
Modelización bidimensional de flujos
hidrodinámicos transitorios y su
influencia en los procesos biológicos de
una Estación de Depuración de Aguas
Residuales

Patricia Pérez Abad

Mecánica de Fluidos

Director: Pilar García Navarro

Codirector: Javier Murillo Castarlenas

Universidad de Zaragoza, 2010

Resumen

Modelización bidimensional de flujos hidrodinámicos transitorios y su influencia en los procesos biológicos de una Estación de Depuración de Aguas Residuales

Aunque se han desarrollado modelos matemáticos, cada vez más complicados, para definir los procesos biológicos que tienen lugar en una Estación de Depuración de Aguas Residuales, el modelado de otros aspectos de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, como la descripción en detalle de la hidrodinámica del reactor y su influencia, siguen siendo cuestiones poco desarrolladas. Por este motivo, el objeto de la realización de este proyecto, es la elaboración y puesta a punto de una herramienta de simulación, que permita predecir el comportamiento de un reactor perteneciente al Proceso Orbal y en el que tiene lugar un tratamiento de lodos activados. Al hablar del comportamiento del reactor, se hace referencia tanto a la evolución de las sustancias implicadas en el proceso, como a la descripción del flujo en el sistema. Esto último se consigue utilizando un modelo matemático basado en las ecuaciones de aguas poco profundas, que describe la dinámica del flujo y que se completa al introducir en su formulación las leyes que gobiernan la cinética del proceso de tratamiento del agua residual. Para evaluar la validez del modelo dinámico, se estudia un caso sobre un codo de 90° del que se tiene información experimental. En un primer paso y como caso ideal, se utilizan las ecuaciones propuestas por el Modelo de Monod para describir la cinética del proceso biológico y a continuación, como aproximación al caso real, se sustituyen las expresiones de Monod por las del Modelo de Lodos Activados $N^\circ 1$ (ASM1). El modelo extendido se ensaya primero en un canal recto donde el flujo es unidimensional. Estos ensayos incluyen el estudio de la evolución de las sustancias dentro del reactor, la influencia de la cantidad de oxígeno disuelto presente en el agua, la densidad de la malla de cálculo y el volumen de agua tratada. Por último se introduce en el modelo una última modificación para incluir el efecto de un sistema de aireación mecánica típica del Proceso Orbal. Tras los casos de estudio sobre el canal 1D, se estudia la validez del modelo sobre una malla de cálculo que reproduce la geometría de un reactor perteneciente al Proceso Orbal. Sobre esta nueva geometría, más complicada que el caso 1D, se evalúa la modelización de los sistemas de aireación, incluyendo, velocidad y sentido de giro de los discos. También se estudia el movimiento de un soluto sin reacción dentro del sistema, así como

la evolución del mismo, cuando tiene lugar en él, un tratamiento de lodos activados completo. Como ejemplo de aplicación, se presenta un caso de estudio de la evolución del sistema frente a un caudal pico de agua residual a tratar en la entrada al reactor, situación cotidiana en este tipo de instalaciones.

Índice general

1. Introducción	7
2. Ecuaciones gobernantes del flujo de superficie libre	11
2.1. El modelo de aguas poco profundas	11
2.2. Modelo κ - ϵ	13
2.3. Modelo de Lodos Activados $N^{\circ}1$ (ASM1)	14
2.4. Modelización de la impulsión y aporte de oxígeno en los discos Orbal	15
2.5. Esquema numérico	17
3. Estudio Previo. Flujo en un codo de 90° .	25
3.0.1. Descripción del experimento.	25
3.0.2. Simulación numérica y Resultados	27
3.1. Conclusiones	29
4. Simulación de procesos de lodos activados.	35
4.1. Modelo de Monod	36
4.2. Modelo de Lodos Activados n 1 (ASM1)	38
4.2.1. Caso sin aireación. Malla de alta densidad	39
4.2.2. Caso sin aireación. Malla de baja densidad	43
4.2.3. Evaluación de la influencia de la concentración de oxígeno disuelto	45
4.2.4. Respuesta frente a la variación del volumen de agua tratada	46
4.3. Aireadores mecánicos	49
4.4. Conclusiones	51
5. Aplicación a una Estación de Depuración de Aguas Resid-	

uales	53
5.1. Estudio del funcionamiento del sentido de giro de los discos Orbal.	56
5.2. Influencia de la velocidad de giro de los discos Orbal.	61
5.3. Estudio del movimiento de un soluto a través del reactor biológico.	63
5.4. Aplicación real. Caso completo.	66
5.5. Estudio de la evolución de un pico en el caudal de entrada. . .	68
5.6. Conclusiones.	69
6. Conclusiones	71
Referencias	73

Capítulo 1

Introducción

Los objetivos del tratamiento biológico son reducir el contenido de materia orgánica de las aguas, disminuir su contenido en nutrientes, y eliminar los patógenos y parásitos. Estas metas se logran por medio de procesos aeróbicos y anaeróbicos, en los cuales la materia orgánica es metabolizada por diferentes cepas bacterianas. Un método de tratamiento de aguas residuales ampliamente utilizado es el Proceso de Lodos Activados. El reactor donde tiene lugar este proceso es un sistema de gran complejidad física, química y biológica en el que tienen lugar numerosas interacciones internas entre las variables de proceso y los cambios dinámicos en el caudal de agua residual a la entrada del reactor, la concentración y la composición [5].

Actualmente, se requiere de la utilización y diseño de programas informáticos de simulación, que permitan representar los procesos de tratamiento de aguas residuales, con el fin de obtener mejoras en los procesos y automatizar el diseño de las plantas de tratamiento.

Aunque se han desarrollado modelos matemáticos para definir estos procesos biológicos, cada vez más complicados, la descripción en detalle de la hidrodinámica del reactor y su influencia, siguen siendo cuestiones poco desarrolladas [7]. Muchos problemas de ingeniería medioambiental involucran el estudio de los flujos de agua con fenómenos como el transporte de diversas sustancias. La predicción de la evolución es de gran importancia por su efecto potencial en el medio ambiente. La descripción del flujo en sistemas hidráulicos es en la mayoría de los casos transitorio. Si se caracteriza por la presencia de una escala vertical mucho menor que las horizontales, puede ser descrito por un modelo de aguas poco profundas [4] que forma un conjunto de ecuaciones no lineal hiperbólico. Conocer a fondo las características

y propiedades que modelan el comportamiento es fundamental, sobre todo cuando se quiere pasar a casos complejos.

Las ecuaciones de aguas poco profundas, se deducen a partir de la ecuación de conservación de la masa y de las ecuaciones de Navier-Stokes para flujo incompresible. Estas ecuaciones, se promedian en la vertical, haciendo uso de las definiciones de los promedios de las variables, dejando la profundidad de la lámina de agua como una variable dependiente con lo que queda una formulación bidimensional.

El presente proyecto, realizado en el Área de Mecánica de Fluidos, desarrolla la elaboración y puesta a punto de una herramienta de simulación, que permita predecir el comportamiento de un reactor perteneciente al Proceso Orbal y en el que tiene lugar un tratamiento de lodos activados. El modelo matemático se basa en las ecuaciones de aguas poco profundas para la descripción del flujo. Este modelo se completa al introducir en su formulación las ecuaciones escalares que describen la cinética del proceso de tratamiento del agua residual.

En los primeros capítulos de este proyecto se describe el modelo matemático utilizado para llevar a cabo las simulaciones. El modelo κ - ϵ en el que las cantidades transportadas son la energía cinética turbulenta, κ , y la disipación de la energía cinética turbulenta, ϵ permite determinar la viscosidad del campo de velocidades del flujo. La comparación entre la información obtenida a partir de las simulaciones utilizando el modelo de turbulencia κ - ϵ promediado en la vertical con los datos experimentales, permite evaluar las prestaciones del esquema numérico propuesto en un caso que aún complicados fenómenos de transporte reacción y difusión.

Los primeros casos de estudio se realizan sobre un canal recto en el que el flujo es unidimensional. En este sistema, se ensayan las ecuaciones cinéticas que describen el proceso de lodos activados. En primer lugar, se implementan las expresiones cinéticas dadas por el Modelo de Monod, para describir una situación ideal. Como aproximación al caso real, en un paso posterior, se sustituyen las ecuaciones de Monod por las que corresponden al Modelo de Lodos Activados $N^{\circ}1$ (ASM1). Este modelo tiene como propósito simular la degradación de la materia orgánica, así como la nitrificación y la desnitrificación de los procesos de lodos activados.

Tras la presentación del caso unidimensional, se muestra una serie de casos de estudio realizados sobre un reactor perteneciente al Proceso Orbal. El Proceso Orbal se puede esquematizar mediante un diagrama de flujo como el que sigue:

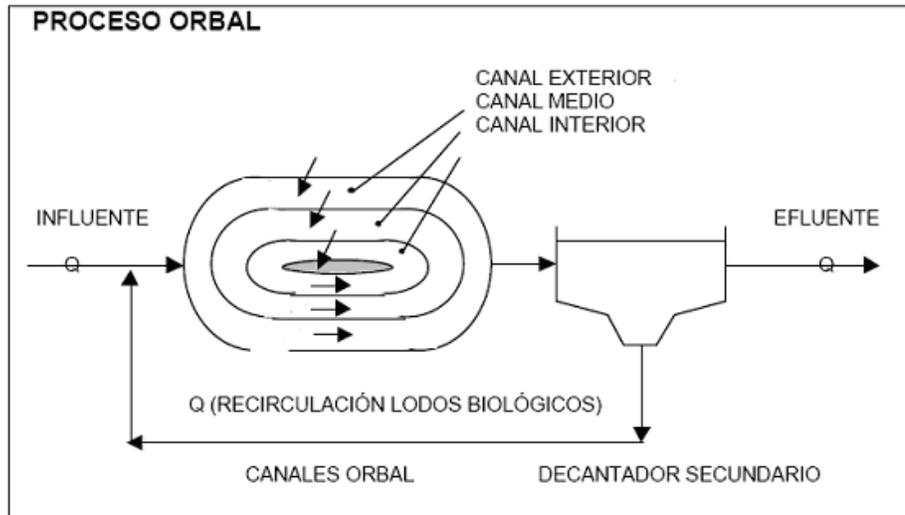


Figura 1.1: Diagrama de flujo genérico del Proceso Orbal

Trabajar con dos o tres reactores (canales) en serie, en comparación con los sistemas de un solo reactor (canal) ofrece una mayor flexibilidad y una mayor eficiencia. El principal motivo de aumento de la eficacia de este tipo de sistemas, es que en el proceso Orbal, se trabaja con concentraciones de sustrato (Materia orgánica) mayores que en los casos de reactor único, en los que se trabaja con la concentración requerida en el efluente. Los reactores del Proceso Orbal, incluyen un sistema de aireación mecánica, que permite aumentar la concentración de oxígeno disuelto en el agua además de ser responsable del movimiento del flujo.

