



Programa para el cálculo de la recarga a los acuíferos a partir de los procesos que tienen lugar en el suelo. Calibración mediante modelos de flujo

MANUAL DEL USUARIO

APLICACIÓN

RENATA

Equipo de trabajo:

Instituto Geológico y Minero (IGME)

José Manuel Murillo Díaz. *Dr. Ingeniero de Minas*

Juan Antonio López Geta. *Dr. Ingeniero de Minas*

Excma. Diputación Provincial de Alicante

Luis Rodríguez Hernández. *Ingeniero de Minas*

Juan Antonio Hernández Bravo. *Geólogo*

Miguel Fernández Mejuto. *Geólogo*

Empresa consultora

Equipo realizador:

Alicia Rodríguez Trinidad. *Ingeniero en Informática*

Joaquín Delgado Pastor. *Geólogo*

Alberto Padilla Benítez. *Dr. en Geología*

Emilio Castillo Pérez. *Geólogo*

Información de contacto:

Instituto Geológico y Minero de España (IGME)

C/ Río Rosas, 23

28003-Madrid

Departamento del Ciclo Hídrico

(Excma. Diputación Provincial de Alicante)

Avda. de Orihuela 128

03006 – Alicante

www.ciclohidrico.es

El presente manual describe las utilidades y el manejo del programa informático RENATA (REcarga NATural a los Acuíferos) desarrollado para calcular la recarga de agua a los acuíferos a partir de los procesos que tienen lugar en el suelo. La aplicación ha sido diseñada para ser utilizada en acuíferos con diferentes características superficiales en relación con las propiedades y usos del suelo, que condicionan la infiltración del agua a los acuíferos.

Los trabajos para el desarrollo de este código se han realizado en el marco del Convenio IGME-DIPUTACIÓN DE ALICANTE en el proyecto titulado **ESTUDIO METODOLÓGICO PARA LA INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE MODELOS DE SOSTENIBILIDAD HÍDRICA QUE UTILICEN AGUAS SUBTERRÁNEAS EN CONJUNCIÓN CON OTRAS FUENTES DE AGUA**. Dentro de este proyecto general, se enmarcan los contemplados en los contratos **Diseño de una aplicación informática para estimar la recarga a los acuíferos a partir de los procesos que tienen lugar en el suelo y zona no saturada** (Exp. 0128/08) y **Confeción del manual de usuario del código informático RENATA de recarga natural de acuíferos** (Exp. 01001879).

Aunque existen programas comerciales y de uso libre, que puntualmente pudieran resolver los problemas concretos de análisis hidrogeológico que usualmente se plantean en el IGME o en el Departamento del Ciclo Hídrico (DCH) de la Diputación de Alicante, con esta nueva aplicación informática se pretende alcanzar soluciones personalizadas, que hagan uso de las aplicaciones informáticas desarrolladas durante estos últimos años por DCH e IGME.

Una de las grandes ventajas de esta aplicación informática, es la posibilidad de poder conectar con otras utilidades empleadas habitualmente por estos organismos, como por ejemplo los programas MOFA para la modelización del flujo subterráneo, SIMTRA para simular la intrusión marina o TRASERO para el tratamiento de series temporales.

La personalización del programa RENATA a los proyectos y bases de datos que realiza y utiliza el IGME y el DCH, no contradice que la herramienta desarrollada tenga un carácter universal y pueda ser utilizada por cualquier otro Organismo o personal técnico que quiera o pretenda estimar la recarga natural a los acuíferos.

Otra de las ventajas que presenta RENATA es la posibilidad de disponer de una herramienta informática propia que permita modificar el código en un futuro para adaptarlo a las nuevas exigencias de la investigación científica de las ciencias de la Tierra, sin depender de tecnología externa. Con ello se retoma una línea de trabajo de la Dirección de Hidrogeología y Aguas Subterráneas del IGME abandonada hace años, que se encuadra en los actuales planes de investigación y desarrollo de este organismo.

El código desarrollado presenta importantes novedades frente a otros códigos que estiman la recarga natural a los acuíferos, como son la posibilidad de introducir dotaciones de riego discretizadas y distribuidas en el espacio y en el tiempo, o el poder realizar la calibración de los resultados que ofrece RENATA mediante la aplicación de un modelo de flujo.

	Páginas
1.- CONCEPTOS BÁSICOS Y METODOLOGÍA	1
1.1.- ETAPAS PARA LA UTILIZACIÓN DEL PROGAMA	1
1.2.- CÁLCULO DE LA INFILTRACIÓN	3
2.- DESCRIPCIÓN DE LA APLICACIÓN	9
2.1.- INICIO DE LA APLICACIÓN	10
2.2.- ENTRADA DE DATOS.....	13
2.2.1.- Gestión de series	13
2.2.2.- Gestión de sectores	15
2.2.2.1.- Sectores climáticos.....	15
2.2.2.2.- Sectores de suelo.....	17
2.2.2.3.- Sectores de riego	18
2.3.- CÁLCULOS.....	19
2.4.- RESULTADOS.....	20
2.5.- EXPORTACIÓN DE LA RECARGA AL MODELO DE FLUJO.....	22
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	25

1.- CONCEPTOS BÁSICOS Y METODOLOGÍA

Antes de ejecutar la aplicación RENATA es necesario definir la geometría en planta del acuífero. Esta definición se puede realizar mediante las aplicaciones para la simulación del flujo subterráneo (MOFA), flujo y transporte de solutos (MOSTRENCO) o flujo e intrusión marina (SIMTRA).

A estas aplicaciones se les ha añadido un ítem de menú llamado “Módulo de Recarga” que establecerá la conexión con RENATA. En dicha conexión se hará el traspaso de toda la información necesaria para la realización de cálculos. Dicha información es la siguiente:

- Discretización superficial: número y tamaño de las filas y columnas
- Coordenadas UTM
- Fechas de inicio y fin del proyecto
- Celdas inactivas
- Directorio de trabajo

1.1.- ETAPAS PARA LA UTILIZACIÓN DEL PROGRAMA

El objetivo final del programa es calcular la recarga, y otras variables, en cada celda del modelo en unidades de mm (l/m^2) para cada período de tiempo (t) en el que se han discretizado las series climatológicas. Las cinco etapas que el usuario podrá seguir para obtener estos resultados mediante la aplicación RENATA son las siguientes:

- a) Inserción y modificación de series temporales
- b) Definición de sectores
- c) Realización de cálculos
- d) Visualización de resultados y gráficos
- e) Exportación al modelo de flujo para su calibración

a) Inserción y modificación de series temporales

Se va a disponer de series de datos cronológicos que serán utilizadas para el cálculo y la calibración. Las series que se pueden insertar y modificar son las de precipitación y de temperatura. Se pueden crear nuevas series, editándolas desde el mismo programa para la asignación de propiedades e incorporación de datos (con la posibilidad de conexión con Excel), y también se pueden importar, tanto desde un fichero en ASCII como de la Base de Aguas de la Diputación de Alicante (BDA). Estas series podrán ser editadas y modificadas por el usuario.

El formato de estas series es el utilizado para la aplicación TRASERO, que es el formato de texto o “txt”.

b) definición de sectores

El modelo estará discretizado en zonas o sectores. Se han definido cuatro tipos temáticos de sectores:

- Sectores climáticos
- Sectores de suelo
- Sectores de riego
- Intersecciones

Los sectores climáticos coinciden con las áreas de influencia de una pareja de estaciones climáticas, pluviométrica y termométrica, con las que está asociada. Cuando se lleven a cabo los cálculos, estos sectores tendrán también asociada una serie de evapotranspiración potencial.

Los sectores de suelo corresponden a zonas del modelo con unas características comunes, que son:

- Número de curva
- Límite inferior de la capacidad de almacenamiento o capacidad de campo
- Límite superior de la capacidad de almacenamiento, si se emplea el método de cálculo de Thornthwaite modificado por G. Girard (1981)
- Umbral de escorrentía

En el epígrafe siguiente se describe la metodología utilizada para calcular la infiltración.

Los sectores de riego es la zonificación espacial para tener en cuenta los posibles retornos de riego según el tipo de cultivo. Para los retornos de regadío se asocia al sector una serie temporal de dotación en m^3/ha con lapso mensual y sobre estos valores se aplica un porcentaje de retorno.

Las intersecciones son, como su propio nombre indica, las intersecciones entre sectores climáticos y sectores de suelo y/o sectores de riego, estos últimos son optativos. Es decir, el resultado de unir los distintos tipos de sectores con características y, consecuentemente, resultados diferentes. A cada una de las zonas obtenidas por intersección geométrica se le asocia una serie temporal de infiltración en mm y, si se ha considerado el retorno de riego, otra serie de retorno con las mismas unidades. Además, también se asocian las series resultantes del cálculo climático: una serie de evapotranspiración real, una serie de lluvia útil y otra de escorrentía superficial.

c) Realización de cálculos

Los cálculos que se realizan son los de la evapotranspiración potencial, evapotranspiración real, lluvia útil, infiltración y escorrentía. Éstos se realizan de forma independiente mediante la selección de unos métodos de cálculo. El cálculo se puede realizar a nivel diario o mensual. Los resultados se pasan en forma de series temporales que estarán asociadas tanto a los sectores climáticos como a las intersecciones resultantes.

d) Visualización de resultados y gráficos

Una vez realizados los cálculos se puede proceder a visualizar los resultados numérica o gráficamente para cada uno de los sectores diferenciados. Se pueden mostrar los valores mensuales u obtener resúmenes anuales.

