

IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO DE TÉMEZ PARA LA EVALUACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS CON GRASS GIS. FASE SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEA.

A. Potenciano de las Heras⁽¹⁾ J. J. Villaverde Valero⁽¹⁾

⁽¹⁾ Centro de Estudios Hidrográficos (CEH), Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Ministerio de Fomento, Paseo de la Virgen del Puerto 3, 28005 Madrid, angela.potenciano@cedex.es ; julio.villaverde@cedex.es

RESUMEN

Se presenta la implementación del modelo hidrológico distribuido de Temez sobre GRASS GIS. Este modelo se utiliza para la evaluación de recursos hídricos en régimen natural con paso mensual y para la totalidad del territorio español, tal como aparece en el Libro Blanco del Agua en España. A partir de las variables de entrada, precipitación y evapotranspiración potencial y los parámetros hidrológicos, el modelo obtiene los mapas de los distintos almacenamientos, humedad en el suelo y volumen de acuífero, y de las variables de salida del ciclo hidrológico, evapotranspiración y escorrentía total, obtenida esta última como suma de la escorrentía superficial y subterránea. El objetivo final del trabajo es la implementación de los componentes superficiales y subterráneos en el modelo hidrológico, desarrollando para ello un programa que hace funcional en GRASS GIS el modelo matemático en que se basa la evaluación de recursos hídricos.

Palabras clave: *Modelo hidrológico distribuido, recursos hídricos, fase superficial, fase subterránea, GRASS GIS.*

ABSTRACT

The Temez distributed hydrological model has been implemented on GRASS GIS. This model, as Water in Spain indicates, is used for the assessment of natural water resources for all Spanish territory on a monthly basis. Maps of the different storages, soil moisture and aquifer volume have been obtained from the input variables: precipitation and potential evapotranspiration, and water parameters. Output variables of the hydrological cycle, evapotranspiration and total runoff, have also been obtained. Total runoff is calculated as the sum of surface and groundwater runoff. The aim of this work is the implementation of the surface and groundwater components on the model by the development of a GRASS GIS application that solves the mathematical functions for the assessment of the water resources.

Key words: *distributed hydrological model, water resources, surface phase, groundwater phase, GRASS GIS.*

INTRODUCCIÓN

El modelo de Témez (Témez, 1977; Estrela y Quintas, 1996; Ruiz, 1999; Cabezas et al, 1999; Álvarez et al, 2005), cuyo esquema representativo se muestra en la Figura 1, utiliza los datos registrados en las estaciones de aforo, la información meteorológica, y las características de las cuencas y acuíferos. Es un modelo hidrológico conceptual y cuasidistribuido, que simula los flujos medios mensuales en régimen natural en cualquier punto de la red hidrográfica de España.

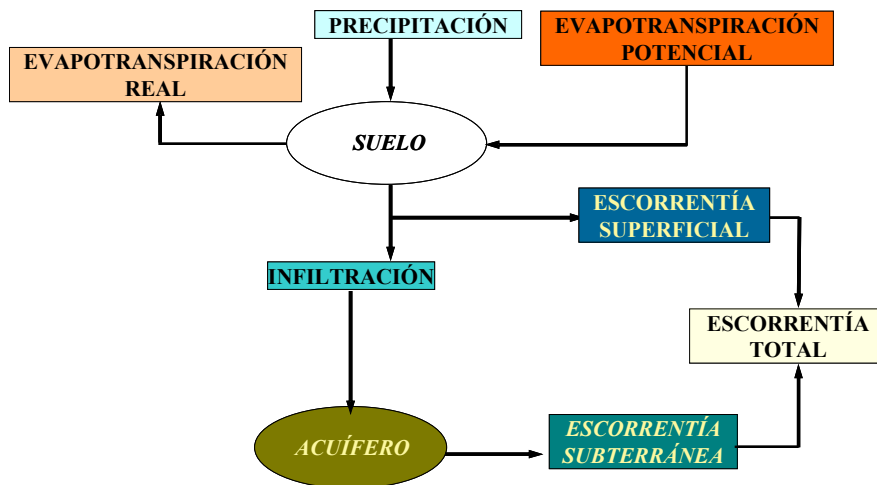


Figura 1:

Figura 1: Esquema representativo del modelo de Témez

Para ello reproduce los procesos esenciales de transporte de agua que tienen lugar en las diferentes fases del ciclo hidrológico, plantea el principio de continuidad y establece, a escala mensual, leyes de reparto y transferencias de agua entre los distintos almacenamientos. En su aplicación en el Libro Blanco del Agua en España (MIMAM, 2000) el territorio español se discretizó en aproximadamente medio millón de celdas de dimensiones 1000 m. x 1000 m.

Las entradas al modelo son los datos de precipitación y evapotranspiración potencial obtenida a partir de datos de temperaturas mensuales en las estaciones meteorológicas. Para contraste se usan los datos de caudales históricos observados en los puntos de simulación o de calibración. Otra información que precisa el modelo son datos sobre topología y clasificación de las subcuencas consideradas (Quintas, 1996) y los mapas de unidades hidrogeológicas.

Los parámetros del modelo son los mapas de, capacidad máxima de almacenamiento de humedad en el suelo, coeficiente de excedente -que regula el denominado umbral de escorrentía-, capacidad máxima de infiltración y coeficiente de recesión de los acuíferos. Todos los parámetros se han obtenido a partir de información fisiográfica de las cuencas y de los acuíferos, tales como usos de suelo, litologías, etc., o del análisis de los hidrogramas de las estaciones de aforo, lo que permite una mayor fiabilidad de la estimación.

OBJETIVOS

El presente artículo muestra la implementación del modelo hidrológico distribuido de Témez para la evaluación de recursos hídricos en GRASS GIS 6.2.1. (GRASS Development Team, 2008).

GRASS GIS (Geographic Resources Analysis Support System) es un Sistema de Información Geográfica de libre distribución utilizado para la gestión y análisis de datos geoespaciales, procesado de imágenes y producción gráfica de mapas, modelado y visualización especial. Actualmente GRASS GIS está siendo utilizado a nivel académico y comercial en muchos lugares del mundo tanto en Organismos oficiales como en consultorías y empresas (GRASS Development Team, 2007). Los módulos utilizados para este trabajo son todos referentes al análisis de datos raster y procesamiento de imágenes.

La implementación de este modelo se ha realizado sobre sistema operativo LINUX usando un *shell script* con comandos de sistema operativo y de GRASS GIS.

METODOLOGÍA

Definición de parámetros y condiciones iniciales de la simulación

Al ser un modelo de paso mensual es necesario:

- Implementar un bucle entre el año inicial y final del periodo de simulación, indicando el mes de inicio de año hidrológico.
- Definir las condiciones iniciales de la simulación:
 - Condición inicial del acuífero
 - Condición inicial del suelo
- Definir los parámetros de los que dependen las leyes de transferencia del modelo:
 - Mapa de coeficiente de excecete
 - Mapa de humedad máxima en el suelo
 - Mapa de infiltración máxima
 - Mapa de coeficiente de recesión del acuífero
- Determinar los mapas base sobre los que se van a aplicar las distintas variables:
 - Mapa de delimitación de cuencas hidrográficas
 - Mapa de delimitación de acuíferos

La implementación de las condiciones iniciales de la simulación y los distintos parámetros requeridos para el funcionamiento del modelo, se describen a continuación en la programación de GRASS GIS 6.2.1:

#DEFINICIÓN DE PARÁMETROS Y CONDICIONES INICIALES DE LA SIMULACIÓN

intervalo de tiempo en que se realiza la simulación (años inicial y final de la simulación). Lectura de un fichero de parámetros

```
ANOI=`head -n 1 param.txt`  
ANOF=`head -n 2 param.txt| tail -1`  
echo "Periodo de la Simulación =" $ANOI - $ANOF
```

mes de inicio del año hidrológico

```
MIAH=`head -n 3 param.txt| tail -1`
```

lectura de la condición inicial del acuífero

```
VO=`head -n 4 param.txt| tail -1`  
echo "Volumen inicial almacenamiento en zona saturada=" $VO  
d.rast $VO
```

lectura de la condición inicial del suelo

```
HI1=`head -n 5 param.txt | tail -1`  
echo "Volumen inicial de humedad en el suelo =" $HI1  
d.rast $ HI1
```

Mapa de coeficiente de excedente

```
EXC=`head -n 6 param.txt | tail -1`  
echo "Coeficiente de excedente=" $EXC  
d.rast $EXC
```

Mapa de Humedad máxima en el suelo

```
HMAX=`head -n 7 param.txt | tail -1`  
echo "Contenido máximo de humedad en el suelo=" $HMAX  
d.rast $HMAX
```

Mapa de Infiltración máxima

```
IMAX=`head -n 8 param.txt | tail -1`  
echo "Infiltrabilidad=" $IMAX  
d.rast $IMAX
```

Mapa de coeficiente de descarga (recesión) del acuífero

```
ALFA=`head -n 9 param.txt | tail -1`  
echo "Coeficiente de descarga en el acuífero=" $ALFA  
d.rast $ ALFA
```

Mapa de delimitación de cuencas hidrográficas

```
MAPC=`head -n 10 param.txt | tail -1`  
echo "Mapa de cuencas =" $MAPC  
d.rast $ MAPC
```

Mapa de delimitación del acuífero

```
MAPUH=`head -n 11 param.txt | tail -1`  
echo "Mapa de acuíferos=" $MAPUH  
d.rast $ MAPUH
```

```
echo -----  
echo -----
```

```
# Se crean los siguientes ficheros de resultados (unidades en mm)
> pre.txt
> etp.txt
> etr.txt
> aes.txt
> asb.txt
> rec.txt

# Inicialización de mapas de estado inicial
r.mapcalc volt.uh=$VO
r.mapcalc hifin=$HI1

# descarga de cada unidad hidrogeológica agregada
# alfa.uh : valor medio de alfa en cada unidad hidrogeológica
r.mapcalc alfa.uh=if(isnull($ALFA),0,$ALFA)

# ealfa.uh : valor de la función exponencial en cada unidad hidrogeológica;
# el paso de tiempo es mensual, 30 días
r.mapcalc ealfa.uh="exp(-alfa.uh*30.)"

# inicio del bucle de cálculo mensual
ANO=$ANOI
ANOC=`expr $ANOF + 1`
while [ $ANO != $ANOC ]
do
  MES=$MIAH
  CON=1
  while [ $CON != 13 ]
  do
    if [ $MES -lt $MIAH ]
    then
      NANO=`expr $ANO + 1`
    else
      NANO=$ANO
    fi
  done
done

# volumen en el instante i = resultado anterior (inicialmente $V0)
r.mapcalc vi1=volt.uh
# humedad inicial = humedad anterior (inicialmente $HI1)
r.mapcalc hi1=hifin
```

Base teórica del modelo de Témez e Implementación del modelo de Témez en GRASS GIS

Fase Superficial

El modelo de Témez, y su desarrollo con GRASS GIS en el que se basa este trabajo, plantea una serie de ecuaciones conceptuales para el cálculo de los flujos y almacenamientos de agua en las celdas en las que se ha discretizado el territorio (Témez, 1977; Cabezas et al, 1999). El cálculo del excedente de agua en cada celda