Sobre una geometría que representa un reactor perteneciente al proceso Orbal, se realizan una serie de casos de estudio en los que se evalúa la modelización de los sistemas de aireación, la evolución de un soluto sin reacción a través del reactor y la respuesta del sistema frente a un proceso de lodos activados completo y una situación de caudal pico en el agua residual de entrada al reactor.

Por último, se manifiestan las conclusiones recogidas tras la realización de este trabajo y se presentan distintas opciones de continuación de esta investigación para el futuro.

Capítulo 2

Ecuaciones gobernantes del flujo de superficie libre

Muchos problemas de ingeniería medioambiental involucran el estudio de los flujos de agua con fenómenos como el transporte de diversas sustancias. La predicción de la evolución es de gran importancia por su efecto potencial en el medio ambiente. La descripción del flujo en sistemas hidráulicos es en la mayoría de los casos transitorio. Si se caracteriza por la presencia de una escala vertical mucho menor que las horizontales, puede ser descrito por un modelo de aguas poco profundas [4] que forma un conjunto de ecuaciones no lineal hiperbólico. Conocer a fondo las características y propiedades que modelan el comportamiento es fundamental, sobre todo cuando se quiere pasar a casos complejos.

2.1. El modelo de aguas poco profundas

Las ecuaciones de aguas poco profundas se deducen a partir de la ecuación de las ecuaciones de Navier-Stokes para flujo incompresible. Para pasar a la forma bidimensional de las ecuaciones, dejando la profundidad de la lámina de agua como una variable dependiente, se promedian las ecuaciones en esta dirección haciendo uso de las definiciones de los promedios de las variables [19], (Figura 2.1)

$$\bar{u} = \frac{1}{h} \int_0^h u(z) dz \quad \bar{v} = \frac{1}{h} \int_0^h v(z) dz \quad (2.1)$$

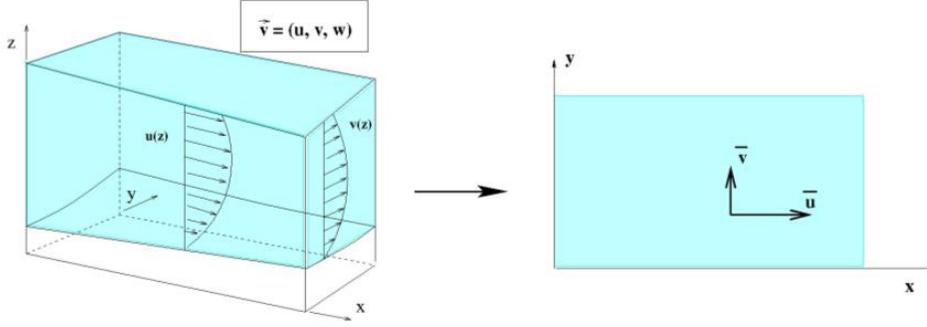


Figura 2.1: Simplificación Aguas Poco Profundas

donde \bar{u}, \bar{v} son las dos componentes de la velocidad del flujo en las direcciones x, y respectivamente. A partir de ahora se elimina el símbolo que indica promedio para simplificar la notación siendo las componentes del vector velocidad promediadas en la vertical, u y v . Así mismo, la concentración de soluto, también queda promediado en la vertical,

$$\phi = \frac{1}{h} \int_0^h \phi(z) dz \quad (2.2)$$

Si suponemos que la velocidad en la escala vertical, w es mucho menor que en las direcciones del plano x, y y la presión es hidrostática, el proceso de promediar en la vertical las ecuaciones convierte el problema tridimensional en uno bidimensional de grosor variable h [4]. El sistema de ecuaciones en derivadas parciales se puede expresar de forma compacta como sigue [14]:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{U})}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}(\mathbf{U})}{\partial y} = \mathbf{S}(\mathbf{U}) + \mathbf{R}(\mathbf{U}) + \vec{\nabla} \mathbf{D}(\mathbf{U}) \quad (2.3)$$

donde

$$\mathbf{U} = (h \quad q_x \quad q_y \quad h\phi_1 \quad h\phi_2 \quad \dots \quad h\phi_p)^T \quad (2.4)$$

son las variables conservadas, con h que representa la profundidad de la columna de agua y $q_x = hu$ y $q_y = hv$, con u, v las componentes del vector velocidad, \mathbf{u} a lo largo del eje x e y respectivamente y promediadas en la vertical. Las variables $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p$ representan la concentración escalar, promediada en la vertical, de las diferentes cantidades transportadas.

Los flujos de estas variables vienen dadas por:

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= \left(q_x \quad \frac{q_x^2}{h} + \frac{1}{2}gh^2 \quad q_x q_y / h \quad q_x \phi_1 \quad q_x \phi_2 \quad \dots \quad q_x \phi_p \right)^T \\ \mathbf{G} &= \left(q_y \quad q_x q_y / h \quad \frac{q_y^2}{h} + \frac{1}{2}gh^2 \quad q_y \phi_1 \quad q_y \phi_2 \quad \dots \quad q_y \phi_p \right)^T \end{aligned} \quad (2.5)$$

donde g es la aceleración de la gravedad.

Los términos fuente del sistema se dividen en tres tipos. Los términos que hacen referencia a la pendiente del fondo y a la fricción en las ecuaciones de momento son:

$$\mathbf{S} = \left(0 \quad gh(S_{ox} - S_{fx}) \quad gh(S_{oy} - S_{fy}) \quad 0 \quad 0 \quad \dots \quad 0 \right)^T \quad (2.6)$$

donde

$$S_{ox} = -\frac{\partial z_b}{\partial x} \quad S_{oy} = -\frac{\partial z_b}{\partial y} \quad (2.7)$$

son la pendientes del fondo en los ejes x e y , definidas a través del nivel z y

$$S_{fx} = n^2 u \sqrt{u^2 + v^2} / h^{4/3} \quad S_{fy} = n^2 v \sqrt{u^2 + v^2} / h^{4/3} \quad (2.8)$$

representan las pérdidas por fricción, que se escriben en función del coeficiente de rugosidad de Manning, n [12]:

Los términos de difusión se basan en la siguiente formulación:

$$\mathbf{D} = \left(0 \quad \mathbf{K}_u h \vec{\nabla} u \quad \mathbf{K}_v h \vec{\nabla} v \quad \mathbf{K}_1 h \vec{\nabla} \phi_1 \quad \mathbf{K}_2 h \vec{\nabla} \phi_2 \quad \dots \quad \mathbf{K}_p h \vec{\nabla} \phi_p \right)^T \quad (2.9)$$

donde cada \mathbf{K} es una matriz de dispersión empírica.

Los términos de reacción \mathbf{R} que solamente afectan al transporte escalar:

$$\mathbf{R} = \left(0 \quad 0 \quad 0 \quad R_1 \quad R_2 \quad \dots \quad R_p \right)^T \quad (2.10)$$

2.2. Modelo κ - ϵ .

El modelo κ - ϵ se caracteriza por introducir las variaciones espaciales y temporales tanto del flujo como de las variables transportadas, en este caso κ y ϵ . De esta forma, el sistema de ecuaciones se puede reescribir con $p = 2$, $\phi_1 = \kappa$ y $\phi_2 = \epsilon$. Las matrices de difusión son [14] :

$$\mathbf{K}_u = \mathbf{K}_v = \begin{pmatrix} \nu + \nu_t & 0 \\ 0 & \nu + \nu_t \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

$$\mathbf{K}_\kappa = \begin{pmatrix} \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\kappa} & 0 \\ 0 & \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\kappa} \end{pmatrix} \quad \mathbf{K}_\epsilon = \begin{pmatrix} \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} & 0 \\ 0 & \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \end{pmatrix}$$

El término de reacción se divide en su contribución positiva, \mathbf{R}_1 y negativa, \mathbf{R}_2 .

$$\mathbf{R}_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & hP_\kappa + hP_{\kappa v} & hc_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{\kappa} P_\kappa + hP_{\epsilon, v} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{R}_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & -h\epsilon & -hc_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{\kappa} \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

$$\nu_t = c_\mu \frac{\kappa^2}{\epsilon} \quad P_k = 2\nu_t (S_{uu}^2 + S_{uv}^2 + S_{vv}^2) \quad P_{kv} = \frac{c_\kappa u_f^3}{h}$$

$$c_k = \frac{1}{c_f^{1/2}} \quad P_{\epsilon v} = c_\epsilon \frac{u_f^4}{h^2} \quad c_\epsilon = 3,6 \frac{c_{2\epsilon} c_\mu^{1/2}}{c_f^{3/4}}$$

donde $c_\nu = 0,09$, $c_{\epsilon 1} = 1,44$, $c_{\epsilon 2} = 1,92$, $\sigma_\kappa = 1,0$, $\sigma_\epsilon = 1,31$. El término de fricción en el fondo, c_f se define como:

$$c_f = g \frac{n^2}{h^{1/3}} = \frac{u_f^2}{|\mathbf{u}|} \quad (2.13)$$

2.3. Modelo de Lodos Activados $N^o 1$ (ASM1)

El ASM1 fue desarrollado por la IAWQ (Internacional Association of Water Quality), actual IWA en 1987 y describe los procesos relacionados con la descomposición de materia carbonosa del agua y del lodo, nitrificación y desnitrificación. Cuenta con 13 componentes en total, de los cuales 7 son sustancias disueltas y 6, sustancias particuladas. En este caso, las ecuaciones del modelo se reescriben con $p = 13$, $\phi_1 = S_I$, $\phi_2 = S_S$, $\phi_3 = X_I$, $\phi_4 = X_S$, $\phi_5 = X_{b,H}$, $\phi_6 = X_{b,A}$, $\phi_7 = X_p$, $\phi_8 = S_O$, $\phi_9 = S_{NO}$, $\phi_{10} = S_{NH}$, $\phi_{11} = S_{ND}$, $\phi_{12} = X_{ND}$, $\phi_{13} = S_{ALK}$. La descripción detallada de las sustancias se puede encontrar en el Apéndice E.