Las herramientas diseñadas para la visualización permiten mostrar conjuntamente los resultados obtenidos con RENATA y las series resultantes al ejecutar el modelo de flujo, lo que facilita al usuario los procesos de ajuste de los parámetros que intervienen en la calibración.

e) Exportación al modelo de flujo y calibración

Finalmente, una vez validados los resultados obtenidos con RENATA, el usuario puede almacenar los resultados y/o exportarlos al formato espacialmente discretizado en el diseño del modelo de flujo.

Al ejecutar el modelo de flujo se podrán obtener aquellas series que se consideren interesantes para la calibración (drenaje por manantiales, evoluciones piezométricas, etc), que pueden incluirse en RENATA para comparar resultados y proceder a su mejor ajuste, si esto se estima necesario

1.2.- CÁLCULO DE LA INFILTRACIÓN

A partir de la temperatura se calcula por el método empírico de Thornthwaite la evapotranspiración potencial. Con la evapotranspiración potencial y la precipitación se calculan por el método del balance de Thornthwaite, o mediante la modificación introducida por G. Girard, la evapotranspiración real y la lluvia útil.

También se puede calcular la infiltración y la escorrentía superficial descomponiendo la lluvia útil según el método del Soil Conservation Service de los EEUU.

Evapotranspiración potencial

Se define la evapotranspiración potencial como la cantidad de agua que puede volver a la atmósfera por evaporación y transpiración cuando la capacidad de agua del suelo está completa y el desarrollo vegetal es óptimo.

Para su estimación Thornthwaite propone la siguiente fórmula:

$$e_i = 16 \left(\frac{10 t_i}{I} \right)^a$$

donde:

e_i , evapotranspiración del mes i sin ajustar (mm). Para datos diarios hay que dividir por 30

t_i , temperatura media del mes ($^{\circ}\text{C}$). Para valores diarios corresponde a la temperatura media diaria

I , índice de calor anual: $I = \sum_{i=1}^{12} i_i$

i_i , índice de calor mensual: $i_i = \left(\frac{t_i}{5}\right)^{1.515}$

$a = 0.000000675 \cdot \bar{t}^3 - 0.0000771 \cdot \bar{t}^2 + 0.01792 \cdot \bar{t} + 0.49239$

Para valores de temperatura media superior a 26.5°C la evapotranspiración potencial sin ajustar se obtiene directamente según la siguiente tabla:

t_i	26,5	27,0	27,5	28,0	28,5	29,0	29,5	30,0	30,5	31,0	31,5	32,0	32,5	33,0	33,5	34,0	34,5	35,0	35,5	36,0	36,5	37,0	37,5	38,0
e_i	135,0	139,5	143,7	147,8	151,7	155,4	158,9	162,1	165,2	168,0	170,7	173,1	175,3	177,2	179,0	180,5	181,8	182,9	183,7	184,3	184,7	184,9	185,0	185,0

La evapotranspiración potencial de cada mes (ETP_i) se obtiene multiplicando la e_i por un factor de corrección:

$$ETP_i = K_i e_i$$

donde:

K_i , factor de corrección: $K_i = N_i/12$, para datos diarios, y $K_i = (D_i/30) \times (N_i/12)$, para datos mensuales

D_i , número de días del mes

N_i , número máximo de horas de sol, según la latitud

El número máximo de horas de sol en el día i viene dado por:

$$N_i = \frac{2}{15} w$$

donde:

w , ángulo horario en grados: $w = \arccos(-\tan(\phi) \tan(d))$

ϕ , latitud en grados

d , declinación en grados: $d = 23.45 \cdot \sin [0.9863 \cdot (284+n)]$

n , día del año contado desde el 1 de enero

Evapotranspiración real y lluvia útil

La evapotranspiración real (ETR) es la cantidad de agua que realmente vuelve a la atmósfera. Su valor depende de su disponibilidad bien en forma de lluvia bien de la almacenada en el suelo. El límite superior de ETR viene determinado por la ETP .

La lluvia útil (LLU), también denominada lluvia eficaz o excedente, corresponde a la cantidad de agua que escurre superficialmente más la que se infiltra.

Para determinar la ETR y LLU , Thornthwaite plantea para cada periodo i un balance del suelo según la siguiente expresión:

$$P_i = ETR_i + LLU_i + \Delta R_i$$

donde:

P_i , precipitación (mm)

ΔR_i , incremento de la reserva de agua en el suelo utilizable por las plantas (mm)

Dicho balance se realiza según las siguientes premisas:

- $ETR_i \leq ETP_i$
- El suelo no puede almacenar más de una cierta cantidad de agua que se denomina capacidad de campo (CC) y depende fundamentalmente de la litología del suelo.
- Siempre que se disponga de agua, precipitación más la almacenada en el suelo, es prioritario primero cubrir la necesidades de ETR_i hasta su límite (ETP_i) y después aumentar el agua almacenada en el suelo, hasta su límite (CC).
- El excedente de agua, una vez cubiertas las demandas de ETP_i y CC, integra la LLU_i .

En la aplicación se ha incluido una variante en el método del balance de Thornthwaite ideada por Girard que creemos se adapta mejor a lo que ocurre en la naturaleza.

La variante introducida consiste en que se considera que el excedente de agua de precipitación se almacena en el suelo de dos formas. Si el agua almacenada en el periodo anterior (R_{i-1}) es inferior a un cierto valor R_{MIN} el exceso de precipitación ($EX_i = P_i - ETR_i$) se acumula en su totalidad. Si R_{i-1} está comprendida entre R_{MIN} y un cierto valor máximo (R_{MAX} , equivalente a la CC), EX_i se divide entre una parte que se destina a aumentar la reserva del suelo y otra a LLU_i . Esta repartición se realiza según la siguiente expresión:

$$LLU_i = \max(R_{i-1} + P_i - R_{MAX}, 0) + \Delta R_i \frac{(2RBA_i + \Delta R_i)}{2(R_{MAX} - R_{MIN})}$$

donde:

$$RBA_i = \max(R_{MIN}, (R_{i-1} - R_{MIN}))$$

$$\Delta R_i = \max(0, (RHA_i - RBA_i))$$

$$RHA_i = \min((R_{i-1} + P_i), R_{MAX}) - R_{MIN}$$

El aumento de la reserva (ΔR_i) es igual:

$$\Delta R_i = EX_i - LLU_i$$

si $R_{MIN} = R_{MAX}$ el balance se realiza según el método tradicional de Thornthwaite.

Escorrentía superficial e infiltración

Para descomponer la LLU_i en escorrentía (ESC_i) y en infiltración (INF_i) se ha seguido el método del Soil Conservation Service de los EE.UU. Este método parte de un umbral de escorrentía (P_0) a partir del cual se empieza a producir escorrentía superficial. El valor de este parámetro depende de la litología, de la pendiente y de la vegetación (ver cuadro adjunto). La escorrentía se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$ESC_i = \frac{(LLU_i - P_0)^2}{LLU_i + 4 P_0}$$

La infiltración para un determinado mes es igual:

$$INF_i = LLU_i - ESC_i$$

El valor de P_0 tiene su equivalencia con el denominado *número de curva* (NC) mediante la siguiente expresión:

$$P_0 = \frac{5.080}{NC} - 50,80$$

o bien

$$NC = \frac{5.080}{(P_0 + 50,80)}$$

En la aplicación estos parámetros se podrán introducir bien como P_0 o como NC .

Hay que indicar que este método hay que aplicarlo con ciertas reservas pues está ideado para obtener la escorrentía superficial en cuencas pequeñas y para intervalos de tormenta relativamente cortos. Para obtener los resultados medios que normalmente se esperan en estudios más extensos, tanto en superficie como en el tiempo, hay que emplear esta utilidad con criterios hidrológicos y analizar los resultados para que sean coherentes con el funcionamiento esperado.

Valores orientativos del parámetro P_o (mm) en función de algunas características del terreno y del uso. Fuente MOPU: *Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales* (José R. Témez).

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

Los valores de P_o muy altos se han sustituido por ---.
Las zonas abancaladas se incluyen entre aquellas con pendiente $< 3\%$.
(1) *R* cuando las labores de cultivo en la dirección de la máxima pendiente o a media ladera y *N* cuando se realizan siguiendo las curvas de nivel.
(2) *A* cuando el agua se infiltra rápidamente, *B* con capacidad de infiltración moderada, *C* la infiltración es lenta y *D* la infiltración es muy lenta

2.- DESCRIPCIÓN DE LA APLICACIÓN

La aplicación RENATA se ha desarrollado con Visual Basic 2008 bajo la plataforma *.NET* lo que posibilita su ejecución en distintos sistemas operativos. RENATA no precisa de instalación propia. Se incluye y se instala automáticamente con los paquetes de programas MOFA o SIMTRA.

Los requerimientos mínimos para su ejecución son los siguientes:

- Velocidad CPU: mínimo 2000 MHz.
- Tarjeta gráfica: VGA con resolución mínima de 800x600 pixeles y 256 colores, recomendable sVGA de 1024x768 pixeles y color de alta densidad (16 bits).
- Memoria RAM: mínimo requerido 512 MB.
- Espacio en disco: mínimo 100 MB de memoria libre en el disco duro.

Como requerimiento adicional, para algunas funcionalidades de importación de datos o de generación de informes de resultados, es necesario tener instalados los programas Microsoft Excel y Microsoft Word.

La aplicación se suministra en soporte CD junto con los programas mencionados que contienen los archivos necesarios para su instalación, así como ficheros de ejemplo y la documentación correspondiente.

Para su instalación se ejecutará desde *Windows* el programa **setup.exe**, que contiene el CD, y se continuará siguiendo las instrucciones (**figura 2.1**).