III JORNADAS DE SIG LIBRE

es, básicamente, función de la precipitación (P_i), del déficit de humedad en el suelo ($H_{m\acute{a}x}-H_{i-1}$) y de la evapotranspiración potencial (EP_i), y tiene como expresión (Témez, 1977):

$$P_i \leq P_0 \quad T_i = 0 \quad (1)$$

$$P_i > P_0 \quad T_i = \frac{(P_i - P_0)^2}{P_i + \delta - 2P_0} \quad (2)$$

Donde:

$$\delta = H_{m\acute{a}x} - H_{i-1} + EP_i \quad (3)$$

$$P_0 = C (H_{m\acute{a}x} - H_{i-1}) \quad (4)$$

siendo en cada celda:

P_i precipitación en el mes i (mm)

T_i excedente de agua en el mes i (mm)

$H_{m\acute{a}x}$ capacidad máxima de almacenamiento de agua en el suelo (mm)

H_{i-1} almacenamiento de agua en el suelo en el mes $i-1$ (mm)

EP_i evapotranspiración potencial en el mes i (mm)

C parámetro de excedente, que toma valores del orden de 0,3

Una vez definidas las condiciones iniciales, el programa comienza a resolver las distintas ecuaciones del modelo Témez, comenzando por el parámetro de excedente T_i , cuya formulación se ha descrito anteriormente (ecuaciones 1 a 4), y por el cálculo de la evapotranspiración potencial EP_i , necesaria para la estimación posterior de la ecuaciones 5 y 6. Este desarrollo de programa se indica a continuación:

CÁLCULOS DE VARIABLES EN PERIODO DE SIMULACIÓN

cálculo de los mapas de excedente T_i en mm/mes (ver ecuaciones 1 a 4), y de la evapotranspiración potencial, ETP o EP_i en mm/mes (ver ecuación 5 y 6) según el modelo de Témez

cálculo de valores medios de precipitación, PRE y evapotranspiración potencial, ETP o EP_i en cuenca y su paso a fichero

```
PRE="pre"$NANO_"$MES
```

```
echo -----
```

```
echo "Precipitación (mm) Año: "$NANO" Mes: "$MES
```

```
echo -----
```

```
r.average base=$MAPC cover=$PRE output=pre.cu --o
```

```
r.stats -An input=pre.cu output=pre.tmp
```

```
more pre.tmp >> pre.txt
```

```
ETP="etp"$NANO_"$MES
```

```
echo -----
```

```
echo "Evapotranspiración potencial (mm) Año: "$NANO" Mes: "$MES
```

```
echo -----
```

```
r.average base=$MAPC cover=$ETP output=etp.cu --o
```

```
r.stats -An input=etp.cu output=etp.tmp
```

```
more etp.tmp >> etp.txt
```

```
# Cálculo del excedente de agua:  $T_i$  (ver ecuaciones 1 a 4)
```

```
echo -----
echo "Po, umbral de escorrentía (mm) Año: "$NANO" Mes: "$MES
echo -----
r.mapcalc po="$EXC*($HMAX-hi1)"
echo -----
echo "Excedente (mm) Año: "$NANO" Mes: "$MES
echo -----
r.mapcalc num1=$PRE-po
r.mapcalc num2=$PRE+$HMAX-hi1+$EPI-2.*po
r.mapcalc ti="if(num1>0.,num1*num1/num2,0.)"
```

Otras variables necesarias para la resolución del modelo en su fase superficial son el almacenamiento de agua en el suelo (H_i) y la evapotranspiración real (E_i) en cada celda en el mes i , y que se obtienen mediante las siguientes expresiones:

$$H_i = \max\left[0, (H_{i-1} + P_i - T_i - EP_i)\right] \quad (5)$$

$$E_i = \min\left[(H_{i-1} + P_i - T_i), EP_i\right] \quad (6)$$

Su implementación en el programa se describe a continuación:

```
# Cálculo de la humedad en el suelo en el instante  $i$ :  $H_i$  en mm/mes (ver ecuación 5)
```

```
HI="hi"$NANO_"$MES
echo -----
echo "Humedad en el suelo (mm) Año: "$NANO" Mes: "$MES
echo -----
r.mapcalc hifin="max(0.,hi1+$PRE-ti-$ETP)"
g.copy rast=hifin,$HI -o
```

```
# dibuja el cociente respecto al máximo
```

```
r.mapcalc hi_hmax=$HI/$HMAX*100
```

```
# Cálculo de la evapotranspiración real: ETR o  $E_i$  en mm/mes (ver ecuación 6)
```

```
ETR="etr"$NANO_"$MES
echo -----
echo "Evapotranspiración real (mm) Año: "$NANO" Mes: "$MES
echo -----
r.mapcalc etr="min(hi1+$PRE-ti,$ETP)"
g.rename rast=etr,$ETR --o
```

```
r.average base=$MAPC cover=$ETR output=etr.cu --o
r.stats -An input=etr.cu output=etr.tmp
more etr.tmp >> etr.txt
```

Fase Subterrànea

La infiltración al acuífero por lluvia directa (I_i) en cada celda es función del excedente de agua (T_i) y del parámetro de infiltración máxima ($I_{máx}$) y adopta la siguiente expresión (Témez, 1977):

$$I_i = I_{máx} \cdot \frac{T_i}{T_i + I_{máx}} \quad (7)$$

Su implementación en el programa se describe a continuación:

```
# Cálculo de la infiltración distribuida (ver ecuación 7)
REC="rec"$NANO"_"$MES
echo -----
echo "Recarga (mm) Año: "$NANO" Mes: "$MES
echo -----
r.mapcalc rec="if(isnull($IMAX),0.,$IMAX*ti/(ti+$IMAX))"
g.copy rast=rec,$REC --o

r.average base=$MAPUH cover=rec output=rec.uh --o
r.stats -An input=rec.uh output=rec.tmp
more rec.tmp >> rec.txt
```

Según Témez (1977) y Cabezas et al (1999) el modelo asume que la recarga al acuífero en cada celda coincide con la infiltración. Una vez calculada la recarga en cada una de las celdas pertenecientes a los distintos acuíferos, el modelo realiza su integración en los recintos que los definen y aplica el conocido modelo unicelular de forma agregada. La evolución del volumen almacenado en el acuífero y su descarga a la red de drenaje superficial o al mar se realiza mediante las siguientes expresiones:

$$V_i = V_{i-1} \cdot e^{-\alpha \cdot \Delta t} + \frac{R_i}{\alpha} (1 - e^{-\alpha \cdot \Delta t}) \quad (8)$$

$$A_{sub_i} = V_{i-1} - V_i + R_i \quad (9)$$

siendo:

- α coeficiente de agotamiento del acuífero (meses-1)
- Δt intervalo temporal (mes)
- R_i recarga al acuífero en el mes i (mm/mes)
- V_i volumen almacenado en el acuífero en el mes i (mm)
- A_{sub_i} aportación subterránea correspondiente al mes i (mm/mes)

La aportación total es igual a la parte de excedente (T_i) no infiltrada (I_i) más la aportación subterránea (A_{sub_i})

$$A_{Tot_i} = (T_i - I_i) + A_{sub_i} = A_{sup_i} + A_{sub_i} \quad (10)$$

siendo:

A_{supi} aportación superficial del mes i (mm/mes)
 A_{Toti} aportación total durante el mes i (mm/mes).