Además, de estos 13 componentes, 7 están relacionados con las sustancias carbonosas del agua y del lodo y se distribuyen como indica la Figura 2.2 y otros 4, son sustancias nitrogenadas, presentadas de forma esquemática en la Figura 2.3. El parámetro de alcalinidad no es esencial al modelo, sin embargo, es una información adicional añadida para permitir detectar indirectamente los riesgos de cambio en el pH. El ASM1 original incluye 8 procesos que se pueden reagrupar en cuatro tipos: 3 de crecimiento, 2 de decaimiento, 2 de

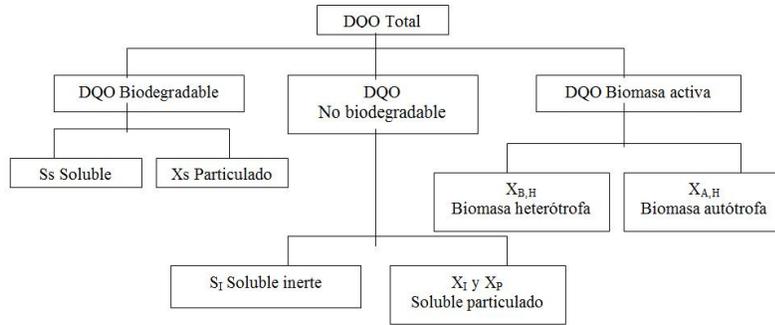


Figura 2.2: Distribución de las sustancias carbonosas que intervienen en el ASM1

hidrólisis y 1 de amonificación. La descripción de los procesos involucrados en el ASM1 está detallada en el Apéndice D. El modelo se presenta en forma matricial en el Apéndice C.

2.4. Modelización de la impulsión y aporte de oxígeno en los discos Orbal

El sistema mecánico de aireación conocido como Proceso Orbal consiste en un conjunto de discos unidos que rotan en torno a un mismo eje y tiene una doble función. Por un lado, a través de la impulsión generada, es el responsable del movimiento del fluido a través de los canales que componen el reactor. Además, suministran el oxígeno necesario para que tenga lugar el proceso de tratamiento biológico del agua residual.

El movimiento del fluido se consigue debido a la transferencia de energía de los discos al fluido. Esta transferencia de energía se mide en la planta en términos de potencia W y su magnitud depende del nivel de sumergencia s_u de los discos en el fluido:

$$W = W(d - z_d) = W(s_u) \tag{2.14}$$

donde d es el nivel superficial de la lámina de agua y z_d es la cota inferior del disco, como se señala en la Figura 2.4.

Esta potencia, puede expresarse como el producto de la variación espacial de la presión ΔP en una sección A del canal, por el caudal Q que atraviesa

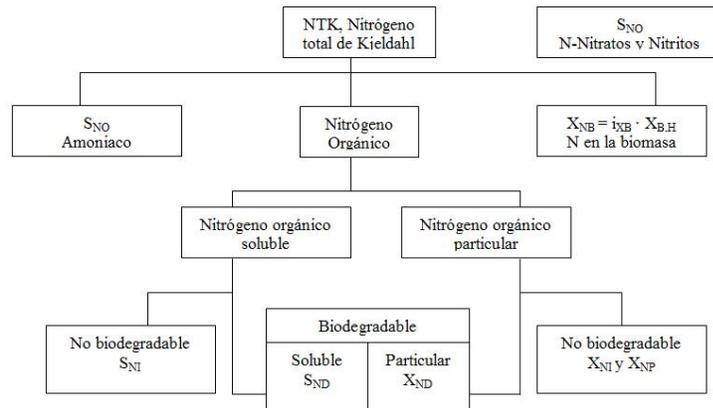


Figura 2.3: Distribución de las sustancias nitrogenadas que intervienen en el ASM1

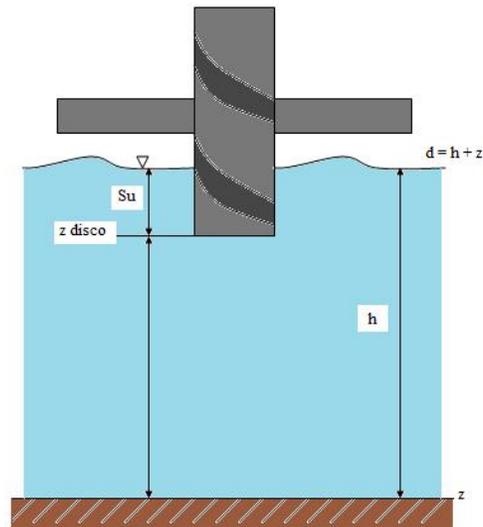


Figura 2.4: Esquema de un disco Orbal en el canal. Vista frontal.

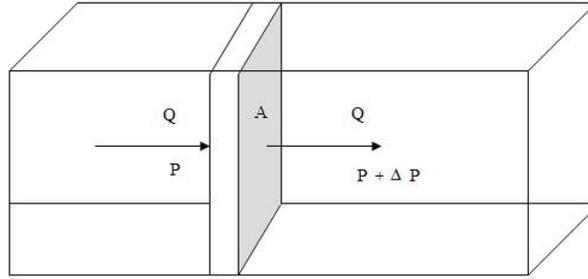


Figura 2.5: Incremento de presión en la sección de transmisión de potencia.

dicha sección,

$$W(s_u) = \Delta P Q \quad (2.15)$$

como se muestra en la Figura 2.5.

La energía transmitida en un intervalo de tiempo δt se calcula a partir de la potencia y también es función de la sumergencia.

$$E(s_u) = W(s_u)\Delta t \quad (2.16)$$

Así mismo, el incremento de presión ΔP se puede definir en términos de altura manométrica de la siguiente manera:

$$\Delta P = \rho_a g \Delta H \quad (2.17)$$

donde g es la aceleración de la gravedad y ρ_a la densidad del agua. Finalmente, la variación espacial de altura que experimentará el flujo se puede expresar en función de la potencia transmitida $W(s_u)$ y del caudal circulante, Q .

$$\Delta H = \frac{W(s_u)}{\rho_a g Q} \quad (2.18)$$

2.5. Esquema numérico

El sistema (2.3) depende del tiempo, es no lineal y contiene convección, difusión y términos fuente y de reacción. Bajo la hipótesis de dominio convec-

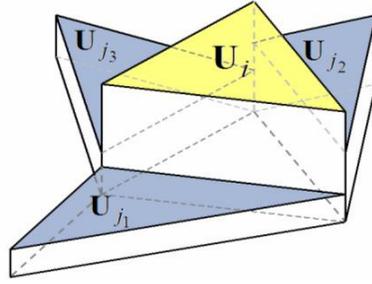


Figura 2.6: Representación constante de las variables en cada celda.

tivo, el sistema se puede clasificar y tratar desde el punto de vista numérico como perteneciente a la familia de los sistemas hiperbólicos.

Las propiedades matemáticas de (2.3) incluyen la existencia de una matriz Jacobiana \mathbf{J}_n , del flujo normal $\mathbf{E}\mathbf{n} = \mathbf{F}n_x + \mathbf{G}n_y$, definida como:

$$\mathbf{J}_n = \frac{\partial \mathbf{E}\mathbf{n}}{\partial \mathbf{U}} = \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{U}}n_x + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{U}}n_y \quad (2.19)$$

Esta matriz Jacobiana será la base para llevar a cabo la discretización numérica que se presenta en este trabajo. Para comenzar la técnica de volúmenes finitos, el sistema (2.3) se integra en el volumen o malla de celdas, Ω :

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \mathbf{U} d\Omega + \int_{\Omega} (\vec{\nabla} \mathbf{E}) d\Omega = \int_{\Omega} \mathbf{S} d\Omega + \int_{\Omega} \mathbf{R} d\Omega + \int_{\Omega} (\vec{\nabla} \mathbf{D}) d\Omega \quad (2.20)$$

se asume que la tercera integral se puede formular de la siguiente manera:

$$\int_{\Omega} \mathbf{S} d\Omega = \oint_{\partial\Omega} (\mathbf{T}\mathbf{n}) dl \quad (2.21)$$

donde \mathbf{T} es una matriz adecuada. Esto lleva a la siguiente formulación:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \mathbf{U} d\Omega + \oint_{\partial\Omega} \mathbf{E}\mathbf{n} dl = \oint_{\partial\Omega} \mathbf{T}\mathbf{n} dl + \oint_{\partial\Omega} (\mathbf{D}\mathbf{n}) dl + \int_{\Omega} \mathbf{R} d\Omega \quad (2.22)$$

Cuando el dominio se subdivide en celdas Ω_i en una malla fija en el tiempo (Figura 2.6) la ecuación (2.22) también se puede aplicar a cada celda.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \mathbf{U}_i d\Omega_i + \sum_{k=1}^{NE} \int_{e_k}^{e_{k+1}} \mathbf{E}_j \mathbf{n}_k l_k = \\ \sum_{k=1}^{NE} \int_{e_k}^{e_{k+1}} \mathbf{T} \mathbf{n}_k l_k + \sum_{k=1}^{NE} \int_{e_k}^{e_{k+1}} \mathbf{D}_k \mathbf{n}_k l_k + \int_{\Omega} \mathbf{R} d\Omega \end{aligned} \quad (2.23)$$

En el primer orden las variables son uniformes en cada celda y la ecuación (2.22) queda reducida a:

$$\frac{(\mathbf{U}_i^{n+1} - \mathbf{U}_i^n)}{\Delta t} A_i + \sum_{k=1}^{NE} (\delta \mathbf{E} - \mathbf{T})_k \mathbf{n}_k l_k = \sum_{k=1}^{NE} \mathbf{D}_k \mathbf{n}_k l_k + \mathbf{R}_i A_i \quad (2.24)$$

donde $\delta \mathbf{E} = \mathbf{E}_j - \mathbf{E}_i$, con \mathbf{E}_j y \mathbf{E}_i el valor de la función \mathbf{E} en la celda vecina j y en la celda i respectivamente y conectadas a través del lado k , \mathbf{n}_k es el vector normal hacia afuera del borde de la celda k , l_k es la longitud correspondiente a dicho borde, NE es el número de bordes que necesita para definir la celda y \mathbf{T}_k