El programa quedará finalmente ubicado en la ruta de instalación elegida por el usuario en el proceso de instalación.

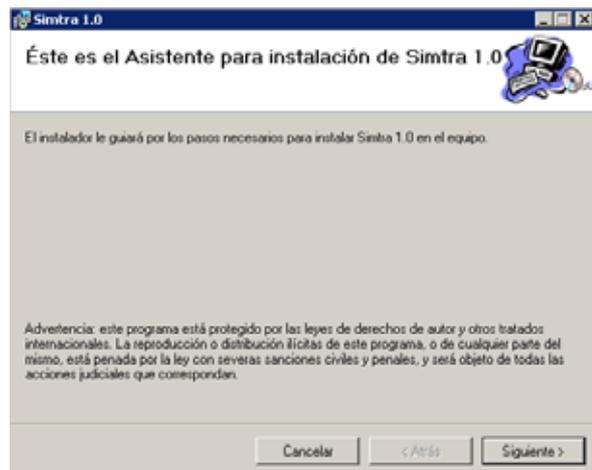


Figura 2.1.- Pantalla principal de instalación del programa SIMTRA que instala también el programa RENATA

2.1.- INICIO DE LA APLICACIÓN

Como ya se ha indicado anteriormente, la aplicación RENATA es una utilidad diseñada para calcular la recarga de los acuíferos subterráneos empleando un modelo de flujo como elemento de calibración.

A continuación se describe el manejo de RENATA sobre la base de un ejemplo de simulación previamente diseñado en el acuífero detrítico de Muro de Alcoy. Como soporte para la discretización inicial se ha utilizado el programa SIMTRA elaborado en el marco del convenio suscrito entre la DPA y el IGME.

Previamente a la utilización de la aplicación es necesario discretizar la superficie del terreno a estudiar. En la **figura 2.2.** se representa el formulario, seleccionado desde la pantalla principal de SIMTRA, en el que el usuario indica al programa los datos iniciales para delimitar el área de trabajo.

En este ejemplo se ha elegido de la BDA el acuífero nº 84 de Muro de Alcoy, en lugar de utilizar las coordenadas UTM almacenadas en la BDA como límites del acuífero, que se han fijado de forma manual. El modelo se ha diseñado con una capa discretizada en una malla regular de 62 filas y 50 columnas. Como fondo de

Figura 2.2.- Formulario inicial de SIMTRA para diseñar un modelo de flujo.

apoyo se ha utilizado una imagen en formato “bmp” (MURO_1.bmp). El intervalo de fechas en el que se realizará la simulación en régimen transitorio estaría comprendido entre el 1/10/1979 y el 30/09/1999. La definición de estas fechas es importante pues serán las utilizadas durante la ejecución del programa RENATA y en la importación de los resultados utilizables en la calibración mediante el modelo de flujo.

Para definir los parámetros y variables necesarios para construir el modelo matemático de flujo (geometría, condiciones en los límites, celdas inactivas, distribución de parámetros, etc) el usuario debe emplear las herramientas y

utilidades disponibles en SIMTRA. Remitimos al lector a la documentación publicada al respecto por la DPA (2008): *Manual del usuario del programa para la simulación de modelos de flujo en acuíferos. Aplicación MOFA 2.0*.

La superficie discretizada para los cálculos se representa en la **figura 2.3**. Esta es la pantalla principal del programa SIMTRA desde la que se puede acceder al programa RENATA mediante la opción [modulo de recarga] localizada en la pestaña [Utilidades] situada en la barra de menú horizontal superior.

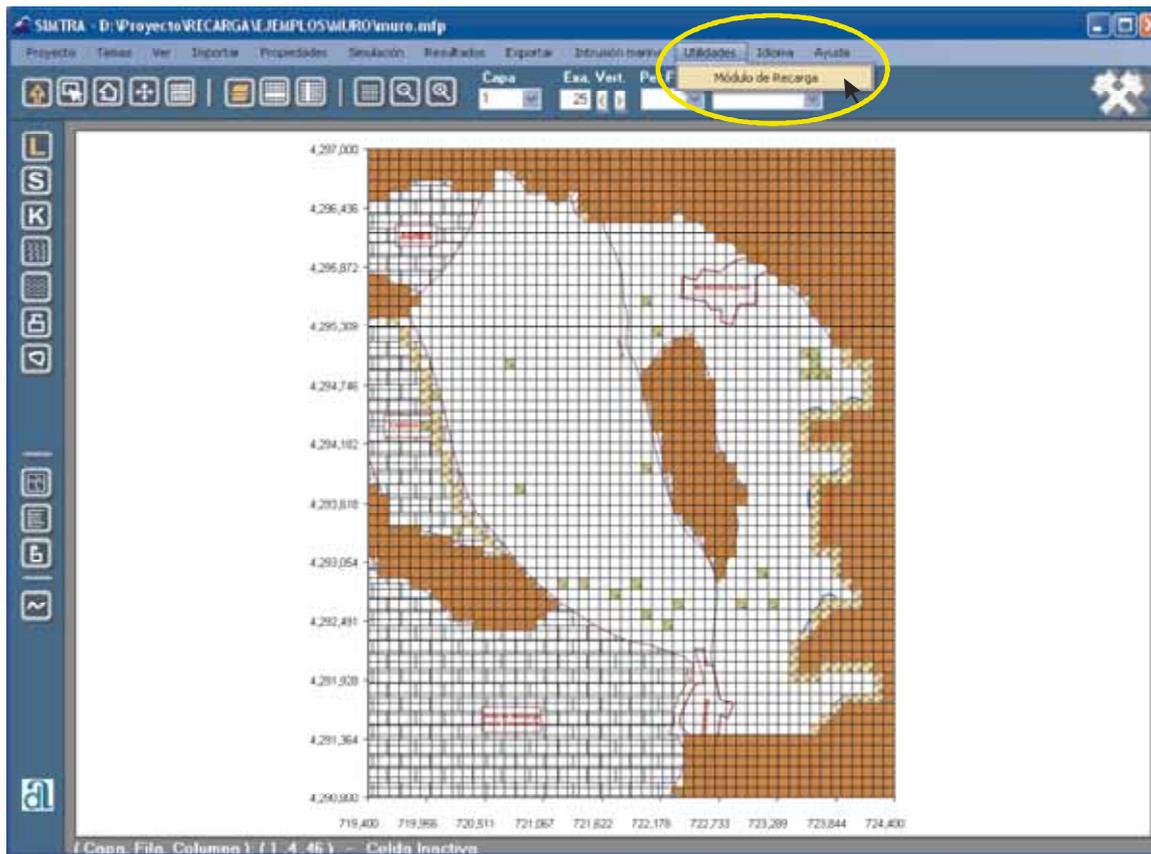


Figura 2.3.- Formulario inicial de SIMTRA para diseñar un modelo de flujo.

Con esta opción se accede a la pantalla principal del programa manteniendo la configuración de la malla y de las celdas activas/inactivas establecida en el programa de partida (**figura 2.4**).

El acceso a las utilidades del programa RENATA se realiza desde la barra de menú y desde la barra de herramientas (**figura 2.5**). La barra de menú contiene todas aquellas opciones mediante las cuales el usuario puede ejecutar y manejar el programa. En la barra de herramientas se incluyen las utilidades disponibles para seleccionar las celdas y sectores dentro de la malla y un botón que permite alternar entre la visualización de la rejilla (modelo discretizado) y los formularios para gestionar las series cronológicas empleadas.

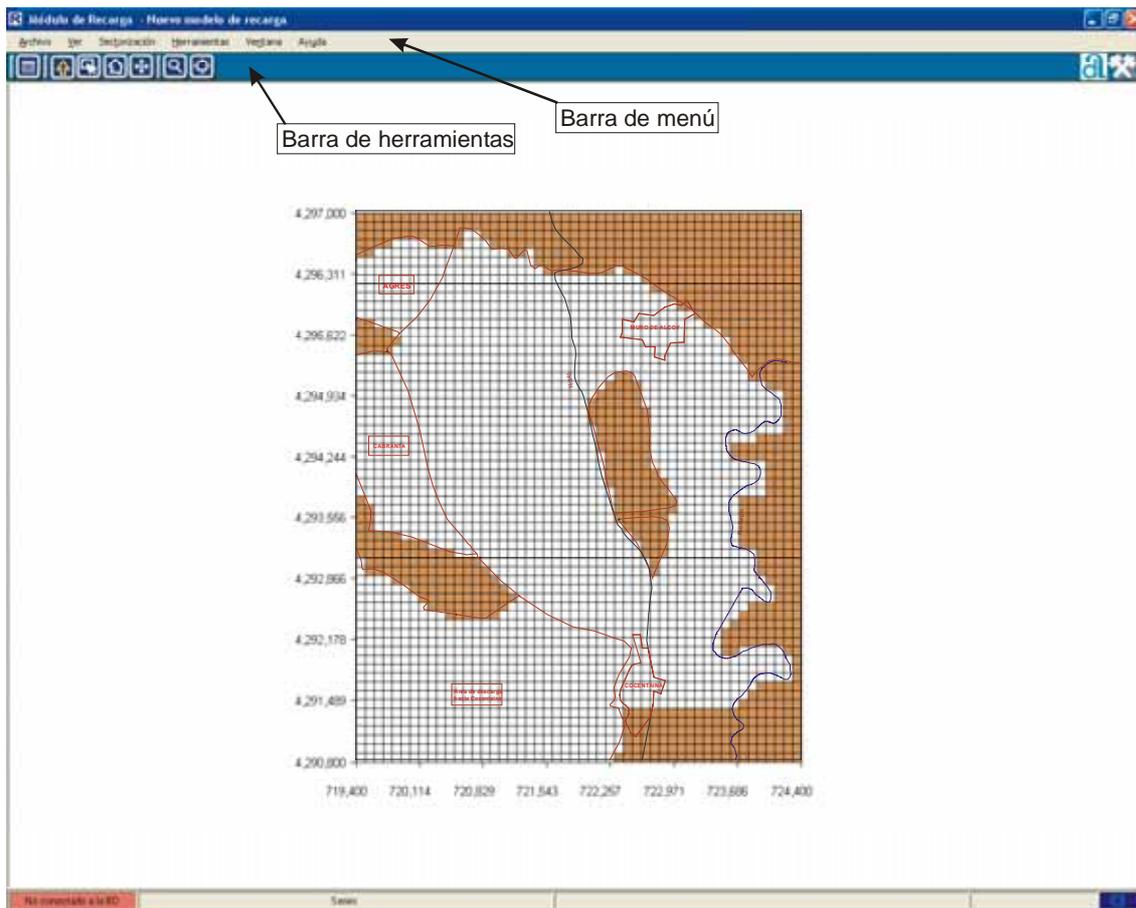


Figura 2.4.- Pantalla principal del programa de recarga.

