

Modelos de simulación de la calidad del agua de los ríos Nalón, Caudal y Nora (Asturias, España):

II. Calibrado de modelos (*)

Por SAINZ BORDA, J. A.; ASCORBE, A.; LIAÑO, A.; PRESMANES, M.; TEJERO, I.

Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente. E.T.S.

Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria.

Se presenta a continuación la segunda parte del artículo sobre el mismo tema publicado en un número anterior de esta revista. En esta segunda parte se estudia el proceso de construcción y calibración de modelos, incluyendo algunos resultados prácticos de su aplicación a ríos asturianos, con el objetivo de llevar a cabo el seguimiento de la calidad de sus aguas.

1. INTRODUCCION

La Confederación Hidrográfica del Norte de España (CHN), al elaborar el Plan de Saneamiento de la cuenca minera de Asturias, dentro de un Plan Nacional de Interés Comunitario (PNIC), ha considerado la necesidad de construir un modelo de simulación de la calidad de las aguas de los ríos Nalón, Caudal y Nora, con el fin de disponer de tal herramienta de cara a la planificación y gestión de dicha cuenca.

El presente artículo es el segundo de una serie en la que se describe y detalla el procedimiento de modelación seguido así como los resultados obtenidos y las dificultades encontradas.

En un artículo anterior (1) se ha realizado, en primer lugar, un breve comentario sobre los fundamentos teóricos en que se basa la citada modelación, haciendo especial hincapié en las características del modelo QUAL2E, que es el que se ha elegido como herramienta de cálculo.

Posteriormente, tras la indicación de las diferentes fases que, a juicio de los autores, se deben contemplar en el proceso de elaboración de un modelo de calidad y su aplicación a un sistema hidráulico, se ha expuesto con detalle el desarrollo de la primera de ellas, designada como elaboración de premodelos. En dicha exposición se han incluido tanto la vertiente metodológica como la vertiente práctica, resumiéndose las características principales de la modelización rea-

lizada en cada río y los resultados de su aplicación a una situación de estiaje severo.

En el presente artículo se expone con detalle el desarrollo de la segunda de las fases del proceso mencionado anteriormente, designada como construcción del modelo inicial mediante calibración y ajuste.

Estos modelos iniciales representan un avance dentro del proceso general de modelización, ya que constituyen herramientas de simulación con un cierto grado de fiabilidad. Ello es debido a que en su elaboración tiene un peso importante la labor de calibración y ajuste a partir de datos obtenidos mediante una campaña de carácter específico.

2. METODOLOGIA

Denominamos "modelo inicial" al resultado de la aplicación del modelo QUAL2E a un río concreto, contando para ello con la realización de una campaña de calidad específica. La elaboración del citado modelo inicial lleva consigo, a su vez, la conceptualización del río y el establecimiento de los valores de los parámetros.

Estas dos fases, la primera de las cuales incluye la caracterización geométrica e hidráulica y la localización y caracterización de vertidos, son análogas a las indicadas en (1) al tratar del establecimiento de premodelos, por lo que, en los aspectos generales de definición del contenido de estos conceptos, nos remitimos a lo allí indicado, dedicando este apartado a la exposición de los

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de mayo de 1991.

aspectos más característicos de la metodología de elaboración del modelo inicial, considerando como punto de partida lo ya realizado con motivo de la elaboración del premodelo.

En este sentido, cabe señalar que, dentro de la conceptualización del río, se ha aceptado como válida la caracterización geométrica del mismo adoptada en el premodelo, por considerarla, generalmente, suficientemente precisa. Esto ha sido posible gracias al detallado trabajo realizado en aquella fase, pero, no obstante, se pueden introducir las modificaciones que se consideren oportunas.

No ocurre lo mismo con la caracterización hidráulica, ya que hay que tener presente que el modelo inicial trata de reflejar el comportamiento del río en una situación concreta: la existente durante la realización de la campaña de medida de calidad.

Por ello, el perfil de caudales a considerar en el modelo inicial debe ser el correspondiente al período de realización de la campaña de calidad. Para su determinación, resulta evidente la necesidad de realizar una campaña de aforos, bastante extensa en términos espaciales.

Asimismo, resulta obvio que el modelo hidráulico de circulación se debe aplicar a las nuevas condiciones de caudal. En esta fase del proceso no cabe esperar que el citado modelo hidráulico se encuentre totalmente establecido, por lo que resulta casi imprescindible la realización de una campaña específica de medida de velocidades, todo lo exhaustiva que sea posible.

En función de la información utilizada para la localización y caracterización de los vertidos en la fase de elaboración de los premodelos y de las "lagunas" observadas, se debe intensificar (más o menos, según los casos) la búsqueda de información más precisa en cuanto a localización de vertidos y realizar, si es posible, una campaña específica de caracterización de los más importantes.

En el artículo anterior (1) se ha hecho referencia a que el establecimiento de los valores de los parámetros estaba basado, a nivel de premodelo, en el criterio personal y experiencia del usuario. En la fase que aquí nos ocupa, la determinación de los valores de los parámetros es fruto de una labor de calibración y ajuste hasta conseguir que los resultados de la simulación mediante el modelo coincidan sensiblemente con los obtenidos en la campaña de calidad realizada a tal efecto.

De aquí se deduce, por lo tanto, la necesidad de realizar dicha campaña de calidad. Ahora bien, la metodología de realización de la citada campaña no puede ser cualquiera, sino que debe ser acorde con las características del modelo de calidad QUAL2E. En este sentido, cabe recordar que el citado modelo está diseñado para representar situaciones estacionarias.

