

Anejo II. Inventario de recursos hídricos

Demarcación Hidrográfica
de las Cuencas
Mediterráneas Andaluzas

Apéndice II.I
Descripción de los modelos
de simulación de
aportaciones y recarga
de acuíferos



APÉNDICE II.1.

DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS DE SIMULACIÓN DE APORTACIONES Y RECARGA DE ACUÍFEROS



Unión Europea

Fondo Europeo
de Desarrollo Regional



JUNTA DE ANDALUCÍA

CONSEJERÍA DE AGRICULTURA, PESCA Y MEDIO AMBIENTE

Índice

I.1.	DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS DE SIMULACIÓN DE APORTACIONES EMPLEADOS.....	1
I.1.1.	MODELO "SIMPA".	2
I.1.2.	MODELO "SSMA-2".....	7
I.2.	DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE SIMULACIÓN DE RECARGA DE ACUÍFEROS EMPLEADO: MÉTODO APLIS.....	11

Índice de tablas

Tabla 1.	Puntuación asignada a los valores de la variable altitud	13
Tabla 2.	Puntuación asignada a los valores de la variable pendiente	13
Tabla 3.	Puntuación asignada a los valores de la variable litología	14
Tabla 4.	Puntuación asignada a los valores de la variable zonas de infiltración preferencial	14
Tabla 5.	Puntuación asignada a las clases de la variable suelo	14
Tabla 6.	Puntuación asignada al coeficiente de corrección en base a las características hidrogeológicas del medio.....	15
Tabla 7.	Categorías del porcentaje de recarga del acuífero	15

Índice de Figuras

Figura 1.	Estructura del SIMPA.....	3
Figura 2.	Diagrama de flujo del modelo SIMPA.	3
Figura 3.	Distribución espacial de la capacidad máxima de infiltración (mm/año).. ..	5
Figura 4.	Capacidad máxima de almacenamiento de agua en el suelo.....	5
Figura 5.	Distribución espacial del coeficiente de recesión (días-1x100.000).	6
Figura 6.	Puntos de control de los resultados del modelo SIMPA.	7
Figura 7.	Representación del ciclo hidrológico del Modelo Conceptual SSMA-2.	8
Figura 8.	Esquema simplificado del modelo.	10
Figura 9.	Tipos de recarga en acuíferos carbonatados. Esquema simplificado del modelo.	12



II.1. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS DE SIMULACIÓN DE APORTACIONES EMPLEADOS

Los caudales generados por una cuenca vertiente como respuesta frente a unas determinadas condiciones meteorológicas son el resultado de una serie de procesos que determinan las cantidades de agua que son retenidas en los diferentes horizontes del suelo, las que retornan a la atmósfera en forma de evaporación o transpiración de la cubierta vegetal, y las que alcanzan la red hidrográfica según distintos esquemas de flujo: escorrentía superficial, flujo hipodérmico y drenaje de acuíferos.

La complejidad de estos procesos y la imposibilidad material de alcanzar un conocimiento detallado de la variación de las características hidrológicas del terreno, obligan a introducir una serie de simplificaciones para la simulación matemática del ciclo terrestre del agua. Dichas simplificaciones pueden referirse tanto a la propia unidad espacial de cómputo del balance (modelos integrados y modelos distribuidos), como a la estructura vertical del suelo considerada (número de depósitos o almacenamientos temporales), o a las formulaciones empleadas para la simulación de los distintos procesos.

Dentro de los modelos de tipo integrado, que han de ser los utilizados en el presente estudio, existe una gran diversidad, siendo la elección del modelo función -entre otros factores- de la complejidad del medio físico y de los objetivos perseguidos. Algunas de estas herramientas matemáticas, las de mayor número de parámetros, están orientadas a una evaluación continua del balance y son de especial interés para los estudios de aportaciones, mientras que los modelos poco "parametrizados" son los de uso más frecuente en los estudios de avenidas.

Un aspecto fundamental a considerar de cara a la selección del modelo, máxime si está previsto su uso para regionalización de escorrentías, es su carácter de "físicamente basado", es decir, en qué medida la esquematización conceptual empleada y las magnitudes que caracterizan a los distintos almacenamientos representados, responden con fidelidad a los mecanismos reales que se producen en la naturaleza. En ello se apoya su capacidad para reproducir los hidrogramas medidos y la transponibilidad de los parámetros calibrados a otras cuencas.

Ahondando en este mismo argumento, el modelo elegido debe contemplar de manera, lo más rigurosa posible, la simulación de los principales rasgos del ciclo del agua en materiales acuíferos: saturación del suelo, percolación hacia niveles más profundos, tránsito por la zona no saturada, almacenamiento y posterior vaciado en dos "depósitos" de diferente capacidad y permeabilidad. Esta faceta resulta esencial en un estudio de este tipo, ya que es necesario compatibilizar los resultados de la simulación de aportes a nivel de cuencas con los de los acuíferos de cabecera.

En el presente estudio se han aplicado dos modelos de simulación hidrológica diferentes, el modelo SIMPA y modelo SSMA-2, los cuales se describen en posteriores apartados. Antes de entrar en detalles sobre cada uno de ellos conviene, sin embargo, explicar el papel que han jugado. Así, por ejemplo, el SIMPA ha tenido una doble función. Por un lado, sus principales variables de entrada y de salida han posibilitado la caracterización de la demarcación desde un punto de vista hidrológico y, por otro, ha permitido la obtención de series de aportaciones en puntos de interés. Estas series, sin embargo, en algunas zonas no representan de manera realista el régimen natural de caudales por lo que se han desestimado o han sido redefinidas mediante una metodología específica para cada caso.

Por otra parte, el modelo SSMA-2 ha sido empleado para ampliar algunas series de aportaciones que ya fueron estimadas en el marco de estudios previos como la ASISTENCIA TÉCNICA PARA LA



REALIZACIÓN DEL ESTUDIO DE UTILIZACIÓN CONJUNTA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEOS DE LA CUENCA DEL RÍO GUADALHORCE o del estudio sobre la GESTION INTEGRAL DE LOS RECURSOS HIDRICOS DE LA COSTA DEL SOL Y DE LA CIUDAD DE MÁLAGA. Su principal ventaja es que proporciona un mayor detalle en cuanto los procesos simulados y los resultados de salida (series diarias), si bien la información de partida es más complicada de obtener. Frente a esto, el modelo SIMPA permite abordar la simulación de aportaciones en grandes cuencas hidrográficas de forma que no se utilicen demasiados parámetros durante la calibración (Principio de Parsimonia), y que los mismos tengan un carácter físico y fácilmente relacionable con la información fisiográfica de la cuenca a estudiar.

II.1.1. MODELO "SIMPA".