Mediante la opción de [ver] → [leyenda lateral] de la barra de menú el usuario podrá ver el contenido de los 5 apartados de que consta el programa:

- ✓ Series
- ✓ Sectores climáticos
- ✓ Sectores de suelo
- ✓ Sectores de riego
- ✓ Intersecciones

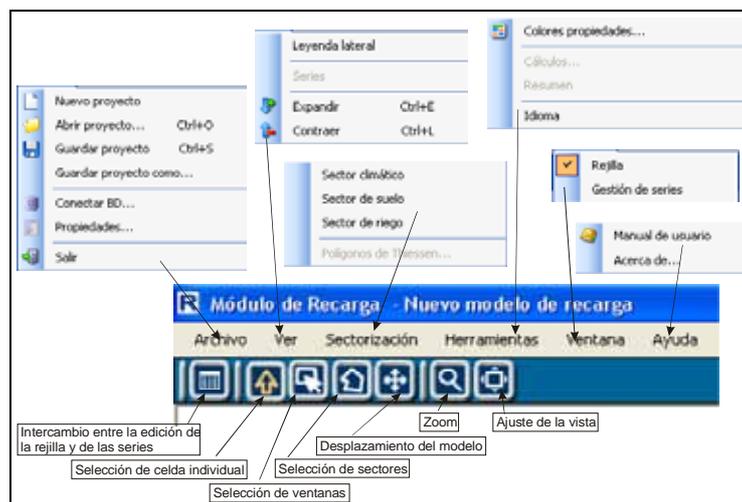


Figura 2.5.- Utilidades y herramientas disponibles en la barra de menú y de herramientas

En los siguientes epígrafes se describirán las utilidades más interesantes de la aplicación guiándose de un sencillo ejemplo.

2.2.- ENTRADA DE DATOS

Mediante la opción de [Archivo] → [Propiedades] el usuario deberá introducir las propiedades del proyecto a diseñar. Como se recoge en el ejemplo de la **figura 2.6** los campos que se deberán completar son:

Nombre del proyecto es la denominación que da el usuario al proyecto de recarga en el que se está trabajando

Periodo intervalo de fechas entre las que se van a realizar los cálculos

Tipo de datos indica el intervalo en el que se ha discretizado el tiempo para realizar los cálculos, puede ser diario o mensual (el intervalo anual y el nº de días o meses está reservado para otras utilidades)

Descripción es un comentario explicativo sobre el proyecto de recarga.



Figura 2.6.- Formulario de propiedades principales del Proyecto de recarga.

2.2.1.- Gestión de series

Mediante el botón de intercambio entre la gestión de la series y de la rejilla el usuario entra en la pantalla de edición de series (**figura 2.7**). Desde esta pantalla se puede acceder a las utilidades necesarias para la incorporación y edición de las series cronológicas que se van a utilizar en el proyecto.

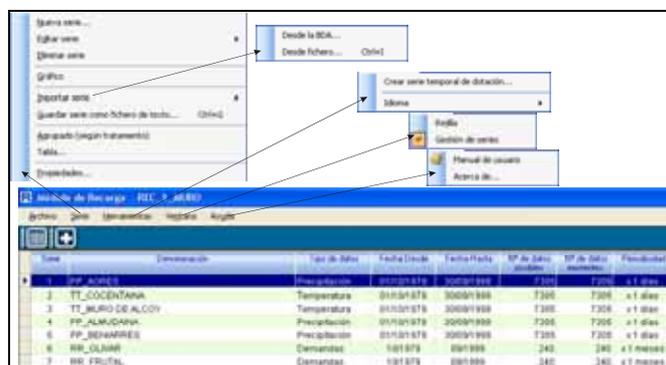


Figura 2.7.- Utilidades incorporadas en la pantalla de edición de series.

Desde el botón [serie] se accede al submenú con el que se pueden realizar las siguientes acciones:

- [Nueva serie] crear series desde el principio
- [Editar serie] editar cualquier serie de la creadas
- [Eliminar serie] eliminar cualquier serie de la creadas
- [Gráfico] acceder a la pantalla de gráficos desde la que se pueden ver y manejar todo tipo de gráficos (**figura 2.8**)
- [Importar series] importar series bien desde la BDA de la DPA bien desde ficheros ASCII previamente creados
- [Guardar series ...] se almacenan series de datos en formato ASCII (.txt)
- [Agrupado (según...)] agrupa las series en el intervalo de tiempo (diario o mensual) y en el periodo seleccionado para editar las series en forma de tabla (**figura 2.9**)
- [Tabla]
- [propiedades] muestra las propiedades de las series (**figura 2.10**)

Dentro del submenú de [herramientas] se ha incorporado una utilidad, [crear serie temporal de dotación ...], mediante la que el usuario podrá crear series de dotación para el riego que posteriormente serán la base para obtener el retorno de regadío. Los datos se introducirán mensualmente (**figura 2.11**), bien de forma común para todos los meses de cada año del periodo bien de forma individual para cada mes del periodo. En este último caso se realizará mediante un editor de series. De cualquier forma, el usuario podrá editar y modificar los datos mediante las opciones: [Serie] → [Editar series].

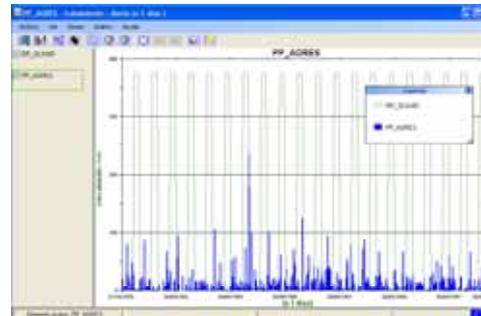


Figura 2.8.- Pantalla de visualización y edición de gráficos.

Fecha	PP_AGRES	TI_DONACION	TI_MUNDO DE AGRI	PP_AJUSGADA	PP_BENEFICIO
1 02/15/1979	0.00	19.00	19.00	0.00	0.00
2 02/15/1979	0.00	17.00	17.00	0.00	0.00
3 02/15/1979	0.00	17.00	17.00	0.00	0.00
4 02/15/1979	0.00	18.75	18.75	0.00	0.00
5 02/15/1979	0.00	19.00	19.00	0.00	0.00
6 02/15/1979	0.00	19.00	19.00	0.00	0.00
7 02/15/1979	0.00	19.00	19.00	0.00	0.00

Figura 2.9.- Visualización de los datos de las series en formato [tabla].

Figura 2.10.- Visualización de las propiedades de las series del proyecto [propiedades].

Figura 2.11.- Formulario de creación de series de dotación para riego.

Con las utilidades descritas anteriormente, para el proyecto de “Muro de Alcoy” se han generado las siguientes series (**figura 2.7**): a nivel diario 3 pluviométricas (PP_AGRES, PP_ALMUDAINA y PP_BENIARRES) y 2 termométricas (TT_COCENTAINA y TT_MURO DE ALCOY); a nivel mensual 2 de dotación agrícola (RR_OLIVAR y RR_FRUTAL).

2.2.2.- Gestión de sectores

Los tipos de sectores que se definirán en el proyecto son los siguientes: clima, suelo, riego e intersecciones. Los tres primeros tipos deberán delimitarse por el usuario y el último se obtendrá por el programa y corresponde al resultado de la intersección de los otros tres.

Los sectores delimitados así como las series utilizadas en el proyecto se pueden visualizar mediante la opción [Ver] → [Leyenda lateral] de la barra de menú de la pantalla principal (**figura 2.12**).

2.2.2.1.- Sectores climáticos

La delimitación de los sectores climáticos se puede realizar mediante las herramientas disponibles al efecto o bien se puede hacer una primera aproximación aplicando los polígonos de Thiessen ([Sectorización] → [Polígonos de Thiessen]). En este último caso se marcarían las estaciones pluviométricas que se quieren utilizar para delimitar estos polígonos (**figura 2.13**). En el ejemplo se han utilizado las tres disponibles. Como resultado se obtendrían tantos sectores delimitados como estaciones pluviométricas, los cuales pueden ser modificados mediante las herramientas de edición de la rejilla (**figura 2.14**).

Posteriormente, estos sectores se deben editar para cambiarles el nombre asignado por defecto y, sobre todo, para asignarle la estación termométrica representativa que será la utilizada para los cálculos de evapotranspiración potencial (**figura 2.15**). En el ejemplo de la figura, al primer sector climático se le ha denominado “BENIARRES” y se le ha asignado la estación termométrica “TT_MURO DE ALCOY”. En esta misma figura se observa como expandiendo los sectores climáticos se obtienen algunas de las



Figura 2.12.- Menú lateral para visualizar las características de los sectores establecidos.

