

En cuanto a estos estadísticos hay que tener en cuenta que acentúan los valores atípicos.

Para facilitar la comparación de los hidrogramas obtenidos en las simulaciones con los observados, los modelos ensayados han sido agrupados de tres en tres en función de la variable ensayada. En la tabla siguiente se muestran las distintas agrupaciones de los modelos de simulación anteriormente descritos.

Tabla 6.22: Agrupación de los modelos de simulación en función de las variables ensayadas

GRUPO DE SIMULACIÓN	NOMBRE DEL MODELO	VARIACIONES						
		Usos del suelo		Grupo hidrológico de suelo		Humedad del suelo		
		Número de curva	Témez	Discreto	Continuo	CAH	$I_{eh}$	% R
SIMULACIÓN I	NC_O_CAH	♦		♦		♦		
	NC_O_IEH	♦		♦			♦	
	NC_O_%R	♦		♦				♦
SIMULACIÓN II	NC_MOD_CAH	♦			♦	♦		
	NC_MOD_IEH	♦			♦		♦	
	NC_MOD_%R	♦			♦			♦
SIMULACIÓN III	Témez_O_CAH		♦	♦		♦		
	Témez_O_IEH		♦	♦			♦	
	Témez_O_%R		♦	♦				♦
SIMULACIÓN IV	Témez_MOD_CAH		♦		♦	♦		
	Témez_MOD_IEH		♦		♦		♦	
	Témez_MOD_%R		♦		♦			♦

## CAPÍTULO 7: RESULTADO DE LAS SIMULACIONES

A continuación se ofrecen los resultados obtenidos en las distintas simulaciones una vez agrupadas.

### 7.1. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN I

En este grupo se han agrupado aquellas simulaciones realizadas con los números de curva obtenidos del modelo original (discretos), pero con las variaciones derivadas del estado antecedente de humedad.

En las siguientes figuras se puede apreciar la respuesta ofrecida por la cuenca, en función del modelo ensayado, para las distintas tormentas estudiadas, así como los valores de los diferentes parámetros y estadísticos que facilitan la evaluación de los modelos.

#### 7.1.1. Tormenta 1 (16/12/2002)

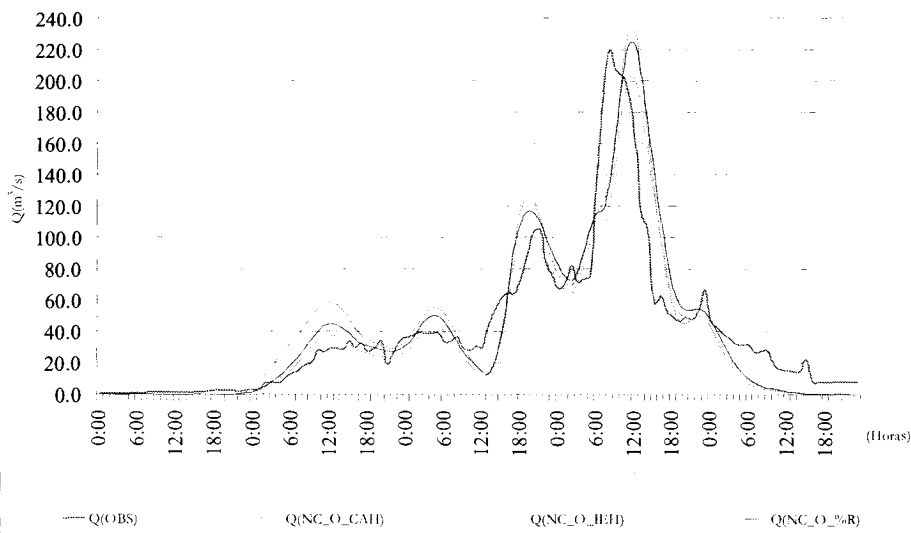


Figura 7.1: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación I y la tormenta 1 del 16/12/2002

Tabla 7.1: Parámetros y estadísticos de la simulación I y la tormenta 1 del 16/12/2002

Parámetro	Hidrograma			
	OBS	NC_O_CAH	NC_O_IEH	NC_O_%R
Volumen (hm <sup>3</sup> )	17,31	18,43	15,85	17,81
Caudal punta (m <sup>3</sup> /s)	220,52	232,24	202,54	224,62
Hora caudal punta	8:00	11:00	11:00	11:00
Diferencia volumen (hm <sup>3</sup> )		-1,15	1,41	-0,65
Diferencia caudal punta (m <sup>3</sup> /s)		-11,72	17,93	-4,12
Desfase (h)		3:00	3:00	3:00
RMS (m <sup>3</sup> /s)		23,13	20,42	22,31
E.Q (%)		6,60	-8,31	3,31
NSE		0,75	0,80	0,77
E.Qp (%)		-5,31	8,14	-1,87

En la tormenta 1 y de forma gráfica se aprecia la enorme similitud entre todos los modelos calculados, tanto entre sí como con el observado para la cuenca. A nivel numérico se percibe que la menor diferencia de volumen y de caudal se localiza en el modelo NC\_O\_%R, siendo además el mejor valor en cuanto al error relativo del caudal y el error relativo del caudal punta, si bien el error medio cuadrático y el parámetro de eficiencia ofrece mejores valores en el modelo NC\_O\_IEH, debido a que en las primeras fases del hidrograma la curva del modelo es similar a la real.

### 7.1.2. Tormenta 2 (24/02/2003)

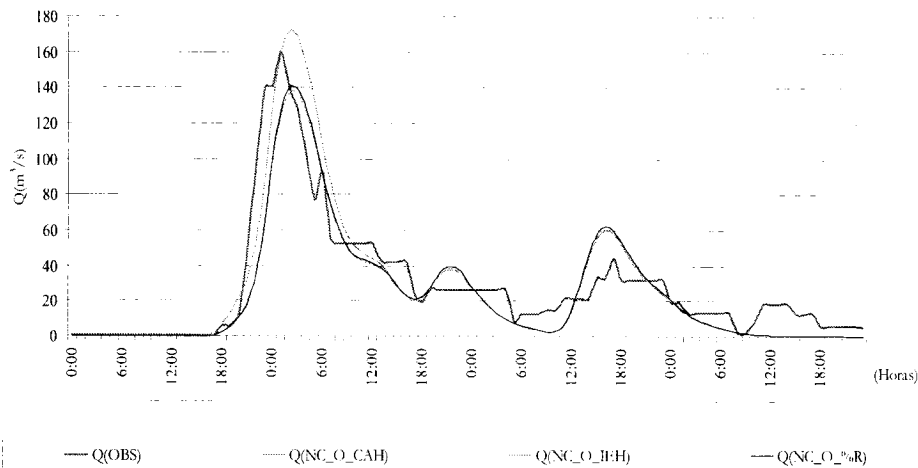


Figura 7.2: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación I y la tormenta 2 del 24/02/2003

Tabla 7.2: Parámetros y estadísticos de la simulación I y la tormenta 2 del 24/02/2003

Parámetro	Hidrograma			
	OBS	NC_O_CAH	NC_O_IEH	NC_O_%R
Volumen (hm <sup>3</sup> )	9,86	9,54	8,32	8,53
Caudal punta (m <sup>3</sup> /s)	160,31	172,02	137,21	140,04
Hora caudal punta	1:00	2:00	2:00	2:00
Diferencia volumen (hm <sup>3</sup> )		0,34	1,53	1,31
Diferencia caudal punta (m <sup>3</sup> /s)		-11,72	23,11	20,22
Desfase (h)		1:00	1:00	1:00
RMS (m <sup>3</sup> /s)		15,19	15,85	15,74
<i>E.Q</i> (%)		-3,00	-15,05	-13,03
<i>NSE</i>		0,80	0,78	0,79
<i>E.Qp</i> (%)		-7,30	14,40	12,63

En el caso de esta tormenta todos los parámetros dan los mejores resultados para el modelo NC\_O\_CAH, causado porque en algunas subcuencas el valor antecedente de humedad ofrece valores más elevados que en el resto de los modelos, debido a que la cantidad de lluvia en los cinco días precedentes sí ha servido para modificar la condición antecedente de humedad, pero no es una cantidad significativa como para hacer variar la reserva de agua del suelo, parámetro que condiciona los modelos NC\_O\_IEH y NC\_O\_%R, aunque esto provoca que se haga una estimación del caudal punta por exceso.

### 7.1.3. Tormenta 3 (27/03/2003)

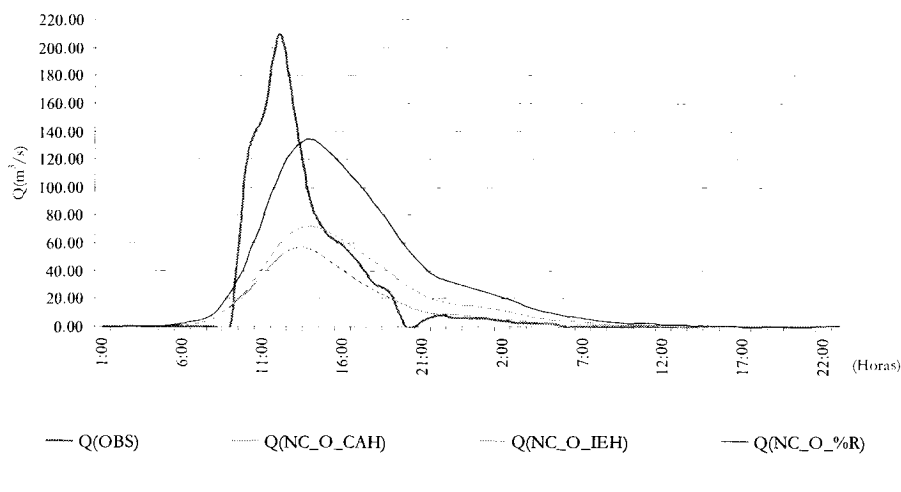


Figura 7.3: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación I y la tormenta 3 del 27/03/2003

Tabla 7.3: Parámetros y estadísticos de la simulación I y la tormenta 3 del 27/03/2003

Parámetro	Hidrograma			
	OBS	NC_O_CAH	NC_O_IEH	NC_O_%R
Volumen (hm <sup>3</sup> )	3,65	1,81	2,72	4,93
Caudal punta (m <sup>3</sup> /s)	209,53	56,41	73,01	134,44
Hora caudal punta	12:00	13:00	14:00	14:00
Diferencia volumen (hm <sup>3</sup> )		1,85	0,87	-1,32
Diferencia caudal punta (m <sup>3</sup> /s)		153,15	136,59	75,03
Desfase (h)		1:00	2:00	2:00
RMS (m <sup>3</sup> /s)		35,59	33,64	31,77
E.Q (%)		-49,42	-25,40	37,70
NSE		0,42	0,496	0,548
E.Qp (%)		73,07	65,18	35,84

En esta tormenta ninguno de los modelos ofrece datos fiables. Esto podría deberse a que la tormenta de referencia fue de una enorme violencia y localizada en una única estación meteorológica, y posiblemente los métodos de interpolación de las precipitaciones del modelo meteorológico introducen importantes sesgos en la valoración de la lluvia.

#### 7.1.4. Tormenta 4 (22/04/2003)

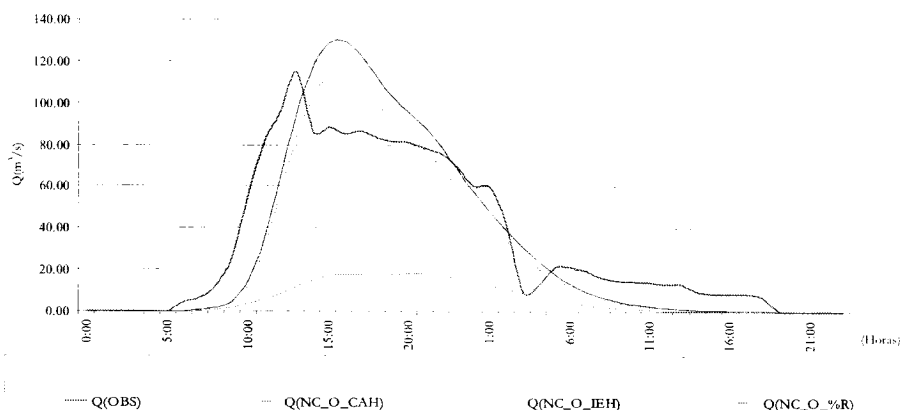


Figura 7.4: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación I y la tormenta 4 del 22/04/2003

Tabla 7.4: Parámetros y estadísticos de la simulación I y la tormenta 4 del 22/04/2003

Parámetro	Hidrograma			
	OBS	NC_O_CAH	NC_O_IEH	NC_O_%R
Volumen (hm <sup>3</sup> )	5,74	1,01	4,83	5,49
Caudal punta (m <sup>3</sup> /s)	114,95	18,27	114,65	129,70
Hora caudal punta	13:00	20:00	15:00	15:00
Diferencia volumen (hm <sup>3</sup> )		4,73	0,91	0,25
Diferencia caudal punta (m <sup>3</sup> /s)		96,68	0,30	-14,75
Desfase (h)		7:00	2:00	2:00
RMS (m <sup>3</sup> /s)		39,27	16,12	17,64
E.Q (%)		-82,34	-15,79	-4,29
NSE		-0,25	0,79	0,75
E.Qp (%)		84,10	0,26	-12,83

En la tormenta 4 los modelos propuestos se ajustan mejor a la realidad de la cuenca que el establecido para el número de curva (NC\_O\_CAH), como se puede observar tanto a nivel gráfico como numérico, pudiéndose resaltar que el volumen ofrece mejores resultados con el modelo NC\_O\_%R y el caudal punta con el modelo NC\_O\_IEH.

### 7.1.5. Tormenta 5 (05/12/2003)

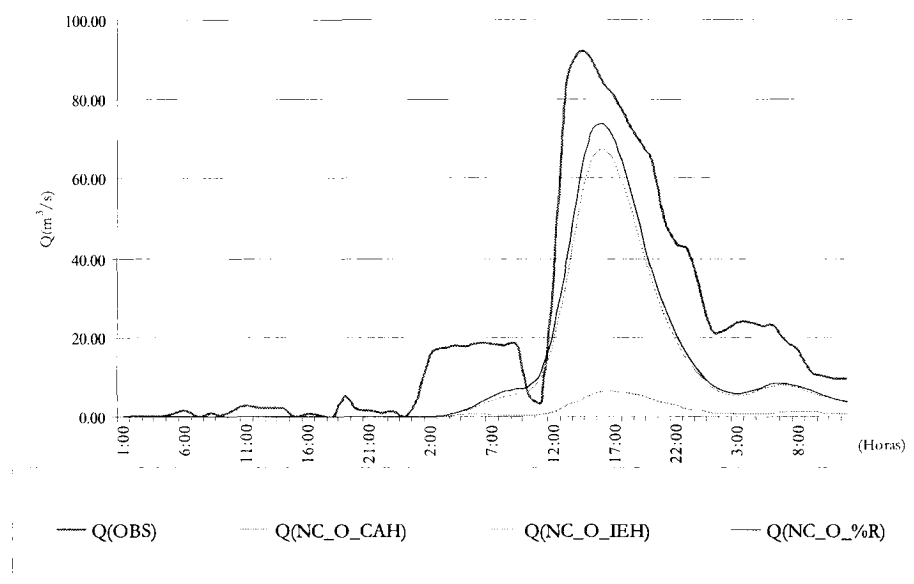


Figura 7.5: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación I y la tormenta 5 del 05/12/2003

Tabla 7.5: Parámetros y estadísticos de la simulación I y la tormenta 5 del 05/12/2003

Parámetro	Hidrograma			
	OBS	NC_O_CAH	NC_O_IEH	NC_O_%R
Volumen (hm <sup>3</sup> )	4,47	0,24	2,22	2,44
Caudal punta (m <sup>3</sup> /s)	91,97	6,53	67,47	74,11
Hora caudal punta	14:00	17:00	16:00	16:00
Diferencia volumen (hm <sup>3</sup> )		4,22	2,25	2,03
Diferencia caudal punta (m <sup>3</sup> /s)		85,44	24,50	17,86
Desfase (h)		3:00	2:00	2:00
RMS (m <sup>3</sup> /s)		31,47	15,20	13,66
E.Q (%)		-94,56	-50,34	-45,33
NSE		-0,43	0,67	0,73
E.Qp (%)		92,90	26,64	19,42

Al igual que sucede con la tormenta anterior, en esta el modelo tradicional del número de curva se aleja de los parámetros reales de la cuenca, siendo el modelo NC\_O\_%R el que mejor se ajusta a los datos observados para todos los parámetros estudiados.

Este desajuste se puede deber a que el modelo NC\_O\_CAH considera que la totalidad de la cuenca se encuentra en un estado antecedente de humedad próximo al punto de marchitez permanente (I), mientras que desde el punto de vista de la reserva de agua del suelo la cuenca

está próxima a la capacidad de campo (III), como se puede observar en la Tabla 5.47, Tabla 5.55 y Tabla 5.56.

### 7.1.6. Tormenta 6 (08/12/2003)

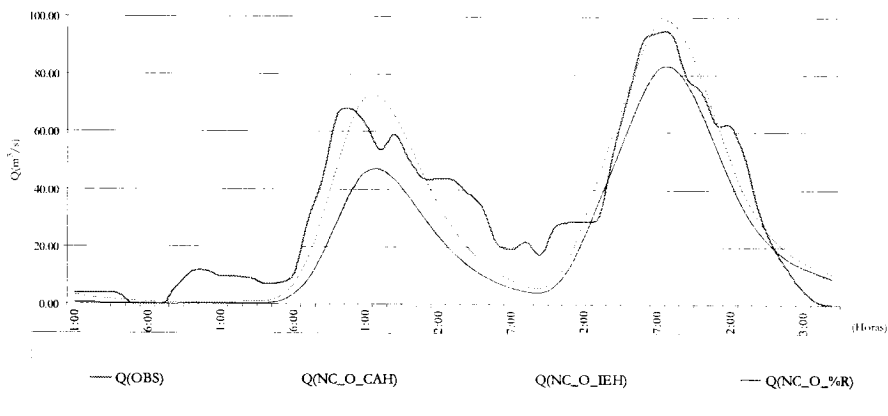


Figura 7.6: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación I y la tormenta 6 del 08/12/2003

Tabla 7.6: Parámetros y estadísticos de la simulación I y la tormenta 6 del 08/12/2003

Parámetro	Hidrograma			
	OBS	NC_O_CAH	NC_O_IEH	NC_O_%R
Volumen (hm <sup>3</sup> )	6,26	5,67	4,28	4,29
Caudal punta (m <sup>3</sup> /s)	94,97	98,30	82,68	82,86
Hora caudal punta	17:00	18:00	18:00	18:00
Diferencia volumen (hm <sup>3</sup> )		0,59	1,98	1,97
Diferencia caudal punta (m <sup>3</sup> /s)		-3,33	12,29	12,12
Desfase (h)		1:00	1:00	1:00
RMS (m <sup>3</sup> /s)		9,81	14,28	14,23
E.Q (%)		-9,38	-31,61	-31,44
NSE		0,87	0,73	0,73
E.Qp (%)		-3,51	12,95	12,76

Los valores ofrecidos por todos los modelos, según se aprecia en la gráfica, son similares en la tormenta 6, si bien el que mejor se ajusta es el NC\_O\_CAH. Hay que tener en cuenta que, debido a la cercanía de esta tormenta con la cinco (dos días entre ambas), el hidrograma observado puede estar registrando parte de la escorrentía retardada de la tormenta anterior, parámetro este difícil de determinar y separar en ambos eventos.

### 7.1.7. Tormenta 7 (20/02/2004)

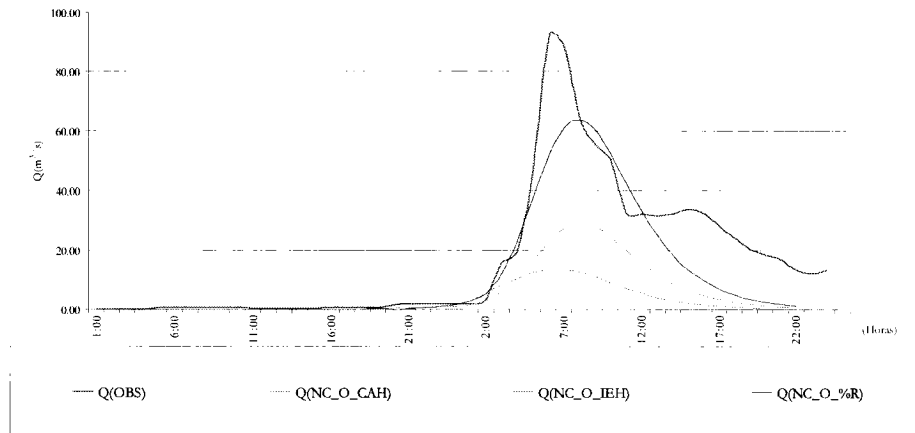


Figura 7.7: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación I y la tormenta 7 del 20/02/2004

Tabla 7.7: Parámetros y estadísticos de la simulación I y la tormenta 7 del 20/02/2004

Parámetro	Hidrograma			
	OBS	NC O CAH	NC O IEH	NC O %R
Volumen (hm <sup>3</sup> )	2,85	0,47	0,90	1,94
Caudal punta (m <sup>3</sup> /s)	92,36	13,52	29,06	63,97
Hora caudal punta	6:00	7:00	7:00	8:00
Diferencia volumen (hm <sup>3</sup> )		2,38	1,94	0,91
Diferencia caudal punta (m <sup>3</sup> /s)		78,84	63,30	28,39
Desfase (h)		1:00	1:00	2:00
RMS (m <sup>3</sup> /s)		23,63	19,05	10,89
E.Q (%)		-83,43	-68,30	-31,99
NSE		-0,08	0,30	0,77
E.Qp (%)		85,36	68,54	30,74

En la tormenta 7 el modelo tradicional del número de curva se aleja de los parámetros reales de la cuenca, siendo el modelo NC\_O\_%R el que mejor se ajusta a los datos observados para todos los parámetros estudiados.

Este desajuste se debe a que el modelo NC\_O\_CAH considera, como ya se ha comentado para anteriores tormentas, que la totalidad de la cuenca se encuentra en un estado antecedente de humedad próximo al punto de marchitez permanente (I), el modelo NC\_O\_IEH considera que la cuenca se encuentra entre las condiciones I y II, y el modelo NC\_O\_%R supone que la cuenca está en un estado superior de humedad, entre II y III, como se puede observar en la en la Tabla 5.47, Tabla 5.55 y Tabla 5.56.

### 7.1.8. Tormenta 8 (23/02/2004)

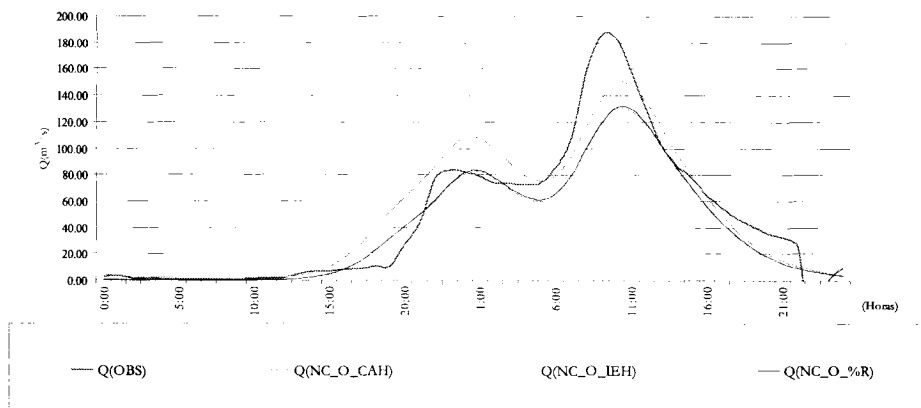


Figura 7.8: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación I y la tormenta 8 del 23/02/2004

Tabla 7.8: Parámetros y estadísticos de la simulación I y la tormenta 8 del 23/02/2004

Parámetro	Hidrograma			
	OBS	NC O CAH	NC O IEH	NC O %R
Volumen (hm <sup>3</sup> )	8,26	8,85	7,06	7,11
Caudal punta (m <sup>3</sup> /s)	186,17	149,82	130,61	131,39
Hora caudal punta	9:00	10:00	10:00	10:00
Diferencia volumen (hm <sup>3</sup> )		-0,59	1,20	1,15
Diferencia caudal punta (m <sup>3</sup> /s)		36,35	55,56	54,78
Desfase (h)		1:00	1:00	1:00
RMS (m <sup>3</sup> /s)		19,30	19,81	19,61
E.Q (%)		7,09	-14,57	-13,91
NSE		0,87	0,86	0,86
E.Qp (%)		19,52	29,84	29,42

Esta tormenta tiene el mismo comportamiento que el evento 6, donde todos los modelos tienen un desarrollo similar, si bien el que mejores valores arroja es el NC\_O\_CAH. Los desajustes entre los valores observados y los de los modelos pueden ser debidos a la cercanía de esta tormenta con la anterior (tormenta 7) y el posible efecto que la escorrentía diferida puede ejercer sobre el hidrograma observado.

### 7.1.9. Resumen de la simulación I

Representando de forma conjunta los principales estadísticos de la simulación para las ocho tormentas, se facilita la interpretación de los resultados, como se puede apreciar en los siguientes gráficos:

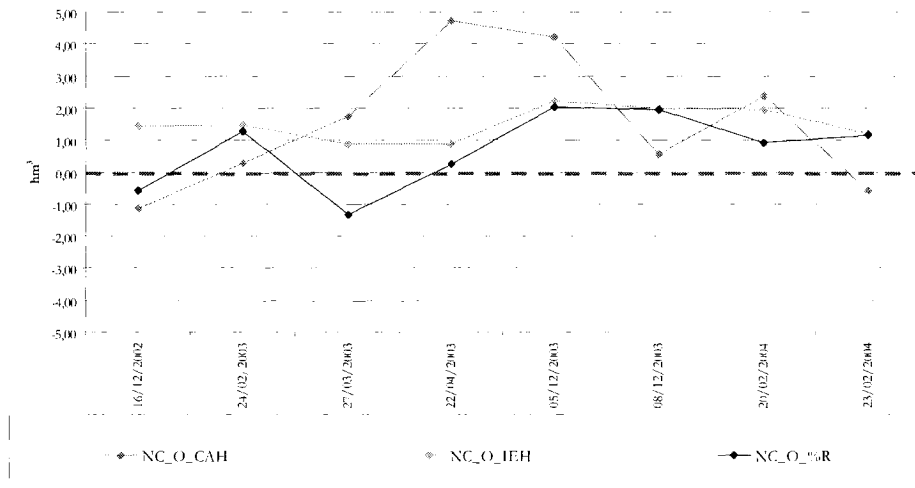


Figura 7.9: Diferencia de volumen para la simulación I y las distintas tormentas

Como estimador del volumen total de escorrentía el modelo que mejor se adapta es el NC\_O\_%R, si bien el modelo NC\_O\_IEH se comporta de forma similar, pero con valores ligeramente más alejados de los observados para la cuenca.

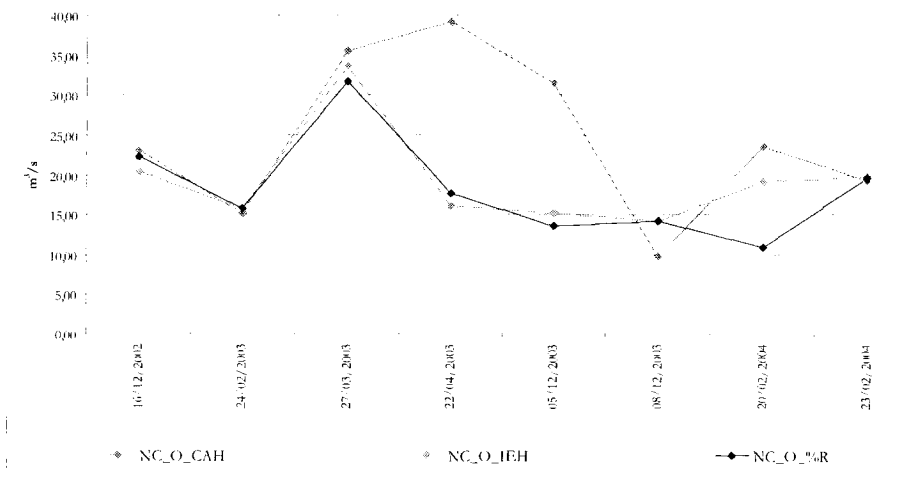


Figura 7.10: Valores del error medio cuadrático para la simulación I y las distintas tormentas

Los valores del error medio cuadrático en los modelos NC\_O\_%R y NC\_O\_IEH son similares para todos los eventos, ofreciendo un mejor ajuste en la mayoría de los casos que el modelo NC\_O\_CAH, salvo para las tormentas 2, en el que es muy similar, y en la tormenta 6, donde este último modelo presenta un valor ligeramente mejor.

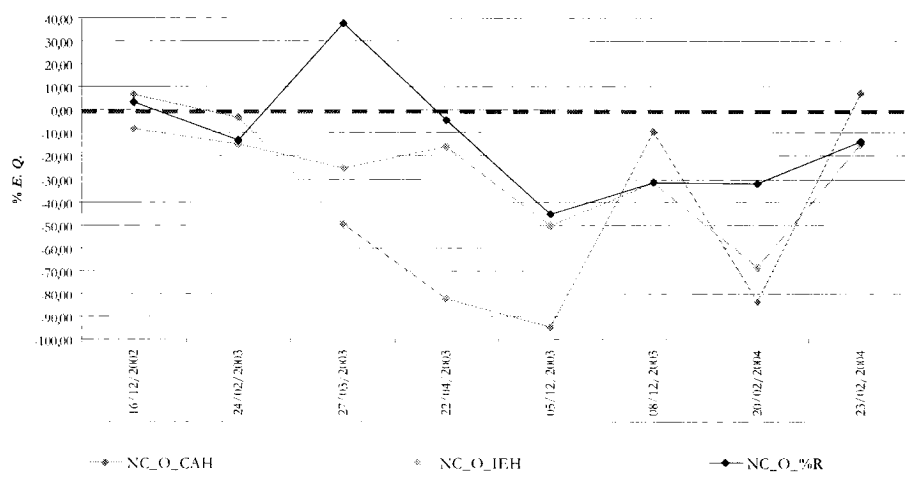


Figura 7.11: Valores del error relativo del caudal para la simulación I y las distintas tormentas

Para el valor del error relativo del caudal en la mayoría de las tormentas, cualquier modelo está por encima del 15%, destacando lo valores del error tan altos que ofrece el modelo NC\_O\_CAH para las tormentas 3, 4, 5 y 7.

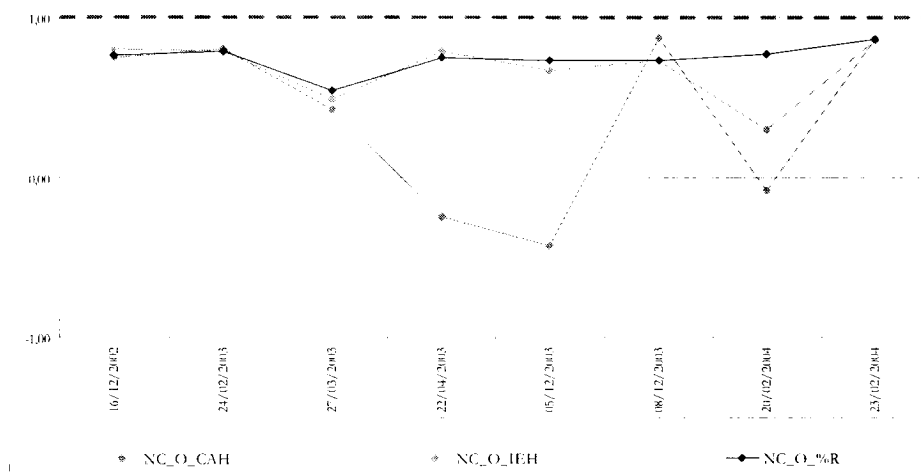


Figura 7.12: Valor de la eficiencia del ajuste de la simulación I y las distintas tormentas

El parámetro de eficiencia de Nahs presenta valores próximos a uno en el modelo NC\_O\_%R, apreciándose una fuerte variabilidad en el modelo NC\_O\_CAH, que llega a alcanzar valores negativos.

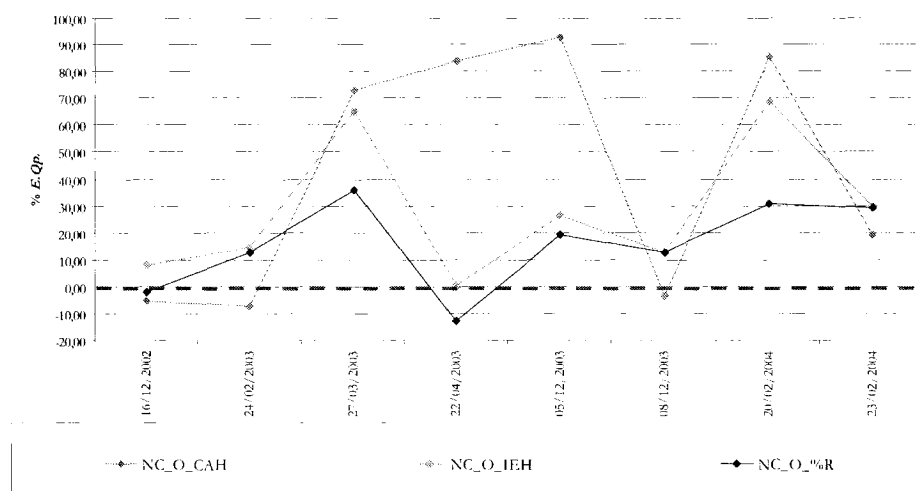


Figura 7.13: Valor del error relativo del caudal punta de la simulación I para las distintas tormentas

Respecto al valor relativo del error del caudal punta ningún modelo ofrece valores satisfactorios, si bien el más alejado del valor de referencia es el NC\_O\_CAH.

Analizando los hidrogramas, así como los distintos parámetros y estadísticos obtenidos de las simulaciones, se puede decir que los tres modelos tienen un comportamiento similar para las dos primeras tormentas y para la última, mientras que para las demás se producen grandes diferencias, pero como norma general presentan un mejor ajuste cualquiera de los dos modelos alternativos de cálculo de la humedad antecedente del suelo.

Los bajos caudales que presenta el modelo original del número de curva en las tormentas 3, 4, 5 y 7 están posiblemente causados porque en los cinco días precedentes a los citados eventos la precipitación es nula o escasa, lo que hace que gran parte de la cuenca se encuentre en una condición antecedente de humedad de tipo I (próxima al punto de marchitez permanente), estado que dista de la situación real de la reserva de agua del suelo.

## 7.2. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN II

En este caso se analizan los modelos basados en el número de curva introduciendo la variación de la determinación del grupo hidrológico de suelo de forma continua, así como las distintas variaciones de la condición de humedad.

En las siguientes figuras se puede apreciar la respuesta ofrecida por la cuenca, en función del modelo ensayado, para las ocho tormentas estudiadas, así como los valores de los distintos parámetros y estadísticos que facilitan la evaluación de los modelos.

**7.2.1. Tormenta 1 (16/12/2002)**

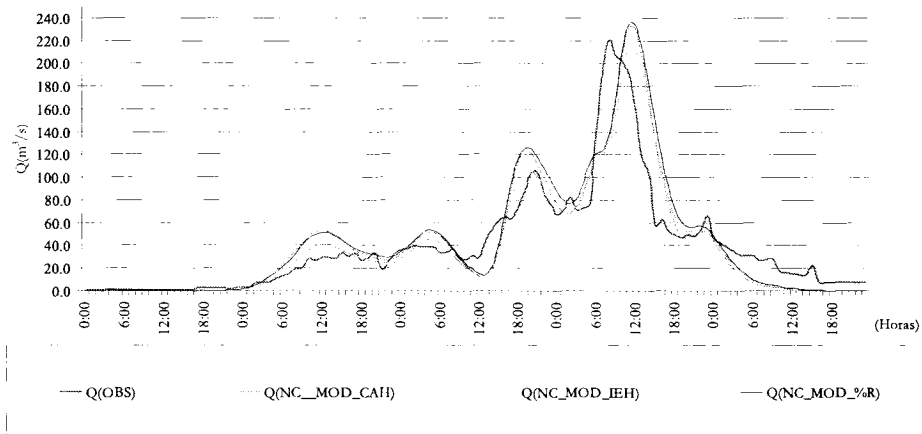


Figura 7.14: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación II y la tormenta 1 del 16/12/2002

Tabla 7.9: Parámetros y estadísticos de la simulación II y la tormenta 1 del 16/12/2002

Parámetro	Hidrograma									
	OBS	NC	MOD	CAH	NC	MOD	IEH	NC	MOD	%R
Volumen (hm <sup>3</sup> )	17,3			17,8			16,6			19,0
Caudal punta (m <sup>3</sup> /s)	220,5			232,2			212,7			235,3
Hora caudal punta	8:00			11:00			11:00			11:00
Diferencia volumen (hm <sup>3</sup> )				-0,6			0,6			-1,7
Diferencia caudal punta (m <sup>3</sup> /s)				-11,8			7,8			-14,8
Desfase (h)				3:00			3:00			3:00
RMS (m <sup>3</sup> /s)				22,69			21,28			24,29
E.Q (%)				3,31			-3,69			9,95
NSE				0,76			0,79			0,72
E.Qp (%)				-5,33			3,55			-6,71

La diferencia de volumen respecto al valor observado es exactamente igual para los modelos NC\_MOD\_CAH y NC\_MOD\_IEH, si bien para el resto de los valores es este último el que mejor se ajusta, salvo en el error relativo del caudal, para el que si bien ambos son similares es el primer modelo el que mejores datos arroja.

## 7.2.2. Tormenta 2 (24/02/2003)

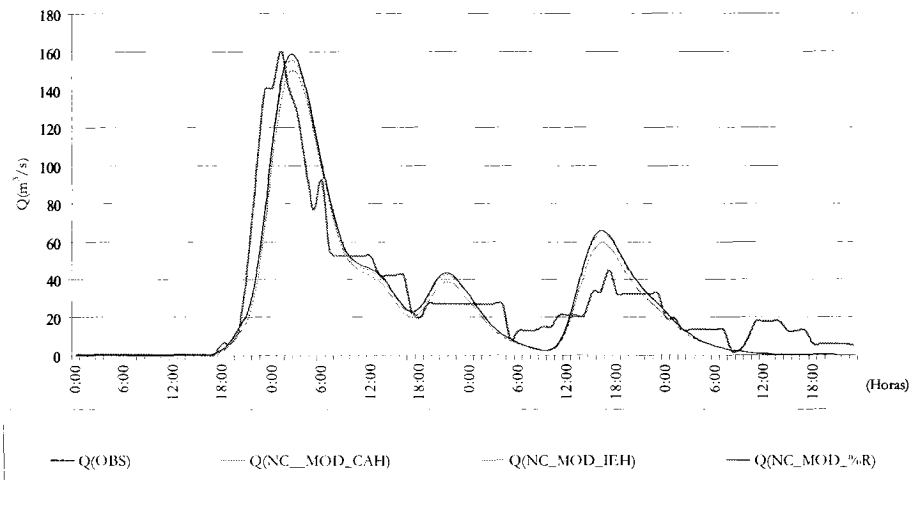


Figura 7.15: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación II y la tormenta 2 del 24/02/2003

Tabla 7.10: Parámetros y estadísticos de la simulación II y la tormenta 2 del 24/02/2003

Parámetro	Hidrograma			
	OBS	NC MOD CAH	NC MOD IEH	NC MOD %R
Volumen (hm <sup>3</sup> )	9,8	8,6	9,2	9,4
Caudal punta (m <sup>3</sup> /s)	160,3	149,3	155,0	158,0
Hora caudal punta	1:00	2:00	2:00	2:00
Diferencia volumen (hm <sup>3</sup> )		1,1	0,6	0,4
Diferencia caudal punta (m <sup>3</sup> /s)		11,0	5,3	2,3
Desfase (h)		1:00	1:00	1:00
RMS (m <sup>3</sup> /s)		15,73	15,57	15,63
<i>E.Q</i> (%)		-11,67	-5,95	-3,94
<i>NSE</i>		0,79	0,79	0,79
<i>E.Qp</i> (%)		6,87	3,28	1,41

En esta tormenta los mejores valores los aporta el modelo NC\_MOD\_%R para todos los parámetros excepto para el error medio cuadrático, donde el modelo NC\_MOD\_IEH presenta un valor ligeramente más favorable.

7.2.3. Tormenta 3 (27/03/2003)

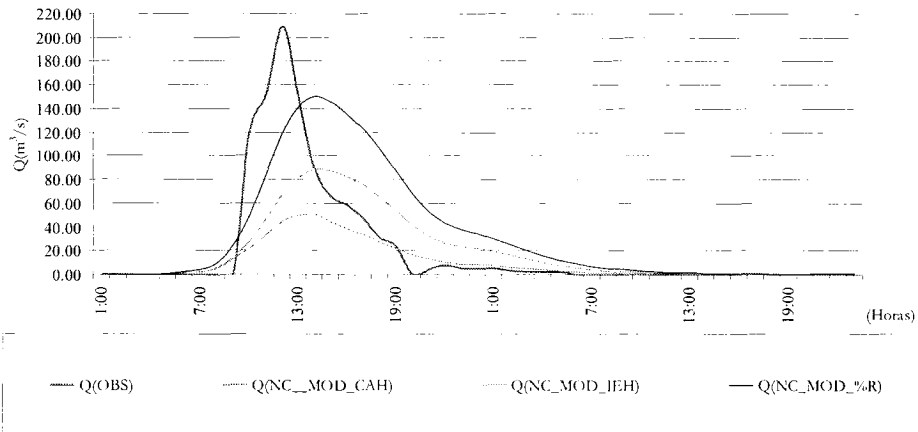


Figura 7.16: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación II y la tormenta 3 del 27/03/2003

Tabla 7.11: Parámetros y estadísticos de la simulación II y la tormenta 3 del 27/03/2003

Parámetro	Hidrograma					
	OBS	NC	MOD CAH	NC	MOD IEH	NC MOD %R
Volumen (hm <sup>3</sup> )	3,6		1,8		3,4	5,7
Caudal punta (m <sup>3</sup> /s)	209,5		50,6		88,9	150,8
Hora caudal punta	12:00		13:00		14:00	14:00
Diferencia volumen (hm <sup>3</sup> )			1,8		0,2	-2,1
Diferencia caudal punta (m <sup>3</sup> /s)			158,9		120,6	58,7
Desfase (h)			1:00		2:00	2:00
RMS (m <sup>3</sup> /s)			37,05		33,65	36,41
E.Q (%)			-50,81		-4,43	58,67
NSE			0,38		0,49	0,40
E.Qp (%)			75,84		57,58	28,02

Esta tormenta en ninguno de los modelos ofrece datos fiables. Este resultado puede deberse a que fue de una enorme violencia y localizada en una única estación meteorológica, por lo que posiblemente los métodos de interpolación de las precipitaciones del modelo meteorológico introducen importantes sesgos en la valoración de la lluvia, si bien los modelos ensayados mejoran los valores calculados en la simulación I.

### 7.2.4. Tormenta 4 (22/04/2003)

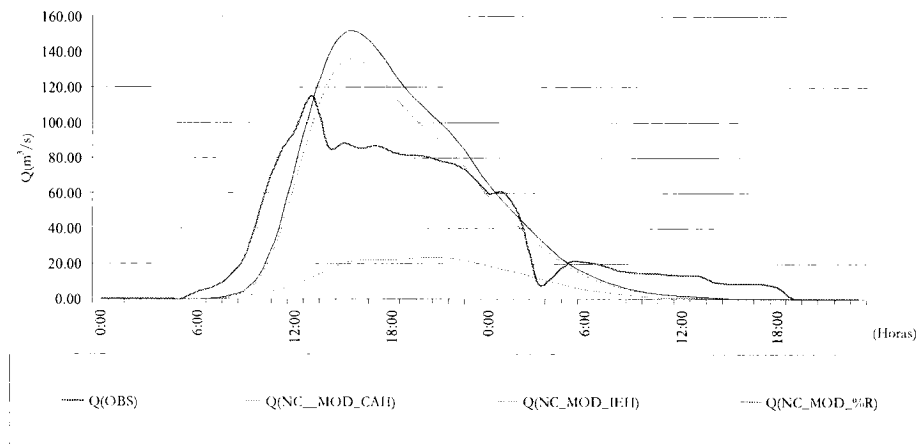


Figura 7.17: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación II y la tormenta 4 del 22/04/2003

Tabla 7.12: Parámetros y estadísticos de la simulación II y la tormenta 4 del 22/04/2003

Parámetro	Hidrograma			
	OBS	NC MOD CAH	NC MOD IEH	NC MOD %R
Volumen (hm <sup>3</sup> )	5,7	1,3	5,7	6,3
Caudal punta (m <sup>3</sup> /s)	115,0	24,0	135,1	150,7
Hora caudal punta	13:00	20:00	15:00	15:00
Diferencia volumen (hm <sup>3</sup> )		4,5	0,1	-0,6
Diferencia caudal punta (m <sup>3</sup> /s)		91,0	-20,1	-35,8
Desfase (h)		7:00	2:00	2:00
RMS (m <sup>3</sup> /s)		37,55	18,60	22,30
E.Q (%)		-78,08	-1,45	10,04
NSE		-0,14	0,72	0,60
E.Qp (%)		79,14	-17,48	-31,12

En esta tormenta el modelo que mejor se ajusta a los valores observados es el NC\_MOD\_IEH, para cualquier parámetro establecido, observándose la importante diferencia con el modelo NC\_MOD\_CAH, que se aleja de forma importante de la realidad de la cuenca, fundamentalmente por considerar que la cuenca está en condición I de humedad, mientras que desde el punto de vista de la reserva de agua del suelo la cuenca está próxima a la capacidad de campo (III).

## 7.2.5. Tormenta 5 (05/12/2003)

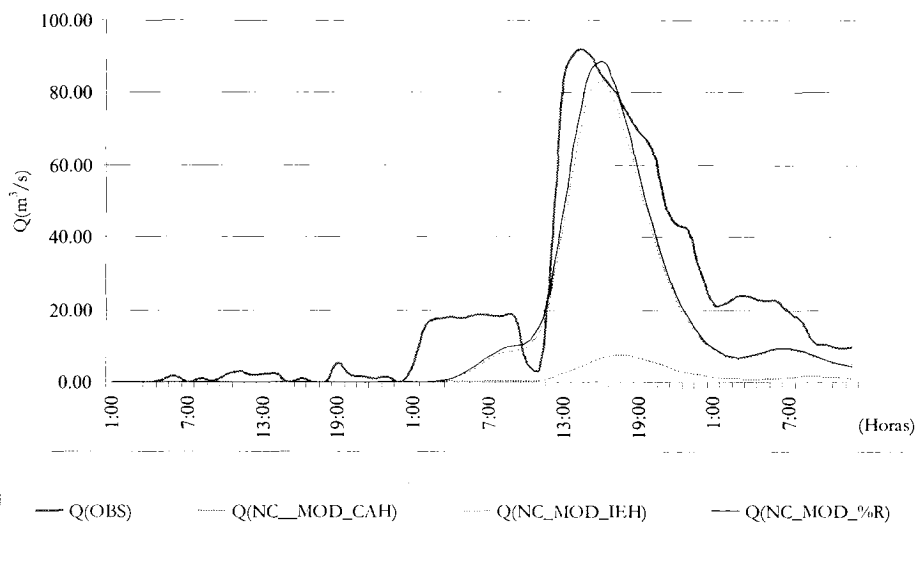


Figura 7.18: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación II y la tormenta 5 del 05/12/2003

Tabla 7.13: Parámetros y estadísticos de la simulación II y la tormenta 5 del 05/12/003

Parámetro	Hidrograma			
	OBS	NC MOD CAH	NC MOD IEH	NC MOD %R
Volumen (hm <sup>3</sup> )	4,5	0,3	2,7	2,9
Caudal punta (m <sup>3</sup> /s)	92,0	7,6	83,1	88,6
Hora caudal punta	14:00	17:00	16:00	16:00
Diferencia volumen (hm <sup>3</sup> )		4,2	1,7	1,5
Diferencia caudal punta (m <sup>3</sup> /s)		84,4	8,9	3,4
Desfase (h)		2:00	2:00	2:00
RMS (m <sup>3</sup> /s)		31,21	12,00	11,09
E.Q (%)		-93,73	-38,56	-34,27
NSE		-0,41	0,79	0,82
E.Qp (%)		91,78	9,66	3,65

Al igual que sucede con la tormenta anterior, el modelo tradicional del número de curva se aleja de los parámetros reales de la cuenca, siendo el modelo NC\_MOD\_%R el que mejor se ajusta a los datos observados para todos los parámetros estudiados.

Este desajuste se debe, como ya se ha comentado en repetidas ocasiones, a que el modelo NC\_MOD\_CAH considera que la totalidad de la cuenca se encuentra en un estado antecedente de humedad próximo al punto de marchitez permanente (I), mientras que desde el punto de vista de la reserva de agua del suelo la cuenca está próxima a la capacidad de campo (III).

Es destacable la gran mejora de las estimaciones NC\_MOD\_IEH y NC\_MOD\_%R en relación a sus equivalentes de la simulación I para esta tormenta.

### 7.2.6. Tormenta 6 (08/12/2003)

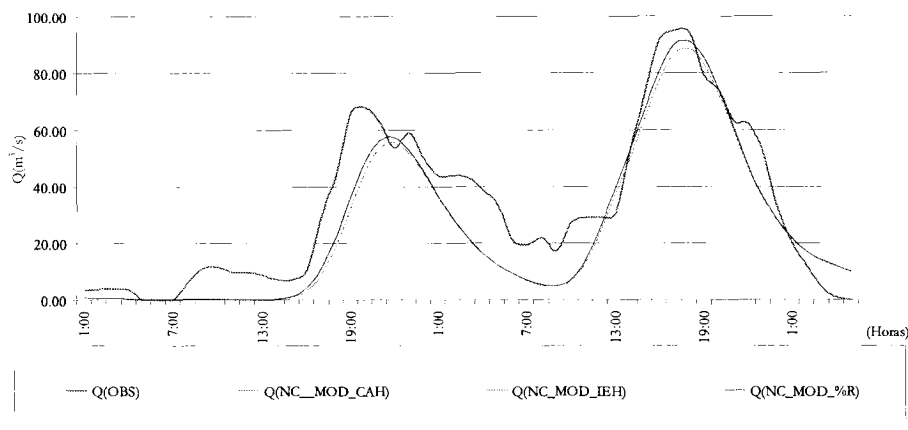


Figura 7.19: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación II y la tormenta 6 del 08/12/2003

Tabla 7.14: Parámetros y estadísticos de la simulación II y la tormenta 6 del 08/12/2003

Parámetro	Hidrograma			
	OBS	NC MOD CAH	NC MOD IEH	NC MOD %R
Volumen (hm3)	6,3	4,7	4,9	4,9
Caudal punta (m3/s)	95,0	88,5	91,2	91,3
Hora caudal punta	17:00	18:00	18:00	18:00
Diferencia volumen (hm3)		1,5	1,4	1,4
Diferencia caudal punta (m3/s)		6,5	3,7	3,7
Desfase (h)		1:00	1:00	1:00
RMS (m³/s)		12,31	11,57	11,55
E.Q (%)		-24,52	-21,76	-21,70
NSE		0,80	0,82	0,82
E.Qp (%)		6,86	3,94	3,89

Los valores ofrecidos por todos los modelos, según se aprecia en la gráfica, son similares en la tormenta 6, si bien el que mejor se ajusta es el NC\_MOD\_%R, aunque las diferencias de caudal punta y volumen son iguales entre este modelo y el NC\_MOD\_IEH.

Ambos modelos superan al planteamiento tradicional, lo que no ocurría en la simulación I.

**7.2.7. Tormenta 7 (20/02/2004)**

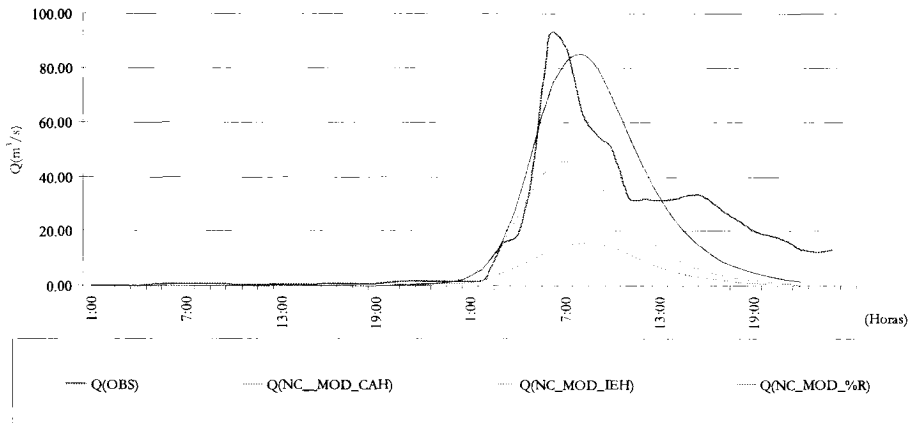


Figura 7.20: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación II y la tormenta 7 del 20/02/2004

Tabla 7.15: Parámetros y estadísticos de la simulación II y la tormenta 7 del 20/02/2004

Parámetro	Hidrograma					
	OBS	NC	MOD CAH	NC	MOD IEH	NC MOD %R
Volumen (hm <sup>3</sup> )	2,8		0,5		1,4	2,6
Caudal punta (m <sup>3</sup> /s)	92,4		15,7		45,9	85,3
Hora caudal punta	6:00		7:00		7:00	8:00
Diferencia volumen (hm <sup>3</sup> )			2,3		1,4	0,3
Diferencia caudal punta (m <sup>3</sup> /s)			76,7		46,5	7,1
Desfase (h)			1:00		1:00	2:00
RMS (m <sup>3</sup> /s)			22,88		14,62	10,43
E.Q (%)			-81,47		-50,86	-9,24
NSE			-0,02		0,58	0,79
E.Qp (%)			83,01		50,36	7,70

En la tormenta 7 el modelo tradicional del número de curva se aleja de los parámetros reales de la cuenca, siendo el modelo NC\_MOD\_%R el que mejor se ajusta a los datos observados para todos los parámetros estudiados.