II.1.1.1. Descripción del modelo

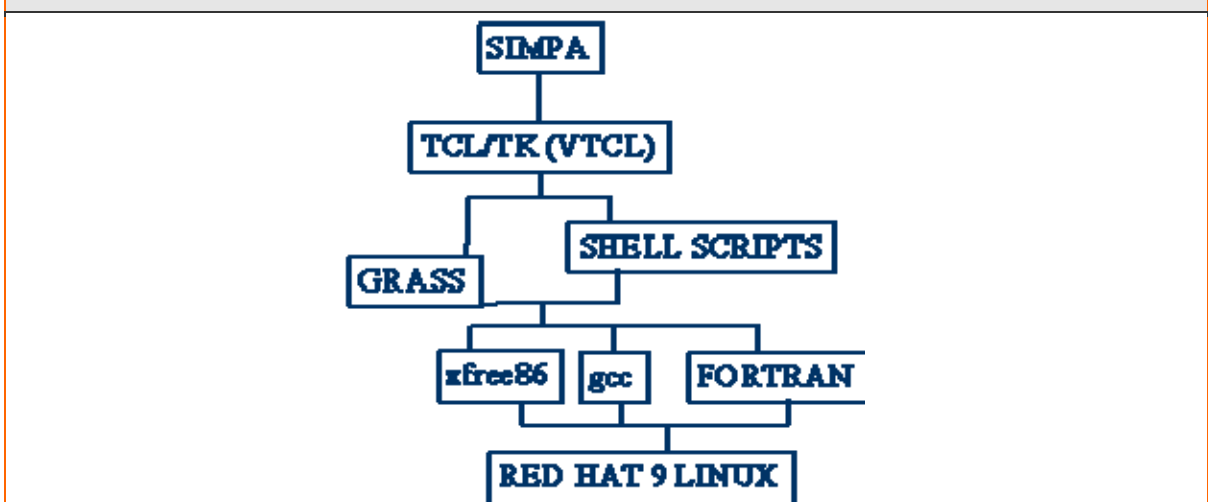
El Sistema Integrado de Precipitación-Aportación (SIMPA) es un modelo hidrológico conceptual y cuasidistribuido que permite gestionar y analizar la información temporal y espacial procedente de la Base de Datos HIDRO (Quintas, 1996) del Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX) y en él se integran las aplicaciones hidrológicas desarrolladas por este organismo para simular diferentes procesos del ciclo hidrológico.

El modelo, que comenzó a implementarse por el CEDEX y diversas universidades colaboradoras a mediados de los años 90, fue posteriormente mejorado con la incorporación de nuevos módulos, bien desarrollados en el propio CEDEX o bien desarrollados en el marco de convenios de colaboración con el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia.

Por otro lado, el SIMPA utiliza el Sistema de Información Geográfica GRASS para gestionar los datos espaciales y como soporte de los modelos distribuidos implementados. Este SIG, desarrollado inicialmente por el U.S. Army CERL, actualmente es mantenido y desarrollado por una comunidad de usuarios desde diferentes países.

Su sistema operativo es Red Hat 9 Linux y la interfaz gráfica del mismo se ha desarrollado con Tcl/Tk. Los lenguajes de programación principales son Fortran y C, aunque también hay comandos del sistema operativo y comandos del GIS GRASS en programas shell scripts.

Figura 1. Estructura del SIMPA.

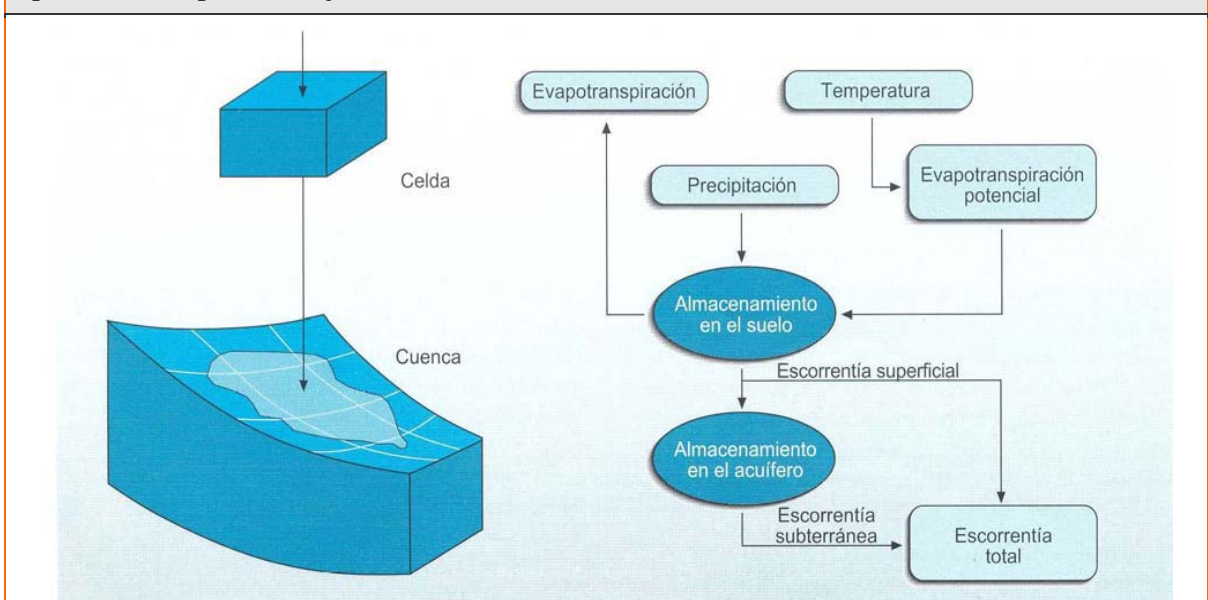


Fuente: CEDEX

II.1.1.2. Formulación conceptual

Atendiendo al principio de continuidad o de conservación de la masa, el modelo reproduce los procesos significativos de transporte de agua que tienen lugar en las diferentes fases del ciclo hidrológico, para cada una de las celdas de la cuenca. Este proceso está regulado por las leyes específicas de reparto y transferencia entre los distintos términos del balance (Témez, 1977) con los que se simplifican las fases del ciclo hidrológico.

Figura 2. Diagrama de flujo del modelo SIMPA.



Fuente: Libro Blanco del Agua.

Si bien el balance se aplica en cada una de las celdas de 1 km x 1 km en que se discretiza el territorio, no está pensado para simular las variaciones espaciales en la piezometría de los acuíferos, únicamente el intercambio de agua entre éstos y la red fluvial o el mar. Tampoco considera la propagación del flujo sobre la cuenca, dificultando tener en cuenta la recarga generada por infiltración en los cauces perdedores. No trabaja con las ecuaciones diferenciales que definen los

procesos hidrológicos sino que cada celda posee sus propios parámetros, los cuales vienen definidos por las características físicas que posee la cuenca en cada punto asociado.