Debido al carácter no lineal del flujo \mathbf{E} , la definición de un flujo Jacobiano aproximado, $\tilde{\mathbf{J}}_{\mathbf{n},k}$ [17] permite una linealización local dando lugar a un sistema de $3 + p$ valores propios reales $\tilde{\lambda}_k^m$ y vectores propios $\tilde{\mathbf{e}}_k^m$, que se construyen con las siguientes variables promedio [11, 12, 13, 14]

$$\begin{aligned} \tilde{u}_k = \frac{u_i \sqrt{h_i} + u_j \sqrt{h_j}}{\sqrt{h_i} + \sqrt{h_j}} \quad \tilde{v}_k = \frac{v_i \sqrt{h_i} + v_j \sqrt{h_j}}{\sqrt{h_i} + \sqrt{h_j}} \quad \tilde{c}_k = \sqrt{g \frac{h_i + h_j}{2}} \\ \tilde{\phi}_1 = \frac{\phi_{1,j} \sqrt{h_i} + \phi_{1,i} \sqrt{h_j}}{\sqrt{h_i} + \sqrt{h_j}} \quad \dots \quad \tilde{\phi}_p = \frac{\phi_{p,j} \sqrt{h_i} + \phi_{p,i} \sqrt{h_j}}{\sqrt{h_i} + \sqrt{h_j}} \end{aligned} \quad (2.25)$$

dando lugar a

$$\begin{aligned} \tilde{\lambda}_k^1 = (\tilde{\mathbf{u}}\mathbf{n} + \tilde{\mathbf{c}})_k \quad \tilde{\lambda}_k^2 = (\tilde{\mathbf{u}}\mathbf{n})_k \quad \tilde{\lambda}_k^3 = (\tilde{\mathbf{u}}\mathbf{n} - \tilde{\mathbf{c}})_k \\ \tilde{\lambda}_k^4 = \tilde{\lambda}_k^5 = \dots = \tilde{\lambda}_k^{3+p} = (\tilde{\mathbf{u}}\mathbf{n})_k \end{aligned} \quad (2.26)$$

y

$$\begin{aligned}
\tilde{\mathbf{e}}_k^1 &= \begin{pmatrix} 1 \\ \tilde{u} + \tilde{c}n_x \\ \tilde{v} + \tilde{c}n_y \\ \tilde{\phi}_1 \\ \tilde{\phi}_2 \\ \vdots \\ \tilde{\phi}_p \end{pmatrix}_k & \tilde{\mathbf{e}}_k^2 &= \begin{pmatrix} 1 \\ -\tilde{c}n_y \\ -\tilde{c}n_x \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}_k & \tilde{\mathbf{e}}_k^3 &= \begin{pmatrix} 1 \\ \tilde{u} - \tilde{c}n_x \\ \tilde{v} - \tilde{c}n_y \\ \tilde{\phi}_1 \\ \tilde{\phi}_2 \\ \vdots \\ \tilde{\phi}_p \end{pmatrix}_k \\
\tilde{\mathbf{e}}_k^4 &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}_k & \tilde{\mathbf{e}}_k^5 &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}_k & \dots & \tilde{\mathbf{e}}_k^{3+p} &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix}_k
\end{aligned} \tag{2.27}$$

Las matrices $\tilde{\mathbf{P}}_k$, t $\tilde{\mathbf{P}}_k^{-1}$, se pueden construir a partir de los vectores propios $\tilde{\mathbf{e}}_k^m$ de $\tilde{\mathbf{J}}_{\mathbf{n},k}$ de forma que la diagonalicen

$$\tilde{\mathbf{J}}_{\mathbf{n},k} = (\tilde{\mathbf{P}}\Lambda\tilde{\mathbf{P}}^{-1})_k \quad \tilde{\mathbf{P}}_k = (\tilde{\mathbf{e}}_k^1 \tilde{\mathbf{e}}_k^2 \tilde{\mathbf{e}}_k^3 \tilde{\mathbf{e}}_k^4 \tilde{\mathbf{e}}_k^5 \dots \tilde{\mathbf{e}}_k^{3+p}) \tag{2.28}$$

También, a partir de la matriz Jacobiana aproximada [17]

$$\tilde{\mathbf{J}}_{\mathbf{n},k}\tilde{\mathbf{e}}_k^m = \tilde{\lambda}_k^m\tilde{\mathbf{e}}_k^m \quad m = 1, 2, 3, \dots, 3+p \tag{2.29}$$

donde Λ son los valores propios de la matriz diagonal $\tilde{\lambda}_k^m$. El problema se reduce a un problema unidimensional proyectado sobre la dirección \mathbf{n} en cada borde de celda [20, 21]. Además, la diferencia del vector \mathbf{U} a través de cada lado de la celda se proyecta sobre la base de vectores propios

$$\delta\mathbf{U}_k = \sum_{m=1}^{3+p} (\alpha\tilde{\mathbf{e}}_k^m)_k \tag{2.30}$$

Donde las expresiones que dan los coeficientes α_k son:

$$\begin{aligned}
\alpha_k^{1,3} &= \frac{\delta h_k}{2} \pm \frac{1}{2\tilde{c}_k} (\delta\mathbf{q}_k - \tilde{\mathbf{u}}_k\delta h_k) \mathbf{n}_k & \alpha_k^2 &= \frac{1}{2\tilde{c}_k} (\delta\mathbf{q}_k - \tilde{\mathbf{u}}_k\delta h_k) \mathbf{n}_{T,k} \\
\alpha_k^4 &= \delta(h\phi_1)_k - (\tilde{\phi}_1\delta h)_k & & \\
\alpha_k^5 &= \delta(h\phi_2)_k - (\tilde{\phi}_2\delta h)_k & \dots & \alpha_k^{3+p} = \delta(h\phi_p)_k - (\tilde{\phi}_p\delta h)_k
\end{aligned} \tag{2.31}$$

con $\mathbf{n}_{T,k} = (-n_y, n_x)$. La contribución de $\delta(\mathbf{En})_k$ en una celda k se puede escribir como:

$$\delta(\mathbf{En})_k = \sum_{m=1}^{3+p} (\tilde{\lambda}\alpha\tilde{\mathbf{e}})_k^m l_k \quad (2.32)$$

Siguiendo la discretización unificada en [11], los términos no conservativos $(\mathbf{Tn})_k$ se escriben de la siguiente manera:

$$(\mathbf{Tn})_k = \left(0 \quad -g\tilde{h}(\delta z + d_{\mathbf{n}}S_f)n_x \quad -g\tilde{h}(\delta z + d_{\mathbf{n}}S_f)n_y \quad 0 \quad 0 \quad \dots \quad 0 \right)_k^T \quad (2.33)$$

donde siguiendo [15]

$$S_{f,k} = \left(\frac{n^2 \tilde{\mathbf{u}}\mathbf{n}|\tilde{\mathbf{u}}|d_{\mathbf{n}}}{\text{máx}(h_i, h_j)^{4/3}} \right)_k \quad (2.34)$$

siendo $d_{\mathbf{n}}$ es la distancia entre los centroides de las celdas que comparten el lado k proyectado sobre la dirección n .

La pendiente del fondo y el término de fricción se pueden descomponer en la base de los vectores propios con el objetivo de asegurar el equilibrio discreto con los términos de flujo (2.32), de tal manera que se asegura en los casos estacionarios con velocidad nula y no nula [15, 18, 22]:

$$(\mathbf{Tn})_k = \tilde{\mathbf{P}}_k \mathbf{B}_k l_k = \sum_{m=1}^{3+p} (\beta^m \tilde{\mathbf{e}}^m)_k l_k \quad (2.35)$$

con $\mathbf{B}_k = \left(\beta_1 \quad \beta_2 \quad \beta_3 \quad \beta_4 \quad \beta_5 \quad \dots \quad \beta_{3+p} \right)_k^T$. Los coeficientes son

$$\begin{aligned} \beta_k^{1,3} &= \mp \frac{\tilde{c}_k}{2} (\delta z + d_{\mathbf{n}}S_f)_k & \beta_k^2 &= 0 \\ \beta_k^4 &= \beta_k^5 = \dots = \beta_k^{3+p} & &= 0 \end{aligned} \quad (2.36)$$

El esquema descentrado explícito de primer orden para un sistema no-reactivo y no-difusivo toma la forma

$$\mathbf{U}_i^* = \mathbf{U}_i^n + \Delta t \sum_{k=1}^{NE} \Psi_{i,k}^n \quad (2.37)$$

donde la contribución de cada lado de la celda, $\Psi_{i,k}$, sólo recoge la información en la dirección entrante, Figura (2.7):

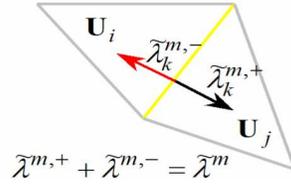


Figura 2.7: Selección de la información necesaria en el método descentrado.

$$\Psi_{i,k} = \sum_{m=1}^{3+p} ((\tilde{\lambda}^- \alpha - \beta^-) \tilde{\mathbf{e}}_k^m l_k / A_i) \quad (2.38)$$

donde $\tilde{\lambda}^- = \frac{1}{2}(\tilde{\lambda} - |\tilde{\lambda}|)$ y $\beta^- = \frac{1}{2}(\beta - |\beta|)$. El valor en (2.37) proporciona una predicción para un sistema no-difusivo y no-reactivo, tras lo cual, el término de reacción se puede añadir de forma simple

$$\mathbf{U}_i^{**} = \mathbf{U}_i^* + \mathbf{R}_i^* \quad (2.39)$$

Finalmente, la solución, incluyendo también los términos difusivos es

$$\mathbf{U}_i^{n+1} = \mathbf{U}_i^{**} + \mathbf{D}_i^{n+1} \quad (2.40)$$

El valor final, incluyendo la difusión, se computa a través de un método explícito promediado sobre el término de difusión en un segundo paso [11]. En el caso de introducir el aporte energético de los discos Orbal, se lleva a cabo una discretización análoga al modelo inicial. El término no conservativos o término fuente $(\mathbf{Tn})_k$ en el lado compartido entre dos celdas vecinas, se escribe de la siguiente manera:

$$(\mathbf{Tn})_k = \left(0, -g\tilde{h}\Delta H_t n_x, -g\tilde{h}\Delta H_t n_x, \dots, 0 \right)_k^T \quad (2.41)$$

donde $\Delta H_t = (\delta z + d_n S_f - \Delta H)$.