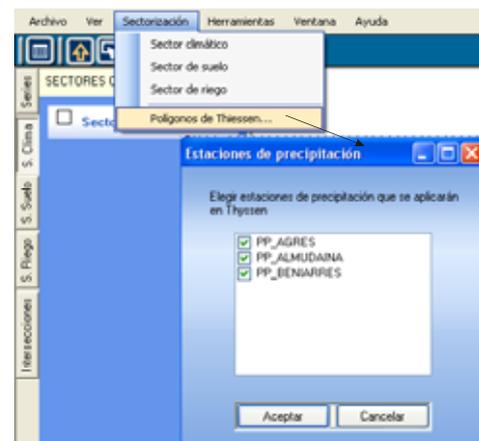


Figura 2.13.- Obtención de los sectores climáticos aplicando polígonos de Thiessen.

propiedades del sector delimitado: nº de celdas, superficie y estaciones que lo representan.

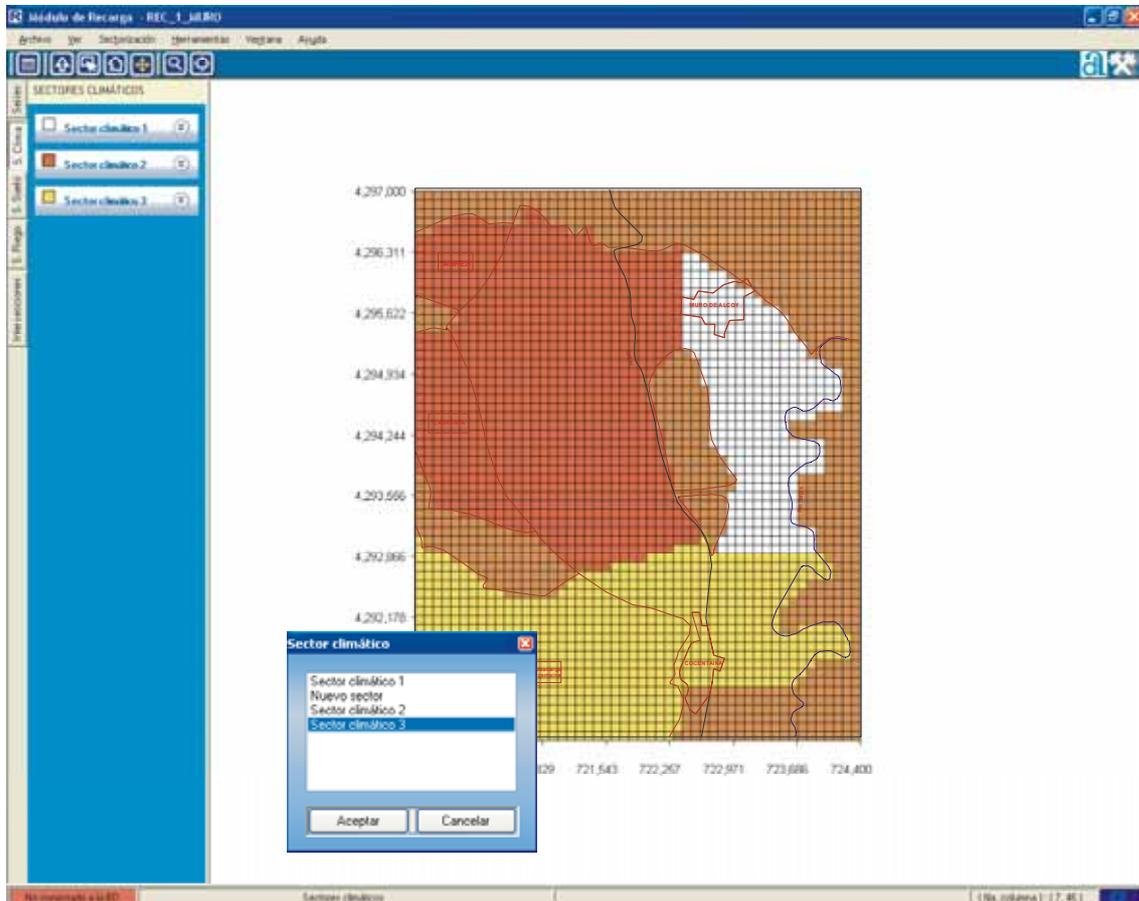


Figura 2.14.- Resultado de aplicar los polígonos de Thiessen en la delimitación de los sectores climático y modificación posterior de los resultados.



Figura 15.- Asignación de estaciones termométricas a los sectores climáticos delimitados.

2.2.2.2.- Sectores de suelo

Para definir los sectores de características de suelo se emplean las herramientas de edición de rejilla de forma similar a como se muestra en la **figura 2.16**: [Sectorización] → [Sector de suelo] → (selección de celdas) → [propiedades] → (asignación). En el ejemplo de la figura se ha asignado a las celdas seleccionadas el tipo de suelo denominado “CALIZAS”.

Una vez delimitados los distintos tipos de suelo, o cuando se crea conveniente, es necesario indicar sus propiedades (figura 2.17). Las propiedades a asignar en cada sector de suelo son las siguientes: nombre; límite inferior y superior de la capacidad de almacenamiento (en el caso de utilizar Thornthwaite clásico deberá ser igual); y el umbral de escorrentía (Po) o, en su defecto, el número de curva (NC).

Tanto Po como NC podrán asignarse mediante tablas específicas incorporadas en el programa con los valores más usuales asignados a estos parámetros según el tipo de terreno (figura 2.17).

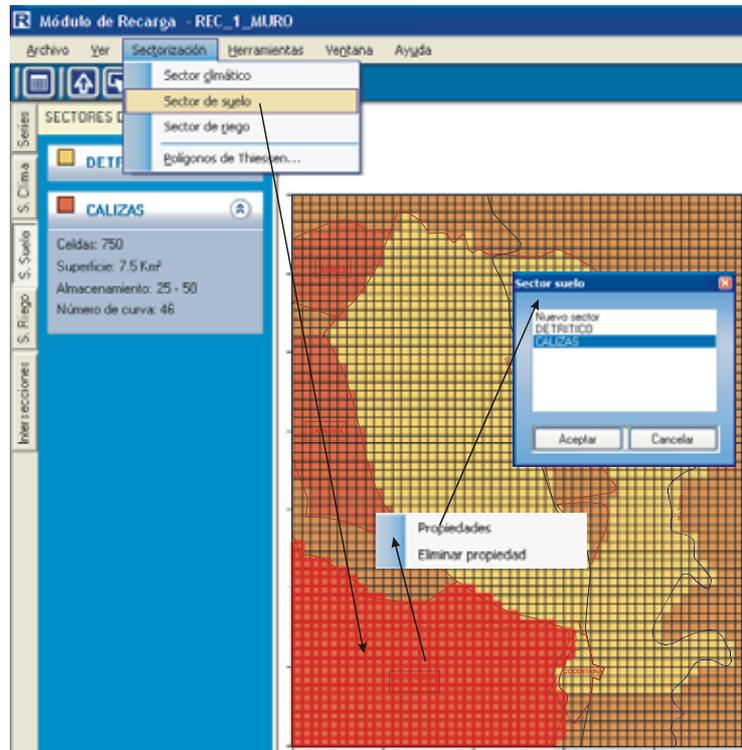


Figura 2.16.- Asignación de sectores de suelo en la rejilla del modelo.

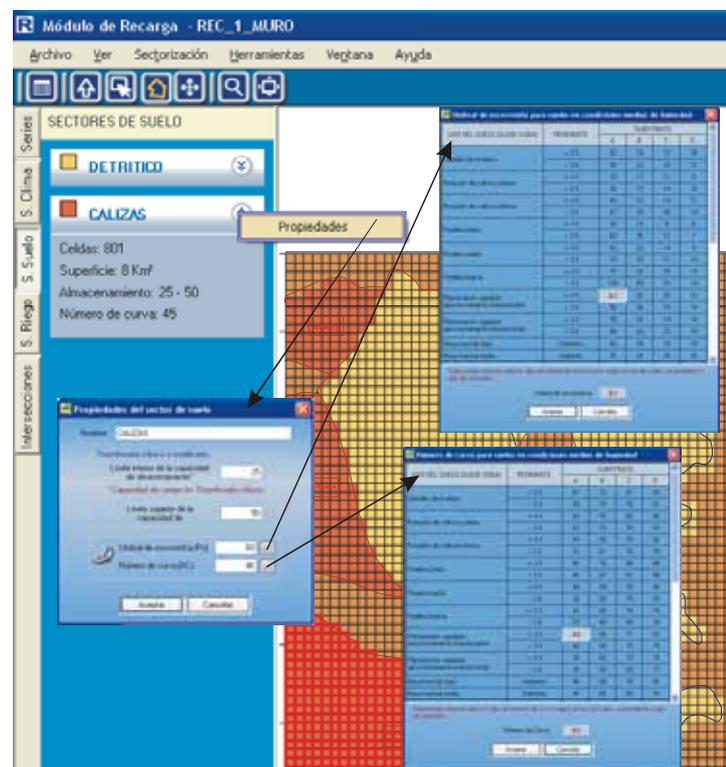


Figura 2.15.- Asignación de propiedades en los sectores de suelo delimitados.