En cada una de las celdas de la cuenca, el terreno está dividido en dos zonas: la superior o no saturada, cuyo contenido de agua es asimilable a la humedad del suelo, y la inferior o acuífero, que funciona como un almacenamiento subterráneo que desagua a la red de drenaje superficial de forma diferida en el tiempo

El balance se lleva a cabo a partir del flujo entrante de precipitación, el cual se reparte entre una serie de flujos salientes (evapotranspiración real, aportación superficial y aportación de origen subterráneo) otra de flujos intermedios (infiltración) y una última de almacenamientos intermedios (humedad del suelo y volumen almacenado en el acuífero)

En cuanto a la infiltración hay que aclarar, que se considera como tal el agua que pasa de la parte superior del suelo al acuífero. Puesto que el tiempo de paso de este flujo por el suelo es inferior al tiempo de simulación, la infiltración se identifica con la recarga al acuífero durante el mes.

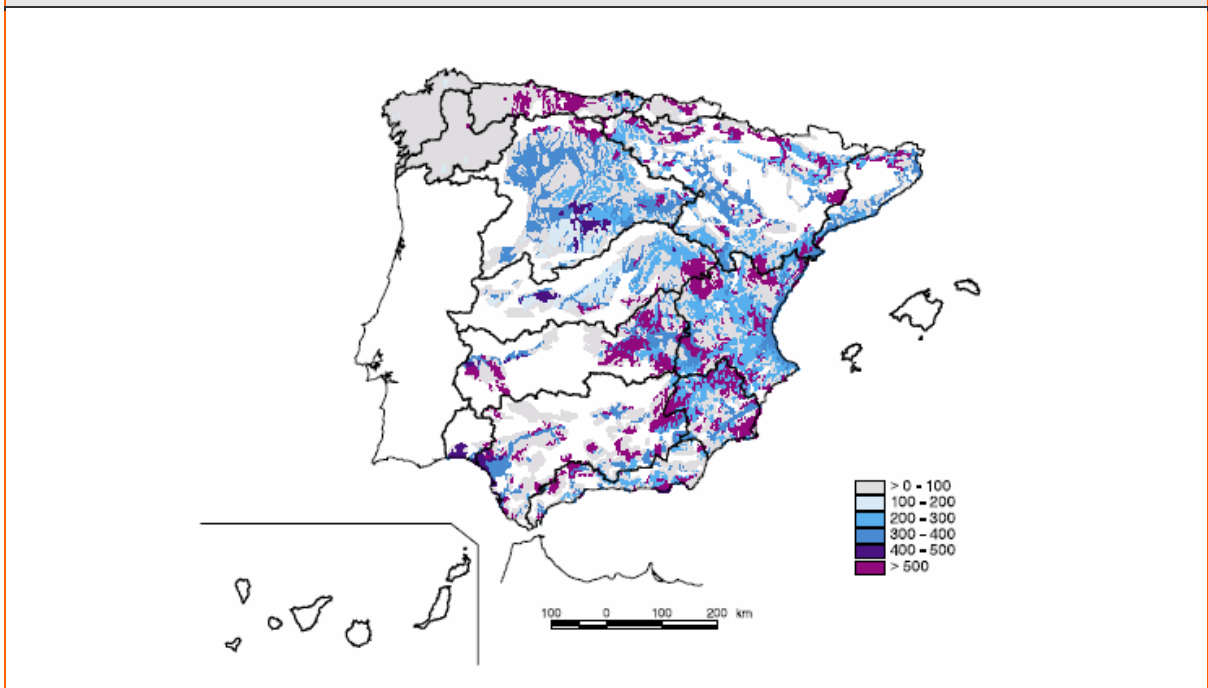
II.1.1.3. Información de partida

La información de partida está constituida por los datos de precipitaciones (total mensual) y temperaturas (medias mensuales) en las estaciones meteorológicas y los datos de caudales históricos en los puntos de contraste. A partir de todos estos datos meteorológicos, el modelo realiza una interpolación espacial, obteniendo mapas mensuales en formato grid, con valores de precipitación y de temperatura en cada una de las celdas. El algoritmo de interpolación elegido ha sido el "Método del Inverso de la Distancia al Cuadrado", obteniendo el valor de la variable (precipitación o temperatura) en cada celda de la cuenca. Este cálculo se lleva a cabo teniendo en cuenta únicamente las seis estaciones más cercanas con datos en dicho mes.

Por otra parte, se tienen en cuenta tres parámetros fundamentales:

- 1) **Capacidad máxima de infiltración o infiltración potencial**, que interviene en la ley que regula el reparto de agua entre la escorrentía superficial y la infiltración a los acuíferos. Se ha obtenido básicamente a partir de información litológica. A mayor valor de este parámetro se produce mayor evaporación y menores aportaciones en la cuenca, y al contrario.

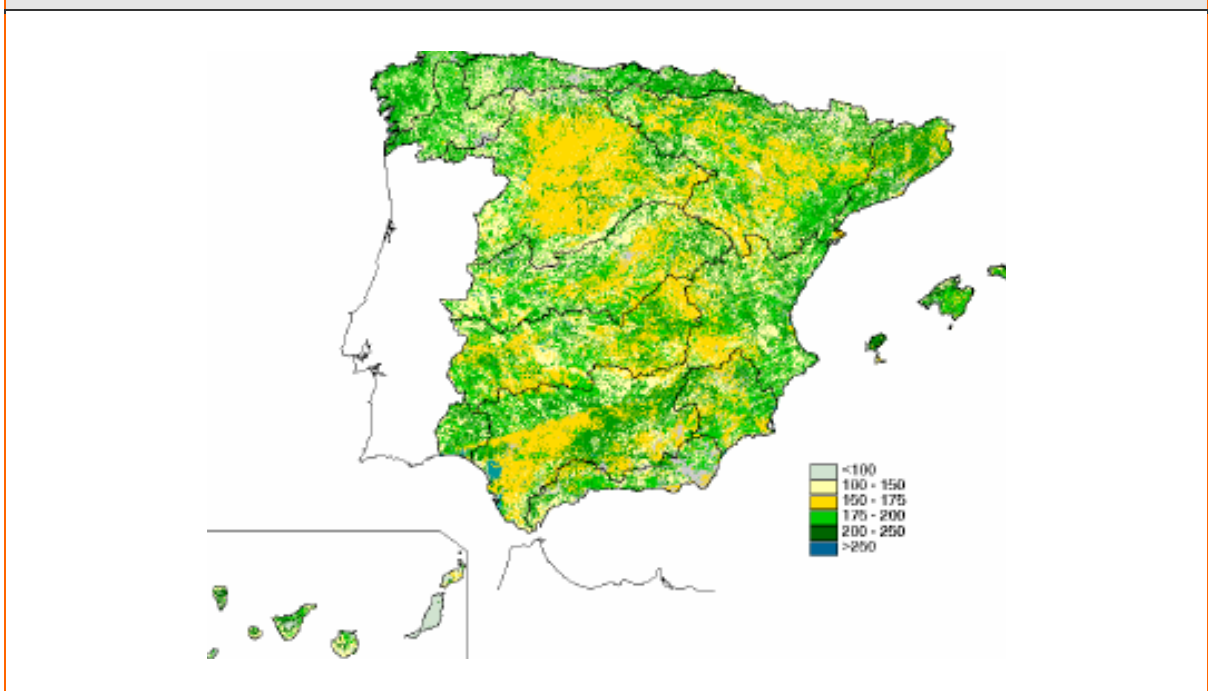
Figura 3. Distribución espacial de la capacidad máxima de infiltración (mm/año)..