Para que el ajuste y calibrado de parámetros siga un proceso racional, se recomienda comenzar por ajustar los parámetros correspondientes a las variables independientes (temperatura, sólidos en suspensión, coliformes, DBO y clorofila). Posteriormente se aborda el ajuste de los parámetros correspondientes a las variables dependientes, consideradas en un orden correlativo con el de dependencia creciente.

3. CONSTRUCCION DE LOS MODELOS: CALIBRACION

De acuerdo con la metodología general antes expuesta, hay que comenzar por insistir en el hecho de que se ha adoptado la misma caracterización geométrica que la utilizada para el premodelo, manteniendo invariables todas sus variables definitorias: zona a modelizar, cabeceras de los ríos, número de tramos, número de elementos de cada tramo, longitud del elemento, etc.

Con objeto, por una parte, de realizar la caracterización hidráulica a incluir en el modelo inicial y, por otra, de poder diseñar de manera correcta la campaña de calidad para el calibrado y ajuste de parámetros, se ha realizado una campaña de medida de velocidades en los ríos, durante los meses de agosto y septiembre de 1988.

La elección de estas fechas ha estado motivada por el deseo de reflejar una situación de estiaje que, además de la importancia intrínseca que tiene como situación desfavorable en cuanto a calidad del agua, tiene la ventaja de que las variaciones de caudal circulante en períodos de 3 a 4 semanas no son importantes. Este último aspecto ha permitido que el desfase temporal entre las campañas de medida de velocidad y de calidad no haya dado lugar a variaciones sensibles de caudal durante las mismas.

Para la realización de la citada campaña de medida de velocidades se ha recurrido al empleo de flotadores y trazadores químicos (dicromato potásico), según la metodología general descrita en (2).

Al procesar los resultados obtenidos, se ha determinado, por una parte, el valor del tiempo de recorrido (o la velocidad media) en cada uno de los tramos considerados en la modelización, así como el perfil de caudales correspondiente (3). Hay que señalar que en la campaña de velocidades efectuada en el río Nora ha sido necesario adoptar tramos muy cortos para la realización de las medidas, con objeto de poder controlar el avance de los flotadores, lo cual ha llevado a poner en entredicho la representatividad de los valores obtenidos para caracterizar tramos muy largos. Este hecho, unido a otras causas que se indican más adelante, ha motivado un aplazamiento en la construcción del correspondiente modelo inicial, por lo que, en lo que sigue, se hace referencia únicamente a los modelos iniciales de los ríos Nalón y Caudal.

En cuanto al modelo hidráulico de circulación, se ha seguido adoptando uno tipo Manning, con unos valores del coeficiente de rugosidad deducidos a partir de los resultados de la mencionada campaña de velocidades. En este sentido, cabe indicar que la mejora del modelo hidráulico de circulación respecto al utilizado en el premodelo ha sido sustancial, debido a la mayor cobertura espacial de las medidas efectuadas, si bien hay que tener presente que los valores medidos sólo son representativos para el rango de caudales existente durante la campaña.

Los datos de vertidos considerados en la conceptualización del río han experimentado un doble proceso de modificación respecto a los valores adoptados para los premodelos: uno previo y otro incluido en el proceso de calibración y ajuste de parámetros, que se indica más adelante.

Dentro del denominado proceso previo, la primera modificación se ha debido a la mayor información de que se ha dispuesto sobre el censo de vertidos, lo que ha dado lugar a ligeros cambios en el número total de vertidos y en el número de elementos con vertido.

A diferencia de lo ocurrido con los premodelos, se ha dispuesto de resultados de análisis de vertidos de aguas residuales urbanas en las cuencas de los ríos Nalón y Caudal, realizados por el laboratorio de la Confederación Hidrográfica del Norte de España, lo cual ha permitido una caracterización más fiable de los vertidos urbanos, asignando los valores de cargas diarias. (Tabla 0).

Del estudio realizado de caracterización de vertidos se ha extraído también información sobre los caudales vertidos, lo cual ha llevado a consi-

TABLA 0

DBO ₅	65.0 g/hab/día
Sólidos en suspensión	80.0 g/hab/día
Nitrógeno amoniacal	6.1 g/hab/día
Nitrógeno orgánico	3.9 g/hab/día
Fósforo disuelto	4.0 g/hab/día
Fósforo orgánico	0.65 g/hab/día

derar diferentes dotaciones, según los núcleos y cuencas, oscilando entre 150 lts/hab/día para los núcleos rurales de la cuenca del río Nalón, aguas abajo del Concejo de Laviana, hasta 500 lts/hab/día para las poblaciones de Sama, La Felguera y Ciaño, altamente industrializadas.

En cuanto a los vertidos industriales, se ha mantenido en principio su localización y caracterización, dado que no se ha dispuesto de mayor información.

Al intentar realizar la caracterización de los vertidos mineros, se han observado, a nuestro juicio, algunas incongruencias entre los datos aportados por la industria minera del carbón (Hunosa) y las medidas realizadas al efecto en los estudios encargados por la CHN (4). Después de un análisis detallado del problema, se ha adoptado el siguiente criterio: considerar los datos de caudales líquidos de Hunosa, emplear las concentraciones de sólidos en suspensión dadas por Hunosa para los pozos y las reflejadas en los estudios de la CHN para los lavaderos de carbón.

Una de las tareas de mayor trascendencia para la construcción de los modelos iniciales ha sido la realización de una campaña específica de medida de la calidad del agua en los ríos, ya que ello ha posibilitado la calibración y el ajuste de los parámetros.