La implementación del programa para la obtención de los valores de escorrentía superficial, escorrentía subterránea y aportación total se muestra a continuación:

```
# Escorrentía superficial (mm/mes) por cuenca (ver ecuación 10)
ASP="asp"$NANO"_"$MES
echo -----
echo "Escorrentía directa (mm) Año: "$NANO" Mes: "$MES
echo -----
r.mapcalc aspl=ti-rec$NANO"_"$MES
g.copy rast=aspl,$ASP -o

# volt.uh : volumen almacenado en acuífero al final del mes de cálculo (mm) en
cada unidad hidrogeológica (ver ecuación 8)
VI="vi"$NANO"_"$MES
r.mapcalc volt.uh=if(isnull($MAPUH),0.,vi1*ealfa.uh+rec.uh*(1.-
ealfa.uh)/(alfa.uh*30.))"
g.copy rast=volt.uh,$VI --o

# Escorrentía subterránea (mm/mes) por unidad hidrogeológica y cuenca (ver
ecuación 9)
ASB="asb"$NANO"_"$MES
echo -----
echo "Escorrentía subterránea (mm) Año: "$NANO" Mes: "$MES
echo -----
r.mapcalc asbr=vi1-volt.uh+rec.uh
g.copy rast=asbr,$ASB --o

r.average base=$MAPC cover=$ASB output=asb.cu --o
r.stats -An input=asb.cu output=asb.tmp
more asb.tmp >> asb.txt

# aptotal : aportación (mm/mes) por unidad hidrogeológica (ver ecuación 10)
AES="aes"$NANO"_"$MES
echo -----
echo "Escorrentía total (mm) Año: "$NANO" Mes: "$MES
echo -----
r.mapcalc aest=aspl+asbr
g.copy rast=aest,$AES --o

r.average base=$MAPC cover=$AES output=aes.cu --o
r.stats -An input=aes.cu output=aes.tmp
```

```
more aes.tmp >> aes.txt

CON=`expr $CON + 1`
MES=`expr $MES + 1`

if [ $MES -eq 13 ]; then
    MES=1
fi
done
ANO=`expr $ANO + 1`
done

# serie temporal con valores medios em cuenca
FILEOUT="ResTemez"$ANOI_"$ANOF".txt"
echo "Resultados simulación mensual. Años: "$ANOI_"$ANOF > $FILEOUT
echo "Área de cuenca (m2): " >> $FILEOUT
r.stats -an input=$MAPC >> $FILEOUT
echo "Precipitación ETP ETR Recarga EscorrentíaBase EscorrentíaTotal" >>
$FILEOUT
paste pre.txt etp.txt etr.txt rec.txt asb.txt aes.txt >> $FILEOUT

# borrado de ficheros temporales
rm pre.txt etp.txt etr.txt rec.txt asb.txt aes.txt
rm aes.tmp asb.tmp pre.tmp etr.tmp etp.tmp rec.tmp
g.remove
rast=hi1,num1,num2,aest,asbr,aspl,vi1,volt.uh,hifin,rec,rec.uh,alfa.uh,ealfa.uh,po
,ti,aes.cu,
pre.cu,etr.cu,etp.cu,asb.cu

echo "Terminado el cálculo de las aportaciones específicas en $SECONDS
segundos"
```

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Como resultado principal de este trabajo, se presenta un programa sobre GRASS GIS 6.2.1 que desarrolla el modelo de Témex expuesto.

A continuación, en la Figura 2 se presenta un ejemplo de resultados obtenidos mediante la aplicación de este modelo de las distintas variables que maneja, precipitación, evapotranspiración potencial y real, humedad del suelo, recarga del acuífero, volumen del acuífero, escorrentía superficial, escorrentía subterránea y escorrentía total, para el mes de abril de 1969 (MIMAM, 2000).