Fuente: CEDEX

- 2) **Capacidad de almacenamiento de agua del suelo.** Regula el volumen de agua que acaba convirtiéndose en escorrentía y se ha obtenido a partir de la información sobre los usos del suelo del CORINE LAND COVER.

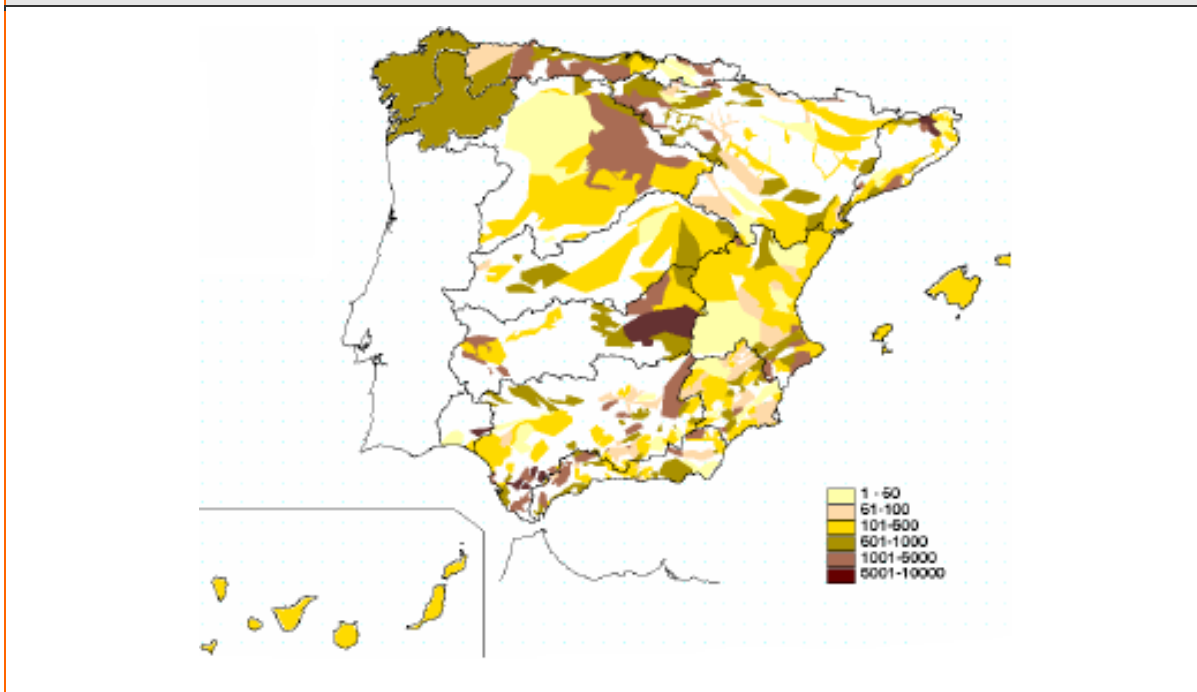
Figura 4. Capacidad máxima de almacenamiento de agua en el suelo (mm).



Fuente: CEDEX

- 3) **Coefficiente de descarga.** El tipo conceptual de acuífero utilizado por el SIMPA es el unicelular, que se conecta hidráulicamente con el sistema superficial mediante un coeficiente de desagüe o recesión cuya distribución espacial se muestra a continuación.

Figura 5. Distribución espacial del coeficiente de recesión (días-1x100.000).



Fuente: CEDEX

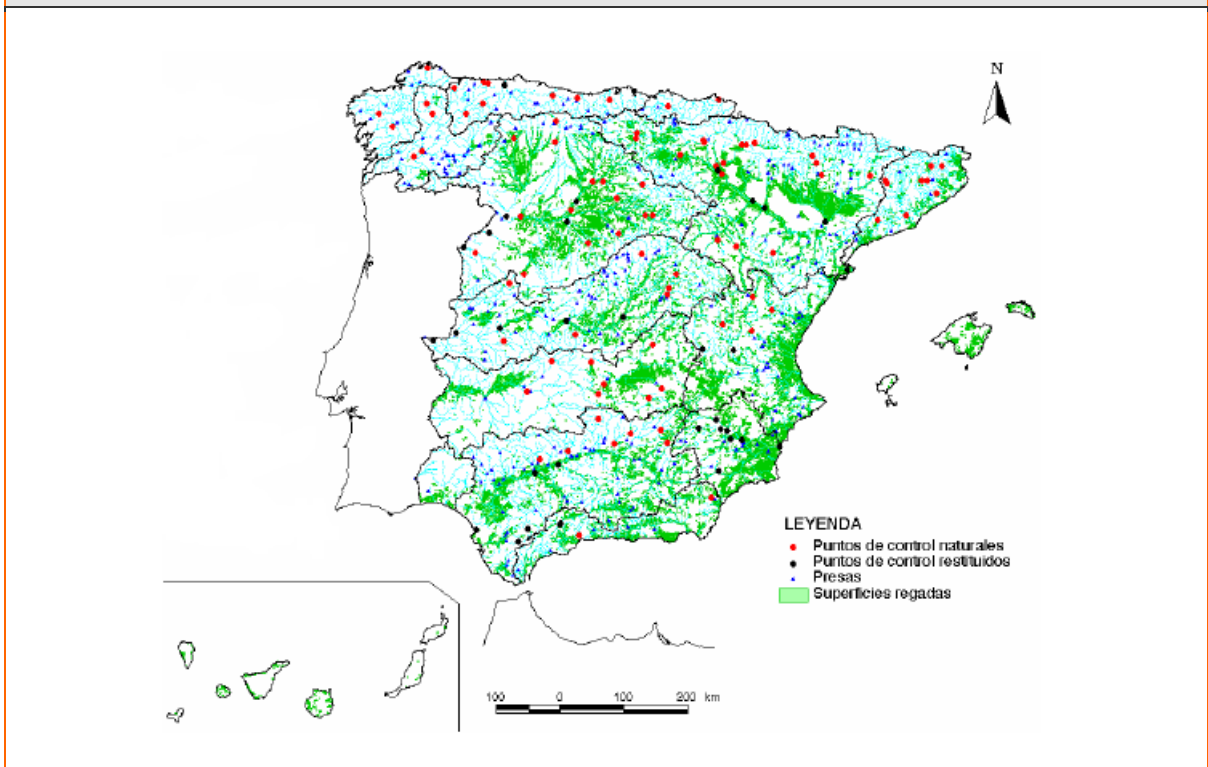
II.1.1.4. Calibración y resultados

A partir las variables de entrada y los parámetros comentados, se obtienen valores mensuales en régimen natural de evapotranspiración potencial y real, humedad del suelo, recarga por lluvia, escorrentía superficial, escorrentía subterránea y escorrentía total.

