DESARROLLO DE UN MODELO DE CONTROL DE VERTIDOS CON LA HERRAMIENTA GESCAL DEL SISTEMA DE APOYO A LA DECISIÓN AQUATOOL.

Javier Paredes y Abel Solera
GRUPO DE INGENERÍA DE RECURSOS HÍDRICOS
INSTITUTO DE INGENIERÍA DEL AGUA Y MEDIO AMBIENTE
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

0. Enunciado del problema

El río Mayu se encuentra ubicado en una cuenca con clima mediterráneo. Su mayor problema ambiental es un vertido ubicado en la zona media - baja de la cuenca. En la figura 1 se puede ver un esquema la zona en que se encuentra el vertido urbano.

Se dispone de estaciones ICA de control de calidad de agua en varios puntos de la cuenca (ver figura 1). Además, se han realizado ensayos de tiempo de viaje y se dispone de parámetros hidráulicos sobre los diferentes tramos de río. Con esta información se pide:

- Realizar un modelo de calidad del tramo de río que incluya los siguientes constituyentes: sólidos suspendidos, DBO_5 y Oxígeno Disuelto para todo el sistema. Calibrar los parámetros necesarios para su modelación.
- Completar el modelo realizado incluyendo el ciclo del nitrógeno.
- Analizar posibles soluciones al tramo de río.

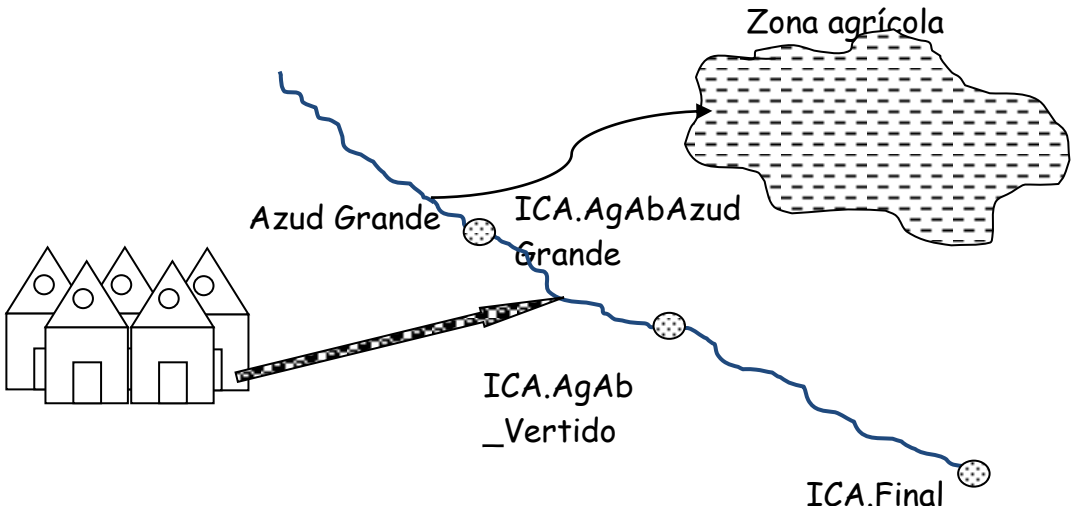


Figura 1. Esquema del tramo de río en estudio

Año inicial: 1996
Número Años: 4
Nombre archivo aportaciones: AportaCal.apo

Datos de la demanda

	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
Demanda Agraria	2.53	0.00	0.00	0.00	0.55	3.64	5.00	10.33	13.98	21.51	19.95	8.72

Datos de las conducciones

		Coeficientes Hidráulicos			
	Longitud	*Alfa veloc*	*Beta veloc*	*AlfaProf*	*Beta Prof*
AzudGrande_VertidoUrbano	32058	0.12	0.61	0.59	0.16
VeetidoUrbano_ICaAgAbVertido	7656	0.12	0.61	0.59	0.16
Tramo Final	8107	0.12	0.61	0.59	0.16

Datos de Temperatura

	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
Temperatura Aguas Arriba de Vertido	13.50	10.20	8.01	5.00	6.30	7.30	10.23	14.32	17.34	19.44	18.50	17.34
Temperatura Aguas Abajo de Vertido	15.71	11.23	8.42	6.21	7.48	9.61	11.68	16.61	19.59	20.83	20.86	19.18

Tabla de comparación

Caudales

Estación	Modelo	A comparar
EA_AgAbAzGrande	AzudGrande_VertidoUrbano	Caudal
EA_Final	Tramo Final	Caudal

Calidad

Estación	Modelo	A comparar
ICA1_AgAb_AzudGrande	AzudGrande_VertitoUrbano	Constituyentes
ICA2_AgAbVert	VertUrbano_IcaAgAbVert	Constituyentes
ICA3_Final	Tramo Final	Constituyentes

1. Inicio del modelo.

El primer paso a dar es iniciar la aplicación, para ello nos vamos a: *Inicio/Programas/Aquatool/AquatolDMA*

Una vez iniciado el programa la aplicación aparecerá vacía y tenemos que decidir entre crear un nuevo ejemplo o abrir uno existente. En este caso queremos crear uno nuevo para lo que hacemos Archivo/Nuevo como se indica en la Figura 2.

Figura 2. Creación de un nuevo ejemplo

Una vez indicado el directorio y el archivo de trabajo la interfaz nos pide los parámetros básicos para la creación del modelo de SIMGES. Aunque en realidad el modelo de SIMGES sirve para la simulación de cuencas y en este ejemplo no va a ser visto en profundidad es necesario realizar la simulación de los flujos ya que los resultados de este modelo son un input para el modelo de GESCAL.

Los parámetros son los que se muestran en la Figura 3.

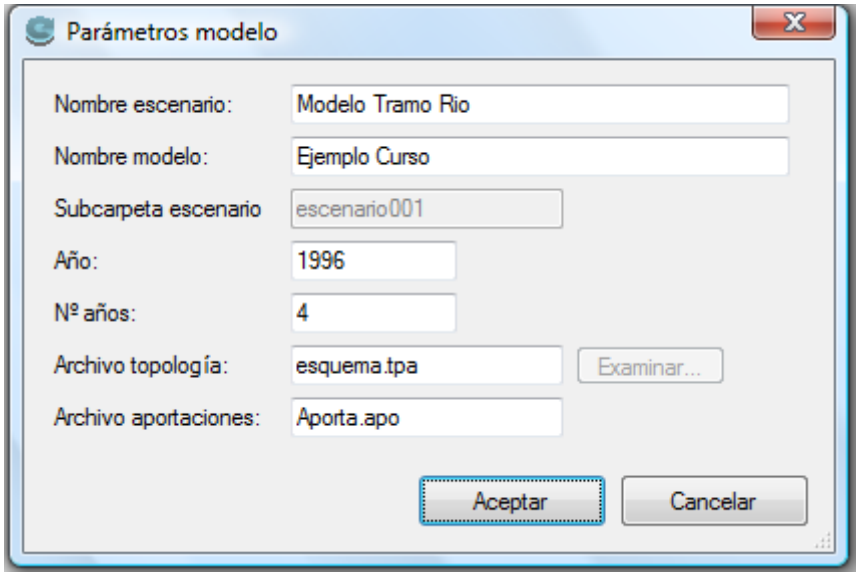


Figura 3. Parámetros básicos del modelo de SIMGES.

Entre estos datos figuran: dos títulos identificativos, elegidos por el usuario; el año de inicio de aportaciones y el número de años de simulación. Finalmente se indica el nombre de los archivos de topología y el de las aportaciones. El archivo de aportaciones contiene los datos de entrada en cuanto a cantidad de agua se refiere.

Una vez presionamos el botón de “aceptar” la interfaz creará un tapiz en blanco para poder empezar a introducir la topología del modelo.

Seguidamente, para indicar que se va a crear un modelo de simulación de la calidad se debe acceder al menú de Opciones del proyecto dentro del menú Modelo.

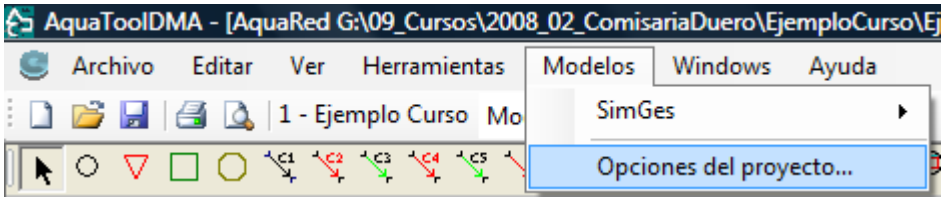


Figura 4. Acceso a las opciones del proyecto.

Al acceder a la pantalla de opciones de proyecto se debe indicar que se quiere realizar un modelo de simulación de la calidad marcando la casilla “Modelar Gescal”, Figura 5.

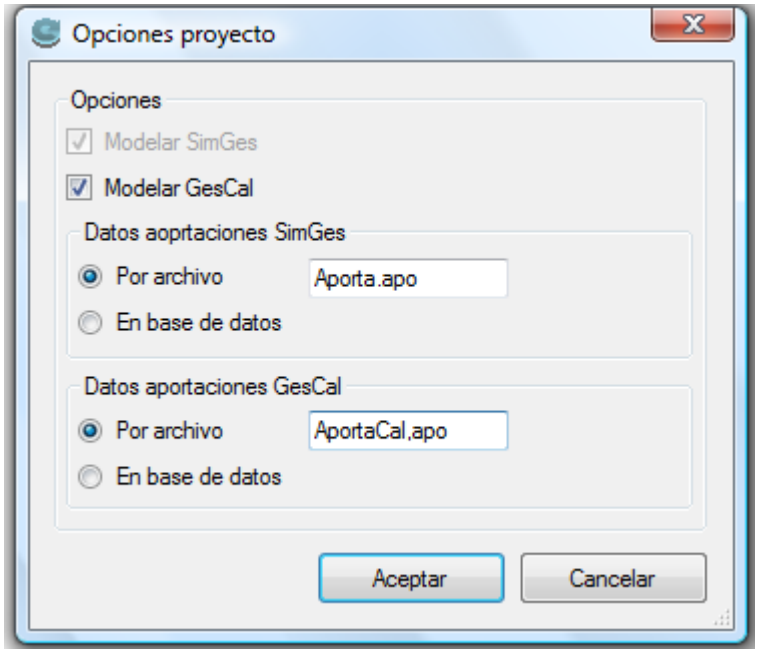


Figura 5. Pantalla de opciones del proyecto.

Al realizar esta seleeción se accederá a la pantalla de “Opciones del modelo de Calidad”, Figura 6, en donde se deberá indicar los parámetros fundamentales del modelo.

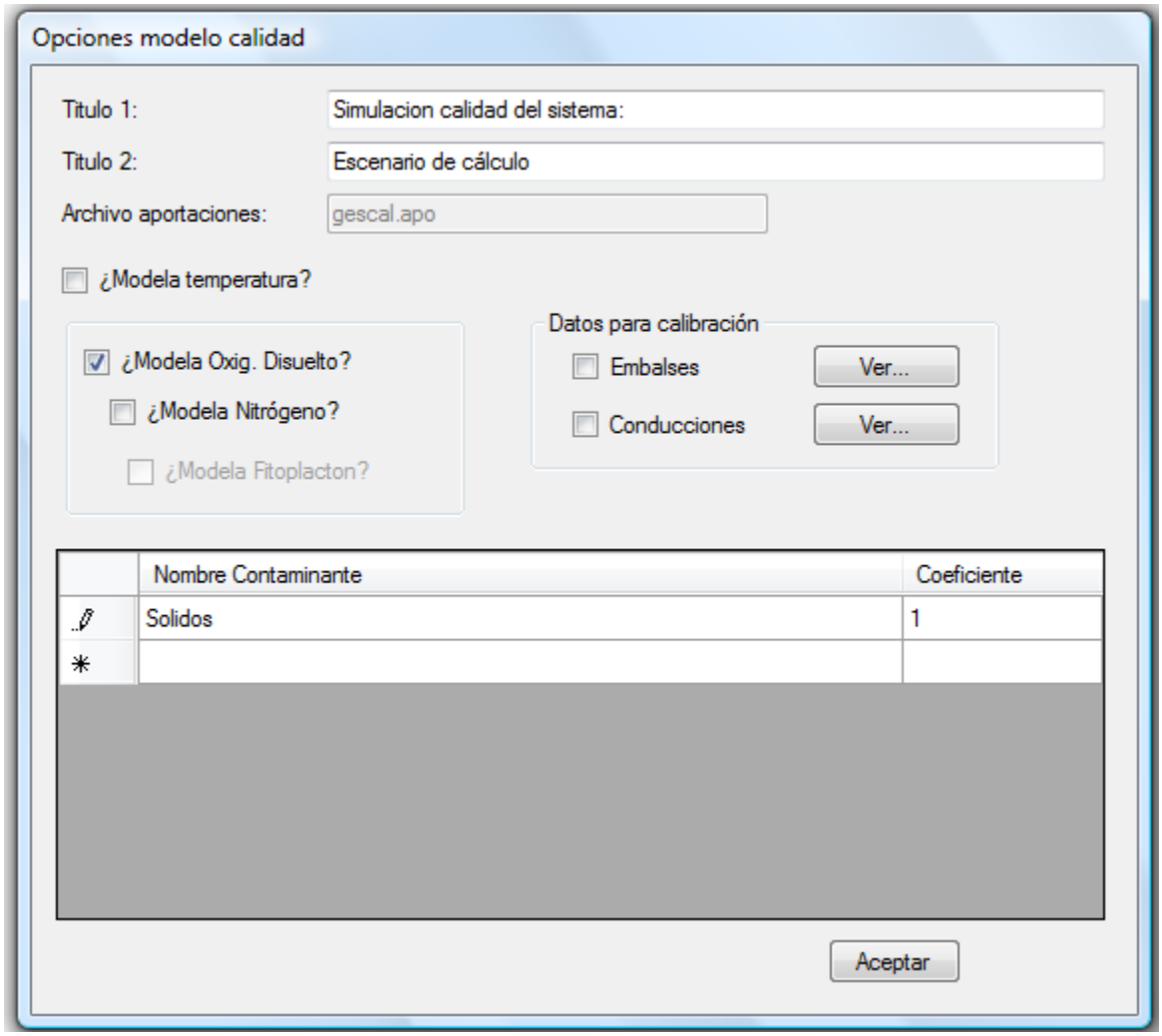


Figura 6. Opciones del modelo de calidad

Por defecto vienen seleccionadas todas las opciones de simulación. Para este ejemplo inicialmente sólo crearemos la opción básica en la que se modela la materia orgánica y el oxígeno disuelto. Para ello tendremos que deseleccionar las opciones de "¿Modela temperatura?", "Modela Fitoplancton" y "¿Modelo Nitrógeno?".

Además modelaremos los sólidos suspendidos como un contaminante arbitrario. Para ello introduciremos el nombre del constituyente a modelar, en este caso "solidos", en la tabla de la parte inferior de la ventana.

Adicionalmente a las opciones de constituyentes a simular se deben indicar dos títulos de la simulación a elegir por el usuario.

Una vez realizados los cambios y presionar el botón aceptar la herramientas nos devuelve a la pantalla de opciones de proyecto, Figura 5, en donde le deberemos indicar si las aportaciones se van a introducir directamente en la aplicación o por archivo. En este caso se va a utilizar un archivo previamente realizado. Una vez escrito el nombre del archivo "Aportacal.apo" se presiona el botón de Aceptar y la herramienta nos devuelve al tapiz para que creemos la topología del modelo.

2. Creación de la topología.

El siguiente proceso consiste en introducir todos los datos del modelo. Para ello se van pinchando elementos en la barra de herramientas, Figura 7, y colocándolos sobre el tapiz.

Figura 7. Barra de Herramientas.

La creación del modelo no tiene porque seguir el orden que se explica a continuación. La única premisa que existe es que para crear los elementos de conexión, como las tomas y conducciones, los elementos inicio y final deben de haberse creado previamente.

2.1. Creación de los nudos.

Debido a la sencillez de la topología primero vamos a crear todos los nudos del sistema. Para ello haciendo clic en el elemento de la barra de herramientas y volviendo hacer clic en el tapiz en el lugar deseado se van creando los nudos. El único dato a proporcionar para los nudos es el nombre del mismo.

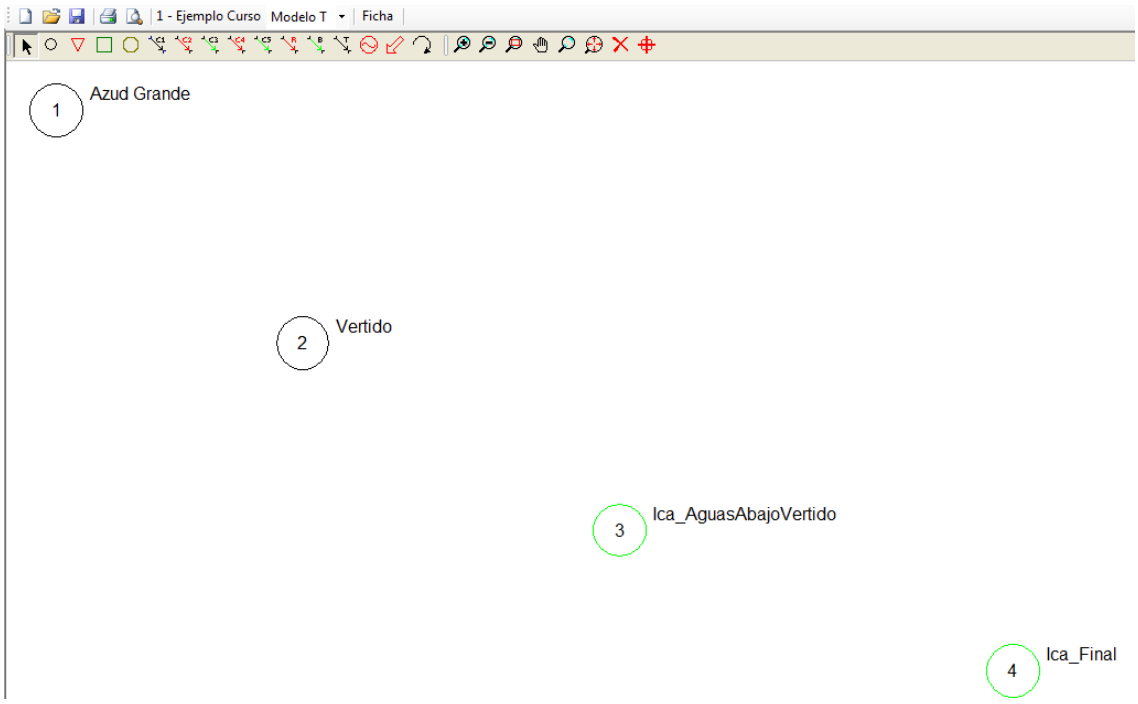


Figura 8. Creación de los nudos del modelo.

Seleccionando el elemento y con las opciones del botón derecho se puede acceder a diferentes opciones estéticas de los elementos como cambiar el color del mismo.

2.2. Creación de conducciones

Una vez que se tienen los nudos creados procedemos a la creación de las conducciones o tramos de río que los unen. Todas las conducciones de este ejemplo son conducciones de tipo 1. Para crear la primera conducción se utiliza el siguiente botón y se parte del nudo inicial. Por cada clic que se haga se crea un punto de la curva hasta llegar al nudo final. Una vez que se llega al nudo final el programa nos muestra la siguiente ficha para que sea completada.

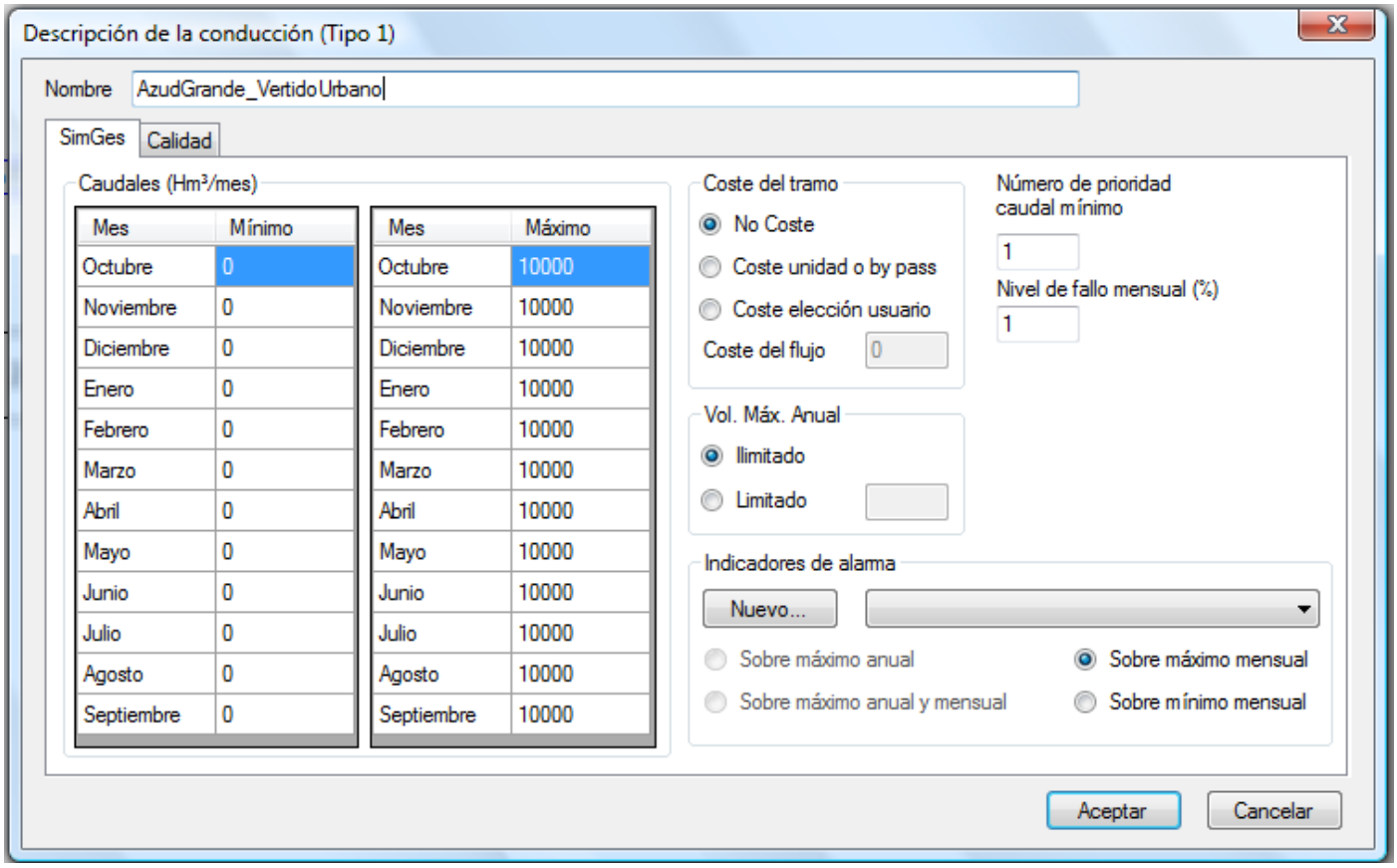


Figura 9. Ficha de conducciones.