Este desajuste se atribuye a que el modelo NC\_MOD\_CAH considera, como ya se ha comentado para anteriores tormentas, que la totalidad de la cuenca se encuentra en un estado antecedente de humedad próximo al punto de marchitez permanente (I), el modelo NC\_MOD\_IEH considera que la cuenca se encuentra entre las condiciones I y II, y el modelo NC\_MOD\_%R supone que la cuenca está en un estado superior de humedad, entre II y III.

### 7.2.8. Tormenta 8 (23/02/2004)

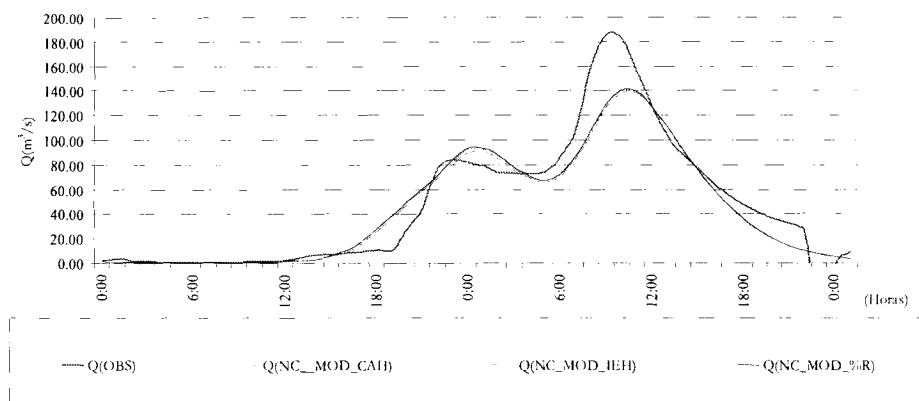


Figura 7.21: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación II y la tormenta 8 del 23/02/2004

Tabla 7.16: Parámetros y estadísticos de la simulación II y la tormenta 8 del 23/02/2004

Parámetro	Hidrograma									
	OBS	NC	MOD	CAH	NC	MOD	IEH	NC	MOD	%R
Volumen (hm <sup>3</sup> )	8,3			7,7			7,8			7,9
Caudal punta (m <sup>3</sup> /s)	186,2			138,6			140,3			141,0
Hora caudal punta	9:00			10:00			10:00			10:00
Diferencia volumen (hm <sup>3</sup> )				0,6			0,5			0,4
Diferencia caudal punta (m <sup>3</sup> /s)				47,6			45,9			45,2
Desfase (h)				1:00			1:00			1:00
RMS (m <sup>3</sup> /s)				18,31			18,11			18,04
E.Q (%)				-6,97			-5,45			-4,75
NSE				0,88			0,88			0,88
E.Qp (%)				25,56			24,66			24,26

En esta tormenta todos los modelos tienen un comportamiento similar, si bien el que mejores valores aporta es el NC\_MOD\_%R. El desajuste entre los modelos y la realidad puede deberse a la cercanía de esta tormenta con la anterior (tormenta 7) y el posible efecto que la escorrentía diferida puede ejercer sobre el hidrograma observado.

### 7.2.9. Resumen de la simulación II

Representando de forma conjunta los principales estadísticos de la simulación para las ocho tormentas, se facilita la interpretación de los resultados, como se puede apreciar en los siguientes gráficos:

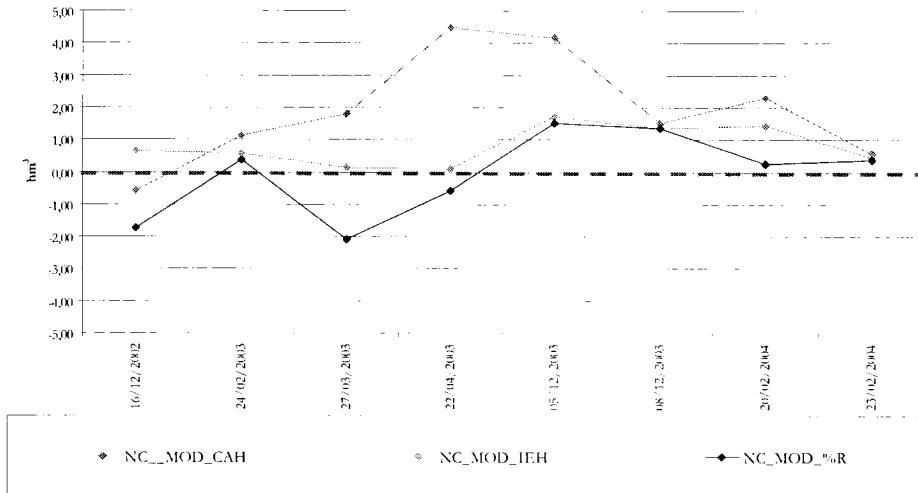


Figura 7.22: Diferencia de volumen para la simulación II y las distintas tormentas

Como estimador del volumen total de escorrentía el modelo que ofrece mejores resultados es el NC\_MOD\_IEH, con diferencias inferiores a los 2 hm<sup>3</sup> respecto a los valores observados en la cuenca. El modelo que peores resultados muestra es el NC\_MOD\_CAH, con valores, para la mayoría de las tormentas muy alejados de los reales.

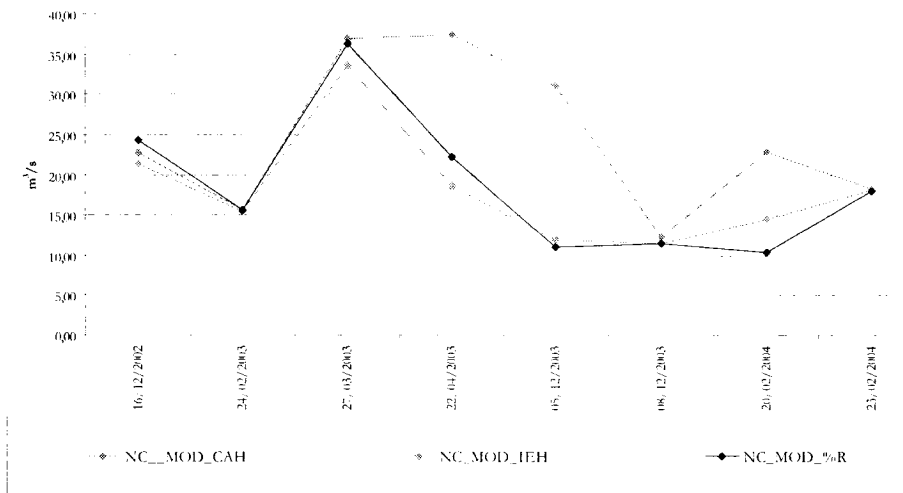


Figura 7.23: Valores del error medio cuadrático para la simulación II y las distintas tormentas

El valor del error medio cuadrático que mejor se ajusta es el del modelo NC\_MOD\_IEH, para todas las tormentas excepto para la 7, en la que los mejores resultados los aporta el modelo NC\_MOD\_%R. En la mayoría de los eventos el modelo que peor se ajusta es el NC\_MOD\_CAH.

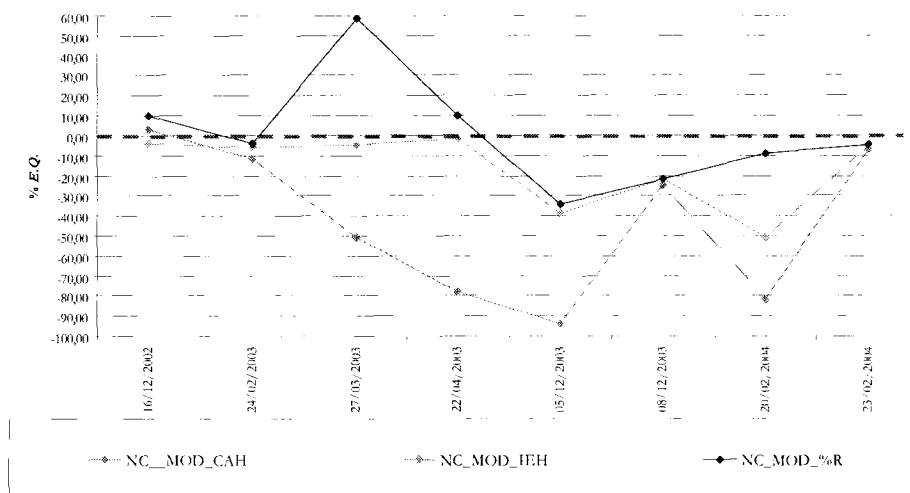


Figura 7.24: Valores del error relativo del caudal para la simulación II y las distintas tormentas

En el caso del error relativo del caudal el mejor comportamiento de los valores aparece en el modelo NC\_MOD\_IEH, donde en general es inferior al 20%. El modelo NC\_MOD\_%R tiene un comportamiento similar salvo en el caso de la tormenta 3, donde el error alcanza el 60%, si bien es necesario tener en cuenta la particularidad ya comentada de dicho evento. Para el modelo NC\_MOD\_CAH los valores del error están muy alejados del valor de referencia en la mayoría de las tormentas.

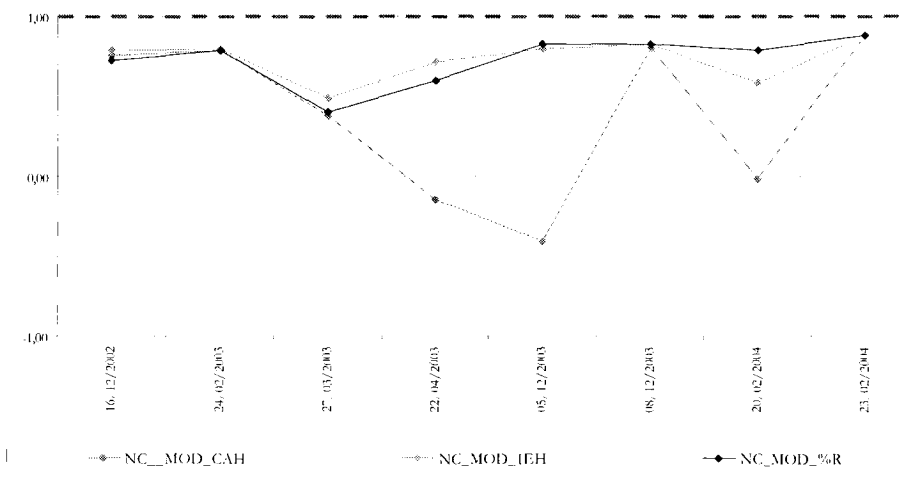


Figura 7.25: Valor de la eficiencia del ajuste de la simulación II y las distintas tormentas

El parámetro de eficiencia de Nahs presenta valores muy similares y próximos a uno en los modelos NC\_MOD\_%R, y NC\_MOD\_IEH, apreciándose una fuerte variabilidad en el modelo NC\_MOD\_CAH, que llega a alcanzar valores negativos en tres de las tormentas.

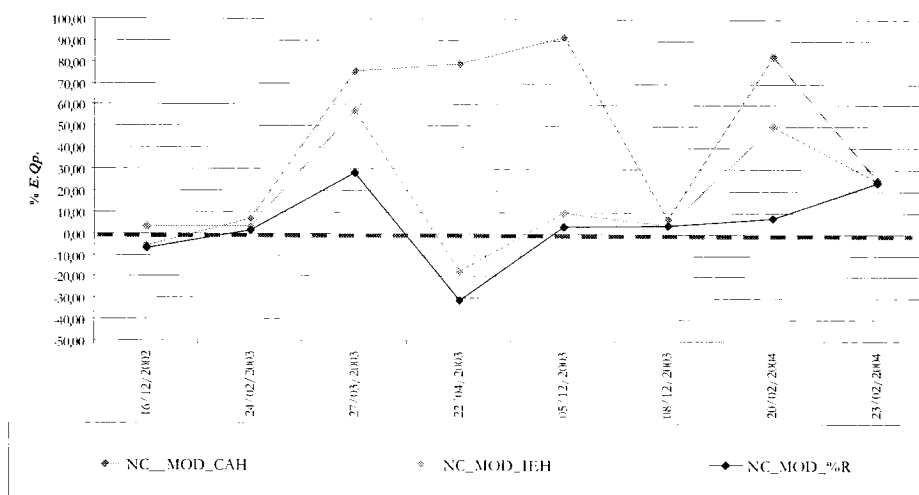


Figura 7.26: Valor del error relativo del caudal punta de la simulación II para las distintas tormentas

El error relativo del caudal punta del modelo NC\_MOD\_%R es el que posee mejores resultados, presentando errores inferiores al 10% en todas excepto en tres tormentas. El modelo NC\_MOD\_CAH ofrece valores muy por encima de los tolerables en la mayoría de los eventos.

Analizando los hidrogramas en conjunto, así como los distintos parámetros y estadísticos obtenidos de las simulaciones, se puede decir que los modelos que introducen las variaciones del contenido de humedad del suelo (NC\_MOD\_IEH y NC\_MOD\_%R) tienen un comportamiento similar para casi todas las tormentas, presentando diferencias significativas para las tormentas de 3 y 7.

El modelo basado en la condición antecedente de humedad (NC\_MOD\_CAH) presenta un comportamiento errático para las distintas tormentas y parámetros analizados.

El modelo de este grupo de simulación que mejor estima el volumen de escorrentía es el basado en el índice de estado de humedad (NC\_MOD\_IEH), presentando diferencias inferiores a los  $2 \text{ hm}^3$ .

En cuanto al error relativo del caudal, el modelo NC\_MOD\_IEH presenta la menor desviación, siendo inferior al 20% para seis tormentas y alcanzando valores del 40% y 50% para las otras dos tormentas. La simulación basada en el porcentaje de la reserva (NC\_MOD\_%R) presenta un comportamiento similar al anterior, con errores algo más altos para algunas tormentas.

Para el parámetro de eficiencia de Nash-Sutcliffe las dos simulaciones basadas en la variación del contenido de humedad del suelo (NC\_MOD\_IEH y NC\_MOD\_%R) tienen un comportamiento similar y casi nunca presentan un valor inferior a 0,5, a diferencia del modelo basado en la condición antecedente de humedad, que en varias ocasiones alcanza valores negativos.

El error relativo del caudal punta ofrece valores inferiores al 10% para seis tormentas en los modelos NC\_MOD\_%R y NC\_MOD\_IEH, mientras que la simulación realizada con el modelo basado en el contenido de humedad antecedente llega a presentar valores cercanos al 100%.

### 7.3. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN III

En este caso se analizan los modelos basados en la modificación introducida para el territorio español por Témex (desarrollada en el Epígrafe 2.6.2), aplicándolos a la cuenca del embalse de El Sancho en su concepción original en cuanto a la determinación del grupo hidrológico de suelo, pero combinada con las distintas variaciones del estado de humedad del suelo.

En las siguientes figuras se puede apreciar la respuesta ofrecida por la cuenca, en función del modelo ensayado, para las ocho tormentas estudiadas, así como los valores de los distintos parámetros y estadísticos que facilitan la evaluación de los modelos.

#### 7.3.1. Tormenta 1 (16/12/2002)

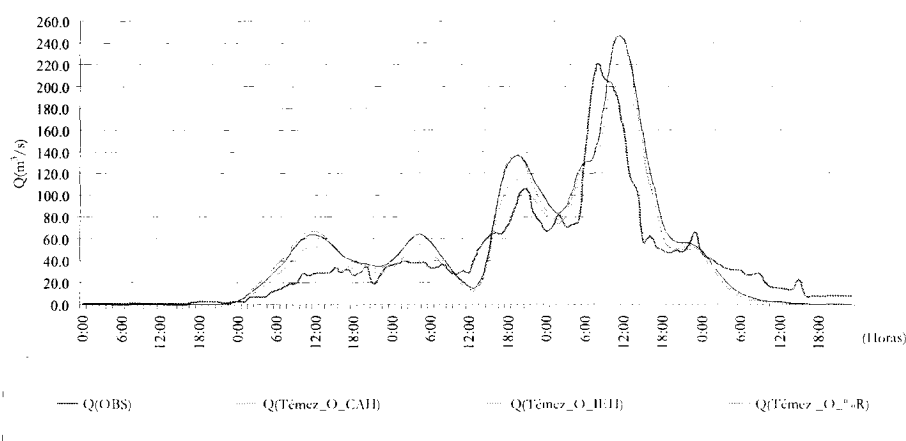


Figura 7.27: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación III y la tormenta 1 del 16/12/2002

Tabla 7.17: Parámetros y estadísticos de la simulación III y la tormenta 1 del 16/12/2002

Parámetro	Hidrograma			
	OBS	Témex O CAH	Témex O IEH	Témex O %R
Volumen (hm <sup>3</sup> )	17,3	20,4	18,1	20,9
Caudal punta (m <sup>3</sup> /s)	220,5	249,0	220,6	246,4
Hora caudal punta	8:00	11:00	11:00	11:00
Diferencia volumen (hm <sup>3</sup> )		-3,1	-0,9	-3,6
Diferencia caudal punta (m <sup>3</sup> /s)		-28,5	-0,2	-26,0
Desfase (h)		3:00	3:00	3:00
RMS (m <sup>3</sup> /s)		26,56	22,13	27,28
E.Q (%)		17,97	4,99	20,86
NSE		0,67	0,77	0,65
E.Qp (%)		-12,94	-0,07	-11,77

En la tormenta 1 el modelo que aporta mejores resultados en todos los parámetros considerados es Témex O IEH, siendo destacable el buen ajuste de los datos, muy próximos al valor de referencia. Los otros dos modelos son muy similares en cuanto a los resultados.

### 7.3.2. Tormenta 2 (24/02/2003)

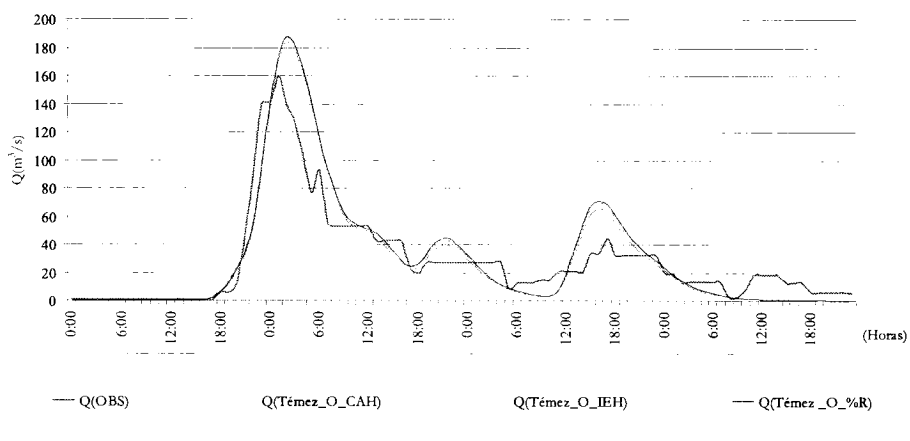


Figura 7.28: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación III y la tormenta 2 del 24/02/2003

Tabla 7.18: Parámetros y estadísticos de la simulación III y la tormenta 2 del 24/02/2003

Parámetro	Hidrograma			
	OBS	Témez O CAH	Témez O IEH	Témez O %R
Volumen (hm <sup>3</sup> )	9,8	10,3	10,4	10,7
Caudal punta (m <sup>3</sup> /s)	160,3	187,2	183,8	187,5
Hora caudal punta	1:00	2:00	2:00	2:00
Diferencia volumen (hm <sup>3</sup> )		-0,5	-0,6	-0,9
Diferencia caudal punta (m <sup>3</sup> /s)		-27,0	-23,6	-27,2
Desfase (h)		1:00	1:00	1:00
RMS (m <sup>3</sup> /s)		16,96	17,24	17,82
E.Q (%)		5,04	6,53	9,58
NSE		0,75	0,74	0,73
E.Qp (%)		-16,82	-14,70	-16,97

Para esta tormenta es reseñable la enorme similitud de los valores en los tres modelos analizados, destacando la sobrevaloración del volumen y del caudal punta en todos los modelos.

### 7.3.3. Tormenta 3 (27/03/2003)

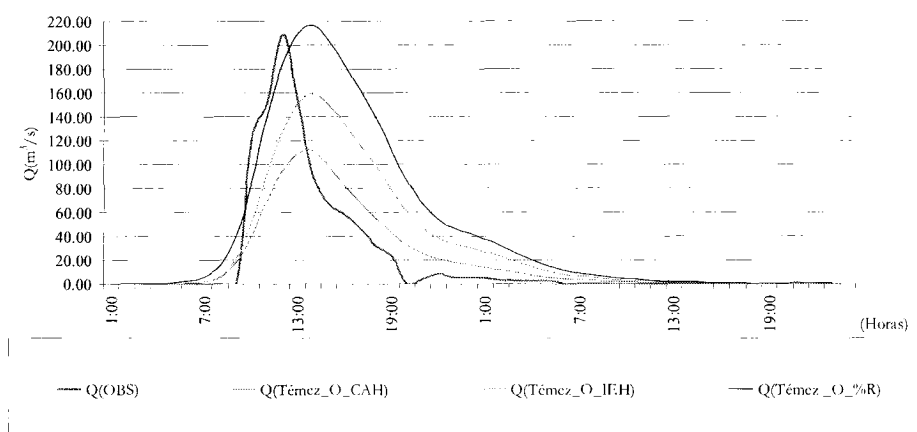


Figura 7.29: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación III y la tormenta 3 del 27/03/2002

Tabla 7.19: Parámetros y estadísticos de la simulación III y la tormenta 3 del 27/03/2003

Parámetro	Hidrograma			
	OBS	Témez O CAH	Témez O IEH	Témez O %R
Volumen (hm <sup>3</sup> )	3,6	3,5	5,5	7,8
Caudal punta (m <sup>3</sup> /s)	209,5	110,9	159,4	216,3
Hora caudal punta	12:00	13:00	14:00	14:00
Diferencia volumen (hm <sup>3</sup> )		0,1	-1,9	-4,3
Diferencia caudal punta (m <sup>3</sup> /s)		98,6	50,1	-6,7
Desfase (h)		1:00	2:00	2:00
RMS (m <sup>3</sup> /s)		26,80	33,92	48,29
E.Q (%)		-1,07	54,63	120,14
NSE		0,67	0,48	-0,06
E.Qp (%)		47,08	23,93	-3,21

Según lo comentado en anteriores apartados el comportamiento de la tormenta 3 presenta ciertas particularidades que afectan a los modelos ensayados, por lo que los datos aportados deben ser tratados con cierta precaución.

**7.3.4. Tormenta 4 (22/04/2003)**

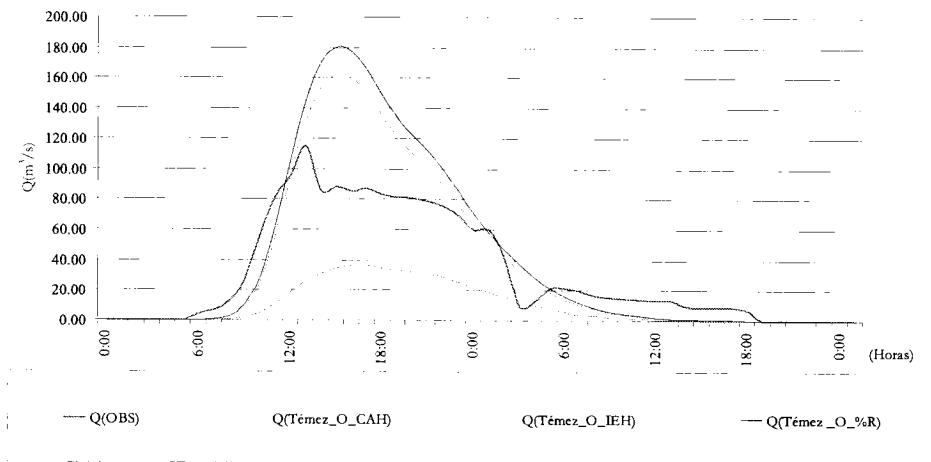


Figura 7.30: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación III y la tormenta 4 del 22/04/2003

Tabla 7.20: Parámetros y estadísticos de la simulación III y la tormenta 4 del 22/04/2003

Parámetro	Hidrograma			
	OBS	Témez O CAH	Témez O IEH	Témez O %R
Volumen (hm <sup>3</sup> )	5,7	1,8	6,7	7,5
Caudal punta (m <sup>3</sup> /s)	115,0	36,4	162,8	180,2
Hora caudal punta	13:00	20:00	15:00	15:00
Diferencia volumen (hm <sup>3</sup> )		4,0	-1,0	-1,7
Diferencia caudal punta (m <sup>3</sup> /s)		78,5	-47,8	-65,3
Desfase (h)		7:00	2:00	2:00
RMS (m <sup>3</sup> /s)		32,43	24,42	30,18
E.Q (%)		-68,97	17,16	29,83
NSE		0,15	0,52	0,26
E.Qp (%)		68,31	-41,60	-56,80

En esta tormenta el modelo que mejor se ajusta es el Témez\_O\_IEH para todos los parámetros analizados, si bien, aunque para el volumen tienen un buen ajuste, en el caudal punta se produce un error del 42%. Es destacable el escaso ajuste que presenta el modelo Témez\_O\_CAH.

### 7.3.5. Tormenta 5 (05/12/2003)

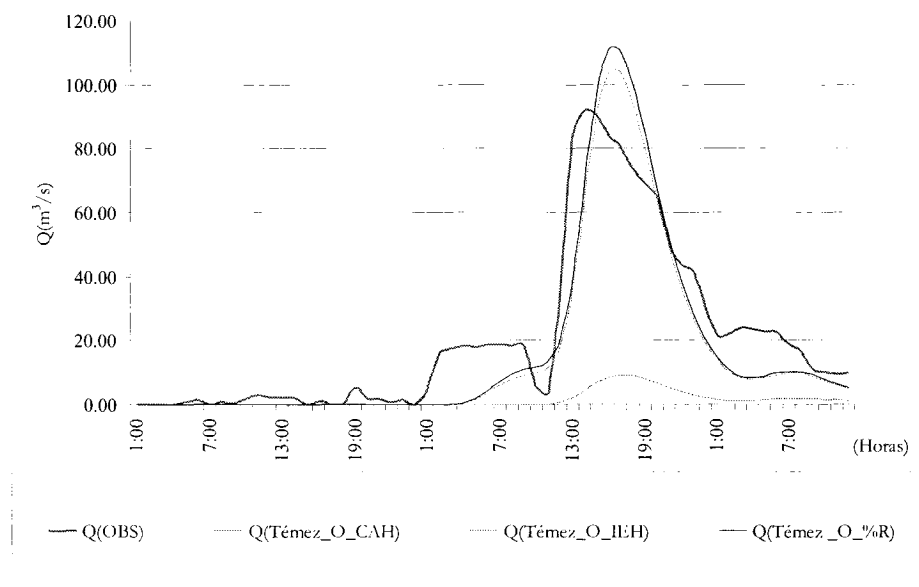


Figura 7.31: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación III y la tormenta 5 del 5/12/2003

Tabla 7.21: Parámetros y estadísticos de la simulación III y la tormenta 5 del 5/12/2003

Parámetro	Hidrograma			
	OBS	Témez O CAH	Témez O IEH	Témez O %R
Volumen (hm <sup>3</sup> )	4,5	0,3	3,4	3,6
Caudal punta (m <sup>3</sup> /s)	92,0	9,1	103,9	110,9
Hora caudal punta	14:00	17:00	16:00	16:00
Diferencia volumen (hm <sup>3</sup> )		4,1	1,1	0,8
Diferencia caudal punta (m <sup>3</sup> /s)		82,8	-11,9	-18,9
Desfase (h)		2:00	2:00	2:00
RMS (m <sup>3</sup> /s)		30,85	11,89	12,02
<i>E.Q</i> (%)		-92,81	-24,15	-18,57
<i>NSE</i>		-0,37	0,80	0,79
<i>E.Qp</i> (%)		90,08	-12,94	-20,58

El modelo Témez\_O\_CAH se aleja de los parámetros reales de la cuenca. Los otros dos modelos tienen un comportamiento similar, siendo mejor Témez\_O\_%R como estimador del volumen y Témez\_O\_IEH para el caudal punta.

Este desajuste del modelo Témez\_O\_CAH se debe, como ya se ha comentado en repetidas ocasiones, a que se considera que la totalidad de la cuenca se encuentra en un estado antecedente de humedad próximo al punto de marchitez permanente (I), mientras que desde el punto de vista de la reserva de agua del suelo, la cuenca está próxima a la capacidad de campo (III).

**7.3.6. Tormenta 6 (08/12/2003)**

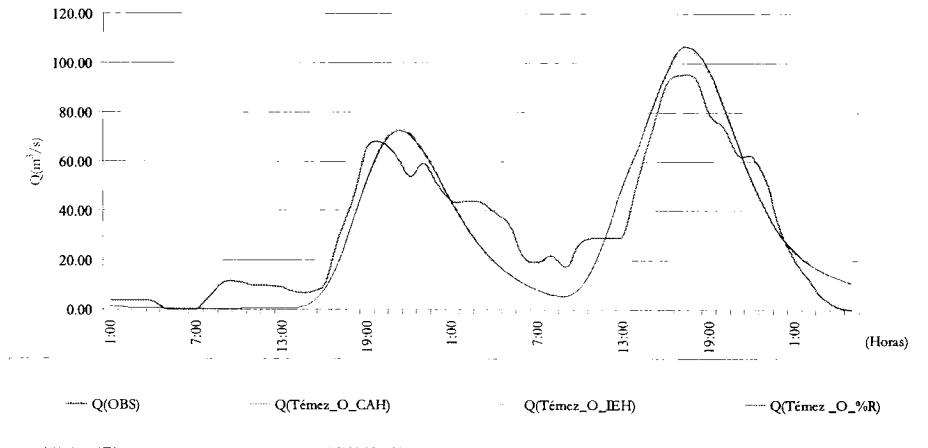


Figura 7.32: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación III y la tormenta 6 del 08/12/2003

Tabla 7.22: Parámetros y estadísticos de la simulación III y la tormenta 6 del 08/12/2003

Parámetro	Hidrograma			
	OBS	Témez O CAH	Témez O IEH	Témez O %R
Volumen (hm <sup>3</sup> )	6,3	6,0	5,9	5,9
Caudal punta (m <sup>3</sup> /s)	95,0	106,5	105,0	105,9
Hora caudal punta	17:00	18:00	18:00	18:00
Diferencia volumen (hm <sup>3</sup> )		0,3	0,4	0,4
Diferencia caudal punta (m <sup>3</sup> /s)		-11,5	-10,0	-10,9
Desfase (h)		1:00	1:00	1:00
RMS (m <sup>3</sup> /s)		10,40	10,23	10,33
E.Q (%)		-4,95	-6,51	-5,66
NSE		0,86	0,86	0,86
E.Qp (%)		-12,11	-10,53	-11,51

En la tormenta 6 se puede observar que todos los parámetros se comportan de forma similar y con variaciones en los datos inferiores al 1,5%.

## 7.3.7. Tormenta 7 (20/02/2004)

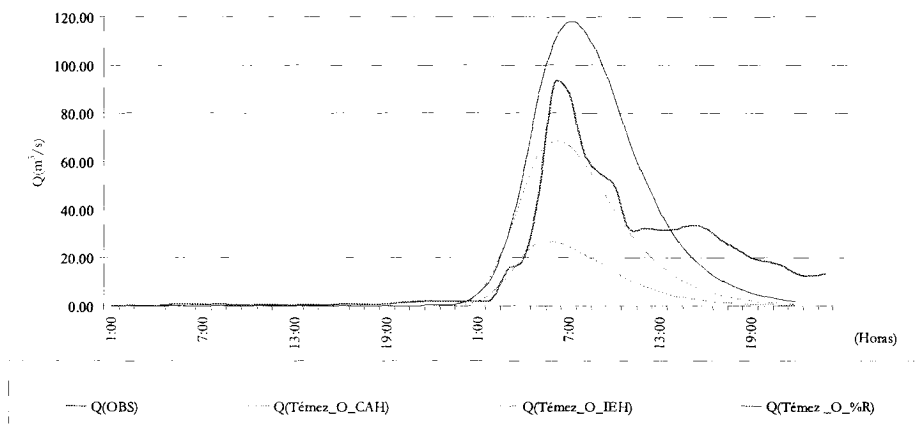


Figura 7.33: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación III y la tormenta 7 del 20/02/2004

Tabla 7.23: Parámetros y estadísticos de la simulación III y la tormenta 7 del 20/02/2004

Parámetro	Hidrograma			
	OBS	Témez O CAH	Témez O IEH	Témez O %R
Volumen (hm <sup>3</sup> )	2,8	0,8	2,0	3,5
Caudal punta (m <sup>3</sup> /s)	92,4	26,7	68,3	117,9
Hora caudal punta	6:00	7:00	7:00	8:00
Diferencia volumen (hm <sup>3</sup> )		2,1	0,8	-0,7
Diferencia caudal punta (m <sup>3</sup> /s)		65,6	24,0	-25,5
Desfase (h)		1:00	1:00	2:00
RMS (m <sup>3</sup> /s)		20,45	11,97	17,43
E.Q (%)		-72,92	-29,34	24,40
NSE		0,19	0,72	0,41
E.Qp (%)		71,07	26,02	-27,65

Cabe destacar el similar comportamiento de los modelos Témez\_O\_IEH y Témez\_O\_%R, si bien los mejores ajustes de volumen aparecen en el primer modelo y los de caudal punta en el segundo modelo.

El modelo Témez\_O\_CAH dista mucho de los datos observados para la cuenca, debido a las consideraciones ya mencionadas sobre el estado antecedente de humedad.

## 7.3.8. Tormenta 8 (23/022004)

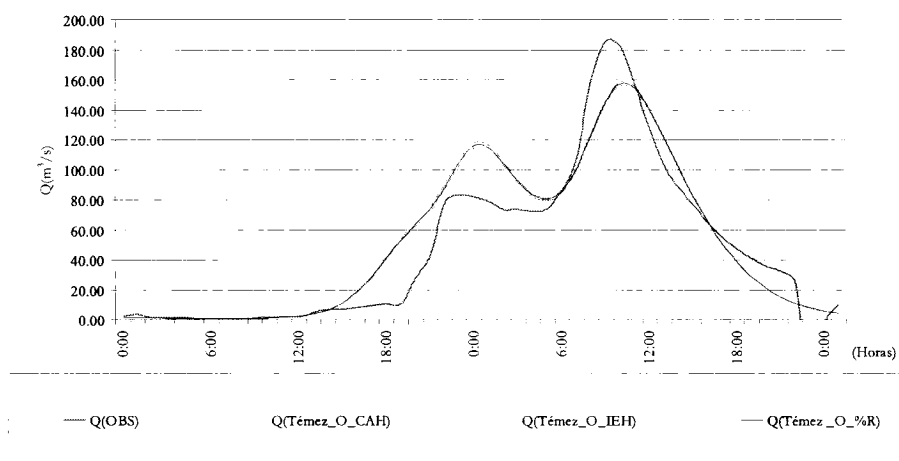


Figura 7.34: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación III y la tormenta 8 del 23/02/2004

Tabla 7.24: Parámetros y estadísticos de la simulación III y la tormenta 8 del 23/02/2004

Parámetro	Hidrograma			
	OBS	Témez O CAH	Témez O IEH	Témez O %R
Volumen (hm <sup>3</sup> )	8,3	9,3	9,1	9,2
Caudal punta (m <sup>3</sup> /s)	186,2	158,8	156,4	157,7
Hora caudal punta	9:00	10:00	10:00	10:00
Diferencia volumen (hm <sup>3</sup> )		-1,1	-0,8	-1,0
Diferencia caudal punta (m <sup>3</sup> /s)		27,4	29,8	28,5
Desfase (h)		1:00	1:00	1:00
RMS (m <sup>3</sup> /s)		19,86	19,13	19,48
E.Q (%)		12,88	10,28	11,64
NSE		0,86	0,87	0,86
E.Qp (%)		14,70	16,01	15,29

En esta tormenta todos los modelos presentan similares características, apreciándose una buena estimación para el volumen, sobre todo en el modelo Témez\_O\_IEH. Respecto al caudal punta el mejor ajuste aparece en el modelo Témez\_O\_CAH, aunque no presenta una diferencia significativa respecto a lo demás modelos.

### 7.3.9. Resumen de la simulación III

Representando de forma conjunta los principales estadísticos de la simulación para las ocho tormentas se facilita la interpretación de los resultados, como se puede apreciar en los siguientes gráficos:

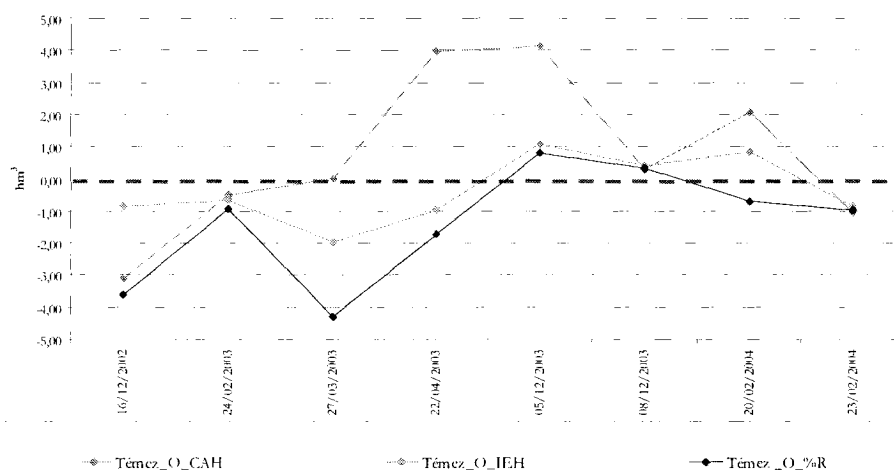


Figura 7.35: Diferencia de volumen para la simulación III y las distintas tormentas

A la vista de los resultados gráficos el modelo que mejor se ajusta como estimador del volumen es el Témez\_O\_IEH, con diferencias inferiores a  $1 \text{ hm}^3$  en todas las tormentas excepto en la tormenta 3, en la que no supera los  $2 \text{ hm}^3$ . Para el resto de los modelos las diferencias son sustanciales en la mayoría de los eventos.

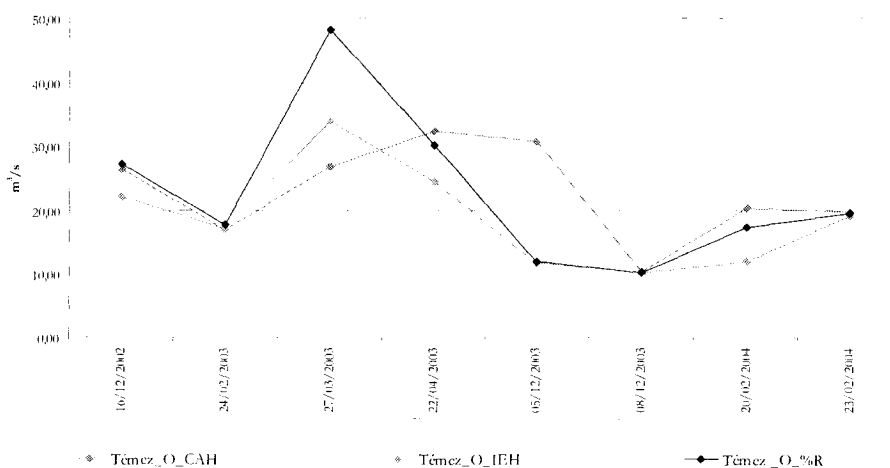


Figura 7.36: Valores del error medio cuadrático para la simulación III y las distintas tormentas

El error medio cuadrático presenta los menores valores en el modelo Témez\_O\_IEH y por lo tanto el mejor ajuste de los datos. El modelo que peores ajustes presenta para todas las tormentas es el Témez\_O\_CAH.

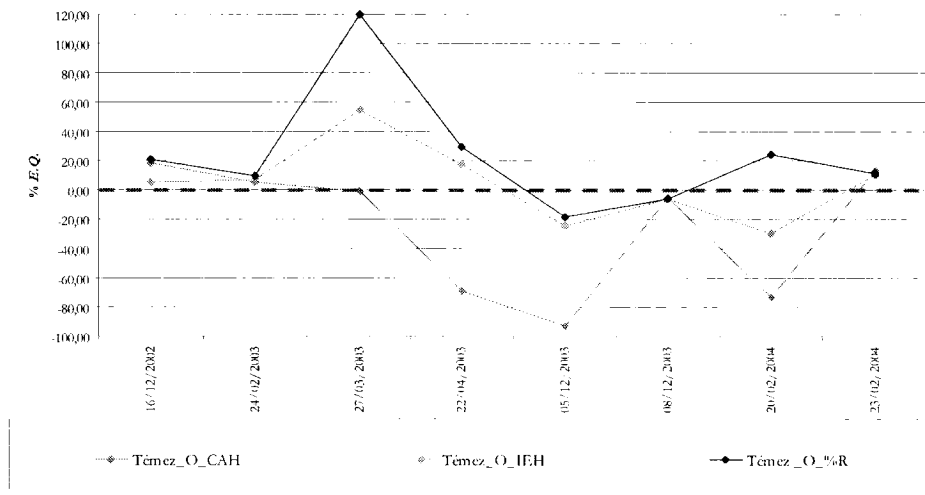


Figura 7.37: Valores del error relativo del caudal para la simulación III y las distintas tormentas

Al igual que con los anteriores parámetros analizados, el modelo que aporta mejores resultados en el Témez O IEH, estando la mayoría de los eventos próximos al 20% del valor de referencia, excepto en la tormenta 3, en la que los valores presentan un claro desajuste.

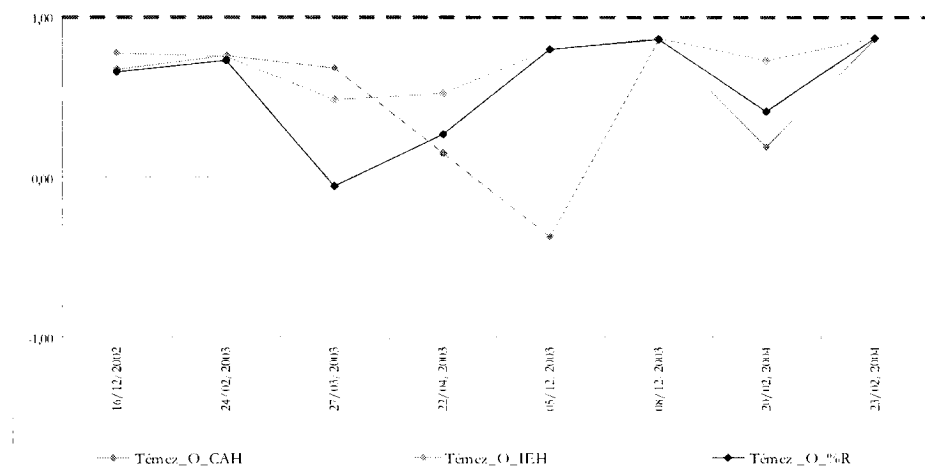


Figura 7.38: Valor de la eficiencia del ajuste de la simulación III y las distintas tormentas

El modelo que aporta mejores resultados respecto al valor de referencia es el Témez\_O\_IEH, mientras que los otros dos modelos presentan valores negativos o próximos a cero para varias tormentas.

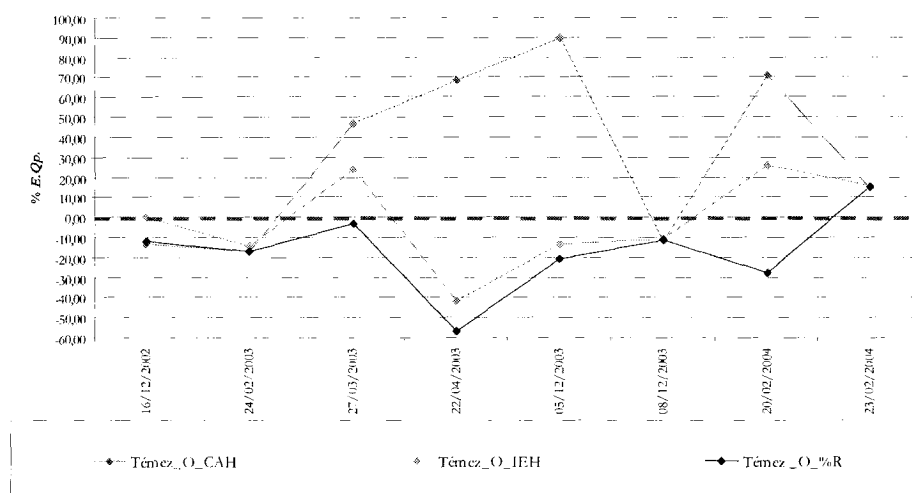


Figura 7.39: Valor del error relativo del caudal punta de la simulación III para las distintas tormentas

En el caso del error relativo del caudal punta ninguno de los modelos aporta datos fiables para muchos de los eventos, si bien en el caso del modelo Témez\_O\_IEH sus valores se acercan más a los de referencia que en los otros dos modelos.

Parece evidente que en el modelo Témez\_O\_CAH el error en la mayoría de las tormentas está por encima del aceptable superándose el 40% en la mitad de los eventos.

Analizando los hidrogramas, así como los distintos parámetros y estadísticos obtenidos de las simulaciones se puede decir que el modelo Témez\_O\_CAH tiene un comportamiento muy dispar frente a los distintos eventos, con una tendencia a estimar volúmenes de escorrentía y caudales punta muy por debajo de lo real.

El modelo Témez\_O\_IEH es el que mejor resultados arroja, presentando una tendencia a estimar caudales punta por encima de los valores de referencia en aquellas tormentas en las que la condición de humedad general de la cuenca está por encima de las condiciones medias.

En cuanto al tercer modelo propuesto (Témez\_O\_%R) presenta una clara tendencia a sobreestimar los volúmenes de escorrentía y los valores de los caudales punta, muy por encima de los valores reales, presentando en ambos parámetros errores muy elevados.

#### 7.4. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN IV

En este caso se analizan las simulaciones basadas en la modificación introducida para el territorio español por Temez (desarrollada en el Epígrafe 2.6.2), pero con la estimación del grupo hidrológico de suelo de forma continua y combinándolas con los distintos modelos de estimación de la humedad del suelo.

En las siguientes figuras se puede apreciar la respuesta ofrecida por la cuenca, en función del modelo ensayado para las ocho tormentas, así como los valores de los distintos parámetros y estadísticos que facilitan la evaluación de los modelos:

### 7.4.1. Tormenta 1 (16/12/2002)

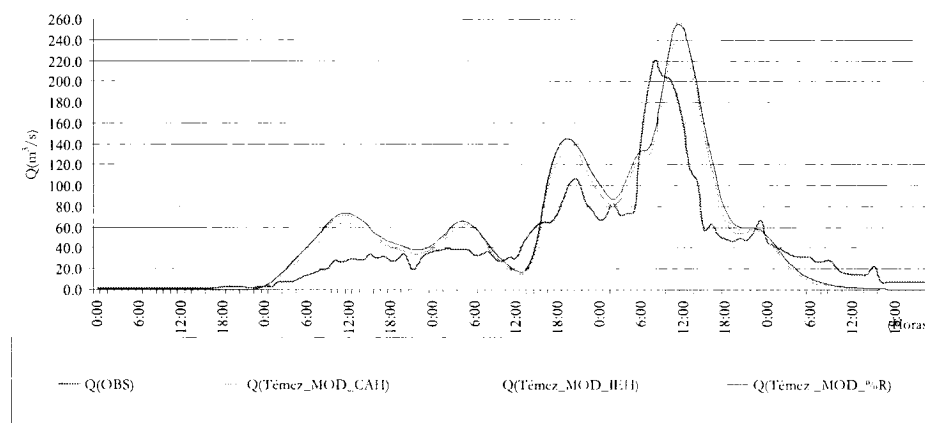


Figura 7.40: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación IV y la tormenta 1 del 16/12/2002

Tabla 7.25: Parámetros y estadísticos de la simulación IV y la tormenta 1 del 16/12/2002

Parámetro	Hidrograma			
	OBS	Témez MOD CAH	Témez MOD IEH	Témez MOD %R
Volumen (hm <sup>3</sup> )	17,3	21,2	20,4	22,1
Caudal punta (m <sup>3</sup> /s)	220,5	256,2	239,2	253,9
Hora caudal punta	8:00	11:00	11:00	11:00
Diferencia volumen (hm <sup>3</sup> )		-3,9	-3,1	-4,9
Diferencia caudal punta (m <sup>3</sup> /s)		-35,7	-18,7	-33,4
Desfase (h)		3:00	3:00	3:00
RMS (m <sup>3</sup> /s)		28,72	26,16	30,23
E.Q (%)		22,80	18,16	28,28
NSE		0,61	0,68	0,57
E.Qp (%)		-16,20	-8,47	-15,15

La diferencia de volumen respecto al valor observado es prácticamente igual en los tres modelos, si bien para caudal punta presenta un error relativo menor el modelo Témez\_MOD\_IEH. Ninguno de los tres modelos destaca del resto para los demás parámetros, presentando todos una clara tendencia a sobrevalorar tanto volúmenes de escorrentía como caudales punta.

La sobrevaloración es superior a la obtenida en la simulación II para los números de curva originales del SCS.

## 7.4.2. Tormenta 2 (24/02/2003)

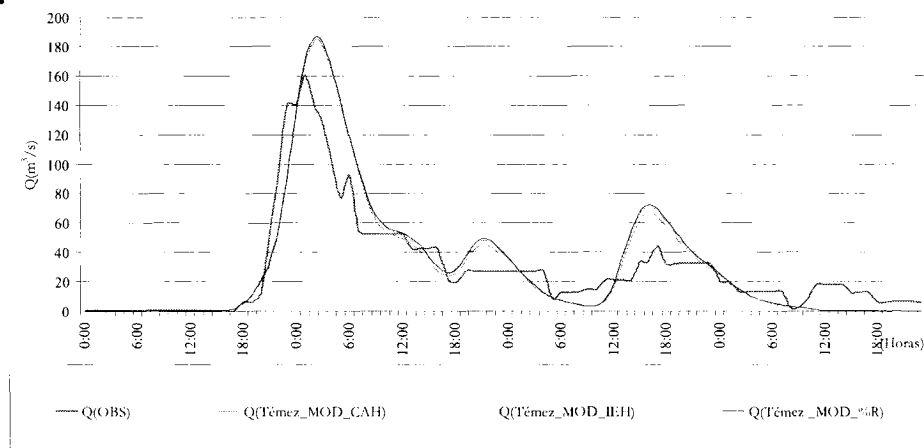


Figura 7.41: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación IV y la tormenta 2 del 24/02/2003

Tabla 7.26: Parámetros y estadísticos de la simulación IV y la tormenta 2 del 24/02/2003

Parámetro	Hidrograma			
	OBS	Témez MOD CAH	Témez MOD IEH	Témez MOD %R
Volumen (hm <sup>3</sup> )	9,8	10,5	10,7	10,9
Caudal punta (m <sup>3</sup> /s)	160,3	184,7	182,9	186,1
Hora caudal punta	1:00	2:00	2:00	2:00
Diferencia volumen(hm <sup>3</sup> )		-0,7	-1,0	-1,2
Diferencia caudal punta(m <sup>3</sup> /s)		-24,4	-22,6	-25,8
Desfase (h)		1:00	1:00	1:00
RMS (m <sup>3</sup> /s)		17,35	17,91	18,40
E.Q (%)		7,07	9,76	11,94
NSE		0,74	0,72	0,71
E.Qp (%)		-15,23	-14,12	-16,11

Al igual que sucedía en la tormenta anterior ninguno de los modelos destaca especialmente, presentando valores muy similares para todos los parámetros evaluados y con una tendencia a sobrevalorar el volumen y el caudal punta.

### 7.4.3. Tormenta 3 (27/03/2003)

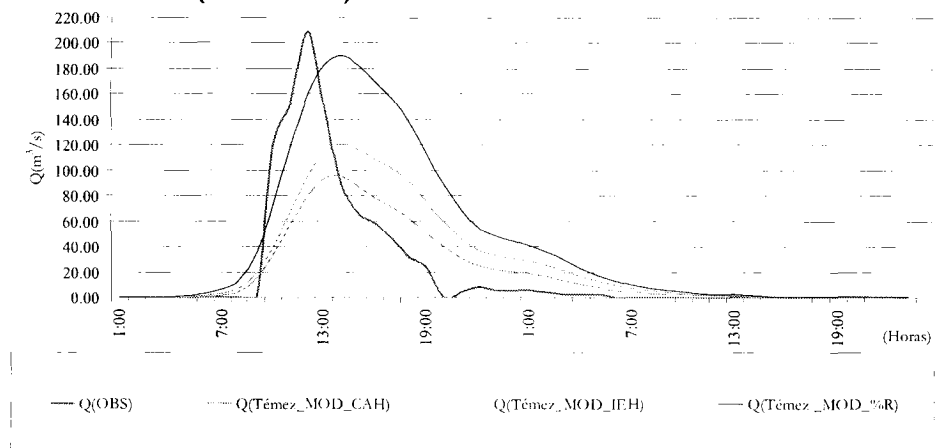


Figura 7.42: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación IV y la tormenta 3 del 27/03/2002

Tabla 7.27: Parámetros y estadísticos de la simulación IV y la tormenta 3 del 27/03/2003

Parámetro	Hidrograma			
	OBS	Témez MOD CAH	Témez MOD IEH	Témez MOD %R
Volumen (hm <sup>3</sup> )	3,6	3,5	4,7	7,4
Caudal punta (m <sup>3</sup> /s)	209,5	95,9	120,8	190,8
Hora caudal punta	12:00	13:00	14:00	14:00
Diferencia volumen (hm <sup>3</sup> )		0,1	-1,2	-3,8
Diferencia caudal punta (m <sup>3</sup> /s)		113,6	88,8	18,7
Desfase (h)		1:00	2:00	2:00
RMS (m <sup>3</sup> /s)		30,71	33,81	45,61
E.Q (%)		-2,54	33,03	107,67
NSE		0,57	0,48	0,06
E.Qp (%)		54,22	42,37	8,94

El comportamiento de los tres modelos ante este evento es dispar, mientras que Témez\_MOD\_CAH, presenta un buen ajuste en la estimación del volumen de escorrentía, subestima de forma notable el caudal punta, como se puede observar de forma gráfica y como corrobora el parámetro de eficiencia de Nash, con valores cercanos a 0,5.