Aunque lo ideal, desde el punto de vista teórico, sería tener un conocimiento perfecto de la calidad del agua en cada punto y en cada instante, es evidente la imposibilidad práctica de conseguirlo. Es por ello que, en el aspecto espacial, se han seleccionado una serie de puntos concretos, repartidos a lo largo de los diferentes tramos de río considerados y, en el aspecto temporal, se ha considerado conveniente la realización de varias medidas a lo largo del día en cada punto, con intervalos de tiempo constantes.

Teniendo en cuenta que el modelo QUAL2E sirve para representar situaciones estacionarias, el diseño de la campaña de calidad se ha reali-

zado con base en el criterio de "seguimiento de la gota". Así, la determinación de los instantes concretos en los que efectuar la toma de muestras en cada punto seleccionado se ha realizado en función de los tiempos de recorrido determinados mediante la campaña de medida de velocidades a la que antes se ha hecho referencia.

Para un mejor conocimiento de los diferentes aspectos relacionados con esta campaña de calidad, incluidos los resultados obtenidos en la misma, nos remitimos a lo indicado en (5).

En cuanto al detalle del proceso de calibración y ajuste de los parámetros, cabe comenzar por señalar el orden seguido en la consideración de las variables a ajustar: temperatura, coliformes, sólidos en suspensión, clorofila, DBO, ciclo del fósforo, ciclo del nitrógeno y oxígeno disuelto.

El proceso ha sido lo suficientemente laborioso como para que no proceda entrar en muchas precisiones sobre el mismo, que se pueden obtener, no obstante, consultando las referencias (6) y (7). A pesar de ello, sí se indican a continuación los aspectos más relevantes del proceso, haciendo referencia, en particular, a alguna de las variables sobre las que se ha actuado.

En primer lugar, hay que indicar que se ha tomado como término de comparación de la calidad del agua del río, en cada punto considerado y para cada variable, la media aritmética de las tres medidas efectuadas durante la correspondiente campaña.

De esta forma, se ha pretendido estimar un valor medio de la calidad del agua del río correspondiente a la situación de estado estacionario que se quería simular. Dado que la caracterización de vertidos no se ha hecho en correspondencia con la campaña de calidad de las aguas del río (por problemas de infraestructura y medios), la mejor estimación de los vertidos corresponde a la carga diaria de contaminación resultante de los estudios específicos realizados.

Esta forma de trabajar produce una incertidumbre tanto de los valores promediados de la calidad del agua del río (error en la determinación del valor medio) como de la contaminación de los vertidos (alejamiento del valor real de contaminación de cada vertido en el día de la campaña respecto al valor medio calculado en los estudios previos).

Por ello, al realizar la calibración y ajuste de los parámetros de los modelos, se ha considerado la posibilidad de introducir ligeras modificacio-

nes en los datos de los vertidos, dentro del rango probable de variación de los mismos, dado que, en ciertos casos, este hecho era el que mejor podía explicar las diferencias entre la simulación y las medidas.

Para el ajuste de la temperatura se han corregido algunos valores de características generales así como la temperatura de los vertidos, respecto a los valores considerados en los premodelos.

Se ha cambiado la filosofía de asignación de concentración de coliformes a los diferentes vertidos, considerando un valor nulo para los vertidos mineros e industriales y un valor fijo y uniforme (comprendido entre 10^5 y 10^6 coliformes por cada 100 ml) para todos los vertidos urbanos.

Durante el ajuste de la clorofila y la DBO se han realizado diferentes cambios, que han afectado a aspectos tales como los datos correspondientes a las cabeceras de los ríos (ajustándolos a los valores medidos), las concentraciones de DBO en algunos vertidos industriales, las tasas de sedimentación y los coeficientes de extinción de luz.

Para el ajuste del ciclo del fósforo se ha actuado en el sentido de reducir, de forma general y uniforme, la concentración de fósforo disuelto en los vertidos urbanos y, puntualmente, de algún vertido industrial.

En cuanto al ciclo del nitrógeno, el proceso ha sido más laborioso, si cabe, dado el número de variables a ajustar y la interrelación entre las mismas. Como pautas seguidas cabe indicar la modificación en las concentraciones de algunos vertidos industriales y de la recarga subterránea (aumentando en este caso fundamentalmente las concentraciones de nitratos), así como algunas variaciones en los valores de las tasas de nitrificación.

Finalmente, para el ajuste del oxígeno disuelto se ha partido de la acumulación de todas las modificaciones anteriores y se ha actuado disminuyendo ligeramente el valor del oxígeno disuelto en los caudales incrementales, aumentándolo en los puntos de vertido (por mezcla turbulenta) y modificando la tasa de reaeración en algunos tramos.

4. PRESENTACION Y ANALISIS DE RESULTADOS

Al igual que se ha indicado en el artículo anterior, dada la envergadura del trabajo, en este

apartado sólo se incluye una muestra de los resultados obtenidos y una breve referencia a las cuestiones más destacables.

Hay que comenzar por señalar que, tanto por la poca representatividad del modelo de circulación del río Nora como por la escasa información adicional de que se ha dispuesto sobre la localización y caracterización de vertidos en la cuenca de dicho río, la construcción del modelo inicial del río Nora no ha podido llevarse a cabo con el mismo grado de fiabilidad que los correspondientes a los ríos Nalón y Caudal, por lo que no se incluyen en este apartado los resultados obtenidos para dicho río.

Considerando como primer resultado la propia construcción de los modelos iniciales, en la tabla 1 adjunta se resumen las características principales de la modelización realizada. Comparando el contenido de esta tabla con el de la correspondiente del artículo anterior se observa que las diferencias se centran, por una parte, en el perfil de caudales y, sobre todo, en la carga contaminante de los vertidos.