En este caso bastará con introducir el nombre identificativo de la conducción dejando el resto de datos los que viene por defecto.

De forma similar se crean todas las conducciones del modelo.

2.3. Definición de demandas.

Una demanda se representa mediante 3 elementos: el elemento “demanda” que representa el área de consumo de agua; el elemento “toma” que representa el o los canales por los que se suministra la demanda (una demanda puede tener una o varias tomas); y el elemento “retorno” que representa la incorporación al río u otro cauce superficial del agua no consumida (el elemento de retorno no es necesario, y un retorno puede asignarse a varias demandas).

Nudo de demanda

Para crear las demandas utilizaremos el elemento de la barra de herramientas. Una vez creado los datos a introducir son los que aparecen en le la Figura 10.

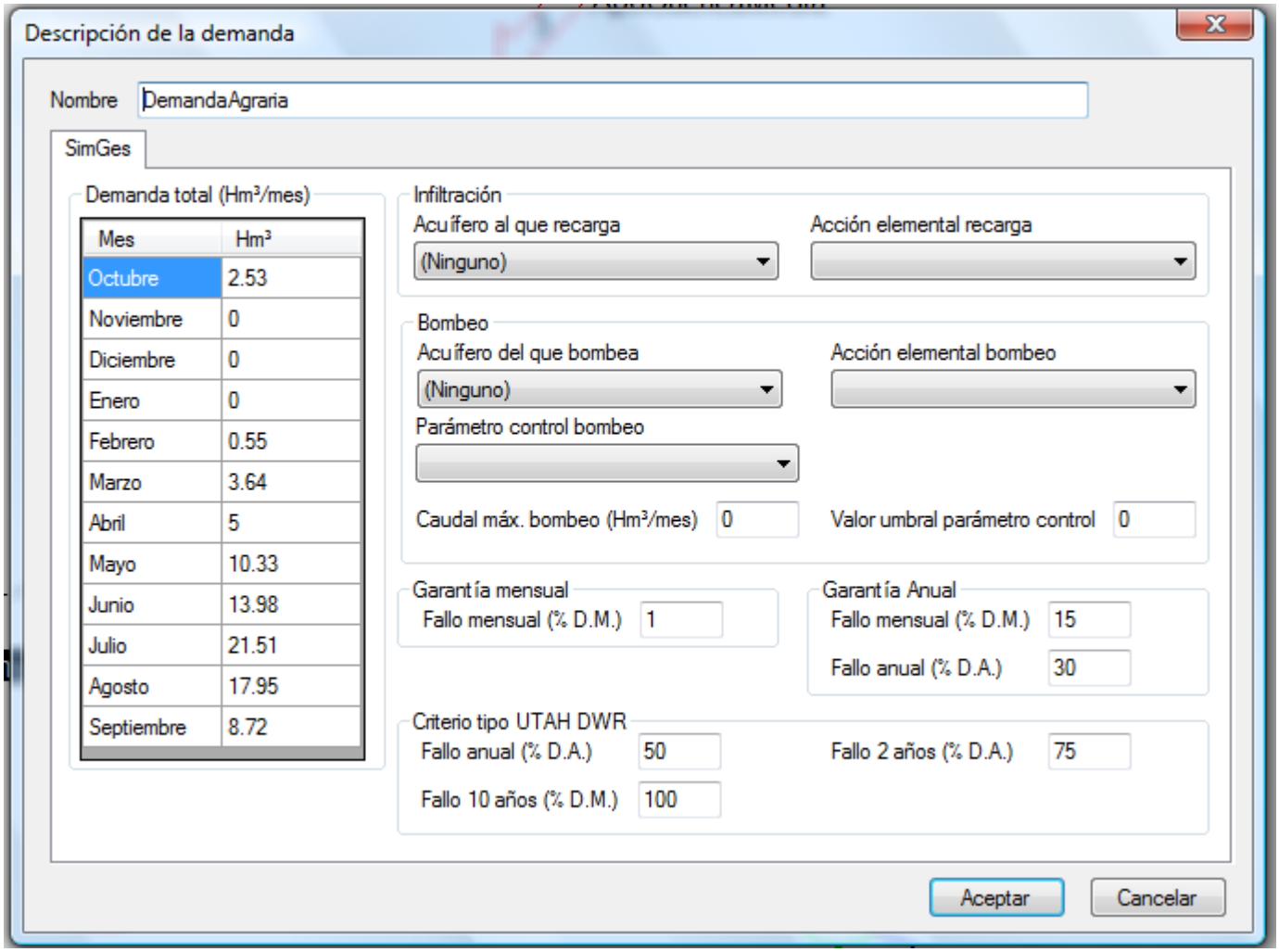


Figura 10. Ficha de datos de la demanda.

Entre los datos a introducir se encuentran: el nombre de la demanda, los valores demandados mensualmente.

Arco de toma.

Una vez creada la demanda debe crearse la toma por la que se realiza su suministro. Para ello se utiliza el elemento de la barra de herramientas. Se indica el nudo de donde se extrae el agua y posteriormente a que demanda se suministra. Los datos a introducir son: el nombre de la toma, la curva de punta de suministro mensual, la prioridad del suministro, la dotación anual, el coeficiente de consumo, el coeficiente de retorno y el elemento de retorno. Figura 11.

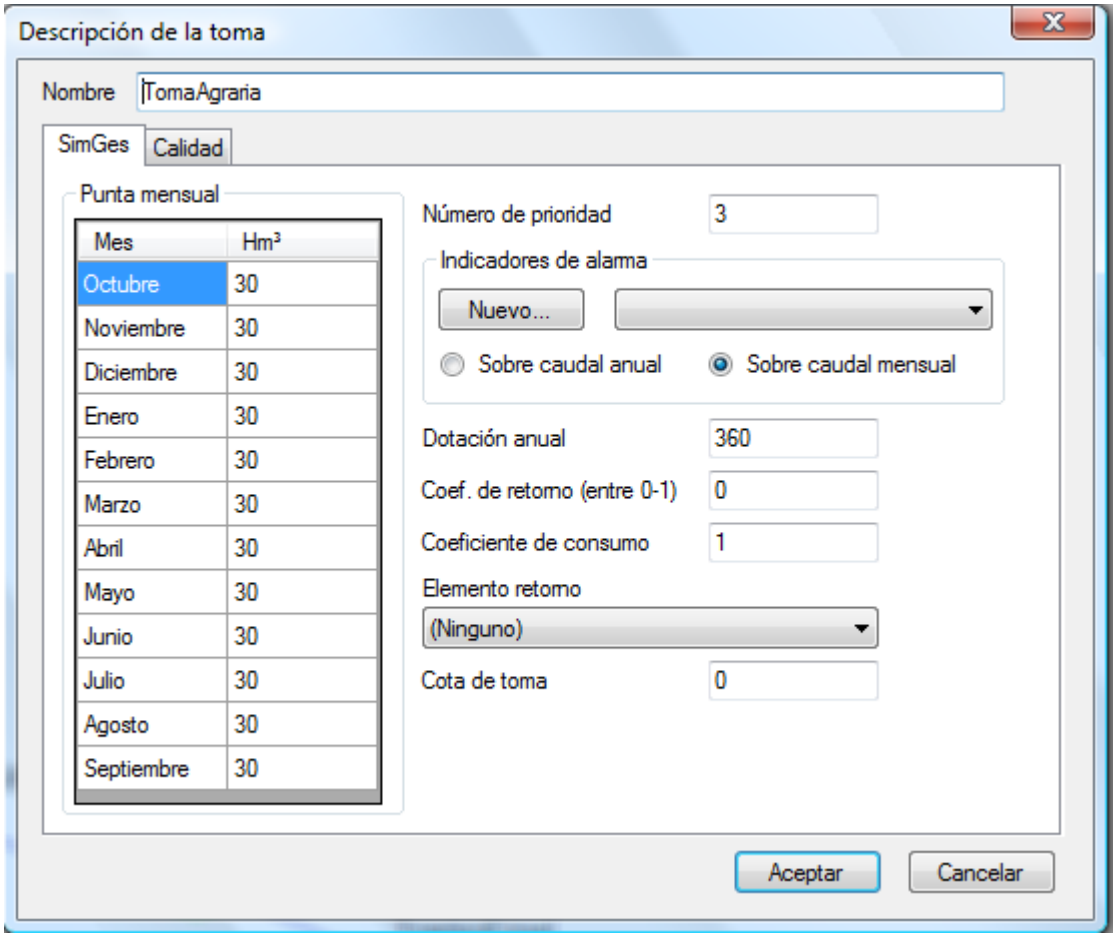


Figura 11. Ficha de datos para una toma.

En este caso los únicos datos que debemos introducir son el nombre de la toma la punta mensual y la dotación anual. Estos valores deben ser superiores a los valores introducidos en la demanda para que no supongan un límite en el suministro.

Un elemento de demanda puede tener varias tomas que la satisfagan. Por otro lado el programa comprueba si una demanda está limitada en su suministro debido a que los datos de la toma son inferiores a los de la demanda. Si no se ha creado el elemento de retorno se puede dejar en “por determinar” y luego volver a la ficha para asignarlo.

También es importante que el usuario entienda el significado del coeficiente de consumo y de retorno.

De esta forma crearemos las tres demandas de nuestro ejemplo y sus tres tomas.

2.4. Aportaciones

Antes de crear las aportaciones conviene copiar en el directorio de trabajo los archivos de aportaciones de SIMGES y GESCAL, “Aporta.apo” y “AportaCal.apo” respectivamente. Esto se realiza de forma externa al programa, utilizando el explorador de archivos. El directorio de trabajo se encuentra dentro del directorio elegido por el usuario con el nombre “escenario001” (según se observa en la Figura 3).

Una vez copiado estos archivos, para crear una aportación al sistema se utiliza el elemento de la barra de herramientas. Una vez presionado el elemento se debe indicar el nudo en el cual entra la aportación de recurso. Los datos que se dan en la ficha de aportaciones, Figura 12, son el nombre de la aportación y la columna en la que se encuentran los valores de la misma en el archivo de aportaciones.

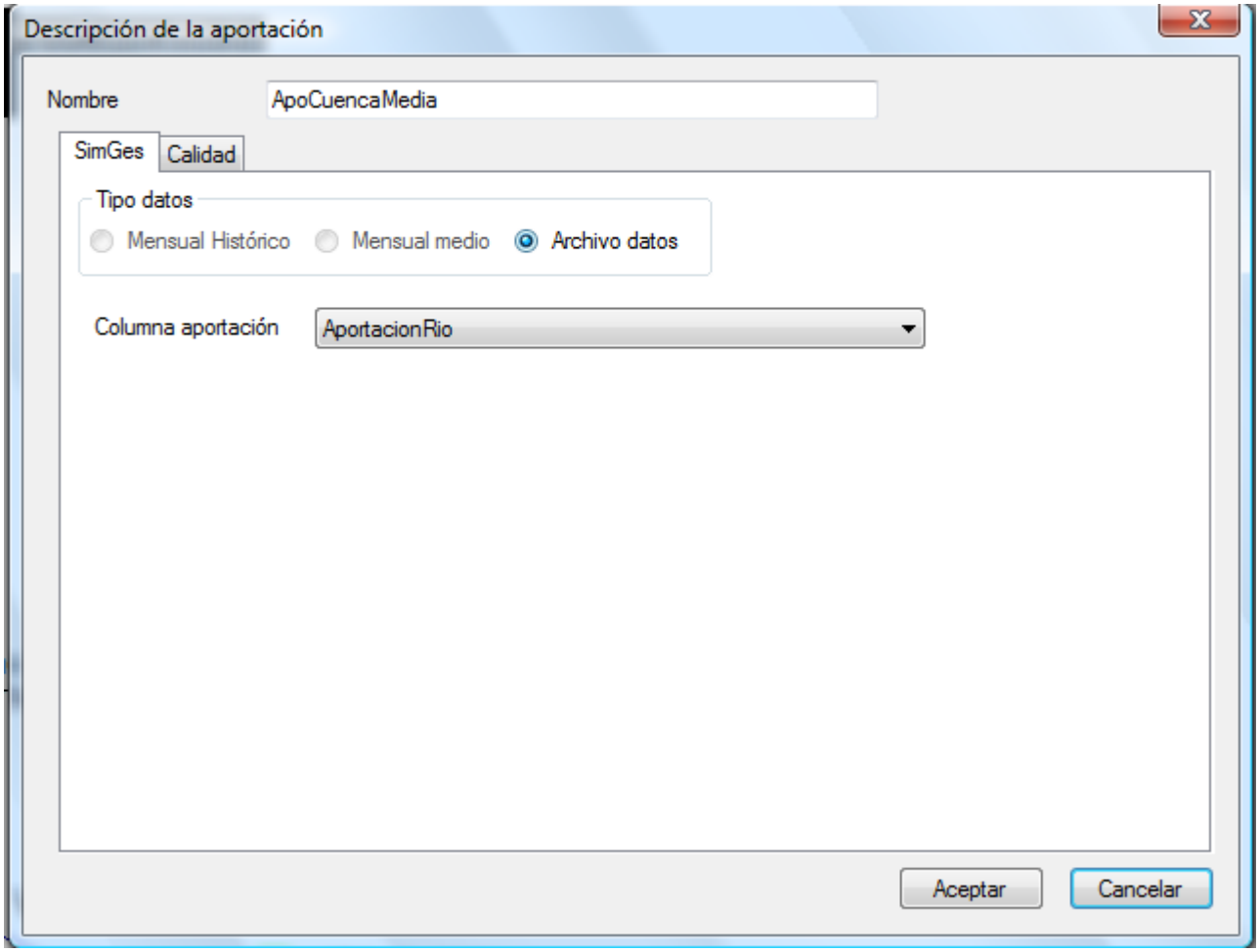


Figura 12. Ficha de aportaciones.

Aunque en este documento no se explica es posible introducir los valores de las aportaciones directamente en la interfaz almacenándose en la base de datos del modelo.

En cuanto a los datos de concentraciones de entradas de las aportaciones, ubicados en el archivo de aportaciones de Gescal, no es necesario realizar ninguna acción en la pantalla. Es importante indicar que el orden de los datos de aportación en el archivo debe ser el mismo que el del orden de aportaciones en el modelo, sin tener que coincidir con el del archivo de SIMGES.

2.5. Asignación del nudo final

En este punto ya se han creado todos los elementos del modelo pero falta hacer una operación que es asignar el nudo final del esquema (o los nudos finales). Para ello seleccionamos el nudo final de la conducción "Tramo final" y en el menú "Editar" seleccionamos la opción Nudo Final/Asignar Nudo final. Figura 13.

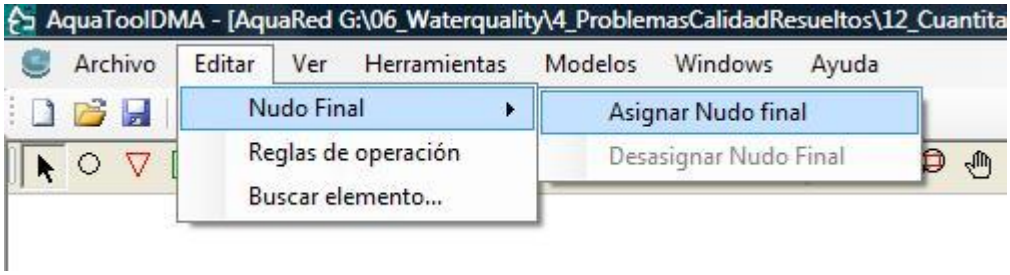


Figura 13. Asignación del nudo final.

En este momento ya se tiene el modelo completo, Figura 14, con todos los datos y es posible comenzar a utilizarlo como una herramienta de análisis.

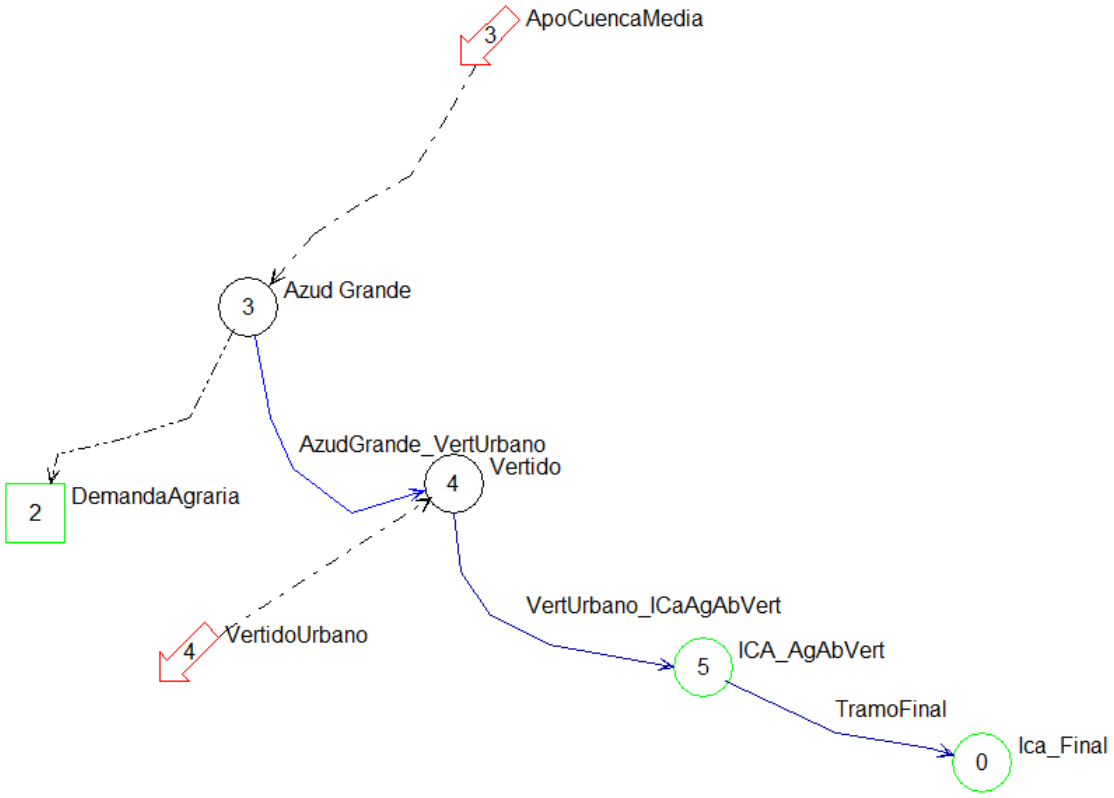


Figura 14. Esquema del modelo realizado

3. Simulación cuantitativa.

En este momento ya se tiene creada la parte “cuantitativa” del modelo y se puede realizar una simulación para ver los resultados y para verificar que todos los datos han sido incluidos correctamente. Para ello en el menú “Modelos” seleccionamos la opción: Simges/Ejecutar Simges como se muestra en la Figura 15.

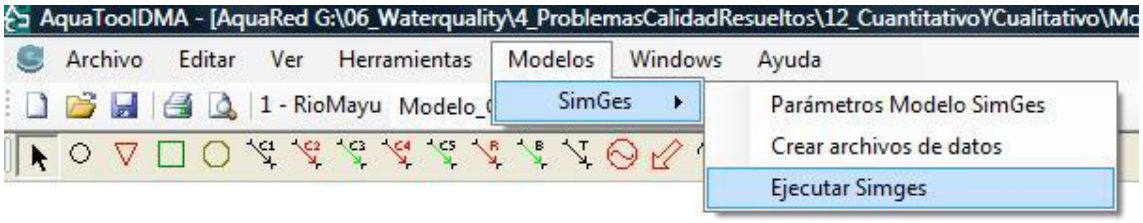


Figura 15. Llamada a la simulación del modelo.

El programa nos lleva a la ficha de parámetros, Figura 3, del modelo se simulación por si se quiere hacer alguna modificación en cuanto a los títulos o los años de simulación. Si hacemos clic sobre el botón Aceptar el programa hace la llamada al módulo SIMGES apareciendo la siguiente pantalla de ejecución.

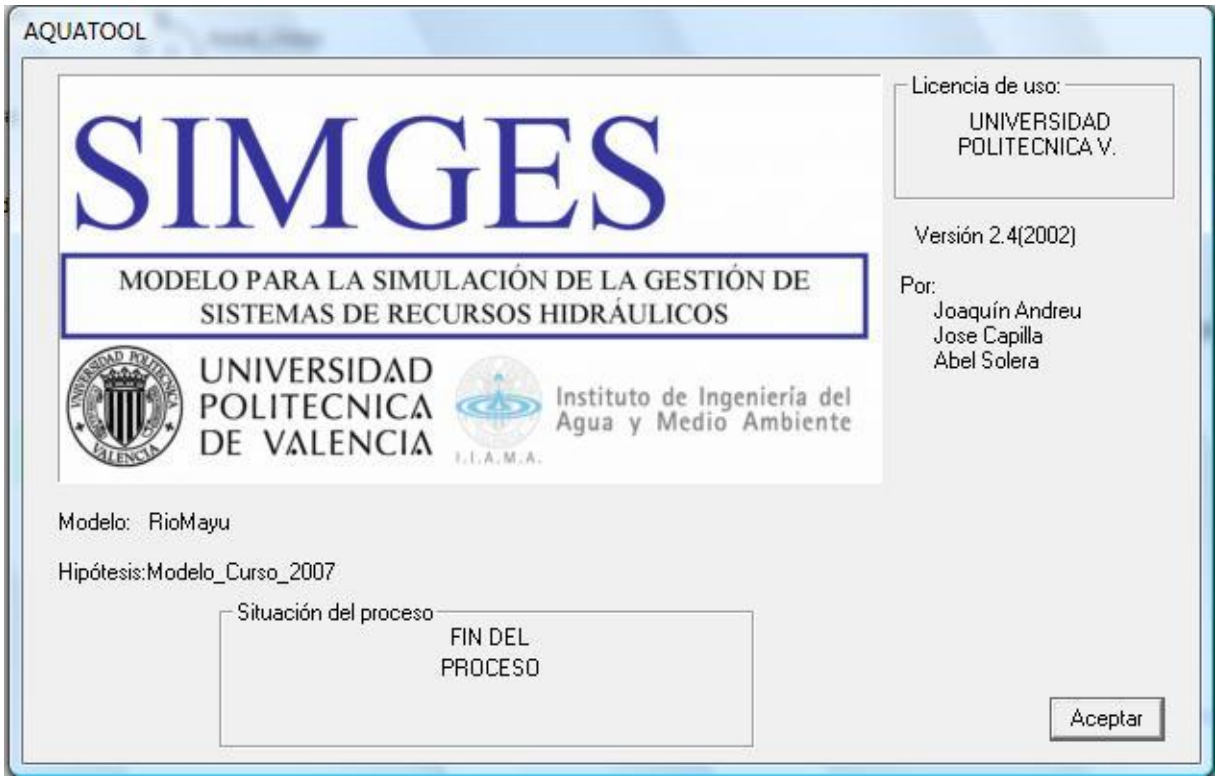


Figura 16. Pantalla de ejecución del modelo SIMGES.