Si se compara la ecuación (2.41) con la del modelo inicial (2.33), se observa que en el nuevo modelo además de incluir los efectos debidos a la pendiente del fondo δz y a la pérdida de energía por rozamiento $d_n S_f$, se incluye el aporte de energía debido a los discos. Suponiendo que ΔH es uniforme en toda la sección del orbal, los nuevos coeficientes en (2.36) se escriben como:

$$\begin{aligned} \beta_k^{1,3} &= \mp \frac{\tilde{c}_k}{2} (\delta z + d_{\mathbf{n}} S_f - \Delta H)_k & \beta_k^2 &= 0 \\ \beta_k^4 &= \beta_k^5 = \dots = \beta_k^{3+p} & &= 0 \end{aligned} \quad (2.42)$$

Por otro lado, el oxígeno transmitido, que depende también de la submergencia, $Q_{O_2} = Q_{O_2}(s_u)$, se computa como la masa aportada en el intervalo de tiempo Δt y la cantidad $Q_{O_2} \Delta t$ se reparte uniformemente en cada sección.

Capítulo 3

Estudio Previo. Flujo en un codo de 90° .

En el capítulo anterior se presentó un esquema numérico diseñado para resolver flujos bidimensionales y de superficie libre, a la par que transporta diferentes especies con la posibilidad de reacción y difusión. En esta parte del trabajo, se presenta un estudio numérico, sobre el flujo en un canal, con datos experimentales de la velocidad y de turbulencia en ciertos puntos. El modelo κ - ϵ es un caso particular del modelo de convección-reacción-difusión general, en el que las cantidades transportadas son la energía cinética turbulenta, κ , y la disipación de la energía cinética turbulenta, ϵ . Estas dos variables se transportan, reaccionan y se difunden para determinar la viscosidad del campo de velocidades del flujo. La comparación entre la información obtenida a partir de las simulaciones utilizando el modelo de turbulencia κ - ϵ promediado en la vertical [16] con los datos experimentales, permite evaluar las prestaciones del esquema numérico propuesto en un caso que aún a complicados fenómenos de transporte, reacción y la difusión.

3.0.1. Descripción del experimento.

Los ensayos experimentales fueron llevados a cabo en el laboratorio hidráulico del CITEEC (Centro de Innovación Tecnológica en Edificación e Ingeniería Civil, Universidad de La Coruña)[3]. La velocidad tridimensional se midió con un Velocímetro Doppler Acústico (Sontek ADV). El volumen de control del ADV es un cilindro de 6 mm de altura con un diámetro de 4 mm (75 mm^3) que se sitúa a una distancia de 5 cm del ADV con el objeto de eliminar

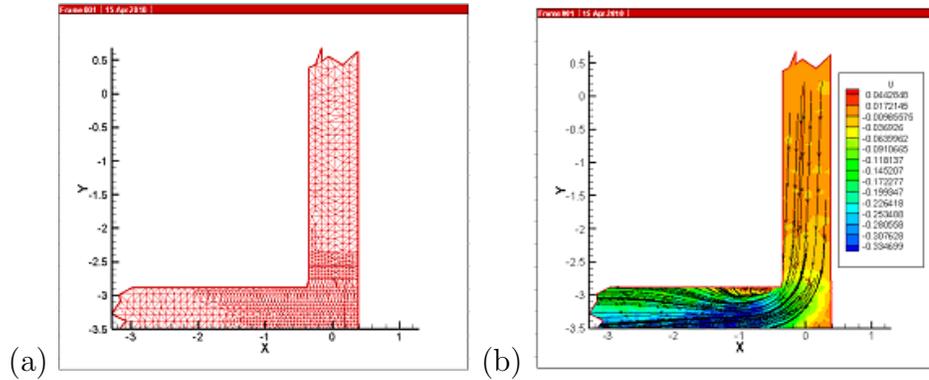


Figura 3.1: (a) Puntos experimentales de toma de medidas. (b) Líneas de corriente en el canal de estudio

interferencias en el flujo. Los experimentos se llevaron a cabo en un canal rectangular de cemento formado por dos secciones rectilíneas unidas por un codo de 90°. La primera sección posee una anchura de 0.86 m con un fondo liso. Al final de la primera sección, justo antes del codo, hay un pequeño escalón que supone un cambio en la elevación del fondo de $z_b = -0,013$ m. La segunda sección dispone de una anchura de 0.72 m con un fondo liso (Figura 3.1). La velocidad experimental se midió en 1029 puntos distribuidos en un plano horizontal situado aproximadamente en el punto medio entre el fondo y la superficie libre. En cada punto de medida se tomaron 40 muestras instantáneas. El caudal total de agua a la entrada fue de 59.5 l/s y al final del canal se fijó una profundidad de 0.180 m. Con estas condiciones de contorno, la velocidad media a la entrada del canal era de 0.20 m/s con una profundidad de 0.173 m.

En la primera sección la velocidad es bastante uniforme con alguna pequeña perturbación y la velocidad vertical es prácticamente cero. Aparece una pequeña burbuja de recirculación en la parte interna del codo. Al mismo tiempo, se genera en el codo un remolino vertical que abarca prácticamente toda la anchura del canal debido al cambio en la dirección del flujo. Este flujo secundario se puede identificar de forma clara en la figura que muestra el campo de velocidades en dirección y en la zona cercana al codo. El efecto del codo está presente en el flujo hasta el final de la segunda sección del canal, aunque el flujo secundario desaparece casi por completo a 1.5 m aguas abajo del codo.

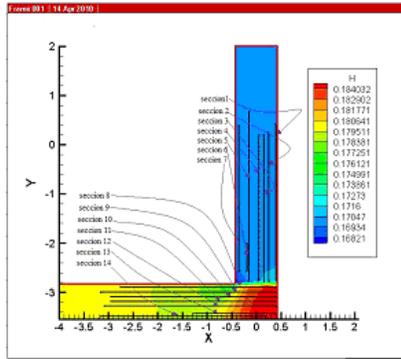


Figura 3.2: Secciones de estudio

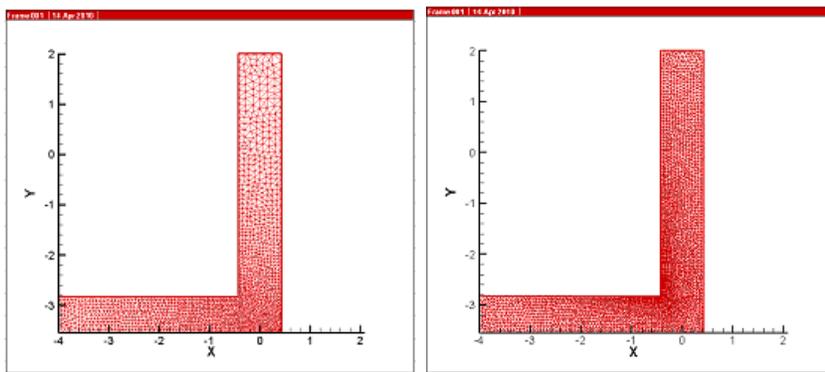


Figura 3.3: (a) Malla M_1 . (b) Malla M_2 .

3.0.2. Simulación numérica y Resultados

A continuación se presentan los resultados obtenidos con la simulación numérica para diferentes secciones dentro de las ramas en dirección x e y que componen el canal, así como la comparación con los datos experimentales de 14 secciones distribuidas por el canal; 7 de ellas situadas en la rama en dirección x y otras 7 en la rama en dirección y . Para cada sección se compara el resultado del modelo con y sin turbulencia en dos mallas M_1 y M_2 de diferente densidad, conteniendo M_2 un número mayor de celdas de cálculo (Figura 3.3).

Como se aprecia en la Figura 3.5 la correspondencia entre los resultados experimentales (azul) y los resultados numéricos promedio en la vertical simulados (rojo) es aceptable en el caso que incluye el modelo promediado de tur-

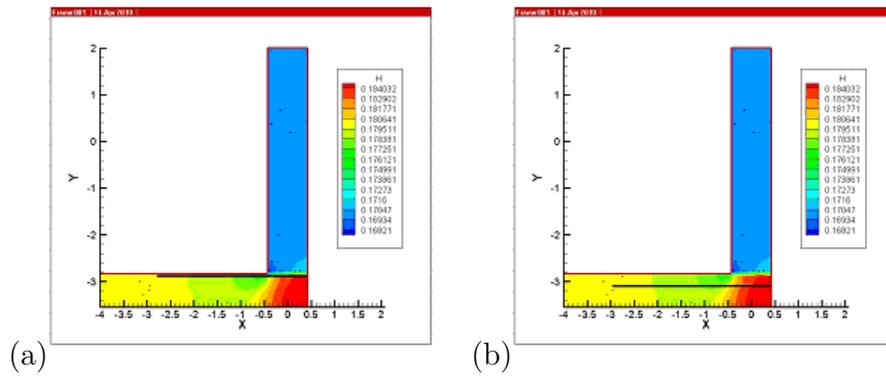


Figura 3.4: (a) Localización de la Sección 8; (b) Localización de la Sección 11

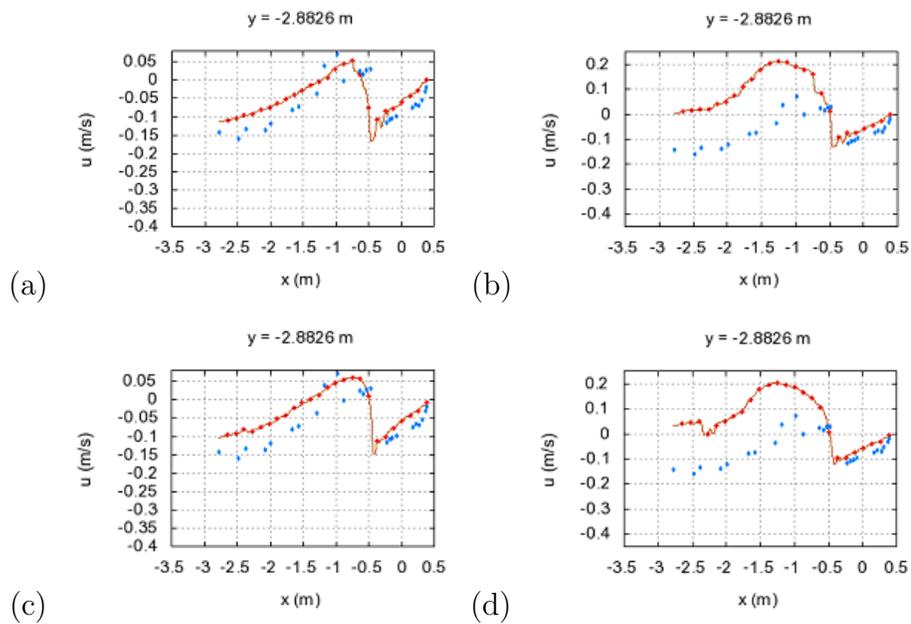


Figura 3.5: Velocidad u (m/s) en la Sección 8: (a) con turbulencia en M_1 ; (b) sin turbulencia en M_1 ; (c) con turbulencia en M_2 ; (d) sin turbulencia en M_2 .