Aunque la relación total de variables y parámetros y sus valores correspondientes se pueden consultar en (6) y (7), en la tabla 2 se indican, al igual que en el artículo anterior, los considerados más representativos, estableciendo una distinción en función de su variabilidad o no de un tramo a otro. En el primero de los casos, la primera de

las columnas corresponde a tramos tipo canal y la segunda a tramos tipo embalse o azud, pudiéndose establecer comparaciones entre el contenido de esta tabla y la correspondiente a los pre-modelos.

Así, en el primero de los bloques, que incluye parámetros que no son susceptibles de variar de unos tramos a otros, las únicas modificaciones se

TABLA 2

Parámetros globales de Nitrógeno, Fósforo, Algas y Luz

Parámetros	Río Nalón	Río Caudal
α_5	3.50	3.50
α_6	1.20	1.20
α_3	1.60	1.60
α_4	2.00	2.00
α_1	0.085	0.085
α_2	0.012	0.012
μ_{max}	2.50	2.50
ρ	0.10	0.10
KN	0.20	0.20
KP	0.04	0.04
λ_1	0.02	0.02
λ_2	0.055	0.055
KNITRF	0.60	0.60

Parámetros de oxígeno disuelto y DBO

K	300	6,000	300	6,000
K_1	0.600	0.600	0.600	0.600
K_3	0.000	0.200	0.000	0.200
K_4	0.000	1.000	0.000	1.000
K_2	—	0.200	—	0.200

Parámetros de Nitrógeno y Fósforo

Parámetros	Río Nalón		Río Caudal	
β_3	0.200	0.200	0.200	0.200
σ_4	0.000	0.050	0.001	0.100
β_1	1.000	1.000	1.000	1.000
σ_3	0.000	1.000	0.000	1.000
β_2	0.200	0.200	0.200	0.200
β_4	0.300	0.300	0.300	0.300
σ_5	0.001	0.050	0.001	0.050
σ_2	0.000	1.000	0.000	1.000

Parámetros varios

α_0	50	50	50	50
α_1	0.150	0.150	0.150	0.150
λ_0	38-20	3.8-10	38-10	0.50
K_5	1.500	1.500	1.500	1.500
K_6	0.000	0.000	0.000	0.000
σ_6	1.000	10.00	1.000	10.00
σ_7	0.000	0.000	0.000	0.000

TABLA 1

Ríos	Nalón	Caudal
N.º tramos	14	10
N.º cabeceras	2	3
Afluentes	Sta. Bárbara	Aller Turón
N.º elementos	53	79
Longitud elemento (mts.)	800	660
L. modelo río princ. (km.)	40,8	33
Pend. media río principal	0,00495	0,00719
Caudal cabec. río principal	3,77	1,00
Caudal final (m³/seg.)	6,31	6,67
Modelo circulación	mannning	mannning
Tiempo total de paso (h.)	36	26
Población total (hab.)	81,772	75,945
N.º vertidos	229	119
N.º elementos con vertido	32	44
Caudal total vertido (m³/s)	1.030	0.989
Carga contaminante (kg/día)		
DBO	6,913	5,233
Sólidos en suspensión	1,460,135	256,168
Nitrógeno amoniacal	4,514	328
Nitrógeno orgánico	571	175
Fósforo disuelto	311	110

centran en los valores de los coeficientes lineal y no lineal de extinción de luz debio a las algas.

En el segundo de los bloques, las modificaciones en algunos de los parámetros que influyen en la variación del oxígeno disuelto y de la DBO han sido importantes. Así, la tasa de sedimentación de la DBO en tramos tipo embalse ha pasado de un valor de 0.2 a 10.0 en el embalse de Soto de Ribera, manteniéndose en valores bajos en los azudes de poca importancia.

El valor de la tasa de reaireación en los tramos tipo embalse se ha mantenido en un valor de 0.2, mientras que, en los tramos tipo canal los valores han sido mayores, oscilando entre 1 y 15, según los tramos. En contra de lo que cabría esperar, se han debido asignar mayores valores a los tramos inferiores.

En cuanto a los parámetros que controlan la simulación de los ciclos del nitrógeno y del fósforo, que se incluyen en el bloque 3, las modificaciones se han centrado casi exclusivamente en las tasas de oxidación biológica, tanto del amoníaco como de los nitritos, que han pasado de valores de 0.75 a 1.0 y de 1.5 a 0.2, respectivamente.

Finalmente, en el último de los bloques de parámetros, el coeficiente de extinción de luz independiente de la presencia de algas ha pasado de tener un valor de 3.8 a oscilar entre 0.38 para los tramos claros y 20.0 para los tramos con aguas más turbias. Por otro lado, la tasa de sedimentación de los sólidos en suspensión ha sufrido un aumento notable en el tramo correspondiente al embalse de Soto de Ribera.

Para la presentación de los resultados correspondientes a la simulación mediante estos modelos iniciales de la variación espacial de la calidad del agua a lo largo de los ríos Nalón y Caudal, se ha recurrido, al igual que en el artículo anterior, al empleo de gráficos, con objeto de facilitar su análisis y comprensión.

En las figuras 1 y 2 se incluyen las gráficas correspondientes a la variación, a lo largo del tramo modelizado del río Nalón, del caudal circulante, de la temperatura y de las concentraciones de sólidos en suspensión, oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno, fósforo disuelto, nitrógeno amoniacal y nitrógeno total.

En la gráfica de variación de caudal a lo largo del río se establece la comparación entre los perfiles de caudales considerados en el premodelo y en el modelo inicial, respectivamente.