Una vez aparece la etiqueta de "fin de proceso" se puede presionar el botón "Aceptar" para cerrar la pantalla de simulación y volver a la pantalla de trabajo.

Si, por cualquier causa, apareciera un mensaje de error tendríamos que consultar el fichero de errores de Simges. Esto se puede hacer desde el menú Ver/Resultados Simges/Incidencias de la simulación como se indica en la Figura 17.

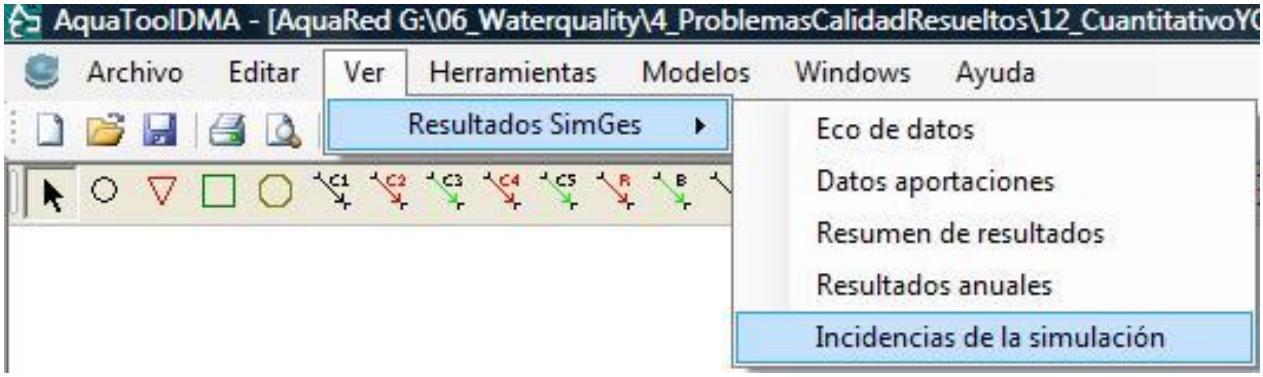


Figura 17. Acceso a el archivo de errores de la simulación.

Si la simulación ha terminado correctamente, es conveniente editar e imprimir el archivo de **"Eco de datos"** (Figura 17) para revisar y validar todos los datos que se han introducido al programa. Este archivo contiene una copia formateada y etiquetada de los datos que se ha dado al programa.

4. Introducción de los datos de calidad.

En este momento se deben introducir los datos relativos a la modelación de la simulación de la calidad del agua.

4.1. Formulación del modelo básico.

Si se han realizado estos pasos correctamente estaremos un modelo en que se van a simular los sólidos suspendidos la DBO_5 y el oxígeno disuelto.

4.1.1. Formulación del modelo planteado.

En este apartado se explican los procesos que se modelas en los diferentes constituyentes. Junto con estos procesos se producen una serie de procesos físicos, según si estamos en un tramo de río y embalse, como puede ser la advección en un tramo de río. Estos procesos se explican en el manual técnico del modelo Gescal.

4.1.1.1. Sólidos suspendidos.

Para un caso de contaminante arbitrario, como son los sólidos suspendidos, la formulación de degradación implica un parámetro de degradación según una cinética de primer orden y una velocidad de sedimentación.

$$\sum W_i = -K\left(\theta^{T-20}\right)C - \frac{VS}{h}C \quad (1)$$

Donde: W_i representa el conjunto de procesos que se dan en la masa de agua, K representa la constante de descomposición a 20 ºC (día^{-1}); θ es el coeficiente por corrección de temperatura; la sedimentación se considera mediante un parámetro VS que representa la velocidad de sedimentación del constituyente (m día^{-1}); h es el calado del río (m); C representa la concentración del contaminante en el río (mgl^{-1}).

Los sólidos sólo sedimentan por lo que la constante de degradación se mantendrá nula (*K=0*) y se utilizará la velocidad de sedimentación (*VS*) como parámetro del modelo.

4.1.1.2. DBO_5 y oxígeno disuelto.

Por otro lado la modelación del oxígeno disuelto en su modo "básico" significa que se tienen en cuenta la DBO_5 y el oxígeno disuelto. La Figura 18 muestra los procesos considerados en la opción de modelación básica en cuanto a oxígeno disuelto (OD) y materia orgánica carbonosa (MOC) se refiere.

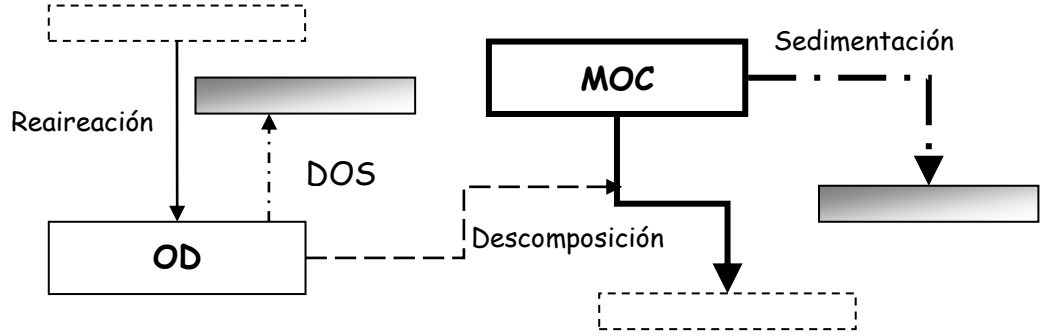


Figura 18. Procesos considerados en la hipótesis básica de modelación del oxígeno disuelto.

Nota: DOS= Demanda de Oxígeno por parte del Sedimento.

Para la modelación de la MOC se tiene en cuenta la degradación por microorganismos aeróbicos heterótrofos y la sedimentación de la parte particulada.

$$\sum W_i = -K_d \theta_d^{T-20} \frac{O}{O + K_{d\,1/2}} L - \frac{VS_L}{h} L \qquad (2)$$

Donde: L es la concentración de MOC o DBO en el río (M/V); K_d es la constante de degradación (T^{-1}); θ_d es la constante por corrección de la temperatura de la constante K_d; VS_L es la velocidad de sedimentación ($mdía^{-1}$); *h* es la altura de la masa de agua; *T* es la temperatura de la masa de agua y O es la concentración de oxígeno disuelto en el río (mgl^{-1}); $K_{d1/2}$ es la constante de semisaturación para tener en cuenta el descenso de la degradación de la materia orgánica en condiciones anóxicas.

Para la modelación del oxígeno disuelto se consideran el consumo de oxígeno disuelto en el proceso de degradación de materia orgánica carbonosa.

$$\sum W_i = +K_a \theta_{Ka}^{T-20} (O_{sat} - O) - K_d \theta_d^{T-20} L - DOS \qquad (3)$$

Donde: O_{sat} es la concentración de saturación de oxígeno disuelto (mgl^{-1}); K_a es la constante de reaireación ($día^{-1}$); θ_{ka} es el factor de corrección por temperatura;

La Saturación del oxígeno disuelto (O_{sat}) se calcula en función de la temperatura. El factor de corrección se tiene un valor por defecto. Los parámetros que se manejan para calibrar este modelo son la K_d; V_{sd} y la K_a

4.2. Datos de Conducciones.

Para introducir la información necesaria basta con acceder a la ficha de cada una de las conducciones haciendo doble-clic sobre el elemento. Al haber activado el modelo GESCAL aparece una solapa con el título “Calidad” que nos permite editar los datos de calidad, Figura 19.

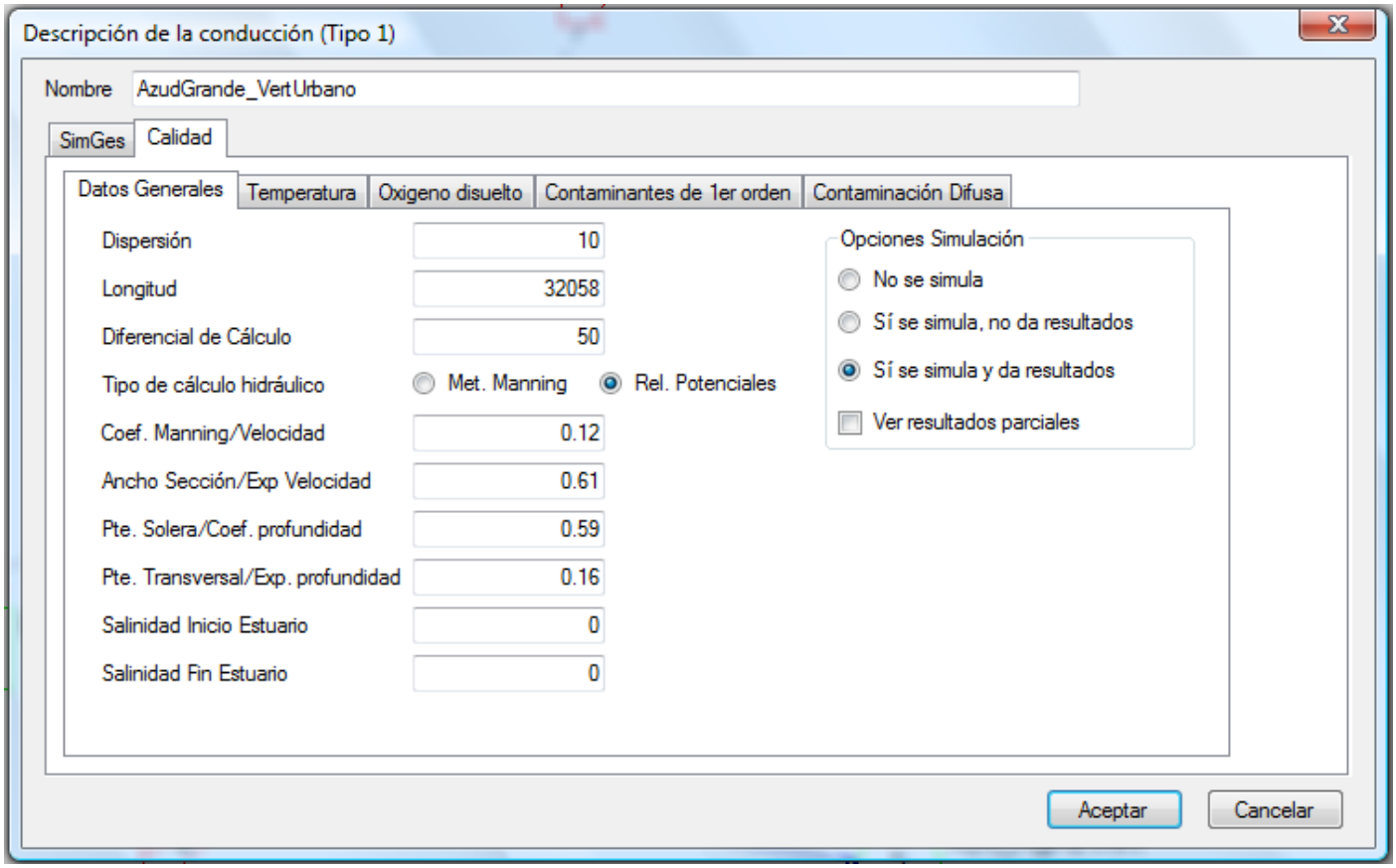


Figura 19. Ficha de datos de generales para la simulación de la calidad de los elementos conducción.

Como se puede ver los datos a introducir se diferencian entre Datos generales, temperatura, oxígeno disuelto, contaminantes de primer orden y contaminación difusa. En nuestro ejemplo en un principio sólo vamos a utilizar las dos primeras solapas.

4.2.1 Datos generales

De los datos generales basta introducir la longitud de la masa de agua y los coeficientes hidráulicos. Los coeficientes hidráulicos nos sirven para caracterizar la hidráulica de los tramos de río mediante relaciones potenciales. Lo que más nos interesa es el tiempo de viaje. Estos coeficientes pueden obtenerse mediante ajustes obtenidos por mediciones simultáneas de ancho, profundo, velocidad y caudal. Las redes biológicas suelen realizar este tipo de muestreos.

De los otros datos podemos remarcar lo siguiente:

El coeficiente de dispersión se puede dejar con un valor de 10 o se puede hacer nulo ya que estamos haciendo la hipótesis de que nuestro río es muy advectivo y que la dispersión es despreciable.

En cuanto al diferencial de cálculo un valor de 50 metros es un valor adecuado en la mayor parte de los casos.

La opción de “Tipo de cálculo hidráulico” debe seleccionarse “Rel. Potenciales” para que el análisis hidráulico lo realice con relaciones potenciales.

La salinidad a inicio y final de estuario se pueden dejar con valores nulos.

En cuanto a las opciones de simulación la opción por defecto simula la conducción y saca resultados globales de la misma. Más adelante se profundizará más sobre estas opciones.

4.2.2. Temperatura

En este ejemplo la temperatura no se modela sino que se introduce como input de cada masa de agua. Para la introducción de los datos se debe seleccionar la pestaña de “temperatura”.

La temperatura se introduce mediante un valor base y una curva temporal. Si los valores temporales de la curva son los valores definitivos es importante hacer la temperatura base igual a 1 ya que por defecto viene con el valor de 20.

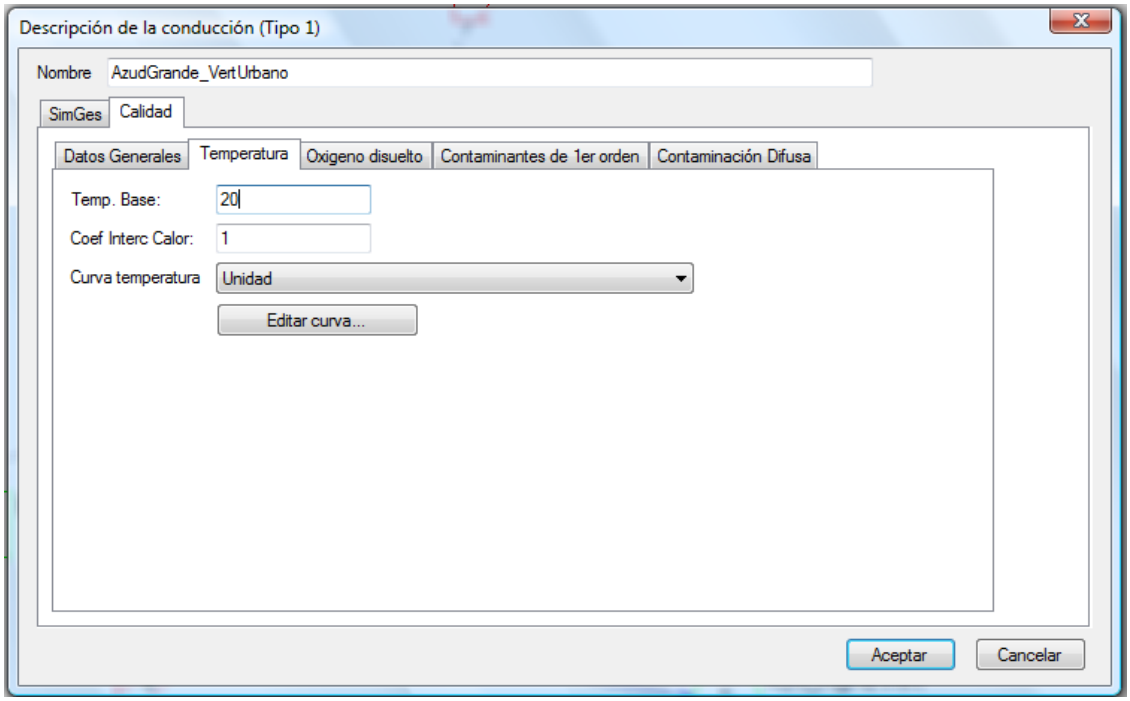


Figura 20. Datos de temperatura de conducciones.

Para introducir la curva temporal (tanto para temperatura como para otros parámetros que se verán más adelante) se edita el gestor de curvas temporales mediante el botón "Editar curva". El gestor de curvas, Figura 21, permite crear, editar y visualizar diferentes curvas temporales para la temperatura y otras variables. Para una mayor comodidad se puede introducir todas las curvas a la vez y luego asignar a cada caso la curva correspondiente.

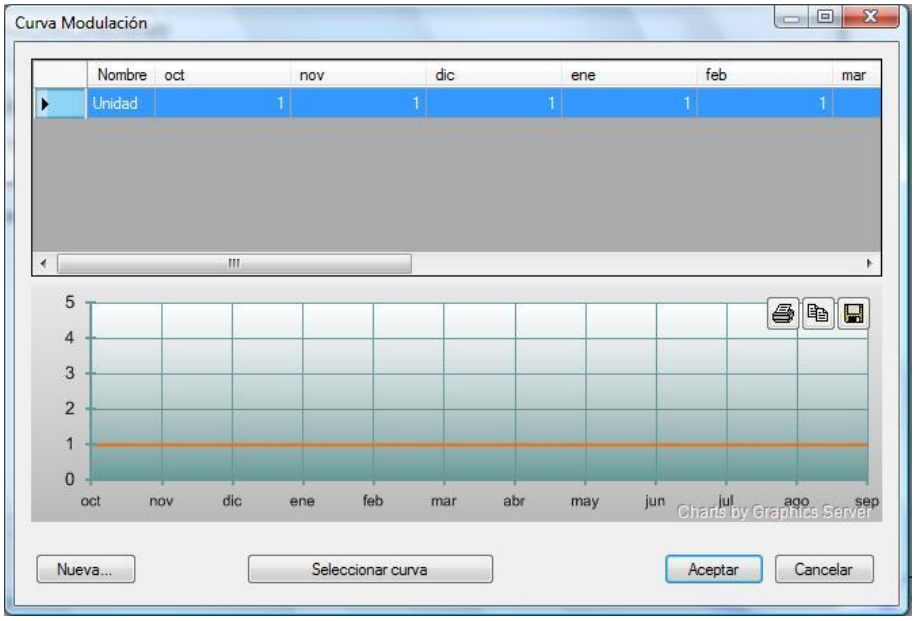


Figura 21. Gestor de curvas temporales

Para agregar una nueva curva basta con hacer clic sobre el botón "Nueva...". La información a introducir es un nombre para la curva y los 12 valores mensuales que definen la variabilidad temporal.

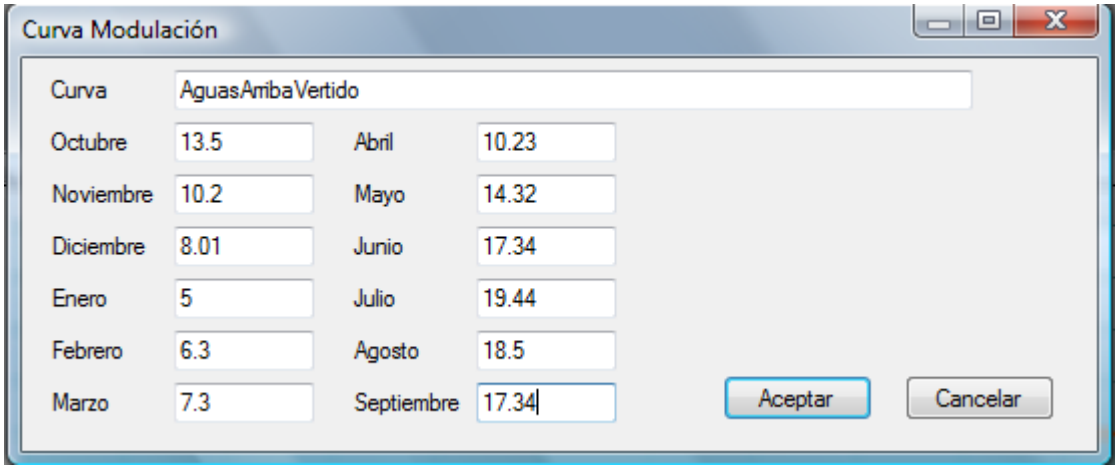


Figura 22. Creación de una nueva curva temporal

Una vez introducidas todas las curvas se pueden consultar en el editor.