La simulación realizada con el modelo Témez\_MOD\_%R, se comporta de forma inversa a la realizada con Témez\_MOD\_CAH, es decir se aproxima en la estimación del caudal punta, pero se aleja en el cálculo del volumen de escorrentía, deformando la curva en exceso como indica el error medio cuadrático y el parámetro de eficiencia de Nash (con valor cercano a cero).

Entre los dos modelos se sitúa el de Témez\_MOD\_IEH, si bien comete errores importantes en la estimación del volumen de escorrentía y del caudal punta.

#### 7.4.4. Tormenta 4 (/22/04/2003)

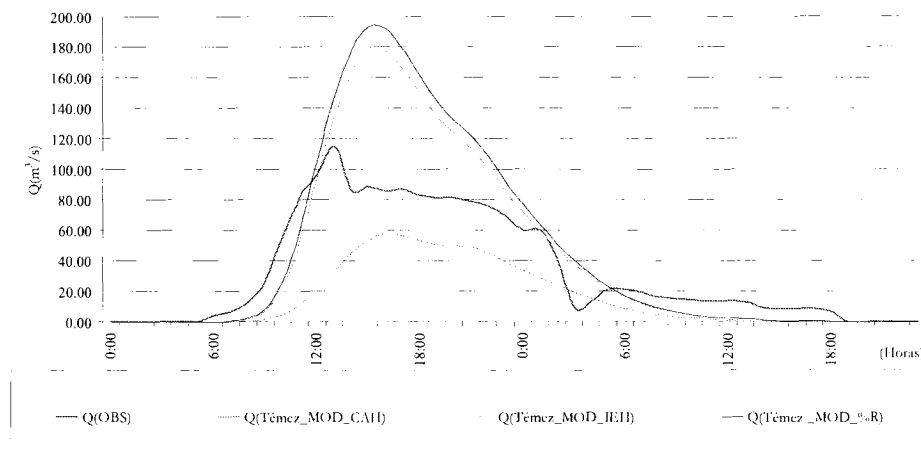


Figura 7.43: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación IV y la tormenta 4 del 22/04/2003

Tabla 7.28: Parámetros y estadísticos de la simulación IV y la tormenta 4 del 22/04/2003

Parámetro	Hidrograma			
	OBS	Témez MOD CAH	Témez MOD IEH	Témez MOD %R
Volumen (hm <sup>3</sup> )	5,7	2,7	7,3	7,9
Caudal punta (m <sup>3</sup> /s)	115,0	57,5	177,3	192,9
Hora caudal punta	13:00	20:00	15:00	15:00
Diferencia volumen (hm <sup>3</sup> )		3,1	-1,6	-2,2
Diferencia caudal punta (m <sup>3</sup> /s)		57,4	-62,3	-78,0
Desfase (h)		7:00	2:00	2:00
RMS (m <sup>3</sup> /s)		26,37	29,87	34,87
E.Q (%)		-53,75	27,42	37,90
NSE		0,44	0,28	0,01
E.Qp (%)		49,95	-54,20	-67,82

Las simulaciones realizadas con los modelos Témez\_MOD\_IEH y Témez\_MOD\_%R, producen una sobrevaloración del caudal punta (con errores por encima del 30%) y del volumen de escorrentía, alejándose en gran medida de la realidad.

El modelo Témez\_MOD\_CAH es el que presenta mejores valores en la estimación del caudal punta, del error medio cuadrático y del parámetro de eficiencia de Nash, aunque este sigue siendo muy bajo (inferior a 0,5), por lo que produce un error relativo del caudal alto.

## 7.4.5. Tormenta 5 (05/12/2003)

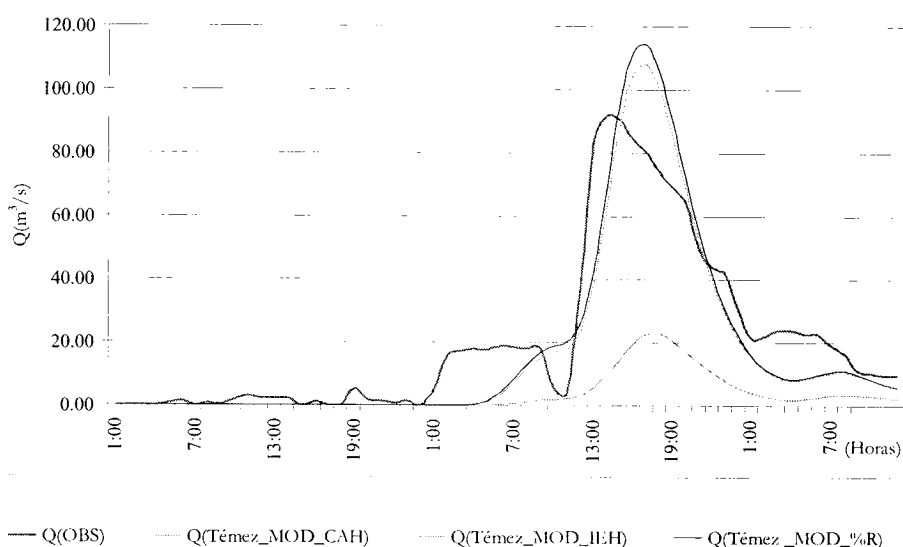


Figura 7.44: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación IV y la tormenta 5 de 05/12/2003

Tabla 7.29: Parámetros y estadísticos de la simulación IV y la tormenta 5 del 05/12/2003

Parámetro	Hidrograma			
	OBS	Témez MOD CAH	Témez MOD IEH	Témez MOD %R
Volumen (hm <sup>3</sup> )	4,5	0,8	3,7	3,9
Caudal punta (m <sup>3</sup> /s)	92,0	22,9	107,9	114,4
Hora caudal punta	14:00	17:00	16:00	16:00
Diferencia volumen (hm <sup>3</sup> )		3,7	0,8	0,6
Diferencia caudal punta (m <sup>3</sup> /s)		69,1	-16,0	-22,4
Desfase (h)		2:00	2:00	2:00
RMS (m <sup>3</sup> /s)		27,20	12,00	12,36
E.Q (%)		-82,44	-18,09	-12,71
NSE		-0,07	0,79	0,78
E.Qp (%)		75,11	-17,36	-24,34

El modelo Témez\_MOD\_CAH, realiza una simulación muy alejada de la realidad con estimaciones tanto de volumen como de caudal punta con errores muy bajos.

Los otros dos modelos Témez\_MOD\_IEH y Témez\_MOD\_%R, con un comportamiento muy similar, sobrevaloran el caudal punta con errores próximos al 20%, y se aproximan de forma similar y con errores bajos en la estimación del volumen de escorrentía, así como en la forma de la curva (con parámetros de eficiencia próximos a 0,8). El modelo Témez\_MOD\_IEH presenta una mejor afinidad con la realidad para la estimación del caudal punta, mientras que el modelo Témez\_MOD\_%R ofrece mejores resultados para la cuantificación del volumen de escorrentía.

## 7.4.6. Tormenta 6 (08/12/2003)

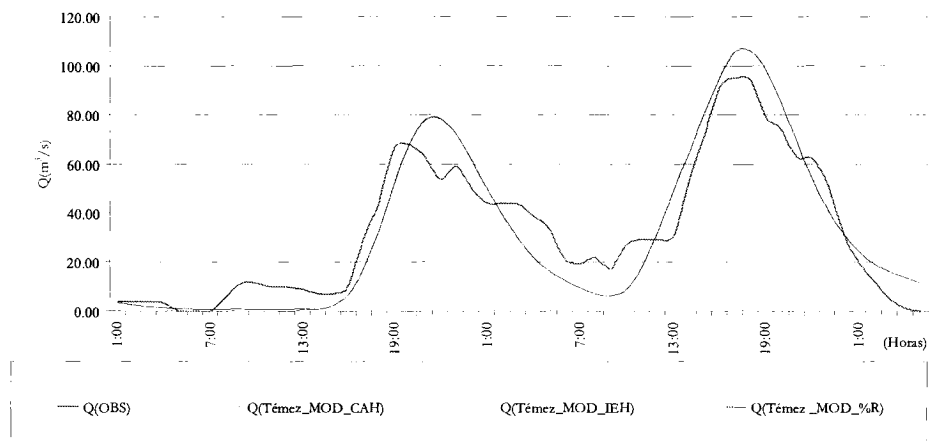


Figura 7.45: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación IV y la tormenta 6 del 08/12/2003

Tabla 7.30: Parámetros y estadísticos de la simulación IV y la tormenta 6 del 08/12/2003

Parámetro	Hidrograma			
	OBS	Témez MOD CAH	Témez MOD IEH	Témez MOD %R
Volumen (hm <sup>3</sup> )	6,3	6,2	6,1	6,1
Caudal punta (m <sup>3</sup> /s)	95,0	106,1	105,9	106,0
Hora caudal punta	17:00	18:00	18:00	18:00
Diferencia volumen (hm <sup>3</sup> )		0,1	0,1	0,1
Diferencia caudal punta (m <sup>3</sup> /s)		-11,1	-10,9	-11,0
Desfase (h)		1:00	1:00	1:00
RMS (m <sup>3</sup> /s)		10,67	10,62	10,65
E.Q (%)		-1,77	-2,04	-1,88
NSE		0,85	0,85	0,85
E.Qp (%)		-11,72	-11,46	-11,63

De forma gráfica se puede apreciar que los tres modelos se comportan de forma análoga, lo que queda corroborado a través de los parámetros de ajuste calculados, pues presentan valores prácticamente iguales entre sí.

En los tres casos el ajuste de la forma de la curva se puede considerar bueno, con valores del parámetro de eficiencia próximos a 0,9 y con errores medios cuadráticos próximos a 11.

También los tres modelos presentan un buen ajuste en la estimación del caudal punta (errores próximos al 10%) y en cuanto al volumen de escorrentía, las diferencias son casi nulas.

## 7.4.7. Tormenta 7 (20/02/2004)

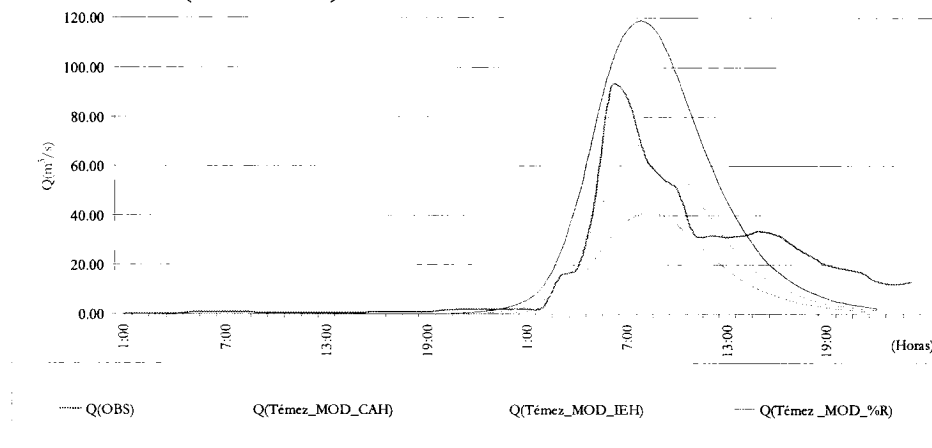


Figura 7.46: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación IV y la tormenta 7 del 20/02/2004

Tabla 7.31: Parámetros y estadísticos de la simulación IV y la tormenta 7 del 20/02/2004

Parámetro	Hidrograma			
	OBS	Témez MOD CAH	Témez MOD IEH	Témez MOD %R
Volumen (hm <sup>3</sup> )	2,8	1,3	2,1	3,6
Caudal punta (m <sup>3</sup> /s)	92,4	41,2	69,9	118,5
Hora caudal punta	6:00	7:00	7:00	8:00
Diferencia volumen(hm <sup>3</sup> )		1,6	0,7	-0,8
Diferencia caudal punta(m <sup>3</sup> /s)		51,2	22,5	-26,1
Desfase (h)		1:00	1:00	2:00
RMS (m <sup>3</sup> /s)		15,67	10,71	18,01
E.Q (%)		-55,30	-25,11	27,89
NSE		0,52	0,78	0,37
E.Qp (%)		55,41	24,35	-28,27

Las simulaciones realizadas con el modelo Témez\_MOD\_CAH y el modelo Témez\_MOD\_%R, no producen buenos resultados, mientras el primero da valores muy por debajo de los registrados en la realidad, el segundo modelo produce una sobre valoración de los mismos, exagerando en exceso el caudal punta.

El modelo Témez\_MOD\_IEH es el que mejor ajuste ofrece, con un error en la estimación del volumen y del caudal punta cercano al 25% y con una forma de la curva relativamente parecida a la original, según muestra el error medio cuadrático y el parámetro de eficiencia de Nash.

### 7.4.8. Tormenta 8 (23/02/2004)

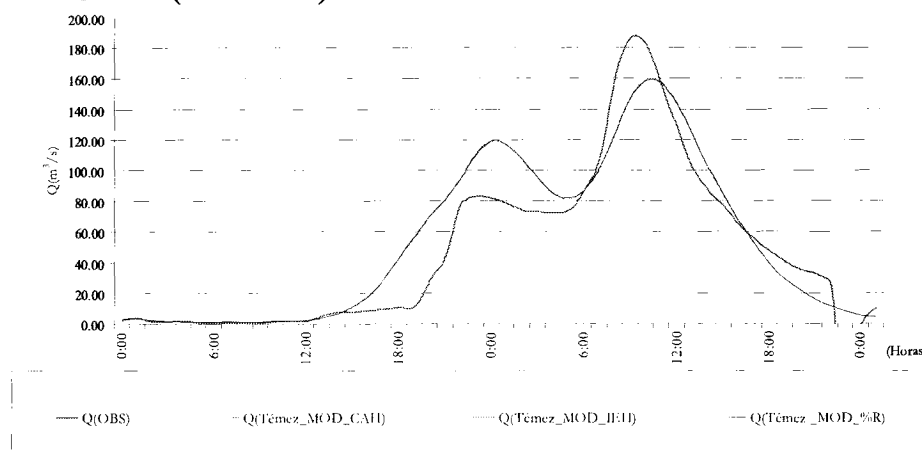


Figura 7.47: Comparación del hidrograma observado y de los simulados para la simulación IV y la tormenta 8 del 23/02/2004

Tabla 7.32: Parámetros y estadísticos de la simulación IV y la tormenta 8 del 23/02/2004

Parámetro	Hidrograma			
	OBS	Témez MOD CAH	Témez MOD IEH	Témez MOD %R
Volumen (hm <sup>3</sup> )	8,3	9,5	9,5	9,5
Caudal punta (m <sup>3</sup> /s)	186,2	159,7	158,9	159,3
Hora caudal punta	9:00	10:00	10:00	10:00
Diferencia volumen (hm <sup>3</sup> )		-1,3	-1,2	-1,2
Diferencia caudal punta (m <sup>3</sup> /s)		26,5	27,3	26,9
Desfase (h)		1:00	1:00	1:00
RMS (m <sup>3</sup> /s)		20,82	20,55	20,68
E.Q (%)		15,20	14,40	14,81
NSE		0,84	0,85	0,85
E.Qp (%)		14,23	14,64	14,43

No se aprecian diferencias significativas entre los tres modelos, presentando errores de estimación del volumen de escorrentía y del caudal punta próximos al 15%.

La forma de la curva simulada se ajusta relativamente bien a la realidad, presentando valores próximos a 0,9 para el parámetro de Nash, pero valores en torno a 20 para el error medio cuadrático, lo que indica que existen algunos puntos de discordancia entre la realidad y los modelos; como la sobrevaloración del caudal punta del primer pico del hidrograma y la subestimación del caudal punta del segundo pico.

### 7.4.9. Resumen de la simulación IV

Representando de forma conjunta los principales estadísticos de la simulación para las ocho tormentas se facilita la interpretación de los resultados, como se puede apreciar en los siguientes gráficos:

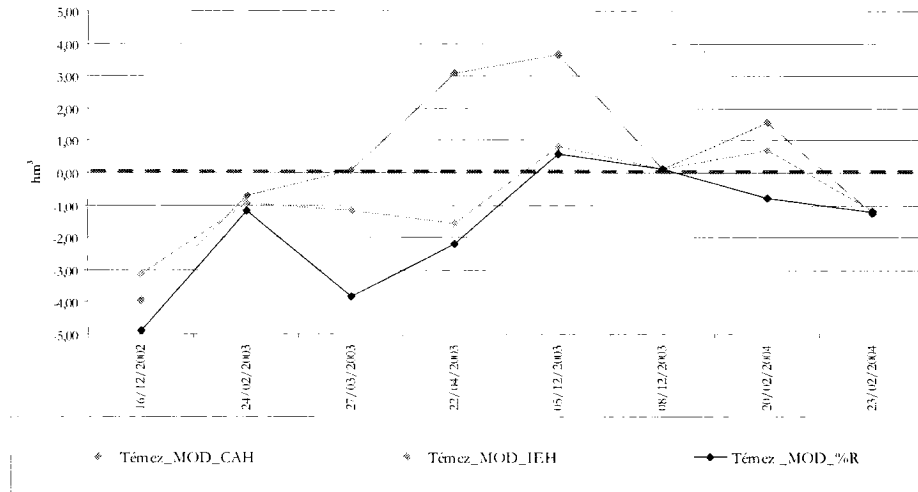


Figura 7.48: Diferencia de volumen para la simulación IV y las distintas tormentas

Como se puede apreciar, los tres modelos presentan un comportamiento dispar para cada tormenta en la estimación del volumen de escorrentía generado por cada evento, y tan solo en las cuatro últimas tormentas parecen tener un comportamiento más homogéneo las simulaciones que corresponde a los modelos Témez\_MOD\_IEH y Témez\_MOD\_%R. Para el resto de las tormentas la diferencia entre el volumen estimado y el observado alcanza valores mayores del 1 hm<sup>3</sup>.

El modelo Témez\_MOD\_CAH, se revela como un mal estimador del volumen de escorrentía.

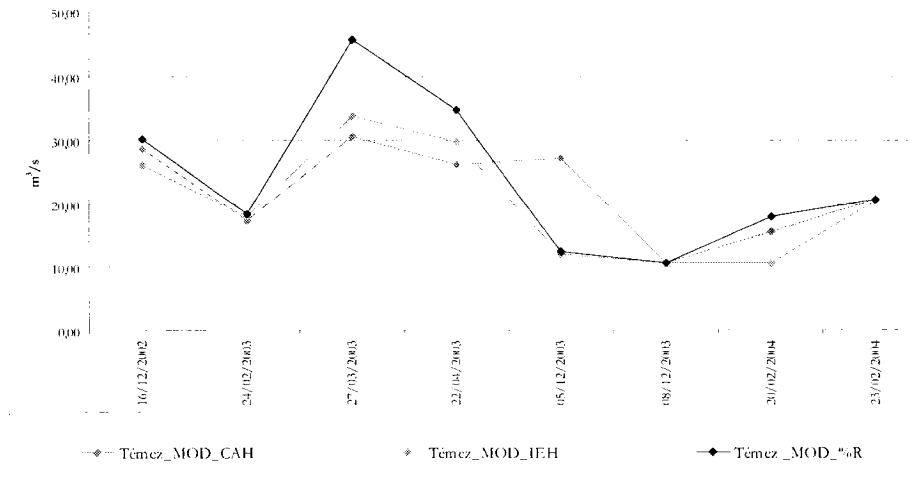


Figura 7.49: Valores del error medio cuadrático para la simulación IV y las distintas tormentas

El mejor comportamiento del error medio cuadrático lo presenta el modelo Témez\_MOD\_IEH, tendiendo a regularizarse en las últimas cuatro tormentas, mientras que para las iniciales ofrece valores muy dispares, lo que nos indica que los hidrogramas de estimación difieren de la realidad.

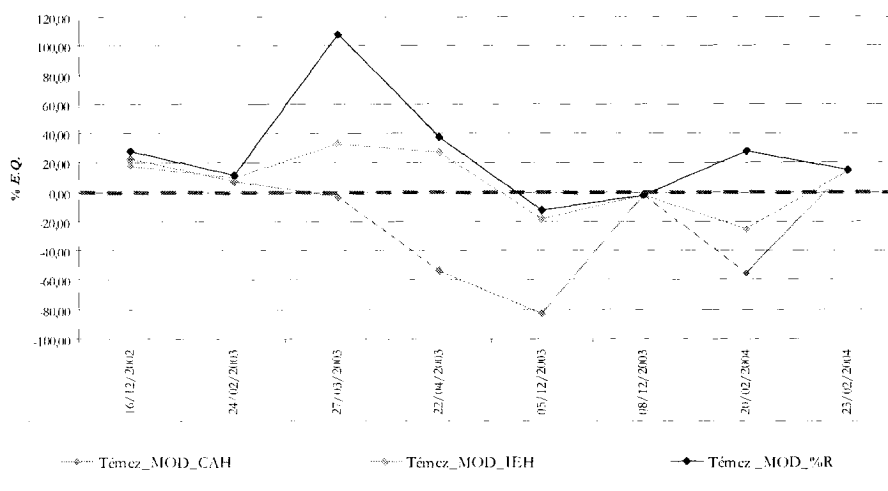


Figura 7.50: Valores del error relativo del caudal para la simulación IV y las distintas tormentas

El modelo que ofrece una mejor estimación del caudal es el Témez\_MOD\_IEH, con errores relativos inferiores al 30% para todas las tormentas, mientras que los otros dos modelos presentan valores del error algo mayores.

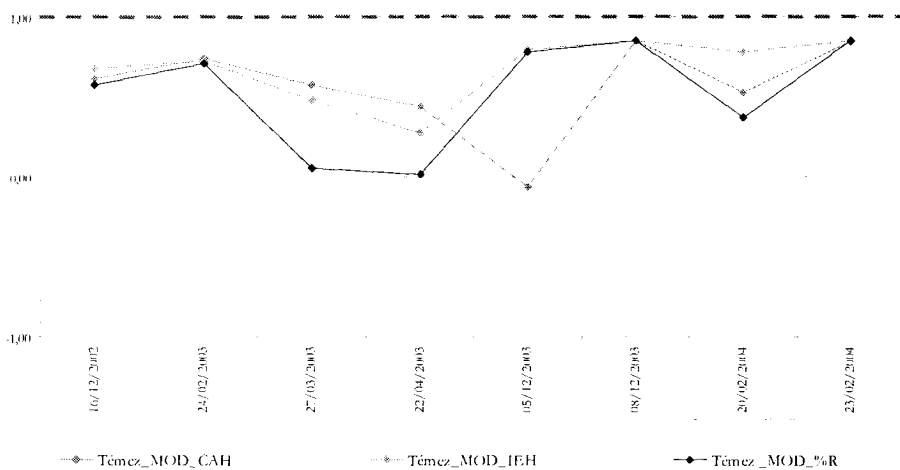


Figura 7.51: Valor de la eficiencia del ajuste de la simulación IV y las distintas tormentas

En cuanto al parámetro de eficiencia de Nash, el modelo Témez\_MOD\_IEH aporta valores superiores a 0,7 para la mayoría de los eventos y tan sólo para el evento 3 y 4 presenta valores algo inferiores, por lo que es el que mejor refleja la forma de curva.

Los otros dos modelos presentan valores inferiores, incluso llegando a presentar valores negativos o cercanos a cero.

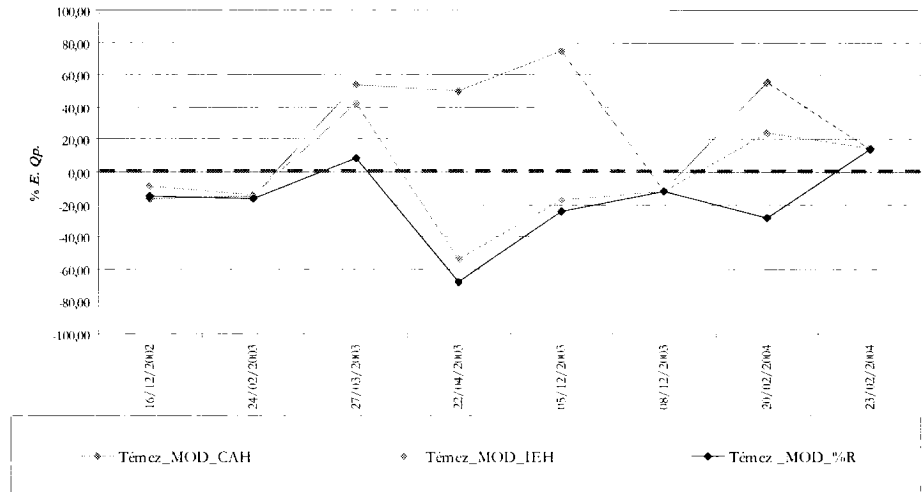


Figura 7.52: Valor del error relativo del caudal punta de la simulación IV para las distintas tormentas

En cuanto al error relativo del caudal punta, los modelos Témez\_MOD\_IEH y Témez\_MOD\_%R tienen una tendencia muy similar con errores inferiores al 20% para la mayoría de las tormentas, mostrando un valor algo mayor para el evento 4.

El modelo Témez\_MOD\_CAH presenta errores relativos del caudal semejantes a los otros dos modelos en los eventos iniciales, pero a partir del tercero el comportamiento es dispar, alcanzándose errores muy superiores al 30%.

### 7.5. COMPARACIÓN DE LAS MEDIAS DE LOS MODELOS

Representando gráficamente la media aritmética para el conjunto de la ocho tormentas y para cada uno de las simulaciones ensayadas se puede estimar el grado de eficacia de los distintos modelos de forma global, como se puede apreciar en los siguientes gráficos:

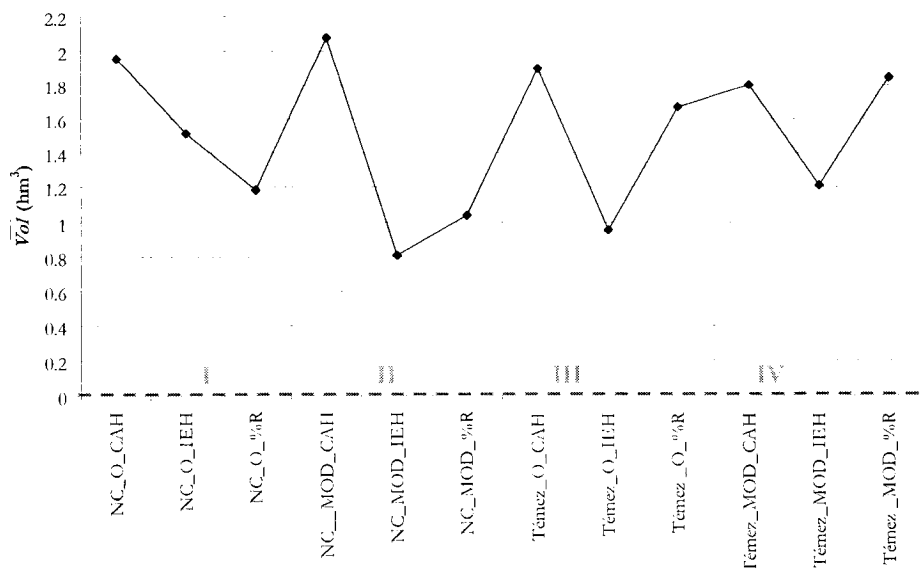


Figura 7.53: Media aritmética de la diferencia entre el volumen de escorrentía observado y el estimado

En el conjunto de las ocho tormentas el modelo que presenta una menor diferencia entre el volumen de escorrentía estimado y el observado es el NC\_MOD\_IEH, con un valor próximo a los  $0,8 \text{ hm}^3$ . Así mismo, se puede apreciar que la introducción de las variaciones del estado antecedente de humedad en cualquiera de los modelos supone, por lo general, una mejora importante respecto a la condición de humedad antecedente en la estimación del volumen total de escorrentía.

La determinación del número de curva de forma continua por sí sola, no parece introducir grandes variaciones en la estimación del volumen de escorrentía, obteniéndose valores muy próximos entre los modelos que solamente introducen dicha variación (NC\_O\_CAH y NC\_MOD\_CAH; Témez\_O\_CAH y Témez\_MOD\_CAH).

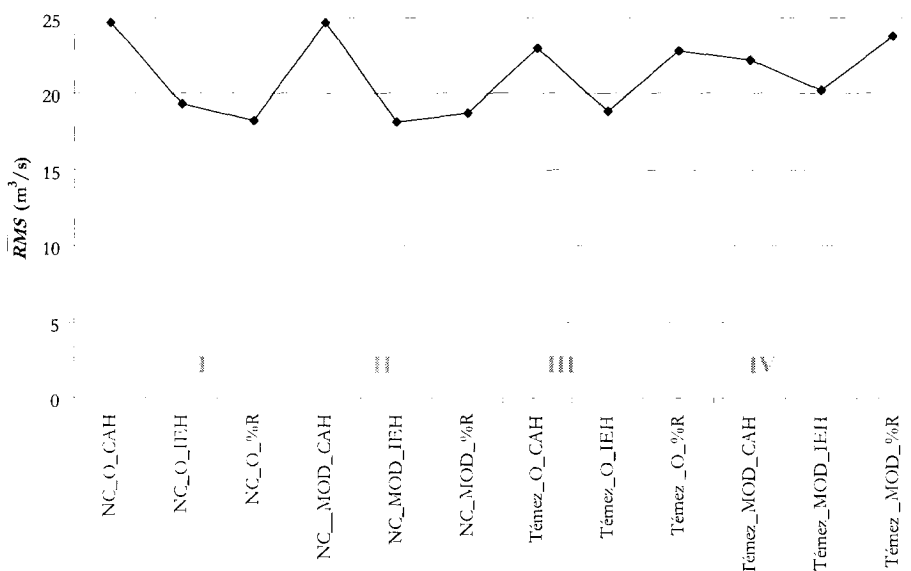


Figura 7.54: Media aritmética del error medio cuadrático

Analizando el error medio cuadrático de los distintos modelos se observa que los modelos NC\_O\_IEH, NC\_O\_%R, NC\_MOD\_IEH, NC\_MOD\_%R y Témez\_O\_IEH presentan un comportamiento muy similar, cometiendo un error inferior al 20%, por lo que nuevamente las variaciones en la estimación del estado antecedente de humedad de la cuenca representan una mejora respecto al modelo tradicional.

En el estudio de este parámetro se vuelve a poner de manifiesto que el cálculo del número de curva de forma continua introduce una modificación mínima en la modelización hidrológica.

En este caso, aunque existen distintos modelos con un comportamiento similar, el que menor error cuadrático refleja es el que trabaja de forma conjunta con el cálculo del número de curva de forma continua y el índice de estado antecedente de humedad.

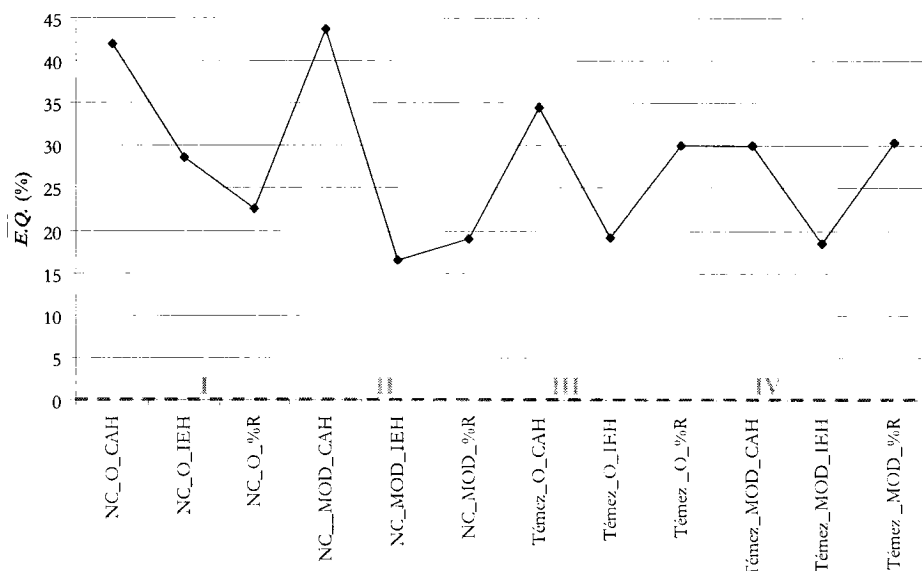


Figura 7.55: Media aritmética del error relativo del caudal

Nuevamente, los modelos que mejor estiman el caudal representado por el hidrograma a lo largo del tiempo, son aquellos que están basados en el cálculo del índice de estado antecedente de humedad en conjunción con el cálculo del número de curva de forma continua.

Destacar que el modelo NC\_MOD\_IEH presenta un error cercano al 15% , mientras que el resto de simulaciones presentan errores mayores.

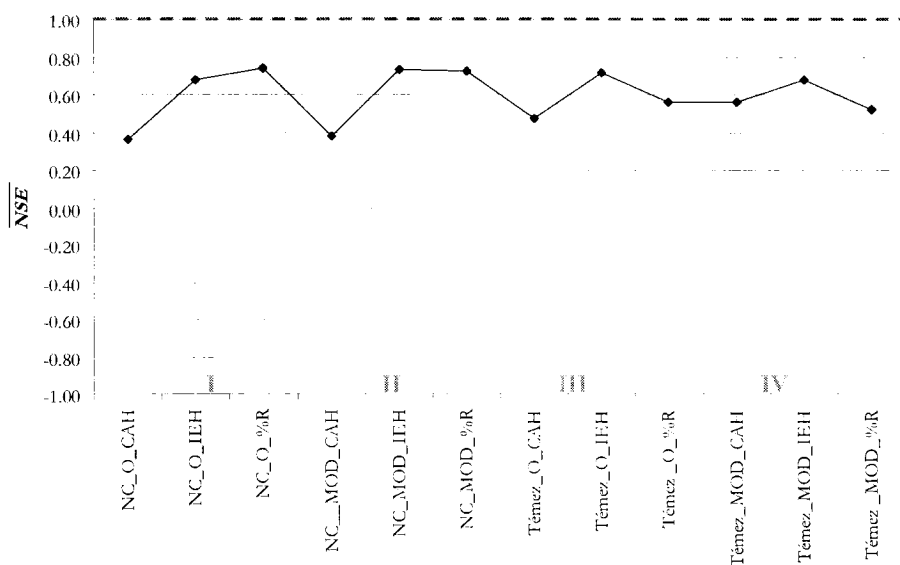


Figura 7.56: Media aritmética del parámetro de eficiencia de Nash

Para el conjunto de las ocho tormentas evaluadas los mejores modelos presentan un valor cercano a 0,80 para el parámetro de eficiencia de Nash, destacando que los modelos basados en la estimación del contenido antecedente de humedad son los que muestran valores más alejados de la unidad.

Los modelos que presentan mejores estadísticos son NC\_O\_%R y NC\_MOD\_IEH.

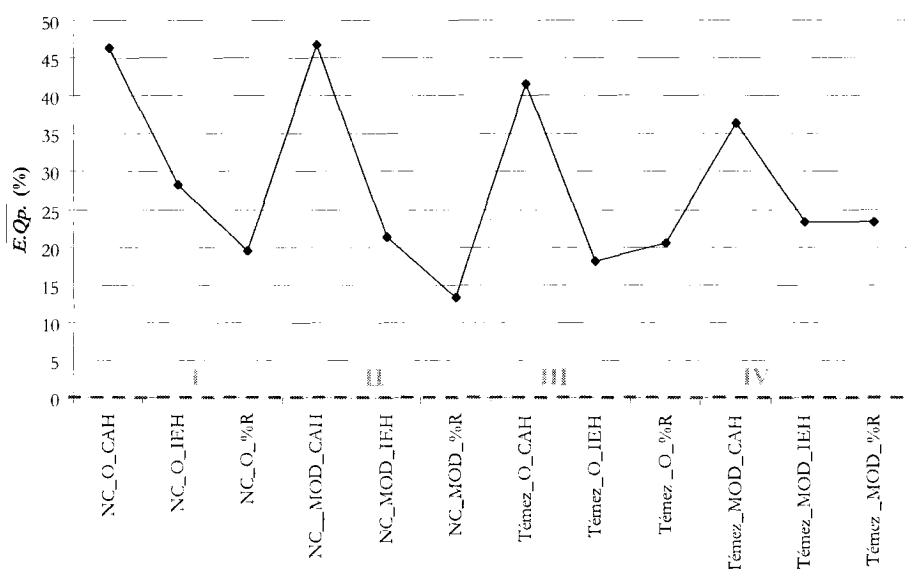


Figura 7.57: Media aritmética del error relativo del caudal punta

La mejor estimación del caudal punta, para el conjunto de las ocho tormentas, aparece en el modelo NC\_MOD\_%R, con error relativo inferior al 15% y está causada por que este modelo tiende a sobreestimar los valores del volumen de escorrentía, mientras que el resto de los modelos tiende a subvalorarlos, lo que provoca que los caudales punta estén algo por debajo del valor real.

Nuevamente, los modelos que introducen variaciones en el cálculo del estado antecedente humedad de la cuenca presentan mejores ajustes y las variaciones relativas al cálculo del número de curva, por sí solas, no parecen producir grandes mejoras en la estimación del caudal punta.



## CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES

En este trabajo se han propuesto un conjunto de alternativas de mejora del método del número de curva para la estimación de la escorrentía superficial. Por otro lado, la validación de las mejoras propuestas ha exigido la obtención de un enorme volumen de información y la aplicación de un modelo hidrológico. En consonancia con estos dos grandes bloques de trabajo señalados, se han distinguido dos grupos de conclusiones y un apartado de propuestas futuras que se presentan a continuación.

### 8.1. CONCLUSIONES RELATIVAS A LAS MEJORAS DEL MODELO DEL NÚMERO DE CURVA

- Se confirma que la predicción del estado antecedente de humedad, basada en los cinco días precedentes de lluvia, se muestra claramente inexacta para determinar el estado de humedad del suelo, al no participar en su estimación ninguna variable edáfica, tal como se había intuido al inicio del presente trabajo y como también ha sido ya apuntado por el NRCS. El método sólo parece mostrar alguna aproximación a la realidad en aquellas situaciones en las que el conjunto de los suelos de la cuenca están próximos a las condiciones medias o cuando toda la cuenca se encuentra en estado de saturación.
- Se han planteado dos alternativas para la determinación del estado antecedente de humedad, basadas en el balance hídrico diario de la reserva del suelo. La primera usa como estimador del estado antecedente de humedad el porcentaje de agua total en la reserva en relación a la capacidad de retención de agua máxima; este estimador se ha denominado *índice de humedad, IH*. La segunda alternativa utiliza el porcentaje de agua disponible (por encima del punto de marchitez permanente) en relación a la capacidad máxima de agua disponible; este estimador se ha denominado *índice de estado de humedad antecedente,  $I_{eh}$* . Ambos índices suponen una mejora sustancial en la estimación de la predisposición del suelo para producir escorrentía, especialmente en aquellas situaciones en las que la cuenca se encuentra en condiciones intermedias de humedad.
- *IH* resulta mucho más sencillo de calcular que  $I_{eh}$  y se ha revelado como mejor indicador de la humedad antecedente del suelo cuando se pretende hacer una estimación del caudal punta del hidrograma.  $I_{eh}$  da mejores resultados en el cálculo del volumen de escorrentía.
- La precisión en la determinación del *grupo hidrológico de suelo* (GHS) se muestra fundamental, dada la alta sensibilidad que los valores del número de curva presentan ante esta variable.

- Se ha planteado la sistematización de la obtención del GHS siguiendo las indicaciones del NRCS sobre la base de la conductividad hidráulica a lo largo del perfil edafológico. Para ello se han propuesto dos niveles de precisión: un primer nivel en el que se obtiene el GHS en el formato discreto tradicional (grupos A, B, C y D); un segundo nivel en el que se plantea la obtención del GHS en formato continuo, que se ha denominado *índice de grupo hidrológico de suelos, Ig*. Esta sistematización reduce la ambigüedad reinante en la determinación del GHS, siempre que se disponga de información edafológica de cierta calidad.
- La obtención de *Ig* permite, a su vez, pasar de valores discretos a continuos en la determinación del número de curva, lo que incrementa la precisión del método. El carácter numérico y continuo de *Ig* facilita su análisis estadístico y su cartografía como una variable edafológica más.
- Aunque parece que por sí solo el índice de grupo no tiene una incidencia clara sobre la estimación del cauda puntal y del volumen de escorrentía, en conjunción con los modelos de estimación de la humedad del suelo sí representa un avance notorio. Hay que tener en cuenta la extensión y la elevada complejidad edafológica de la cuenca de El Sancho, que compensa y, por tanto, difumina las variaciones entre cuencas más pequeñas.
- La adaptación al territorio nacional del número de curva realizada por Témez, en su versión original, mejora ligeramente la calidad de las estimaciones del modelo original del SCS.
- Cuando se aplican las variaciones del índice de grupo y de los índices de humedad a la adaptación de Témez los resultados mejoran ostensiblemente respecto al original, si bien se aprecia que la estimación de caudales y volúmenes se realiza por exceso, con lo que el modelo resulta menos preciso que el del SCS. Este problema podría ser solucionado con un reajuste de los umbrales de escorrentía o con una reducción de la abstracción inicial (*Ia*).

## 8.2. CONCLUSIONES RELATIVAS A LA MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA

- Los sistemas de información geográfica permiten la implementación de modelos hidrológicos que trabajen con variables continuas y distribuidas. A través de los sistemas de información geográfica se consigue también una elevada potencia de procesamiento de las variables hidrológicas. Se supera, por lo tanto, la tradicional necesidad de trabajar con valores discretos medios, lo que significa un incremento en la precisión de los modelos y no necesariamente un aumento del trabajo de cálculo.
- El gran tamaño y la complejidad de la cuenca, unidos a la poca sensibilidad de algunos de los sensores implicados en la determinación del hidrograma observado, hacen que los caudales reales estimados en la presa presenten oscilaciones bruscas que dificultan la comparación con los hidrogramas simulados.
- En aquellas tormentas en las que la distribución espacial y temporal de la precipitación es muy heterogénea (tormentas 3 y 4), los métodos de interpolación utilizados para transformar los datos puntuales de lluvia en areales introducen un sesgo en los modelos por las diferencias que pueden aparecer con respecto a la precipitación real.

- Las tormentas de intensidad muy alta provocan una respuesta rápida de la cuenca que los modelos de simulación no reproducen con exactitud, por lo que parece ser necesario, al menos en cuencas de estas características, el introducir una corrección de la escurrentía o del estado antecedente de humedad en función de la intensidad media o máxima de la lluvia.

### 8.3. LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO

Los avances obtenidos en la presente investigación han hecho surgir nuevas cuestiones para continuar ahondando en el conocimiento del fenómeno de la producción de escurrentía; entre las líneas futuras de trabajo que se plantean tendríamos:

- Profundizar en el conocimiento de las relaciones del grupo hidrológico del suelo con las características físicas y el estado hídrico del perfil edafológico, con el fin de mejorar el balance diario de la reserva de agua en el suelo.
- Estudiar posibles relaciones del número de curva con los parámetros de calidad de estación y de productividad forestal, así como las interrelaciones del rendimiento forestal, las preparaciones del terreno y el parámetro del número de curva.
- Proponer y validar nuevas fórmulas de estimación de los estados antecedentes de humedad, investigando los estados extremos y sus relaciones con el punto de marchitez permanente y la capacidad de campo.
- Incorporar el uso de sensores remotos (imágenes radar de lluvia) a los modelos de estimación de la distribución de la precipitación, con el fin de solventar los problemas de la heterogeneidad espacial y temporal de las precipitaciones.
- Aplicar los modelos propuestos a una serie de microcuencas aforadas, con el fin de confirmar y calibrar mejor los parámetros que intervienen en el modelo.



**BIBLIOGRAFÍA**

- ALLUÉ, J. L. (1990). Atlas fitoclimático de España. Taxonomías. Madrid *INIA-MAPA*.
- ALMOROX, J., ANTONIO, R. DE SAA y HONTORIA, CH. (1998). Guía de campo para la descripción de perfiles. Madrid *Depto. de Edafología. E.T.S. Ingenieros Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid*. 51 pp.
- ALMOROX, J., ANTONIO, R. DE, SAA, A., DÍAZ, M<sup>a</sup> C. (1994). Métodos de estimación de la erosión hídrica.. Madrid *Agrícola Española*. 152 pp.
- ALONSO, E. (1987). Inventariación, análisis y evaluación integrada del medio natural en la Comarca de Riaño. León. *Tesis Doctoral. Facultad de Biología, Departamento de Ecología. Universidad de León*. 601 pp.
- BARLING, R.D., MOORE, I.D. y GRAYSON, R.B. (1994). A quasi-dynamic wetness index for characterizing the spatial distribution of zones of surface saturation and soil water content. *Water Resources Research*. Vol. 30, n<sup>o</sup> 4. pp. 1029-1044.
- BAUGHTON, W. C. (1989). A review of the USDA SCS curve number method. *Australian Journal of soil research*, 27. pp. 511-523.
- BEDIENT, P. B. y HUBER, W. C. (2002). Hydrology and Floodplain Analysis. Upper Saddle River, NJ. *Prentice Hall*. 763 pp.
- BELLINFANTE, N., MARTÍNEZ-ZAVALA, L. y PANEQUE, G. (2000). Cartografía de Unidades Geomorfoedáficas de la comarca del Andévalo (NW de Huelva). Relaciones suelo/geomorfología/uso. *Edafología*. Vol 7-3. pp. 287-299.
- BIRKELAND, P.W. (1999). Soils and Geomorphology. *Oxford University Press*.. 430 pp.
- BLANQUER JARAIZ, F. (2002). Normas de explotación. Presa del Sancho. *Algaida Ingenieros (Inédito)*. 13 pp.
- BONDELID, T. R., MCCUEN, R. H. y JACKSON, T. J. (1982). Sensitivity of SCS model to curve number variation. *Water Resources Bulletin*, 18-1. pp. 111-116.
- BOZSNAY, M. (1989). Generalization of SCS curve number method. *Journal of the Irrigation and Drainage Engineering*, 115-1. pp. 139-144.
- BRAKENSIEK, D. L., RAWLS, W. J. y STEPHENSON, G. R. (1984). Modifying SCS hydrologic soil groups and curve numbers for rangeland soils. *American Society of Agricultural Engineers*, 84-203. 1-13 pp.
- BRANDY, N.C. y WEIL, R.R. (1996). The Nature and Properties of Soils. New York, NY. *MacMillan Publishing Co*. 621 pp.
- CHEN, C. L. (1982). Infiltration formulas by curve number. *Journal of Hydraulics Division*, 108-7. pp. 828-829.
- CHONG, S. K. y TENG, T. M. (1986). Relationships between the runoff curve number and hydrologic soil properties. *Jornal of Hydrologic*, 84-1/2. pp. 1-7.

- CHOW, V. T. (1994). Hidrología aplicada. Santafé de Bogotá. *McGraw-Hill*. 584 pp.
- COLOSIMO, C. y MEDICINO, G. (1996). Gis for distributed rainfall-runoff modeling.. En V.P. SINGH y M. FIORENTINO [Ed]: *Geographical Information Systems in Hydrology*. Netherland, *Kluwer Academic Publishers*. pp. 195-235.
- CONACHER, A.J. y DALRYMPLE, J.B. (1977). The nine unit landsurface model: An approach to pedogeomorphic research. *Geoderma*. vol.18, n°1 (monografía especial). pp. 127-144.
- CONSEJERÍA DE MEDIO AMBIENTE. JUNTA DE ANDALUCÍA (2003). Plan director de riberas de Andalucía. Sevilla. *Junta de Andalucía*. 309 pp.
- COSBY, B. J., HORNBERGER, G. M., CLAPP, R. B. y GINN, T. R. (1984). A statical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. *Water Resources Research*, 20-6. pp. 682-690.
- DE BRUIN, S. y STEIN, A. (1998). Soil-landscape modelling using fuzzy c-means clustering of attribute data derived from a digital elevation model (DEM). *Geoderma* 83. pp. 17-33.
- DEL RÍO, J., FERNÁNDEZ DE VILLARÁN, R. y MARTÍNEZ DE AZAGRA, A. (1994). Programas básicos de ordenador: III-ficha hídrica de Thornthwaite y programas auxiliares. *E.U.P.A. Servicio de publicaciones, Palencia*. 39 pp. .
- DIAZ DEL OLMO, F. (1987). El relieve en Andalucía. En: Cano, G., Geografía de Andalucía. Sevilla. *Tartessos*.
- DOMINGO SANTOS, J. M. (2002). Caracterización de los suelos forestales de la provincia de Huelva. *Tesis Doctoral. E.T.S.I.Montes. Universidad Politécnica de Madrid*. 395pp.
- DOMINGO SANTOS, J. M., CORRAL, E., MORENO, F. J., FERNÁNDEZ, Y., REFOJO, L. y FERNÁNDEZ DE VILLARÁN, R. (2002). Memoria de investigación: Caracterización de los suelos forestales de la Hoja M.T.N. 959-II, Calañas. *Departamento de Ciencias Agroforestales, Universidad de Huelva (sin publicar)*. 158 pp.
- DOMINGO SANTOS, J. M., CORRAL, E., MORENO, F. J., RODA, J. C., RAPP, I. y FERNÁNDEZ DE VILLARÁN, R. (2003). Memoria de investigación: Caracterización de los suelos forestales de la Hoja M.T.N. 981-III, Gibrleón-Tariquejos (ampliada). *Departamento de Ciencias Agroforestales, Universidad de Huelva (sin publicar)*.
- DOMINGO SANTOS, J. M., FERNÁNDEZ DE VILLARÁN SAN JUAN, R., CORRAL PAZOS DE PROVENS, E. y RAPP ARRARÁS, I. (2006). Estimación de la capacidad de retención de agua en el suelo: Revisión del parámetro CRA. Madrid. *Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA)*. pp. 14-23.
- ENCE, S.A. (2001). Normas de actuación ante avenidas de la presa de El Sancho. *Empresa Nacional de Celulosas, S.A. (Informe Interno), Inédito*.. .
- FELICÍSMO, ANGEL M. (1994). Modelos digitales del terreno. Introducción y aplicaciones en la ciencias ambientales. Oviedo. *Pentalfa Ediciones*. 220 pp.

FERRER JULIA, M. (2003). Análisis de nuevas de fuentes de datos para la estimación del parámetro número de curva: perfiles de suelo y teledetección. Madrid. *CEDEX*. 345 pp.

FERRER JULIA, M., ESTRELA MONREAL, T. SÁNCHEZ DEL CORRAL JIMÉNEZ, A. y GARCÍA MELÉNDEZ E. (2004). Constructing a saturated hydraulic conductivity map of Spain using pedotransfer functions and spatial prediction. *Geoderma*, 123. pp. 257-277.

GANDULLO, J.M (1994). Climatología y ciencia del suelo. Madrid. *Fundación Conde del Valle de Salazar*. 404 pp.

GARCÍA BARTUAL, R. (2003). Estudios hidrológicos para optimización de la gestión de la Presa de El Sancho (Huelva). Valencia. *Universidad Politécnica de Valencia (Inédito)*. .

GENERALITAT DE CATALUNYA. DEPARTAMENT DE MEDI AMBIENT. AGÈNCIA CATALANA DE L'AIGUA (2001). Guia Técnica: Recomanacions tècniques per als estudis d'inundabilitat d'àmbit local. *Generalitat de Catalunya*. 106 pp.

GONZÁLEZ HIDALGO, J. C., DE LUÍS, M., ŠTEPÁNEK, P., RAVENTÓS, J. y CUADRAT, J. M. (2002). Reconstrucción, estabilidad y proceso de homogeneizado de series de precipitación en ambientes de elevada variabilidad pluvial. *VII Reunión Nacional de Climatología. Grupo de Clima de la Asociación de Geógrafos Españoles. Albarracín 2002*. pp. 47-57.

GREEN, I. R. A. y STEPHENSON, D. (1986). Criteria for comparison of single event model. *Hydrological Society Journal*, 31 (3). pp. 395-411.

HAWKINS, R. H. (1978). Runoff curve number with varying site moisture. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 104-4. pp. 389-398.

HAWKINS, R. H., JIANG, R., WOORWARD, D. E., HEJMFELT, A. T. y VAN MULLEN, J. A., (2002). Runoff curve number method: Examination of the initial abstraction ratio. *Second Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference. Las Vegas, Nevada*. 12 pp.

HJELMFELT, A. T., WOODWARD, D. A., CONAWAY, G., PLUMMER, A., QUAN, Q. D., VAN MULLEN, J., HAWKINS, R. H. y RIETZ, D. (2001). Curve Numbers, Recent Developments. *Proc. 29th Congress of the Intr. Assoc. for Hydraulic Research. Beijing, China*.

HJELMFELT, A.T., KRAMER, L.A. y BURWELL, R. (1982). Curve numbers as random variables. in V.P. Singh (editor), *Rainfall-Runoff Relationships. Water Resources Publications, Highlands Ranch, CO*. pp. 365-370.