En el resto de las gráficas se incluyen dos

líneas y un conjunto de puntos. La línea de trazo fino corresponde a los resultados proporcionados por la primera versión del modelo inicial, es decir, la establecida a partir del premodelo para el nuevo perfil de caudales y su correspondiente modelo de circulación y para los nuevos estándares de carga contaminante y caudal en los vertidos urbanos.

La línea de trazo grueso corresponde a la versión considerada como definitiva para el modelo inicial. El conjunto de puntos refleja los resultados obtenidos en la campaña de calidad (media aritmética de tres valores, como se ha indicado antes).

Por otro lado, en las figuras 3 y 4 se incluyen las gráficas análogas correspondientes al río Caudal. En este sentido, hay que señalar que, en el eje de abscisas, se representa la longitud del curso principal, sin incluir afluentes, cuya localización queda reflejada en el perfil de caudales en forma de incrementos localizados del mismo. El resto de lo indicado al presentar los gráficos 1 y 2 sigue siendo válido.

Del examen de los gráficos incluidos en las figuras 1 a 4 se deduce que, en la mayor parte de los casos, la simulación obtenida mediante la versión definitiva del modelo inicial es bastante acorde con las medidas efectuadas en el propio río.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Enlazando con lo anterior, cabe citar como primera conclusión la de haber podido establecer, mediante un proceso de calibración y ajuste, un modelo de calidad capaz de reflejar la variación espacial de algunos componentes de la calidad del agua de un río, en una situación de caudal determinada.

La no realización de una campaña de caracterización de vertidos simultáneamente con la campaña específica de calidad del agua del río, base del proceso de calibración, ha introducido una incertidumbre que ha sido compensada parcialmente por el tipo de campaña de calidad que se ha diseñado. Es recomendable, tal como se plantea en los procesos clásicos de calibración, el diseño y realización de campañas que incluyan medidas tanto de la calidad del agua del río como de la contaminación de los principales vertidos.

La realización de campañas de aforo y de

MODELOS DE SIMULACION DE LA CALIDAD DEL AGUA

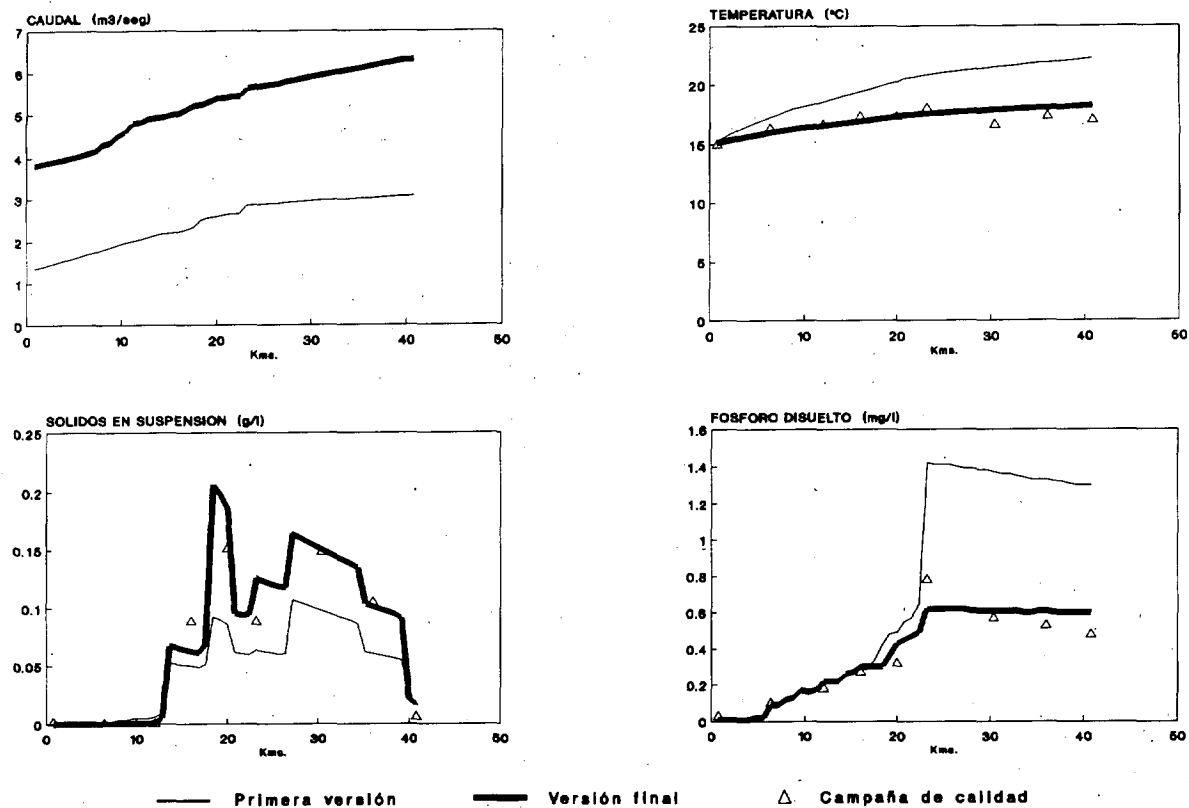


Figura 1. Modelo inicial del río Nalón.