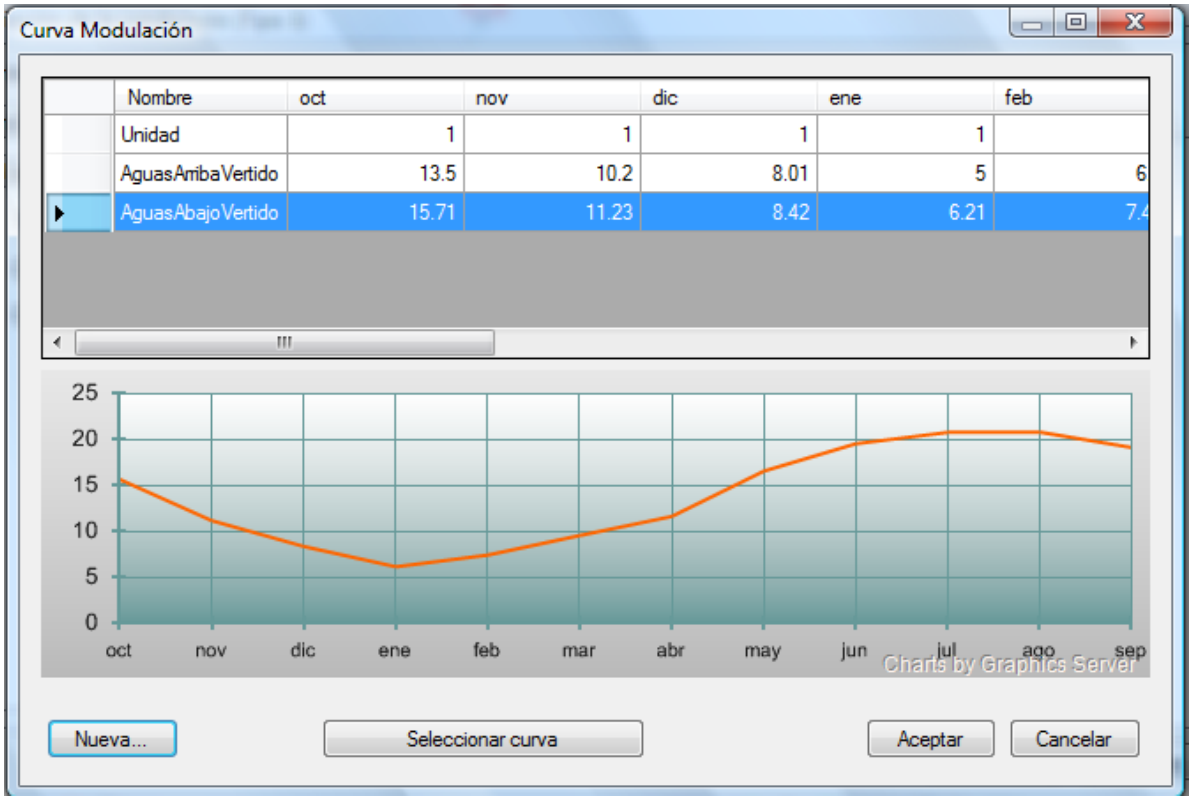


Figura 23. Almacenamiento de curvas temporales en el gestor de curvas.

Cuando se ha creado se debe volver a la ficha de la conducción en la que se estaba trabajando y asignar la curva que contiene la variabilidad temporal de la temperatura de esa masa de agua, Figura 24.

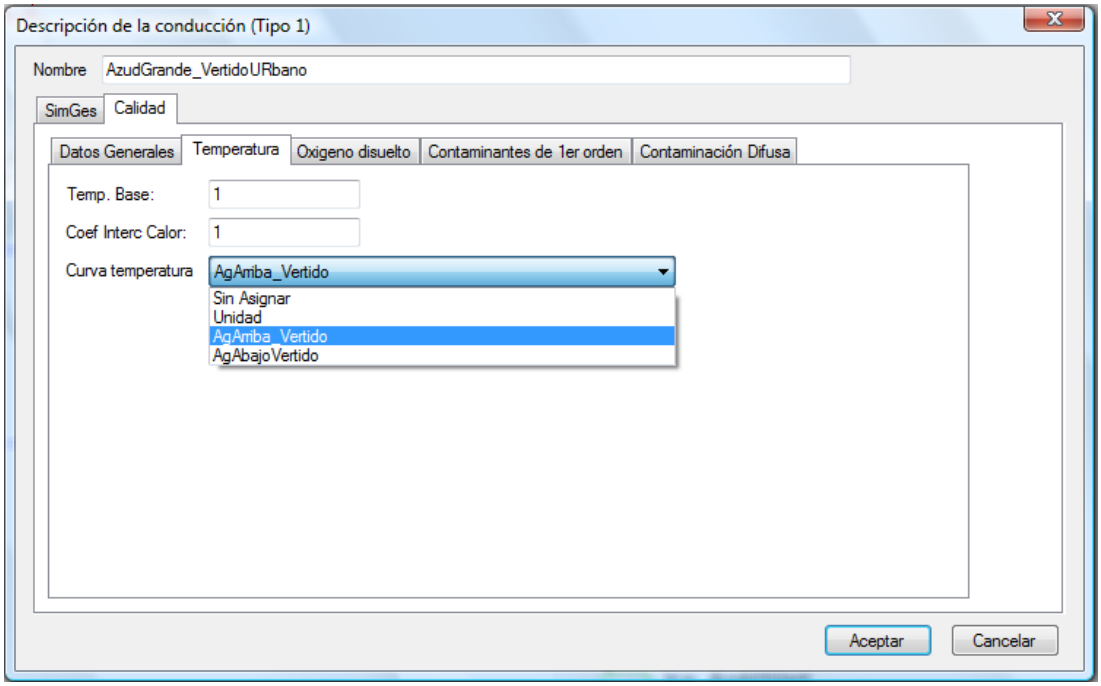


Figura 24. Asignación de curva de temperatura en una conducción.

De la misma forma se puede introducir toda la información necesaria del resto de conducciones.

4.3. Datos de aportaciones

Los datos de las aportaciones se introducen vía fichero. Este archivo contiene las concentraciones de los diferentes constituyentes que se están modelando para las aportaciones consideradas. En el manual técnico del módulo GESCAL se indica el formato de este fichero. Antes de realizar la simulación debe copiarse el fichero de aportaciones de calidad dentro de la carpeta de estudio. En este caso el fichero se ha llamado “AportaCal.apo” y se encuentra en la carpeta de datos.

Es de destacar que, en general, se tiene pocos años de datos de calidad si se comparan con la longitud de las series de datos de aportaciones cuantitativas.

Finalmente remarcar que el orden de las columnas de aportaciones de GESCAL no tiene porque coincidir con el del archivo de aportaciones de SIMGES. El orden debe coincidir con la creación de aportaciones en el modelo. Adelantar también que está previsto para la próxima versión de Aquatooldma que estos datos sean requeridos a través de interface y queden almacenados en la base de datos.

Los datos de las concentraciones de las aportaciones se han obtenido de algunas de las estaciones de calidad de la red ICA. Se debe hacer notar que algunas de las estaciones se utilizan como entrada al modelo mientras que el resto se utilizan para la calibración del mismo. La decisión sobre donde comienza el modelo y que datos son entradas debe realizarse en la fase de diseño del modelo.

Como referencia general, los datos procedentes de cauces en régimen natural son útilies como aproximación de la calidad de las aportaciones en zonas similares. Mientras que las estaciones de medida afectadas por vertidos u otros procesos serán más útiles para calibrar el modelo.

Se debe comentar que un vertido se puede modelar como un elemento de aportación o como un elemento de retorno. Ambas formas tienen ventajas e inconvenientes. La modelación como aportación permite dar variabilidad temporal tanto del volumen de vertido como de las concentraciones. Por otro lado los retornos representan una relación con el suministro que en el caso de las aportaciones no se produce.

5. Simulación sin calibrar y análisis de resultados

5.1 Simulación.

En este momento se tiene el modelo de simulación de la calidad montado a falta de simular para empezar a calibrar los parámetros. Antes de simular con GESCAL se debe simular con SIMGES como se ha realizado previamente. El período de simulación de ambos modelos debe coincidir.

Para realizar la simulación de la calidad se debe acceder al menú de Modelos/GESCAL/Ejecutar GESCAL.

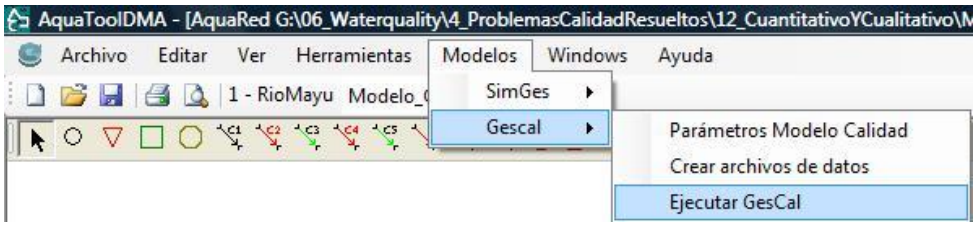


Figura 25. Acceso a la simulación de GESCAL.

En ese momento se escriben los archivos de entrada al modelo y se hace la llamada al módulo matemático. Si no se han cometido errores aparecerá la pantalla de la Figura 26 en la que se irán mostrando los años y meses de simulación y finalmente una etiqueta de "Fin de proceso". Una vez aparece esta etiqueta se debe pulsar el botón aceptar para que la pantalla desaparezca y se pueden acceder a los resultados de las simulaciones.

Figura 26. Modelo GESCAL en funcionamiento.

En caso de que, por cualquier causa, la simulación diera un mensaje de error deberíamos comprobar el archivo de gestión de errores. Esto se puede ver en la interfaz mediante el menú Ver/Resultados de GESCAL/Incidencias del modelo.

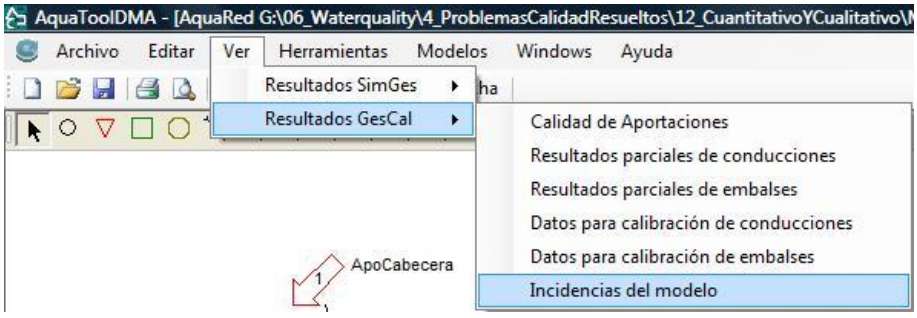


Figura 27. Acceso al archivo de incidencias.

5.2. Análisis de resultados.

Una vez terminada la simulación se puede pasar a analizar los resultados. Para ello se dispone de varios recursos. Aunque los principales son 2. El primero son los diferentes archivos de resultados que se escriben tras la simulación tanto cuantitativa como cualitativa. El segundo es la herramienta de análisis gráfico de resultados por elementos.

Para acceder a los resultados gráficos debemos cambiar el modo de edición de datos por el modo de acceso a resultados. Para ello basta con hacer Click donde pone “Ficha” en la barra de herramientas y cambiará a la palabra “Gráfico”.

Figura 28. Elección entre los modos de edición o visualización de resultados.

Una vez que aparece el modo “Gráfico” al acceder a cualquier elemento del esquema mediante un doble-clic se mostrará sus resultados activándose el Gestor de gráficos. Los resultados que se muestran por defecto son resultados cuantitativos.

Por ejemplo si seleccionamos el primer tramo de río podremos ver lo que aparece en la Figura 29.

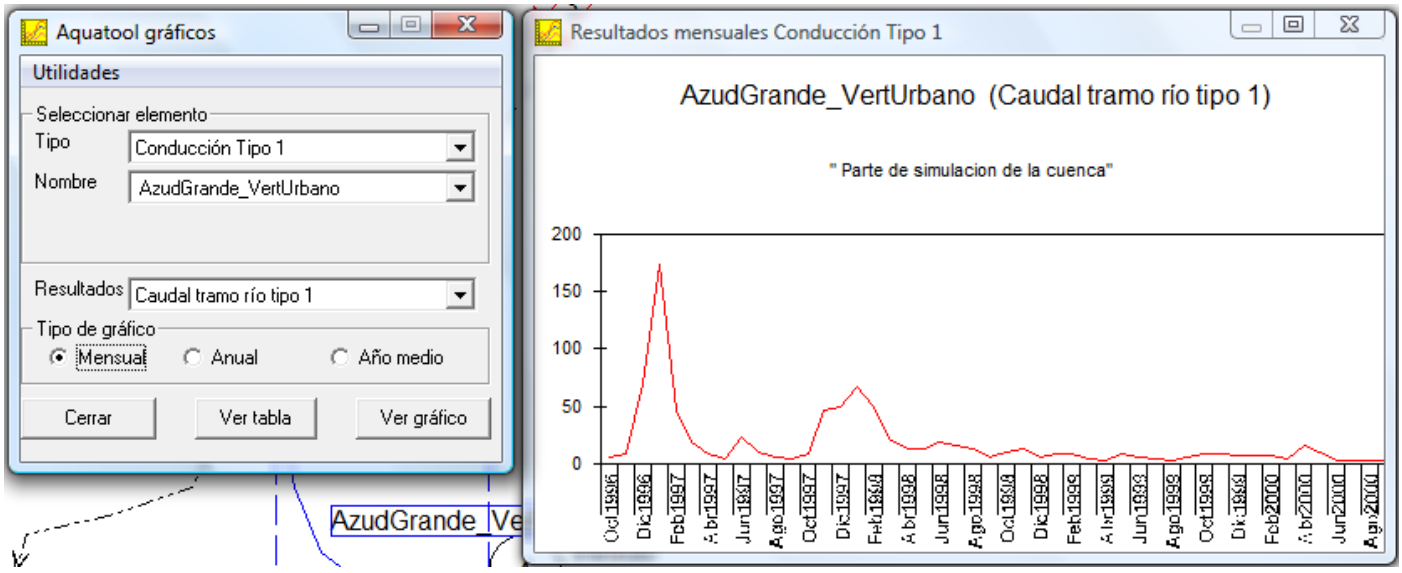
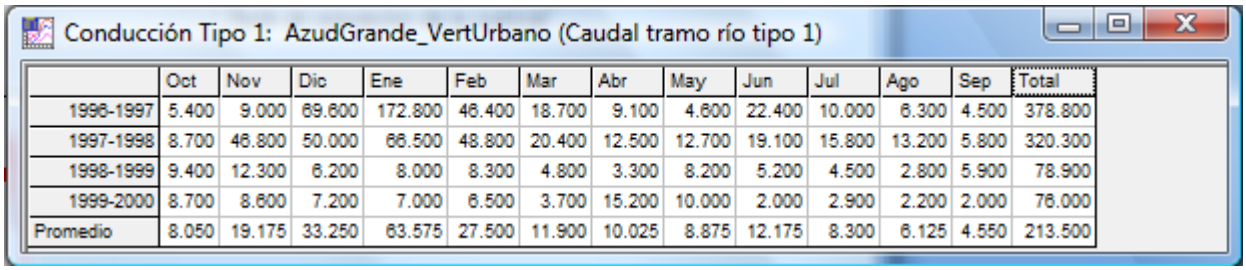


Figura 29. Gestor de gráficos y gráfico de resultados del tramo de río inical.

Desde la pantalla de gestor de gráficos también se pueden obtener resultados numéricos mediante la opción “Ver tabla”. Para el caso mostrado nos llevará a la pantalla que aparece en la Figura 30.


Conducción Tipo 1: AzudGrande_VertUrbano (Caudal tramo río tipo 1)

	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Total
1996-1997	5.400	9.000	69.600	172.800	46.400	18.700	9.100	4.600	22.400	10.000	6.300	4.500	378.800
1997-1998	8.700	46.800	50.000	66.500	48.800	20.400	12.500	12.700	19.100	15.800	13.200	5.800	320.300
1998-1999	9.400	12.300	6.200	8.000	8.300	4.800	3.300	8.200	5.200	4.500	2.800	5.900	78.900
1999-2000	8.700	8.600	7.200	7.000	6.500	3.700	15.200	10.000	2.000	2.900	2.200	2.000	76.000
Promedio	8.050	19.175	33.250	63.575	27.500	11.900	10.025	8.875	12.175	8.300	6.125	4.550	213.500

Figura 30. Resultados numéricos de la conducción.

El gestor de gráficos tiene diferentes opciones en cuanto a exportación de gráficos o datos a diferentes formatos por lo que se anima al usuario a revisar el manual de AquatoolDMA para un mayor conocimiento sobre este aspecto.

Para acceder a los resultados de la simulación de la calidad se debe seleccionar en el desplegable “tipo” si queremos visualizar los resultados de la calidad de un embalse o de un tramo de río.

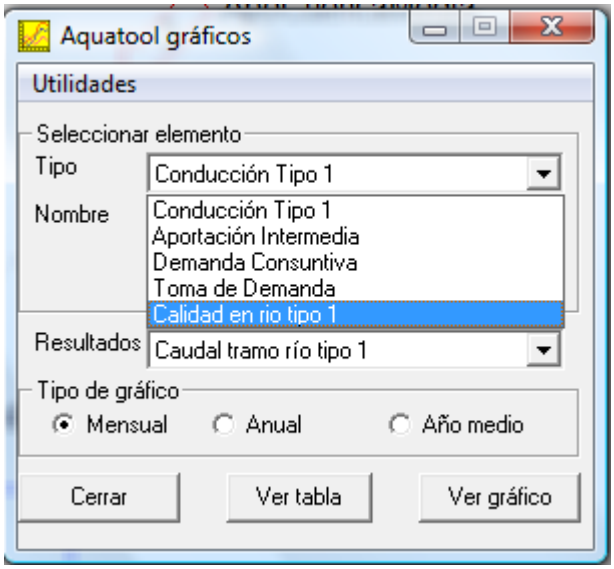
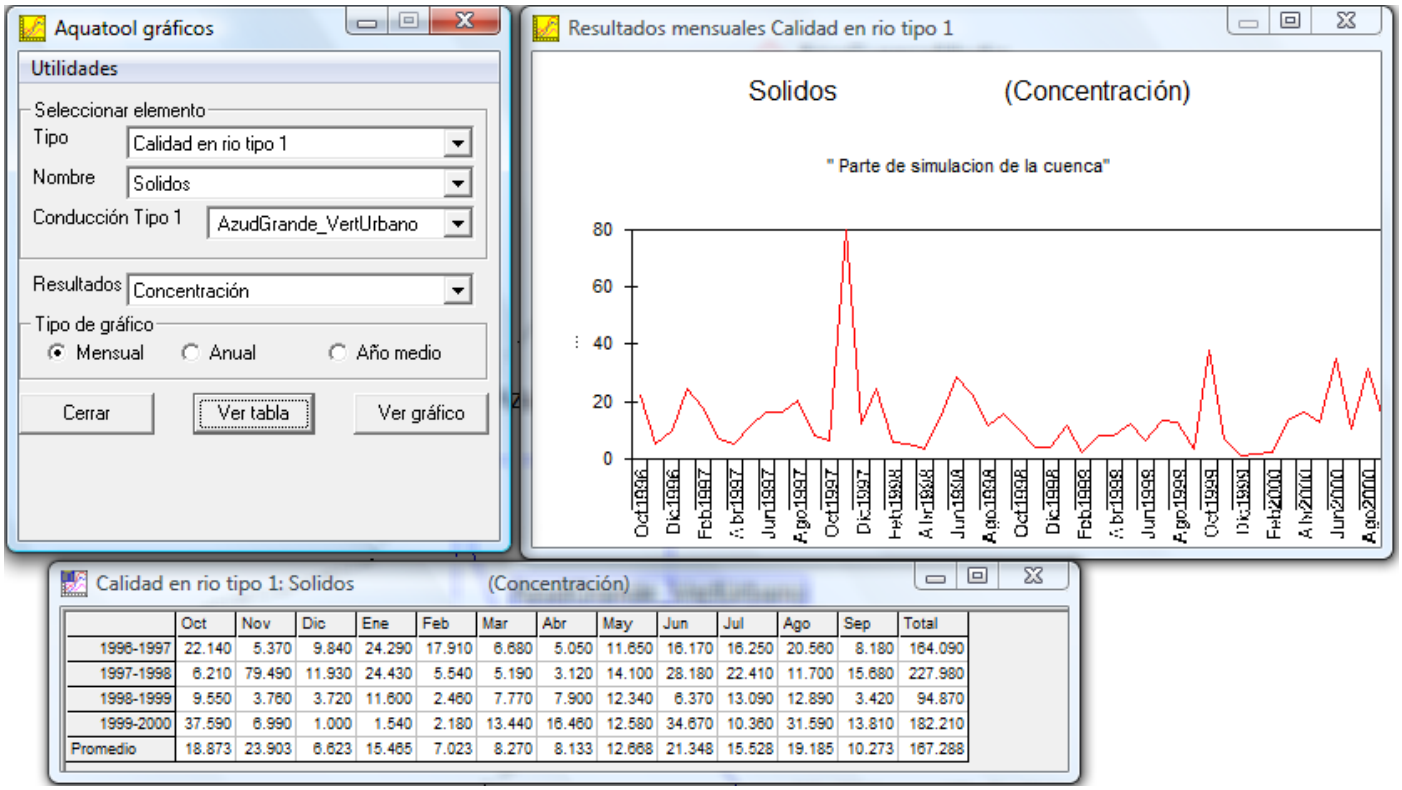


Figura 31. Acceso a los resultados de calidad en tramo de río desde el gestor de gráficos.

Una vez realizado esto en el campo “Nombre” se debe seleccionar que constituyente se quiere visualizar.

De este modo se accederá al gráfico y/o tabla de las concentraciones simuladas del constituyente y elemento elegidos.



	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Total
1996-1997	22.140	5.370	9.840	24.290	17.910	6.680	5.050	11.650	16.170	16.250	20.560	8.180	164.090
1997-1998	6.210	79.490	11.930	24.430	5.540	5.190	3.120	14.100	28.180	22.410	11.700	15.680	227.980
1998-1999	9.550	3.760	3.720	11.600	2.460	7.770	7.900	12.340	6.370	13.090	12.890	3.420	94.870
1999-2000	37.590	6.990	1.000	1.540	2.180	13.440	16.460	12.580	34.670	10.360	31.590	13.810	182.210
Promedio	18.873	23.903	6.623	15.465	7.023	8.270	8.133	12.668	21.348	15.528	19.185	10.273	167.288

Figura 32. Resultados del módulo de calidad.

5.2.1. Resultados en gráfico dinámico.

Antes de comenzar esta actividad se debe copiar el archivo “observados.csv” ubicada en la carpeta de los datos en la carpeta del escenario de trabajo. Esto se debe realizar de forma manual.

Debido a la gran cantidad de elementos que suelen haber en los modelos, y que los constituyentes modelados suelen ser varios, los resultados de modelación de la calidad suelen ser bastante numerosos. Esto, junto a la necesidad de realizar calibraciones ha llevado a dar la posibilidad de exportar los resultados a una aplicación de gráfico dinámico que permite el tratamiento de datos masivos de una forma cómoda y sencilla.

Para ello, desde el gestor de gráficos en el menú Utilidades/Gráfico dinámico de GESCAL/Nuevo.