2.2.2.3.- Sectores de riego

Al igual que los sectores climáticos y de suelo, se delimitarán los sectores de riego con las herramientas del programa. En el ejemplo de la **figura 2.18**, se han considerado delimitado dos tipos: "OLIVAR", localizado preferentemente en el sector occidental del acuífero detrítico de Muro, y el "FRUTAL" localizado en el oriental.

Las propiedades de los sectores de riego se asignan tal y como se indica en la **figura 2.19**:

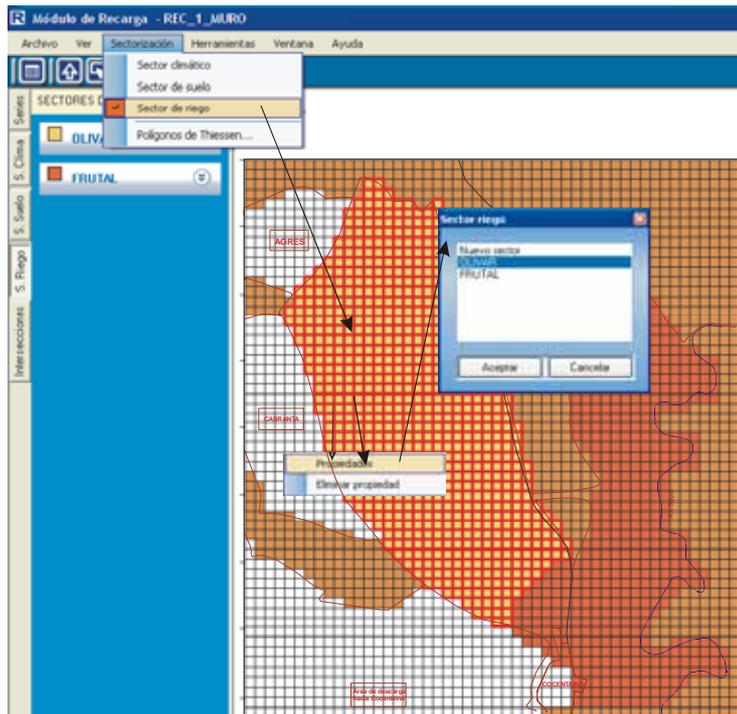


Figura 2.18.- Asignación de sectores de riego en la rejilla del modelo.

- Nombre* cultivo asignado por el usuario
- Dotación de riego* serie de dotación representativa, en el ejemplo se asigna a la superficie "OLIVAR" la serie "RR_OLIVAR"
- Retorno de regadío* porcentaje del retorno de riego, en el ejemplo se asigna el 5%

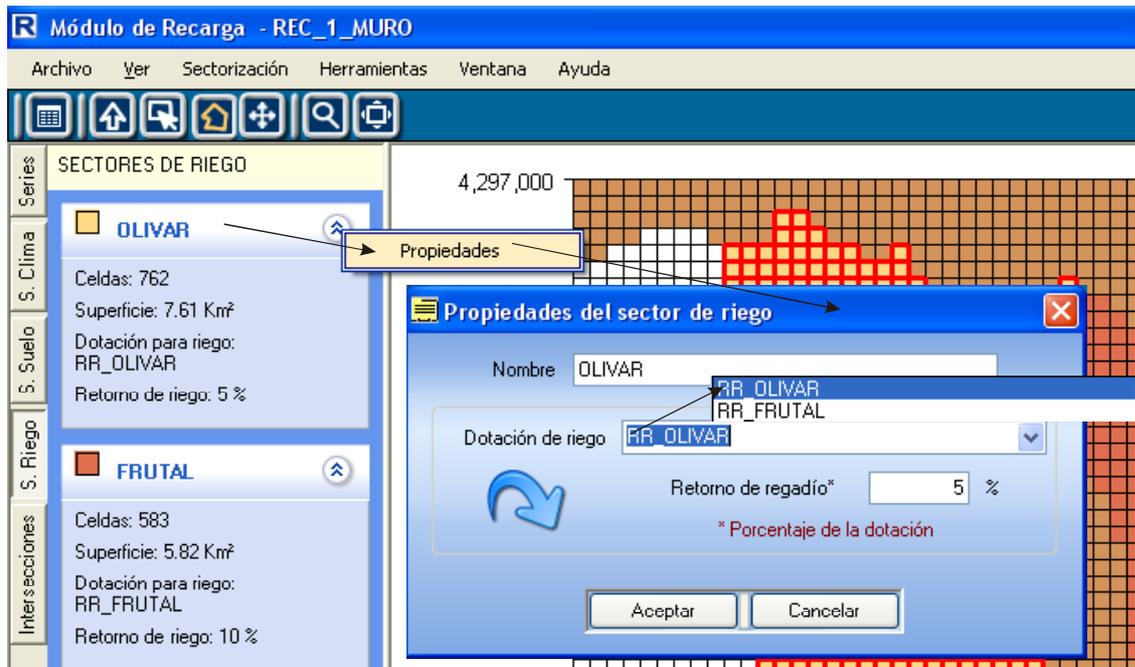


Figura 2.19.- Asignación de propiedades en los sectores de riego delimitados.

2.3.- CÁLCULOS

El cálculo de la recarga en las celdas del modelo se realiza desde la barra de menú mediante los botones [Herramientas] → [Cálculos]. Esta opción nos remite a un formulario (**figura 2.20**) en el que el usuario puede elegir el método de cálculo de la lluvia útil (Thornthwaite clásico o modificado); el cálculo de la infiltración por el método del Servicio de Conservación del Suelo de EE.UU (número de curva o umbral de escorrentía) y el cálculo del retorno de riego de las dotaciones introducidas. El usuario también podrá elegir que series de las generadas en el cálculo quiere incorporar al grupo de series del proyecto para su posterior análisis y calibración. En el ejemplo de la **figura 20** se han seleccionado las calculadas como lluvia útil (LLU), infiltración (INF) y las de retorno de regadío. Las unidades de estas series serán en mm.

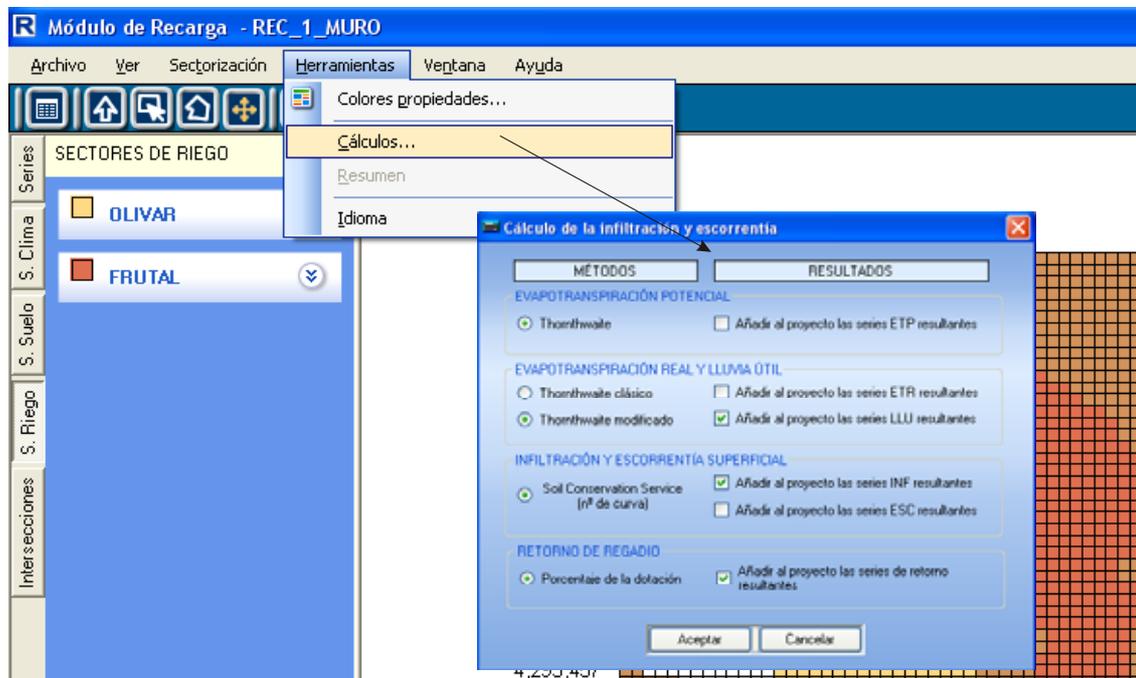


Figura 2.20.- Asignación de propiedades en los sectores de riego delimitados.

2.4.- RESULTADOS

Para cada una de las intersecciones con igual conjunto de propiedades (climáticas, suelo y retorno de regadío) que calcula el programa se obtiene la recarga. Las principales características de las intersecciones delimitadas por el programa se pueden observar en la leyenda lateral desplegable (**figura 2.21**): [Ver] → [Leyenda lateral] → [Intersecciones]. La expansión de estos sectores permite obtener: el nº de celdas incluidas, la superficie que ocupa, la infiltración total, el retorno de regadío total y los sectores climático, suelo y regadío que lo constituyen.