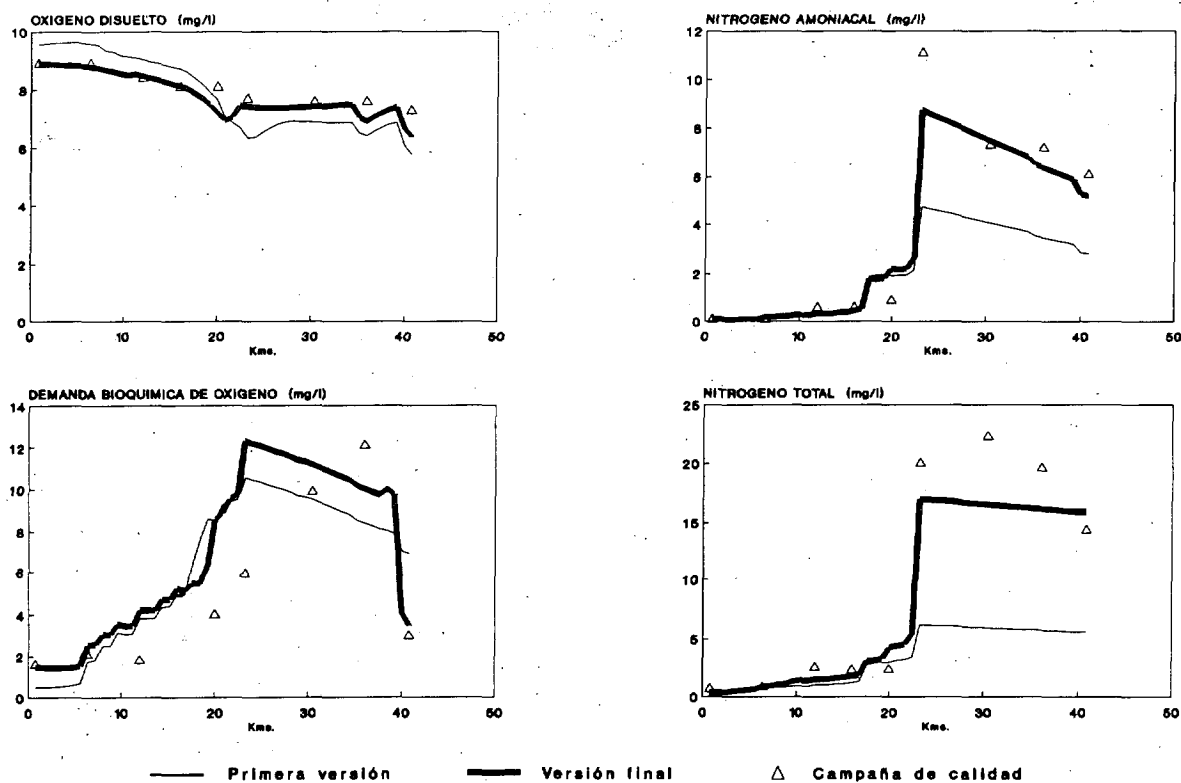


Figura 2. Modelo inicial del río Nalón.

MODELOS DE SIMULACION DE LA CALIDAD DEL AGUA

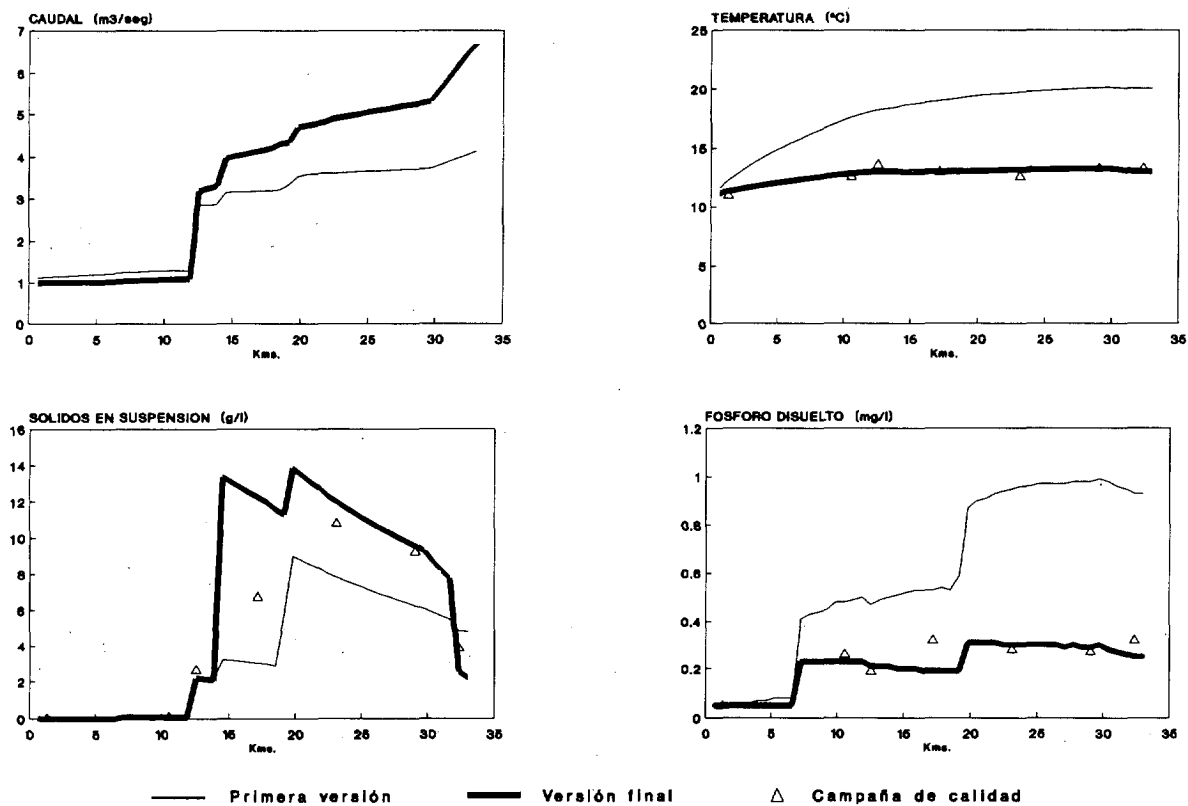


Figura 3. Modelo inicial del río Caudal.