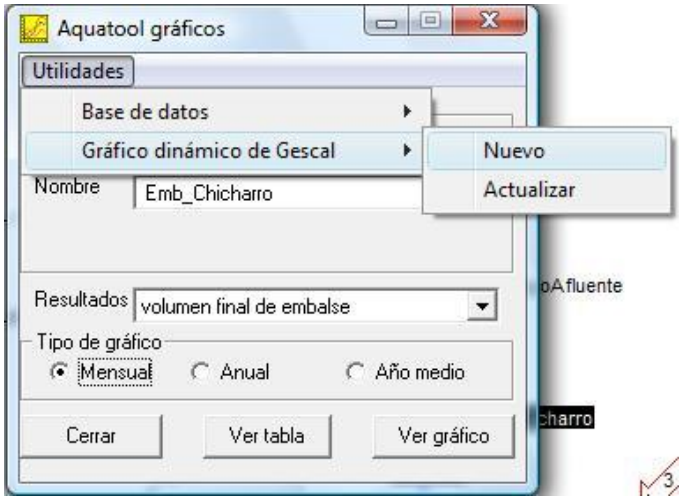


Figura 33. Creación de un gráfico dinámico con los resultados.

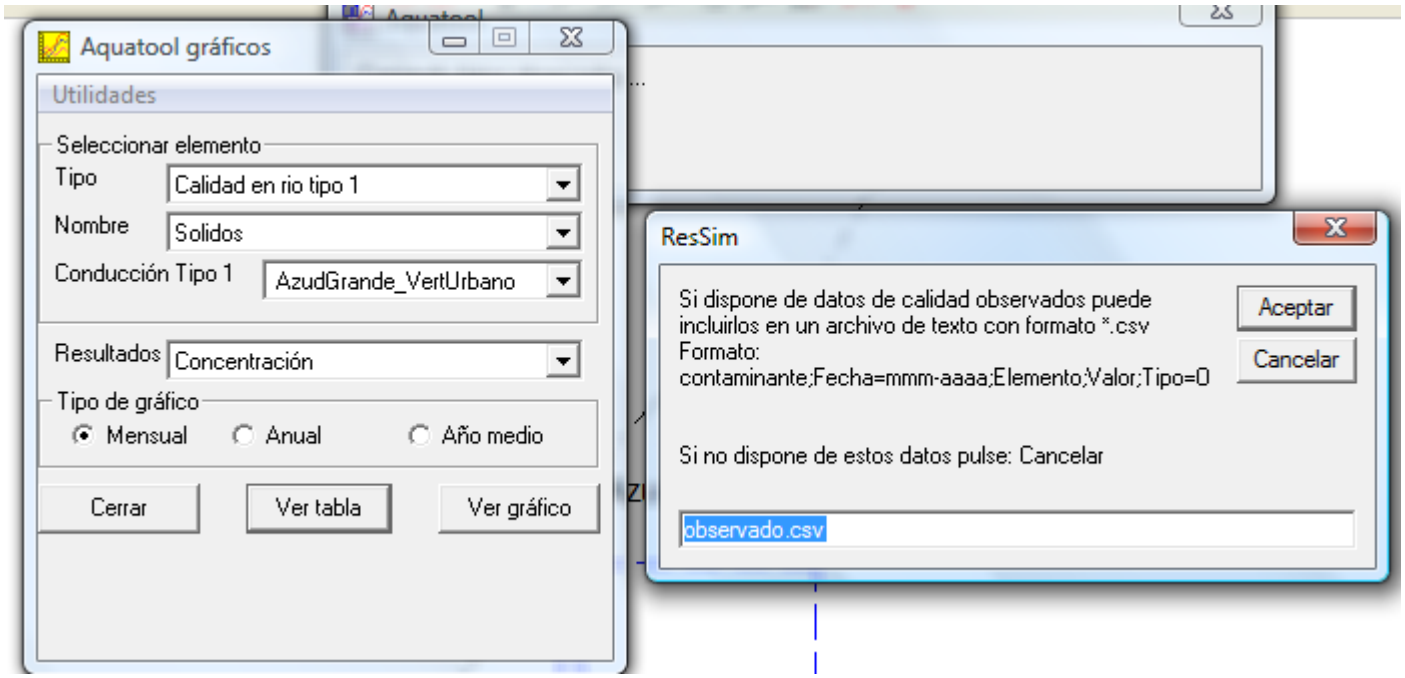


Figura 34. Definición del archivo de datos de observados.

Seguidamente el programa nos preguntará si disponemos de un archivo de datos observados para su comparación. El formato que debe contener este archivo se describe en el manual técnico de GESCAL. Si no se dispone de este archivo basta seleccionar la opción “Cancelar”. Si disponemos de este archivo, como es el caso, previamente a realizar esta operación debemos copiar el archivo a la carpeta de trabajo del modelo.

El programa abrirá un archivo Excel con un gráfico dinámico en el que se tienen todos los resultados y datos observados, Figura 35.

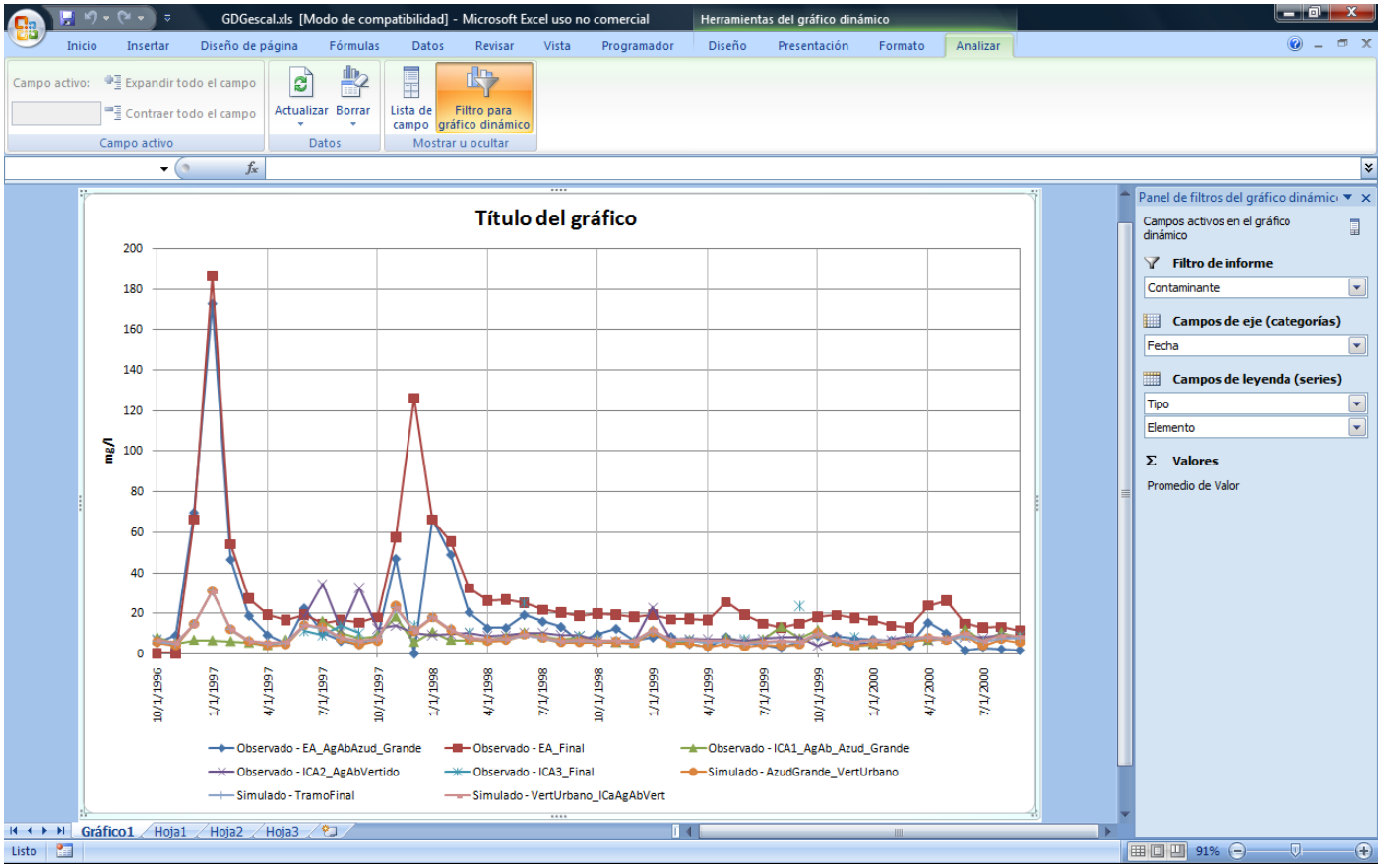


Figura 35. Gráfico dinámico con los resultados de la simulación y los datos observados.

A partir de ese momento se pueden ir haciendo filtros de contaminante, estaciones y fechas de los resultados que se quieres mostrar.

Hay que mencionar que las figuras, sobre el gráfico dinámico, que se muestran en este documento están obtenidas del programa Office Vista. Las ventanas son diferentes, aunque el concepto es el mismo, si se utilizan versiones anteriores de Office.

Por ejemplo se puede seleccionar como contaminante a visualizar el oxígeno disuelto.

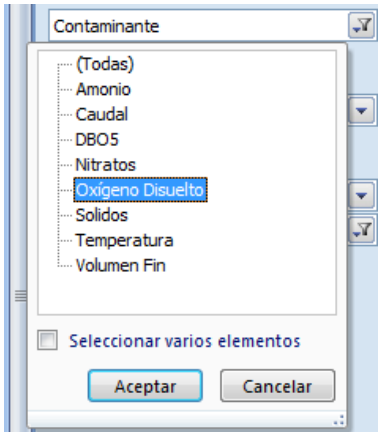


Figura 36. Filtro del contaminante

Y como estaciones a visualizar la estación “Ica1_AgAb_Azud_Grande” (valor observado) versus el elemento “AzudGrande_VertUrbano”. Con lo que se obtiene el gráfico de la Figura 38.

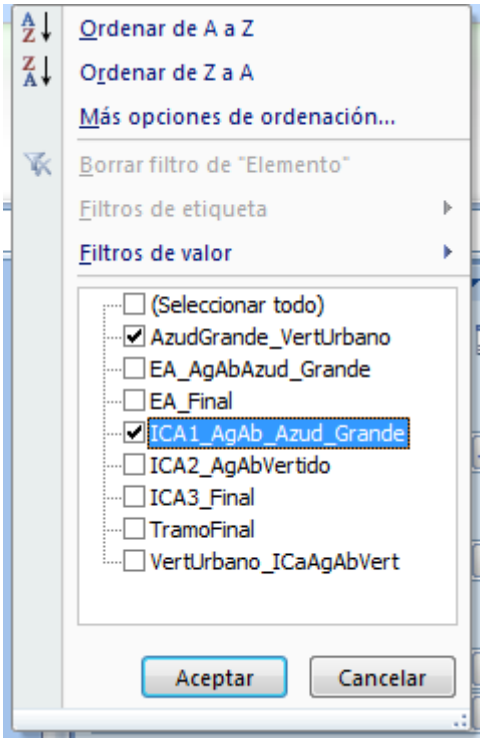


Figura 37. Filtro por elementos.

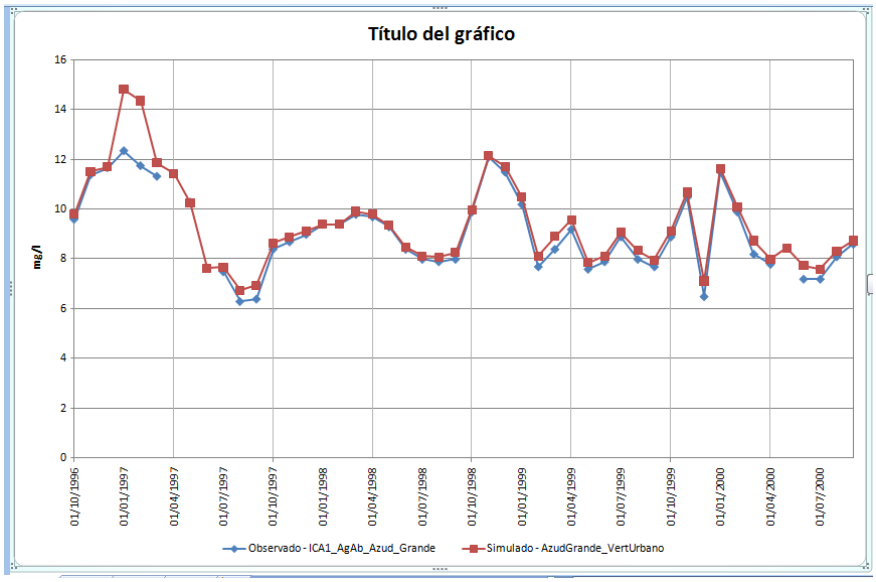


Figura 38. Gráfico de concentraciones de oxígeno disuelto. Simuladoy Observado.

5.2.2. Actualización de resultados.

Para realizar el proceso de calibración es necesario hacer múltiples simulaciones variando los parámetros del modelo para ver los resultados. No es necesario iniciar en cada simulación el gráfico dinámico con los nuevos resultados, basta con actualizar los resultados cada vez que se cambia algún parámetro y se realiza un nueva simulación de la calidad. Para ello, una vez realizada la simulación, ir al menú del gestor de gráficos *Utilidades/Gráfico dinámico de GESCAL/Actualizar*.

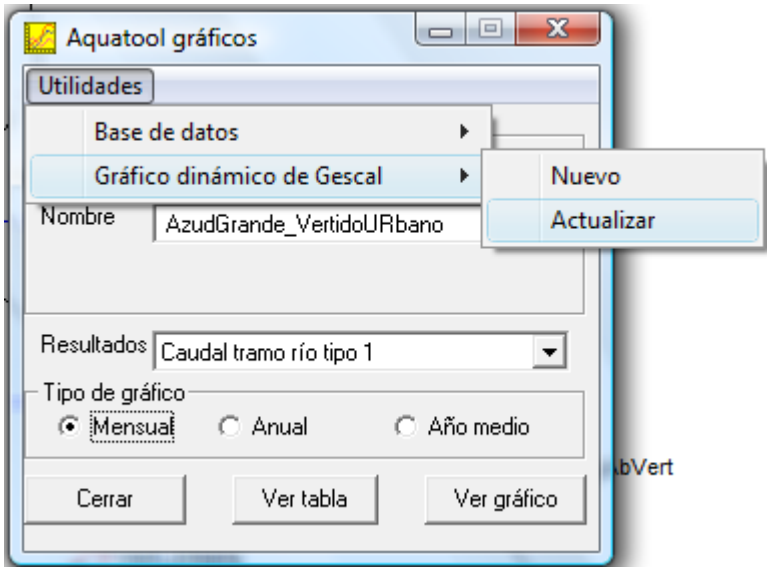
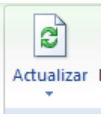


Figura 39. Actualización de los resultados del gráfico dinámico desde el programa de gráficos.

Una vez realizado este paso basta con pulsar el botón de actualizar del gráfico dinámico.



No es necesario cerrar y abrir el gestor de gráficos cada vez que se haga una simulación. Por otra parte hay que recordar que no hace falta simular el modelo SIMGES a no ser que se haya variado algún dato que modifique las variaciones de flujos en el sistema.

6. Calibración

En este momento se dispone del modelo funcionando con las entradas y datos físicos introducidos. Sin embargo para que el modelo de calidad este completo se debe realizar un proceso de calibración de los parámetros del mismo. Este proceso se puede realizar mediante cualquier técnica matemática de ajuste de parámetros o simplemente mediante la visualización de los resultados medidos frente a los simulados.

En cuanto a qué comparar, en el archivo de datos se adjunta la siguiente tabla para establecer que elementos deben de compararse con los resultados.

Caudales		
Estación	**Modelo**	**A comparar**
EA_AgAbAzGrande	AzudGrande_Vertido	Caudal
EA_Final	Tramo Final	Caudal
Calidad		
Estación	**Modelo**	**A comparar**
ICA1_AgAb_AzudGrande	AzudGrande_VertidoUrbano	Constituyentes
ICA2_AgAbVertido	VeetUrbano_IcaAgAbVertido	Constituyentes
ICA3_Final	Tramo Final	Constituyentes

Tabla 1. Relación entre puntos de medición y resultados del modelo para comparación.

Para establecer los puntos de comparativa se ha de tener en cuenta que el modelo da como resultado las concentraciones a final del tramo.

6.1. Calibración de caudales.

El primer aspecto que de debe comprobar es el cuantitativo. La comparación de los caudales en estaciones de aforo nos indica si el modelo responde a la realidad del sistema y a la gestión que se está realizando. Este proceso es una forma de comprobar el modelo de simulación y dar una mayor robustez.

Al comparar la evolución de los caudales podemos ver que en la primera estación de aforos la similitud es total debido a que se han utilizado los datos como input del modelo.

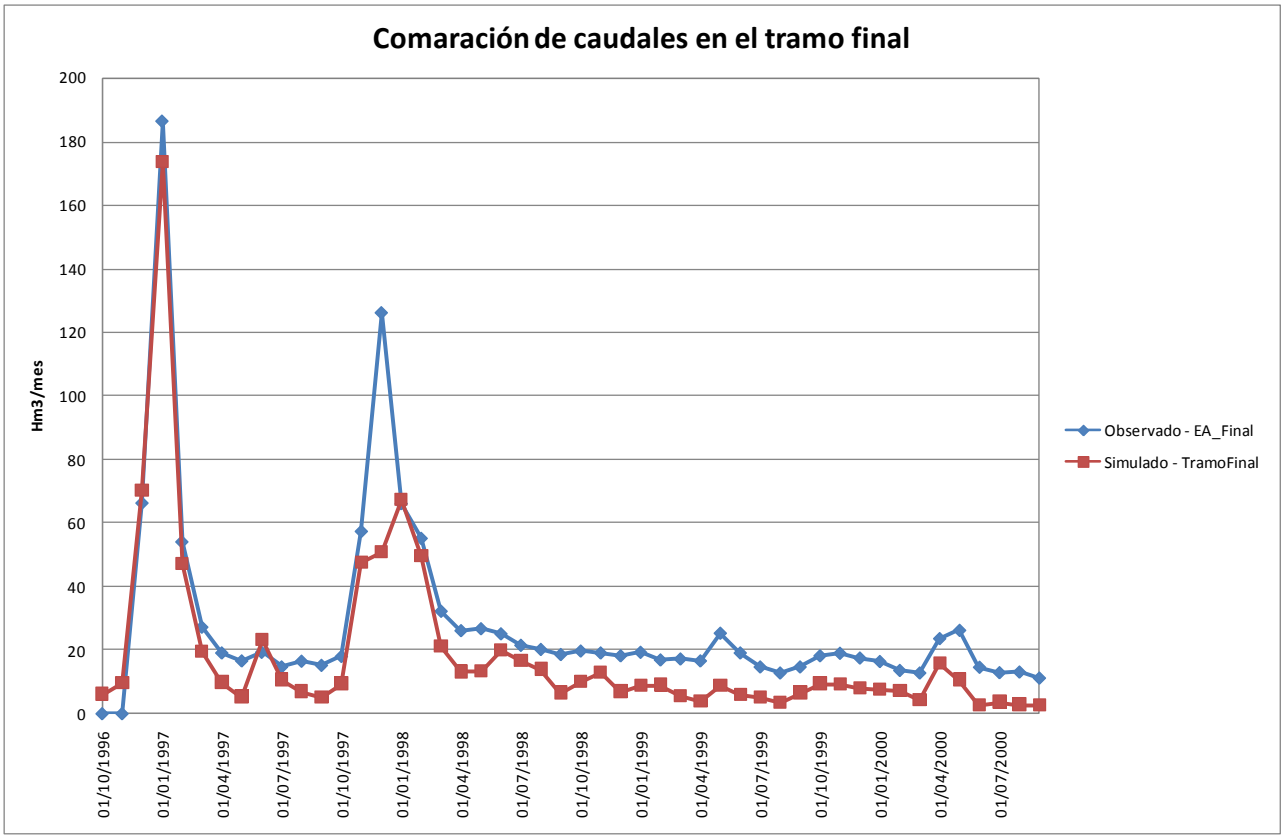


Figura 40. Comparativa de caudales en el tramo final.

Del gráfico se deduce que existe una aportación de caudal no contemplada en el modelo. Esto se debe a que este ejemplo es una simplificación de un modelo real y, en aras de simplificar el ejemplo, se han eliminado ciertas entradas de aportación que suponían el incremento del caudal que se desprende de la figura.

6.2. Comparativa de concentraciones.

El siguiente paso sería ir comparando las concentraciones de los sólidos suspendidos, DBO5 y Oxígeno disuelto entre las estaciones de calidad y los elementos correspondientes, según Tabla 1. Conviene ir realizando la comparativa de aguas arriba a aguas abajo.

6.2.1. Sólidos suspendidos.

Para la calibración de los sólidos suspendidos se dispone de la velocidad de sedimentación, v_s. Valores normales entre 0.01 y 1 m/d. Depende del tipo de sólidos ya que arcillas o limos pueden presentar valores mucho más altos de sedimentación. Un primer valor aproximado, si se nota un efecto de sedimentación en la masa de agua, puede ser 0.2 m/d. Este dato se asigna en la ficha de la conducción, en la pestaña "Contaminantes de 1er Orden".

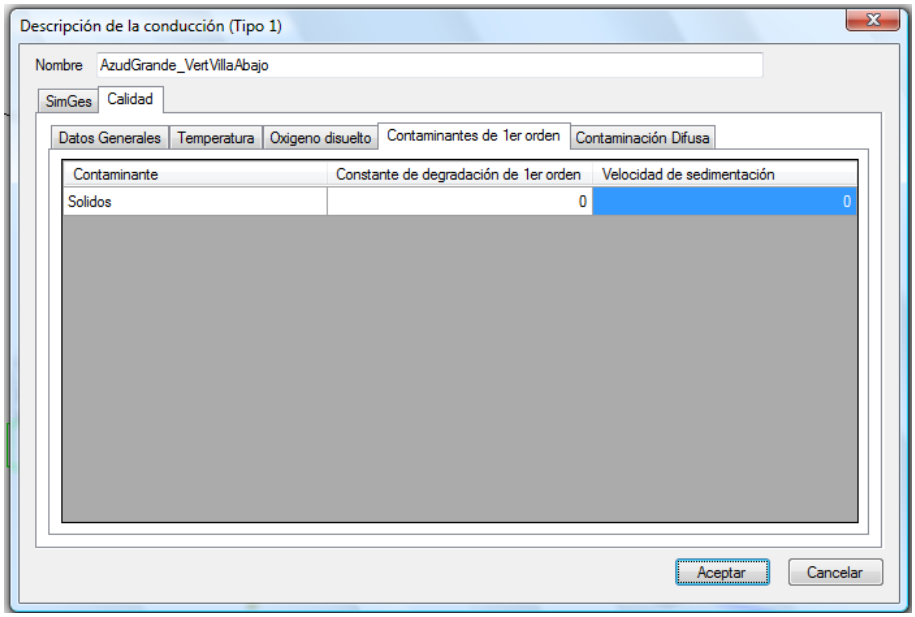


Figura 41. Definición de la velocidad de sedimentación en una conducción.