La calibración del modelo se llevó a cabo mediante el análisis paramétrico de las capas de información relevantes respecto al valor de los correspondientes parámetros hidrológicos: capacidad máxima de almacenamiento del suelo, infiltración máxima y coeficiente de descarga de los acuíferos.

Además, los resultados obtenidos fueron contrastados por el CEDEX con los datos históricos de una selección de estaciones que miden caudales en régimen natural y con las series restituídas en los planes de cuenca. La siguiente figura muestra los puntos de control empleados.

Figura 6. Puntos de control de los resultados del modelo SIMPA.



Fuente: CEDEX.

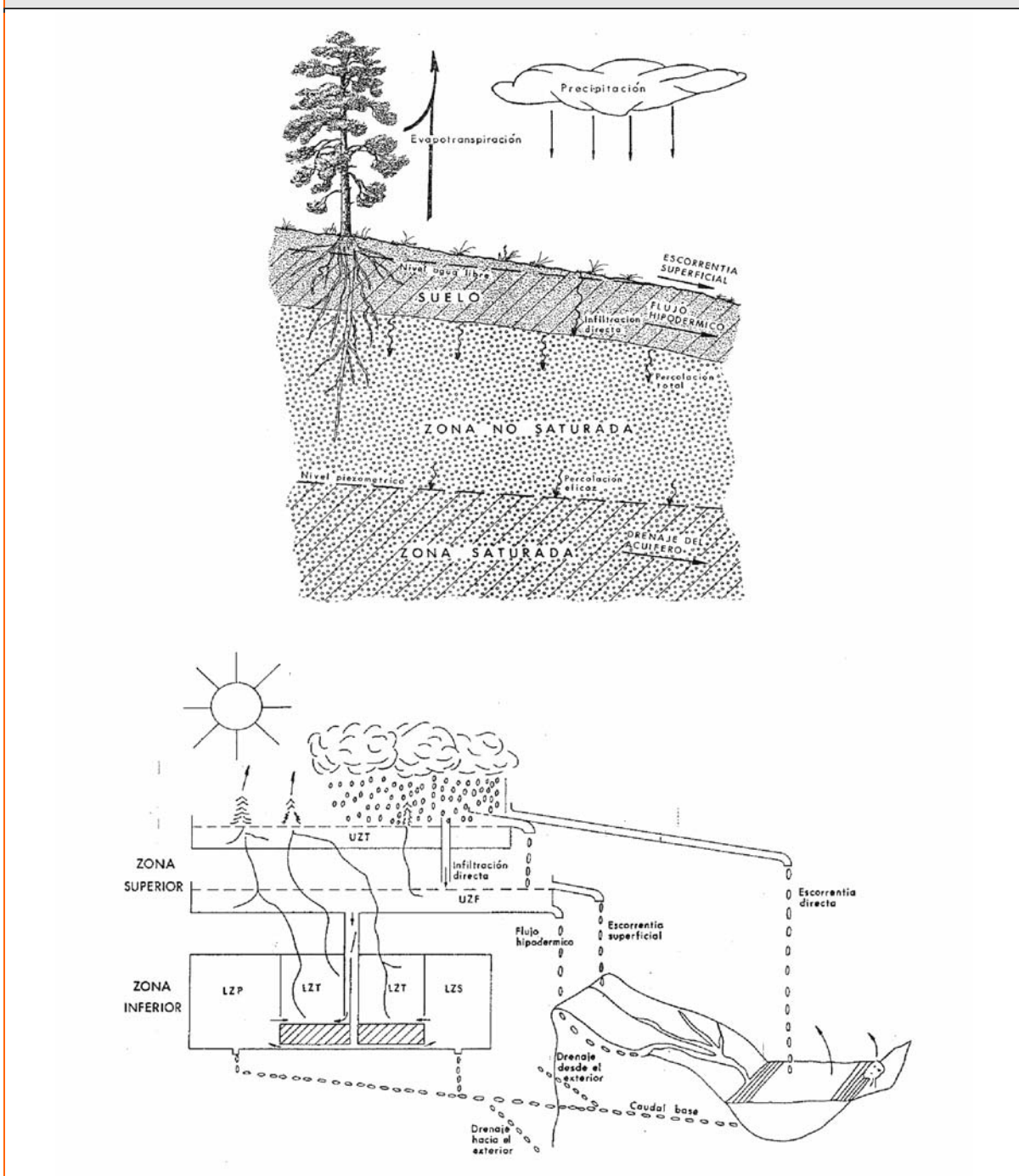
II.1.2. MODELO "SSMA-2".

Sin duda el mayor esfuerzo de investigación hasta la fecha en el campo de la modelización de los procesos hidrológicos fue desarrollado a principios de la década de los 70 sobre un gran número de cuencas experimentales en los Estados Unidos, y que condujo a la aparición de los modelos conceptuales de cuenca de la "familia" Stanford.

Uno de éstos, que constituye la base del actualmente utilizado por el National Weather Service, es el "Sacramento Soil Moisture Accounting model", modelo que fue modificado por Intecsa en el año 1986 (SSMA-2) mediante la incorporación de subrutinas basadas en formulaciones internacionalmente reconocidas que permiten mejorar la simulación de los procesos de infiltración en acuíferos kársticos. Esta versión ha sido extensivamente utilizada en diferentes cuencas hidrográficas españolas (Norte, Ebro, Duero, Júcar y, sobre todo, Sur) y en los estudios realizados para la Unión Europea en Perú y Bolivia. Constituye la herramienta de simulación empleada para la extensión de las series de aportes y la evaluación de aportaciones en cuencas no aforadas del Plan Hidrológico de la cuenca Sur, y en su marco y en el de otros estudios se ha utilizado ya previamente en la simulación de diversas subcuencas del Guadalhorce.

El modelo conceptual de simulación hidrológica a nivel diario SSMA-2 permite distinguir dentro de una cuenca distintos sectores con características diferenciadas: áreas permeables, áreas impermeables con suelo desarrollado, áreas impermeables conectadas directamente con la red hidrográfica, y áreas inundadas.