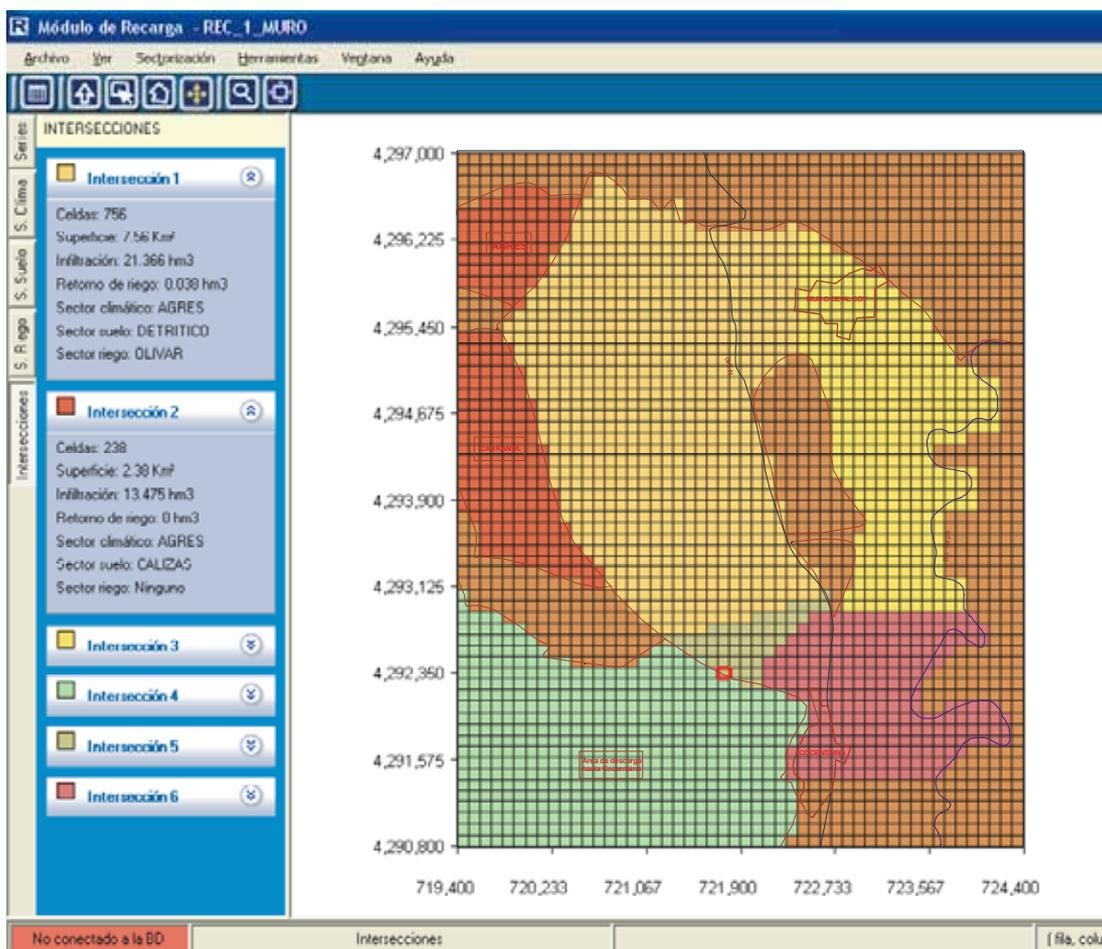


Figura 2.21.- Zonas de intersección con características iguales calculadas por el programa.

Los resultados numéricos suministrados por el programa pueden visualizarse mediante los botones de la barra de menú: [Herramientas] → [Resumen]. Los tres tipos de tablas que suministra el programan son (**figura 2.22**): Resumen global, bien de la totalidad del periodo bien de la media anual; Anual (para cada uno de los años del periodo); y Mensual (para cada uno de los meses del período).

Desde la vista de los datos mensuales se puede obtener una representación gráfica de todos los resultados obtenidos (**figura 2.23**).

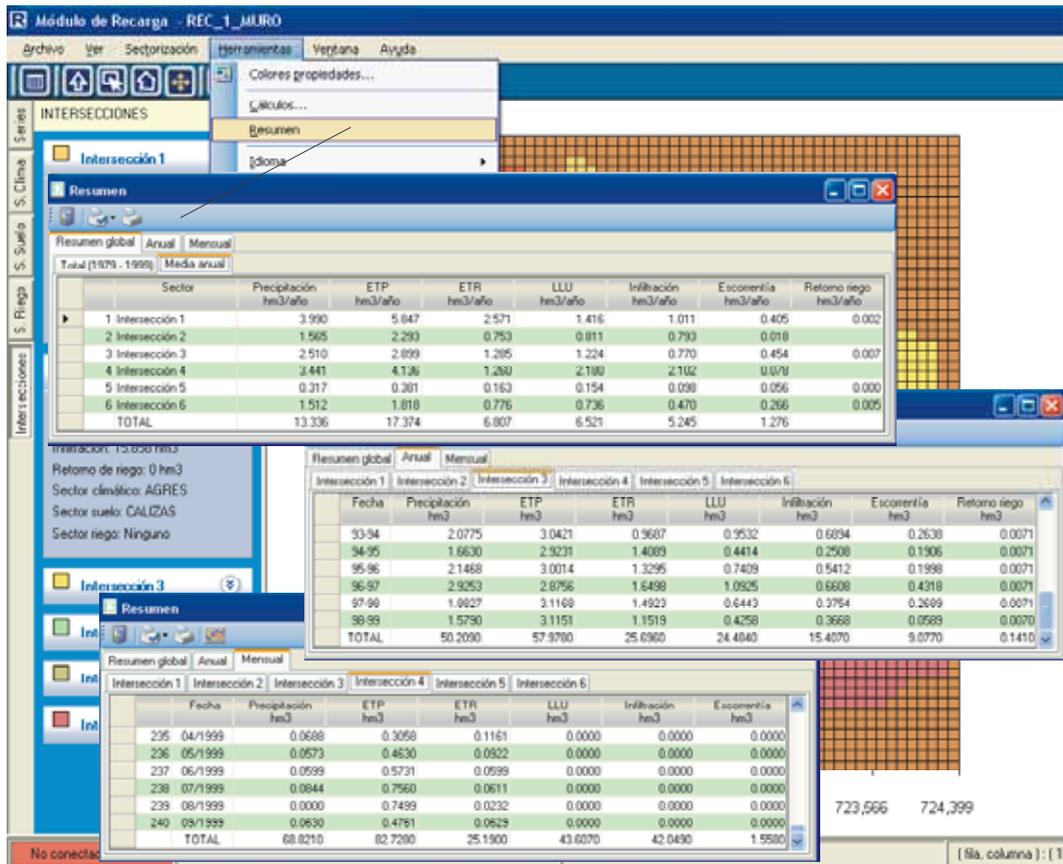


Figura 2.22.- Resultados numéricos suministrados por el programa tras el cálculo de la recarga.

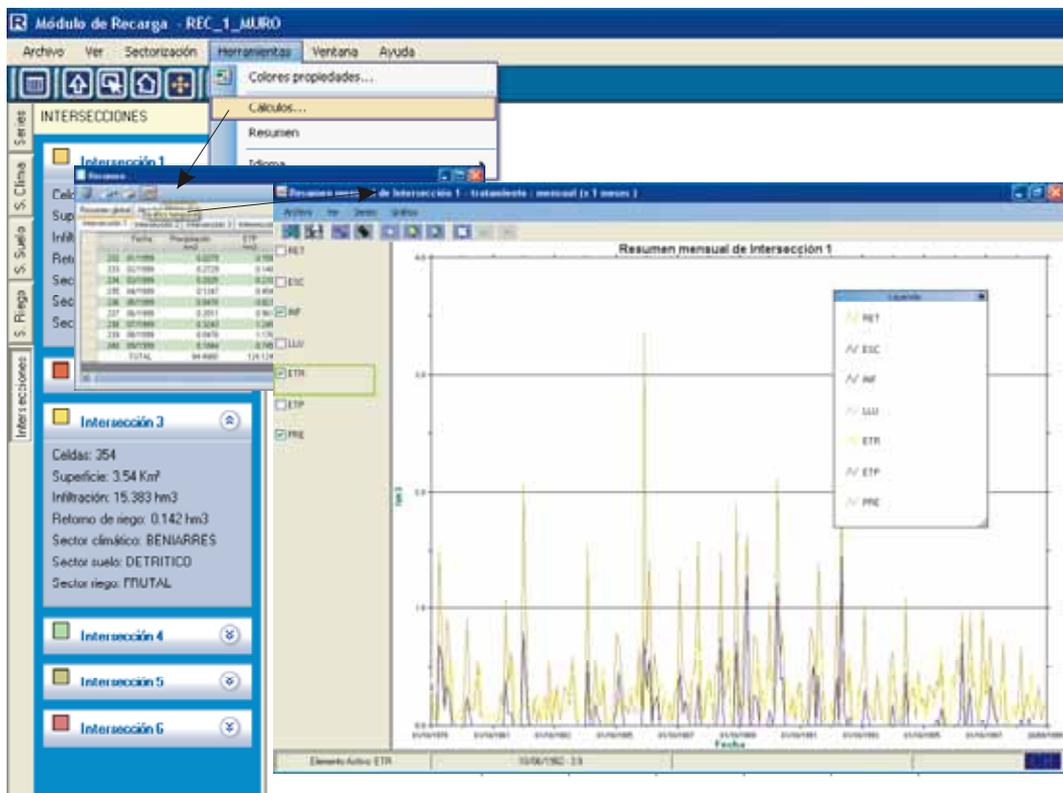


Figura 2.23.- Representación gráfica de resultados.

2.5.- EXPORTACIÓN DE LA RECARGA AL MODELO DE FLUJO

Cuando el usuario opta por salir del programa RENATA se presenta una pantalla informativa sobre la recarga total (la infiltración más el retorno de regadío) en un intervalo mensual obtenida en cada una de los sectores de intersección y pregunta si se desea trasladar los valores calculados al modelo de flujo (**figura 2.24**). En caso afirmativo estos resultados se exportan en mm configurando a su vez en el modelo de flujo todos los sectores de recarga originados (**figura 2.25**). Hay que indicar que la exportación de los datos se realiza desde la “intersección 1” en el programa de recarga a la “recarga 2” en el modelo de flujo, así sucesivamente. La “recarga 1” en el modelo de flujo se mantiene por defecto como la inicial y no se modifica.