HOGGAN, D. (1996). Computer Assisted Floodplain Hydrology and Hydraulics. Utah, USA. *McGraw-Hill*. 640 pp.

HOGUE, T.S., GUPTA, H.V., y SOROOSHIAN, S. (2006). A 'User-Friendly' approach to parameter estimation in hydrologic models. *Journal of Hydrology*, 320. pp. 202-217.

IGME (1997). Mapa tectónico de la Península Ibérica y Baleares. E. 1:1.000.000. Madrid. *Instituto Geológico y Minero de España. Ministerio de Industria*.

IGME (Instituto Geológico y Minero de España) (1982a). Mapa geológico de España E. 1:50.000. 958- PUEBLA DE GUZMÁN. *Ministerio de Industria y Energía. Madrid.*

IGME (Instituto Geológico y Minero de España) (1982b). Mapa geológico de España E. 1:50.000. 959- CALAÑAS. *Ministerio de Industria y Energía. Madrid.* Pp. Mapa y reseña de 87.

IGME (Instituto Geológico y Minero de España) (1982c). Mapa geológico de España E. 1:50.000. 980- SAN SILVESTRE DE GUZMÁN. *Ministerio de Industria y Energía. Madrid.*

IGME (Instituto Geológico y Minero de España) (1983). Mapa geológico de España E. 1:50.000. 981- GIBRALEÓN. *Ministerio de Industria y Energía. Madrid.*

INITEC (1996). Estudio de optimización y realización de normas de realización de la presa de El Sancho. *Inédito.*

KULL, D. y FELDMAN, A. (1998). Evolution of Clark's unit graph method to spatially distributed runoff. *Journal of Hydrologic Engineering, ASCE 3 (1).* pp. 9-19.

LAGACHERIE, P. Y VOLTZ, M (2000). Predicting soil properties over a region using sample information from a mapped reference area and digital elevation data: a conditional probability approach. *Geoderma. 97 (2000).* pp. 187-208.

MAIDMENT, D. R. (1992). Handbook of hydrology. *McGraw-Hill, INC.* Pp. .

MARTÍNEZ DE AZAGRA, A. y NAVARRO HEVIA, J. (1996). Hidrología forestal. El ciclo hidrológico. Valladolid. *Universidad de Valladolid.* 286 pp.

MARTÍNEZ FERNÁNDEZ, J. y CEBALLOS BARBANCHO, A. (2001). Estimación de propiedades hídricas de los suelos mediante el uso de funciones de edafo-transferencia. *V jornadas sobre investigación en la zona no saturada, Pamplona, Universidad Pública de Navarra y Gobierno de Navarra.*

MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J.A. (1999). Modelos digitales de terreno: Estructuras de datos y aplicaciones en análisis de formas del terreno en edafología. *Universitat de Lleida. Quaderns DMACS n° 25.* 51pp.

MILLER, N. y CRONSHEY, R. (1989). Runoff curve number de next step. *Procedures Inc. Conf. on Channel flow and catchment runoff. University of Virginia.* .

MISHRA, S. K. y SINGH, V.P. (2004). Validity and extension of the SCS-CN method for computing infiltration and rainfall-excess rates. *Hydrological Processes, 18.* pp. 3323-3345.

MISHRA, S. K., KUMAR, S. R. y SINGH, V.P. (1999). Calibration and validation of general infiltration model. *Hydrological Processes, 13.* pp. 1691-1718.

MISHRA, S. K., TYAGI, J. V., SINGH, V. P. y SINGH, R. (2006). SCS-CN-based modelling of sediment yield. *Journal of Hydrology.* pp. 1-22.

MISHRA, S.K. Y SINGH, V.P. (2003). Soil conservation service curve number (SCS-CN) Methodology. Netherlands. *Kluwer Academic Publishers.* 499 pp.

- MONSALVE SÁEZ, G. (1999). Hidrología en la ingeniería. México, D.F. *Alfaomega, coop.* 358 pp.
- MOPT (1992). Guía para la elaboración de estudios del medio físico: contenido y metodología. Madrid *MOPT.* 809 pp.
- MOPU (1990). Instrucción de carreteras 5.2-IC. Drenaje superficial. *Dirección General de Carreteras.* 8 pp.
- MOREL-SEYTOUX, H. J. y VERDIN, J. P. (1982). Correspondence between the SCS CN and infiltration parameters. *Advances in Irrigation and Drainage.* pp. 308-319.
- MUÑOZ CARPERNA, R. y RITTER RODRIGUEZ A. (2005). Hidrología agroforestal. Madrid. *Mundi-Prensa.* 348 pp.
- MUSGRAVE, G. W. (1955). How much rain enters the soil. *Water: the yearbook of agriculture 1955.* pp. 151-159.
- NASH, J.E. y SUTCLIFFE, J.V., (1970). River flow forecasting through conceptual models, Part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology, 10.* pp. 282-290.
- NEARING, M. A., LIU, B., RISSE, L. M. y HANG, X. (1996). Curve number and Green-Ampt reflective hydraulic conductivities. *Water Resource Bolletin, 32.* pp. 125-126.
- NEITSCH, S. L., ARNOLD, J. G., KINIRY, J. R., WILLIAMS, J. R. y KING, K. W. (2002). Soil and Water Assessment Tool. Theoretical documentation (SWAT, 2000 v.). *Texas Water Resources Institute, College Station, Texas.* 506 pp.
- NIELSEN, R. D. y HEJMFELT, A. T. (1998). Hydrologic soil group assignment. *Water Resorce Engineering.* pp. 6.
- NRCS (1972). National Engineering Handbook, Section 4. Hydrology. *USDA.*
- NRCS (1985). National Engineering Handbook, Section 4. Hydrology. *USDA.*
- NRCS (2002). National Engineering Handbook, Section 4. Hydrology. *USDA.*
- NURÜNNISA USUL y MUSA YILMAZ (2002). Estimation of instantaneous unit hydrograph with Clark's technique in GIS. *ESRI International User Conferences.* pp. 17.
- OCHS, E., S. (2003). CRREL ArcGis Tools: Gage Analyst and Storm Transform. User's Manual. Hannover, NH *Engineer Research and Development Center.* pp. 33.
- PONCE, V. M. y HAWKINS, R. H. (1996). Runoff curve number: has it reached maturity?. *Journal of Hydrologic Engineering, January.* Pp. 11-19.
- PORTA, J. , LÓPEZ-ACEVEDO, M. y ROQUERO, C. (1994). Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Madrid. *Mundiprensa.* 807 pp.
- RALLISON, R. E. y MILLER, N. (1982). Past, present, and future SCS runoff procedure. *En: V.P. Singh [Ed], Rainfall-runoff relationship. Proceedings of the International Symposium of Rainfall-Runoff Modeling held May 18-21 (1981) at Mississippi State University, Littleton, Colorado, Water Reources Publications.* pp. 353-364.

RAWLS, W. J., AHUJA, L. R. y BRAKENSIEK, D. L. (1992). Estimating soil hydraulic properties from soils data. In M. Th. van Genuchten et al., eds. *Indirect methods for estimating the hydraulic properties of unsaturated soils. Proc. Workshop. U.S. Soil Salinity Lab. and Dep. Soil and Envir. Sci., U. Calif., Riverside.* pp. 329-340.

ROBBEZ-MASSON, J.M. (1998). L'esquisse cartographique pédologique numérique: un nouvel outil au service du prospecteur. Montpellier (France) *Congrès AISS Science du Sol.*

ROBBEZ-MASSON, J.M. (2000). Clapas. Unité du sol. *ENSAM-INRA. Pp.Web: <http://sol.ensam.inra.fr/Produits/Clapas>.*

RUBIO, C. Y LLORENS, P. (2003). Evaluación del uso de funciones de edafotransferencia para la determinación de propiedades hidrodinámicas en suelos franco-limosos (cuencas experimentales de Vallcebre, Alt Llobregat). *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo, VI.* pp. 137-142.

SÁNCHEZ-PALOMARES, O. y BLANCO, A. (1985). Un modelo de estimación del equivalente de humedad de los suelos. *Montes, 4.* pp. 26-30.

SAXTON, K. E., RAWLS, W. J. ROMBERGER, J. S. y PAPENDICK R. I. (1986). Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Science Society of America Journal, 50.* pp. 1031-1036.

SCHAAP, M.G. Y LEIJ, F. J. (1999). Improved prediction of unsaturated hydraulic conductivity with the Mualem-van Genuchten. *Soil Science Society of America Journal.*

SCS (1986). Urban Hydrology for Small Watersheds, Technical Release 55. *USDA.* 156 pp.

SHIRAZI, M.A. y BOERSMA, L. (1984). A unifying quantitative analysis of soil texture. *Soil Science Society of America Journal 48.* pp. 142-147.

SIMANTON, J. R., HAWKINS, R. H., MOHSENI-SARAVI, M. y RENARD, K. G. (1996). Runoff curve number variation with drainage area, Walnut Gulch, Arizona. *Transactions of the ASAE, 39(4).* pp. 1391-1394.

SOBIERAJ, J.A., ELSENBEER, H. y VERTESSY, R. A. (2001). Pedotransfer functions for estimating saturated hydraulic conductivity: implications for modelling storm flow generation. *Journal of Hydrology, 251.* pp. 202-220.

SOIL SURVEY DIVISION STAFF (1993). Soil survey manual. Handbook 18. *Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture.*

STRAUB, T. D., MELCHING, C. S. y KOCHER, K. E. (2000). Equations for Estimating Clark's Unit-Hydrograph. Parameters for Small Rural Watersheds in Illinois. Illinois (USA) *U.S. Geological Survey.* 36 pp.

TÉMEZ, J. R. (1987). Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales. Madrid. *MOPU, Dirección General de Carreteras.* 111 pp.

USACE (1994). Flood-runoff analysis, EM 1110-2-1417. Washington, DC *Office of Chief of Engineers.* 214 pp.

USACE (2000). Hydrologic Modelling System. HEC-HMS, Technical reference manual. Davis California USA. *U.S. Army Corps of Engineers*. 157. pp.

USACE (2001). Hydrologic Modelling System. HEC-HMS. User's manual. Davis California USA. *U.S. Army Corps of Engineers*. 188 pp.

USACE (2003). Geospatial Hydrologic Modelling Extension. HEC-GeoHMS. Davis California USA. *U.S. Army Corps of Engineers*. 267 pp.

VAN MULLEN, J. A., WOODWAR, D.E., HAWKINS, R. H y HJEMFELT, A. T. (2002). Runoff curve number method: beyond the handbook. *Hydrologic Modelling for the 21st Century. Second Federal Interagency Hydrologic Modelling Conference*. pp. 10.

WAKINS, R. H. (1975). The importance of accurate curve number in the estimation of storm runoff. *Water Resources Bulletin*, 11-5. pp. 887-891.

WILLEKE, G. E. (1997). Discussion to runoff curve number: has it reached maturity?. *Journal of Hydrologic Engineering*. pp. 147-148.

WOOD, M. K. (1984). An evaluation of the hydrologic soil. *Water Resources Bulletin*, 20. pp. 379-389.

WOORWARD, D. E., HAWKINS, R., HJELMFELT, A. T., VAN MULLEN, J. A. y QUAN Q. D. (2002). Curve number method: origins, applications and limitations. *Hydrologic Modeling for the 21st Century. Second Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference*. 10 pp.

WÖSTEN, J. H. M., PACHEPSKY, Y. A. y RAWLS, W. J. (2001). Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology*, 251. pp 123-150.

YOUNG, D.F. y CARLETON, J. N. (2005). Implementation a probabilistic curve number method in the PRZM runoff model. *Environmental Modeling & Software*. 8 pp.

YU, B. (1998). Theoretical justification of SCS method for runoff estimation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 124(6). pp. 306-310.

ZHAN, X. y HUANG, M. (2004). ArcCN-Runoff: an ArcGIS tool for generating curve number and runoff maps. *Environmental Modelling & Software*, 19. pp. 875-879.



**ANEJOS A LA MEMORIA**

## **ÍNDICE ANEJOS**

**ANEJO I: PERFILES TIPO**

**ANEJOII: INTERVALOS CUALITATIVOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE  
LAS PROPIEDADES EDÁFICAS**

**ANEJO III: DESCRIPCIÓN DE VARIABLES USADAS PARA LA  
DETERMINACIÓN DE LAS RELACIONES SUELO-PAISAJE**

**ANEJO IV: MEDIAS DE LAS VARIABLES ENSAYADAS POR SUBGRUPOS  
DE LITOFACIES SIMPLIFICADAS**

**ANEJO V: BALANCES HÍDRICOS DIARIOS**

## **ANEJO I: PERFILES TIPO**

## I.1. FORMACIÓN CULM

### MUESTREO

Leptosol Éútrico

#### Características macromorfológicas

Coordenadas UTM: Litofacies: 1200 Grauwacas y pizarras con Posidonomia, Goniatites y Archaeocalamites  
 Hoja mapa: 959-II Término municipal: Calañas  
 m % Orientación: 70 E  
 Topografía local: Alta ladera  
 Longitud de ladera 8 m Buzamiento: Inverso %  
 cm Reacción perfil: Ligeramente ácido

#### Vegetación

Composición ppal: Pinar

Talla formación: Arbórea (bosque) >7m

Htz	Prof (cm)	Descripción						
AC	0 - 25	Color en Húmedo 7.5YR4/4, Marrón	Textura Franca	Estructura Granular	Débil	Reacción Ligeramente ácido	Compacidad Poco compacto	
		Fragmentos rocosos: Abundantes	Raíces	Manchas: %			Humedad	
		Naturaleza de los fragmentos:	Muy abundante Finas, medias y gruesas	Color:			Húmedo	

#### RESULTADOS ANALÍTICOS

Hor.	Espesor	TFSA%	Arena %	AMP %	Limo %	Arcilla %	pH (H <sub>2</sub> O)	pH (ClK)	C.E. (dS/m)	MO%	CaCO <sub>3</sub> %	Dens. real	CRA Tot	CRADU	CRAM
AC	25	55,9	41,9	2,66	39,0	19,1	6,1	5,1	0,06	1,42	0,04	2,61	36	22	42
Total:													36	22,0	42,0

Hor.	Ca ppm	Mg ppm	Na ppm	K ppm	CIC (meq/100g TF)	S (meq/100g)	V %
AC	872,09	189,31	19,48	86,10	9,42	6,24	66,28

Horizontes de diagnóstico: Un único horizonte, abundantemente rocoso y escásamente orgánico: ócrico.

#### Leptosol Éútrico

La presencia de roca dura continua a 25 cm de profundidad define el grupo Leptosol. La saturación con bases superior al 50% le asigna la unidad Éútrico.

#### Clasificación Soil Taxonomy (1988): Lithic Xerorthent

La inexistencia de un horizonte diagnóstico de profundidad clasifica el perfil como Entisol. Siendo el régimen de humedad Xérico (Xeric): Xerorthent. Se le asigna el subgrupo Lithic por la presencia de roca continua a menos de 50 cm de la superficie.

#### Clasificación forestal de los suelos españoles (Gandullo, 1994): Litosuelo (silíceo, xérico, subhúmico)

Suelo muy poco evolucionado que sólo presenta un horizonte superficial incipiente, y descansa sobre roca dura: Litosuelo. Se le añaden además los subgrupos silíceo, xérico y subhúmico.

#### Reseña:

Suelo situado por encima de los perfiles 959-75, 76, 77, 78 y 80, (transecto nº3) con los que guarda un gran parecido; el material parental ejerce una influencia fundamental sobre su construcción, debido a la escasa meteorización que sufren las grauwacas. En este caso, el perfil se sitúa en zona culminal, con pendiente suave, apreciándose un ligero incremento de la profundidad, probablemente debido a la disminución de los flujos de escorrentía superficial en esta zona.

Al igual que los perfiles de media ladera, sus condiciones de CRA y profundidad son muy limitantes, pues además también recibe menos agua, precisando vegetación muy estable y xerofítica, como matorral o pinar.

MUESTREO 959-106 Regosol Endolepti-Epiesquelético

**Características macromorfológicas**

Coordenadas UTM: X = 677.277 Litofacies: 1100 Pizarras y algunas grauwacas con Posidonomia, Goniatites y Archaeocalamites

Y = 4.167.653 Hoja mapa: 959-II Término municipal: Calañas

Altitud = 103 m Pendiente: 31 % Orientación: 85 E

Topografía general: Ondulado Topografía local: Baja ladera Microtopografía: Cóncavo

Longitud de ladera 80 m Buzamiento: Inverso Pedregosidad: 5 % Afloramientos rocosos: 0 %

Profundidad útil: 60 cm Reacción perfil: Ligeramente ácido

**Vegetación**

Composición ppal: Matorral degradado

Talla formación: Dehesa

Hzi	Prof (cm)	Descripción					
A	0- 12	Color en Seco 7.5YR5/4, Marrón	Textura Franco-arcillosa	Estructura Granular	Fuerte	Reacción muy fina Ligeramente ácido	Compacidad Blando
		Fragmentos rocosos: Frecuentes	Raíces	Muy abundante Finas (< 2mm)		Manchas: %	Humedad Seco
		Naturaleza de los fragmentos: Pizarras				Color:	
BwC	12- 20	Color en Seco 7.5YR5/4, Marrón	Textura Franco-arcillosa	Estructura Granular	Moderada fina	Reacción Ligeramente ácido	Compacidad Compacto
		Fragmentos rocosos: Abundantes	Raíces	Finas, medias y muy gruesas		Manchas: %	Humedad Seco
		Naturaleza de los fragmentos: Pizarras	Abundantes			Color:	
C	20- 60	Color en Fresco	Textura	Estructura		Reacción	Compacidad
		Fragmentos rocosos:	Raíces			Manchas: %	Humedad
		Naturaleza de los fragmentos: Pizarras	Abundantes	Finas, medias y muy gruesas		Color:	Fresco

**RESULTADOS ANALÍTICOS**

Hor.	Espesor	TFSA%	Arena %	AMF %	Limo%	Arcilla %	pH (H <sub>2</sub> O)	pH (ClK)	C.E. (dS/m)	MO%	CaCO <sub>3</sub> %	Dens. real	CRA Tot	CRADU	CRAM
A	12	71,1	31,4	2,06	39,9	28,7	6,2	5,2	0,13	4,84	0,14	2,51	27	20	38
BwC	8	44,9	22,8	1,39	42,9	34,3	6,1	4,4	0,08	1,48	0,17	2,69	10	15	14
Total:													37	26,0	52,0

Hor.	Ca ppm	Mg ppm	Na ppm	K ppm	CIC (meq/100g IT)	S (meq/100g)	V %
A	1.401,79	607,28	36,21	163,90	15,85	12,65	79,79
BwC	379,11	390,29	19,84	88,70	11,95	5,46	45,72

**Horizontes de diagnóstico:** A ócrico: horizonte delgado y sin condiciones de color para mólico, a pesar del buen contenido en materia orgánica.**Clasificación FAO (1999):** Regosol Endolepti-Epiesquelético

Suelo con horizonte ócrico como único de diagnóstico, y sin otras propiedades indicadoras de evolución, por lo que se le asigna el grupo Regosol; su escasa profundidad (roca dura a 60 cm), y su contenido en tierra fina por debajo del 60% le asignan las unidades Léptico y Epiesquelético.

**Clasificación Soil Taxonomy (1988):** Dystric Xerorthent

La inexistencia de un horizonte diagnóstico de profundidad clasifica el perfil como Entisol. Siendo el régimen de humedad Xérico (Xeric): Xerorthents. Aunque se encuentra cercano a las condiciones del subgrupo Lithic (roca a 60 cm), le correspondería el subgrupo Dystric si como es muy probable presenta insaturación en bases (&lt;60%) a partir de 25 cm.

**Clasificación forestal de los suelos españoles (Gandullo, 1994):** Suelo fersialítico pardo (xérico, lítico)

Se trata de un suelo de la Clase V, característica de climas templados cálidos con régimen hídrico no árido y con procesos de fersialitización. La presencia de un horizonte de profundidad poco diferenciado y la roca silicea lo clasifican como suelo fersialítico pardo. Se le añaden además los subgrupos xérico y lítico, por la elevada pedregosidad que presenta.

**Reseña:**

Suelo muy somero y pedregoso, con un contenido medio-bajo en bases en su horizonte de profundidad, pero con altos contenidos de Ca y Mg en superficie. El horizonte de superficie es además rico en materia orgánica. Las condiciones de exposición en ligera umbría, la vegetación clara de encina y actuaciones probables de fertilización antrópica podrían justificar estos dos últimos caracteres.

Presenta un segundo horizonte con menos del 50% de tierra fina, aunque se observa en él una incipiente acumulación-neoformación de arcilla. El tercer horizonte presenta menos del 20% de tierra fina que no se ha muestreado, pero que puede representar una ayuda para el suministro de agua y nutrientes a la vegetación, unido a las grietas que presente la roca pizarrosa. En cualquier caso sus condiciones hídricas son de muy baja capacidad.

Estas condiciones pueden ser en parte achacadas a la naturaleza de la roca madre, pizarrosa, de lenta meteorización, y por otro lado al manejo secular pastoral de estas lomas del Andévalo, que ha provocado la degradación de la vegetación y desprotección del suelo frente a la erosión.

## I.2. FORMACIÓN PQ

MUESTREO Acrisol Endolepti-Abrúptico (Endoesquelético, Crómico)

**Características macromorfológicas**

Coordenadas UTM: Litofacias: 1300 Pizarras, areniscas y cuarcitas  
 Hoja mapa: 959-III Término municipal: Alosno  
 m % Orientación: 360 N  
 Topografía local: Alta ladera  
 Longitud de ladera 10 m Buzamiento: Inverso %  
 cm Reacción perfil: Fuertemente ácido

**Vegetación**

Composición ppal: Quercíneas  
 Talla formación: Dehesa

Hzt	Prof (cm)	Descripción				
Ap	0- 18	Color en Seco 7.5YR6/6, Amarillo rojizo	Textura Franca	Estructura Granular	Reacción Fuertemente ácido	Compacidad Poco compacto
		Fragmentos rocosos: Frecuentes	Raíces	Moderada gruesa	Manchas: %	Humedad Seco
		Naturaleza de los fragmentos: Pizarras y cuarcitas	Abundantes	Finas (< 2mm)	Color:	
Bt	18- 40	Color en Seco 5YR6/6, Amarillo rojizo	Textura Arcillosa	Estructura Bloques subangulares	Reacción Muy fuertemente ácido	Compacidad Muy compacto
		Fragmentos rocosos: Frecuentes	Raíces	Moderada fina	Manchas: %	Humedad Seco
		Naturaleza de los fragmentos: Pizarras	Escasas	Finas, medias y gruesas	Color:	
C	40- 80	Color en Húmedo No muestreable	Textura Franco-arcillosa	Estructura No observable	Reacción Muy fuertemente ácido	Compacidad Muy compacto
		Fragmentos rocosos: Abundantes	Raíces		Manchas: %	Humedad Húmedo
		Naturaleza de los fragmentos: Pizarras	Escasas	Finas (< 2mm)	Color:	

**RESULTADOS ANALÍTICOS**

Hoz	Espeor	TFSa%	Arena %	AMF %	Limo%	Arcilla %	pH (H2O)	pH (CIK)	C.E. (dS/m)	MO%	CaCO3%	Dens. real	CRA Tot	CRADU	CRAM
Ap	18	75,5	34,4	5,45	42,9	22,6	5,2	3,9	0,12	2,77	0,00	2,68	52	35	58
Bt	22	76,9	22,7	1,89	34,3	43,1	4,9	3,6	0,10	0,62	0,00	2,69	74	40	83
C	40	35,0	27,3	2,8	43,9	28,9	5,0	3,6	0,11	0,33	0,00	2,70	44	18	50
Total:													170	99,0	191,0

Hoz	Ca ppm	Mg ppm	Na ppm	K ppm	CIK (meq/100gTF)	S (meq/100g)	Y %
Ap	245,29	158,89	19,82	112,60	8,50	2,93	34,41
Bt	30,71	155,20	19,80	62,50	5,22	1,69	32,41
C	10,60	221,58	30,04	49,90	4,66	2,16	46,37

Horizontes de diagnóstico: Ap ócrico: escaso espesor y color claro  
 Bt árgico: fuerte acumulación de arcillas

**Acrisol Endolepti-Abrúptico (Endoesquelético, Crómico)**

La baja capacidad de intercambio catiónico del horizonte árgico (<24 cmol/kg arcilla) y una saturación con bases menor del 50% en todo el perfil, clasifican al suelo dentro del grupo Acrisol. La presencia de roca dura entre 50 y 100 cm determina la unidad Endoléptico y el cambio textural brusco entre los dos primeros horizontes es característico de la unidad Abrúptico. Se le asigna además la unidad Endoesquelético por el alto contenido en gruesos entre 50 y 100 cm y Crómico por el tono rojizo del horizonte B.

**Clasificación Soil Taxonomy (1988): Ultic Haploxeralf**

El horizonte de profundidad tiene características de argílico y, aunque la saturación en bases es menor del 35%, no se considera que exista menos del 10% de minerales meteorizables en la fracción 20-200 micras, por lo que se clasifica el perfil en el orden de los Alfisols. Un régimen de humedad Xérico (Xeric) y la ausencia de características que lo encuadren en otra clasificación lo tipifican como Haploxeralf. La saturación en bases menor del 75% le asigna el subgrupo Ultic.

**Clasificación forestal de los suelos españoles (Gandullo, 1994): Suelo rojo fersialítico ácido (silíceo, xérico, lítico)**

Se trata de un suelo de la Clase V, característica de climas templados cálidos con régimen hídrico no árido y con procesos de fersialitización. La presencia de un horizonte de acumulación de arcilla y el pH por debajo de 6 lo clasifican como suelo rojo fersialítico ácido. El régimen de humedad le hace corresponder el subgrupo xérico, el contenido en gruesos superior al 50% a partir de los 50 cm, el lítico

**Reseña:**

Perfil de profundidad media-alta con una capacidad de retención de agua media. El factor más reseñable es su bajísima capacidad de intercambio catiónico y su fuerte acidez, especialmente en los horizontes de profundidad. En superficie presenta contenidos en nutrientes medios, probablemente por fertilización artificial y por el retorno de nutrientes de la vegetación.

MUESTREO 959-166 Cambisol Lepti-Epiesquelético (Crómico, Epidístrico)

**Características macromorfológicas**

Coordenadas UTM: X = 661.819

Litofacies: 1300 Pizarras, areniscas y cuarcitas

Y = 4.157.990

Hoja mapa: 959-III

Término municipal: Alosno

Altitud = 172 m Pendiente : 14 % Orientación: 189 S

Topografía general: Ondulado

Topografía local: Alta ladera

Microtopografía: Plano-cóncavo

Longitud de ladera 30 m Buzamiento: Inverso Pedregosidad: 3 % Afloramientos rocosos: 0 %

Profundidad útil: 50 cm Reacción perfil: Fuertemente ácido

**Vegetación**

Composición ppal: Quercíneas

Talla formación: Dehesa

Hzi	Prof (cm)	Descripción					
Ap	0 - 13	<b>Color en Seco</b> 7.5YR6/4, Marrón claro	<b>Textura</b> Franca	<b>Estructura</b> Granular	Moderada mediana	<b>Reacción</b> Medianamente ácido	<b>Compacidad</b> Compacto
		<b>Fragmentos rocosos:</b> Frecuentes		<b>Raíces</b>		<b>Manchas:</b> %	<b>Humedad</b>
		<b>Naturaleza de los fragmentos:</b> Pizarras		Abundantes	Finas (< 2mm)	<b>Color:</b>	Seco
BtC	13 - 50	<b>Color en Seco</b> 7.5YR6/6, Amarillo rojizo	<b>Textura</b> Franco-arcillosa	<b>Estructura</b> Granular	Débil fina	<b>Reacción</b> Fuertemente ácido	<b>Compacidad</b> No muestreable
		<b>Fragmentos rocosos:</b> Abundantes		<b>Raíces</b>		<b>Manchas:</b> %	<b>Humedad</b>
		<b>Naturaleza de los fragmentos:</b> Pizarras		Escasas	Finas, medias y gruesas	<b>Color:</b>	Seco

**RESULTADOS ANALÍTICOS**

Hor.	Espesor	TFSA%	Arena %	AMP %	Limo%	Arcilla %	pH (H2O)	pH (ClK)	C.E. (dS/m)	MO%	CaCO3%	Dens. real	CRA Tot	CRADU	CRAM
Ap	13	61,0	41,1	5,39	40,9	18,1	5,6	4,2	0,11	1,90	0,00	2,60	27	19	31
BtC	37	59,0	31,7	4,23	41,3	27,1	5,4	3,9	0,07	0,64	0,00	2,68	64	36	75
Total:													91	55,0	106,0

Hor.	Ca ppm	Mg ppm	Na ppm	K ppm	CIC (meq/100g TF)	S (meq/100g)	V. %
Ap	309,31	169,60	19,66	111,70	7,65	3,33	43,55
BtC	65,70	170,34	9,73	49,90	5,44	1,92	35,30

**Horizontes de diagnóstico:** Ap órico: escaso espesor y color no muy oscuro

BtC cámbico: estructura de suelo en más del 50% del volumen del horizonte e indicios de evolución. a la vista de la acumulación de arcilla. No es un árgico por el escaso espesor suprayacente pero sí un árgico.

**Clasificación FAO (1999):** Cambisol Lepti-Epiesquelético (Crómico, Epidístrico)

Suelo con horizonte cámbico que define el grupo Cambisol. La presencia de roca dura que limita la profundidad total señala la unidad Léptico y la abundancia de fragmentos rocosos la unidad Epiesquelético. Como unidades complementarias aparecen Crómico, por el color rojizo y Epidístrico por el escaso contenido en bases (menor del 50% de saturación entre 20 y 50 cm)

**Clasificación Soil Taxonomy (1988):** Lithic Haploxeralf

La presencia de un horizonte árgico y la saturación en bases por encima del 35% clasifican el perfil en el orden de los Alfisols. Un régimen de humedad Xérico (Xeric) y la ausencia de características que lo encuadren en otra clasificación lo tipifican como Haploxeralf.

El suborden Lithic se le aplica por la presencia de contacto lítico en los 50 cm superficiales.

**Clasificación forestal de los suelos españoles (Gandullo, 1994):** Suelo rojo fersialítico ácido (silíceo, xérico, lítico, subhúmico)

Se trata de un suelo de la Clase V, característica de climas templados cálidos con régimen hídrico no árido y con procesos de fersialitización. La presencia de un horizonte de acumulación de arcilla y el pH por debajo de 6 lo clasifican como suelo rojo fersialítico ácido. El régimen de humedad le hace corresponder el subgrupo xérico, la roca dura a 50 cm el lítico y el contenido en materia orgánica del horizonte superior por debajo de 2.5% el subhúmico.

**Reseña:**

Suelo de profundidad media, bastante pedregoso y de baja capacidad de retención de agua. Su contenido en bases es medio-bajo, observándose una cierta riqueza en potasio, quizás a causa de la aplicación artificial de fertilizantes. En algunos aspectos aparece algo más evolucionado que el que se encuentra al pie de la ladera, lo que resulta atípico. Una explicación podría ser el cambio que se aprecia en el tipo de roca, dentro de que ambas rocas son de aspecto pizarroso.

## Anejo I: Perfiles tipo

MUESTREO 959-165 Regosol Lepti-Epiesquelético (Dístrico)

### Características macromorfológicas

Coordenadas UTM: X = 661.801 Litofacies: 1300 Pizarras, areniscas y cuarcitas  
Y = 4.157.925 Hoja mapa: 959-III Término municipal: Alosno

Altitud = 165 m Pendiente: 13 % Orientación: 198 S-S

Topografía general: Ondulado Topografía local: Baja ladera Microtopografía: Cóncavo

Longitud de ladera 102 m Buzamiento: Oblicuo Pedregosidad: 10% Afloramientos rocosos: 0 %

Profundidad útil: 50 cm Reacción perfil: Fuertemente ácido

### Vegetación

Composición ppal: Quercíneas

Talla formación: Dehesa

Hzt	Prof (cm)	Descripción						
Ap	0 - 18	Color en Seco	Textura	Estructura	Reacción	Compacidad		
		10YR6/4, Marrón claro amarillento	Franca	Granular	Moderada mediana	Fuertemente ácido	Compacto	
		Fragmentos rocosos: Frecuentes	Raíces	Manchas: %	Humedad			
		Naturaleza de los fragmentos: Pizarras y cuarcitas	Muy abundante	Finas, medias y gruesas	Color:	Seco		
CBt	18 - 50	Color en	Textura	Estructura	Reacción	Compacidad		
		2.5Y5/3, Marrón oliva claro	Franco-arcillosa	No muestreable	Fuertemente ácido	No observable		
		Fragmentos rocosos: Abundantes	Raíces	Manchas: %	Humedad			
		Naturaleza de los fragmentos: Pizarras y cuarcitas	Escasas	Finas y medias	Color:			

### RESULTADOS ANALÍTICOS

Hor.	Espesor	TPSA%	Arena %	AMF %	Limo%	Arcilla %	pH (H <sub>2</sub> O)	pH (ClK)	C.E. (dS/m)	MO%	CaCO <sub>3</sub> %	Dens. real	CRA Tot	CRADU	CRAM
Ap	18	76,9	39,2	2,88	39,8	21,0	5,5	4,6	0,11	2,54	0,00	2,54	54	38	60
CBt	32	30,0	28,8	1,89	42,9	28,3	5,4	3,9	0,09	0,64	0,00	2,66	30	16	34
Total:													84	54,0	94,0

Hor.	Ca ppm	Mg ppm	Na ppm	K ppm	CIC (meq/100g TE)	S (meq/100g)	V %
Ap	482,28	193,94	30,06	130,90	9,27	4,49	48,46
CBt	57,11	326,49	19,77	37,50	6,82	3,19	46,73

Horizontes de diagnóstico: Ap ócrico: escaso espesor y color no muy oscuro

El horizonte de profundidad CBt tiene las cualidades de un argílico según Soil Taxonomy

**Clasificación FAO (1999):** Regosol Lepti-Epiesquelético (Dístrico)

Suelo con horizonte ócrico como único de diagnóstico, y sin otras propiedades indicadoras de evolución, por lo que se le asigna el grupo Regosol; su escasa profundidad y su contenido en tierra fina por debajo del 60% en el horizonte CBt le asignan las unidades Léptico y Epiesquelético. Se añade la unidad complementaria Dístrico por la saturación en bases inferior al 50%, al menos en una parte del perfil

**Clasificación Soil Taxonomy (1988):** Lithic Haploxeralf

La presencia de un horizonte argílico y la saturación en bases por encima del 35% clasifican el perfil en el orden de los Alfisols. Un régimen de humedad Xérico (Xeric) y la ausencia de características que lo encuadren en otra clasificación lo tipifican como Haploxeralf.

El suborden Lithic se le aplica por la presencia de contacto lítico en los 50 cm superficiales.

**Clasificación forestal de los suelos españoles (Gandullo, 1994):** Ranker de pendiente (xérico y lítico)

Se trata de un suelo somero sobre una pendiente media que no debería justificar su escasa profundidad salvo por intervenciones humanas combinadas con la resistencia de la roca a la meteorización. Los subgrupos indican respectivamente régimen hídrico xérico y presencia de un horizonte R o contenido en gruesos superior al 50%, a menos de 50 cm de profundidad.

### Reseña:

Perfil de profundidad intermedia aunque la elevada pedregosidad reduce notablemente el volumen de suelo prospectable por los sistemas radicales. Su capacidad de retención de agua es baja, por las mismas razones citadas. El contenido en bases es medio en el horizonte de superficie, gracias a los retornos de nutrientes de la vegetación herbácea y, probablemente, por la aplicación esporádica de fertilizantes para el pastizal (contenido en K medio-alto).

### 1.3. FORMACIÓN COMPLEJO VULCANO-SEDIMENTARIO

#### Sobre materiales ácidos

MUESTREO Regosol Lepti-Esquelético (Dístrico)

#### Características macromorfológicas

Coordenadas UTM: Litofacies: 400 Pizarras y tufitas violetas "pizarras moradas"

m Hoja mapa: 959-III Término municipal: Alosno

% Orientación: 148 S

Topografía local: Media ladera

Longitud de ladera 15 m Buzamiento: Inverso %

cm Reacción perfil: Muy fuertemente ácido

#### Vegetación

Composición ppal: Quercíneas

Talla formación:

Hzt	Prof (cm)	Descripción						
Ap	0 - 16	Color en Seco 10YR5/3, Marrón	Textura Franca	Estructura Granular	Débil	Reacción Muy fuertemente ácido	Compacidad Blando	
		Fragmentos rocosos: Abundantes		Raíces		Manchas: %	Humedad	
		Naturaleza de los fragmentos: Pizarras		Abundantes	Finas (< 2mm)	Color:	Seco	
CBt	16 - 33	Color en Seco No muestreable	Textura Franca	Estructura No observable		Reacción Fuertemente ácido	Compacidad Compacto	
		Fragmentos rocosos: Abundantes		Raíces		Manchas: %	Humedad	
		Naturaleza de los fragmentos: Pizarras		Escasas	Finas (< 2mm)	Color:	Seco	
CR	33 - 55	Color en No muestreable	Textura	Estructura No observable		Reacción	Compacidad No observable	
		Fragmentos rocosos:		Raíces		Manchas: %	Humedad	
		Naturaleza de los fragmentos:				Color:		

#### RESULTADOS ANALÍTICOS

Hor.	Espesor	TESA%	Arena %	AMF %	Limo%	Arcilla %	pH (H2O)	pH (CIK)	C.E. (dS/m)	MO%	CaCO3%	Dens. real	CRA Tot	CRADU	GRAM
Ap	16	58,2	37,0	4,15	45,4	17,6	4,8	3,7	0,12	2,63	0,00	2,68	27	21	35
CBt	17	29,0	30,8	2,61	42,3	26,9	5,3	3,5	0,06	0,47	0,00	2,71	13	11	17
Total:													40	29,0	52,0

Hor.	Ca ppm	Mg ppm	Na ppm	K ppm	ClC (meq/100gTF)	S (meq/100g)	V %
Ap	223,69	185,12	25,26	120,30	7,62	3,08	40,41
CBt	99,80	175,90	19,86	87,80	6,83	2,28	33,34

Horizontes de diagnóstico: Ap ócrico: escaso espesor y color no oscuro

CBt argílico (Soil Taxonomy): acumulación de arcilla que cumple condiciones de argílico de Soil Taxonomy, aunque no las de FAO, ya que no presenta estructura de suelo en más del 50% del volumen del horizonte.

Regosol Lepti-Esquelético (Dístrico)

Suelo con horizonte ócrico como único de diagnóstico y sin otras propiedades indicadoras de evolución, por lo que se le asigna el grupo Regosol; su escasa profundidad (roca dura a menos de 50 cm), y su contenido en tierra fina por debajo del 60% le asignan las unidades Léptico y Esquelético. Se añade la unidad complementaria Dístrico por presentar una saturación inferior al 50%.

**Clasificación Soil Taxonomy (1988):** Liltic Haploxeralf

La presencia de un horizonte argílico y el no cumplimiento claro de las condiciones minerales de los Ultisoles clasifican el perfil en el orden de los Alfisols. Un régimen de humedad Xérico (Xeric) y la ausencia de características que lo encuadren en otra clasificación lo tipifican como Haploxeralf.

El suborden Lithic se le aplica por la presencia de contacto lítico en los 50 cm superficiales.

**Clasificación forestal de los suelos españoles (Gandullo, 1994):** Suelo rojo fersialítico ácido (silíceo, xérico, lítico)

Se trata de un suelo de la Clase V, característica de climas templados cálidos con régimen hídrico no árido y con procesos de fersialitización. La presencia de un horizonte de acumulación de arcilla y el pH por debajo de 6 lo clasifican como suelo rojo fersialítico ácido. El régimen de humedad le hace corresponder el subgrupo xérico y el contenido en gruesos superior al 50% a partir de los 50 cm, el lítico

Reseña:

Perfil de profundidad media, muy pedregoso y con texturas francas, lo que resulta en una capacidad hídrica baja. Presenta además una reacción de cambio extremadamente ácida, algo atenuada en la medición de la solución externa del suelo; todo esto se corresponde con las condiciones bajas de saturación en bases, a pesar de que el contenido en bases intercambiables no es excesivamente bajo, probablemente a causa de fertilizaciones esporádicas.

## Anejo I: Perfiles tipo

MUESTREO 959-87 Luvisol Endoléptico

### Características macromorfológicas

Coordenadas UTM: X = 682.440 Litofacies: 500 Lavas, aglomerados, brechas, tobas y tufitas acidas

Y = 4.166.099 Hoja mapa: 959-II Término municipal: Calañas

Altitud = 200 m Pendiente: 10 % Orientación: 311 NW

Topografía general: Ondulado Topografía local: Alta ladera Microtopografía: Plano-cóncavo

Longitud de ladera 50 m Buzamiento: No existe Pedregosidad: 60% Afloramientos rocosos: 5 %

Profundidad útil: 66 cm Reacción perfil: Medianamente ácido

### Vegetación

Composición ppal: Quercíneas

Talla formación: Dehesa

Hzt	Prof (cm)	Descripción				
A	0 - 16	Color en Húmedo 10YR4/3, Marrón	Textura Franco-arenosa	Estructura Granular	Reacción Ligeramente ácido	Compacidad Blando
		Fragmentos rocosos: Frecuentes	Raíces	Moderada fina	Manchas: %	Humedad Húmedo
		Naturaleza de los fragmentos: Riolitas y cuarcitas	Muy abundante	Finas, medias y gruesas	Color:	Húmedo
Bt1	16 - 36	Color en Húmedo 10YR6/4, Marrón amarillento	Textura Franca	Estructura Bloques angulares	Reacción Medianamente ácido	Compacidad Compacto
		Fragmentos rocosos: Pocos	Raíces	Moderada fina	Manchas: %	Humedad Húmedo
		Naturaleza de los fragmentos: Riolitas y cuarcitas	Escasas	Finas, medias, gruesas y muy	Color:	Húmedo
Bt2	36 - 56	Color en Húmedo 10YR6/6, Amarillo parduzco	Textura Franca	Estructura Bloques angulares	Reacción Medianamente ácido	Compacidad Muy compacto
		Fragmentos rocosos: Pocos	Raíces	Fuerte mediana	Manchas: %	Humedad Húmedo
		Naturaleza de los fragmentos: Riolitas y cuarcitas	Escasas	Finas y medias	Color:	Húmedo

### RESULTADOS ANALÍTICOS

Hor.	Espesor	TFSa%	Arena %	AMF %	Limo%	Arcilla %	pH (H2O)	pH (CIC)	C.E. (dS/m)	MO%	CaCO3%	Dens. real	CRA Tot	CRADU	GRAM
A	16	71,6	51,6	3,19	46,4	2,0	6,2	4,9	0,07	1,33	0,06	2,60	24	18	27
Bt1	20	89,0	47,6	3,46	42,0	10,4	5,6	3,8	0,06	0,62	0,04	2,59	54	40	58
Bt2	20	73,8	41,7	6,236	43,6	14,7	5,7	3,8	0,06	0,05	0,06	2,64	36	35	40
Total:													114	81,0	125,0

Hor.	Ca ppm	Mg ppm	Na ppm	K ppm	CIC (meq/100g TE)	S (meq/100g)	V %
A	588,93	102,87	17,50	110,50	5,10	4,16	81,60
Bt1	260,37	180,44	17,57	61,00	4,71	3,04	64,56
Bt2	225,24	176,49	17,59	55,50	5,16	2,82	54,59

Horizontes de diagnóstico: A ócrico: horizonte delgado y con escaso contenido en M.O.

Bt1 no se considera árgico debido al escaso espesor del horizonte suprayacente, y a que no es patente el cambio textural abrupto en el límite con A, al presentar un límite difuso.

Bt2 árgico, ya que está enriquecido respecto de los dos horizontes superiores.

Clasificación FAO (1999): Luvisol Endoléptico

La presencia de horizonte árgico con un nivel de saturación en bases por encima del 50% clasifican el perfil dentro del grupo Luvisol. La roca dura que aparece a 56 cm de la superficie indica el grupo Endoléptico.

Clasificación Soil Taxonomy (1988): Ultic Haploxeralf

La presencia de un árgico y la saturación en bases mayor del 35% clasifica el perfil en el orden de los Alfisols. Un régimen de humedad Xérico (Xeric) y la ausencia de características que lo encuadren en otra clasificación lo tipifican como Haploxeralf. La saturación en bases del árgico menor del 75% le asigna el subgrupo Ultic.

Clasificación forestal de los suelos españoles (Gandullo, 1994): Suelo rojo fersialítico (silíceo, xérico, subhúmico)

Se trata de un suelo de la Clase V, característica de climas templados cálidos con régimen hídrico no árido y con procesos de fersialitización. La presencia de un horizonte de acumulación de arcilla y el pH superficial mayor de 6 lo clasifican como suelo rojo fersialítico. Se le añaden además los subgrupos silíceo, xérico y subhúmico.

### Reseña:

Suelo que texturalmente aparece equilibrado, con una CRA media, favorecida por la escasa pendiente y el elevado porcentaje de tierra fina que presenta, a pesar de su profundidad baja-media. Nutricionalmente se encuentra limitado, con contenidos bajos-medios en bases y reducido complejo de cambio, dada su escasez en arcilla. Al respecto también debe destacarse la extrema acidez de su reacción, especialmente el pH de cambio, que ofrece valores por debajo de 4 en la mayor parte del perfil a excepción del horizonte superficial, más orgánico.

La roca volcánica ácida tiene una influencia notable en la formación y características de este perfil.

MUESTREO 959-172 Lixisol Abrupti-Crómico

**Características macromorfológicas**

Coordenadas UTM: X = 666.412 Litofacies: 500 Lavas, aglomerados, brechas, tobas y tufitas acidas

Y = 4.156.398 Hoja mapa: 959-III Término municipal: Alosno

Altitud = 186 m Pendiente: 20 % Orientación: 158 S

Topografía general: Ondulado Topografía local: Media ladera Microtopografía: Plano-convexo

Longitud de ladera 80 m Buzamiento: Inverso Pedregosidad: 45% Afloramientos rocosos: 0 %

Profundidad útil: 110 cm Reacción perfil: Fuertemente ácido

**Vegetación**

Composición ppal: Quercíneas

Talla formación: Dehesa

Hzi	Prof (cm)	Descripción					
A	0- 14	Color en Seco 7.5YR6/4, Marrón claro	Textura Franca	Estructura Granular	Fuerte	Reacción Fuertemente ácido	Compacidad Compacto
		Fragmentos rocosos: Frecuentes	Raíces	Manchas: %	Humedad		
		Naturaleza de los fragmentos: Tobas o tufitas y cuar	Abundantes	Finas y medias	Color:	Seco	
Bt	14- 45	Color en Seco 5YR6/8, Amarillo rojizo	Textura Arcillosa	Estructura Bloques subangulares	Fuerte	Reacción Fuertemente ácido	Compacidad Compacto
		Fragmentos rocosos: Frecuentes	Raíces	Manchas: %	Humedad		
		Naturaleza de los fragmentos: Tobas o tufitas y cuar	Abundantes	Finas, medias y gruesas	Color:	Seco	
CB	45- 110	Color en Húmedo No muestreable	Textura Arcillo-limosa	Estructura Laminar	Moderada muy grue	Reacción Fuertemente ácido	Compacidad Compacto
		Fragmentos rocosos: Frecuentes	Raíces	Manchas: %	Humedad		
		Naturaleza de los fragmentos:	Escasas	Finas, medias, gruesas y muy	Color:	Húmedo	

**RESULTADOS ANALÍTICOS**

Hor.	Espesor	TFSA%	Arena %	AMF %	Limo%	Arcilla %	pH (H2O)	pH (ClK)	C.E. (dS/m)	MO%	CaCO3%	Dens. real	CRA Tot	CRADU	CRAM
A	14	64,3	50,8	5,22	33,0	16,3	5,5	4,0	0,07	1,66	0,00	2,69	28	21	33
Bt	31	70,5	21,1	1,75	31,8	47,2	5,1	3,5	0,07	0,68	0,00	2,56	74	32	92
CB	65	53,7	8,4	1,03	43,0	48,6	5,1	3,5	0,09	0,30	0,00	2,45	128	58	160
Total:													230	111,0	285,0

Hor.	Ca ppm	Mg ppm	Na ppm	K ppm	CIC (meg/100gTF)	S(meg/100g)	V %
A	237,12	147,19	9,74	62,40	5,89	2,62	44,405
Bt	37,10	568,54	19,76	49,90	9,88	5,14	52,03
CB	32,28	1.350,57	30,04	37,40	8,91	11,64	100

**Horizontes de diagnóstico:** A órico: horizonte no muy oscuro y de escaso espesor

Bt árgico: acumulación de arcilla con un cambio textural abrupto que le da el carácter árgico, a pesar de que el espesor suprayacente es menor de 18 cm.

**Clasificación FAO (1999):** Lixisol Abrupti-Crómico

Se trata de un perfil con horizontes de acumulación de arcilla, con una baja capacidad de intercambio catiónico en sus arcillas y saturación media-alta en bases, lo que le clasifica como grupo Lixisol. El salto textural abrupto le asigna la unidad Abruptico y la coloración rojiza la unidad Crómico.

**Clasificación Soil Taxonomy (1988):** Ultic Haploxeralf

La presencia de un argílico y la saturación en bases mayor del 35% en Bt clasifica el perfil en el orden de los Alfisols. Un régimen de humedad Xérico (Xeric) y la ausencia de características que lo encuadren en otra clasificación lo tipifican como Haploxeralf. La saturación en bases menor del 75% en el horizonte argílico, le asigna el subgrupo Ultic.

**Clasificación forestal de los suelos españoles (Gandullo, 1994):** Suelo rojo fersialítico ácido (silíceo, xérico, subhúmico)

Se trata de un suelo de la Clase V, característica de climas templados cálidos con régimen hídrico no árido y con procesos de fersialitización. La presencia de un horizonte de acumulación de arcilla y el pH por debajo de 6 lo clasifican como suelo rojo fersialítico ácido. El régimen de humedad le hace corresponder el subgrupo xérico y la escasez de materia orgánica superficial el subhúmico.

**Reseña:**

Perfil muy profundo, aunque a partir de los 50 cm se incrementa notablemente el contenido en gruesos. Su capacidad hídrica total es muy alta, a causa de la citada profundidad y de la textura arcillosa; esta última es causante de que la cantidad de agua que se estima como disponible sea relativamente menor, aunque se tipifica como alta. Nutritivamente el perfil se presenta con altos contenidos en Mg en profundidad, lo que resulta atípico en unas condiciones de reacción de cambio extremadamente ácida. El resto de bases intercambiables es escaso. Se considera que la abundancia de Mg debe venir dada por alguna peculiaridad litológica que convendrá investigar. Las condiciones de permeabilidad de estos suelos podrían producir movimientos en masa o fuerte erosión del horizonte de superficie, además de problemas de desarrollo para la vegetación.

## Anejo I: Perfiles tipo

MUESTREO 959-82 Cambisol Lepti-Crómico (Éutrico)

### Características macromorfológicas

Coordenadas UTM: X = 681.544 Litofacies: 1400 Brechas, aglomerados, lavas, tobas y tufitas acidas e intermedias (localmente basicas)  
Y = 4.165.640 Hoja mapa: 959-II Término municipal: Calañas

Altitud = 156 m Pendiente: 19 % Orientación: 270 W

Topografía general: Ondulado Topografía local: Alta ladera Microtopografía: Convexo

Longitud de ladera 66 m Buzamiento: Inverso Pedregosidad: 35% Afloramientos rocosos: 10 %

Profundidad útil: 60 cm Reacción perfil: Ligeramente ácido

### Vegetación

Composición ppal: Quercineas

Talla formación: Matorral medio 0,5 - 1,5 m

Hzi	Prof (cm)	Descripción					
A	0 - 15	Color en Húmedo	Textura	Estructura	Reacción	Compacidad	
		7.5YR4/4, Marrón	Franca	Granular	Débil fina	Ligeramente ácido	Poco compacto
		Fragmentos rocosos: Frecuentes	Raíces	Manchas: %	Humedad		
		Naturaleza de los fragmentos: Brechas	Muy abundante Finas, medias y gruesas	Color:	Humedo		
Bw/R	15 - 48	Color en Fresco	Textura	Estructura	Reacción	Compacidad	
		7.5YR4/6, Marrón fuerte	Franco-limosa	Granular	Débil fina	Ligeramente ácido	Poco compacto
		Fragmentos rocosos: Pocos	Raíces	Manchas: %	Humedad		
		Naturaleza de los fragmentos: Brechas	Abundantes Finas, medias, gruesas y muy	Color:	Fresco		

### RESULTADOS ANALÍTICOS

Hor.	Espesor	TFSA%	Arena %	AMP %	Limo%	Arcilla %	pH (H2O)	pH (CIC)	C.E. (dS/m)	MO%	CaCO3%	Dens. real	CRA Tot	CRADU	CRAM
A	15	74,8	48,8	3,42	39,9	11,4	6,5	4,1	0,09	0,52	0,08	2,53	28	21	33
Bw/R	33	54,3	36,7	2,99	51,8	11,6	6,2	4,4	0,11	1,14	0,08	2,41	43	45	54
Total:													71	54,0	87,0

Hor.	Ca ppm	Mg ppm	Na ppm	K ppm	CIC (meq/100g TP)	S (meq/100g)	V %
A	951,92	284,16	25,64	12,90	8,46	7,27	85,97
Bw/R	515,55	145,55	30,30	100,60	7,53	4,18	55,55

**Horizontes de diagnóstico:** Horizonte superficial de espesor inferior a 20 y escasamente orgánico: ócrico.

Horizonte de profundidad espeso y bien diferenciado de los materiales subyacentes, aunque presente discontinuidades por afloramientos rocosos: cámbico.