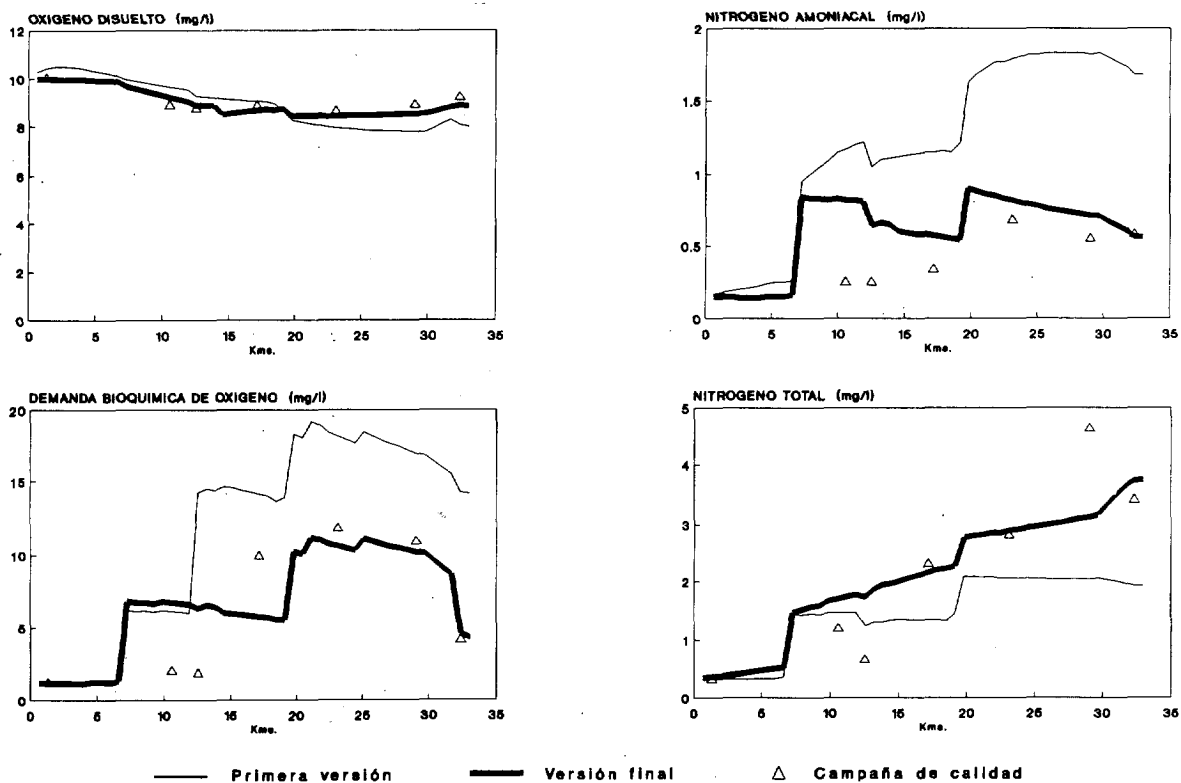


Figura 4. Modelo inicial del río Caudal.

medida de velocidades ha permitido diseñar ajustadamente la campaña de calibración y obtener un modelo de circulación del agua del río válido para el momento de la campaña, pero cuya extrapolación a otras situaciones de caudal hay que comprobar.

La determinación de las tasas de reaeración del río se ha realizado por ajuste de los valores del oxígeno disuelto, lo cual ha producido una buena calibración del modelo, pero, al haber obtenido valores fijos de dichas tasas en cada tramo (no dependientes de las características geométrico-hidráulicas del río), queda en entredicho su extrapolación a otras situaciones de caudal diferentes de las existentes durante la campaña de calibración.

Se han detectado posibles errores en algunos de los resultados de los análisis de DBO realizados. Lo mismo se había detectado al establecer los premodelos para los datos correspondientes a otros estudios anteriores. Por otra parte, la simulación de la DBO resulta bastante grosera. Por todo ello, es recomendable analizar, además de la DBO, otros parámetros relacionados con la materia orgánica como pueden ser la demanda química de oxígeno (DQO) y el carbono orgánico total (TOC).

Se ha determinado indirectamente la contaminación en nitratos de la recarga subterránea (caudales de aportación continua) de los ríos, que sin ser excesiva es importante de cara a la simulación del modelo, tal como se planteó al establecer los premodelos.

Como resultado del ajuste, se deduce la existencia de un fenómeno extraño de nitrificación, especialmente en el río Nalón, que se concreta en que la velocidad de paso del nitrógeno amoniacal a nitritos es superior a la correspondiente a la transformación de los nitritos a nitratos. Ello trae como consecuencia un incremento gradual de los nitritos a lo largo del río, llegando a producir concentraciones muy elevadas (4-5 mg/l de nitritos en el río Nalón).

En cuanto a las causas, o bien es el resultado de errores en los análisis o bien existe una cierta inhibición de los *nitrobacter*. En cualquier caso, este es un hecho que habrá que comprobar en posteriores estudios.

Se ha comprobado la rigidez del modelo QUAL2E para simular la temperatura de las aguas del río como consecuencia de tener que adoptar un valor único de temperaturas del aire

para toda la cuenca. No obstante, los errores producidos no han sido excesivos.