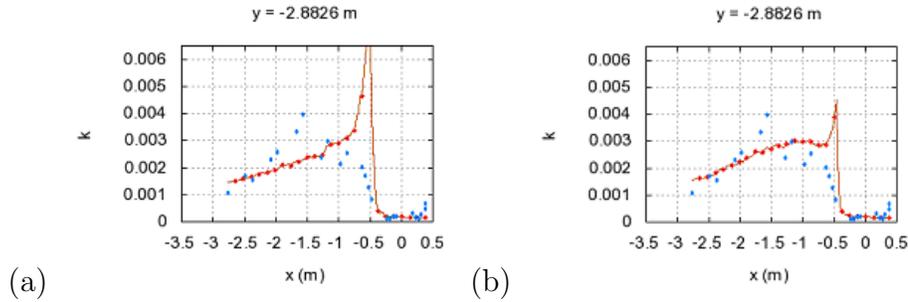


Figura 3.6: Energía cinética turbulenta, k , en la sección 8: (a) Malla M_1 . (b) Malla M_2 .

bulencia. También se ha analizado la variación espacial de la energía cinética turbulenta promedio k . Es interesante describir los resultados en la sección 8, mostrados en la Figura 3.6. Se observa cómo el codo genera un aumento brusco de la turbulencia, mayor en el caso de la malla gruesa, que se va disipando progresivamente aguas abajo. El refinamiento de la malla genera una convergencia hacia una mejor aproximación a los datos experimentales.

La evolución espacial de la velocidad v , en la Sección 8 se presenta en la Figura 3.7. En este caso, el efecto del codo sobre esta variable se visualiza claramente como una caída brusca y la correspondencia entre los puntos experimentales y los obtenidos de la simulación es correcta en cualquier caso. Las Figuras 3.8–3.10 muestran los resultados para la Sección 10. En este caso, se observan las mismas tendencias comentadas para la sección de medida 8, pero con un efecto del codo menos pronunciado por encontrarse esta sección más alejada de la parte interior del mismo.

3.1. Conclusiones

En este caso de laboratorio el esquema numérico ofrece resultados adecuados cuando el sistema de ecuaciones se amplía para incorporar el modelo de turbulencia promediado. A la vista de los resultados se puede concluir que el esquema numérico presentado es válido para una situación con una variación rápida de las cantidades transportadas dentro del fluido en un caso donde participan complejos procesos de reacción y difusión. Por ello, se asume que dicho modelo es válido para el proceso de estudio de este proyecto, en el que el flujo es lento y relativamente ordenado y las reacciones y transporte de

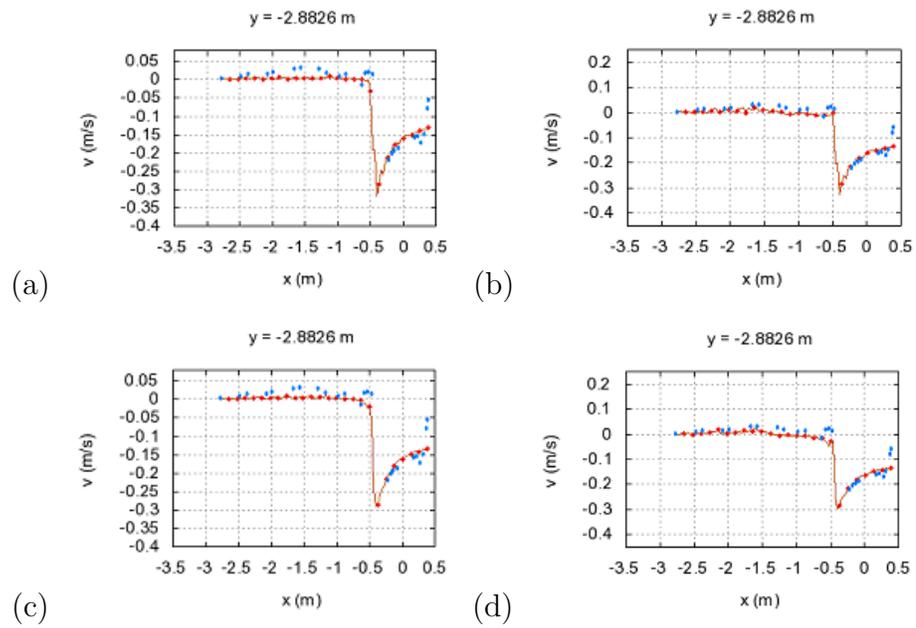


Figura 3.7: Velocidad u (m/s) en la sección 8: (a) con turbulencia en M_1 ; (b) sin turbulencia en M_1 ; (c) con turbulencia en M_2 ; (d) sin turbulencia en M_2 .

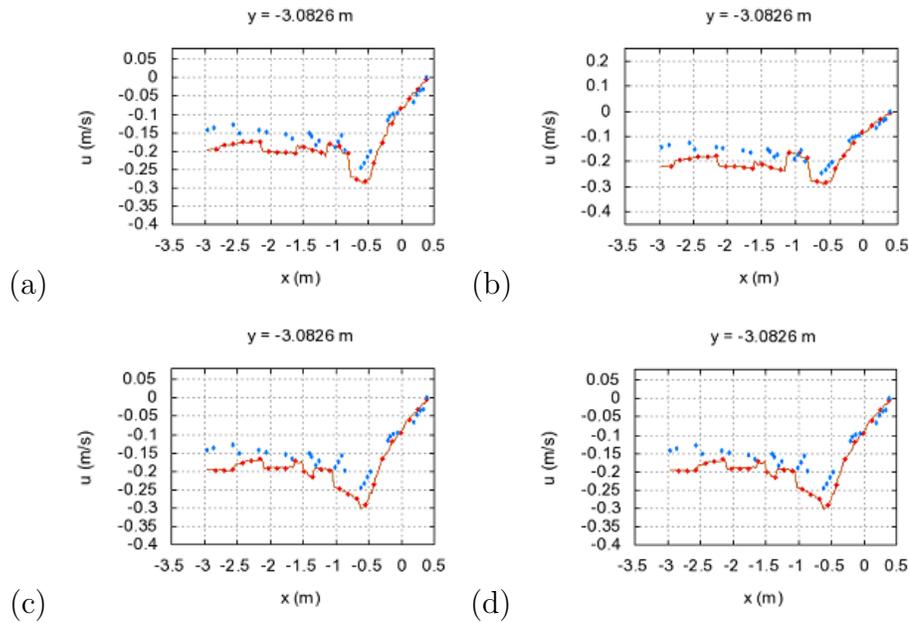


Figura 3.8: Velocidad u en la sección 10: (a) con turbulencia en M_1 ; (b) sin turbulencia en M_1 ; (c) con turbulencia en M_2 ; (d) sin turbulencia en M_2 .

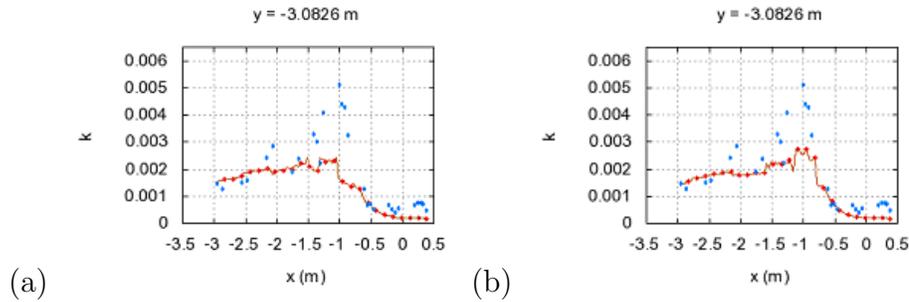


Figura 3.9: Energía cinética turbulenta, k , en la sección 10: (a) Malla M_1 . (b) Malla M_2 .

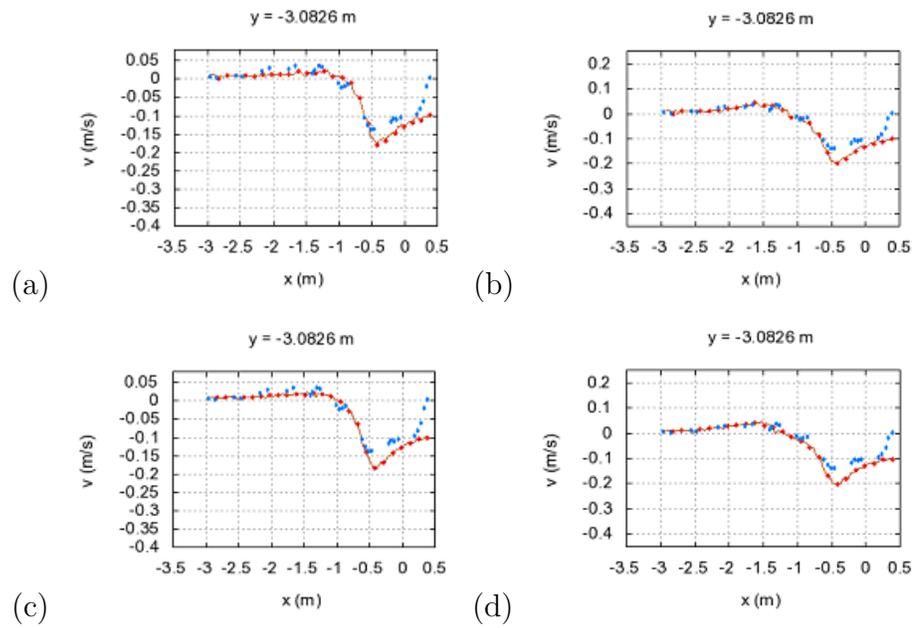


Figura 3.10: Velocidad v en la sección 10: (a) con turbulencia en M_1 ; (b) sin turbulencia en M_1 ; (c) con turbulencia en M_2 ; (d) sin turbulencia en M_2 .

solutos dentro del fluido tiene lugar de forma muy lenta.