**Clasificación FAO (1999):** Cambisol Lepti-Crómico (Éutrico)

Se trata de un Cambisol, al presentar un horizonte cámbico. La presencia de roca dura continua indica la unidad Endoléptico. Su coloración rojiza le asigna la unidad Crómico. Unidad complementaria Éutrico por la saturación en bases superior al 50%.

**Clasificación Soil Taxonomy (1988):** Dystric Xerochrept

La presencia de un horizonte diagnóstico cámbico y una evolución media sitúa este perfil como Inceptisol. Con régimen de temperatura Térmico (Thermic), presencia de un ócrico y un régimen de humedad Xérico (Xeric), el perfil queda clasificado como Xerochrept; subgrupo Dystric por presentar saturación en bases algo menor del 60% entre 25 y 100 cm.

**Clasificación forestal de los suelos españoles (Gandullo, 1994):** Suelo fersialítico pardo (xérico, lítico, subhúmico)

Se trata de un suelo de la Clase V, característica de climas templados cálidos con régimen hídrico no árido y con procesos de fersialitización. La presencia de un horizonte de profundidad poco diferenciado y la roca silíceas lo clasifican como suelo fersialítico pardo. Se le añaden además los subgrupos xérico, lítico y subhúmico.

### Reseña:

Se trata de un suelo formado sobre tobas ácidas y quizás otros materiales piroclásticos muy antiguos, como brechas y aglomerados; la meteorización de estos materiales tiene como resultado un sustrato rico en arenas y limos, y pobre en arcillas, aunque éstas tienen CIC elevadas y contenidos medios en cationes de cambio.

Por su textura y profundidad media-baja las cualidades hídricas del perfil son bajas-medias.

Este suelo se encuentra dentro del transecto 4 haciendo pareja con el perfil 959-74; al localizarse cercano a la parte culminal de la ladera su carácter somero se acentúa, hasta convertirse en roca aflorante.

MUESTREO 959-157 Regosol Epilepti-Esquelético (Districo)

**Características macromorfológicas**

Coordenadas UTM: X = 666.368

Litofacies: 2000 Pizarras, tufitas y tobas

Y = 4.152.664

Hoja mapa: 959-III

Término municipal: Villanueva de los Castillejos

Altitud = 142 m Pendiente : 28 % Orientación: 230 SW

Topografía general: Ondulado

Topografía local: Alta ladera

Microtopografía: Plano-convexo

Longitud de ladera 22 m

Buzamiento: Inverso

Pedregosidad: 70%

Afloramientos rocosos: 0 %

Profundidad útil: 35 cm

Reacción perfil: Medianamente ácido

**Vegetación**

Composición ppal: Matorral

Talla formación: Matorral bajo 5 - 50 cm

Hzi	Prof (cm)	Descripción					
A	0 - 16	Color en Húmedo 7.5YR4/4, Marrón	Textura Franca	Estructura Granular	Reacción Moderada mediana	Compacidad Poco compacto	
		Fragmentos rocosos: Abundantes		Raíces	Manchas: %	Humedad	
		Naturaleza de los fragmentos: Cuarzitas		Muy abundante Finas, medias y gruesas	Color:	Húmedo	
CBt	16 - 32	Color en Húmedo 7.5YR5/6, Marrón fuerte	Textura Franca	Estructura Granular	Reacción Moderada fina	Compacidad Compacto	
		Fragmentos rocosos: Abundantes		Raíces	Manchas: %	Humedad	
		Naturaleza de los fragmentos: Pizarras		Abundantes Finas y medias	Color:	Húmedo	
R/C	32 -	Color en No muestreable	Textura	Estructura	Reacción	Compacidad	
		Fragmentos rocosos:		Raíces	Manchas: %	Humedad	
		Naturaleza de los fragmentos:			Color:		

**RESULTADOS ANALÍTICOS**

Hor.	Espesor	TFSA%	Arena %	AMF %	Limo%	Arcilla %	pH (H <sub>2</sub> O)	pH (ClK)	C.E. (dS/m)	MO%	CaCO <sub>3</sub> %	Dens. real	CRA Tot	CRADU	CRAM
A	16	52,9	46,0	9,67	34,0	20,0	6,1	5,0	0,18	3,08	0,00	2,67	22	16	30
CBt	16	45,0	44,0	4,64	31,2	24,8	5,6	4,1	0,17	0,68	0,00	2,74	15	12	21
Total:													37	26,0	51,0

Hor.	Ca ppm	Mg ppm	Na ppm	K ppm	CIC (meq/100gTF)	S (meq/100g)	V %
A	361,09	182,56	9,97	136,50	8,48	3,72	43,88
CBt	57,29	42,75	0,00	87,50	3,56	0,87	24,33

**Horizontes de diagnóstico:** A ócrico: escaso espesor y condiciones de color no fuertemente oscuro**Clasificación FAO (1999):** Regosol Epilepti-Esquelético (Districo)

Suelo con horizonte ócrico como único de diagnóstico, y sin otras propiedades indicadoras de evolución, por lo que se le asigna el grupo Regosol; su escasa profundidad (roca dura a menos 50 cm), y su contenido en tierra fina por debajo del 60% le asignan las unidades Léptico y Esquelético. La saturación en bases menor del 50% en todo el perfil indica la unidad complementaria Districo.

**Clasificación Soil Taxonomy (1988):** Lithic Haploxeralf

La presencia de un horizonte argílico y el no cumplimiento de las condiciones minerales de los Ultisoles clasifican el perfil en el orden de los Alfisols. Un régimen de humedad Xérico (Xeric) y la ausencia de características que lo encuadren en otra clasificación lo tipifican como Haploxeralf. El suborden Lithic se le aplica por la presencia de contacto lítico en los 50 cm superficiales.

**Clasificación forestal de los suelos españoles (Gandullo, 1994):** Ranker de pendiente (xérico, lítico)

Se trata de un suelo sobre pendiente fuerte con probables intervenciones humanas negativas combinadas con la resistencia de la roca a la meteorización, que le han conferido su carácter somero. Los subgrupos indican respectivamente régimen hídrico xérico y la presencia superficial de roca firme.

**Reseña:**

Suelo somero y de condiciones hídricas fuertemente limitantes. Los contenidos en bases son medios-bajos en el horizonte superior y muy bajos en el inferior.

## Anejo I: Perfiles tipo

MUESTREO 959-154 Alisol Hiperdistri-Crómico

### Características macromorfológicas

Coordenadas UTM: X = 664.537 Litofacies: 2000 Pizarras, tufitas y tobas  
Y = 4.159.876 Hoja mapa: 959-III Término municipal: Alosno

Altitud = 195 m Pendiente: 13 % Orientación: 237 SW-

Topografía general: Ondulado Topografía local: Media ladera Microtopografía: Plano-cóncavo

Longitud de ladera 70 m Buzamiento: Oblicuo Pedregosidad: 70% Afloramientos rocosos: 0 %

Profundidad útil: 60 cm Reacción perfil: Fuertemente ácido

### Vegetación

Composición ppal: Matorral degradado

Talla formación: Matorral bajo con herbáceas

Hzf	Prof (cm)	Descripción					
A	0- 14	Color en Seco 7.5YR5/6, Marrón fuerte	Textura Franco-limosa	Estructura Bloques subangulares	Moderada fina	Reacción Medianamente ácido	Compacidad Poco compacto
		Fragmentos rocosos: Frecuentes	Raíces	Manchas: %	Humedad		
		Naturaleza de los fragmentos: Cuarzitas, pizarras y	Abundantes	Finas, medias y gruesas	Color:	Seco	
Bt1	14 - 34	Color en Húmedo 5YR5/8, Rojo amarillento	Textura Franco-arcillo-limosa	Estructura Bloques angulares	Fuerte fina	Reacción Muy fuertemente ácido	Compacidad Compacto
		Fragmentos rocosos: Frecuentes	Raíces	Manchas: %	Humedad		
		Naturaleza de los fragmentos: Cuarzitas, pizarras y	Abundantes	Finas, medias y gruesas	Color:	Húmedo	
Bt2	34 - 44	Color en Húmedo 7.5YR5/8, Marrón fuerte	Textura Franco-arcillo-limosa	Estructura Bloques angulares	Fuerte mediana	Reacción Fuertemente ácido	Compacidad Muy compacto
		Fragmentos rocosos: Frecuentes	Raíces	Manchas: %	Humedad		
		Naturaleza de los fragmentos: Pizarras	Escasas	Finas y medias	Color:	Húmedo	
C	44 - 60	Color en No muestreable	Textura	Estructura	Reacción	Compacidad	
		Fragmentos rocosos:	Raíces	Manchas: %	Humedad		
		Naturaleza de los fragmentos:	Color:				

### RESULTADOS ANALÍTICOS

Hor.	Espesor	TFSA%	Arena %	AMF %	Limo%	Arcilla %	pH (H2O)	pH (ClK)	C.E. (dS/m)	MO%	CaCO3%	Dens. real	CRA Tot	CRADU	CRAM
A	14	81,9	20,7	2,3	52,9	26,4	5,6	4,1	0,22	2,01	0,00	2,81	49	34	55
Bt1	20	82,1	12,9	1,41	52,4	34,7	4,9	3,5	0,20	0,90	0,00	2,69	60	33	69
Bt2	10	83,0	7,5	2	54,9	37,7	5,1	3,4	0,21	0,55	0,00	2,74	32	23	36
Total:													141	83,0	160,0

Hor.	Ca ppm	Mg ppm	Na ppm	K ppm	ClC (meq/100g.F)	S(meq/100g)	V. %
A	246,15	229,60	20,25	62,20	8,99	3,39	37,72
Bt1	36,45	182,74	20,24	37,30	13,70	1,89	13,79
Bt2	22,00	448,80	41,85	25,00	17,27	4,10	23,72

Horizontes de diagnóstico: A órico: horizonte de escaso espesor

Bt2 árgico: horizonte enriquecido en arcilla con el suficiente espesor de materiales suprayacentes

### Clasificación FAO (1999): Alisol Hiperdistri-Crómico

La presencia del horizonte árgico y las propiedades álicas (pHKCl<4) clasifican este suelo dentro del grupo principal Alisoles. La fuerte desaturación de todo el perfil indica la unidad Hiperdistri y el color rojizo del horizonte árgico asigna la unidad Crómico.

### Clasificación Soil Taxonomy (1988): Ultic Haploxeral

El horizonte de profundidad tiene características de argílico y, aunque la saturación en bases es menor del 35%, no se considera que exista menos del 10% de minerales meteorizables en la fracción 20-200 micras, por lo que se clasifica el perfil en el orden de los Alfisols. Un régimen de humedad Xérico (Xeric) y la ausencia de características que lo encuadren en otra clasificación lo tipifican como Haploxeraf. La saturación en bases menor del 75% le asigna el subgrupo Ultic.

### Clasificación forestal de los suelos españoles (Gandullo, 1994): Suelo rojo fersialítico ácido (silíceo, xérico, lítico, subhúmico)

Se trata de un suelo de la Clase V, característica de climas templados cálidos con régimen hídrico no árido y con procesos de fersialitización. La presencia de un horizonte de acumulación de arcilla y el pH por debajo de 6 lo clasifican como suelo rojo fersialítico ácido. El régimen de humedad le hace corresponder el subgrupo xérico, la roca disgregada (más del 50% de gruesos) a 44 cm el lítico y el contenido en materia orgánica del horizonte superior por debajo de 2,5% el subhúmico.

### Reseña:

Suelo de profundidad media que también presenta unas condiciones medias de capacidad de retención de agua, aunque el alto contenido en arcilla de los horizontes de profundidad limita notablemente el agua disponible que se reduce aproximadamente a la mitad. Los contenidos en bases son muy bajos en todos los horizontes y los enriquecidos en arcilla presentan reacción muy fuertemente ácida y fuertemente ácida respectivamente, debiéndose destacar los pHs de cambio de 3,5 y 3,4. Todo ello indica unas condiciones nutritivas limitantes, aunque la capacidad de intercambio catiónico de las arcillas es intermedia, por lo que estos suelos podrían experimentar mejoras notables con una fertilización racional.

**Sobre materiales básicos:**MUESTREO **Regosol Endolepti-Epiesquelético (Hiperéutrico)****Características macromorfológicas**

Coordenadas UTM: Litofacias: 1800 Gabro - diabasas  
 Hoja mapa: 959-III Término municipal: Alosno  
 m % Orientación: 236 SW  
 Topografía local: Media ladera  
 Longitud de ladera 30 m Buzamiento: Inverso %  
 cm Reacción perfil: Neutro %

**Vegetación**

Composición ppal: Quercíneas

Talla formación: Dehesa

Hzi	Prof (cm)	Descripción					
A	0 - 19	Color en Seco 7.5YR6/4, Marrón claro	Textura Franca	Estructura Granular	Reacción Moderada mediana Neutro	Compacidad Compacto	
		Fragmentos rocosos: Frecuentes	Raíces	Manchas: %	Humedad		
		Naturaleza de los fragmentos: Tufitas	Muy abundante	Finas y medias	Color:	Seco	
Bt1C	19 - 32	Color en Seco 7.5YR6/4, Marrón claro	Textura Franco-arcillosa	Estructura Bloques subangulares	Reacción Moderada muy fina Neutro	Compacidad Muy compacto	
		Fragmentos rocosos: Abundantes	Raíces	Manchas: %	Humedad		
		Naturaleza de los fragmentos: Cuarzitas, tufitas	Escasas	Finas y medias	Color:	Seco	
Bt2C	32 - 75	Color en No muestreable	Textura Franco-arcillosa	Estructura No observable	Reacción Neutro	Compacidad No observable	
		Fragmentos rocosos: Abundantes	Raíces	Manchas: %	Humedad		
		Naturaleza de los fragmentos:	Escasas	Finas, medias y gruesas	Color:		

**RESULTADOS ANALÍTICOS**

Hor.	Espesor	TFS%	Arena %	AMF %	Limo%	Arcilla %	pH (H <sub>2</sub> O)	pH (ClK)	C.E. (dS/m)	MO%	CaCO <sub>3</sub> %	Dens. real	CRA Tot	CRADU	CRAM
A	19	74,6	45,4	5,35	36,1	18,5	6,6	5,5	0,22	2,53	0,00	2,70	52	37	58
Bt1C	13	38,4	42,8	7,62	28,9	28,3	6,9	4,8	0,23	0,55	0,00	2,57	13	7	15
Bt2C	43	39,4	41,0	2,4	21,7	37,3	7,0	5,0	0,23	0,57	0,00	2,55	48	18	57
Total:													113	65,0	130,0

Hor.	Ca ppm	Mg ppm	Na ppm	K ppm	ClC (meq/100gTF)	S (meq/100g)	V %
A	991,06	432,92	29,90	136,50	11,13	9,04	81,249
Bt1C	2.292,11	1.832,04	63,24	12,60	25,93	27,04	100
Bt2C	2.236,20	2.767,53	92,36	12,60	32,52	34,68	100

**Horizontes de diagnóstico:** A ócrico: escaso espesor y color no muy oscuro  
 CBt1 y CBt2 son horizontes argílicos según Soil Taxonomy

**Regosol Endolepti-Epiesquelético (Hiperéutrico)**

Suelo con horizonte ócrico como único de diagnóstico puesto que los horizontes de profundidad son excesivamente pedregosos a pesar de presentar acumulación o formación de arcillas; se le asigna el grupo Regosol. La presencia de roca dura a menos de 100 cm y su contenido en tierra fina por debajo del 60% le asignan las unidades Endoleptico y Epiesquelético. Se añade la unidad complementaria Hiperéutrico, indicadora de la elevada saturación en bases.

**Clasificación Soil Taxonomy (1988):** Typic Haploxeralf

La presencia de un argílico y el nivel de saturación en bases por encima del 35% en la mayor parte del horizonte clasifica el perfil en el orden de los Alfisols. Un régimen de humedad Xérico (Xeric) y la saturación en bases por encima del 75% lo tipifican como Typic Haploxeralf.

**Clasificación forestal de los suelos españoles (Gandullo, 1994):** Suelo rojo fersialítico (silíceo, xérico)

Se trata de un suelo de la Clase V, característica de climas templados cálidos con régimen xérico y con procesos de fersialitización. La presencia de un horizonte de profundidad con acumulación de arcillas y un pH superficial mayor de 6 lo clasifican como suelo rojo fersialítico. Se le añaden además los subgrupos silíceo, xérico y lítico, este último por el contenido en gruesos superior al 50% antes de los 50 cm de profundidad.

**Reseña:**

Perfil de profundidad media-alta y cualidades hídricas entre medias y bajas. La pérdida de capacidad hídrica se ve causada por la abundante pedregosidad que aparece en los horizontes de profundidad y por el carácter arcilloso de la tierra fina que limita la disponibilidad del agua retenida. El contenido en bases es alto y se aprecia una excesiva abundancia de magnesio que puede resultar limitante para especies forestales poco tolerantes de este elemento.

## Anejo I: Perfiles tipo

MUESTREO 959-164 Luvisol Crómico

### Características macromorfológicas

Coordenadas UTM: X = 663.929 Litofacies: 1800 Gabro - diabasas  
Y = 4.156.816 Hoja mapa: 959-III Término municipal: Alosno

Altitud = 145 m Pendiente: 11 % Orientación: 235 SW  
Topografía general: Ondulado Topografía local: Baja ladera Microtopografía: Plano  
Longitud de ladera 86 m Buzamiento: No existe Pedregosidad: 30% Afloramientos rocosos: 0 %  
Profundidad útil: 100 cm Reacción perfil: Neutro

### Vegetación

Composición ppal: Quercíneas

Talla formación: Dehesa

Hzt	Prof (cm)	Descripción					
Ap	0 - 15	Color en Seco 7.5YR5/6, Marrón fuerte	Textura Franca	Estructura Granular	Fuerte gruesa	Reacción Neutro	Compacidad Poco compacto
		Fragmentos rocosos: Frecuentes		Raíces		Manchas: %	Humedad
		Naturaleza de los fragmentos: Lavas y cuarcitas		Abundantes	Finas (<2mm)	Color:	Seco
Bt1	15 - 24	Color en Seco 5YR4/6, Rojo amarillento	Textura Franco-arcillosa	Estructura Granular	Fuerte mediana	Reacción Neutro	Compacidad Compacto
		Fragmentos rocosos: Frecuentes		Raíces		Manchas: %	Humedad
		Naturaleza de los fragmentos: Lavas y cuarcitas		Escasas	Finas, medias y gruesas	Color:	Seco
Bt2	24 - 65	Color en Seco 7.5YR4/6, Marrón fuerte	Textura Franco-arcillosa	Estructura Bloques subangulares	Fuerte fina	Reacción Medianamente básico	Compacidad Muy compacto
		Fragmentos rocosos: Frecuentes		Raíces		Manchas: 40 %	Humedad
		Naturaleza de los fragmentos: Lavas		Escasas	Finas, medias, gruesas y muy	Color: 10YR6/6, Amarillo parduzco	Seco
CBt	65 - 100	Color en Seco 7.5YR4/6, Marrón fuerte	Textura Franca	Estructura Bloques subangulares	Fuerte fina	Reacción Medianamente básico	Compacidad Muy compacto
		Fragmentos rocosos: Frecuentes		Raíces		Manchas: 45 %	Humedad
		Naturaleza de los fragmentos: Lavas		Ausencia		Color: 10YR6/6, Amarillo parduzco	Seco

### RESULTADOS ANALÍTICOS

Hor.	Espesor	TESA%	Arena %	AMF %	Limo%	Arcilla %	pH (H <sub>2</sub> O)	pH (ClO)	C.E. (dS/m)	MO%	CaCO <sub>3</sub> %	Dens. real	CRA Tot	CRADU	CRAM
Ap	15	76,8	42,4	7,67	40,0	17,6	6,6	5,0	0,19	1,92	0,00	2,58	38	26	42
Bt1	9	81,0	36,0	8,83	33,7	30,2	7,2	4,8	0,08	0,91	0,00	2,54	22	11	25
Bt2	41	84,7	34,6	2,8	29,9	35,5	7,4	4,9	0,08	0,57	0,00	2,45	108	49	122
CBt	35	65,2	43,0	4,39	31,5	25,5	7,7	5,1	0,08	0,26	0,00	2,49	60	31	68
Total:													228	117,0	257,0

Hor.	Ca ppm	Mg ppm	Na ppm	K ppm	CIC (meq/100g TF)	S (meq/100g)	V %
Ap	2.821,70	1.587,64	30,00	37,30	25,79	27,57	100
Bt1	3.371,59	2.382,37	46,12	12,50	34,95	36,94	100
Bt2	3.971,08	2.973,90	51,79	12,50	41,88	44,90	100
CBt	4.946,98	4.063,24	80,07	6,20	47,18	58,96	100

**Horizontes de diagnóstico:** A ócrico: escaso espesor y chroma por encima de 3,5  
Bt2 árgico: enriquecimiento en arcilla

### Clasificación FAO (1999): Luvisol Crómico

Grupo Luvisol, horizonte árgico sin propiedades álicas. Unidad Crómico, por su coloración rojiza que indica, previsiblemente, un enriquecimiento en óxidos de hierro. Se clasifica como Luvisol Crómico sin otras características especiales.

### Clasificación Soil Taxonomy (1988): Mollic Haploxeralf

Suelo con horizonte árgico y bajo porcentaje de saturación en bases pero que no cumple todas las condiciones típicas de Ultisol (menos del 10% de minerales meteorizables en la fracción de 20 a 200 micras), por lo que se clasifica como un Haploxeralf. El subgrupo Mollic viene establecido por el color oscuro y el contenido en materia orgánica superior a 1,2%.

### Clasificación forestal de los suelos españoles (Gandullo, 1994): Suelo rojo fersialítico (silíceo, xérico, subhúmico)

Se trata de un suelo de la Clase V, característica de climas templados cálidos con régimen xérico y con procesos de fersialitización. La presencia de un horizonte de profundidad con acumulación de arcillas y un pH superficial mayor de 6 lo clasifican como suelo rojo fersialítico. Se le añaden además los subgrupos silíceo, xérico y subhúmico, este último por el contenido en materia orgánica inferior al 2,5% en el horizonte de superficie.

### Reseña:

Perfil profundo, superando ampliamente la media de profundidad en gabro-diabasas y con una capacidad de retención de agua de alta a muy alta. El alto contenido en arcillas limita la disponibilidad real de agua que puede considerarse como alta en cualquier caso. Las arcillas presentan también un cierto carácter expansivo evidenciado por los altos coeficientes de extensión lineal medidos, si bien sólo se han apreciado estrechas grietas en los horizontes Bt, por lo que no puede asignarse al perfil un carácter vértico. El fuerte endurecimiento de estas arcillas con el perfil seco sí puede dificultar el desarrollo de los sistemas radicales, que están ausentes en el horizonte más profundo. Nutricionalmente se trata de un suelo muy rico en bases, principalmente Mg y Ca, aunque es muy pobre en potasio. Estas condiciones químicas pueden resultar limitantes para algunas especies sensibles estos cationes, como en el caso del alcornoque. Es llamativa en este suelo la elevada capacidad de intercambio catiónico que presenta su complejo de cambio, aún con porcentajes bajos de materia orgánica.

MUESTREO 959-159 Cambisol Endoesqueleti-Crómico (Hiperéutrico)

**Características macromorfológicas**

Coordenadas UTM: X = 672.864

Litofacias: 1700 Lavas y tobas basicas espiliticas

Y = 4.166.910

Hoja mapa: 959-I

Término municipal: Villanueva de las Cruces

Altitud = 178 m Pendiente : 29 % Orientación: 128 SE

Topografía general: Colinado

Topografía local: Media ladera

Microtopografía: Plano-convexo

Longitud de ladera 85 m Buzamiento: No existe Pedregosidad: 50% Afloramientos rocosos: 10 %

Profundidad útil: 85 cm Reacción perfil: Neutro

**Vegetación**

Composición ppal: Quercíneas

Talla formación: Dehesa

Hzt	Prof (cm)	Descripción				
A	0 - 16	Color en Seco 7.5YR4/6, Marrón fuerte	Textura Franca	Estructura Granular	Reacción Moderada mediana	Compacidad Compacto
		Fragmentos rocosos: Frecuentes		Raíces	Manchas: %	Humedad
		Naturaleza de los fragmentos: Lavas o tobas volcán	Muy abundante	Finas y medias	Color:	Seco
Bt	16 - 42	Color en Húmedo 5YR4/6, Rojo amarillento	Textura Franco-arcillosa	Estructura Bloques subangulares	Reacción Fuerte mediana	Compacidad Compacto
		Fragmentos rocosos: Pocos		Raíces	Manchas: %	Humedad
		Naturaleza de los fragmentos: Lavas o tobas volcán	Abundantes	Finas, medias y gruesas	Color:	Húmedo
CBt	42 - 75	Color en Húmedo 7.5YR5/6, Marrón fuerte	Textura Franco-arcillo-arenosa	Estructura Laminar	Reacción Fuerte muy grue	Compacidad Medianamente básico
		Fragmentos rocosos: Frecuentes		Raíces	Manchas: %	Humedad
		Naturaleza de los fragmentos: Lavas o tobas volcán	Escasas	Finas y medias	Color:	Húmedo

**RESULTADOS ANALÍTICOS**

Hor.	Espesor	TFSa%	Arena %	AMF %	Limo%	Arcilla %	pH (H2O)	pH (ClK)	C.E. (dS/m)	MO%	CaCO3%	Dens. real	CRA/Tot	CRADU	CRAM
A	16	76,3	43,4	11,72	34,3	22,3	7,1	5,0	0,19	1,69	0,00	2,57	29	20	40
Bt	26	90,9	33,3	19,11	29,2	37,5	6,9	4,9	0,22	1,22	0,00	2,50	70	42	96
CBt	33	49,0	52,3	3,8	20,9	26,8	7,5	4,7	0,20	0,25	0,00	2,50	31	23	44
Total:													130	80,0	180,0

Hor.	Ca ppm	Mg ppm	Na ppm	K ppm	CIC (meq/100gTF)	S (mg/100g)	V %
A	2.467,32	1.318,17	30,05	37,40	22,42	23,55	100
Bt	3.253,67	2.440,92	40,64	24,90	37,35	36,85	98,664
CBt	6.682,20	4.051,17	62,17	12,40	56,32	67,47	100

**Horizontes de diagnóstico:** A ócrico: escaso espesor y color no muy oscuro

Bt cámbico: horizonte de acumulación de arcilla sin el suficiente espesor suprayacente para ser considerado árgico

**Clasificación FAO (1999):** Cambisol Endoesqueleti-Crómico (Hiperéutrico)

Suelo con horizonte cámbico, por lo que le corresponde el grupo Cambisol.

El contenido en gruesos en el horizonte más profundo indica la unidad Endoesquelético. El color pardo-rojizo que toma en profundidad le asigna la unidad Crómico. El nivel de saturación en bases superior al 80% en todos los horizontes de profundidad indica la unidad Hiperéutrico

**Clasificación Soil Taxonomy (1988):** Typic Haploxeralf

La presencia de un argílico y el nivel de saturación en bases por encima del 75% en la mayor parte del horizonte clasifica el perfil en el orden de los Alfisols. Un régimen de humedad Xérico (Xeric) y la ausencia de características que lo encuadren en otra clasificación lo tipifican como Typic Haploxeralf.

**Clasificación forestal de los suelos españoles (Gandullo, 1994):** Suelo rojo fersialítico (silíceo, xérico, subhúmico)

Se trata de un suelo de la Clase V, característica de climas templados cálidos con régimen xérico y con procesos de fersialitización. La presencia de un horizonte de profundidad con acumulación de arcillas y un pH superficial mayor de 6 lo clasifican como suelo rojo fersialítico. Se le añaden además los subgrupos silíceo, xérico y subhúmico, este último por la escasez de materia orgánica en superficie.

**Reseña:**

Perfil profundo y con una capacidad hídrica media. La influencia de la roca volcánica básica se deja ver en la abundancia de bases, en especial Ca y Mg, mientras que el contenido en K resulta escaso. Se trata de un suelo de excelentes características que puede presentar algunos problemas de drenaje, lo que justificaría en parte el escaso espesor del epipedión por la acción de la erosión hídrica.

## I.4. MATERIALES TERCIARIOS Y CUATERNARIO

MUESTREO Acrisol Plinti-Abrúptico (Hiperdístico, Crómico)

Características macromorfológicas

Coordenadas UTM: Litofacies: 3150 Conglomerados, gravas y arenas con ostras y calizas bioclasticas arenosas  
 Hoja mapa: 981-I Término municipal: Gibraltón  
 m % Orientación: 280 W  
 Topografía local: Alta ladera  
 Longitud de ladera 25 m Buzamiento: No observado %  
 cm Reacción perfil: Fuertemente ácido

Vegetación

Composición ppal: Pinar

Talla formación: Arbórea (bosque) &gt;7m

Hat	Prof (cm)	Descripción					
A	0 - 18	Color en Seco SYR6/2, Gris rosado	Textura Franco-arenosa	Estructura Granular	Moderada mediana	Reacción Ligeramente ácido	Compacidad Blando
		Fragmentos rocosos: Abundantes	Raíces	Manchas: %	Humedad		
		Naturaleza de los fragmentos: Cuarzitas	Muy abundante	Finas, medias, gruesas y muy	Color:	Seco	
Bt	18 - 44	Color en Seco SYR6/6, Amarillo rojizo	Textura Franco-arenosa	Estructura Granular	Débil muy fina	Reacción Fuertemente ácido	Compacidad Muy compacto
		Fragmentos rocosos: Frecuentes	Raíces	Manchas: %	Humedad		
		Naturaleza de los fragmentos: Cuarzitas	Escasas	Finas, medias y gruesas	Color:	Seco	
CBt	44 - 95	Color en Seco 10R4/8, Rojo	Textura Franco-arcillo-arenosa	Estructura Bloques subangulares	Débil muy fina	Reacción Fuertemente ácido	Compacidad Muy compacto
		Fragmentos rocosos: Frecuentes	Raíces	Manchas: 30 %	Humedad		
		Naturaleza de los fragmentos: Cuarzitas y pizarras	Escasas	Finas y gruesas	Color: 10YR7/8, Amarillo	Seco	

## RESULTADOS ANALÍTICOS

Hor.	Espesor	TfSA%	Arena %	AMP %	Limo%	Arcilla %	pH (H <sub>2</sub> O)	pH (ClK)	C.E. (dS/m)	MO%	CaCO <sub>3</sub> %	Dens. real	CRA Tot	CRADU	GRAM
A	18	49,2	68,3	9,36	25,5	6,2	6,1	5,2	0,08	1,74	0,00	2,60	18	13	21
Bt	26	72,6	60,1	6,78	21,7	18,3	5,3	4,2	0,06	0,51	0,00	2,62	58	40	64
CBt	51	69,0	47,7	4,17	19,1	33,2	5,2	4,1	0,07	0,26	0,00	2,55	93	35	105
Total:													169	92,0	190,0

Hor.	Ca ppm	Mg ppm	Na ppm	K ppm	CIC (meq/100g TF)	S (meq/100g)	V %
A	287,31	57,42	10,39	55,40	3,70	2,10	56,857
Bt	29,00	23,71	10,40	38,80	2,89	0,49	16,828
CBt	27,63	91,03	10,41	33,30	6,21	1,03	16,546

Horizontes de diagnóstico: A órico: color no suficientemente oscuro y escaso espesor  
 Bt árgico: acumulación de arcillas con cambio textural abrupto  
 CBt plintico: acumulación de arcillas con fuerte segregación de hierro

## Acrisol Plinti-Abrúptico (Hiperdístico, Crómico)

Acrisol por el horizonte árgico con una CIC de las arcillas menor de 24 cmol+/kg y saturación en bases menor del 50%. La unidad Plintico indica la presencia de un horizonte de ese tipo y la Abrúptico el salto textural entre los horizontes. La fuerte insaturación y la coloración roja asignan las unidades complementarias Hiperdístico y Crómico.

Clasificación Soil Taxonomy (1988): Ultic Haploxeralf

Siendo el régimen de temperatura del suelo Térmico (Thermic), con la presencia de un horizonte árgico en el que se estima que no se cumplen las condiciones minerales de un Ultisol (a pesar de que V<35%), se opta por clasificarlo como Alfisol.

Al ser el régimen de humedad Xérico (Xeric) y presentar en el horizonte argílico un grado de saturación bajo (<75%), el perfil se clasifica como un Ultic Haploxeralf.

Clasificación forestal de los suelos españoles (Gandullo, 1994): Suelo rojo fersialítico (silíceo, xérico, hidromórfico, subhúmico)

Se trata de un suelo de la Clase V, característica de climas templados cálidos con régimen xérico y con procesos de fersialitización. La presencia de un horizonte de profundidad con acumulación de arcillas y un pH superficial mayor de 6 lo clasifican como suelo rojo fersialítico. Se le añaden además los subgrupos silíceo, xérico y subhúmico, este último por la escasez de materia orgánica en superficie; el subgrupo hidromórfico se le asigna por la presencia de manchas indicadoras de reducción temporal, aunque se debe tener en cuenta que estas manchas son segregaciones de hierro ocurridas en condiciones paleoclimáticas.

## Reseña:

Perfil profundo, aunque la observación de la distribución de las raíces indica que el alto grado de compactación de los horizontes de profundidad puede reducir muy notablemente el volumen útil explorable. La capacidad hídrica total es alta, siendo la disponible media, a la vista de las posibles limitaciones por compactación indicadas. Su comportamiento hidrológico puede verse también afectado dada la disminución que la compactación puede producir sobre la capacidad de infiltración en capas profundas. El uso forestal actual que tiene este suelo reduce notablemente estos riesgos de disminución de conductividad hidráulica, pues los sistemas radicales arbóreos si logran colonizar estos horizontes aunque sólo sea parcialmente.

Los contenidos en bases son muy bajos y pueden constituir uno de los problemas fundamentales de estos suelos, formados probablemente en condiciones paleoclimáticas, más húmedas y cálidas. El uso forestal de estos suelos aconsejaría su subsolado para romper la capa plintica endurecida.

MUESTREO 981-110 Luvisol Profondi-Crómico (Districo)

**Características macromorfológicas**

Coordenadas UTM: X = 673.076 Litofacias: 3100 Arenas y gravas versicolores  
 Y = 4.143.051 Hoja mapa: 981-III Término municipal: Gibraleón  
 Altitud = 118 m Pendiente: 12 % Orientación: 23 N-N  
 Topografía general: Media ladera Topografía local: Media ladera Microtopografía: Plano-cóncavo  
 Longitud de ladera m Buzamiento: No existe Pedregosidad: 0 % Afloramientos rocosos: 0 %  
 Profundidad útil: 100 cm Reacción perfil: Fuertemente ácido

**Vegetación**

Composición ppal: Pinar  
 Talla formación: Arbórea (bosque) >7m

Hdz	Prof (cm)	Descripción					
A	0 - 9	Color en Fresco 10YR3/2, Marrón grisáceo muy oscuro	Textura Arenoso-franca	Estructura Granular	Moderada gruesa	Reacción Fuertemente ácido	Compacidad Blando
		Fragmentos rocosos: Muy pocos	Raíces	Manchas: %	Humedad Fresco		
		Naturaleza de los fragmentos:	Muy abundante Finas, medias y gruesas	Color:			
AE	9 - 26	Color en Fresco 10YR6/4, Marrón claro amarillento	Textura Arenosa	Estructura Granular	Débil mediana	Reacción Medianamente ácido	Compacidad Poco compacto
		Fragmentos rocosos: Muy pocos	Raíces	Manchas: %	Humedad Fresco		
		Naturaleza de los fragmentos:	Muy abundante Finas, medias y gruesas	Color:			
BtsC	26 - 100	Color en Fresco 7.5YR5/6, Marrón fuerte	Textura Franco-arenosa	Estructura Granular	Débil mediana	Reacción Fuertemente ácido	Compacidad Compacto
		Fragmentos rocosos: Muy pocos	Raíces	Manchas: %	Humedad Fresco		
		Naturaleza de los fragmentos:	Escasas Finas, medias y gruesas	Color:			

**RESULTADOS ANALÍTICOS**

Hdz	Espesor	TPSA%	Arena %	AMF %	Limo%	Arcilla %	pH (H2O)	pH (ClK)	C.E. (dS/m)	MO%	CaCO3%	Dens. real	CRA Tot	CRADU	CRAM
A	9	99,7	79,8	13,28	15,2	5,0	5,5	4,6	0,23	9,53	0,21	2,22	22	15	25
AE	17	98,1	87,5	5,83	8,1	4,4	5,7	4,5	0,10	1,03	0,21	2,58	25	19	27
BtsC	74	99,5	73,0	2,72	9,2	17,8	5,1	4,1	0,09	0,15	0,23	2,65	119	56	136
Total:													166	90,0	188,0

Hdz	Ca ppm	Mg ppm	Na ppm	K ppm	ClC (meq/100gTF)	S (meq/100g)	V %
A	729,00	342,00	69,00	149,00	13,71	7,18	52,36
AE	57,00	37,00	6,00	16,00	2,22	0,66	29,70
BtsC	13,00	16,00	5,00	25,00	2,44	0,28	11,65

**Horizontes de diagnóstico:** A ócrico: horizonte de alto contenido en materia orgánica pero excesivamente delgado para considerarse mólico o úmbrico.  
 BtsC árgico: acumulación de arcilla con un fuerte incremento relativo que indican un horizonte árgico; además, aparece un importante enrojecimiento del perfil, por lo que se le estima una acumulación de Fe, que se hace más patente al aumentar en profundidad.

**Clasificación FAO (1999):** Luvisol Profondi-Crómico (Districo)

Presencia de un horizonte árgico en condiciones de reacción fuertemente ácida, aunque no se alcanzan los valores de pH identificables con las propiedades álicas, por lo que el suelo pertenece al grupo de los luvisoles.  
 El gran espesor del horizonte enriquecido en arcilla lo caracteriza como Profóndico (muestreado con barrena a partir de 45 cm). La coloración rojiza del horizonte árgico le asigna la unidad Crómico. Se añade la unidad Districo complementaria, para indicar la fuerte acidez del perfil.

**Clasificación Soil Taxonomy (1988):** Ultic Palexeralf

La presencia de un árgico clasifica el perfil en el orden de los Alfisols, aunque el pH resulta fuertemente ácido, pero se considera que no lo suficiente para un Ultisol. Un régimen de humedad Xérico (Xeric) y la ya citada escasez de bases lo clasifican como Ultic Palexeralf.

**Clasificación forestal de los suelos españoles (Gandullo, 1994):** Suelo rojo fersialítico ácido (silíceo, xérico)

Se trata de un suelo de la Clase V, característica de climas templados cálidos con régimen xérico y con procesos de fersialitización. La presencia de un horizonte de profundidad con acumulación de arcilla y el pH superficial menor que 6 lo clasifican como suelo rojo fersialítico ácido. El régimen de humedad le hace corresponder el subgrupo xérico y la roca madre silíceo con el silíceo.

**Reseña:**

Perfil de ladera boscosa sobre materiales arenosos ácidos en el que la incorporación de la materia orgánica al perfil se realiza de forma más rápida que la humificación y mineralización. El espesor del horizonte árgico parece ser indicativo de su evolución paleoclimática, bajo condiciones de alteración y lavado más intensas. La capacidad hídrica del perfil es media-alta y se puede considerar como profundo a muy profundo, aunque resulta dudoso que el arbolado penetre con facilidad la parte inferior del horizonte árgico, bastante cementada.  
 Nutricionalmente es claramente oligotrófico, por lo que en conjunto se puede decir que la potencialidad de estos pedones es media, para su uso forestal.

## Anejo I: Perfiles tipo

MUESTREO 981-125 Luvisol Areni-Profúndico (Crómico)

### Características macromorfológicas

Coordenadas UTM: X = 668.988 Litofacies: 3100 Arenas y gravas versicolores

Y = 4.142.005

Hoja mapa: 981

Término municipal: San Bartolomé de la Torre

Altitud = 142 m Pendiente: 1 % Orientación: 245 SW-

Topografía general:

Topografía local: Baja ladera

Microtopografía: Plano-cóncavo

Longitud de ladera m Buzamiento: No existe Pedregosidad: 1 % Afloramientos rocosos: 0 %

Profundidad útil: 125 cm Reacción perfil: Ligeramente ácido

### Vegetación

Composición ppal: Eucaliptal

Talla formación: Arbórea (bosque) >7m

Hzt	Prof (cm)	Descripción					
A	0 - 20	Color en Mojado 7.5YR4/6, Marrón fuerte	Textura Arenoso-franca	Estructura Granular	Débil	Reacción Ligeramente ácido	Compac dad Blando
		Fragmentos rocosos: Muy pocos	Raíces	Manchas: %	Humedad		
		Naturaleza de los fragmentos:	Abundantes	Finas, medias y gruesas	Color:	Mojado	
Bt1	20 - 63	Color en Mojado 5YR3/4, Marrón rojizo oscuro	Textura Arenoso-franca	Estructura Granular	Débil	Reacción Medianamente ácido	Compac dad Poco compacto
		Fragmentos rocosos: Muy pocos	Raíces	Manchas: 15 %	Humedad		
		Naturaleza de los fragmentos:	Abundantes	Finas, medias, gruesas y muy	Color: 7.5YR5/8, Pardo fuerte	Mojado	
Bt2	63 - 80	Color en Mojado 10YR6/6, Amarillo parduzco	Textura Franco-arenosa	Estructura Sin estructura (grano)		Reacción Ligeramente ácido	Compac dad Poco compacto
		Fragmentos rocosos: Muy pocos	Raíces	Manchas: %	Humedad		
		Naturaleza de los fragmentos:	Escasas	Finas, medias y gruesas	Color:	Mojado	
Bt3C	80 - 125	Color en Húmedo 10YR6/8, Amarillo parduzco	Textura Franco-arenosa	Estructura Bloques angulares	Débil	Reacción Medianamente ácido	Compac dad Compacto
		Fragmentos rocosos: Muy pocos	Raíces	Manchas: %	Humedad		
		Naturaleza de los fragmentos:	Escasas	Finas y medias	Color:	Húmedo	

### RESULTADOS ANALÍTICOS

Hor.	Espesor	TFSa%	Areña %	AMF %	Limo%	Arcilla %	pH (H2O)	pH (CIC)	C.E. (dSm)	MO%	CaCO3%	Dens. real	CRA Tot	CRADU	CR (M)
A	20	99,5	84,3	19,14	10,1	5,6	6,3	5,0	0,08	0,94	0,16	2,64	26	15	27
Bt1	43	99,9	80,3	8,82	11,1	8,7	6,1	4,5	0,07	0,19	0,14	2,64	60	31	61
Bt2	17	100,0	77,7	9,41	13,6	8,7	6,2	4,7	0,08	0,10	0,12	2,67	40	29	41
Bt3C	45	100,0	62,9	8,13	18,1	19,0	5,8	4,2	0,08	0,10	0,14	2,63	97	43	93
Total:													223	118,0	227,0

Hor.	Ca ppm	Mg ppm	Na ppm	K ppm	CIC (meq/100gTF)	S (meq/100g)	V %
A	67,00	24,00	1,00	26,00	2,23	0,61	27,15
Bt1	4,00	10,00	1,00	24,00	1,43	0,17	11,79
Bt2	41,74	20,44	10,41	49,90	0,89	0,55	62,09
Bt3C	86,47	36,62	10,40	74,90	2,11	0,97	46,18

Horizontes de diagnóstico: A órico: no alcanza la coloración oscura necesaria para horizontes más orgánicos.

Bt1 y Bt2 árgicos por la acumulación de arcilla; esta acumulación es mínima pero suficiente, ya que el contenido en arcilla de estas arena: es muy bajo.

Bt3C árgico: fuerte contraste textural con respecto de los horizontes superiores que puede ser debido a la estratificación sedimentaria, además de procesos de argilización in situ e iluvación de arcillas.

### Clasificación FAO (1999): Luvisol Areni-Profúndico (Crómico)

Se trata de un suelo con horizontes árgicos cuyo pH hace suponer un grado de saturación  $V > 50\%$ ; se desconoce la capacidad de intercambio catiónico, si bien se considera por las circunstancias climáticas (alteración de silicatos en medios templados de clima no húmedo) que su CIC debe superar los 24 cmol/kg de arcilla, por lo que debe tratarse de un Luvisol.

La textura arenosa-franca de los dos primeros horizontes le engloba en la unidad Arénico y la profundidad del horizonte árgico hasta más de un metro le hace corresponder la unidad Profúndico. El color rojo del segundo horizonte lo encuadra complementariamente en la unidad Crómico.

### Clasificación Soil Taxonomy (1988): Ultic Haploxeralf

La presencia de un árgico y la presunción de una saturación en bases mayor del 35% clasifica el perfil en el orden de los Alfisols. Un régimen de humedad Xérico (Xeric) y la ausencia de características que lo encuadren en otra clasificación lo tipifican como Haploxeralf. Su reacción ácida permite suponer una saturación en bases menor del 75%, que le asigna el subgrupo Ultic.

### Clasificación forestal de los suelos españoles (Gandullo, 1994): Suelo rojo fersialítico (silíceo, xérico, rojizo, subhúmico)

Se trata de un suelo de la Clase V, característica de climas templados cálidos con régimen hídrico no árido y con procesos de fersialitización. La presencia de horizontes de acumulación de arcilla y el pH superficial mayor de 6 lo clasifican como suelo rojo fersialítico. Se le añaden además los subgrupos silíceo, xérico, subhúmico y rojizo.

### Reseña:

Suelo arenoso y profundo en el que la escasa pendiente y la buena permeabilidad favorecen las migraciones verticales de arcillas, que se acumulan progresivamente en el fondo del perfil; esto beneficia a la vegetación arbórea, que es capaz de introducir sus sistemas radicales a gran profundidad, buscando zonas de humedad continuada. Hidrológicamente la citada profundidad y unas condiciones texturales de ausencia de gruesos y componente franca le confieren una capacidad de retención de agua alta. Nutricionalmente aparece con una escasa capacidad de cambio y escasez de bases cambiables.

Por lo tanto, se considera que la potencialidad forestal de estos suelos es muy aceptable, dado el carácter frugal de la mayor parte de las especies forestales.

MUESTREO 981-43 Arenosol Dístico

**Características macromorfológicas**

Coordenadas UTM: X = 667.062 Litofacies: 3100 Conglomerados, arenas y gravas rojas  
 Y = 4.137.183 Hoja mapa: 981 (2-4) Término municipal: Cartaya

Altitud = 125 m Pendiente: 12 % Orientación: 50 NE

Topografía general: Media ladera Topografía local: Media ladera Microtopografía: Cóncavo

Longitud de ladera m Buzamiento: No existe Pedregosidad: 0 % Afloramientos rocosos: 0 %

Profundidad útil: 125 cm Reacción perfil: Fuertemente ácido

**Vegetación**

Composición ppal: Pinar

Talla formación: Arbustiva (mat. Arbustivo) 3 - 7m

Hzt	Prof (cm)	Descripción					
A	0 - 24	Color en Húmedo 10YR6/4, Marrón claro amarillento	Textura Arenosa	Estructura Granular	Débil	Reacción Fuertemente ácido	Compacidad Blando
		Fragmentos rocosos: Muy pocos		Raíces Muy abundante Finas (< 2mm)		Manchas: %	Humedad Húmedo
		Naturaleza de los fragmentos:		Color:			
Bw	24 - 80	Color en Fresco 10YR6/6, Amarillo parduzco	Textura Arenosa	Estructura		Reacción Muy fuertemente ácido	Compacidad Poco compacto
		Fragmentos rocosos: Muy pocos		Raíces Escasas	Gruesas (5 - 20 mm)	Manchas: %	Humedad Fresco
		Naturaleza de los fragmentos:		Color:			
BwC	80 - 125	Color en Húmedo 10YR7/4, Marrón muy pálido	Textura Arenosa	Estructura		Reacción Fuertemente ácido	Compacidad Blando
		Fragmentos rocosos: Muy pocos		Raíces Escasas	Gruesas (5 - 20 mm)	Manchas: %	Humedad Húmedo
		Naturaleza de los fragmentos:		Color:			

**RESULTADOS ANALÍTICOS**

Hor.	Espesor	TFSa%	Arena %	AMP %	Limo%	Arcilla %	pH (H <sub>2</sub> O)	pH (ClK)	C.E. (dS/m)	MO%	CaCO <sub>3</sub> %	Dens. real	CRA Tot	CRADU	CRAM
A	24	99,4	93,1	13,65	6,8	0,1	5,1	4,8	0,04	0,42	0,00	2,54	18	14	20
Bw	56	99,5	92,7	17,34	6,7	0,6	5,1	4,4	0,08	0,17	0,07	2,55	41	32	47
BwC	45	99,7	97,6	6,43	2,4	0,1	5,3	4,3	0,04	0,29	0,13	2,56	27	22	31
Total:													86	68,0	98,0

Hor.	Ca ppm	Mg ppm	Na ppm	K ppm	ClC (meq/100gTP)	S (meq/100g)	V %
A	103,94	44,93	4,29	33,20	0,85	1,00	100
Bw	16,90	31,95	0,00	33,30	0,73	0,44	59,426
BwC	12,60	2,96	0,00	22,10	0,20	0,15	74,359

**Horizontes de diagnóstico:** A órico.

Horizontes de profundidad: no tienen carácter diagnóstico, ya que no presentan acumulaciones, y sus contenidos en arcilla son insignificantes, por lo que ni siquiera se puede hablar de un horizonte cámbico.

**Clasificación FAO (1999):** Arenosol Dístico

La textura gruesa y ausencia de otros horizontes diagnósticos clasifican este suelo como un Arenosol. La reacción de fuerte a muy fuertemente ácida se caracteriza aplicando la unidad Dístico.

**Clasificación Soil Taxonomy (1988):** Dystric Xeropsamment

Su escaso desarrollo y la inexistencia de un horizonte diagnóstico de profundidad lo clasifica como Entisol. La textura arenosa y un porcentaje de fragmentos de roca menor del 35% encuadran el perfil en Psamment. Un régimen de humedad Xérico (Xeric) lo clasifica como Xeropsamment. Se le asigna el subgrupo Dystric por la reacción ácida que indica, aproximadamente, una saturación en bases menor del 60%.

**Clasificación forestal de los suelos españoles (Gandullo, 1994):** Suelo fersialítico pardo (xérico, subhúmico)

Se trata de un suelo de la Clase V, característica de climas templados cálidos con régimen hídrico no árido y con procesos de fersialitización. La presencia de un horizonte de profundidad poco diferenciado y la roca silíceo lo clasifican como suelo fersialítico pardo. Se le añaden además los subgrupos xérico y subhúmico.

**Reseña:**

Suelo arenoso con escasísimo contenido en limos y arcillas, lo que facilita el arrastre de las escasas partículas coloidales existentes.

Hidrológicamente resultará excesivamente drenante, con escasa capacidad de retención de agua, aunque este problema puede suplirse parcialmente con la facilidad que presenta al crecimiento radical, que posibilita una buena auscultación del medio a las raíces de los árboles.

Nutricionalmente es un suelo sin apenas complejo de cambio, por lo que sólo estarán disponibles los nutrientes procedentes de la mineralización de la materia orgánica, por otra parte muy escasa.



**ANEJO II: INTERVALOS CUALITATIVOS DE LA  
CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES EDÁFICAS**

A continuación se describen los intervalos de caracterización de propiedades edáficas empleadas en la determinación de los perfiles tipo

## II.1. REACCIÓN DEL SUELO SEGÚN SU PH AL AGUA

Tabla II-1: Evaluación de la reacción del suelo según su pH al agua (1:2,5), (Porta, 1994).

pH	Evaluación	Efectos esperables en el intervalo
<4,5	Extremadamente ácido	Condiciones muy desfavorables
4,5-5,0	Muy fuertemente ácido	Posible toxicidad por $Al^{3+}$ y exceso: Co, Cu, Fe, Mn, Zn
		Deficiencia: Ca, K, N, Mg, Mo, P, S
5,1-5,5	Fuertemente ácido	Suelos sin carbonato cálcico.
		El hormigón ordinario resulta atacado.
5,6-6,0	Medianamente ácido	Actividad bacteriana escasa.
		Exceso: Co, Cu, Fe, Mn, Zn
6,1-6,5	Ligeramente ácido	Deficiencia: Ca, K, N, Mg, Mo, P, S
		Suelos sin carbonato cálcico.
6,6-7,3	Neutro	El hormigón ordinario resulta atacado.
		Actividad bacteriana escasa.
7,4-7,8	Medianamente básico	Intervalo adecuado para la mayoría de los cultivos.
7,9-8,4	Básico	Máxima disponibilidad de nutrientes.
		Mínimos efectos tóxicos.
8,5-9,0	Ligeramente alcalino	Por debajo de pH = 7,0 el carbonato cálcico no es estable en el suelo.
		Suelos generalmente con $CaCO_3$
9,1-10,0	Alcalino	Disminuye la disponibilidad de P y B.
		Deficiencia creciente de Co, Cu, Fe, Mn, Zn.
<10,0	Fuertemente alcalino	Suelos calizos. Clorosis férrica debida al $HCO_3^-$
		En suelos con carbonatos, estos pH altos pueden deberse al $MgCO_3$ , si no hay sodio intercambiable.
		Mayores problemas de clorosis férrica (Russell, 1978)
		Presencia de carbonato sódico.
		Elevado porcentaje de sodio intercambiable (ESP>15%)
		Toxicidad: Na, B
		Movilidad del P como $Na_3PO_4$
		Actividad microbiana escasa
		Micronutrientes poco disponibles, excepto Mo

## II.2. PROFUNDIDAD DEL SUELO

Tabla II-2: Profundidad del suelo

Intervalo de profundidad (cm)	Evaluación cualitativa de la profundidad
0-40	Somero
40-70	Profundidad media (medianamente profundos)
70-100	Profundos
>100	Muy profundos

## II.3. CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA SATURADA DEL SUELO

Tabla II-3: Caracterización de la conductividad hidráulica saturada (modificada de Soil Survey Division Staff, 1993)

Clase	$K_{sat}$ ( $\mu\text{m/s}$ )	$K_{sat}$ (in/h)	$K_{sat}$ (cm/h)
Muy alta	$\geq 100$	$\geq 14,17$	$\geq 36$
Alta	10 -100	1,417 – 14,17	3,6 – 36
Moderadamente alta	1 - 10	0,1417 – 1,417	0,36 – 3,6
Moderadamente baja	0,1 - 1	0,0142 – 0,1417	0,036 – 0,36
Baja	0,01 - 0,1	0,0014 – 0,0142	0,0036 – 0,036
Muy baja	<0,01	<0,0014	<0,0036

## II.4. CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE AGUA DEL SUELO

Tabla II-4: Capacidad de retención de agua del suelo

Intervalo de CRA (mm.)	Intervalo de CRAM (mm.)	Intervalo de CRAD (mm.)	Evaluación cualitativa
0-50	0-60	0-35	Muy baja
50-100	60-120	35-70	Baja
100-150	120-180	70-105	Media
150-200	180-240	105-140	Alta
>200	>240	>140	Muy alta

Tabla II-5: Niveles de variación de la capacidad de retención de agua fuera de los intervalos medios marcados por la cartografía

Variación de CRAM (mm.)	Variación de CRAD (mm.)	Evaluación cualitativa
0-20	0-15	Baja
21-40	16-30	Media
41-60	$\geq 31$	Alta
$\geq 61$		Extrema

## II.5. ATRIBUTOS DE LA ESTRUCTURA DEL SUELO

Tabla II-6: Atributos de la estructura del suelo

Grado:		Tipo:			
• Sin estructura: maciza (si coherente), grano suelto (si incoherente).	• Débil: agregados escasamente formados.	• Laminar.	• Prismática.	• Columnar.	• Bloques angulares.
• Moderada: agregados bien formados y diferenciados.	• Fuerte: agregados bien formados y diferenciados y duraderos.	• Bloques subangulares.	• Granular: agregados relativamente no porosos.	• Migajosa: agregados porosos.	