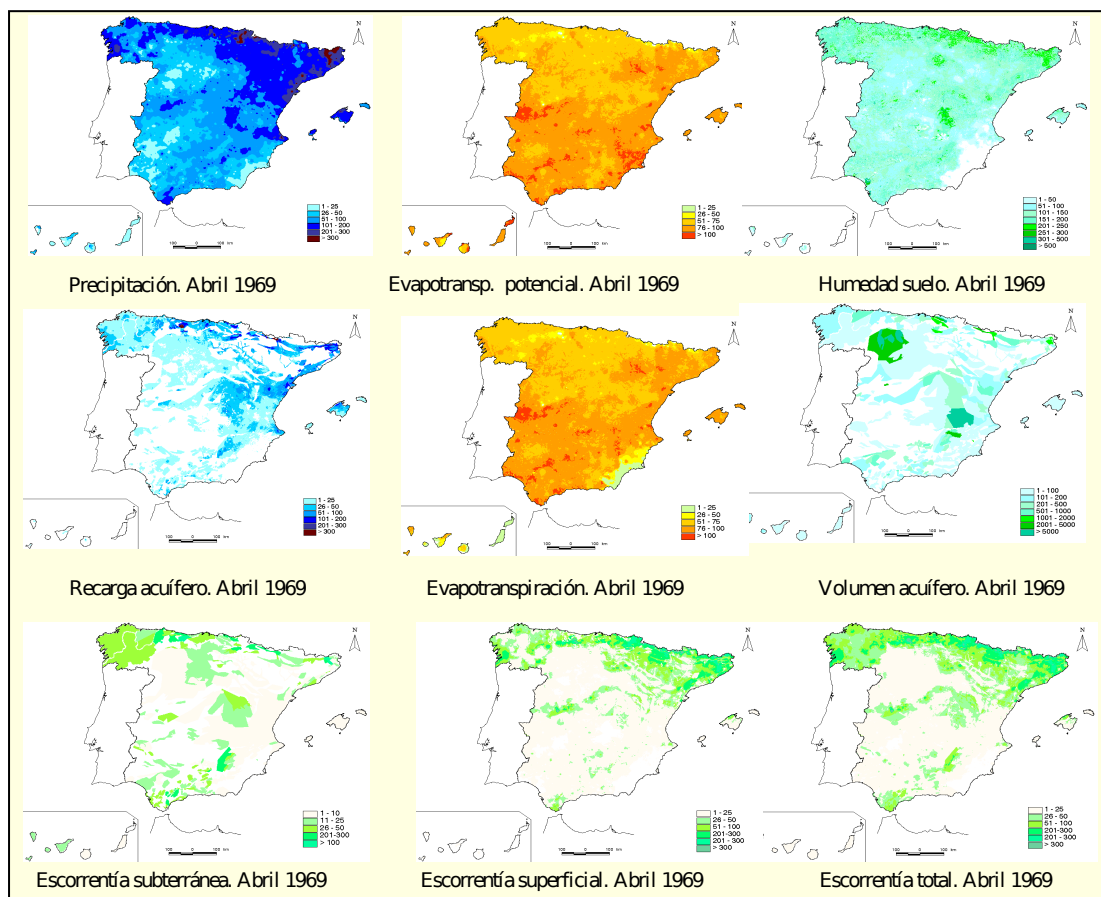


Figura 2: Variables hidrológicas simuladas en abril de 1969

También se presenta en la Figura 3 un mapa de escorrentía total medio anual para el periodo de simulación en mm/año (MIMAM, 2000).