Otro hecho constatado ha sido la dificultad de simular (con el modelo QUAL2E) tramos de río muy diferentes en un mismo modelo, debido a la fijación de un valor constante para la longitud del elemento de cálculo en todo el río. Este ha sido el caso del río Caudal, en el que la simulación del río Turón, que exigiría longitudes de elemento de cálculo muy pequeñas (50 a 100 metros), no ha podido ser muy buena.

Se ha vislumbrado la posible existencia de fenómenos no considerados por el QUAL2E (precipitación de fósforo disuelto por vertido de canteras, destrinificación por el lecho anaerobio del río, aumento de la turbidez por carbón suspendido, etc.) que pueden producir ciertos errores en la calibración del modelo.

AGRADECIMIENTO

Este trabajo ha sido financiado por la Confederación Hidrográfica del Norte de España, a través de un Convenio con la Fundación Leonardo Torres Quevedo de la Universidad de Cantabria. El estudio ha sido dirigido por los Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, D. Ramón Álvarez Maqueda, D. Luis Gil García y D. Carlos Blanco Quirós. Para el desarrollo de la campaña de medida de velocidades y de la campaña de calidad se ha contado con la colaboración de personal de la citada Confederación.

NOTACION

Parámetros	Definición
α_5	Consumo específico de oxígeno para la oxidación del amoníaco
α_6	Consumo específico de oxígeno para la oxidación de los nitritos
α_3	Producción específica de oxígeno por crecimiento de las algas
α_4	Consumo específico de oxígeno por respiración de las algas
α_1	Contenido específico de nitrógeno en la biomasa de las algas
α_2	Contenido específico de fósforo en la biomasa de las algas
μ_{max}	Tasa máxima de crecimiento de las algas
ρ	Tasa de respiración de las algas
KN	Constante de Michaelis-Menton de semi-saturación para el nitrógeno

KP	Constante de Michaelis-Menton de semi-saturación para el fósforo
λ_1	Coefficiente lineal de auto-oscurecimiento producido por las algas
λ_2	Coefficiente no lineal de auto-oscurecimiento producido por las algas
K	Constante de dispersión
K_1	Tasa de desoxigenación debida a la materia orgánica carbonácea
K_3	Tasa de sedimentación de la DBO carbonácea
K_4	Tasa de consumo béntico de oxígeno
K_2	Tasa de reaeración
β_3	Tasa de hidrólisis del nitrógeno orgánico
σ_4	Tasa de sedimentación del nitrógeno orgánico
β_1	Tasa de oxidación biológica del amoníaco
σ_3	Tasa de producción béntica del nitrógeno amoniacal
β_2	Tasa de oxidación biológica de los nitritos
β_4	Tasa de solubilización del fósforo orgánico
σ_5	Tasa de sedimentación del fósforo orgánico
σ_2	Tasa de producción béntica del fósforo disuelto
α_0	Contenido de clorofila A en la biomasa de las algas
α_1	Contenido específico de nitrógeno en la biomasa de las algas
λ_0	Coefficiente de extinción de luz independiente de las algas
K_5	Tasa de desaparición de coliformes
K_5	Tasa de desaparición del elemento arbitrario no conservativo
σ_6	Tasa de sedimentación del elemento arbitrario no conservativo
σ_7	Tasa de producción béntica del elemento arbitrario no conservativo

BIBLIOGRAFIA

- (1) SAINZ, J.A. y otros. (1990). "Modelos de Simulación de la Calidad del Agua de los Ríos Nalón, Caudal y Nora (Asturias, España): 1.- Establecimiento de Premodelos". Revista de Obras Públicas.
- (2) TEJERO, J.L. y otros. (1989). "Estudio de Trazadores en Cauces Fluviales. Fundamentos Teóricos y Metodológicos". Informe emitido para la Confederación Hidrográfica del Norte de España.

(3) TEJERO, J.L. y otros. (1989). "Campañas de Trazadores. Año 1988". Informe emitido para la Confederación Hidrográfica del Norte de España.

(4) INGENIERIA DE LA POLUCION, S.A. (1988). "Estudios Previos a la Redacción de los Proyectos de los Sistemas Generales de Saneamiento de las Cuencas Mineras del Nalón, Caudal y Nora".

(5) TEJERO, J.L. y otros. (1989). "Campañas de Calidad. Año 1988". Informe emitido para la Confederación Hidrográfica del Norte de España.

(6) TEJERO, J.L. y otros. (1989). "Modelo de la Calidad de las Aguas del Río Nalón". Informe emitido para la Confederación Hidrográfica del Norte de España.

(7) TEJERO, J.L. y otros. (1990). "Modelo de la Calidad de las Aguas del Río Caudal". Informe emitido para la Confederación Hidrográfica del Norte de España.

José Angel Sainz Borda

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos (1975). Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos (1979). Profesor Titular de Ingeniería Hidráulica (1).

Agustín Ascorbe Salcedo

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos (1981). Doctor Ingeniero de Caminos Canales y Puertos (1983). Profesor Titular de Ingeniería Hidráulica (1).

Andrés Liaño Herrera

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos (1976). Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos (1981). Profesor Titular de Ingeniería Hidráulica (1).

Mar Presmanes García

Licenciada en Ciencias Químicas. Becaria de la Fundación Leonardo Torres Quevedo de la Universidad de Cantabria.

Ignacio Tejero Monzón

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos (1976). Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos (1980). Catedrático de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (1).

Como equipo de trabajo han llevado a cabo estudios e investigaciones en diversos campos dentro del ámbito de la Ingeniería Hidráulica y de la Ingeniería Sanitaria y Ambiental, que han dado lugar a varios informes técnicos y publicaciones, tanto a nivel nacional como internacional.

- (1) Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente de la Universidad de Cantabria.