Figura 7. Representación del ciclo hidrológico del Modelo Conceptual SSMA-2.



A su vez, en el sentido vertical, el modelo conceptual diferencia los siguientes compartimentos en el perfil del terreno: zona de almacenamiento superficial de agua bajo fuerzas "de tensión", zona de almacenamiento superficial de agua gravitacional, zona no saturada, y zona acuífera (esta última subdividida en dos con diferentes permeabilidades). Cada uno de estos compartimentos está definido por una serie de parámetros que lo caracterizan (tamaño, velocidad de vaciado...) y que permiten controlar las transferencias de agua entre los mismos.

En lo que respecta al tránsito del flujo en superficie, el modelo incorpora la posibilidad de definir un hidrograma unitario de la cuenca y una propagación en cauce mediante el método de Muskingum.

Para facilitar la comprensión del esquema conceptual del modelo y de la relación entre los parámetros de simulación y las características físicas del suelo, se acompaña a continuación una breve reseña del significado de los principales parámetros:

Parámetro Significado

ADIMP	Fracción de la cuenca ocupada por terrenos impermeables temporales, es decir aquéllos que tienen un suelo más o menos desarrollado y que una vez saturados generan escorrentía superficial.
PCTIM	Fracción de la cuenca ocupada por terrenos impermeables sin suelo desarrollado que están conectados directamente con la red hidrográfica.
SARVA	Fracción de la cuenca ocupada por zonas inundadas (ríos, lagos, embalses, etc).
UZTWM	Cantidad máxima de agua (mm) que puede ser retenida en el nivel superior de los terrenos permeables mediante fuerzas de tensión.
CID	Coefficiente de infiltración directa; fracción de la lluvia caída que alcanza niveles inferiores del suelo aunque exista un déficit de saturación en superficie.
UZFWM	Cantidad máxima de agua libre (mm) que puede contener el suelo superior.
UZK	Velocidad de vaciado lateral del depósito de agua libre superior (UZF); es decir, fracción diaria del contenido en dicho depósito que es drenado en forma de flujo hipodérmico.
ZPERC	Incremento proporcional de la percolación desde condiciones saturadas a condiciones de fuerte déficit.
REXP	Exponente de la ecuación de percolación que determina la forma en que varía la "demanda de percolación" entre las condiciones saturadas y las condiciones de sequedad total en el nivel inferior.
LZTWM	Cantidad máxima de agua (mm), disponible para evapotranspiración, que puede ser retenida en niveles más profundos del suelo (zona no saturada) mediante fuerzas de capilaridad.
PFREE	Fracción del agua percolada que es transmitida directamente al acuífero aunque siga existiendo un cierto déficit de agua capilar en la zona no saturada.
LZFPM	Cantidad máxima de agua libre (mm) que puede contener el nivel inferior (acuífero) en su depósito primario (LZP), el menos transmisivo.
LZPK	Fracción del contenido en el depósito primario del acuífero (LZP) que se drena diariamente en forma de caudal base.
LZFSM	Cantidad máxima de agua libre (mm) que puede contener el acuífero en su depósito secundario (LZS), el más transmisivo.
LZSK	Fracción del contenido en el depósito secundario del acuífero (LZS) que se drena diariamente.
RSERV	Fracción del agua libre del acuífero que no está disponible para evapotranspiración.

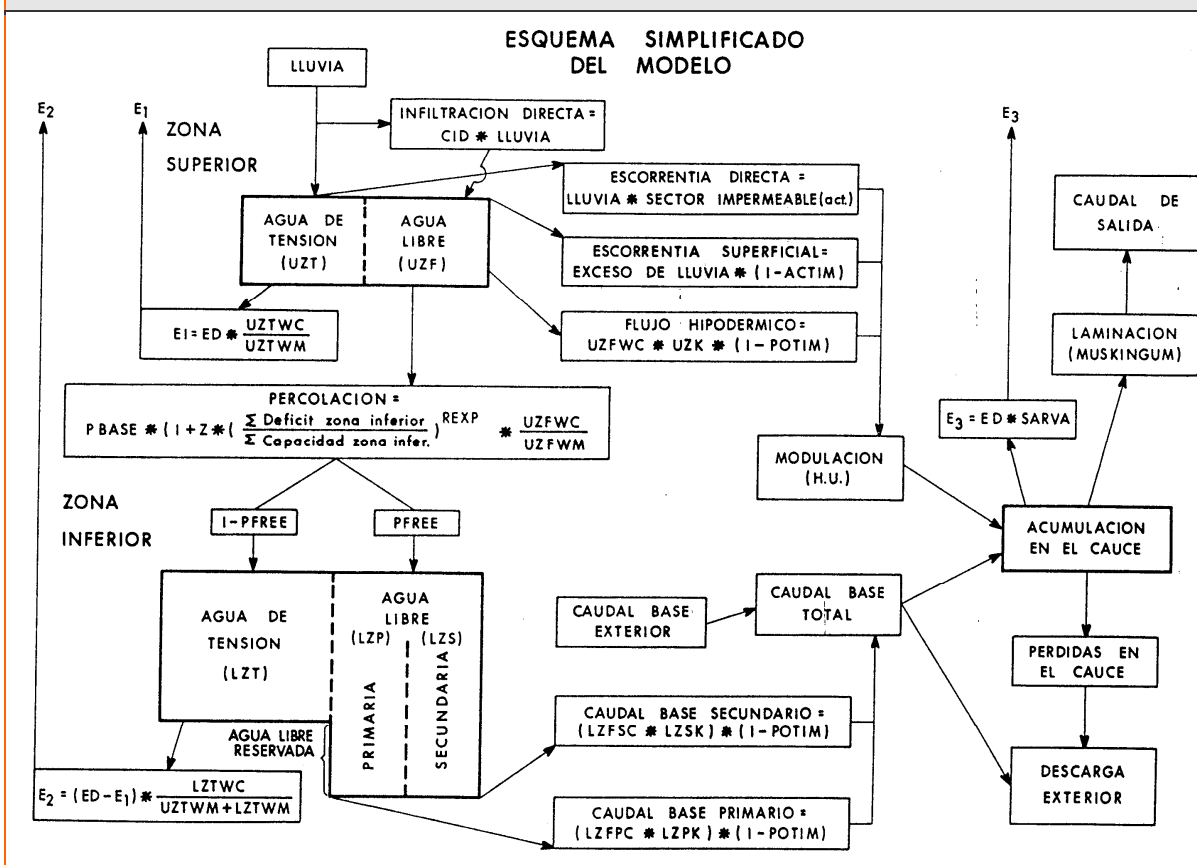


SIDE Coeficiente que establece la relación entre materiales permeables que se drenan dentro de la cuenca y los que realmente afloran dentro de ella (para cuencas hidrográficas e hidrogeológicas no coincidentes).