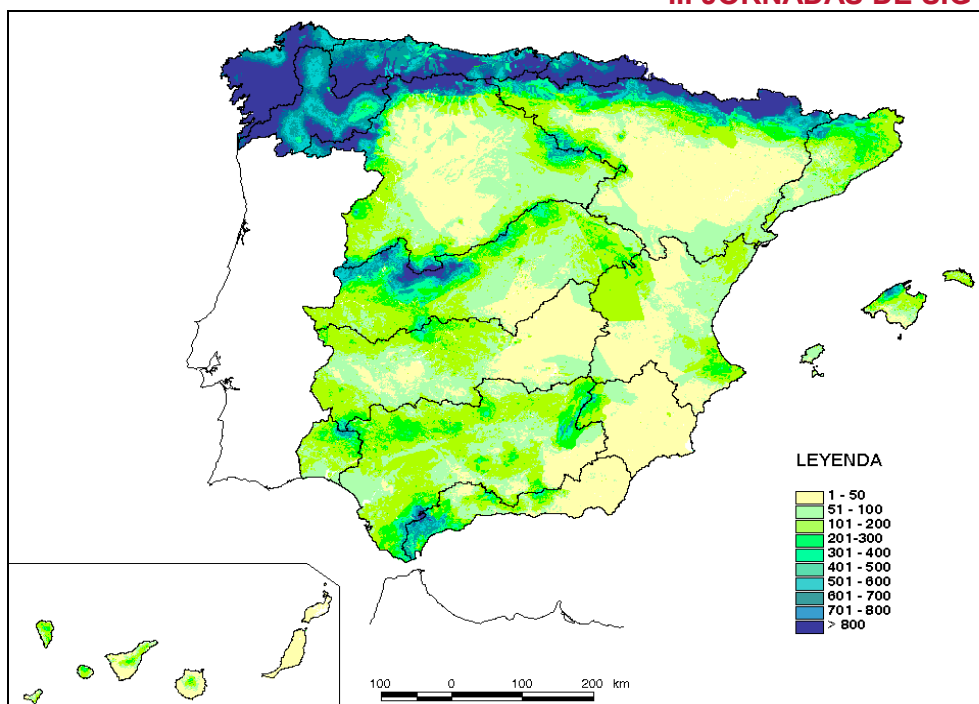


Figura 3: Escorrentía total media anual en mm/año para el periodo de simulación

BIBLIOGRAFÍA

- ◆ ÁLVAREZ, J.; SÁNCHEZ, A. Y QUINTAS, L. (2005), "SIMPA, a GRASS Based Tool for Hydrological Studies". *International Journal of Geoinformatics*, Vol.1, No. 1, March 2005. pp. 13-20
- ◆ CABEZAS CALVO-RUBIO, F.; ESTRADA LORENZO, F. Y ESTRELA MONREAL, T. (1999), "Algunas contribuciones técnicas del Libro Blanco del Agua en España". *Ingeniería Civil*, nº 115, pp. 79-96
- ◆ CIEMAT (2000), *Propiedades Edafológicas de los Suelos Españoles*. Base de Datos en formato digital.
- ◆ ESTRELA MONREAL, T. Y QUINTAS RIPOLL, L. (1996), "El sistema integrado de modelización precipitación-aportación SIMPA". *Ingeniería Civil*, 104
- ◆ FAO-Unesco (1974), *Soil Map of the World*
- ◆ GRASS Development Team (2007), *GRASS 6.2 Users Manual*. ITC-irst, Trento, Italy. Electronic document: http://grass.osgeo.org/grass62/manuals/html62_user/
- ◆ GRASS Development Team (2008), *Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software*. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://grass.osgeo.org>
- ◆ QUINTAS, L. (1996), "La base de datos hidrológicos "HIDRO" del CEDEX". *Ingeniería Civil*, 104. pp. 117-126
- ◆ MIMAM. MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE. SECRETARÍA DE ESTADO DE AGUAS Y COSTAS. DIRECCIÓN GENERAL DE OBRAS HIDRÁULICAS Y CALIDAD DE LAS AGUAS (2000): *Libro Blanco del Agua en España*. Ed. Secretaría General Técnica del Ministerio de Medio Ambiente. Madrid. 637 p.
- ◆ RUIZ GARCÍA, J. M. (1999), *Modelo distribuido para la evaluación de recursos hídricos*. Monografías Cedex M67

III JORNADAS DE SIG LIBRE

- ◆ TEMEZ, J.R. (1977): Modelo matemático de transformación Precipitación Aportación, ASINEL 1977
- ◆ THORNTHWAITE, C.W. Y MATHER J.R. (1957), "Instructions and Tables for Computing Potential Evapotranspiration and the Water Balance". Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology, *Publications in Climatology* 10(3), 311 pp.