Si como hemos dicho, el modelo κ - ϵ se caracteriza por tener una gran sensibilidad y una gran rapidez de respuesta a las variaciones espaciales y temporales tanto del flujo como de las variables transportadas, en casos donde el sistema de ecuaciones contenga términos donde los procesos reactivos sean más lentos y no interfieran en el flujo (como el modelo ASM1), podemos suponer que el esquema numérico generará información fiable.

Capítulo 4

Simulación de procesos de lodos activados.

En este capítulo se analiza el comportamiento del esquema numérico propuesto aplicado a un proceso de lodos activados, que se caracteriza por una variación lenta de las cantidades transportadas dentro del fluido y por una cinética lenta de los procesos de reacción.

Para poder contrastar la calidad de los esquemas numéricos es necesario comparar sus soluciones para casos con soluciones exactas. Para este fin, se ha escogido el modelo de Monod, que aún siendo un caso idealizado, es frecuentemente nombrado en la literatura.

El modelo de convección-reacción-difusión, anteriormente descrito se ha completado con la programación de las ecuaciones incluidas en el Modelo de Lodos Activados N°1 (ASM1). Este modelo, que define el proceso biológico en el tratamiento de lodos activados, ofrece una descripción más realista del proceso ya que tiene en cuenta los fenómenos de descomposición de materia carbonosa, nitrificación y desnitrificación. Con el esquema numérico completo, ya introducidas las ecuaciones cinéticas del ASM1, se realizan una serie de casos test para analizar si la respuesta del sistema. Estos casos contemplan la evolución de las sustancias dentro del reactor en estado estacionario y transitorio, la influencia de la densidad de la malla de cálculo, la evolución del sistema frente a distintas situaciones de aporte de oxígeno, la respuesta del sistema frente a un aumento en el caudal de agua residual a tratar y el efecto de los aireadores mecánicos tipo Orbal en el flujo.

Como primer paso y para poder explicar y determinar si los elementos introducidos en la simulación numérica son correctos se utiliza una dominio

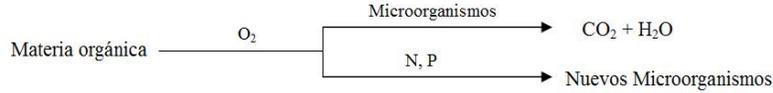


Figura 4.1: Esquema simplificado de la reacción de consumo de materia orgánica.

de cálculo con una geometría sencilla y un flujo de masa estacionario. El sistema es un canal de sección rectangular, recto, con una anchura de 1 m, una longitud de 600 m, con una pendiente en el fondo nula y sin fricción. En todos los casos se parte de una situación inicial en la que la altura de la columna de agua h tiene un valor de 1 m y circula agua limpia con una velocidad de 0.01 m/s.

4.1. Modelo de Monod

Como punto de partida, se ensayó la respuesta de la ecuación cinética del modelo de Monod. Este modelo representa un caso ideal en el que el consumo de sustrato, S , depende de su concentración y de la concentración de microorganismos, $X = cte$. La concentración de microorganismos se supone constante en todo el reactor. La concentración de oxígeno disuelto en el agua no interviene en el proceso. La expresión que representa el transporte y consumo de sustrato, S , para un caso unidimensional con h constante es:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} = r_{su} \quad (4.1)$$

donde el Modelo de Monod establece que:

$$r_{su} = -kX \frac{S}{K_s + S} = -\frac{\mu_m X}{Y} \frac{S}{K_s + S} \quad (4.2)$$

siendo r_{su} , la tasa de consumo de materia orgánica, μ_m la tasa máxima de crecimiento bacteriano, K_s la constante de semisaturación de materia orgánica e Y el rendimiento de consumo de materia orgánica por parte de los microorganismos. Las expresiones del Modelo de Monod se encuentran explicadas de forma más detallada en el Apéndice A. Si asumimos que el flujo es estacionario, la ecuación (4.1) puede rescribirse como

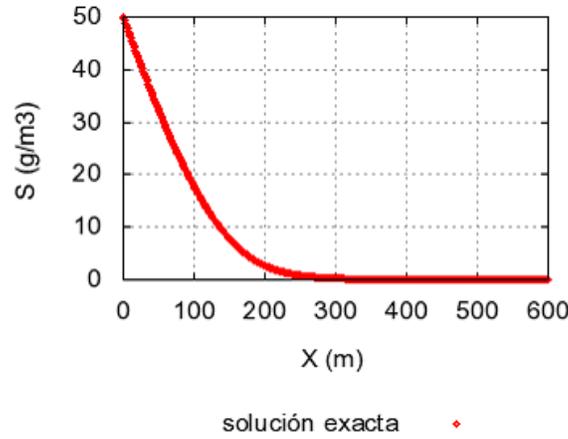


Figura 4.2: Representación gráfica de los valores exactos calculados a partir del Modelo de Monod

$$u \frac{dS}{dx} = r_{su} \quad (4.3)$$

y si se separan las variables queda:

$$\frac{K_s + S}{S} dS = -\frac{\mu_m X}{Y} \frac{1}{u} dx \quad (4.4)$$

Integrando (4.4) en un dominio de longitud $[0, x]$ con $S(x=0) = S_0$:

$$\int_{S_0}^S \left(\frac{K_s}{S} + 1 \right) dS = \int_0^x \left(-\frac{\mu_m X}{Y} \frac{1}{u} \right) dx \quad (4.5)$$

obtenemos la variación del sustrato S en el espacio:

$$K_s \ln S(x) + S(x) = S_0 + K_s \ln S_0 - \left(-\frac{\mu_m X}{Y} \frac{x}{u} \right) \quad (4.6)$$

Para obtener la distribución espacial de materia orgánica a lo largo del reactor, se calculó el valor de S para distintos puntos de x . Para resolver (4.6) se creó un programa que, mediante un proceso iterativo de búsqueda de mínimos, permitió obtener el valor exacto de S a lo largo de todo el reactor (Figura 4.2).

El siguiente paso fue la introducción de la expresión del Modelo de Monod (4.2) como término de reacción del modelo numérico, en el que $p = 1$ y $\phi = S$

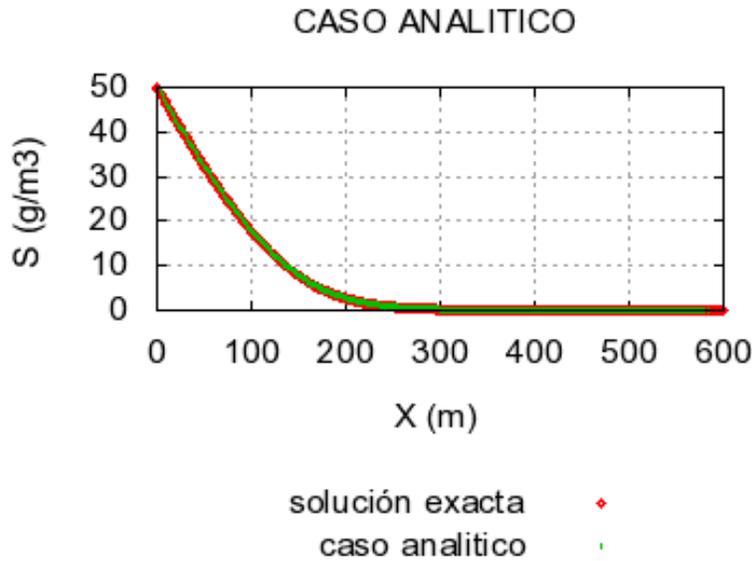


Figura 4.3: Comparación entre los puntos calculados con la solución exacta y la simulación del caso analítico

(2.4). Para comprobar esta nueva modificación del modelo numérico con un caso ideal, simplificado, se realizó un caso test, en el que se llevó a cabo una simulación del nuevo modelo sobre una malla triangular formada por 1200 celdas. El caudal a la entrada se fijó en $0.01 \text{ m}^3/\text{s}$ y a la salida existía una altura total de 1 m. Se partió de una situación inicial en la que el canal se encuentra con agua limpia que lleva una velocidad media de 0.01 m/s y se introducen 50 g/m^3 de sustrato, S , y $51,1 \text{ g/m}^3$ de microorganismos, X . En la Figura 4.3 se observa cómo los resultados de la simulación del caso test se corresponden con la representación de la solución exacta.

4.2. Modelo de Lodos Activados n 1 (ASM1)

El Modelo de Monod corresponde a un sistema ideal demasiado simplista. Para realizar ensayos más próximos a la realidad, se sustituyeron los términos fuente anteriormente formulados según una cinética tipo Monod por las expresiones correspondientes del modelo ASM1.

4.2.1. Caso sin aireación. Malla de alta densidad

En este apartado se describen una serie de simulaciones en las que se trabaja sobre la misma malla y las mismas condiciones iniciales que en el caso analítico. Inicialmente, el canal se encuentra lleno de agua hasta una altura de 1 m. El agua est limpia y se mueve con una velocidad de 0.01 m/s. Los casos se describen en la Tabla 4.1, donde las zonas marcadas (*) indican los procesos y especies que intervienen en cada caso. Los diferentes casos están ordenados pasando de menor a mayor complejidad. En el Caso 1 se imponen las mismas condiciones con las que se ha calculado la solución exacta y en los siguientes entran en juego mayor número de especies, con el objeto de estudiar su influencia en el proceso.