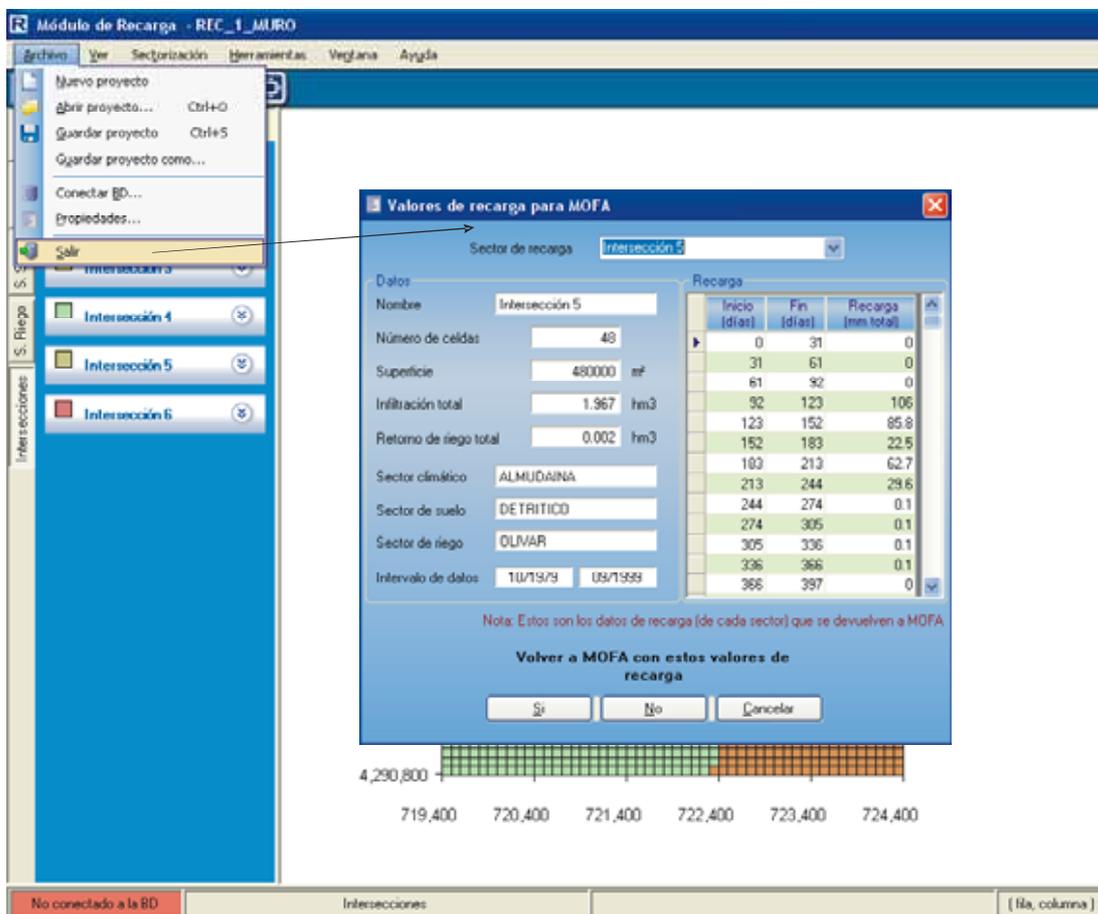
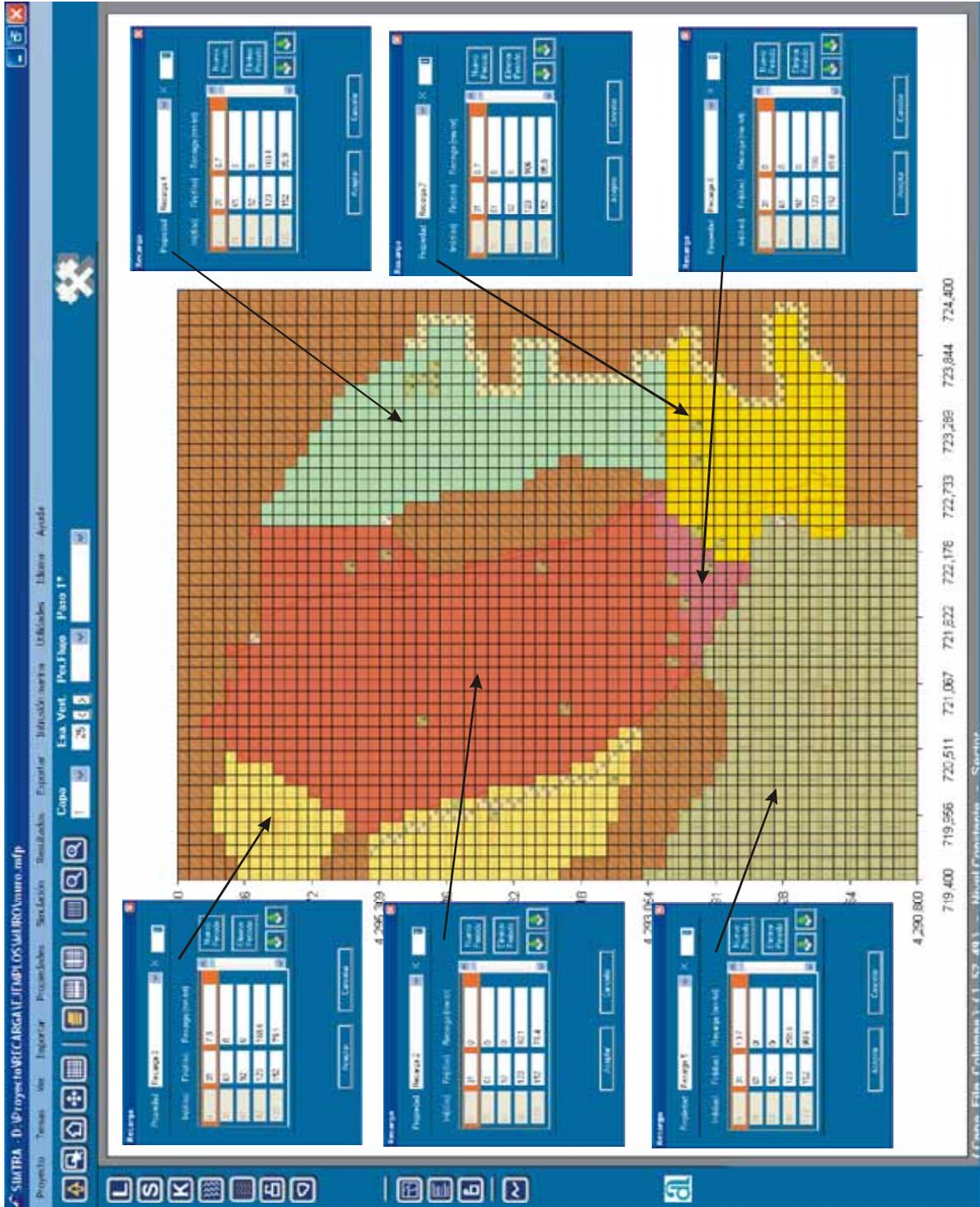


Figura 2.24.- Información mostrada por el programa y solicitud de confirmación antes de exportar los resultados obtenidos en el módulo de recarga hacia el modelo de flujo.

A continuación se opera el modelo de flujo y se comprueba (calibración) que los resultados obtenidos dan lugar a un residuo aceptable. Si el caso no fuera este, se opera nuevamente el módulo RENATA realizando las modificaciones que se estimen oportunas y se calibra nuevamente con el modelo de flujo variando los parámetros que sean necesarios. Se procede de esta manera iterativa hasta que

se estime que el residuo de la piezometría que se obtiene con el modelo de flujos menor que un valor previamente prefijado.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Diputación de Alicante. *Visualización cartográfica de libre distribución. Programa MisSapos*. 2005.
- Diputación de Alicante. *Tratamiento y gestión de series temporales hidrológicas. Simulación de Modelos de flujo en Acuíferos. Manual del usuario de la aplicación TRASERO*. 2005.
- Diputación de Alicante. *Simulación de Modelos de flujo en Acuíferos. Manual del usuario de la aplicación MOFA 2.0*. 2008.
- Girard, G., Ledoux, E., and Villeneuve, J. P. *Le modèle couplé: simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un système hydrologique*. Cahiers ORSTOM, série hydrologie, XVIII (4). 1981.
- Harbaugh A.W., Banta E. R., Hill, M. C. y McDonald, M.G. *MODFLOW-2000, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model—User Guide to Modularization Concepts and the Ground-Water Flow Process*. U.S. Geological Survey. 2000
- IGME. *Asistencia Técnica para la Adaptación y desarrollo de códigos numéricos de modelación de la intrusión marina al objeto de optimizar la utilización del agua subterránea en los acuíferos costeros*. Convenio IGME-DPA. 2005. Inédito.
- IGME. *Asistencia Técnica para el Diseño de la aplicación informática para estimar la recarga a los acuíferos a partir de los procesos que tiene lugar en el suelo y zona no saturada*. Convenio IGME-DPA. Inédito. Convenio IGME-DPA. 2008. Inédito.
- Témez Peláez, J. R. *Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales*. MOPU. 1978.
- Thorntwaite. *An approach toward a rational classification of climate*. Geologic. Rev. Vol. 38. 1948.
-