Clase	Muy fina	Fina	Mediana	Gruesa	Muy gruesa
Laminar	<1	1-2	2-5	5-10	>10
Prismática	<10	10-20	20-50	50-100	>100
Columnar	<10	10-20	20-50	50-100	>100
Bloques	<5	5-10	10-20	20-50	>50
Granular	<1	1-2	2-5	5-10	>10
Migajosa	<1	1-2	2-5		

## II.6. PROPIEDADES DE LOS ELEMENTOS GRUESOS (PEDREGOSIDAD INTERNA)

Tabla II-7: Propiedades de los elementos gruesos (pedregosidad interna) según FAO (Almorox et al., 1998)

Grado:	Tamaño	Forma	Alteración
Sin gruesos (<1%)	Grava (2- 75 mm).	Angular.	No alterados.
Muy pocos (1-5 %).	• fina 2 – 5 mm	Redondeada.	Meteorizados.
Pocos (6-15 %).	• media 5 – 20 mm	Plana.	Fuertemente meteorizados.
Frecuentes (16-40 %).	• gruesa 20 – 75 mm		
Abundantes ( 40-80 %).	Piedra (75 – 250 mm).		
Muy abundantes (> 80 %))	Bloque (>250 mm).		

## II.7. CARACTERIZACIÓN DE LOS LÍMITES ENTRE HORIZONTES EDÁFICOS

Tabla II-8: Caracterización de los límites entre horizontes edáficos

Ancho de transición	Topografía del límite
• Brusco o abrupto (< 2,5 cm)	• Plano.
• Neto (2,5 - 5 cm)	• Ondulado.
• Gradual (5 - 12 cm)	• Irregular: anguloso; dendrítico; denticulado; digitado; lobulado.
• Difuso (> 12 cm)	• Interrumpido.

## II.8. IDENTIFICACIÓN DE NIVELES DE COMPACTACIÓN DEL SUELO

Tabla II-9: Identificación de niveles de compactación del suelo con el uso de una navaja

Nivel de compactación	Descripción
Blando	Material incoherente, el cuchillo penetra completamente sin esfuerzo
Poco compacto	Se precisa un ligero esfuerzo, pero el cuchillo penetra por completo en el suelo
Compacto	El cuchillo no penetra completamente, incluso realizando un cierto esfuerzo
Muy compacto	No es posible clavar el cuchillo más de algunos mm

## II.9. ABUNDANCIA RELATIVA DE ESPECIES VEGETALES

Tabla II-10: Abundancia relativa de especies vegetales según los criterios fitosociológicos de Braun-Blanquet

Código	Descripción	Código	Descripción
+	Presencia puntual	3	25 al 50% de cobertura
1	<5% de cobertura	4	50 al 75% de cobertura
2	5 al 25% de cobertura	5	>75% de cobertura

## II.10. VALORES UTILIZADOS PARA LA ESTIMACIÓN DEL ÁREA ESPECÍFICA DE DRENAJE

Se cuantifica la dirección del flujo de escorrentía superficial en el punto de muestreo, según los criterios mostrados en la Figura 1.

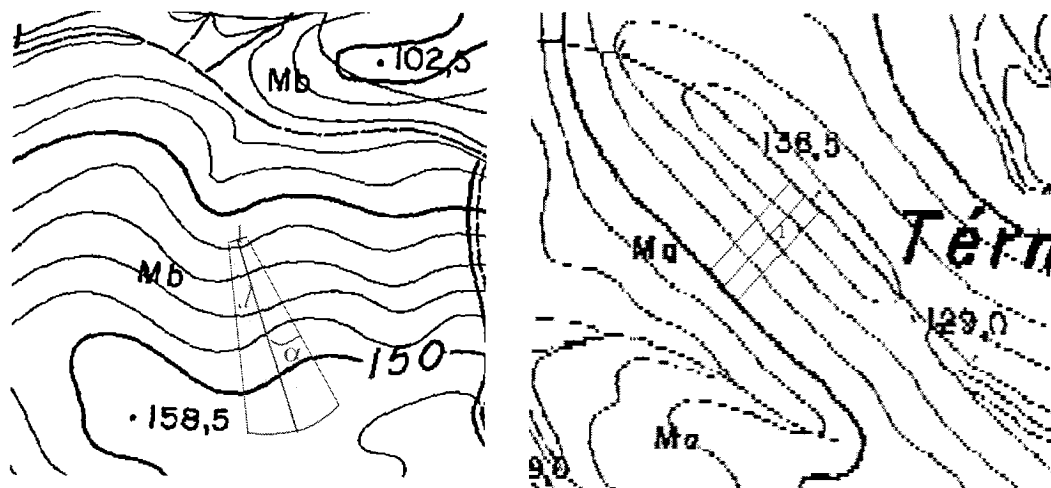


Figura 1: Esquema de interpretación de la convergenca de flujo. Situación de convergenca ligera (izquierda), y de flujo paralelo (derecha).

*Tabla II-11: Valores utilizados para la estimación del área específica de drenaje*

<b>Tipo de flujo</b>	<b>Intervalo de <math>\text{tg } \alpha</math></b>	<b>Valor medio asignado</b>
Convergente	0,03 a 0,2	0,1
Ligeramente convergente	0,01 a 0,03	0,02
Neutro o paralelo	0	0
Divergencia débil	0 a $-1/(2 \cdot l)$	$-1/(4 \cdot l)$
Divergencia fuerte	$> -1/(2 \cdot l)$	$-1/(2 \cdot l)$

**ANEJO III: DESCRIPCIÓN DE VARIABLES USADAS PARA LA  
DETERMINACIÓN DE LAS RELACIONES SUELO-PAISAJE**

### III.1. VARIABLES CATEGÓRICAS DEL MEDIO

#### III.1.1. Tipo de pendiente (*Tipo\_pte*)

La magnitud de las pendientes se ha tipificado según la “Capacidad Agrológica de los Suelos de España” de entre las múltiples clasificaciones existentes (MOPT, 1992), con alguna pequeña variación, para adaptarla a los terrenos forestales:

Tabla III-1: Caracterización del tipo de pendiente.

% de pendiente	Denominación	Criterio	Código
0-3%	llana	Terrenos de vocación agrícola, sin problemas de erosión.	1
3-10	suave	Terrenos de vocación agrícola, que precisan prácticas de conservación.	2
10-20	media o moderada	Terrenos agrícolas marginales o forestales. El 20% es límite a la agricultura (Porta <i>et al.</i> , 1994).	3
20-35	fuerte	Terrenos de vocación forestal productora-protectora. El 35% marca el límite al uso de maquinaria forestal convencional de preparación del terreno sin alteración de la pendiente (Serrada, 1993).	4
35-50	muy fuerte	Terrenos de vocación forestal protectora-productora. Los suelos se encuentran condicionados por la pendiente en sus posibilidades de evolución.	5
>50	escarpada	Terrenos de vocación forestal protectora. Los fenómenos erosivos hacen que la creación de una capa continua de suelo sea difícil, acumulándose los materiales finos en los resaltos y rellanos del terreno.	6

Tabla III-2: Clases de pendiente simplificada para la composición de unidades cartográficas

Tipo	Intervalo	Criterio
Tipo 10→	0-20 %	Pendientes suaves-medias; terrenos agrícolas.
Tipo 20→	20-50 %	Pendientes fuertes a muy fuertes; terrenos forestales productivos en diversa magnitud; se considera posible la formación de una capa continua de suelo.
Tipo 30→	> 50 %	Terreno escarpado; vocación protectora y capa de suelo a menudo discontinua.

#### III.1.2. Tipo de concentración de flujo (*Cod\_Concentrac*)

Tabla III-3: Valores utilizados para la estimación del área específica de drenaje

Tipo de flujo	Intervalo de $\text{tg } \alpha$	Código
Convergente	0,03 a 0,2	1
Ligeramente convergente	0,01 a 0,03	2
Neutro o paralelo	0	3
Divergencia débil	0 a $-1/(2 \cdot l)$	4
Divergencia fuerte	$> -1/(2 \cdot l)$	5

#### III.1.3. Tipo de vegetación dominante (*Cod\_VegDom*)

La codificación de los tipos de vegetación dominante se ha realizado según las siguientes clases:

Tabla III-4: Codificación de la vegetación dominante

Vegetación dominante	Código
Pinar	1
Eucaliptal	2
Quercíneas	3
Mezcla de especies arbóreas	4
Matorral	5
Matorral degradado	6
Olivar	7
Herbáceas	8
Naranjos	8
Raso menos de 10% cobertura	10

### III.2. VARIABLES CONTÍNUAS DEL MEDIO

#### Índice de humedad (*WI*) y variables asociadas (*A\_drej* y *Long\_lad*)

El índice de humedad (Wetness index) fue originariamente desarrollado para predecir la localización de áreas saturadas y también para predecir la profundidad del nivel freático del suelo (Martínez-Casasnovas, 1999). Posteriormente, ha sido empleado para la caracterización del régimen de humedad de los suelos (Barling *et al.*, 1994), para el establecimiento de relaciones suelo-paisaje (De Bruin y Stein, 1998) y para identificar áreas de erosión-deposición.

Su expresión simplificada es:

$$WI = \ln\left(\frac{A\_drej}{\tan \beta}\right) \quad \text{III.1}$$

Donde: *WI* es el índice de humedad

*A\_drej* es el área de drenaje específica o superficie que drena por unidad de longitud de curva de nivel en el punto

$\beta$  es el ángulo de la pendiente local

Como puede observarse, valores altos de *WI* implicarán una gran área de captación de agua y una pendiente suave, que permitirá el movimiento subterráneo lento del agua en la zona y, por lo tanto, una humedad edáfica mayor y más constante. Los valores bajos corresponderán a pendientes fuertes o escasez de superficie de captación de agua, por lo que el agua circulará rápido y en menor cantidad por esa porción de suelo que, por lo general, estará más seco.

El cálculo de este índice puede realizarse fácilmente para toda la zona de estudio mediante el uso de las funciones de álgebra de mapas del SIG. Sin embargo, en el caso de los puntos de muestreo, se ha creído conveniente realizar este cálculo manualmente, con el fin de evitar los errores de precisión debidos al tamaño de las cuadrículas de los mapas en formato ráster.

El cálculo del área de drenaje se ha realizado mediante la siguiente expresión:

$$A\_drej = [Long\_lad \cdot tg \alpha + 1] \cdot Long\_lad \quad \text{III.2}$$

Donde:  $A_{drje}$  es el área de drenaje específica

$Long_{lad}$  es la longitud de ladera del área drenante

$tg \alpha$  es el valor medio del ángulo de la divergencia de flujo según lo mostrado en la tabla siguiente

Tabla III-5: Valores medios del ángulo de divergencia de flujo

Tipo de flujo	Intervalo de $tg \alpha$	Valor medio asignado
Convergente	0,03 a 0,2	0,1
Ligeramente convergente	0,01 a 0,03	0,02
Neutro o paralelo	0	0
Divergencia débil	0 a $-1/(2 \cdot l)$	$-1/(4 \cdot l)$
Divergencia fuerte	$> -1/(2 \cdot l)$	$-1/(2 \cdot l)$

### III.3. VARIABLES CATEGÓRICAS DEL PERFIL COMPLETO

#### III.3.1. Grupo taxonómico FAO ( $Cod_{FaoRes}$ )

A cada grupo taxonómico de suelo presente en la cuenca del embalse de El Sancho se le asignado un ordinal correlativo con el fin del poder introducirlos en el análisis estadístico.

#### III.3.2. Grupo hidrológico de suelo (en valor discreto) ( $ghs_{perfil}$ )

Para facilitar el análisis estadístico a cada uno de los grupos hidrológicos de suelo se le asignado un valor entero como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla III-9: Código para los grupos hidrológicos de suelo

Grupo hidrológico de suelo	Código
A	1
B	2
C	3
D	4

### III.4. VARIABLES POR CATEGORÍAS DEL PERFIL OBTENIDAS COMO VALORES MEDIOS DE LOS HORIZONTES

#### Índice textural logarítmico entero ( $Tipo_{Itex_{ln}}$ )

Este índice ha sido ideado para contribuir a mejorar algunos aspectos relativos a la parametrización de la textura edáfica. En concreto:

- La simplificación que establecen las fracciones texturales: las tres fracciones texturales clásicas, arena, limo y arcilla, engloban cada una importantes variaciones de tamaño de partículas, lo que puede influir fuertemente sobre las propiedades del suelo. Este aspecto es especialmente patente en el caso de la fracción de las arenas, cuyo tamaño puede variar entre 50 y 2000  $\mu m$ . Los buenos análisis texturales separan varios tamaño de arenas pero a la hora de establecer la clase textural de las tierras estas diferencias no son tenidas en cuenta.

- El carácter cualitativo, discreto y determinista que presentan las clases texturales establecidas: dos suelos con importantes diferencias en composición textural pueden pertenecer a una misma clase textural mientras que tierras cuya composición textural se diferencia en un 1 ó 2 % pueden tener asignadas clases diferentes. Lógicamente las propiedades físicas y químicas de estas dos últimas se asemejarán mucho más.

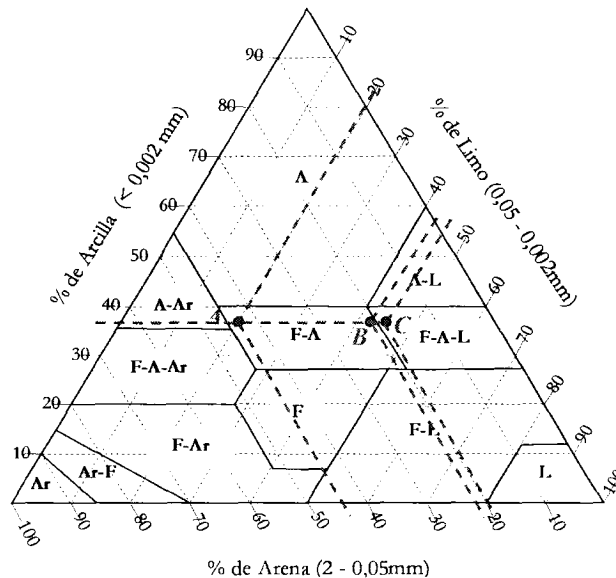


Figura III-1: Diferencia de asignación de un suelo a las clases texturales

- Los intervalos de las fracciones texturales pueden variar de unas clasificaciones (USDA, Internacional, ASTM) a otras, lo que puede inducir a errores o ambigüedades en la determinación de clases texturales.

Para solucionar estos problemas Shirazi y Boersma (1984) plantearon la transformación de las clases texturales clásicas a un parámetro textural continuo bidimensional constituido por el diámetro medio cuadrático de las partículas ( $D_g$ ) y su desviación típica, también cuadrática, ( $\sigma_g$ ). Este excelente trabajo supera la mayor parte de los inconvenientes arriba planteados pues los parámetros son continuos, independientes del sistema de clasificación y admiten todos los tamaños texturales que se deseen incluir.

La caracterización textural que proporcionan  $D_g$  y  $\sigma_g$  es excelente si bien, para el análisis estadístico resulta menos operativo el tener variables bidimensionales, por lo que se ha planteado la obtención de un coeficiente textural único que pueda servir como variable estimadora de distintas propiedades edáficas.

El índice concebido se basa en el número de partículas totales que pueden existir por unidad de peso de suelo. Este valor está estrechamente relacionado con la superficie específica y, por lo tanto, con los fenómenos de infiltración y retención de agua en el suelo. El tamaño de las partículas es también una propiedad que puede estar vinculada al tipo de roca madre (Birkeland, 1999).

Al igual que para la obtención de  $D_g$  el número medio de partículas se ha obtenido mediante una media geométrica que impida que se anule totalmente la importancia de las partículas grandes. El índice final se obtiene tomando el logaritmo natural de la media

geométrica para localizar los valores en un rango numérico más sencillo de tratar estadísticamente.

En la Tabla III-8 se indican los números aproximados de partículas de suelo según tamaños. Cuando no se dispone de todas las fracciones texturales indicadas, lo que es frecuente en el caso de la arena, se calcula la media geométrica del número de partículas del subconjunto previamente.

Tabla III-8: Cantidad de partículas por unidad de peso de suelo según el tamaño de las partículas, tomado de Porta et al. (1993).

Fracción	Diámetro aparente (mm)	Nº partículas por gramo		
		Todas las fracciones de arena	Sólo arena muy fina y resto arena	Sólo arena total
Arena muy gruesa	2-1	90		
Arena gruesa	1-0,5	720	2.030	6.573
Arena media	0,5-0,25	5.700		
Arena fina	0,25-0,1	46.000		
Arena muy fina	0,1-0,05	722.000	722.000	
Limo	0,05-0,02	5.776.000	5.776.000	5.776.000
Arcilla	<0,02	90.260.853.000	90.260.853.000	90.260.853.000

La expresión del índice textural sería :

$$I_{tex\_ln} = \ln \left( \prod_{i=frac.text} n_i^{p_i} \right) \quad \text{III.3}$$

Donde:  $n_i$  es el número de partículas por gramo en la fracción textural  $i$

$p_i$  es el tanto por uno en peso de la fracción textural  $i$

El índice también puede expresarse como la suma de los logaritmos de los tamaños de partículas ponderada con su abundancia relativa en tanto por uno:

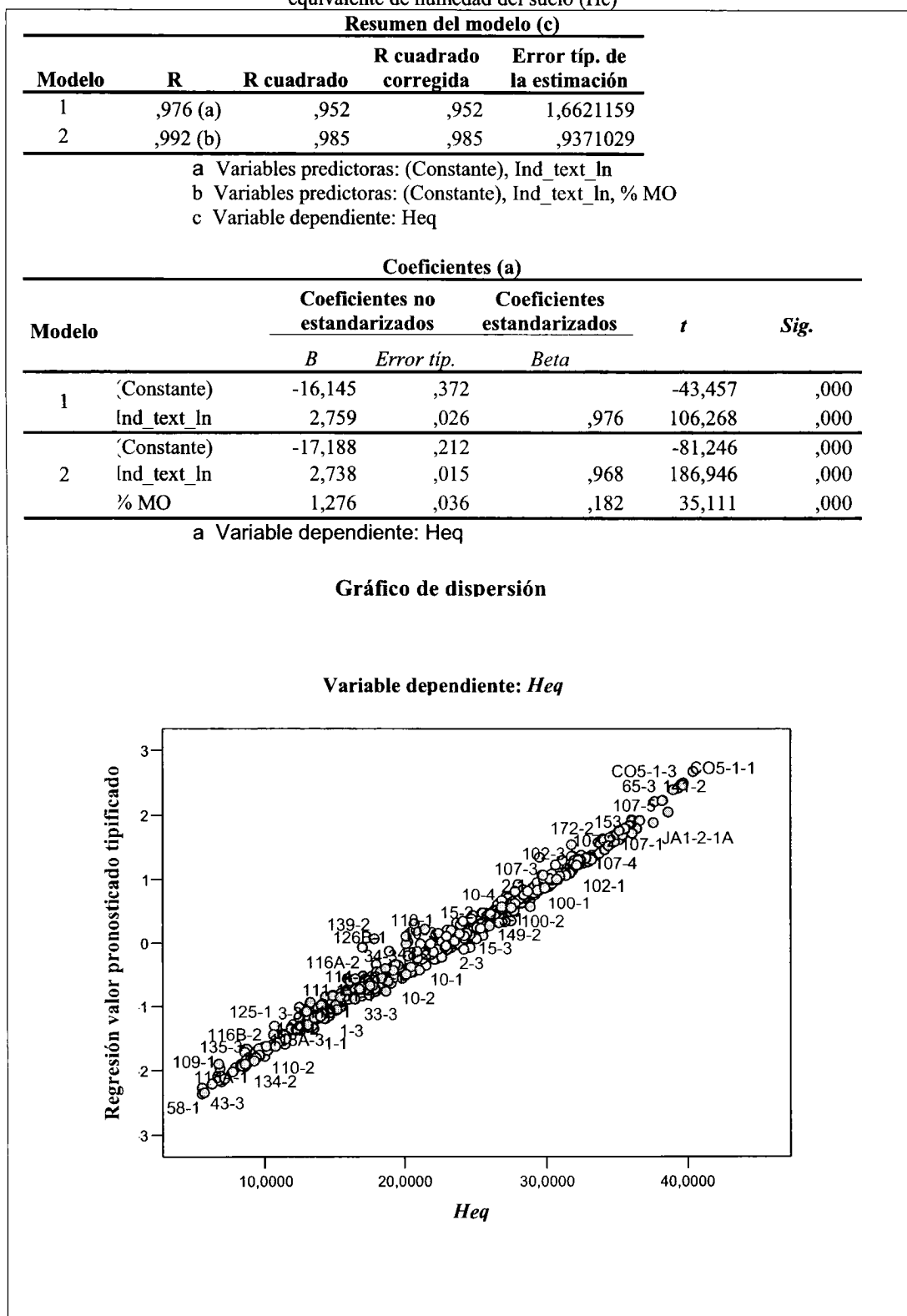
$$I_{tex\_ln} = \sum_{i=frac.text} p_i \cdot \ln n_i \quad \text{III.4}$$

Se ha comprobado que este índice resulta muy práctico y presenta altas correlaciones con variables como la litofacies y la profundidad del suelo. Para comprobar su calidad como estimador textural se ha realizado un análisis de regresión sobre 576 casos de suelos, comparando  $I_{tex\_ln}$  con la variable bidimensional medio cuadrática propuesta por Shirazi y Boersma (1984). La variable estimada en ambos caso es el equivalente de humedad,  $He$  (Sánchez Palomares y Blanco, 1984), utilizado para el cálculo de las capacidades de retención de agua.

Como puede apreciarse en los cuadros 1 y 2 la variable única  $I_{tex\_ln}$  presenta ajustes significativamente mejores que el conjunto de variables  $D_g$  y  $\sigma_g$ . Sin duda estas dos últimas variables definen la textura con una mayor precisión, pero su uso en modelos lineales presenta peores ajustes para estimar propiedades del suelo relacionadas con la textura.



Cuadro 1. Modelo de regresión de la variable  $\ln$  y la materia orgánica (%MO), como estimadores del equivalente de humedad del suelo (He)



Cuadro 2. Modelo de regresión de las variables texturales medio cuadráticas  $D_g$  y  $\sigma_g$  y la materia orgánica (%MO), como estimadores del equivalente de humedad del suelo (Heq)

Resumen del modelo(d)				
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
1	,851(a)	,724	,724	3,9689611
2	,860(b)	,740	,739	3,8611467
3	,867(c)	,752	,750	3,7748915

a Variables predictoras: (Constante),  $D_g$   
 b Variables predictoras: (Constante),  $D_g$ , SIGMAg  
 c Variables predictoras: (Constante),  $D_g$ , SIGMAg, % MO  
 d Variable dependiente: Heq

Coeficientes(a)						
Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
		B	Error típ.	Beta		
1	Constante)	27,940	,240		116,195	,000
	$D_g$	-86,709	2,505	-,851	-34,613	,000
2	Constante)	33,102	1,024		32,334	,000
	$D_g$	-98,606	3,349	-,968	-29,443	,000
	$\sigma_g$	-,487	,094	-,170	-5,179	,000
3	Constante)	32,101	1,023		31,369	,000
	$D_g$	-96,928	3,294	-,951	-29,428	,000
	$\sigma_g$	-,477	,092	-,167	-5,190	,000
	%MO	,777	,166	,111	4,694	,000

a Variable dependiente: Heq

**Grafico de dispersión**

Variable dependiente: *Heq*

Regresión valor pronosticado tificicado

*Heq*



**ANEJO IV: MEDIAS DE LAS VARIABLES ENSAYADAS POR  
SUBGRUPOS DE LITOFACIES SIMPLIFICADAS**

Tabla IV-I: Estadísticos por subgrupos litológicos de todas las variables ensayadas

Variable	Estadístico	Subgrupo Litológico																
		400	520	550	590	1100	1200	1300	1400	1550	1590	1700	1820	1850	1900	2050	2090	3150
Prof_util	Media	53,750	62,000	110,000	102,500	48,000	34,000	58,400	55,000	63,333	118,333	80,000	85,000		113,000	84,000	35,800	88,750
	Error típ.	4,270	14,572	0,000	17,500	7,930	4,154	5,461	5,089	7,265	7,265	8,416	15,000		13,000	14,866	7,946	10,483
CRAM	Media	83,000	118,667	236,000	121,500	53,900	56,917	127,600	102,625	101,333	278,333	176,750	193,500	90,000	399,000	227,800	72,600	168,750
	Error típ.	18,735	41,978	38,527	36,500	13,058	11,340	18,344	12,086	9,404	23,842	12,546	63,500	1,000	4,000	58,613	17,985	40,903
CRADutil	Media	54,250	78,333	106,333	67,000	33,900	33,083	66,533	62,250	65,333	146,333	80,750	89,500	51,500	159,500	108,200	39,200	85,250
	Error típ.	13,356	25,333	14,051	17,000	7,372	5,605	9,315	5,470	7,753	11,465	6,750	27,500	0,500	0,500	23,549	9,410	10,403
DgPf_TF	Media	0,018	0,035	0,010	0,025	0,023	0,042	0,016	0,023	0,024	0,010	0,013	0,021	0,024	0,005	0,009	0,019	0,049
	Error típ.	0,003	0,004	0,003	0,005	0,005	0,015	0,001	0,003	0,006	0,003	0,002	0,001	0,000	0,000	0,003	0,003	0,007
SigmagPf_TF	Media	4,560	3,731	3,765	4,216	8,048	8,024	4,625	4,235	3,753	3,545	4,213	4,656	6,277	2,823	3,375	7,131	4,742
	Error típ.	0,408	0,429	0,539	0,908	0,975	0,887	0,280	0,177	0,082	0,022	0,299	0,453	0,312	0,098	0,247	0,960	0,414
M_TF	Media	60,902	71,630	51,364	43,571	56,295	60,995	60,755	64,401	60,354	66,161	71,916	62,247	58,802	80,728	67,974	59,931	76,626
	Error típ.	10,828	4,690	4,783	2,049	4,950	1,643	3,061	3,934	13,504	8,025	7,016	14,106	2,635	8,134	5,927	6,062	3,484
M_arcilla	Media	19,323	10,274	33,861	19,865	23,597	18,418	26,843	16,873	15,892	34,320	33,972	28,978	24,417	45,633	33,716	25,741	20,927
	Error típ.	4,028	1,287	5,271	1,546	1,913	1,541	1,582	2,478	1,999	2,148	2,091	0,297	0,330	2,284	4,261	1,716	2,660
M_limo	Media	51,027	46,600	41,528	39,555	41,660	40,208	41,264	48,316	49,055	41,381	34,636	30,310	32,304	39,908	43,853	36,960	22,039
	Error típ.	4,159	1,695	3,185	2,175	1,362	0,833	0,957	1,200	3,919	4,162	2,614	1,980	0,754	0,228	2,854	2,916	1,974
M_arena	Media	29,649	43,124	24,611	40,580	34,744	41,373	31,893	34,811	35,051	24,300	31,391	40,713	43,277	14,458	22,431	37,298	57,032
	Error típ.	1,930	2,758	5,462	3,720	2,699	1,743	1,790	2,668	5,154	5,685	3,434	2,277	0,423	2,056	3,590	3,025	1,933
MO_10	Media	2,013	1,000	2,160	1,555	3,180	1,700	2,409	1,989	1,417	1,790	1,558	2,225	1,660	0,770	2,322	3,076	2,430
	Error típ.	0,230	0,376	0,465	0,335	0,367	0,186	0,321	0,254	0,057	0,352	0,322	0,305	0,280	0,420	0,510	0,616	0,451
KbrakMin50	Media	0,563	1,333	0,134	0,716	1,050	1,265	0,318	0,774	0,814	0,146	0,111	0,063	0,343	0,041	0,216	0,635	0,852
	Error típ.	0,127	0,269	0,078	0,204	0,242	0,208	0,059	0,225	0,094	0,069	0,056	0,011	0,175	0,038	0,182	0,189	0,457
ghs_cont_perfil	Media	2,577	2,189	3,646	2,575	2,443	2,297	3,001	2,550	2,393	3,621	3,612	3,502	2,826	4,575	3,522	2,609	2,685
	Error típ.	0,091	0,085	0,629	0,012	0,151	0,106	0,162	0,131	0,054	0,348	0,404	0,078	0,244	0,287	0,319	0,175	0,337
M_RM_pHKCl	Media	4,123	4,045	3,632	4,600	4,469	4,531	4,108	4,467	4,410	4,634	5,069	5,040	5,293	4,053	4,004	4,436	4,814
	Error típ.	0,258	0,106	0,039	0,031	0,128	0,101	0,102	0,176	0,078	0,166	0,105	0,130	0,359	0,267	0,121	0,094	0,276
M_RM_Ca	Media	301,023	249,465	114,223	1278,107	743,453	541,053	199,306	725,650	740,822	722,889	4085,600	2718,781	1494,833	323,567	117,705	433,945	299,102
	Error típ.	95,527	82,070	26,597	197,127	97,668	62,367	37,651	117,627	68,312	189,605	201,650	978,010	181,062	28,700	11,168	106,806	112,795

Variable	Estadístico	Subgrupo Litológico																
		400	520	550	590	1100	1200	1300	1400	1550	1590	1700	1820	1850	1900	2050	2090	3150
M_RM_Mg	Media	146,392	209,905	479,733	971,510	306,484	297,341	149,492	423,042	362,123	538,428	2860,266	2138,340	4215,657	731,932	354,664	277,072	115,404
	Error típ.	14,849	52,582	120,657	261,941	40,934	48,753	18,704	125,003	57,037	199,799	142,859	509,391	822,802	327,819	128,559	67,252	33,922
M_RM_K	Media	97,045	75,838	56,308	71,211	101,264	101,593	72,201	97,310	69,303	96,088	42,471	40,977	37,734	44,864	66,325	88,659	84,597
	Error típ.	6,279	2,535	6,566	5,212	11,055	9,255	6,130	18,724	15,150	41,832	6,879	22,043	3,391	1,310	9,470	13,405	26,135
M_RM_Na	Media	13,974	16,649	34,319	41,596	20,571	14,623	19,550	43,917	25,913	56,677	51,537	55,009	24,215	38,243	43,408	11,113	17,109
	Error típ.	3,408	0,449	15,495	7,137	2,048	1,795	1,381	12,966	6,756	37,548	5,170	6,065	2,521	10,112	30,370	2,431	5,546
M_RM_CIC	Media	7,377	4,777	7,994	14,828	12,070	9,485	7,135	9,580	7,348	16,215	29,254	29,704	30,880	10,095	11,206	9,154	5,355
	Error típ.	0,424	0,646	1,003	3,109	0,795	0,564	0,368	0,802	0,707	1,064	3,418	7,217	4,528	1,205	2,098	1,216	0,441
M_RM_V	Media	40,216	67,018	58,903	95,015	53,447	59,468	36,396	73,743	98,187	49,541	169,454	102,768	136,459	77,050	31,632	49,144	49,156
	Error típ.	4,350	3,412	8,646	1,664	5,347	6,856	5,214	9,382	3,350	12,211	29,147	6,940	3,576	17,450	5,495	4,979	7,496
Itext_In_Pf	Media	15,250	13,401	17,085	14,520	15,247	14,321	15,873	14,738	14,507	17,108	16,667	15,390	14,651	18,907	17,164	15,329	13,404
	Error típ.	0,431	0,334	0,862	0,419	0,388	0,281	0,267	0,417	0,552	0,588	0,314	0,219	0,052	0,376	0,646	0,297	0,341
Ind_Arc	Media	1,311	3,963	2,332	1,223	1,066	1,228	1,600	1,508	1,509	1,966	1,564	2,016	1,334	1,498	1,913	1,309	3,225
	Error típ.	0,074	1,789	0,367	0,187	0,032	0,125	0,099	0,177	0,159	0,792	0,166	0,003	0,170	0,238	0,357	0,114	0,868
Pte	Media	23,000	17,000	18,333	35,000	25,800	25,000	24,533	19,750	26,667	15,667	32,500	13,000	12,000	18,000	26,000	20,400	14,250
	Error típ.	7,200	4,041	3,844	18,000	3,690	3,284	5,094	4,008	6,766	7,219	1,323	2,000	3,000	17,000	6,716	3,326	5,266
Pedr_sup	Media	47,500	53,333	48,333	32,500	51,000	39,833	35,200	27,500	35,000	30,000	54,250		13,500		57,000	44,600	56,250
	Error típ.	11,990	4,410	6,009	17,500	7,986	5,893	7,087	7,258	8,660	13,229	17,264		1,500		8,602	13,898	9,437
long_lad	Media	40,000	90,000	53,333	118,000	38,300	46,167	86,267	102,375	59,333	200,667	100,500	58,000	95,500	20,000	83,200	57,600	32,500
	Error típ.	17,200	23,094	17,638	7,000	8,234	8,724	16,721	19,427	23,919	74,086	12,017	28,000	13,500	20,000	19,983	16,317	5,867
A_Drje	Media	38,313	85,833	77,333	118,000	55,716	56,531	394,431	246,384	59,333	200,667	167,188	54,250	162,740	20,500	147,800	59,344	37,070
	Error típ.	14,653	26,784	32,359	7,000	17,432	19,771	317,656	124,902	23,919	74,086	81,256	31,750	53,740	19,500	96,627	11,138	13,745
WI	Media	5,101	6,163	5,835	5,970	4,991	4,975	6,055	6,485	5,317	7,279	5,948	5,837	7,185	4,675	5,815	5,632	5,611
	Error típ.	0,788	0,117	0,774	0,630	0,348	0,318	0,551	0,624	0,470	1,089	0,392	0,826	0,085	0,065	0,850	0,361	0,238

Anexo IV: Medias de la variables ensayadas por subgrupos de litofacies simplificadas



## **ANEJO V: BALANCES HÍDRICOS DIARIOS**

Conocida las precipitación diaria, la evapotranspiración corregida diaria, la CRAM y la reserva inicial se han aplicado las fórmulas desarrolladas para el cálculo de los balances hídricos diarios, los cuales se muestran a continuación:

### V.1. BALANCES DIARIOS PARA LA PRESA

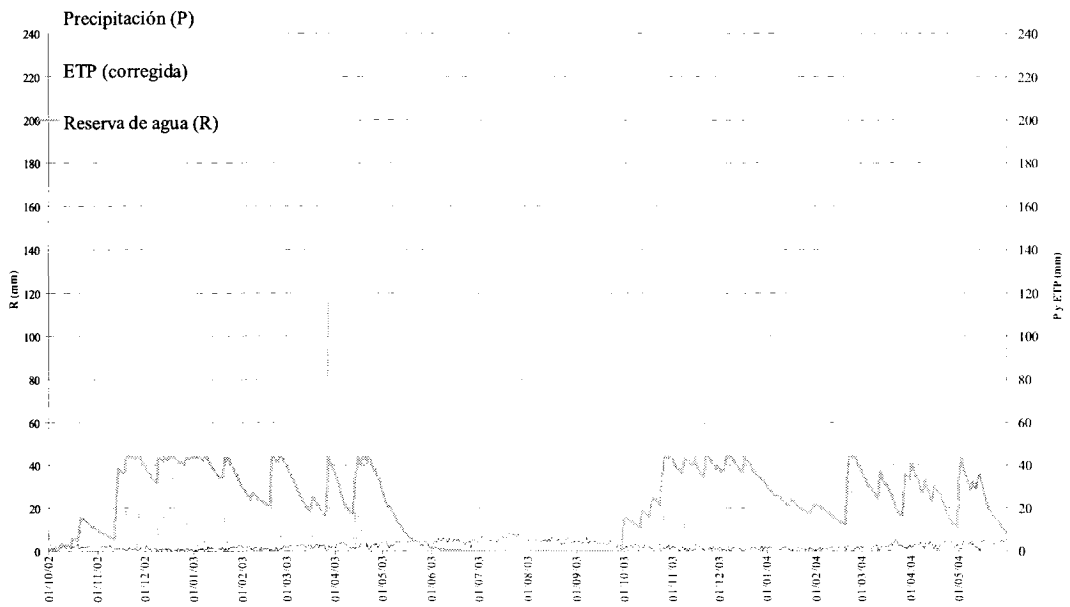


Figura V.1: Balance hídrico a nivel diario para la Presa y CRAM=43,78 mm

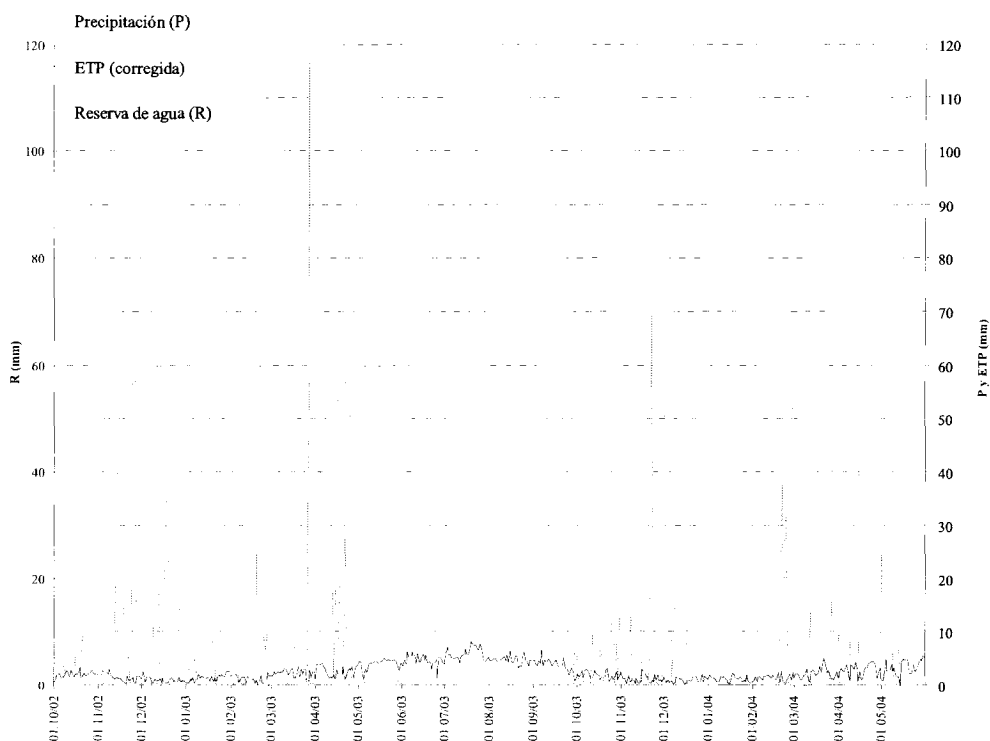


Figura V.2: Balance hídrico a nivel diario para la Presa y CRAM=56,90 mm

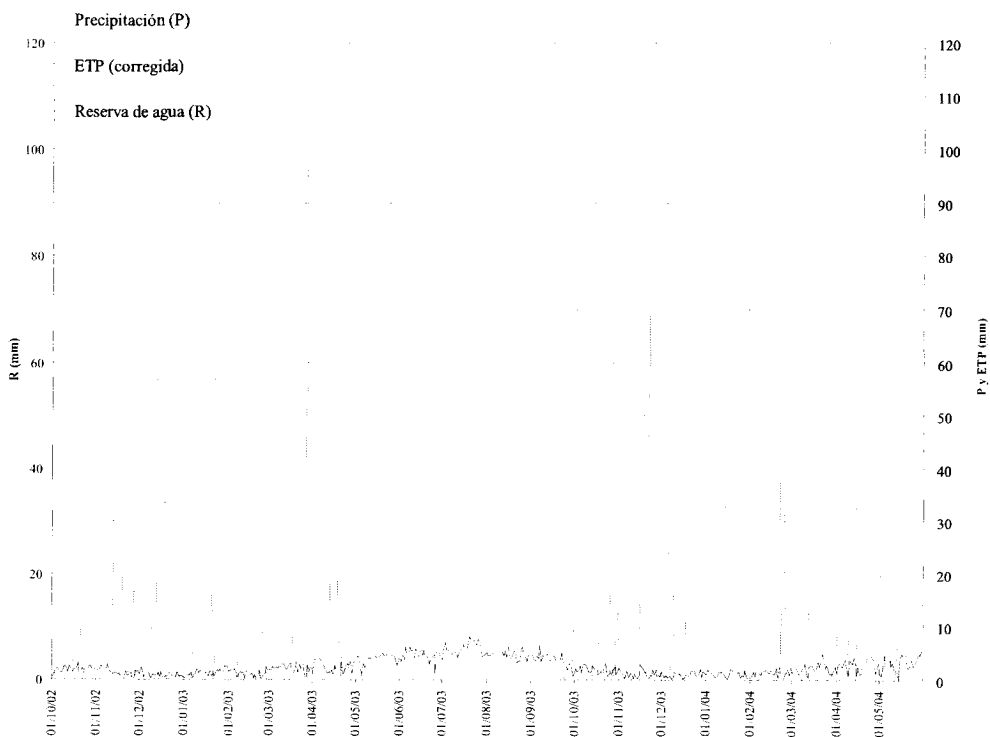


Figura V.3: Balance hídrico a nivel diario para la Presa y CRAM=57,0 mm

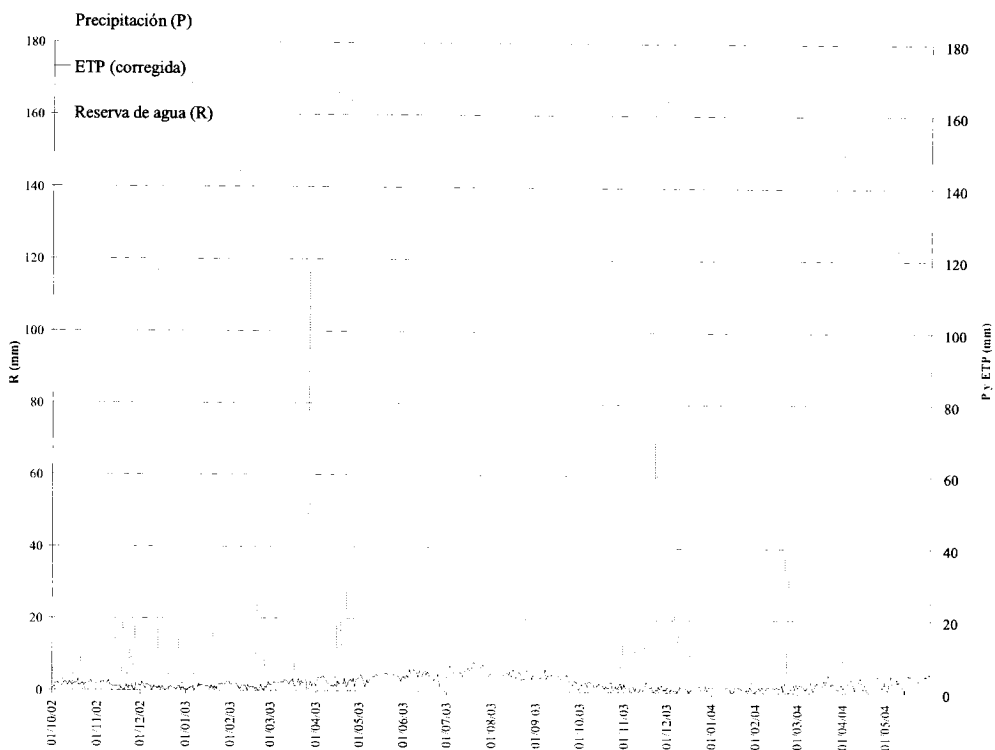


Figura V.4: Balance hídrico a nivel diario para la Presa y CRAM=168,80 mm

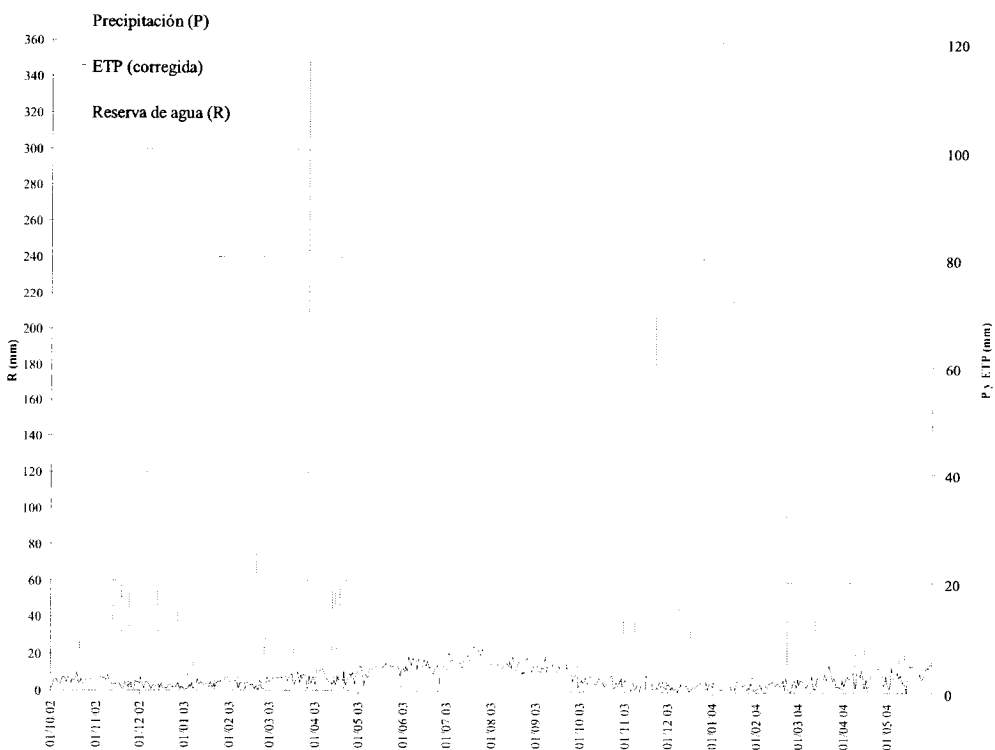


Figura V.5: Balance hídrico a nivel diario para la Presa y CRAM=244,20 mm

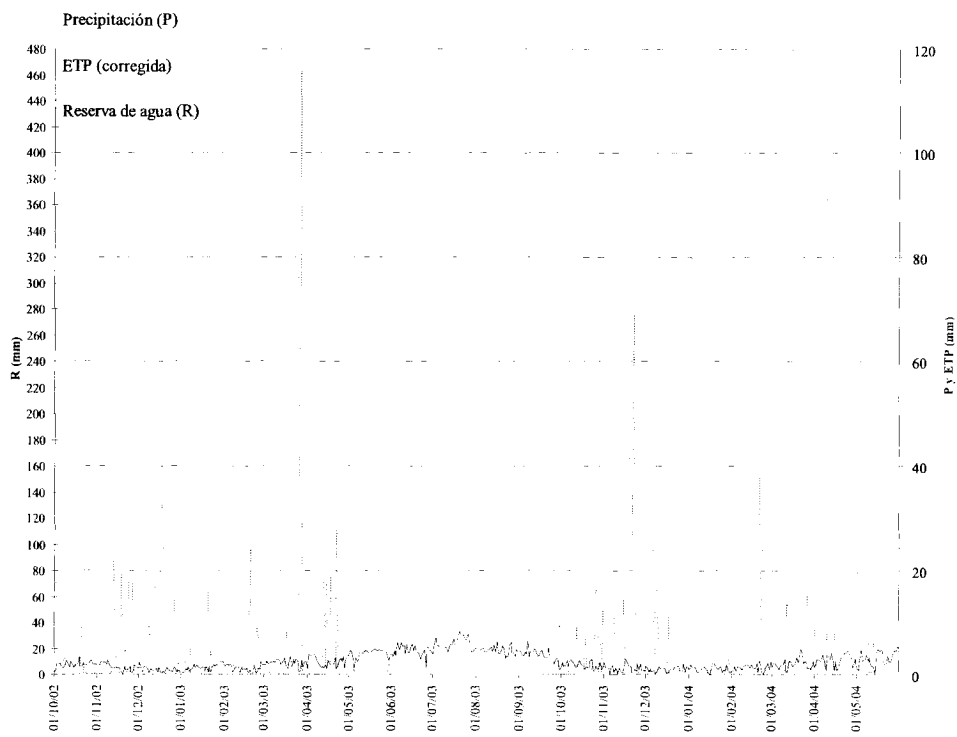


Figura V.6: Balance hídrico a nivel diario para la Presa y CRAM=399,00 mm

## V.2. BALANCES DIARIOS PARA ALONSO

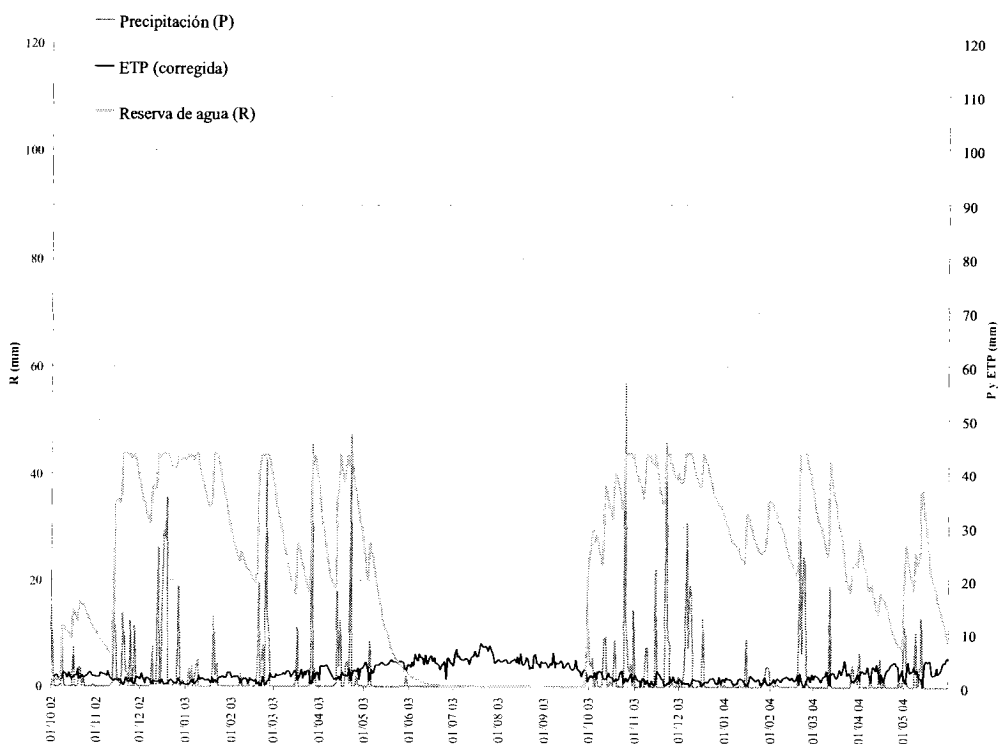


Figura V.7: Balance hídrico a nivel diario para Alosno y CRAM=43,70 mm

Anejo V: Balances hídricos diarios

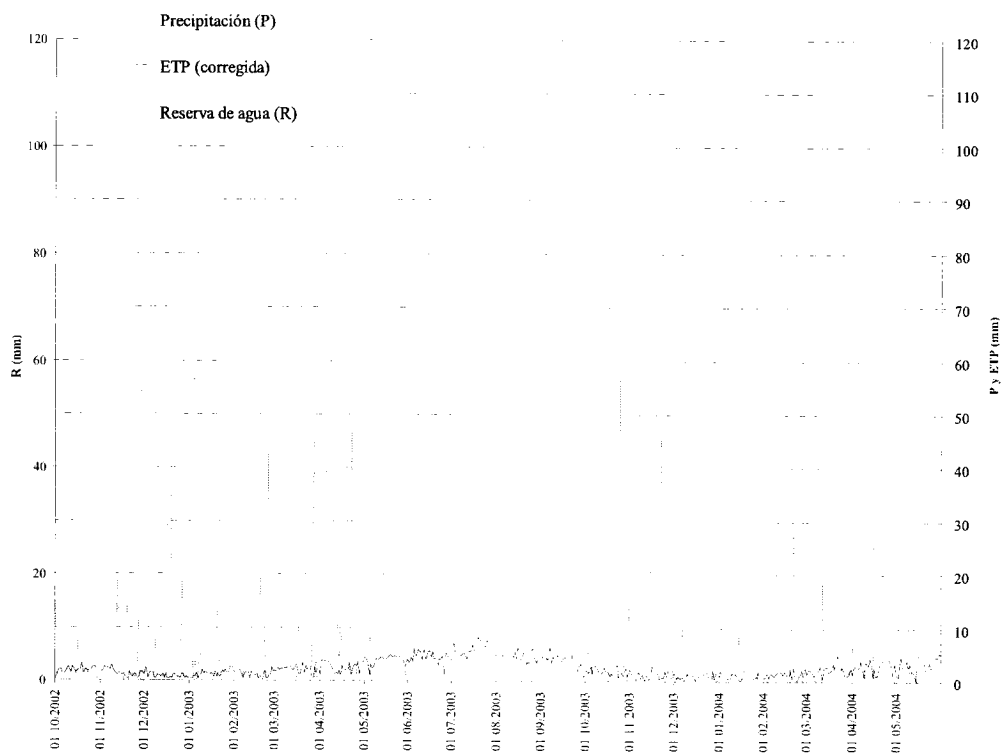


Figura V.8: Balance hídrico a nivel diario para Alosno y CRAM=56,90 mm

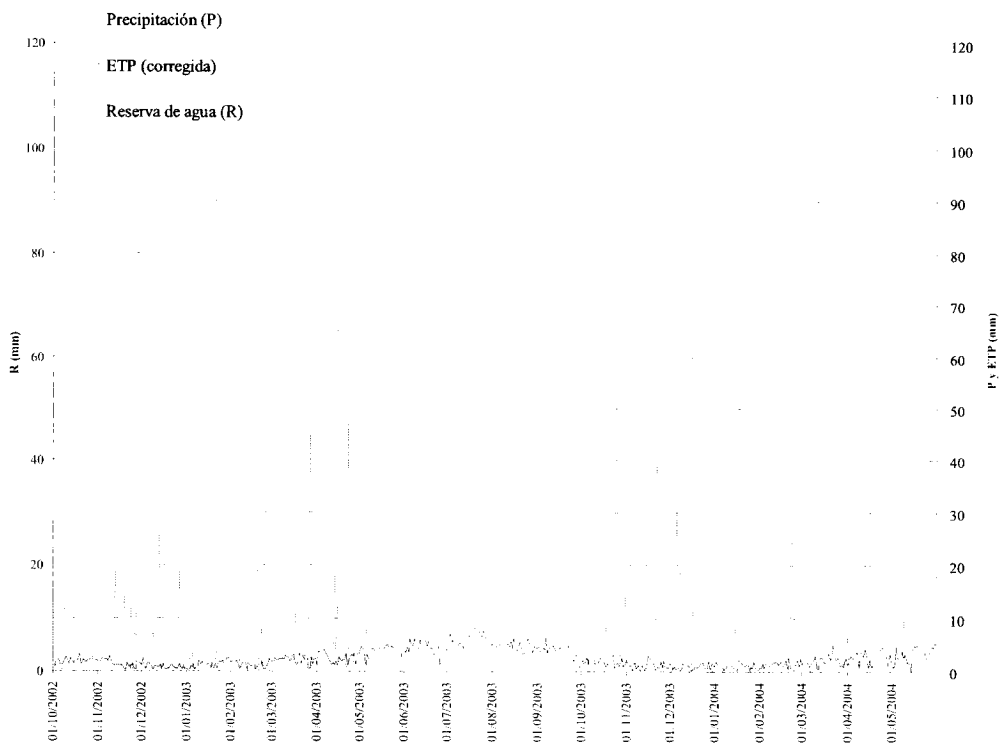


Figura V.9: Balance hídrico a nivel diario para Alosno y CRAM=65,33 mm

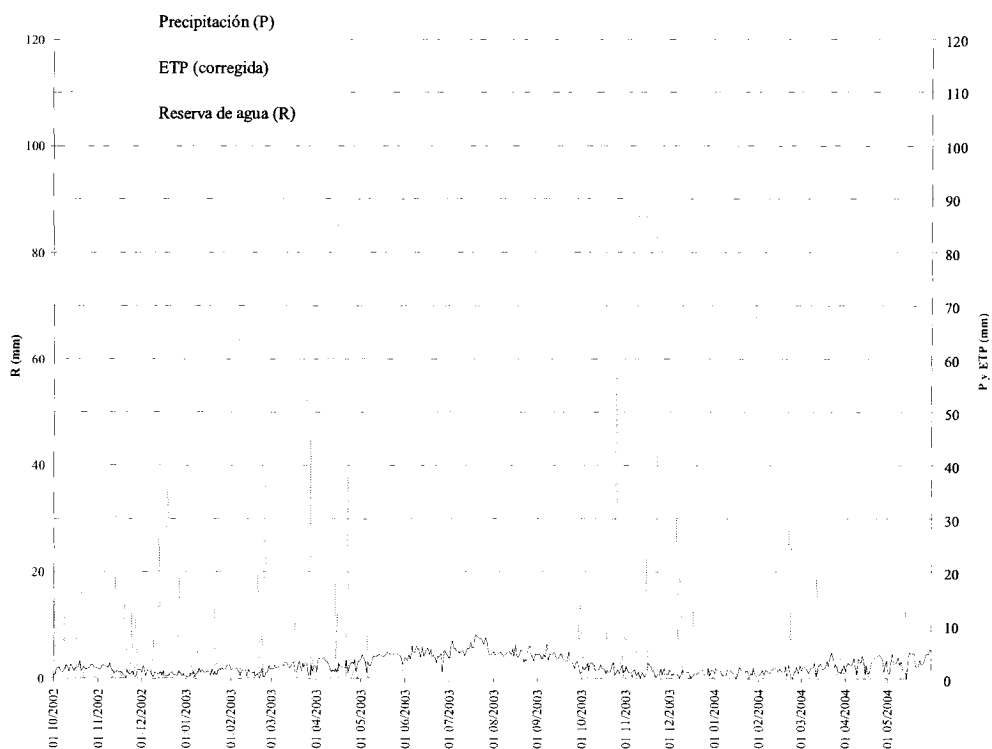
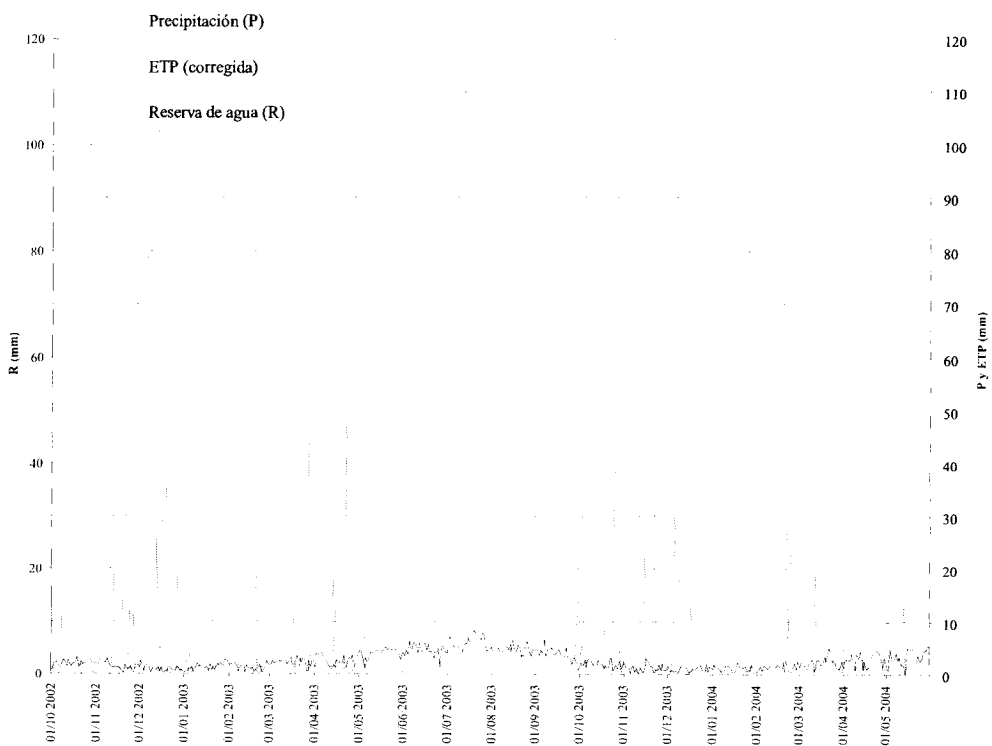


Figura V.10: Balance hídrico a nivel diario para Alosno y CRAM=87,00 mm



V.11: Balance hídrico a nivel diario para Alosno y CRAM=102,60 mm

Anejo V: Balances hídricos diarios

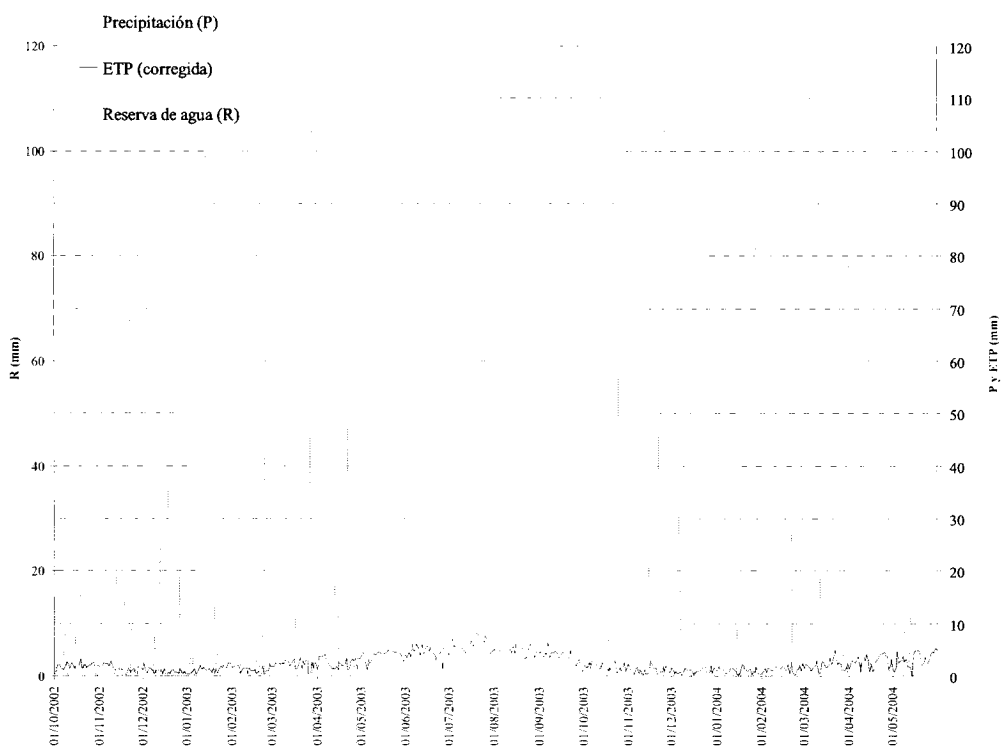


Figura V.12: Balance hídrico a nivel diario para Alosno y CRAM=105,60 mm

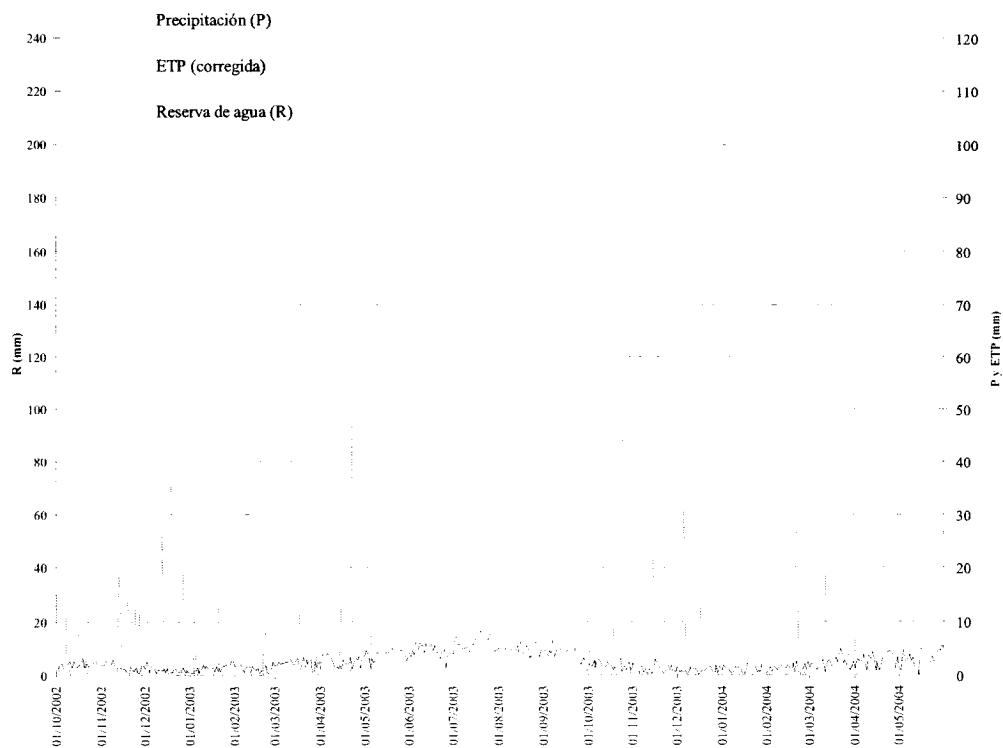


Figura V.13: Balance hídrico a nivel diario para Alosno y CRAM=127,60 mm

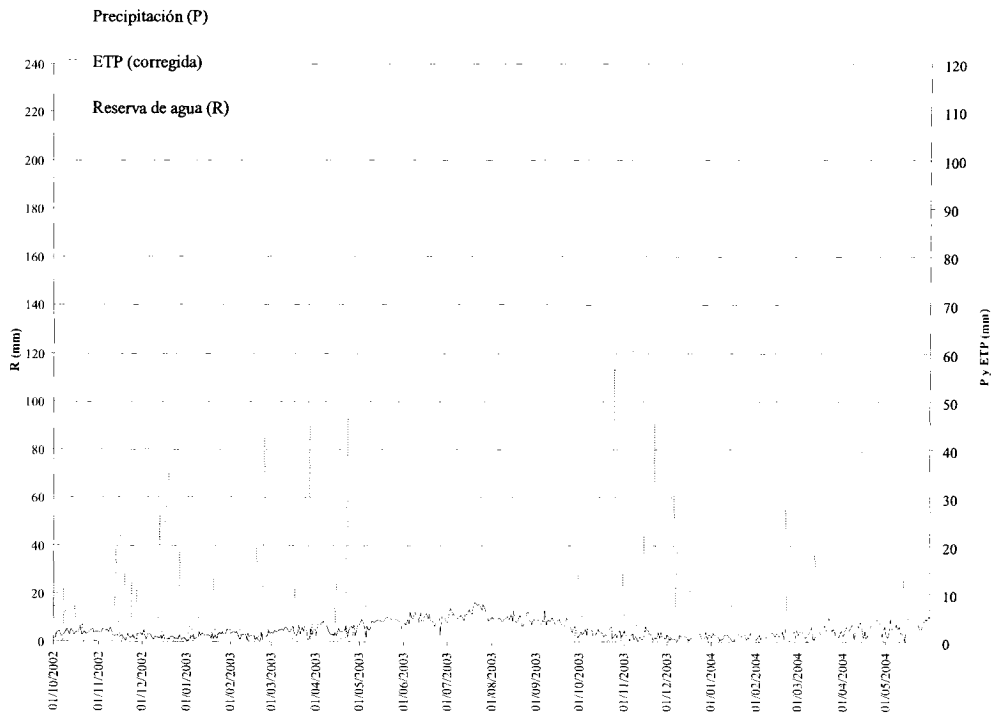


Figura V.14: Balance hídrico a nivel diario para Alosno y CRAM=130,00 mm

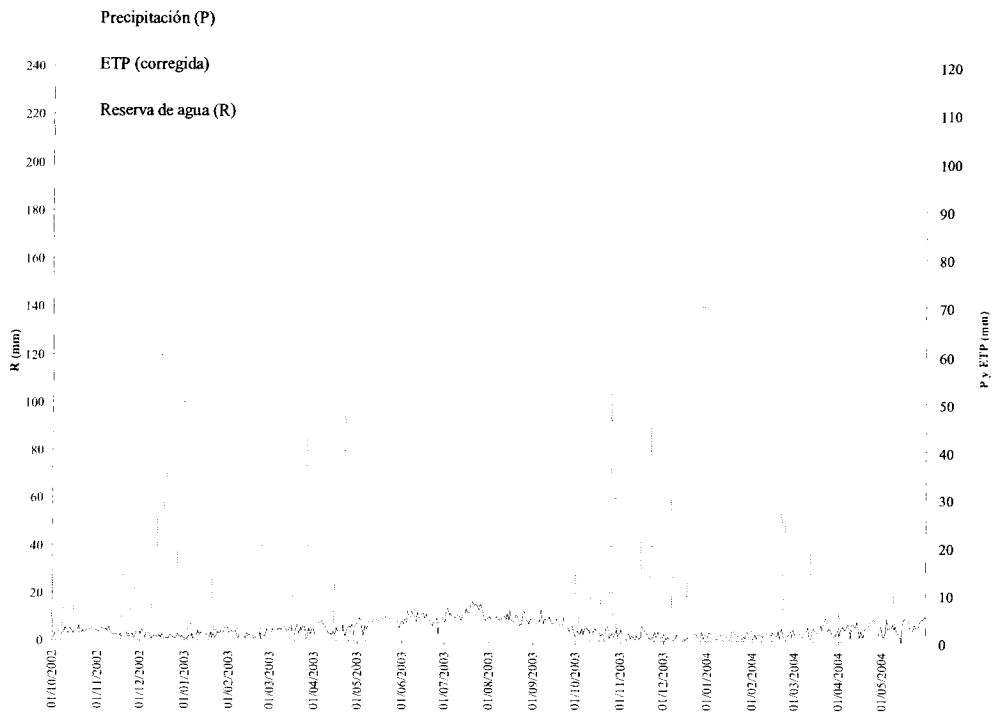


Figura V.15: Balance hídrico a nivel diario para Alosno y CRAM=150,20 mm

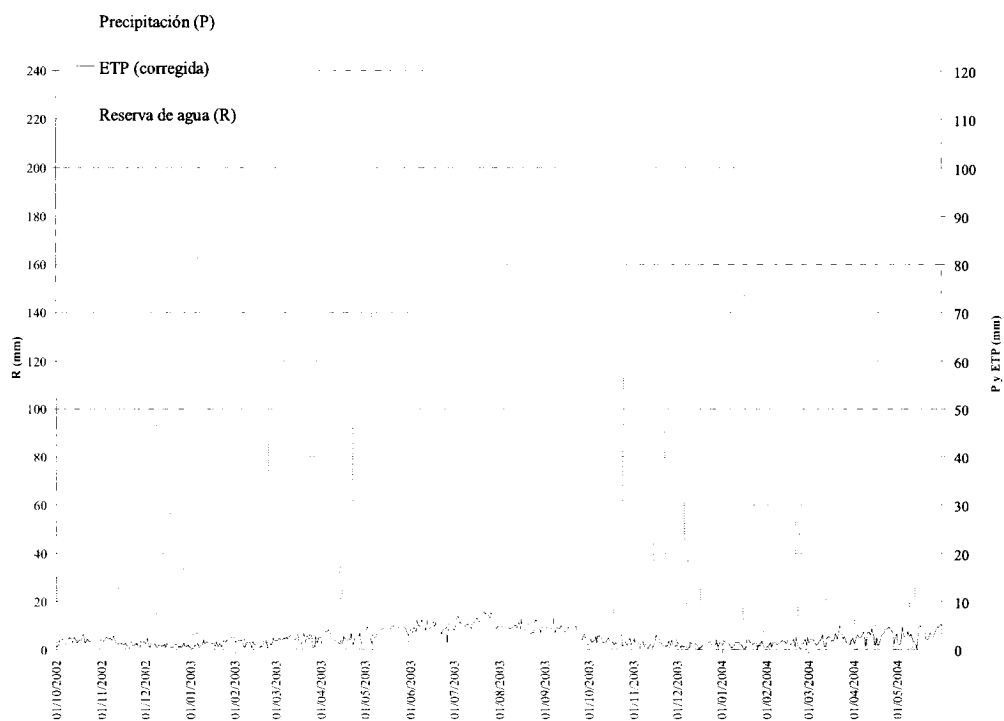


Figura V.16: Balance hídrico a nivel diario para Alosno y CRAM=163,40 mm

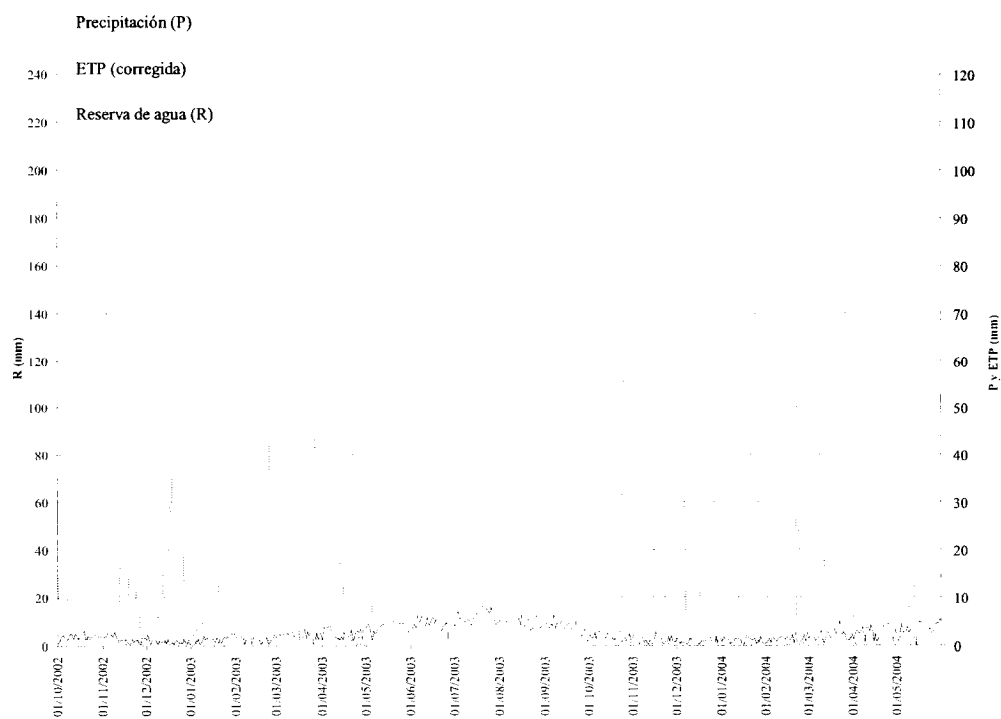


Figura V.17: Balance hídrico a nivel diario para Alosno y CRAM=176,80 mm

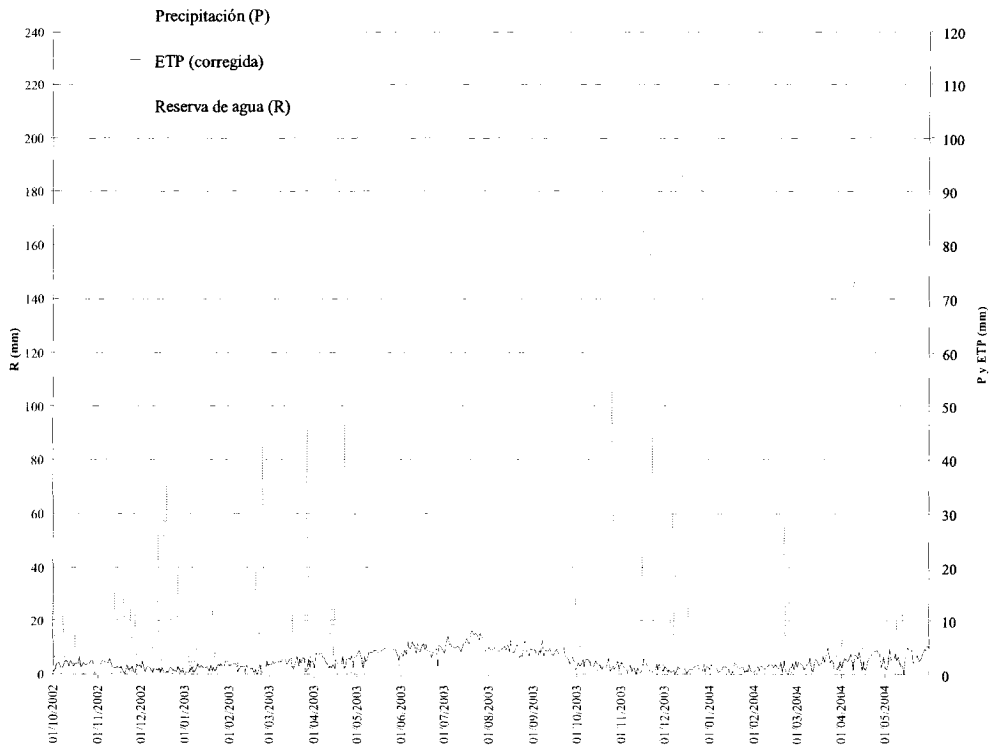


Figura V.18: Balance hídrico a nivel diario para Alosno y CRAM=189,80 mm

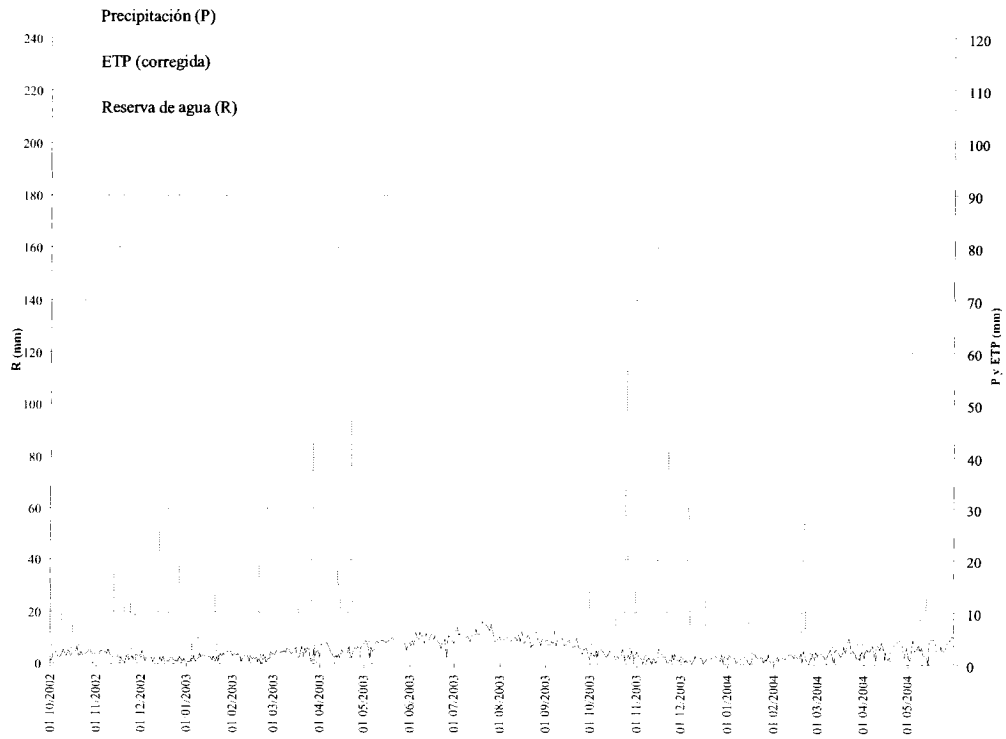


Figura V.19: Balance hídrico a nivel diario para Alosno y CRAM=193,50 mm

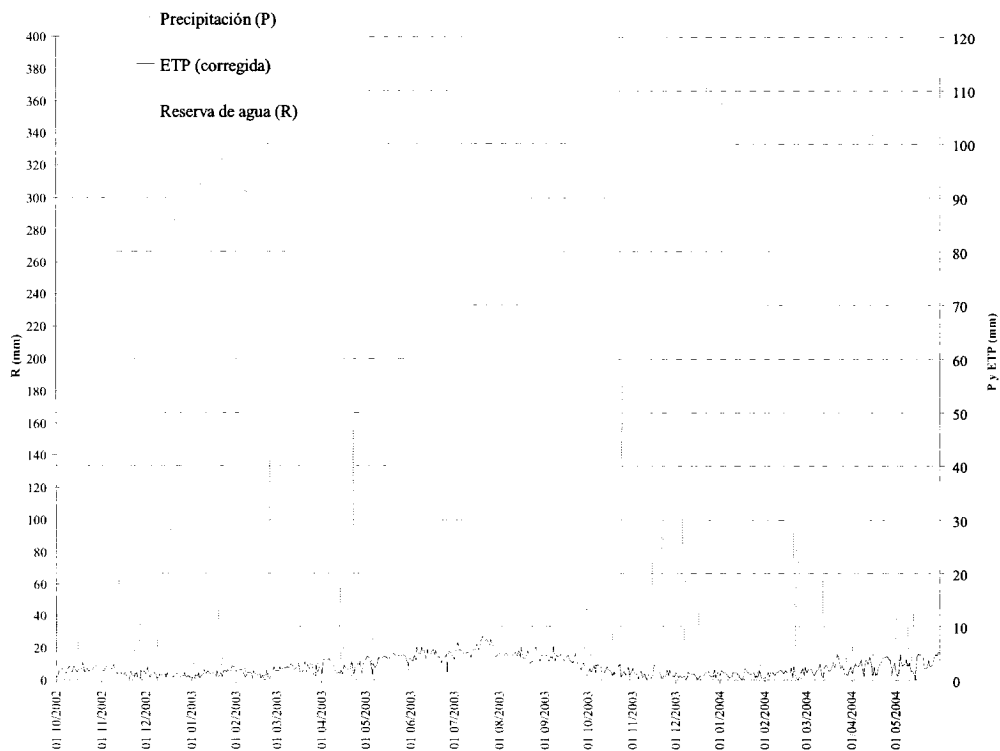


Figura V.20: Balance hídrico a nivel diario para Alosno y CRAM=193,50 mm

### V.3. BALANCES DIARIOS PARA SAN BARTOLOMÉ

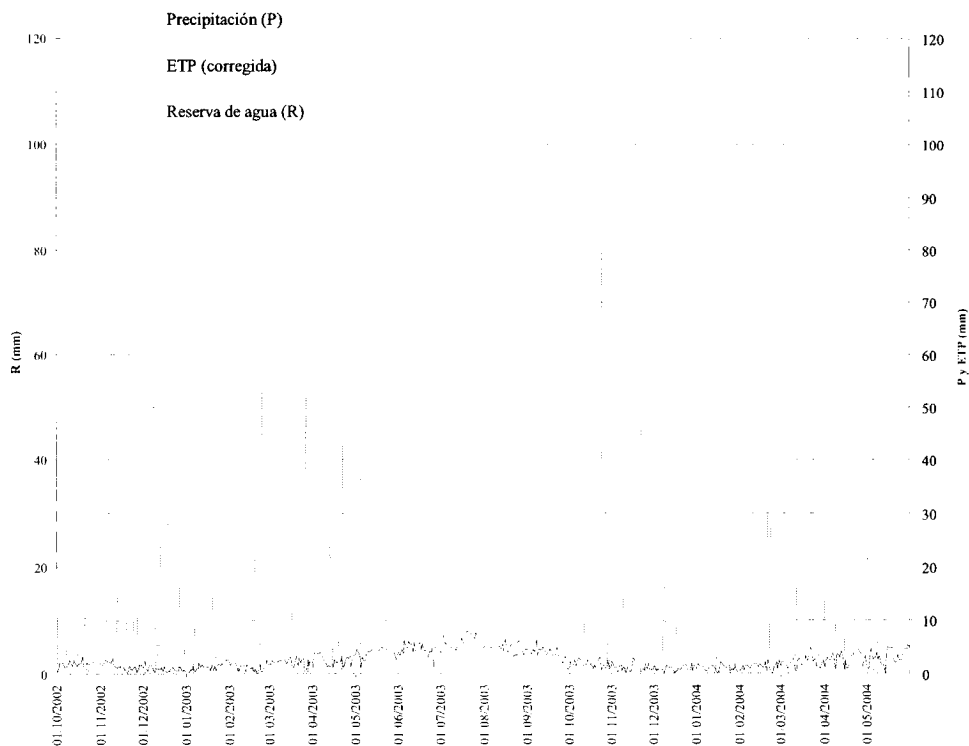


Figura V.21: Balance hídrico a nivel diario para San Bartolomé y CRAM=56,90 mm

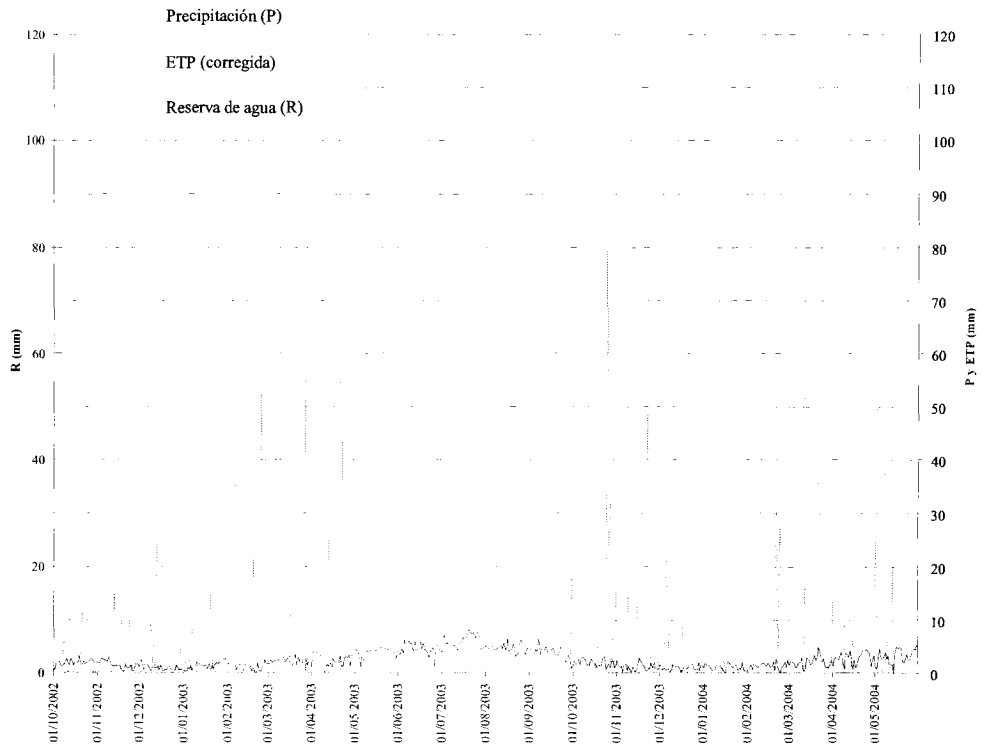


Figura V.22: Balance hídrico a nivel diario para San Bartolomé y CRAM=57,00 mm

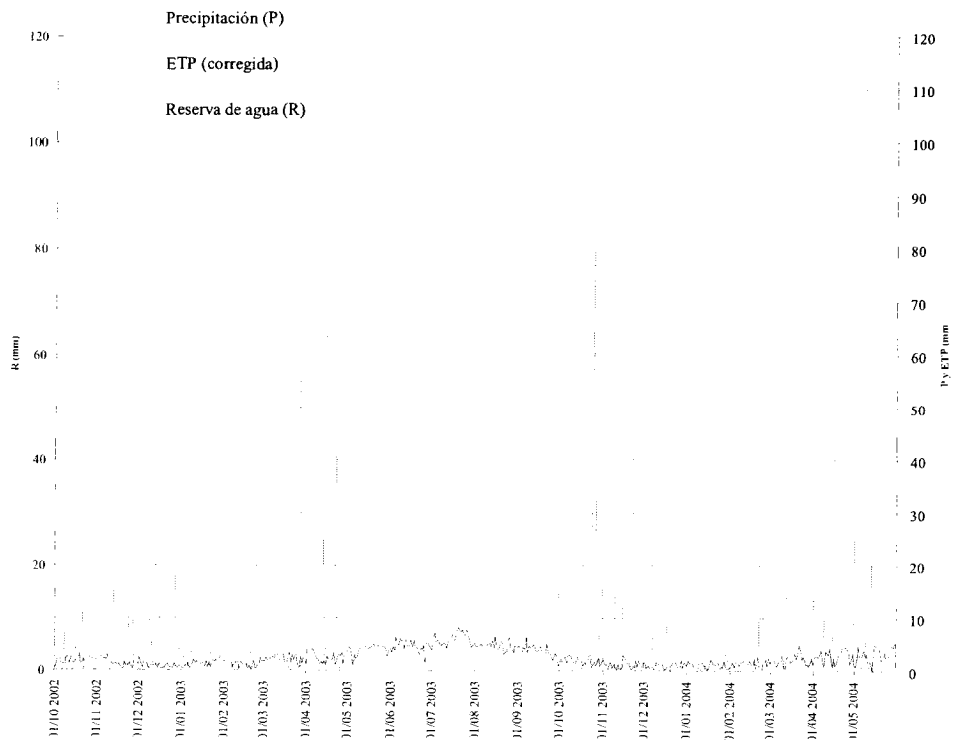


Figura V.23: Balance hídrico a nivel diario para San Bartolomé y CRAM=65,33 mm

Anejo V: Balances hídricos diarios



Figura V.24: Balance hídrico a nivel diario para San Bartolomé y CRAM=83,00 mm

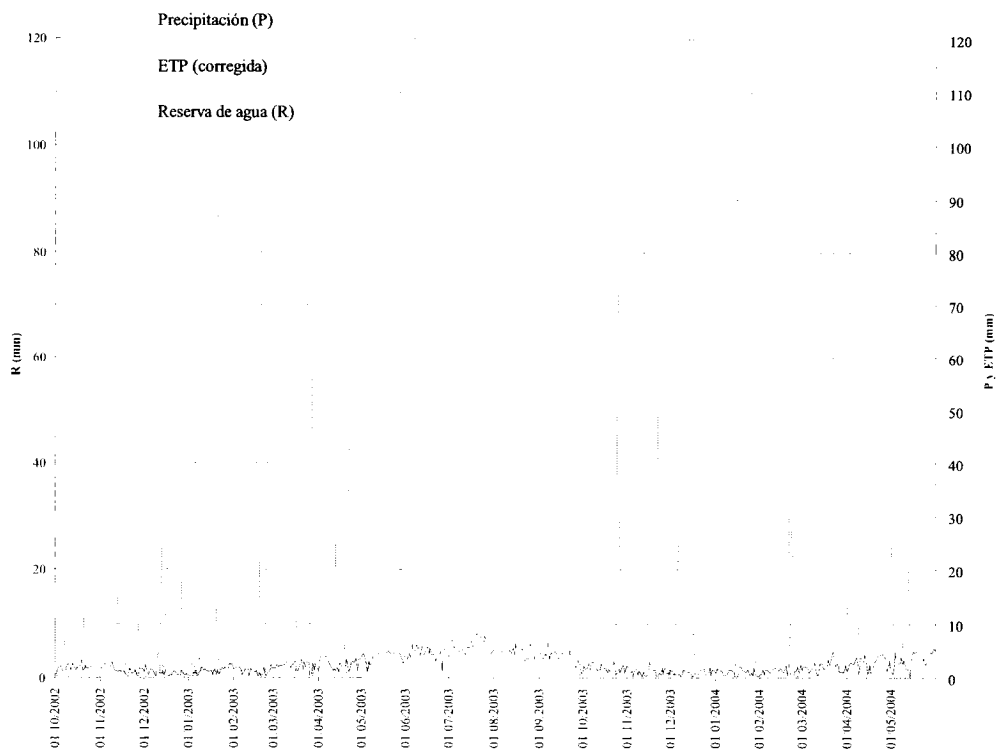


Figura V.25: Balance hídrico a nivel diario para San Bartolomé y CRAM=87,00 mm

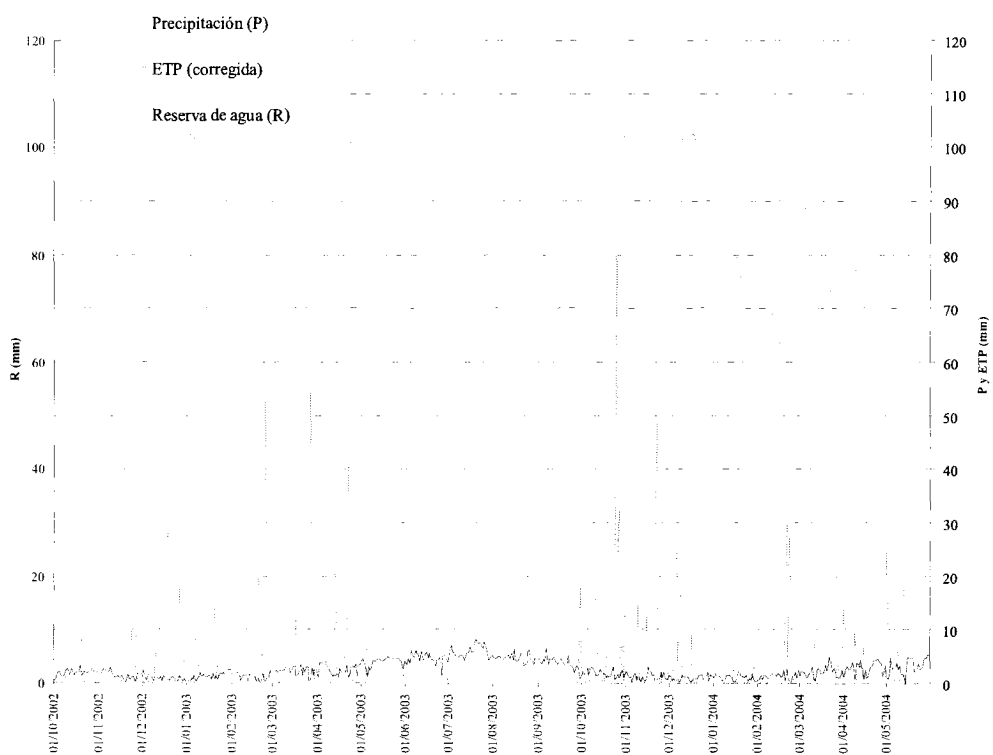


Figura V.26: Balance hídrico a nivel diario para San Bartolomé y CRAM=102,60 mm

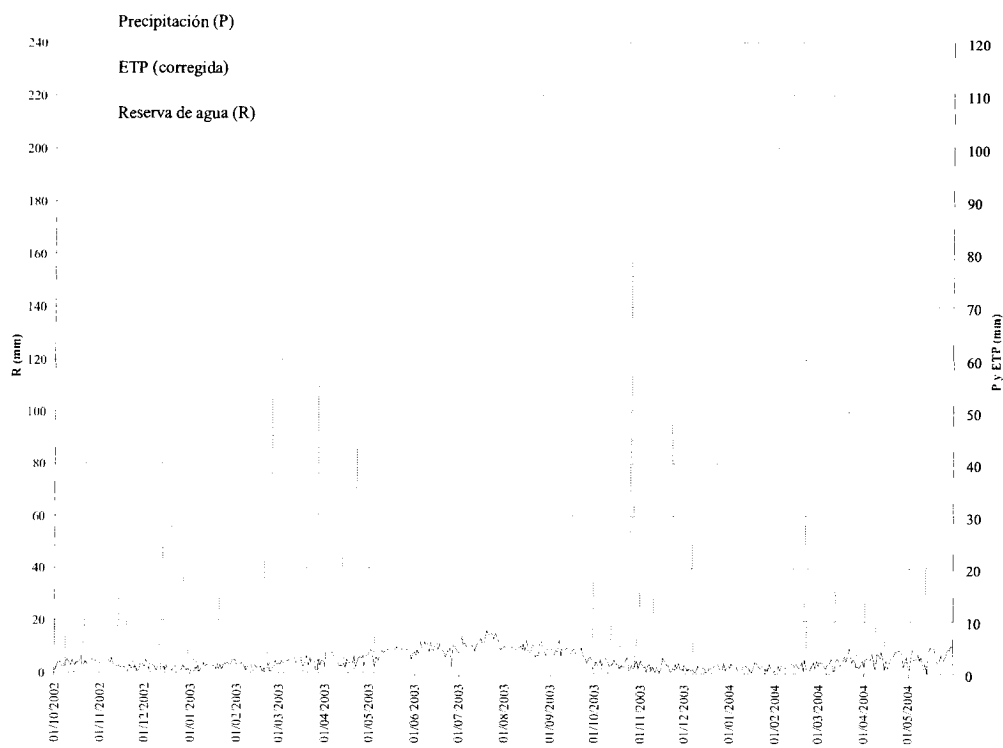


Figura V.27: Balance hídrico a nivel diario para San Bartolomé y CRAM=127,60 mm

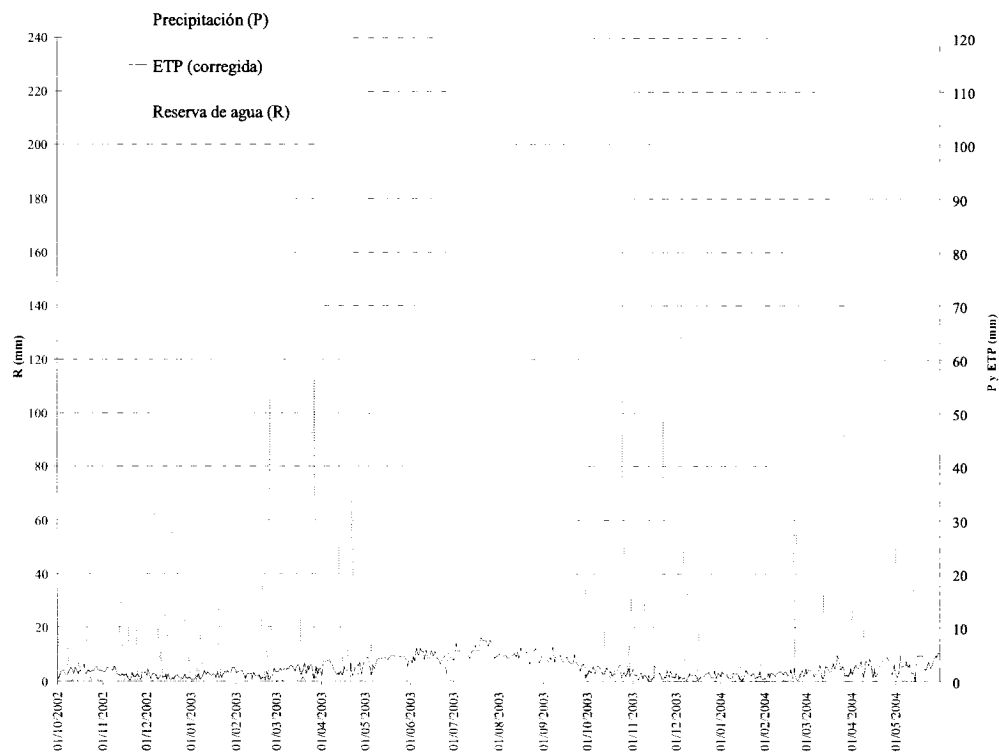


Figura V.28: Balance hídrico a nivel diario para San Bartolomé y CRAM=130,00 mm

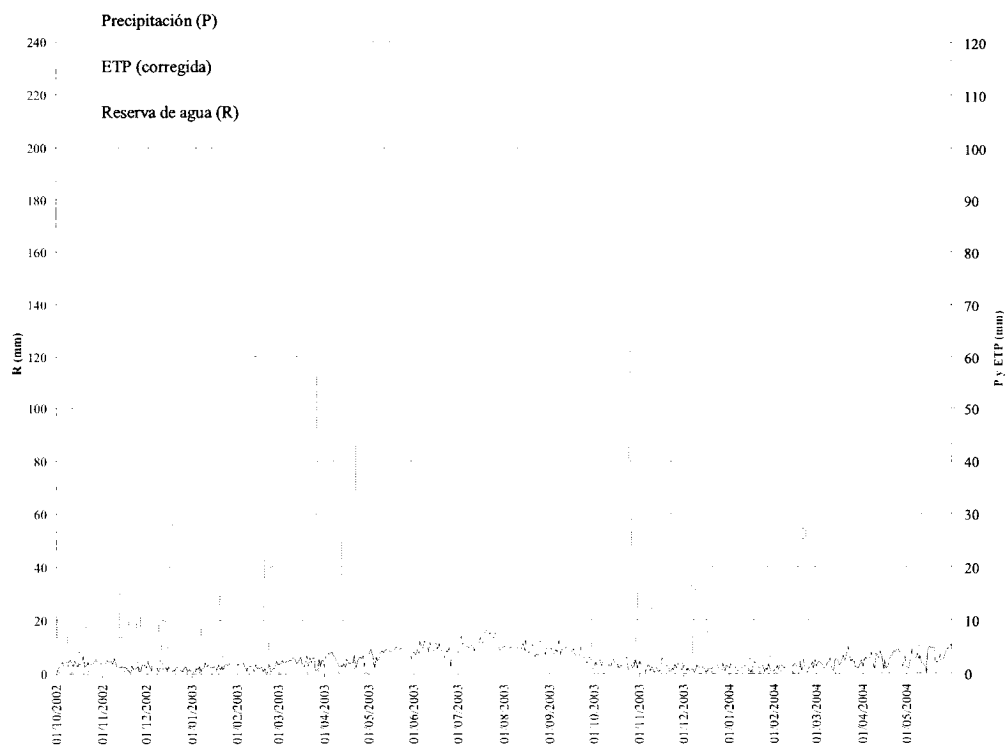


Figura V.29: Balance hídrico a nivel diario para San Bartolomé y CRAM=150,20 mm

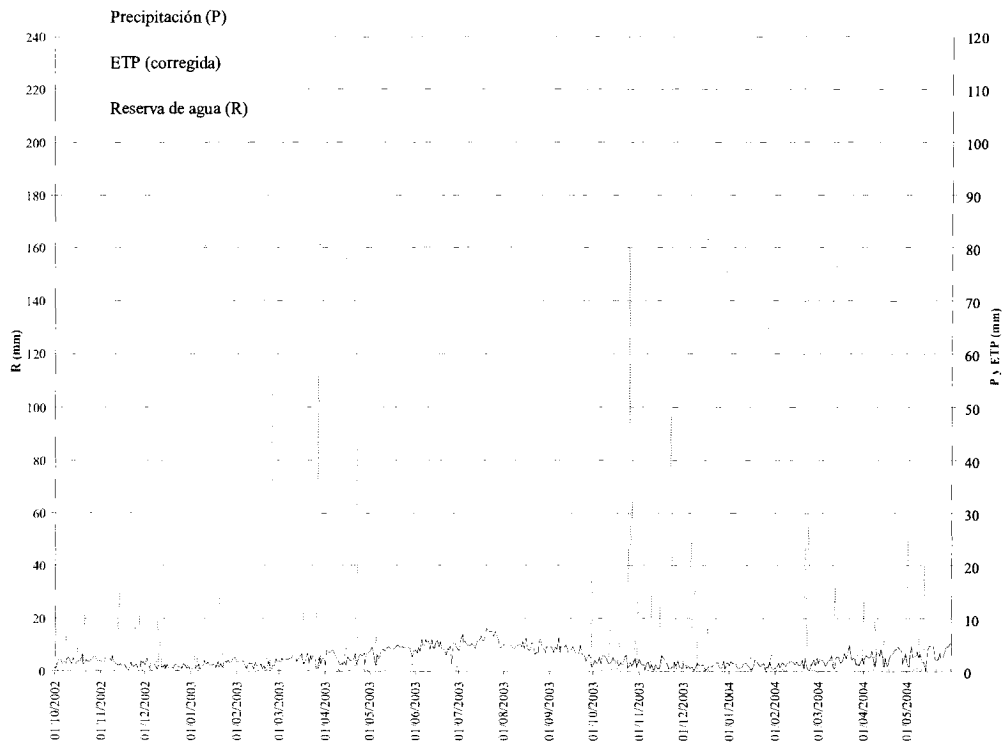


Figura V.30: Balance hídrico a nivel diario para San Bartolomé y  $CRAM=163,40\text{ mm}$

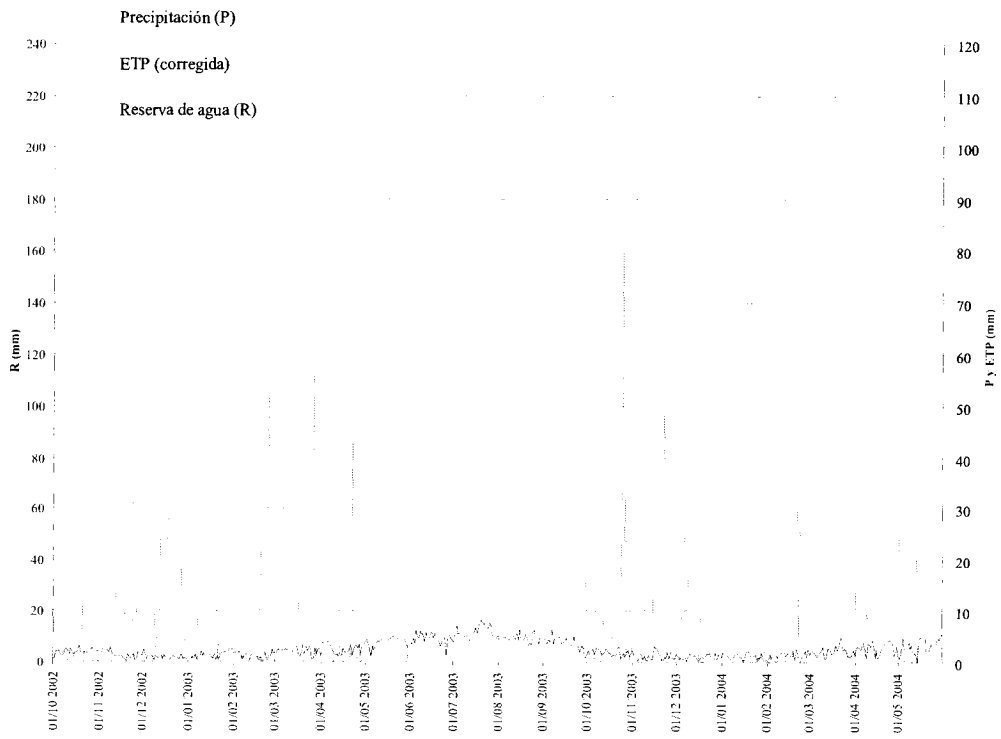


Figura V.31: Balance hídrico a nivel diario para San Bartolomé y  $CRAM=168,80\text{ mm}$