6.2.2. Materia orgánica y oxígeno disuelto

Para la DBO5 se dispone de la velocidad de sedimentación, V_{sd}, y la constante de degradación, K_d, de la materia orgánica. Los valores de la bibliografía para la velocidad de sedimentación se centran entre 0.01-0.36 m/d. Para la constante de degradación se encuentran valores entre 0.02 y 3.4 dias^{-1}.

En cuanto al oxígeno disuelto la constante de reaireación, K_a, con valores entre 0 y 100. Si damos un valor de "-1" el programa lo calcula internamente utilizando el método de Covar.

Los parámetros de la materia orgánica y el oxígeno disuelto se fijan en la pestaña "Oxígeno Disuelto" de la conducción correspondiente, Figura 42.

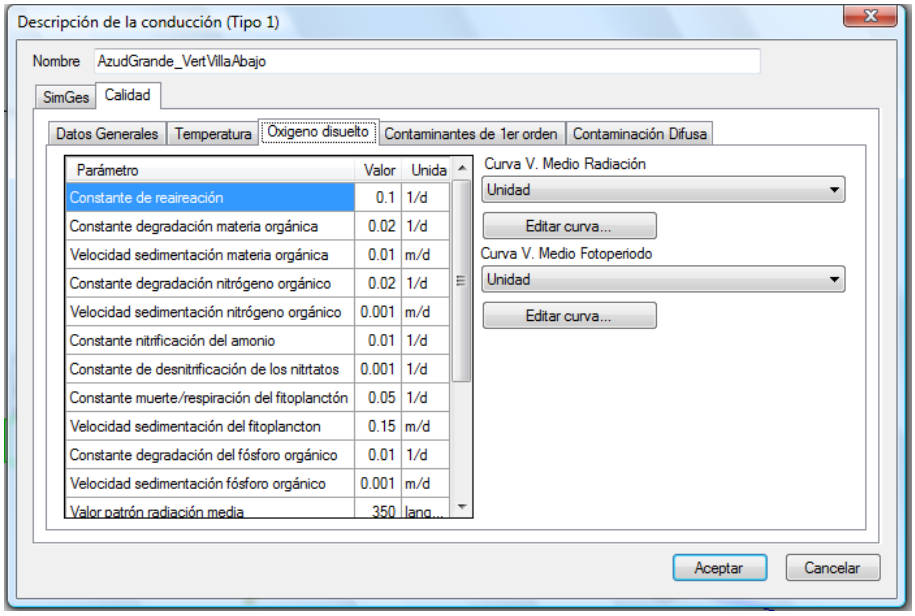


Figura 42. Definición de parámetros para simulación del oxígeno disuelto.

Zona aguas arriba del vertido.

Al comparar las concentraciones en el primer punto "ICA_AgAbAzud Grande" con la primera conducción "AzudGrande_VertidoUrbano" se puede ver que las concentraciones son iguales debido a que la estación

que se he escogido para caracterizar las aportaciones de cabecera precisamente la estación ICA con la que se está comparando.

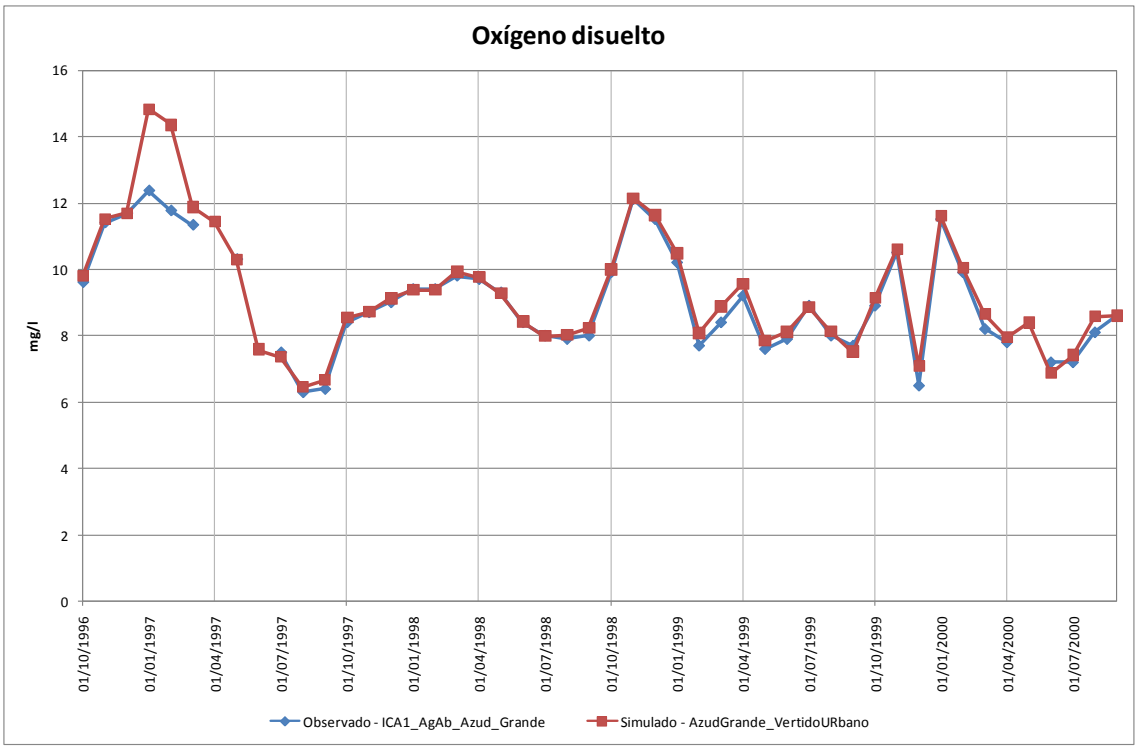
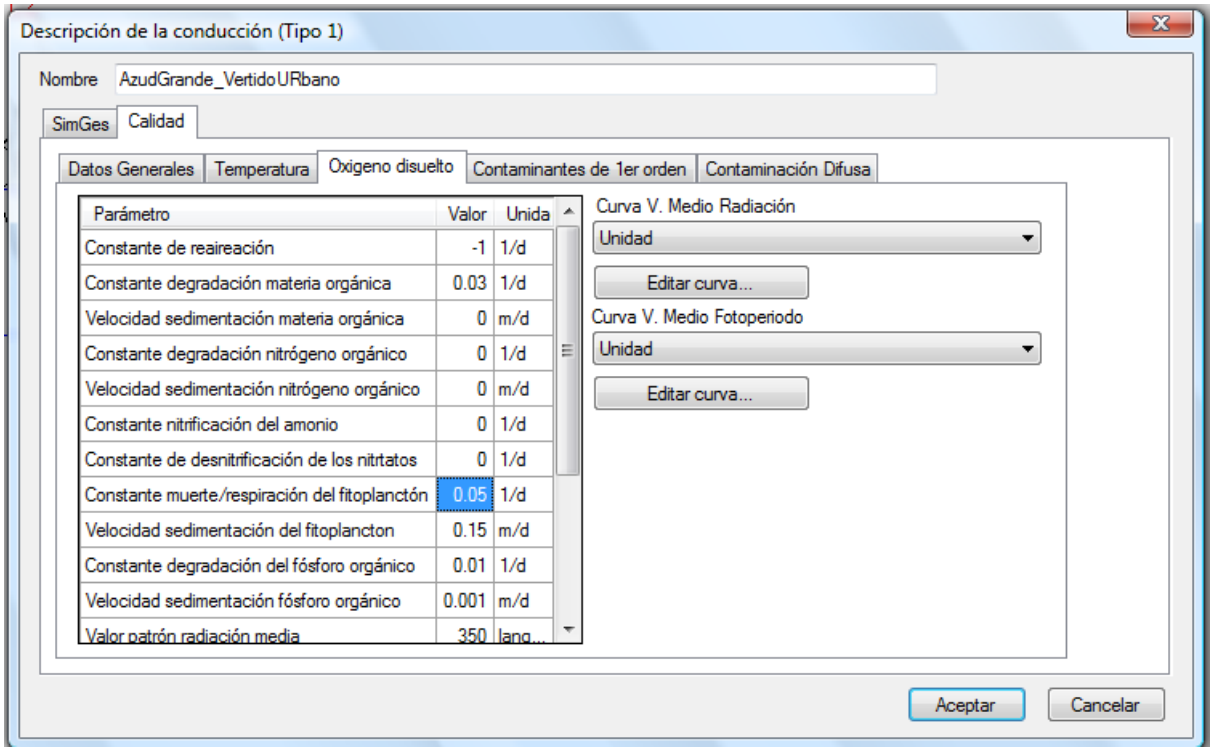


Figura 43. Comparativa de las concentraciones de oxígeno disuelto de entrada al modelo.

Debido a que no disponemos de una estación a final de este tramo de río no tenemos datos para poder calibrar las constantes en el mismo. Las concentraciones de entrada a nuestro modelo presentan un río algo afectado antrópicamente. Algunos meses presentan algo de materia orgánica y con cierta afección sobre el oxígeno disuelto. Para este caso se decide que la constante de reaireación sea calculada de forma automática por la aplicación. Por otro lado asumiremos un constante de degradación de materia orgánica muy baja del orden de 0.03 (d-1). Finalmente, en cuanto a los sólidos suspendidos se va a asumir que la velocidad de sedimentación en ese tramo es nula.

Estos parámetros no se van a calibrar debido a, como se ha comentado previamente, la imposibilidad de contrastar con datos reales a final del tramo.

Para incorporar estos parámetros se edita la ficha de la conducción y en la solapa de oxígeno disuelto se introduce un valor de “-1” para indicarle al programa que la constante de reaireación debe estimarla de forma automática por el método de Covar. También se modifica la constante de degradación de materia orgánica con el valor seleccionado.



Zona aguas abajo del vertido.

Aguas abajo de este punto se encuentra la zona más contaminada. Merece una mayor atención en cuanto a lo que a la calibración se refiere. Comparando las concentraciones de sólidos suspendidos entre la "ICA2-AgAbVertido" con el tramo de río "Vertido_ICaAgAbVert" obtenemos el siguiente gráfico.

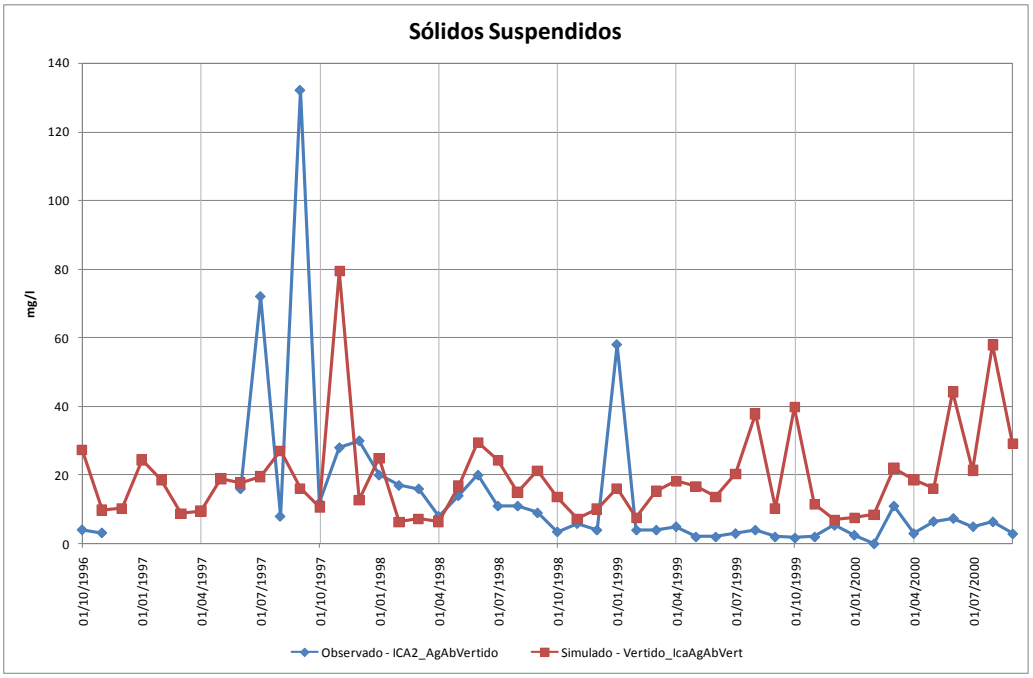


Figura 44. Comparativa de las concentraciones de sólidos suspendidos aguas abajo del vertido de Villa Abajo.

Si analizamos, sin haber calibrado ningún parámetro, la estación aguas abajo del vertido vemos que los sólidos suspendidos se estiman inferiores en algunas puntas que presentan los datos observados y superiores en la mayor parte de los meses. En este caso convendría "jugar" un poco con el parámetro de la velocidad de sedimentación para ver su efecto.

Después de realizar bastantes pruebas se puede obtener un ajusta bueno con una velocidad de sedimentación del orden de 0.3 m/d. La Figura 44 representa la comparativa con velocidad de sedimentación nula y la Figura 45 representa la calibración final.

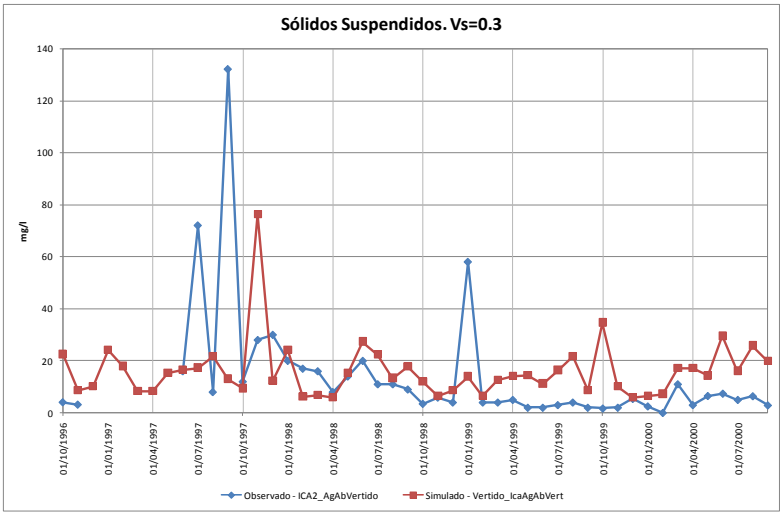


Figura 45. Comparativa de las concentraciones de sólidos suspendidos aguas abajo del vertido de Villa Abajo con una velocidad de sedimentación de 0.7 (m/d).

Analizando, en el mismo punto, la materia orgánica y el oxígeno disuelto se observan diferencias muy significativas. Se ha asumido que la constante de reaireación se estime por el método de Covar. Posteriormente se comprobarán los valores de reaireación que se están estimando. En la Figura 46 se compara en el punto aguas abajo del vertido antes y después de calibrar las constantes relacionadas con la DBO5 y el Oxígeno disuelto.

Como se puede ver el ajuste, una vez calibrado, mejora mucho. Sin embargo las concentraciones de oxígeno disuelto quedan un poco por encima de los valores reales.

Figura 46: Comparativa aguas abajo del vertido. Sin calibración y con ajuste de parámetros.

Seguidamente también se grafican los ajustes obtenidos en el punto final de la cuenca. Se ha asumido que los parámetros ajustados para el primer tramo se mantienen en el segundo. El ajuste es bueno para la DBO_5 aunque el oxígeno disuelto queda bastante por encima. Por otro lado, las velocidades de sedimentación se deberían disminuir porque, en general, inmediatamente aguas abajo del vertido es donde se produce una mayor sedimentación.

Llegados a este punto hay que mencionar que el programa tiene la posibilidad de utilizar una "calibración forzada". Esta calibración, en el caso de conducciones, consta de la posibilidad de que en una conducción definida los caudales y concentraciones de entrada se introduzcan por archivo en vez de ser obtenidos del nudo de origen. Este procedimiento tiene sentido en caso de que con el modelo no se consiga obtener unas condiciones de entrada a la conducción suficientemente razonables.

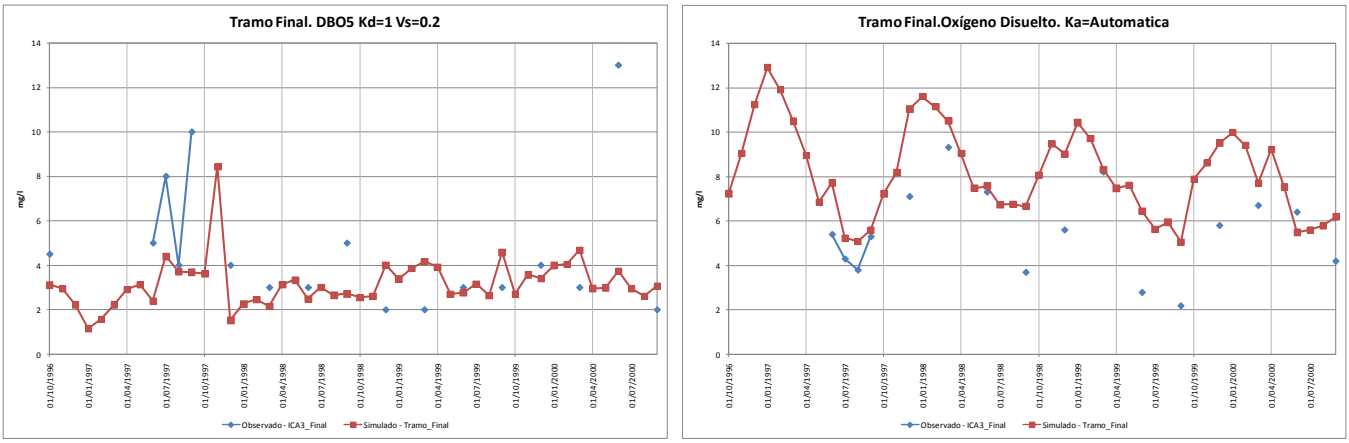


Figura 47: Comparativa en el punto final. Parámetros similares a los propuestos en el tramo de aguas arriba.

7. Simulación del ciclo de nitrógeno.

Una forma de dar mayor robustez al modelo es incluir el ciclo del nitrógeno. Los vertidos urbanos suelen incorporar nitrógeno orgánico, amonio y nitratos al medio natural. La nitrificación de amonio a nitratos consume oxígeno disuelto por lo que es interesante su consideración.

7.1. Formulación del modelo.

En la siguiente figura se muestran los procesos y constituyentes que se incluyen en la segunda opción de modelación del oxígeno disuelto, MOC y ciclo del nitrógeno.