SSSOT Caudal subálveo máximo por debajo del cual no se observa ningún flujo en el cauce (m^3/s).

El modelo utiliza además una serie de parámetros adicionales que permitan controlar la laminación de la escorrentía en sus fases de ladera y de propagación en cauce, pero cuya explicación carece de interés en el contexto del presente estudio.

Figura 8. Esquema simplificado del modelo.



En lo que respecta a las series temporales requeridas para las simulaciones, éstas son de tres tipos: caudales, precipitaciones y evapotranspiraciones potenciales. Los caudales diarios en el punto de descarga son necesarios en el proceso de ajuste (calibración) para verificar que el hidrograma simulado reproduce correctamente los rasgos del observado. Las precipitaciones diarias -en un máximo de cinco pluviómetros por cuenca- constituyen las entradas de agua al sistema; las series deben ser continuas por lo que suele ser necesario un tratamiento previo de los datos para el rellenado de huecos. En cuanto a las evapotranspiraciones potenciales (ETP), pueden ser introducidas a nivel diario o mensual e ir afectadas de un coeficiente de ponderación variable de mes en mes. En el presente caso se ha partido de las series de ETP obtenidas mediante la aplicación del método de Thornthwaite en el estudio climático, pero afectándolas posteriormente con unos coeficientes de ponderación mensuales para hacerlas equiparables a las que se obtendrían, si existieran datos suficientes, con el método de Penman.

Dada la complejidad de los modelos matemáticos de este tipo -ligada fundamentalmente a la multiplicidad de parámetros empleados para caracterizar cada cuenca- su utilización exige no solamente un dominio de su formulación interna, sino que también es necesario un buen conocimiento del medio físico a simular y de los procesos que en él ocurren. Incluso con estos conocimientos, la calibración de una cuenca determinada demanda un esfuerzo considerable, por lo que se ha dotado al programa informático de un importante soporte gráfico que facilita esta labor. Con este mismo objetivo, en el presente estudio se ha recurrido por primera vez a la utilización de un algoritmo (programa PEST) que mediante un procedimiento iterativo permite optimizar el valor final de los parámetros, si bien esta técnica sólo se ha empleado en cuencas en las que era factible simular de manera conjunta los sectores permeables e impermeables, y ello tras haber alcanzado previamente una precalibración satisfactoria.

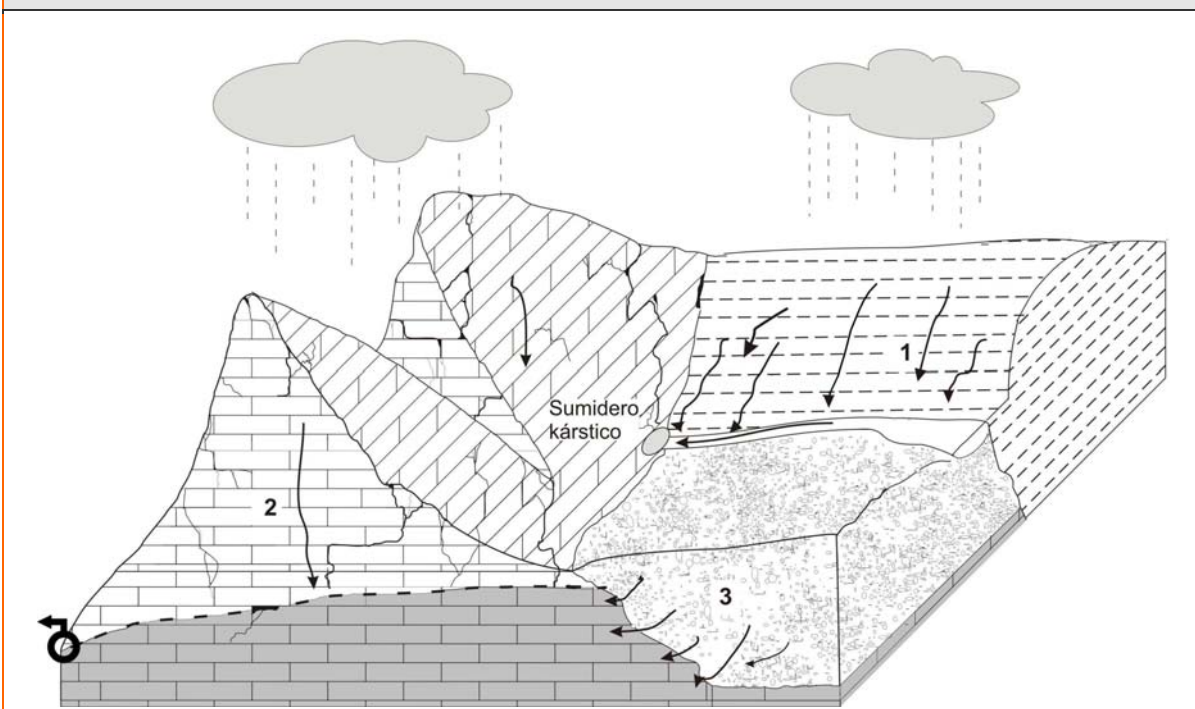
1.2. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE SIMULACIÓN DE RECARGA DE ACUÍFEROS EMPLEADO: MÉTODO APLIS

La recarga a los acuíferos se define como el volumen medio de agua que entra en ellos durante un periodo de tiempo. Se expresa como volumen medio anual (recursos medios anuales) o en forma de porcentaje de la precipitación (tasa de recarga o infiltración eficaz). Para un periodo suficientemente largo, y en el caso de que el acuífero no esté sujeto a extracciones por bombeo, la recarga media es igual al caudal medio de descarga. Esta recarga se puede producir de forma difusa o concentrada. El agua que recarga a los acuíferos puede proceder de la lluvia (suele ser la más importante y la más habitual), de las aguas superficiales (río y lagos) o de otros acuíferos o acuitardos (Figura 9). En los dos últimos casos puede ser recarga permanente o esporádica y depende de la posición del nivel freático y de la permeabilidad los materiales que están contacto.

Para el cálculo de la recarga por infiltración del agua de lluvia en las masas de agua subterránea de naturaleza carbonatada, así como en la parte correspondiente de las mixtas, se ha utilizado el método APLIS. Este método fue diseñado en el marco del proyecto desarrollado por el IGME-GHUMA (2003)¹, de título *Estudios metodológicos para la estimación de la recarga en diferentes tipos de acuíferos carbonatados: aplicación a la Cordillera Bética*.

¹ IGME-GHUMA (2003): Estudios metodológicos para la estimación de la recarga en diferentes tipos de acuíferos carbonatados: aplicación a la Cordillera Bética. Informe inédito. 3 tomos.