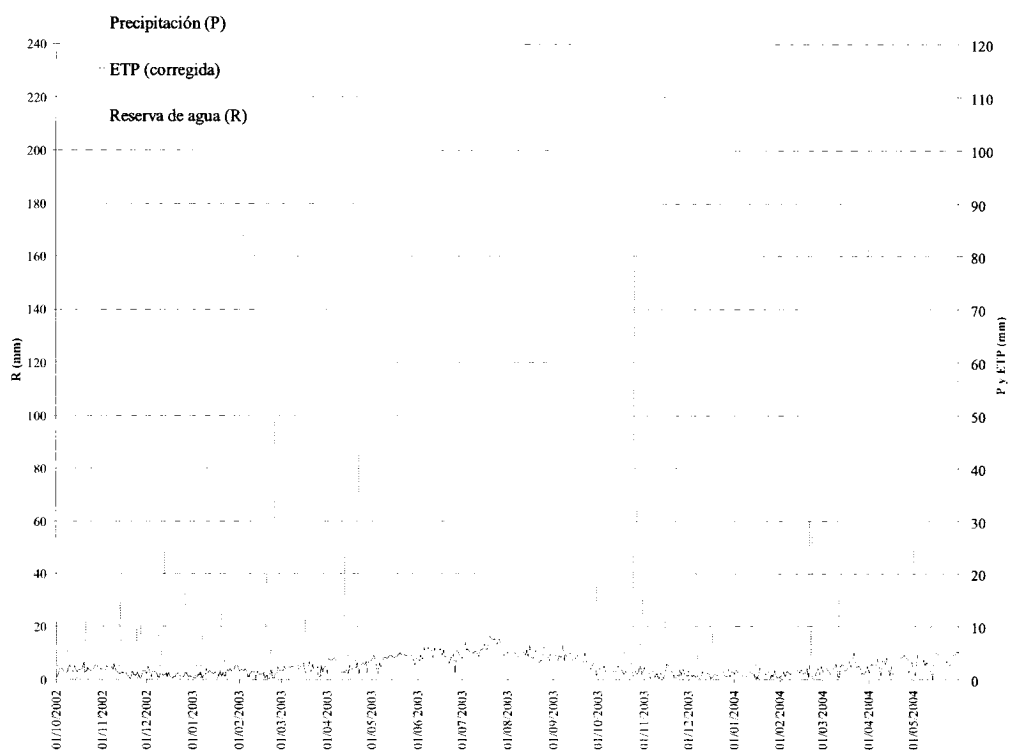


Figura V.32: Balance hídrico a nivel diario para San Bartolomé y CRAM=189,90 mm

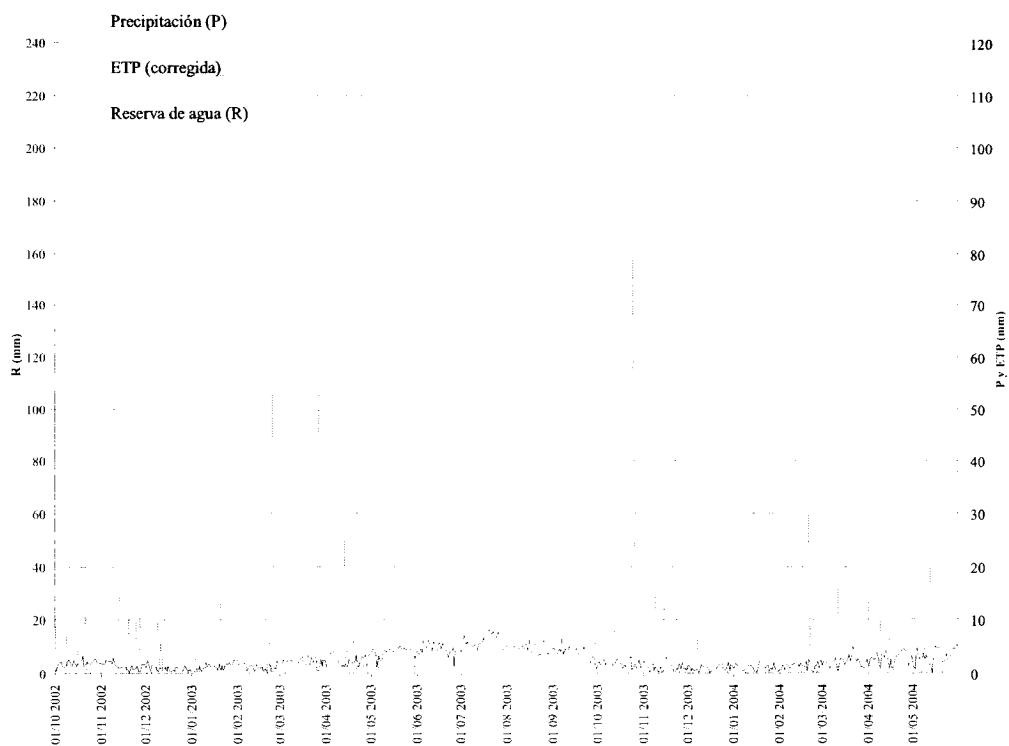


Figura V.33: Balance hídrico a nivel diario para San Bartolomé y CRAM=227,80 mm

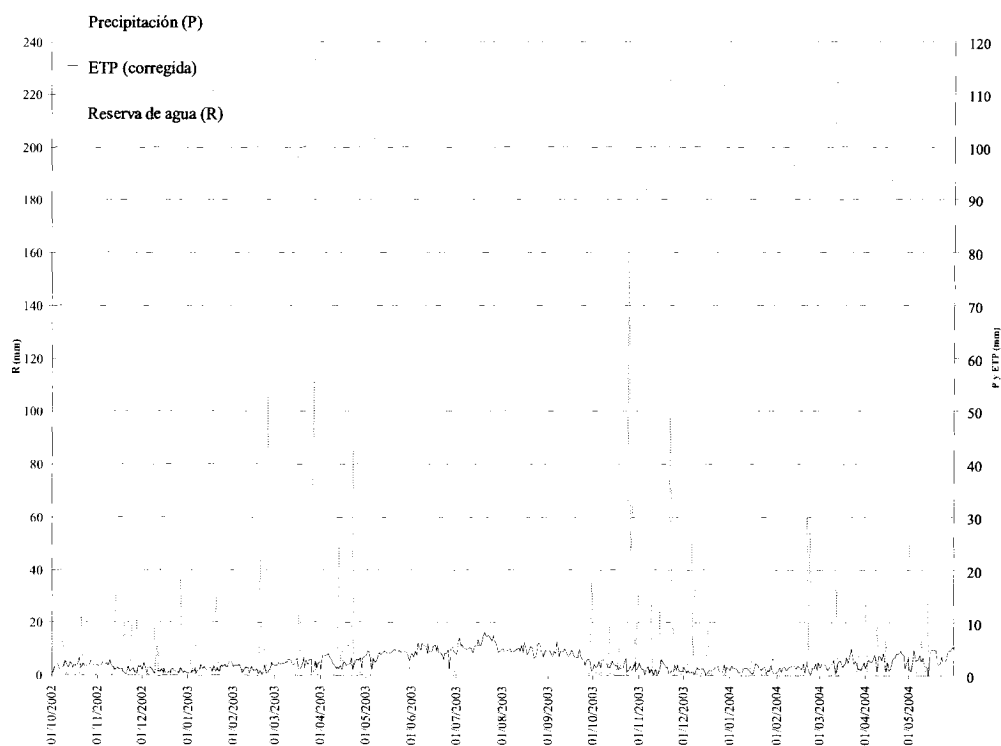


Figura V.34: Balance hídrico a nivel diario para San Bartolomé y CRAM=233,80 mm

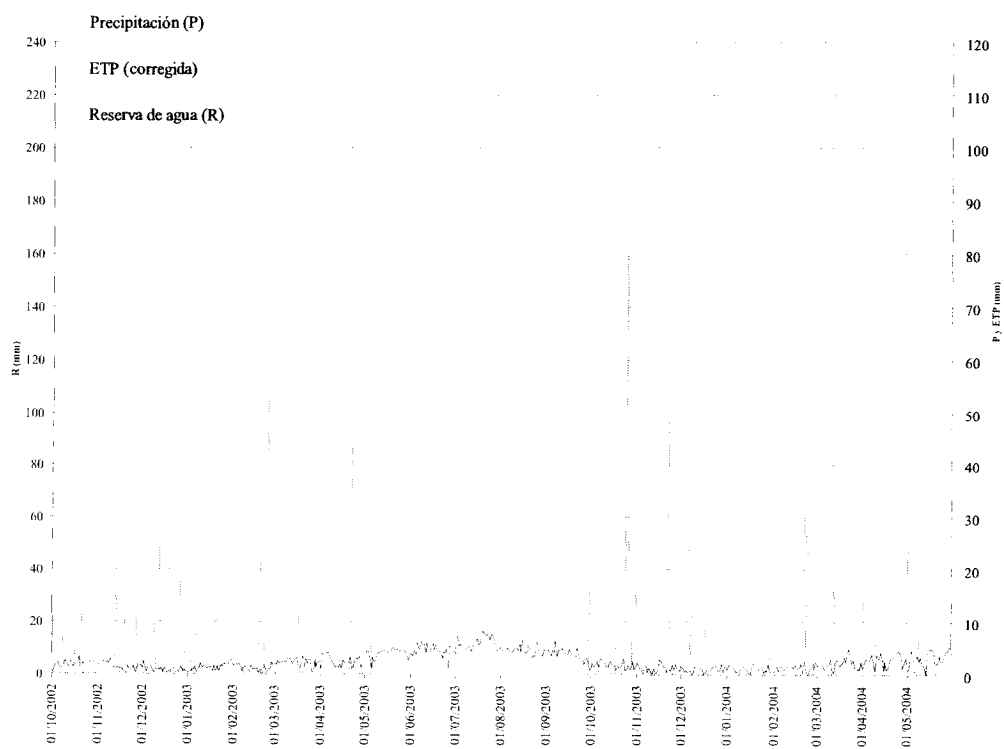


Figura V.35: Balance hídrico a nivel diario para San Bartolomé y CRAM=234,50 mm

Anejo V: Balances hídricos diarios

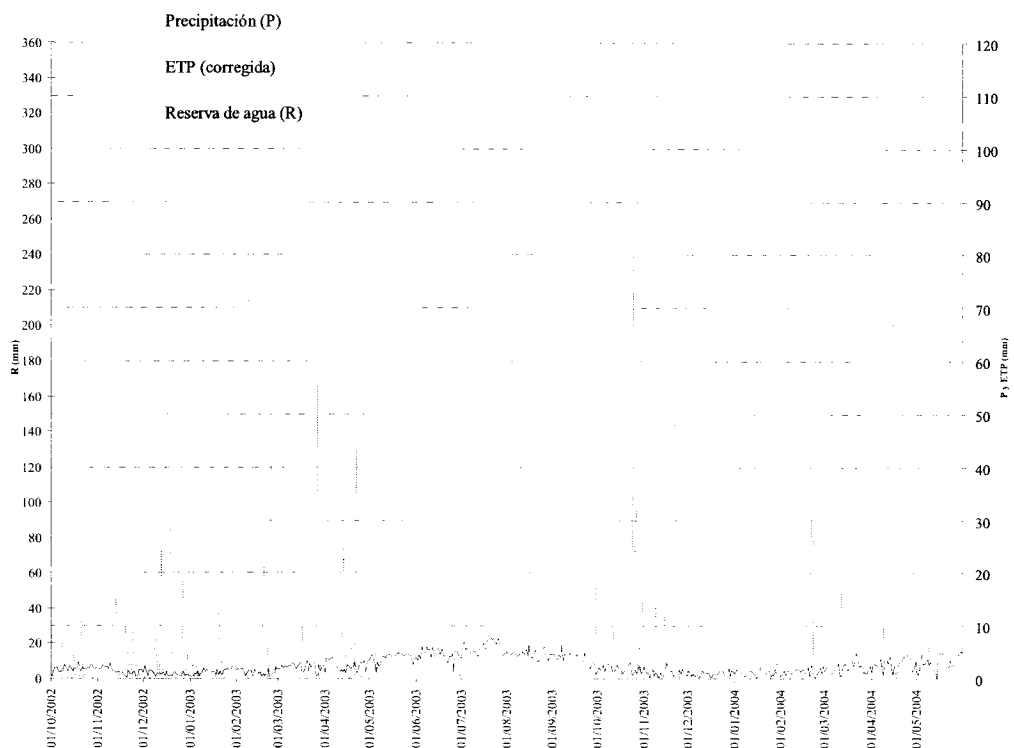


Figura V.36: Balance hídrico a nivel diario para San Bartolomé y CRAM=244,20 mm

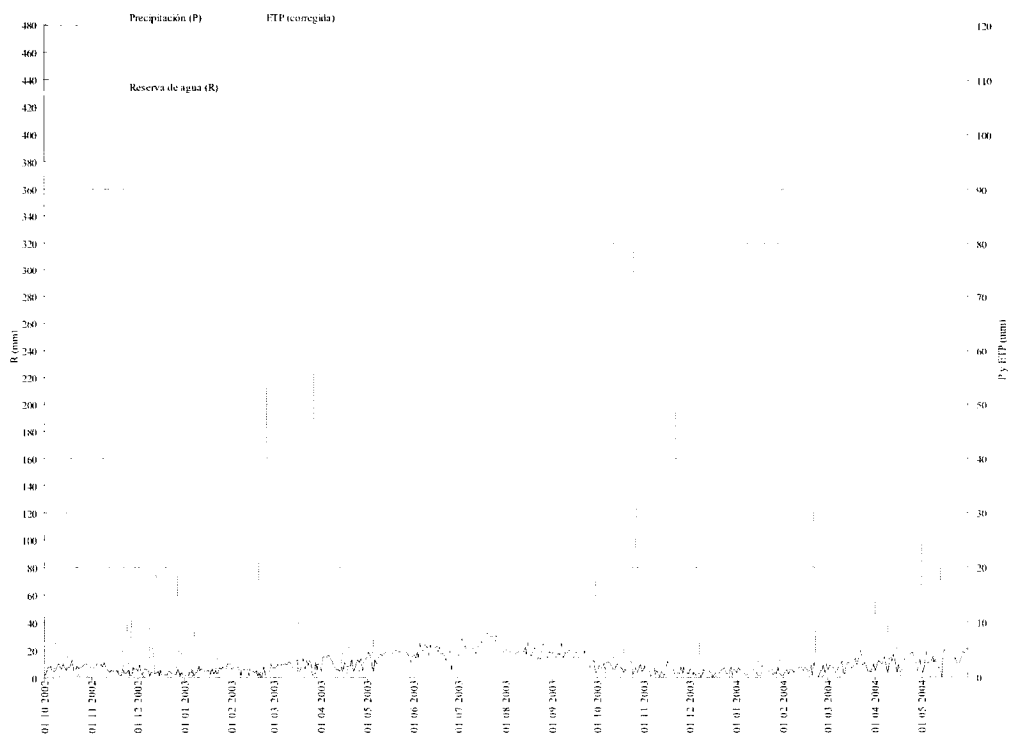


Figura V.37: Balance hídrico a nivel diario para San Bartolomé y CRAM=399,00 mm

**V.4. BALANCES DIARIOS PARA LA BURRILLA**

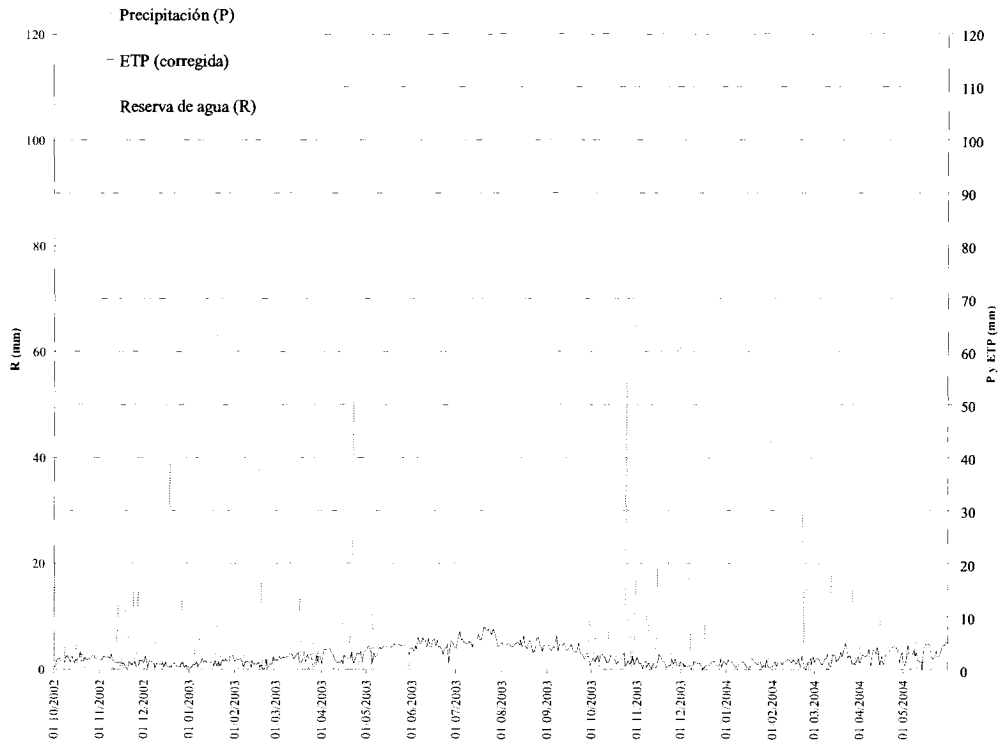


Figura V.38: Balance hídrico a nivel diario para la Burrilla y CRAM=65,35 mm

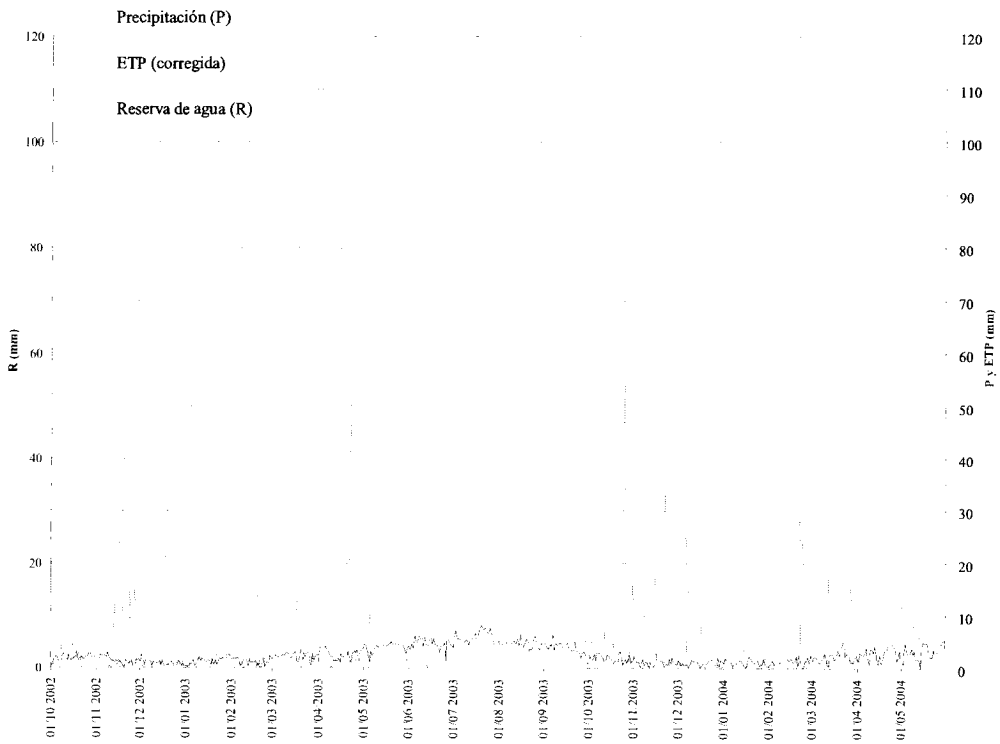


Figura V.39: Balance hídrico a nivel diario para la Burrilla y CRAM=102,60 mm

Anejo V: Balances hídricos diarios

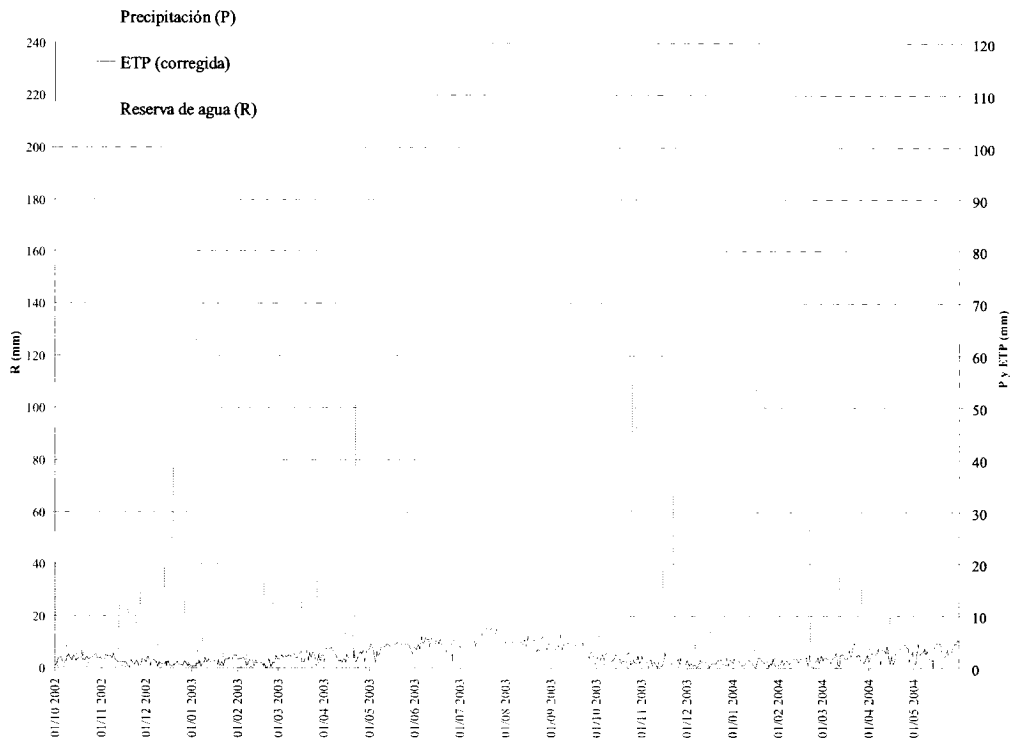


Figura V.40: Balance hídrico a nivel diario para la Burrilla y CRAM=130,00 mm

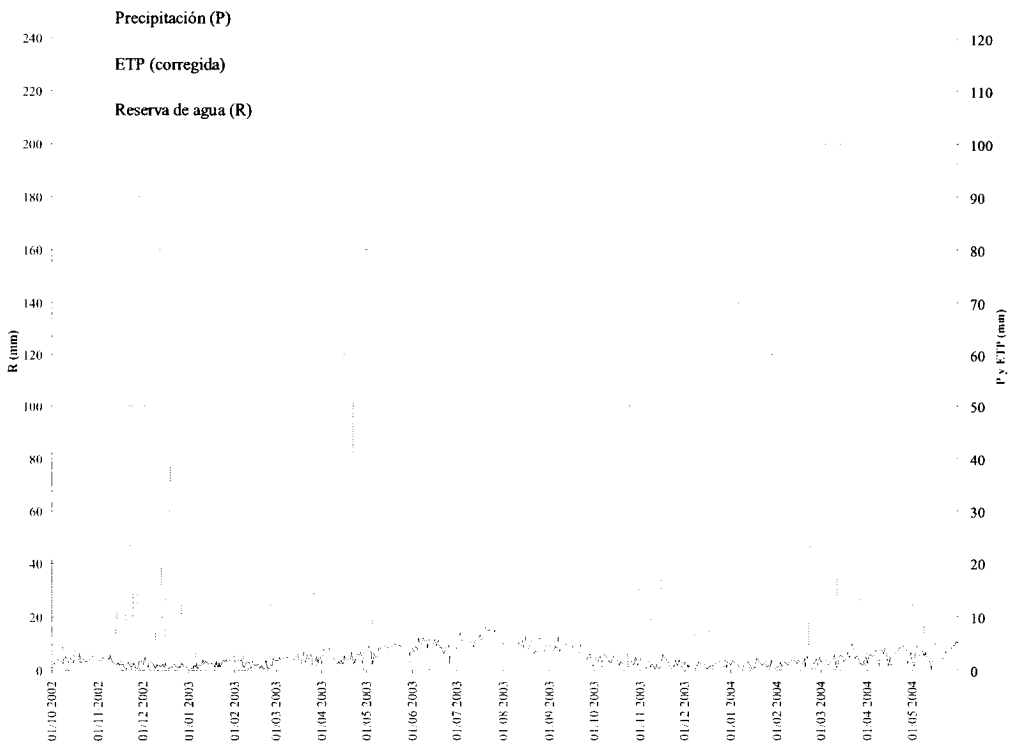


Figura V.41: Balance hídrico a nivel diario para la Burrilla y CRAM=150,20 mm

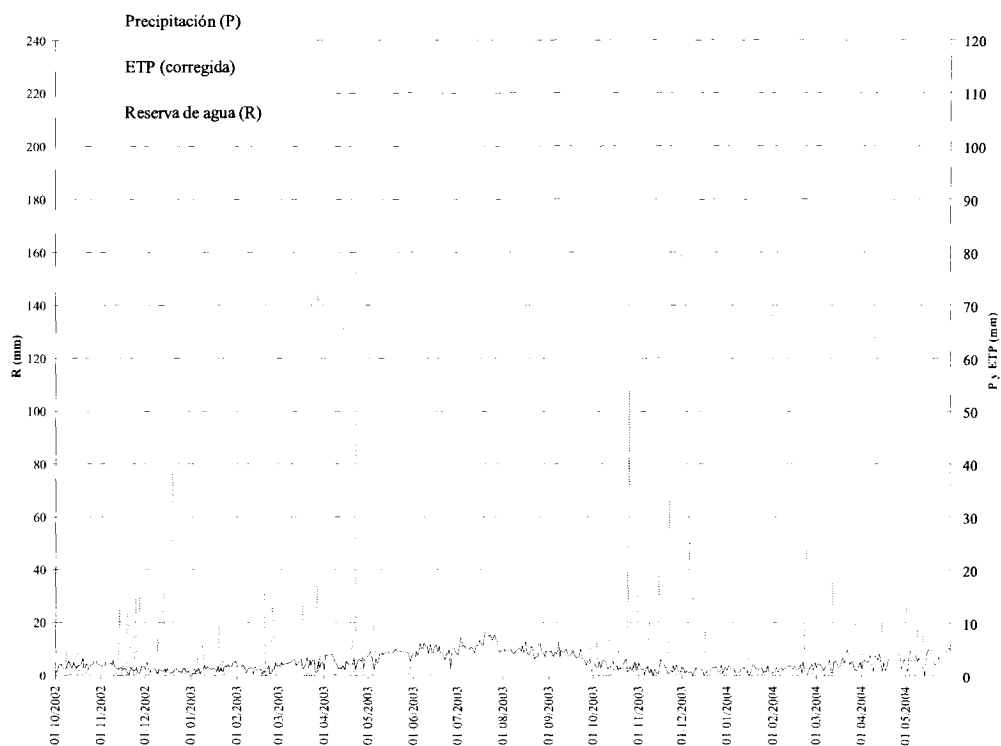


Figura V.42: Balance hídrico a nivel diario para la Burrilla y CRAM=163,40 mm

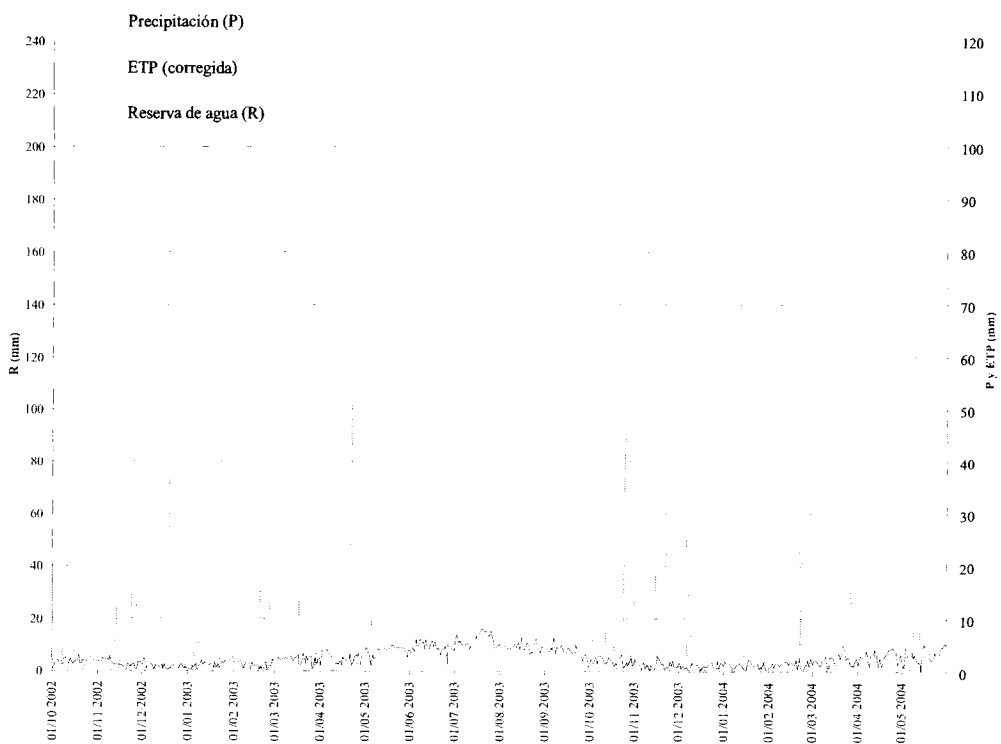


Figura V.43: Balance hídrico a nivel diario para la Burrilla y CRAM=176,80 mm

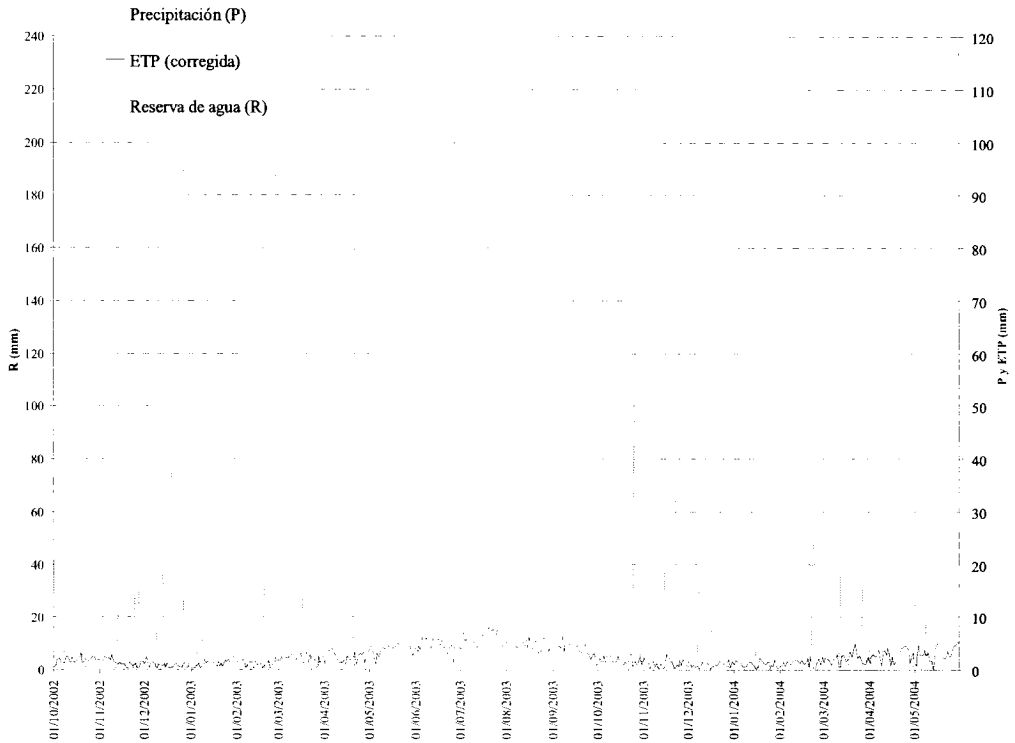


Figura V.44: Balance hídrico a nivel diario para la Burrilla y CRAM=189,80 mm

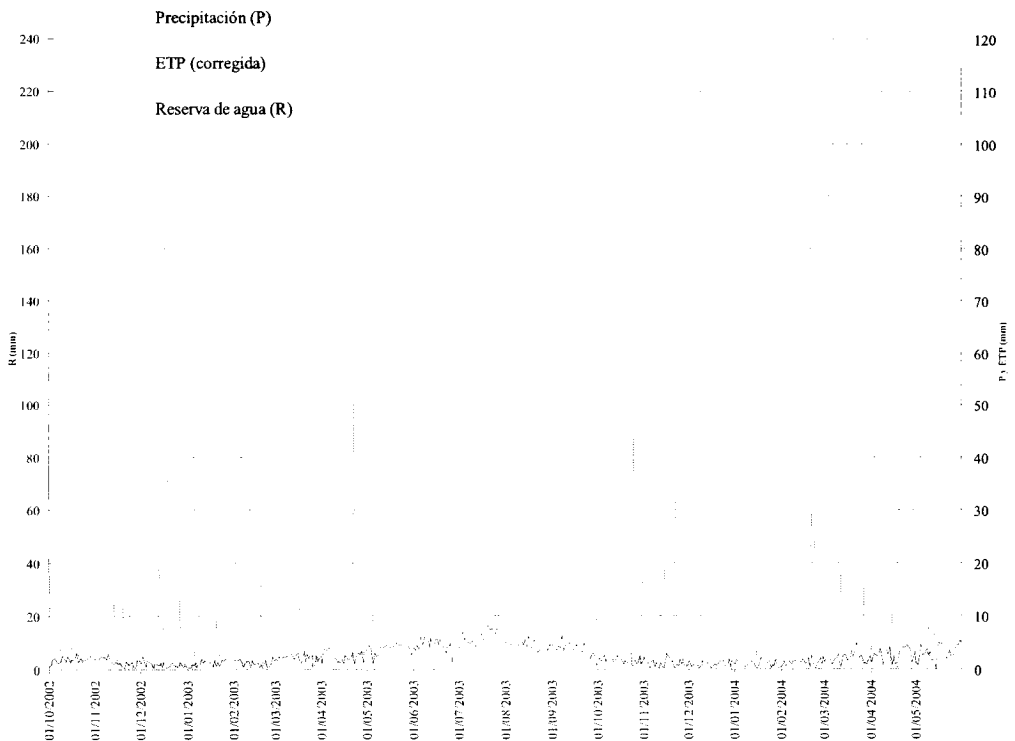


Figura V.45: Balance hídrico a nivel diario para la Burrilla y CRAM=193,50 mm

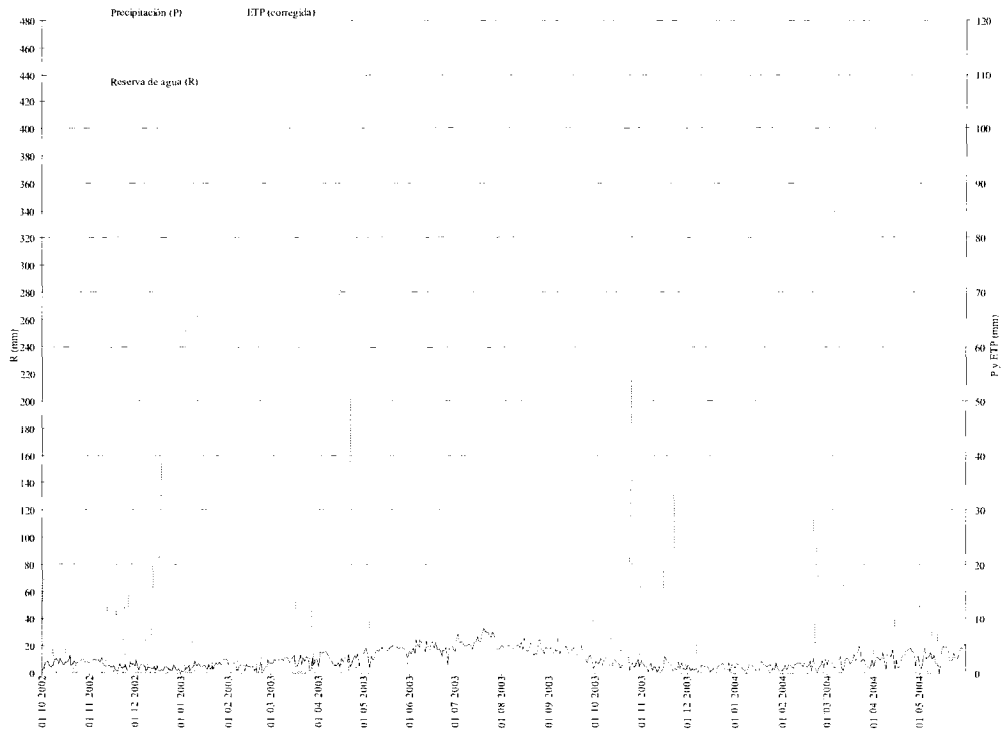


Figura V.46: Balance hídrico a nivel diario para la Burrilla y CRAM=193,50 mm

### V.5. BALANCES DIARIOS PARA LA PEÑA

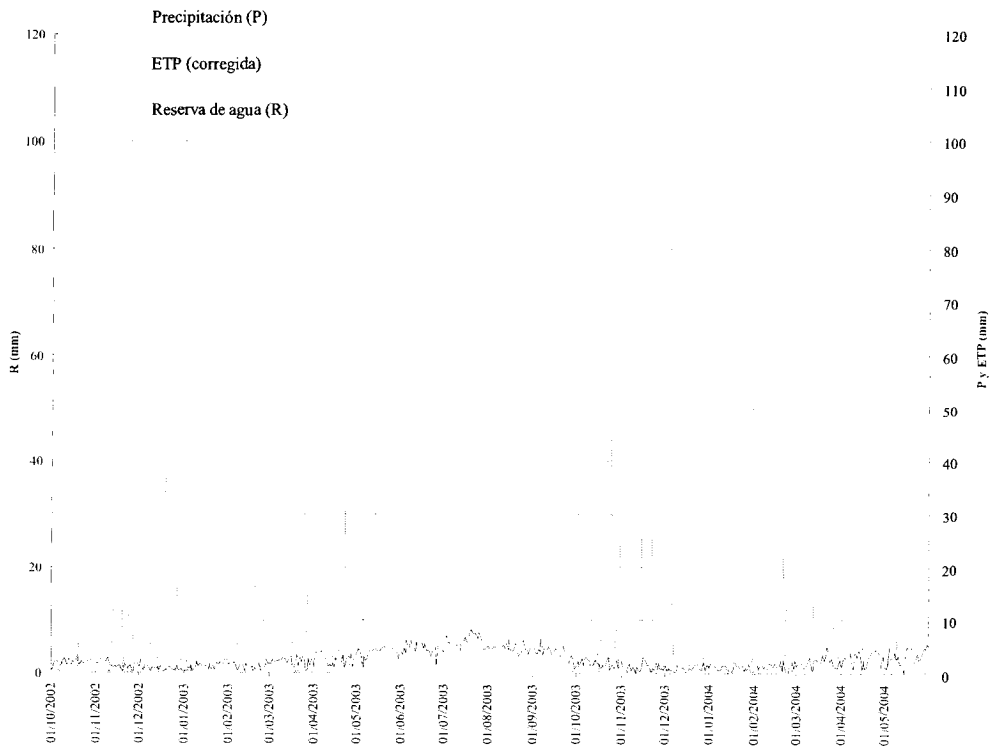


Figura V.47: Balance hídrico a nivel diario para la Peña y CRAM=65,33 mm

Anejo V: Balances hídricos diarios

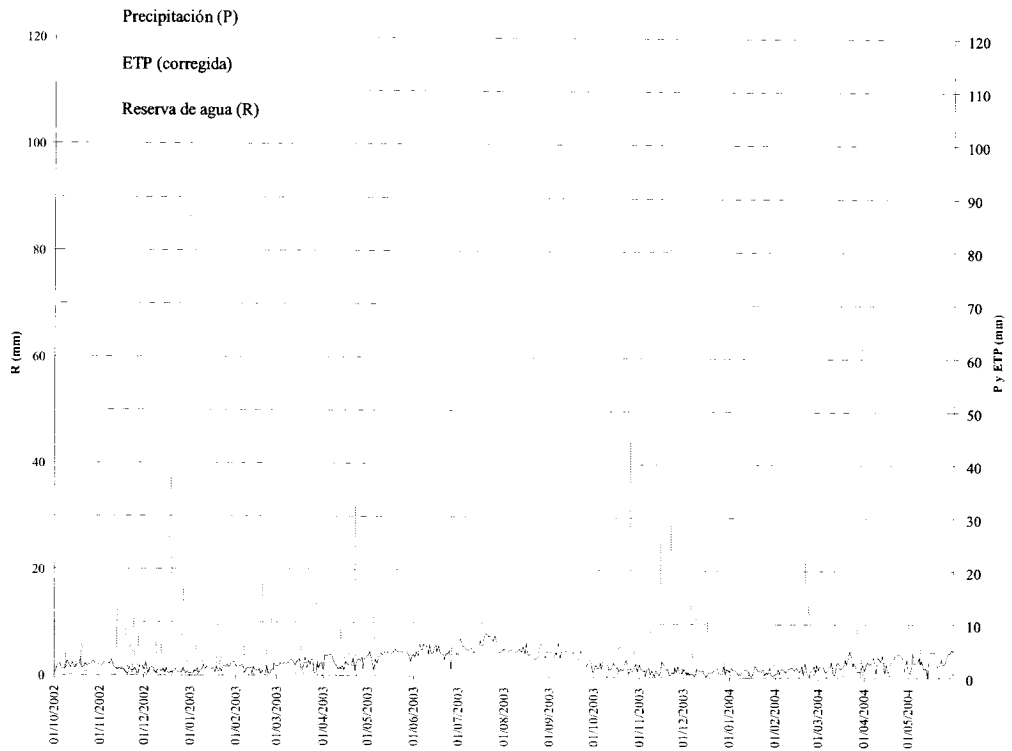


Figura V.48: Balance hídrico a nivel diario para la Peña y CRAM=87,00 mm

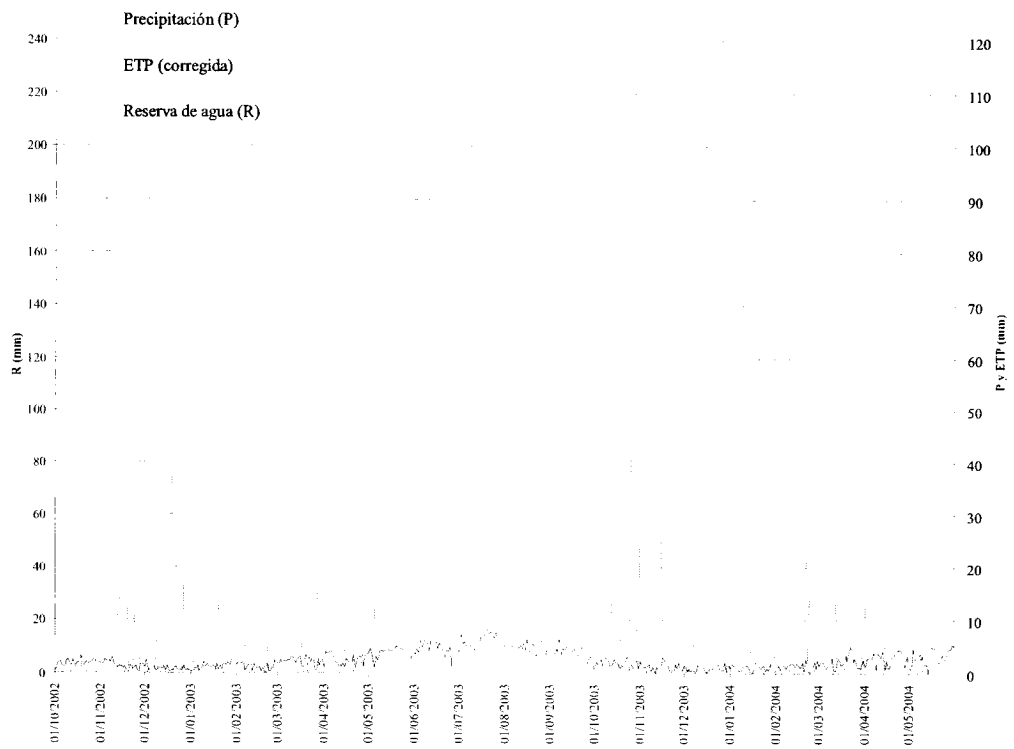


Figura V.49: Balance hídrico a nivel diario para la Peña y CRAM=127,60 mm

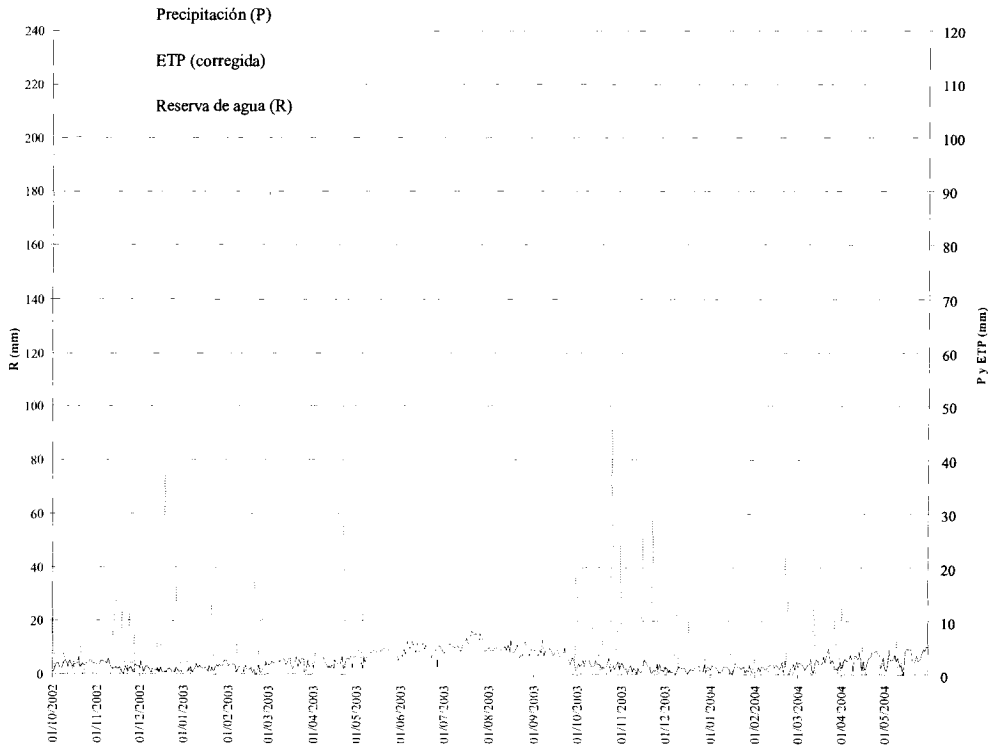


Figura V.50: Balance hídrico a nivel diario para la Peña y CRAM=130,00 mm

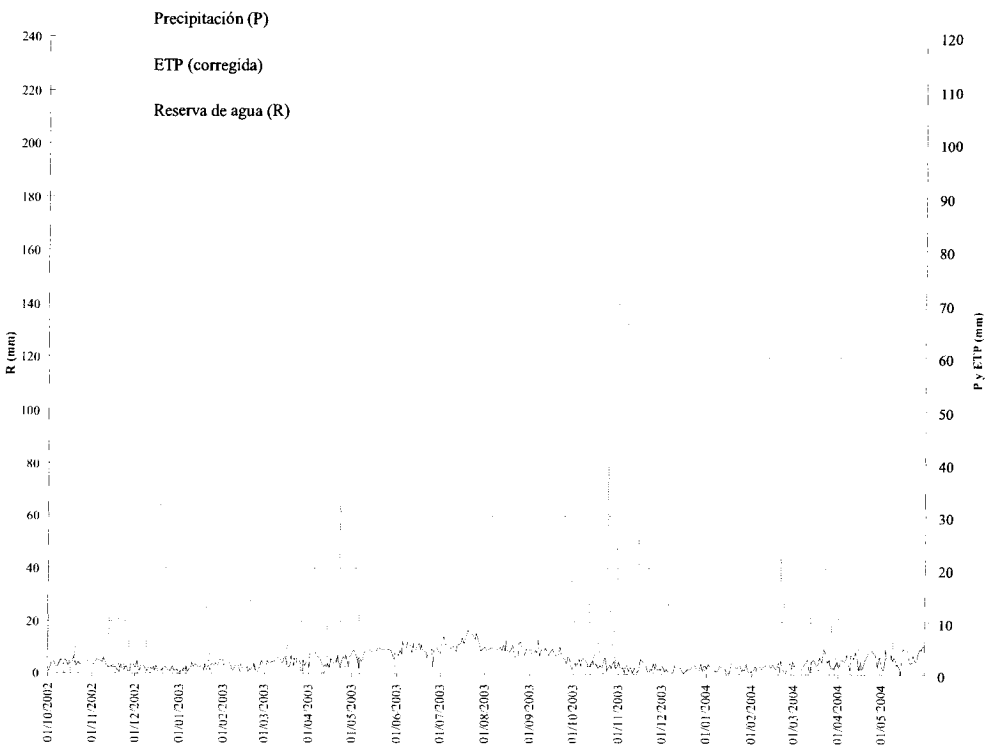


Figura V.51: Balance hídrico a nivel diario para la Peña y CRAM=150,20 mm

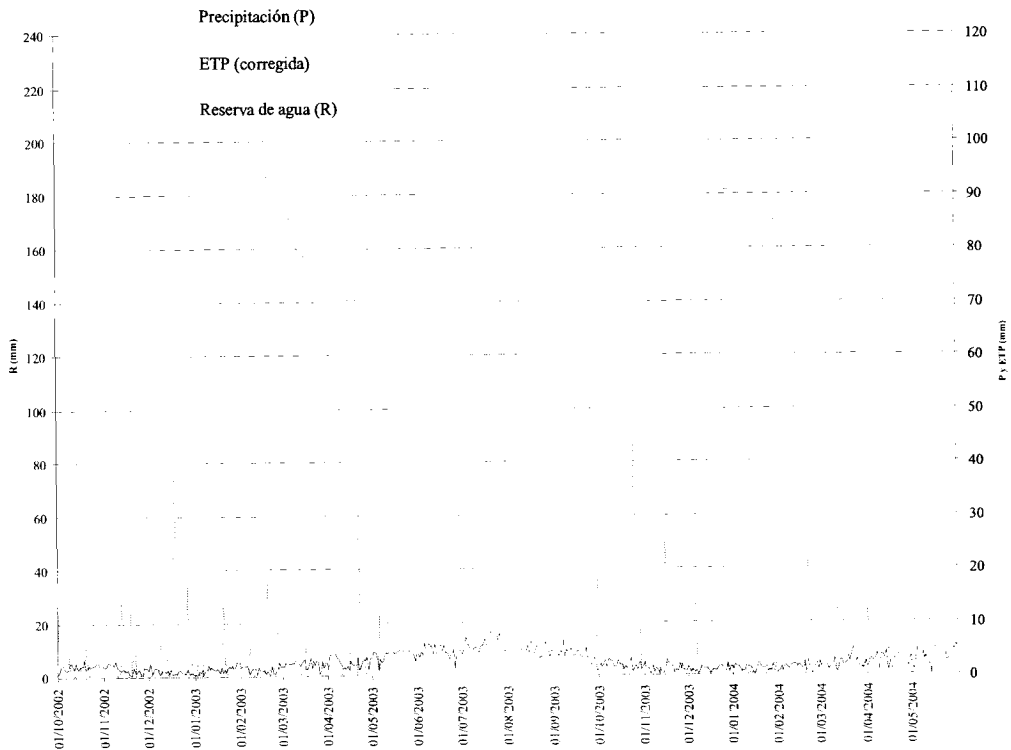


Figura V.52: Balance hídrico a nivel diario para la Peña y CRAM=189,80 mm



Universidad de Huelva

Reunido el Tribunal integrado por los abajo firmantes en el día de la fecha, para Juzgar la Tesis Doctoral de D. / D<sup>a</sup>. Rubén Fernández de Villaván San Juan

Titulada Mejora de los parámetros de cálculo del modelo del número de curva y su validación mediante un modelo hidrológico distribuido.

acordó otorgarle la calificación de Sobresaliente con laude por unanimidad de sus miembros

Huelva, 1 de diciembre de 2006

El Vocal

El Presidente

El Vocal

El Secretario

El Vocal

El Doctorando



UNIVERSIDAD DE HUELVA  
BIBLIOTECA



0000210943