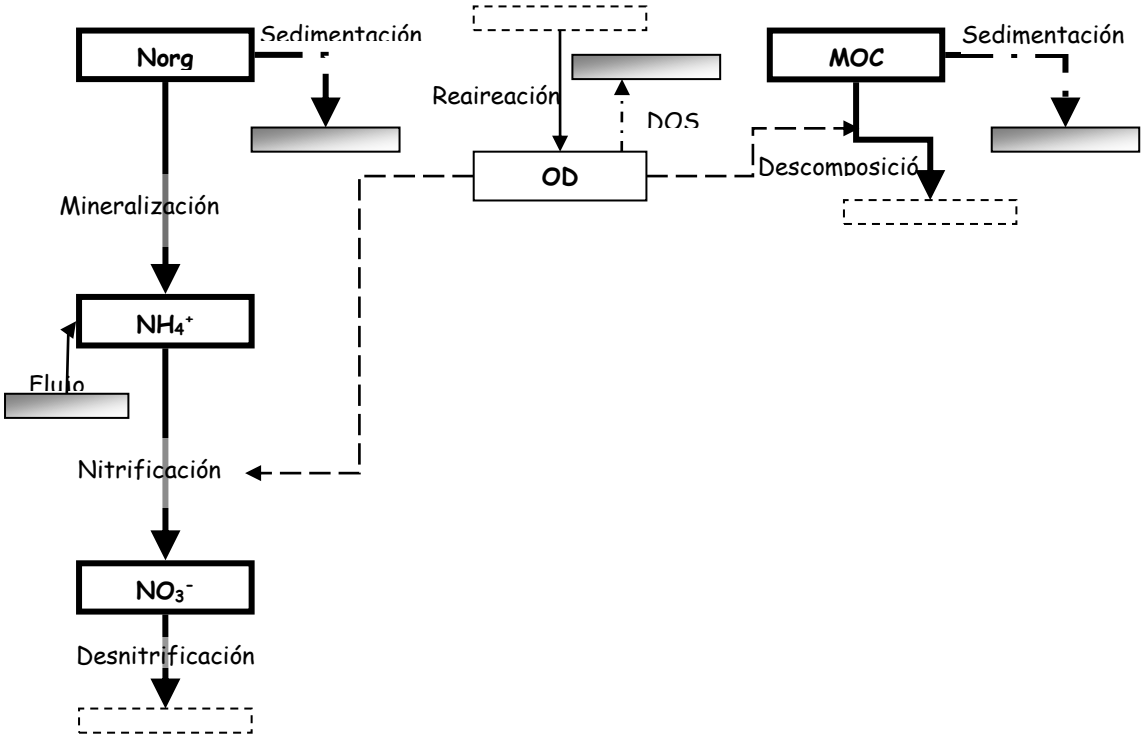


Figura 48. Procesos considerados en la modelación del oxígeno disuelto junto con el ciclo del nitrógeno

Para el nitrógeno orgánico se consideran los procesos de mineralización y sedimentación:

$$\sum W_i = -K_{Noa}\theta_{noa}^{T-20}N_o - \frac{VS_{No}}{h}N_o \qquad (1)$$

Donde: K_{noa} representa la constante de mineralización (día^{-1}); θ_{noa} representa el coeficiente de corrección de la constante anterior por temperatura; N_o es la concentración de nitrógeno orgánico (MT^{-1}); VS_{NO} velocidad de sedimentación del nitrógeno orgánico (mdía^{-1});

Los procesos considerados sobre el amonio han sido el incremento de concentración por la amonificación del nitrógeno orgánico y la disminución de la misma por la nitrificación. La nitrificación se ha considerado en su totalidad incluyendo el paso de amonio a nitritos y de estos a nitratos.

$$\sum \mathrm{W_i} = +K_{Noa}\theta_{Knoa}^{T-20}N_o - \left(K_{Nai}\theta_{nai}^{T-20}\frac{O}{O+K_{n1/2}}\right)N_a \qquad (2)$$

Donde: N_a representa la concentración de amonio (NH_4^+) en el río (mgl^{-1}); K_{Nai} es la constante de nitrificación de paso a nitritos (día^{-1}) θ_{nai} es la corrección por temperatura de la constante de nitrificación; $K_{n1/2}$ es la constante de semisaturación del nitrógeno (mgl^{-1}); O es la concentración de oxígeno disuelto

Los nitratos y nitritos se modelan de forma conjunta debido a la rapidez con que los primeros se oxidan a la forma más reducida. En el proceso de modelación de los nitratos se tiene en cuenta el efecto del incremento de concentración por la transformación de amonio y la disminución de los mismos por posibles procesos de desnitrificación. Esta desnitrificación sólo se produce en condiciones anaeróbicas.

$$\sum W_i = \left(K_{Nai}\theta_{nai}^{T-20} \frac{O}{O+K_{nai1/2}} \right) N_a - \left(K_{no3}\theta_{no3}^{T-20} \frac{O+K_{no31/2}}{O} \right) N_{o3} \quad (6)$$

Donde: N_{o3} es la concentración de nitratos (mgl^{-1} –N); K_{no3} representa la constante de desnitrificación ($día^{-1}$); θ_{no3} es el factor de corrección de temperatura para la constante anterior;

7.2. Ampliación del modelo.

Para aumentar el modelo creado incorporando el ciclo del nitrógeno en primer lugar se accede a los parámetros del modelo de calidad a partir del menú Modelos/Parámetros Modelo Calidad

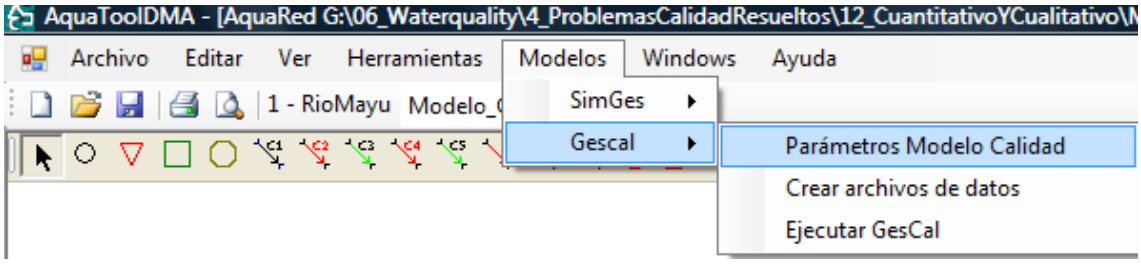


Figura 49. Acceso a los parámetros del modelo de calidad.

Una vez se accede a la pantalla de las opciones se marca la opción "¿Modela Nitrógeno?

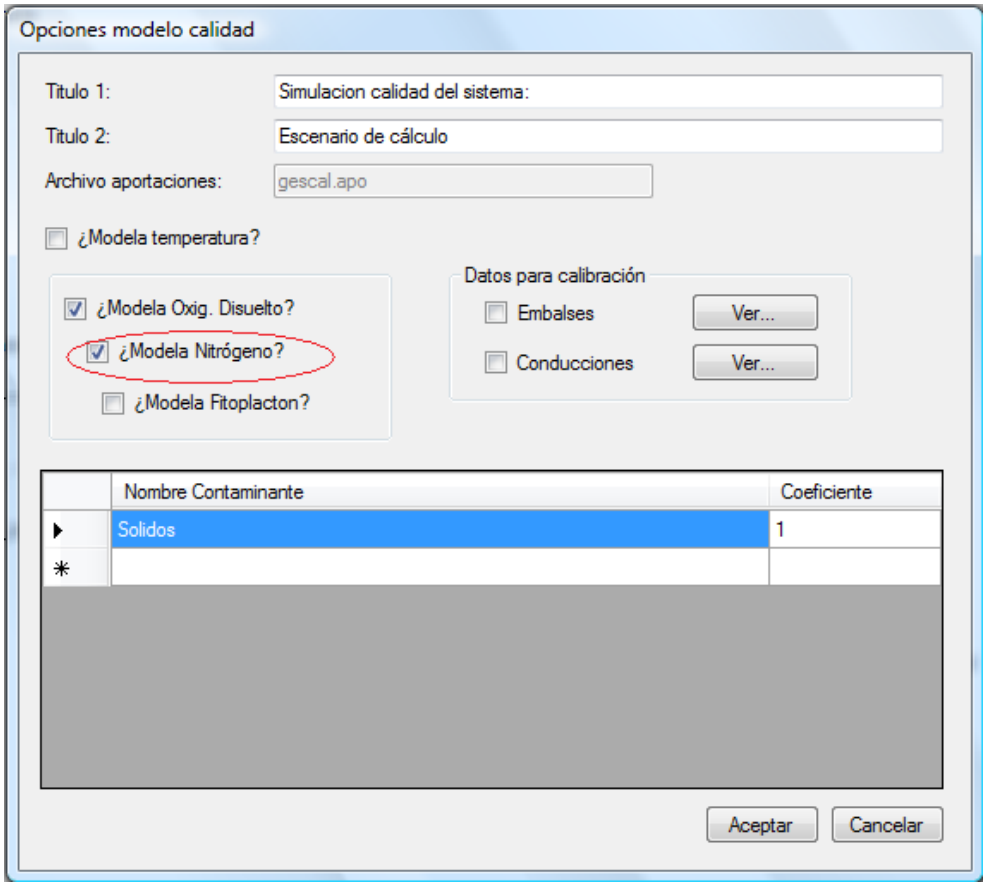


Figura 50. Activación de la modelación del ciclo del nitrógeno en el modelo.

Una vez realizado esto se deben incorporar los datos de aportaciones, condiciones iniciales de embalse y las concentraciones en retornos. La modelación del ciclo del nitrógeno supone incluir datos para el nitrógeno orgánico, al amonio y los nitratos. En general la mayor parte de las estaciones de calidad miden amonio y nitratos. El nitrógeno orgánico no suele medirse aunque es fácil hacer una hipótesis debido a que en aguas poco contaminadas suelen medirse valores realmente bajos. La parte de nitrógeno orgánico de un vertido puede obtenerse si se dispone de medición de amonio y nitrógeno Kjeldahl (TKN).

7.3. Calibración

Una vez introducidos los datos se hace una primera simulación para comprobar su funcionamiento y visualizar los primeros resultados. Seguidamente se procede a la calibración de las constantes del ciclo del nitrógeno.

Para el ajuste de las concentraciones de nitrógeno orgánico se dispone de la velocidad de sedimentación, V_{sNorg}, y la constante de mineralizacióno de paso amonio, K_{Norg}. Para la velocidad de sedimentación el rango bibliógrafo marca valores entre 0.001 y 0.1 (m/d). En cuanto a la constante de degradación el rango usual se enmarca entre 0.02 y 0.4 (1/d).

El proceso de nitrificación del amonio se rige mediante una única constante, K_{nitr}, con valores entre 0.1 y 1 (1/d).

Para realizar una calibración coherente se debe tener en mente el ciclo del nitrógeno y como la degradación del nitrógeno orgánico aumenta las concentraciones de amonio. La degradación de este produce un consumo de oxígeno disuelto y un aumento de concentraciones de nitratos.

También es importante tener en cuenta que las unidades que se manejan son mg/l de amonio y nitratos y no de mg/l de nitrógeno como sucede en otros programas de modelación de la calidad del agua. Para cambiar esta configuración se anima al usuario a leer el manual de modelo GESCAL y la descripción del archivo de coeficientes.

Para el primer tramo de río las constantes a introducir son bajas ya que, como se ha explicado previamente, la calidad del agua presenta un estado no altamente alterado.

Para la parte aguas abajo del vertido, tras realizar múltiples iteraciones cambiando los parámetros descritos, se puede obtener un buen ajuste con una constante de mineralización del nitrógeno orgánico de 0.05; una velocidad de sedimentación de 0.075 y una constante de nitrificación de 0.5.

Hay que comprobar las concentraciones de DBO5 y oxígeno disuelto ya que podrían haberse desajustado. Si esto pasa se podrían realizar nuevas iteraciones afinado otra vez los parámetros.

En las siguientes figuras se muestra el ajuste obtenido en el punto aguas abajo del vertido y en el punto final.

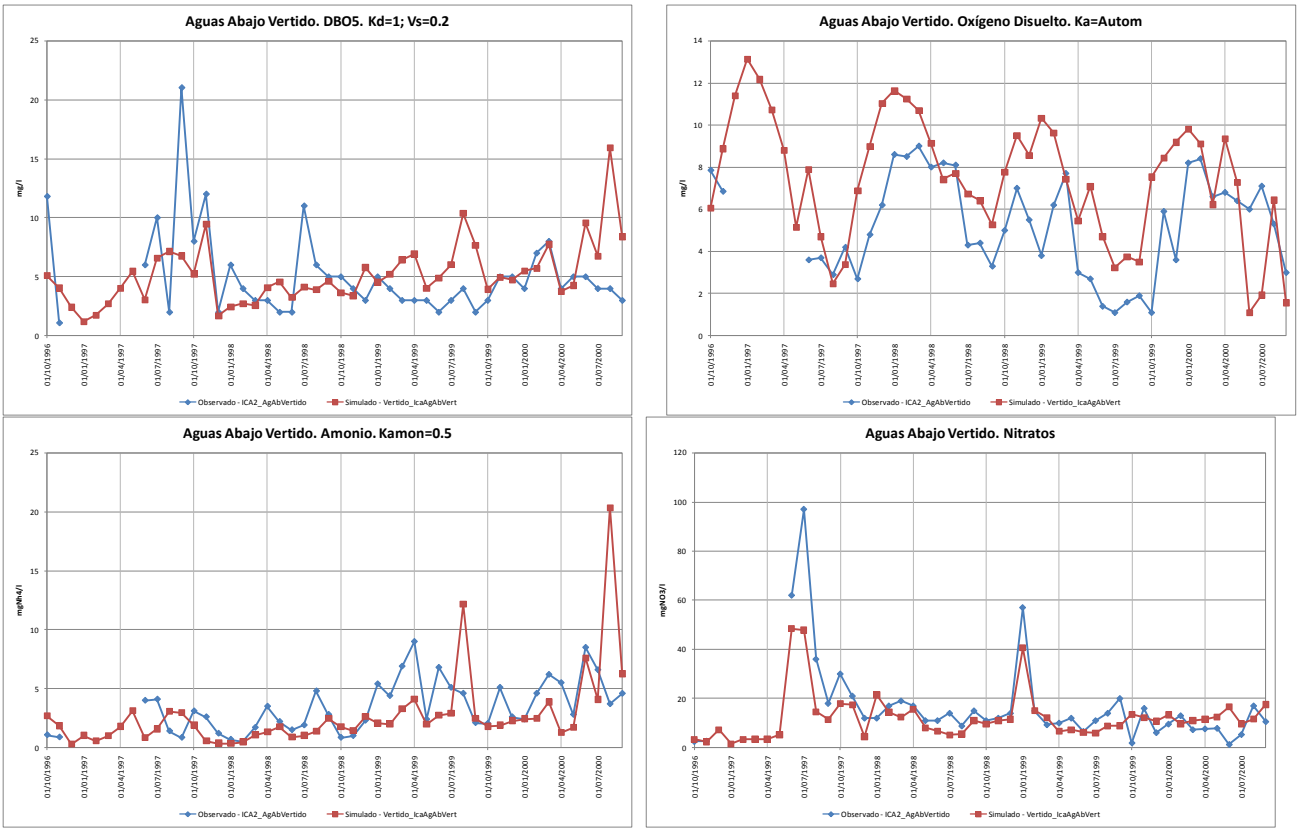


Figura 51: Calibración SS+DBO5+OD+Norg+NH4+NO3. En el tramo desde el vertido a la ICA aguas abajo.

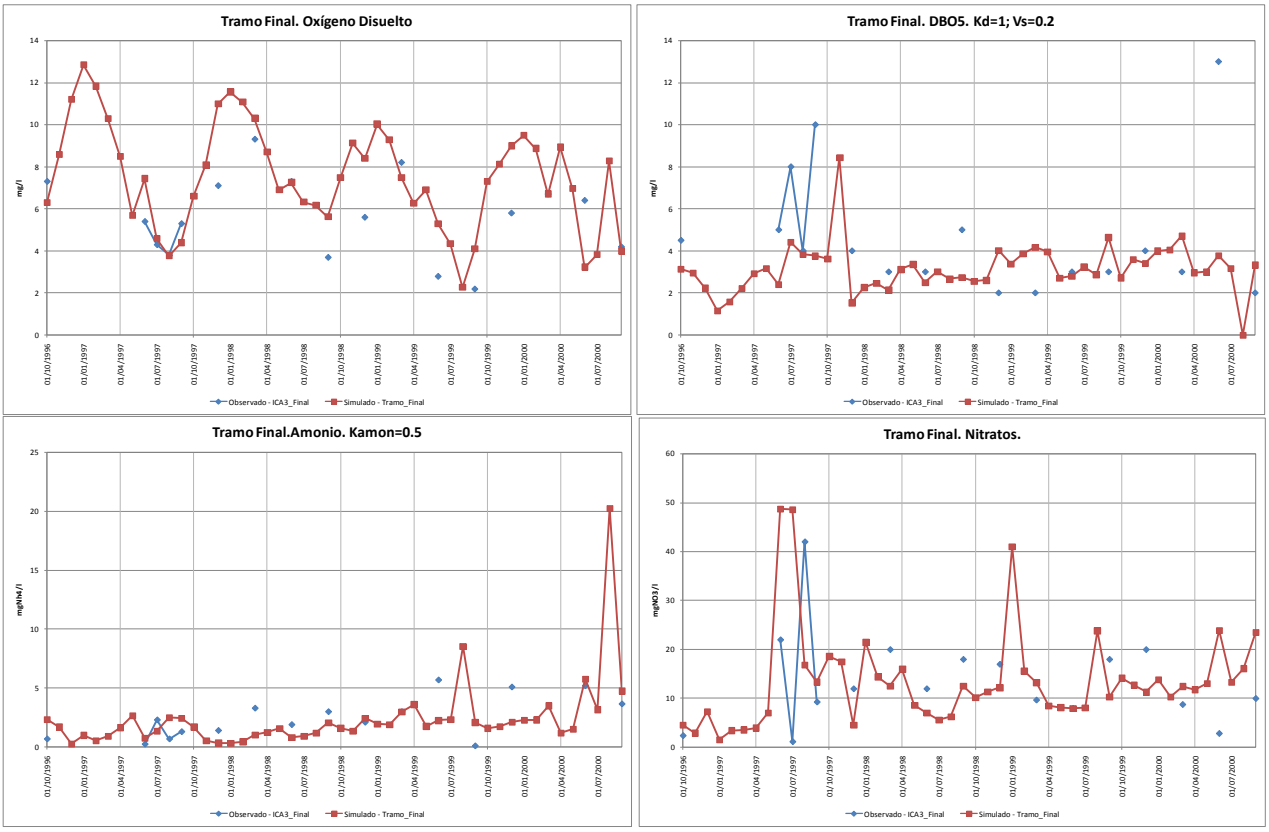


Figura 52: Calibración. SS+DBO5+OD+Norg+NH4+NO3. En el tramo final.

8. Análisis de los datos parciales.

Los resultados que se han visto hasta el momento se corresponden con la concentración al final de la conducción. El modelo estima la concentración de cada conducción en cada tramo de río para cada diferencial de cálculo y para cada mes simulado. Por motivos de memoria sólo produce como resultado la del último punto. Si se quieren ver y analizar estas concentraciones parciales se puede acceder exigiendo que se creen los resultados parciales.

En los tramos de río más contaminados puede ser interesante estudiar la evolución de la calidad dentro de la masa de agua. Para ello basta con acceder a la ficha de la conducción o conducciones deseadas y seleccionar la opción “Resultados parciales”.

Nota: de las conducciones que no se modelan no se pueden obtener resultados parciales.

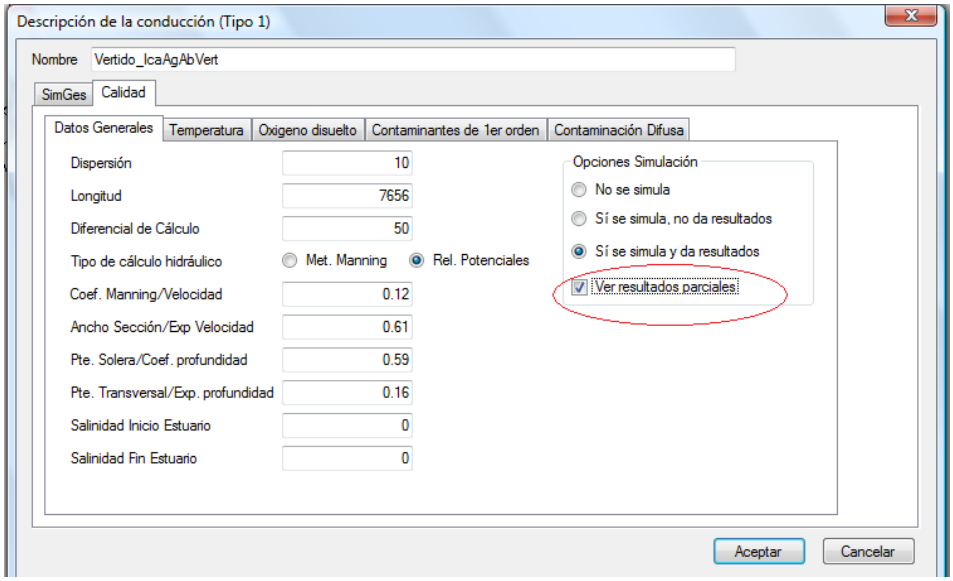


Figura 53: Salida de resultados detallados en conducciones.

El archivo que contiene los resultados parciales se denomina “Conducc.csv” y se puede abrir directamente en una hoja de cálculo. La descripción del archivo de resultados parciales se encuentra en el manual de GESCAL.

Aparte de las concentraciones en cada diferencial de cálculo el archivo presenta una serie de variables que pueden ser de interés como son la velocidad, profundidad, la constante de reaireación o la concentración de saturación del oxígeno disuelto.

Para nuestro caso sería interesante conocer la evolución de los diferentes constituyentes a lo largo del tramo río aguas abajo del vertido de Villa Abajo. Para ello se debe de requerir la obtención de resultados parciales en las dos últimas conducciones del modelo.

Una vez realizada la simulación podemos acceder a los resultados editando el archivo “Conduc.csv” con una hoja de cálculo.

En primer lugar se puede ver que la constante de reaireación determinada por el método de Covar se mueve entre 2.32 y 4.33 (1/d). Esto supone una reaireación medianamente alta para un tramo de río aunque bastante factible.

El momento más crítico, en cuanto a concentraciones de oxígeno disuelto se refiere, es el mes de agosto de 1999. Analizando el perfil longitudinal de oxígeno disuelto y materia orgánica se puede ver un descenso muy acusado de concentración de oxígeno disuelto en los primeros cientos de metros del río. Incluso hace que el río se quede anóxico.

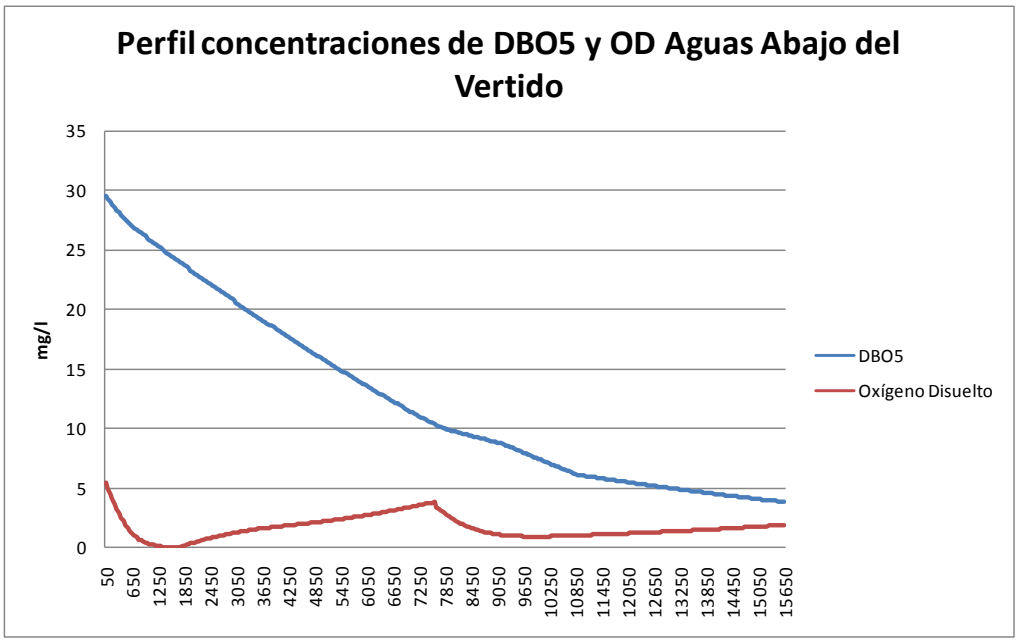


Figura 54. Concentraciones de DBO_5 y Oxígeno disuelto a lo largo del tramo aguas abajo del vertido.

Es importante darse cuenta de que la concentración mínima no se da a final del tramo final sino en medio del mismo. Analizando los resultados parciales se puede obtener la concentración mínima en el punto más crítico de todo el río.