Figura 9. Tipos de recarga en acuíferos carbonatados. Esquema simplificado del modelo.



Leyenda. 1: recarga procedente de escorrentía sobre materiales impermeables, 2: infiltración directa del agua de lluvia, 3: alimentación subterránea desde acuíferos detríticos adyacentes

El objetivo de este método se centra en desarrollar un procedimiento sencillo que permita estimar la tasa de recarga en acuíferos carbonatados asociada a la infiltración del agua de lluvia (expresada como porcentaje de la precipitación) mediante la combinación de diferentes variables: geológicas y geográficas, y establecer el reparto zonal de la recarga en estos acuíferos.

Posteriormente se han propuesto unas modificaciones del método APLIS (Marín, 2009)² que suponen una mejora en la aplicabilidad y salvan algunas limitaciones que presentaba el método APLIS en su versión original. Estas modificaciones son:

- La homogenización de la variable pendiente, que pasa de 9 a 10 clases.
- La creación de una clase nueva, de valor intermedio, para la variable formas de infiltración preferencial.
- La incorporación de un factor de corrección (Fh), dependiente de las características hidrogeológicas de los materiales aflorantes en superficie.

Esta modificación del método ha sido aplicada de forma satisfactoria en varios estudios y por tanto, se ha empleado durante la estimación de la componente de recarga asociada a la infiltración del agua de lluvia en las masas de agua subterránea de naturaleza carbonatada (así como en la parte correspondiente de las mixtas), en el marco del presente trabajo.

² Marín, A.I. (2009): Los Sistemas de Información Geográfica aplicados a la evaluación de recursos hídricos y a la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos carbonatados. Caso de la AltaCadena (Provincia de Málaga). Tesis de Licenciatura, Universidad de Málaga, 131 pp

Descripción de las variables consideradas en el método APLIS modificado

La estimación de la recarga tiene un marcado carácter cuantitativo. Sin embargo, parte de las variables que se utilizan en este método para su estimación, son de naturaleza cualitativa: litología, zona preferencial de infiltración, suelo y características hidrogeológicas y, por ello, deben transformarse en valores ordinales para su posterior tratamiento.

Las variables que contempla el método APLIS modificado son:

- Altitud (A)
- Pendiente (P)
- Litología (L)
- Formas de Infiltración preferencial (I)
- Suelo (S)
- Características hidrogeológicas: factor de corrección (Fh)

A cada variable se le ha asignado un valor comprendido entre 1 y 10 y, generalmente, sigue una progresión aritmética. De este modo, el valor 1 indica la mínima incidencia de los valores de esa variable en la recarga del acuífero, mientras que el valor 10 expresa la máxima influencia en la recarga.

La puntuación de la variable *Altitud* sigue una progresión aritmética y considera que, conforme aumenta la altitud, aumenta la precipitación y la recarga del acuífero. Así:

ALTITUD (A)	PUNTUACIÓN
> 2.700 m	10
2.400-2.700 m	9
2.100-2.400 m	8
1.800-2.100 m	7
1.500-1.800 m	6
1.200-1.500 m	5
900-1.200 m	4
600-900 m	3
300-600 m	2
≤300 m	1

Las puntuaciones asignadas a la variable *Pendiente* disminuyen conforme aumenta la pendiente, es decir, a mayor pendiente, mayor escorrentía y menor recarga del acuífero. Así:

PENDIENTE (P)	PUNTUACIÓN
≤ 3 %	10
(3 - 5]	9
(5 - 10]	8
(10 - 15]	7
(15 - 20]	6
(20 - 30]	5
(30 - 45]	4
(45 - 65]	3

Tabla 2. Puntuación asignada a los valores de la variable pendiente

PENDIENTE (P)	PUNTUACIÓN
(65 - 100]	2
> 100	1

La asignación de puntuaciones a la variable *Litología* se efectúa en función de criterios hidrogeológicos relacionados con la permeabilidad de los materiales: grado de fracturación y/o karstificación. Así:

Tabla 3. Puntuación asignada a los valores de la variable litología

LITOLOGÍA (L)	PUNTUACIÓN
Calizas y dolomías karstificadas	10 - 9
Calizas y dolomías fracturadas o ligeramente karstificadas	8 - 7
Calizas y dolomías fisuradas	6 - 5
Arenas y gravas, coluviones	4
Conglomerados	3
Rocas plutónicas y metamórficas	2
Esquistos, pizarras, limos, arcillas	1

La variable *Infiltración* considera tres clases o tipologías y hace referencia a la existencia o no de formas de absorción y a la capacidad potencial de infiltración. Así:

Tabla 4. Puntuación asignada a los valores de la variable zonas de infiltración preferencial

FORMAS DE INFILTRACIÓN PREFERENCIAL (I)	PUNTUACIÓN
Alto desarrollo de las formas de infiltración preferencial	10
Desarrollo moderado de las formas de infiltración preferencial	5
Escaso desarrollo o ausencia de las formas de infiltración preferencial	1

En el caso de la variable Suelo las distintas clases se agrupan en función de las características de espesor y textura de sus horizontes, que a su vez, están relacionadas con la permeabilidad del mismo.

Tabla 5. Puntuación asignada a las clases de la variable suelo

SUELOS (S)	PUNTUACIÓN
Leptosoles	10
Arenosoles y Xerosoles	9
Regosoles calcáreos y Fluvisoles	8
Regosoles eútricos, dístricos y Solonchaks	7
Cambisoles	6
Cambisoles eútricos	5
Histosoles y Luvisoles	4
Luvisoles crómicos	3
Planosoles	2
Vertisoles	1

El coeficiente de corrección de la recarga (F_h) tiene en cuenta la capacidad del terreno de dejar pasar el agua en la vertical. Permite distinguir entre aquellos materiales que tienen características acuíferas, ya sea por su litología, porosidad o grado de alteración y fracturación que presentan, de otros materiales que no presentan estas características acuíferas.

Tabla 6. Puntuación asignada al coeficiente de corrección en base a las características hidrogeológicas del medio	
CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS DE LOS MATERIALES QUE AFLORAN (Fh)	PUNTUACIÓN
Características acuíferas	1
Otros	0,1

Finalmente, el algoritmo utilizado para estimar el porcentaje de recarga es el siguiente:

$$R = [(A + P + 3L + 2I + S) / 0,9].Fh$$

Una vez estimada la recarga, ésta se representa agrupada en cinco intervalos regulares, a cada uno de los cuales se le asigna una categoría según el porcentaje de lluvia que recarga el acuífero.

Tabla 7. Categorías del porcentaje de recarga del acuífero	
INTERVALO	CLASE DE RECARGA
≤ 20 %	Muy Baja
20 - 40 %	Baja
40 - 60 %	Moderada
60 - 80 %	Alta
> 80 %	Muy Alta