Analizando los perfiles de nitrógeno se puede ver cómo el amonio mantiene una primera etapa donde las concentrajciones son bastante constantes o incluso crecientes. Esto se debe a que en la zona de oxígeno disuelto bajo no se produce la nitrificación. Posteriormente conforme el río va adquiriendo oxígeno se va produciendo esa nitrificación y en consecuencia una disminución de concentraciones de amonio y un aumento de la de los nitratos.

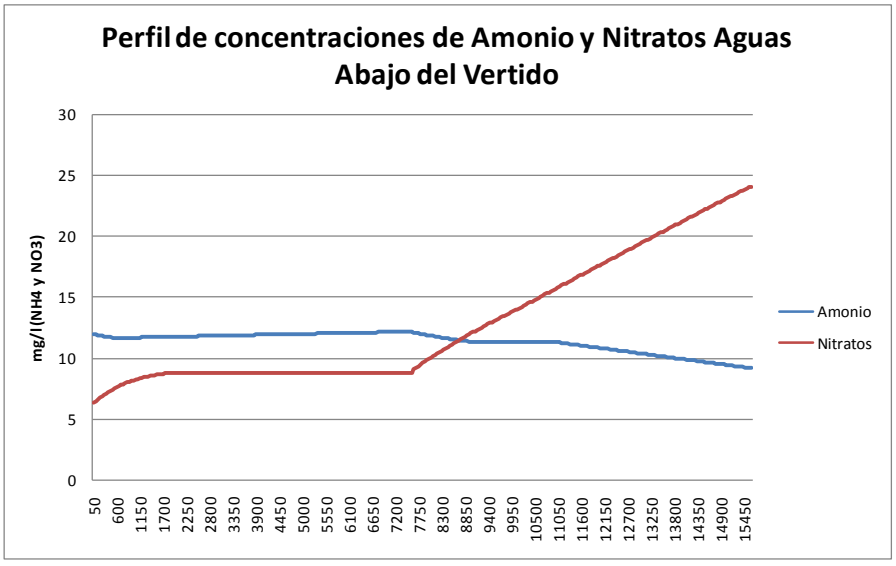


Figura 55. Concentraciones de Amonio y Nitratos a lo largo del tramo de río aguas abajo del vertido de Villa Abajo.

9. Simulación de alternativas.

Una vez se tiene el modelo calibrado se dispone de una herramienta para evaluar alternativas y escenarios y sus efectos tanto en la parte cuantitativa como la cualitativa. Una de las primeras soluciones que se pueden proponer es la depuración del vertido de Villa Abajo.

En primer lugar se asume que se mejora el tratamiento secundario y se consigue reducir la materia orgánica a una concentración de salida de 20 mg/l. Frente a este escenario se deberá estimar la constante de degradación de la materia orgánica ya que, lógicamente, tendrá una degradación mucho más difícil y lenta que la actual. Además la sedimentación se reducirá enormemente. Con un buen tratamiento la constante de degradación podría valer entre 0.2 y 0.05 (1/d). Para la velocidad de sedimentación se puede asumir que es nula. En este caso vamos a asumir una constante de degradación de 0.3 (1/d) ya que nos dejará del lado de la seguridad (para el oxígeno, ya que si la preocupación fuera las concentraciones de DBO_5 nos dejaría del lado de la inseguridad).

Previamente a simular debemos cambiar el archivo de aportaciones de calidad y fijar una concentración de 20mg/l en la DBO5. Además debemos modificar los parámetros de K_d y V_{sd}.

Una vez realizado esto simularemos de nuevo el modelo GESCAL. Analizando el perfil del modelo calibrado, denominado actual, frente a la opción depurada.

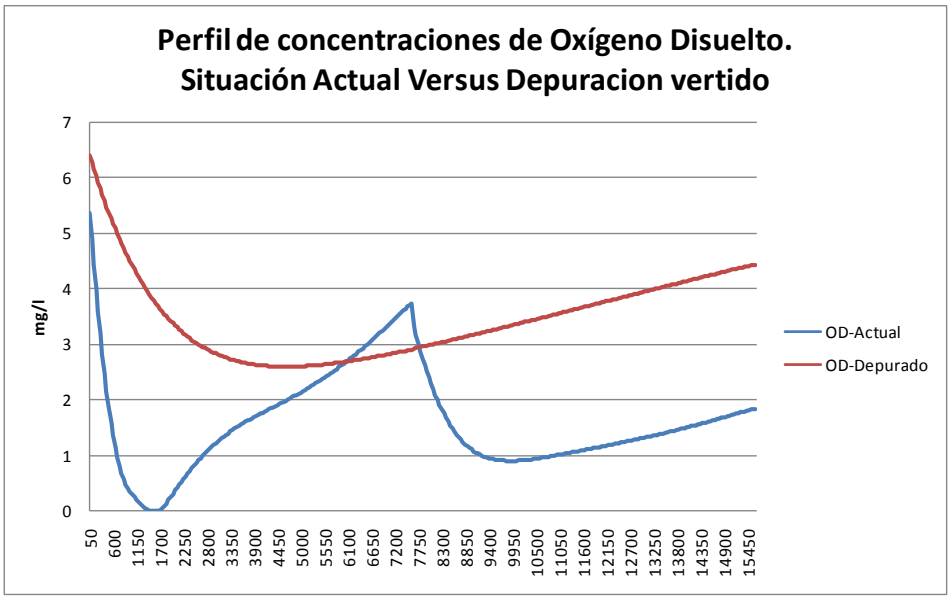


Figura 56: Corrección del oxígeno disuelto mediante depuración.

Como se puede ver las concentraciones mejorarían aunqe se darían concentraciones de oxígeno inferiores a 3 mg/l que son pelirosas para la vida acuática. La normativa sobre calidad de agua piscícola establece un mínimo de 4mg/l para soportar la vida acuática. Se podría hacer un análisis de sensibilidad sobre la constante y la concentración de salida de DBO_5 de la depuradora para ver la robustez de esta simulación.

Otro aspecto que nos puede preocupar medioambientalmente son las concentraciones de amonio ya que en función del pH y de la temperatura del agua puede ser altamente tóxico para los peces. Una reducción del amonio a 2 $mgNH_4/l$ es factible con algún tratamiento que funcione bien. En este caso la constante de nitrificación podría verse altamente modificada. Una proyección adecuada serían valores entre 0.1 y 0.05. La simulación es directa cambiando las concentraciones en el archivo de aportaciones y las constantes de nitrificación de las dos últimas conducciones.

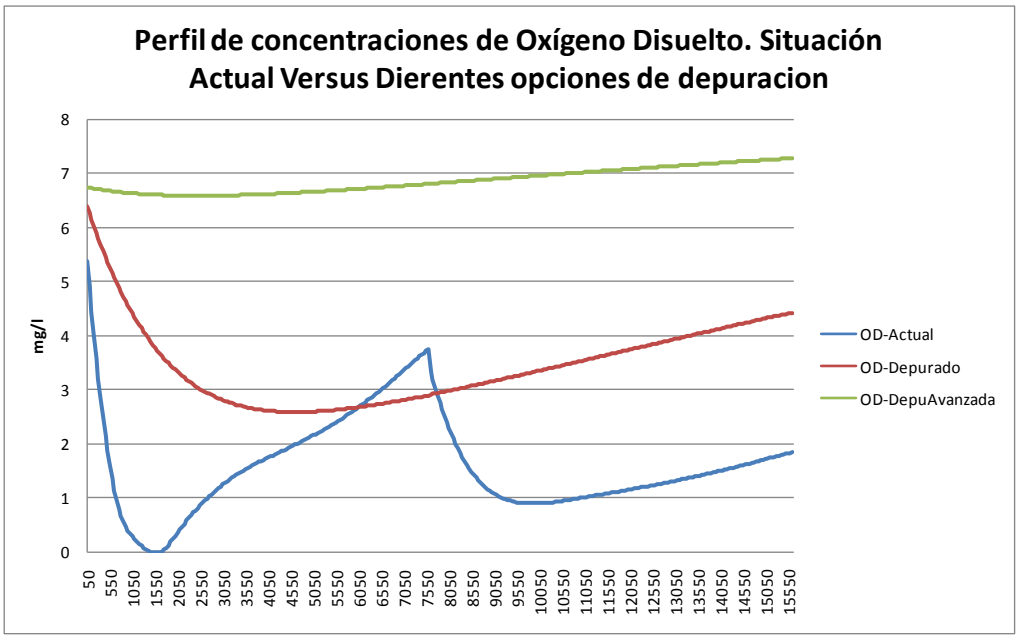


Figura 57. Perfil de concentraciones de oxígeno disuelto para diferentes opciones de simulación.

ANEJO I.1. DATOS DE CAUDALES Y CONCENTRACIONES.

		Caudal (Hm3/mes)		Sólidos Suspendidos (mg/l)		Materia orgánica (mg/l)		Oxígeno disuelto (mg/l)		Nitrógeno orgánico (mgN/l)		Amonio (mgNH4/l)		Nitratos (mgNO3/l)	
Año	Mes	Río	Vertido	Río	Vertido	Río	Vertido	Río	Vertido	Río	Vertido	Río	Vertido	Río	Vertido
1996	10	7.93	0.735	22.14	65	1	60.4	9.76	4	0.01	20	0.04	25	0.76	10
1996	11	9	0.735	5.37	65	1	60.4	11.59	4	0.01	20	0.08	25	1.27	10
1996	12	69.6	0.735	9.84	65	2.01	60.4	11.71	4	0.01	20	0.03	25	7.21	10
1997	1	172.8	0.735	24.29	65	1	60.4	14.86	4	0.01	20	0.92	25	1.47	10
1997	2	46.95	0.735	17.91	65	1	60.4	14.45	4	0.01	20	0.17	25	3.24	10
1997	3	22.34	0.735	6.68	65	1	60.4	11.89	4	0.01	20	0.08	25	2.99	10
1997	4	14.1	0.735	5.05	65	1	60.4	11.5	4	0.01	20	0.04	25	2.37	10
1997	5	14.93	0.735	11.65	65	1	60.4	10.38	4	0.01	20	0.2	25	2.26	10
1997	6	36.38	0.735	16.17	65	2	60.4	7.49	4	0.01	20	0.09	25	49.42	10
1997	7	31.51	0.735	16.25	65	6.09	60.4	7.49	4	0.01	20	0.09	25	49.62	10
1997	8	24.25	0.735	20.56	65	5.14	60.4	6.29	4	0.01	20	0.12	25	12.19	10
1997	9	13.22	0.735	8.18	65	4.09	60.4	6.39	4	0.01	20	0.02	25	9.03	10
1997	10	11.23	0.735	6.21	65	3.05	60.4	8.45	4	0.01	20	0.15	25	17.69	10
1997	11	46.8	0.735	79.49	65	9.8	60.4	8.78	4	0.01	20	0.2	25	17.47	10
1997	12	50	0.735	11.93	65	1	60.4	9.03	4	0.01	20	0.01	25	4.43	10
1998	1	66.5	0.735	24.43	65	2	60.4	9.29	4	0.01	20	0.06	25	21.57	10
1998	2	49.35	0.735	5.54	65	2.13	60.4	9.29	4	0.01	20	0.11	25	14.4	10
1998	3	24.04	0.735	5.19	65	1	60.4	9.8	4	0.01	20	0.24	25	12.32	10
1998	4	17.5	0.735	3.12	65	2	60.4	9.69	4	0.01	20	0.02	25	15.67	10
1998	5	23.03	0.735	14.1	65	3	60.4	9.3	4	0.01	20	0.56	25	7.22	10
1998	6	33.08	0.735	28.18	65	2.04	60.4	8.4	4	0.01	20	0.04	25	6.3	10
1998	7	37.31	0.735	22.41	65	3.03	60.4	8.01	4	0.01	20	0.02	25	4.46	10
1998	8	31.15	0.735	11.7	65	2.04	60.4	7.96	4	0.01	20	0.02	25	4.48	10
1998	9	14.52	0.735	15.68	65	0.92	60.4	8.05	4	0.01	20	0.06	25	9.3	10
1998	10	11.93	0.735	9.55	65	0.78	60.4	9.98	4	0.01	20	0.14	25	8.77	10
1998	11	12.3	0.735	3.76	65	1	60.4	12.27	4	0.01	20	0.11	25	10.69	10
1998	12	6.2	0.735	3.72	65	2	60.4	11.71	4	0.01	20	0.17	25	10.89	10
1999	1	8	0.735	11.6	65	1	60.4	10.25	4	0.01	20	0.05	25	42.98	10
1999	2	8.85	0.735	2.46	65	2.18	60.4	7.66	4	0.01	20	0.07	25	15.14	10
1999	3	8.44	0.735	7.77	65	2	60.4	8.45	4	0.01	20	0.26	25	11.18	10
1999	4	8.3	0.735	7.9	65	1	60.4	9.26	4	0.01	20	0.02	25	3.43	10
1999	5	18.53	0.735	12.34	65	1	60.4	7.56	4	0.01	20	0.16	25	6.1	10
1999	6	19.18	0.735	6.37	65	1	60.4	7.89	4	0.01	20	0.16	25	3.29	10
1999	7	26.01	0.735	13.09	65	2.91	60.4	9.1	4	0.01	20	0.03	25	2.31	10
1999	8	20.75	0.735	12.89	65	3.11	60.4	8.12	4	0.01	20	0.07	25	2.34	10

1999	9	14.62	0.735	3.42	65	6.72	60.4	7.67	4	0.01	20	0.1	25	6.95	10
1999	10	11.23	0.735	37.59	65	1	60.4	9.01	4	0.01	20	0.02	25	12.97	10
1999	11	8.6	0.735	6.99	65	2.2	60.4	10.64	4	0.01	20	0.05	25	11.78	10
1999	12	7.2	0.735	1	65	1	60.4	6.5	4	0.01	20	0.1	25	10.19	10
2000	1	7	0.735	1.54	65	1.88	60.4	11.54	4	0.01	20	0.2	25	13.11	10
2000	2	7.05	0.735	2.18	65	2	60.4	9.82	4	0.01	20	0.08	25	8.99	10
2000	3	7.34	0.735	13.44	65	3	60.4	8.16	4	0.01	20	0.1	25	9.39	10
2000	4	20.2	0.735	16.46	65	2	60.4	7.72	4	0.01	20	0.19	25	11.32	10
2000	5	20.33	0.735	12.58	65	2	60.4	8.26	4	0.01	20	0.15	25	11.89	10
2000	6	15.58	0.735	34.67	65	7.87	60.4	7.11	4	0.01	20	0.26	25	10.01	10
2000	7	24.41	0.735	10.36	65	2	60.4	7.11	4	0.01	20	0.11	25	4.39	10
2000	8	20.15	0.735	31.59	65	2	60.4	8.07	4	0.01	20	0.29	25	5.04	10
2000	9	10.42	0.735	13.81	65	2	60.4	8.52	4	0.01	20	0.03	25	11.71	10

	Caudal		Temperatura			Solidos			DBO5		
Fecha	EA AgAb Azud Grande	EA_Final	ICA1 AgAb Azud Grande	ICA2 AgAb Vertido	ICA3 Final	ICA1 AgAb Azud Grande	ICA2 AgAb Vertido	ICA3 Final	ICA1 AgAb Azud Grande	ICA2 AgAb Vertido	ICA3 Final
oct-96	5.4		13.4	14	15	20.7	4.1	12.4	1	11.8	4.5
nov-96	9		11	8.1		5.3	3.2		1	1.1	
dic-96	69.6	66.2	9			9.8			2		
ene-97	172.8	186.2	6			17			1		
feb-97	46.4	54	8			12.2			1		
mar-97	18.7	27.2	10			6.3			1		
abr-97	9.1	19.1	12			5			1		
may-97	4.6	16.6	15			11.4			1		
jun-97	22.4	19.3		18.9	18.9		16	14		6	5
jul-97	10	14.7	16.7	18.7	18.2	16	72	20	6	10	8
ago-97	6.3	16.5	18.6	20.4	20.4	20	8	12	5	2	4
sep-97	4.5	15.2	18.1	18.4	18.6	8	132	16	4	21	10
oct-97	8.7	18	17.7	18.5		6	12		3	8	
nov-97	46.8	57.3	12.3	13.4		64	28		9	12	
dic-97		126	9	9.4	9.4	10	30	50	1	2	4
ene-98	66.5	66	7.3	7.5		25	20		2	6	
feb-98	48.8	55.1	9.5	10.2		5	17		2	4	
mar-98	20.4	32.2	12.4	13	12	5	16	13	1	3	3
abr-98	12.5	26.1	11.9	12.3		3	8		2	3	
may-98	12.7	26.7	14	15.5		14	14		3	2	
jun-98	19.1	25.1	16.6	18.6	18.4	28	20	107	2	2	3
jul-98	15.8	21.5	14.1	19.4		22	11		3	11	
ago-98	13.2	20.2	16	20.3		12	11		2	6	
sep-98	5.8	18.6	16.5	18.1	18.2	15	9	5	1	5	5
oct-98	9.4	19.7	12.6	13.3		8.9	3.5		1	5	
nov-98	12.3	19.1	5.4	6.8		3.6	5.9		1	4	
dic-98	6.2	18.2	5.2	5.8	5.4	3.2	4	2	2	3	2
ene-99	8	19.3	7.4	6.8		10	58		1	5	

feb-99	8.3	16.9	6.7	6.9		3	4		2	4		
mar-99	4.8	17.2	12	12.5	12.8	8	4	3	2	3	2	
abr-99	3.3	16.6	10.2	12.5		9	5		1	3		
may-99	8.2	25.3	18.6	18.4		12	2		1	3		
jun-99	5.2	19.1	17.9	19.2	19.9	7	2	4	1	2	3	
jul-99	4.5	14.7	14	21.1		13	3		3	3		
ago-99	2.8	12.8	18.3	20.3			4			4		
sep-99	5.9	14.7	19	20	20.3	5	2	96	6	2	3	
oct-99	8.7	18.2	12.1	13.7		35	1.7		1	3		
nov-99	8.6	19	7.8	8.8		6	2		2	5		
dic-99	7.2	17.5	4.8	5.9	5.7	1	5.4	8	1	5	4	
ene-00	7	16.4	2.5	3.7		2	2.5		2	4		
feb-00	6.5	13.6	9.1	8.6		2.9			2	7		
mar-00	3.7	12.8	11.4	12	11.6	12	11	4.8	3	8	3	
abr-00	15.2	23.6	10.6	11.5		12.3	3		2	4		
may-00	10	26.2		17.4			6.5			5		
jun-00	1.6	14.6	19.5	21.4	21.2	30	7.4	5.9	6	5	13	
jul-00	2.9	12.9	15.9	19.9		9.6	5		2	4		
ago-00	2.2	13.1	16.4	19.1		30.8	6.4		2	4		
sep-00	1.7	11.2	15	17.1	17.3	14	2.9	14.4	2	3	2	

	Oxígeno Disuelto			Amonio			Nitratos		
Fecha	**ICA1 AgAb Azud Grande**	**ICA2 AgAb Vertido**	**ICA3 Final**	**ICA1 AgAb Azud Grande**	**ICA2 AgAb Vertido**	**ICA3 Final**	**ICA1 AgAb Azud Grande**	**ICA2 AgAb Vertido**	**ICA3 Final**
oct-96	9.61	7.85	7.3	0.04	1.07	0.68	2.29	2.48	2.44
nov-96	11.4	6.85		0.08	0.88		2.24	2.67	
dic-96	11.68			0.03			7.3		
ene-97	12.36			0.6			1.3		
feb-97	11.76			0.11			2.32		
mar-97	11.33			0.07			2.71		
abr-97				0.04			2.31		
may-97	10.3			0.19			2.22		
jun-97		3.6	5.4		4	0.24		62	22
jul-97	7.5	3.7	4.3	0.09	4.1	2.3	49	97	1.2
ago-97	6.3	2.9	3.8	0.12	1.4	0.68	12	36	42
sep-97	6.4	4.2	5.3	0.02	0.85	1.3	8.8	18	9.3
oct-97	8.4	2.7		0.14	3.1		17	30	
nov-97	8.7	4.8		0.17	2.6		14	21	
dic-97	9	6.2	7.1	0.02	1.2	1.4	4.9	12	12
ene-98	9.4	8.6		0.06	0.69		19	12	
feb-98	9.4	8.5		0.1	0.51		14	17	
mar-98	9.8	9	9.3	0.23	1.7	3.3	12	19	20
abr-98	9.7	8		0.02	3.5		15	17	
may-98	9.3	8.2		0.54	2.2		7.1	11	

jun-98	8.4	8.1	7.3	0.04	1.5	1.9	6.2	11	12
jul-98	8	4.3		0.02	1.9		4.4	14	
ago-98	7.9	4.4		0.02	4.8		4.4	8.8	
sep-98	8	3.3	3.7	0.06	2.8	3	8.8	15	18
oct-98	9.9	5		0.13	0.85		8	11	
nov-98	12.1	7		0.1	1		10	12	
dic-98	11.5	5.5	5.6	0.14	2.3	2.1	9.3	14	17
ene-99	10.2	3.8		0.05	5.4		38	57	
feb-99	7.7	6.2		0.06	4.4		13	15	
mar-99	8.4	7.7	8.2	0.24	6.9	3	9.3	9.3	9.7
abr-99	9.2	3		0.02	9		3.1	10	
may-99	7.6	2.7		0.15	2.4		5.7	12	
jun-99	7.9	1.4	2.8	0.15	6.8	5.7	3.1	6.6	8
jul-99	8.9	1.1		0.03	5.1		2.2	11	
ago-99	8	1.6			4.6			14	
sep-99	7.7	1.9	2.2	0.09	2.1	0.09	6.2	20	18
oct-99	8.9	1.1		0.02	2.04		12	1.91	
nov-99	10.5	5.9		0.05	5.1		10	16	
dic-99	6.5	3.6	5.8	0.08	2.6	5.1	10	6.1	20
ene-00	11.5	8.2		0.21	2.4		9.8	9.58	
feb-00	9.9	8.4		0.07	4.6		6.9	13	
mar-00	8.2	6.6	6.7	0.1	6.2		7.3	7.3	8.79
abr-00	7.8	6.8		0.12	5.5		6.77	7.65	
may-00		6.4			2.8			7.88	
jun-00	7.2	6	6.4	0.19	8.5	5.2	7.3	1.29	2.88
jul-00	7.2	7.1		0.1	6.6		3.8	5.34	
ago-00	8.1	5.3		0.27	3.7		4.75	17	
sep-00	8.6	3	4.2	0.023	4.59	3.66	10	10.58	10.02