Cuadro 4.1: Resumen de los casos 1D sin aireación en malla de alta densidad

Caso test	1	2	3	4	5	6
Term. Fuente	ASM1	ASM1	ASM1	ASM1	ASM1	ASM1
Proc. Aeróbios	*	*	*	*	*	*
Mic. Heterótrofos	*	*	*	*	*	*
Proc. Anaeróbios4		*	*	*	*	*
Mic. Autótrofos		*	*	*	*	*
Alcalinidad			*		*	*
Sust. Nitrogenadas				*	*	*
Inertes						*

Con este modelo se pueden realizar simulaciones tanto en estado estacionario como en transitorio. La evolución temporal de las sustancias que intervienen en el Caso 2 se representa en la Figura 4.4

Los escalones que se observan en la Figura 4.4, representan el avance del frente de agua residual de la entrada a través del canal. En estado estacionario, la materia orgánica soluble presenta un perfil muy poco pronunciado. Este perfil se observa en los primeros metros del canal, quedando después la concentración de esta sustancia constante. Se observa que la tendencia del mismo es la misma que predecía el Modelo de Monod, sin embargo, la reacción en el caso no ideal ocurre en una medida mucho menor. En concreto, para el Caso 2, se reduce una cantidad de materia orgánica soluble del 1% frente al consumo total de la misma que proporcionaban los cálculos del caso ideal. Para el caso de la materia orgánica particulada, X_S , la Figura

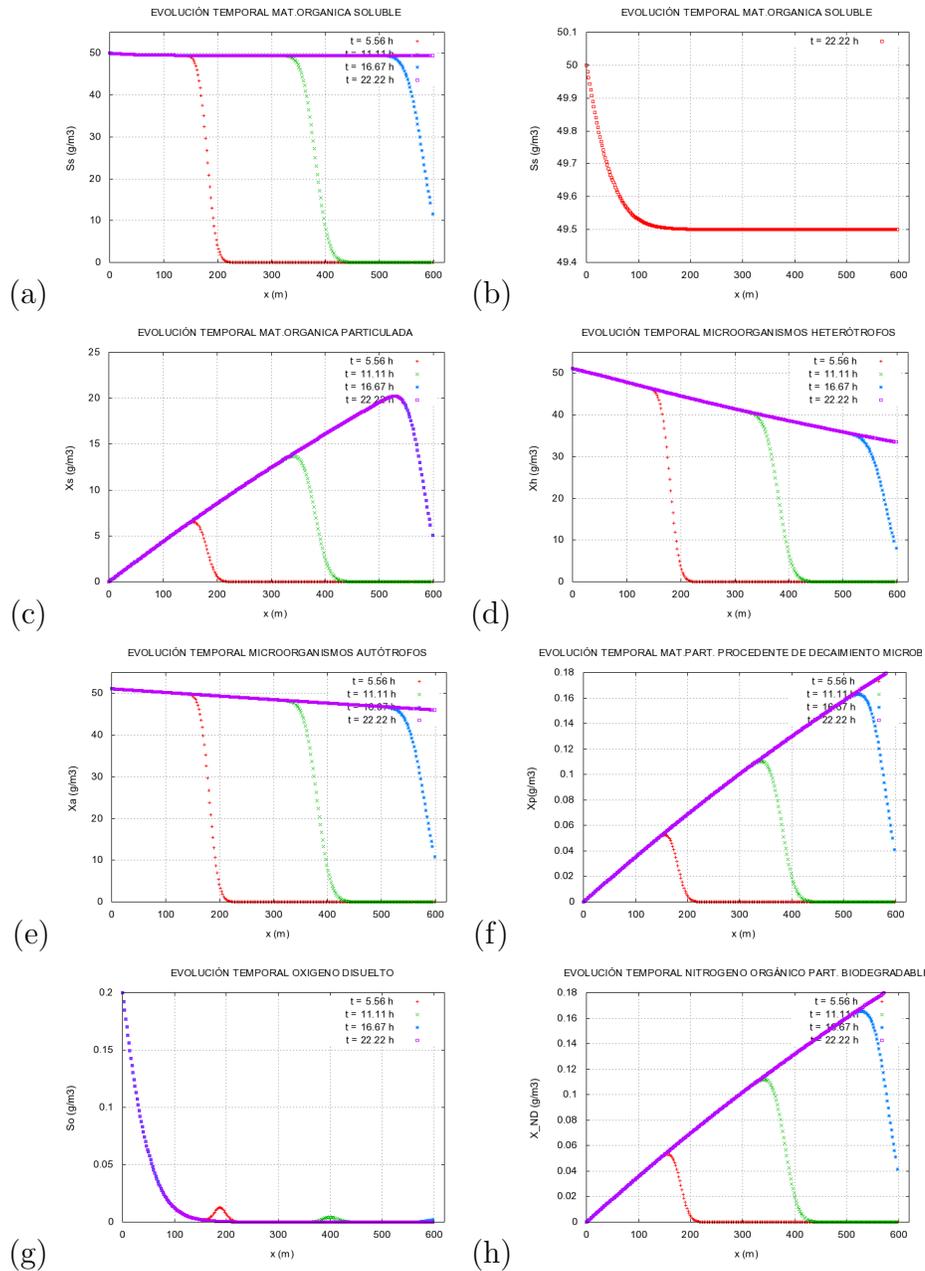


Figura 4.4: Evolución temporal de las sustancias que intervienen en el Caso 2. (a), (b) Materia orgánica soluble. (c) Materia orgánica de degradación lenta. (d) Biomasa heterótrofa activa. (e) Biomasa autótrofa activa. (f) Materia particulada procedente del decaimiento de la biomasa. (g) Oxígeno disuelto. (h) Nitrógeno orgánico particulado biodegradable.

Cuadro 4.2: Valores de los parámetros ASM1 [7]

		Caso 1	Resto de los casos
$\mu_{H,max}$	s^{-1}	$6,94 \cdot 10^{-6}$	$6,94 \cdot 10^{-6}$
K_{OH}	g/m^3	0.2	0.2
K_{NO}	g/m^3	0.5	0.5
K_{NH}	g/m^3	1	1
K_{OA}	g/m^3	0.4	0.4
K_S	g/m^3	100	100
η_g	–	0	0.8
$\mu_{A,max}$	s^{-1}	0	$9,259 \cdot 10^{-6}$
b_H	s^{-1}	$7,18 \cdot 10^{-6}$	$7,18 \cdot 10^{-6}$
b_A	s^{-1}	0	$1,74 \cdot 10^{-6}$
k_A	$m^3 g^{-1} s^{-1}$	0	0.08
k_h	s^{-1}	0	$8,33 \cdot 10^{-4}$
K_x	g/m^3	0.003	0.003
η_h	–	0	0.4
ρ_7	–	0	0
Y_A	–	0.24	0.24
Y_H	–	0.67	0.67
f_p	–	0.0008	0.0008
i_{XB}	–	0.086	0.086
i_{XP}	–	0.06	0.06

4.4, presenta una tendencia creciente y aproximadamente lineal conforme se evoluciona hacia el estado estacionario. Esta tendencia creciente se explica porque en este caso, la evolución de X_S , depende únicamente de las tasas de decaimiento de microorganismos heterótrofos y autótrofos, que son siempre términos positivos o de aporte de la sustancia.

En la formulación del ASM1 completo, la evolución de la concentración de X_S , que supone un consumo de esta especie, es la hidrólisis de materia orgánica, que consiste en la ruptura y solubilización de los flocs biológicos que forman X_S , por efecto de las encimas extracelulares. El resultado es la producción de sustrato soluble fácilmente biodegradable, S_S , que se utiliza luego en el crecimiento. En el caso que representa la Figura 4.4, Caso 2, este último proceso no se tiene en cuenta, por lo que la evolución de esta sustancia depende únicamente de las tasas de decaimiento de la biomasa que

Cuadro 4.3: Distribución de concentraciones del agua residual a tratar

Casos test		1	2	3	4	5	6
S_I	$gDQO/m^3$	0	0	0	0	0	25
S_S	$gDQO/m^3$	50	50	50	50	50	50
X_I	$gDQO/m^3$	0	0	0	0	0	25
X_S	$gDQO/m^3$	0	0	0	0	0	100
$X_{b,H}$	$gDQO/m^3$	51.1	51.1	51.1	51.1	51.1	51.1
$X_{b,A}$	$gDQO/m^3$	0	51.1	51.1	51.1	51.1	51.1
X_p	$gDQO/m^3$	0	0	0	0	0	0
S_O	g/m^3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
S_{NO}	$gN - NO/m^3$	0	$10 \cdot 10^{-11}$	$10 \cdot 10^{-11}$	1	1	1
S_{NH}	$gN - NH_3/m^3$	0	$10 \cdot 10^{-11}$	$10 \cdot 10^{-11}$	10	10	10
S_{ND}	gN/m^3	0	0	0	5	5	5
X_{ND}	gN/m^3	0	0	0	10	10	10
S_{ALK}	g/m^3	0	0	189	0	189	189

es siempre positiva, lo que explica la forma del perfil.

La población de microorganismos heterótrofos, $X_{b,H}$, presenta una tendencia decreciente y lineal. La evolución de esta especie viene determinada por dos tasas de crecimiento, aerobio y anaeróbico (procesos positivos, de aporte de sustancia) y una tasa de decaimiento (consumo). A la vista de la tendencia decreciente que se observa en la Figura 4.4, en este caso, tiene más importancia la tasa de decaimiento que las de crecimiento. De forma análoga a la evolución de los microorganismos heterótrofos, para los microorganismos autótrofos, $X_{b,A}$, existe un término de crecimiento en medio aerobio y otro de decaimiento, siendo éste último de mayor importancia dada la tendencia descendente del perfil, aunque la pendiente es menos pronunciada que en el caso de los microorganismos heterótrofos.

En la evolución de la materia particulada procedente del decaimiento de biomasa, X_p , intervienen únicamente los procesos de decaimiento tanto de microorganismos autótrofos como heterótrofos, que en ambos casos se trata de términos lineales de aporte de sustancia, con lo que se explica la tendencia creciente del perfil.

En el caso del oxígeno disuelto en el agua, S_O , se llega a un estado estacionario que presenta un perfil longitudinal que concuerda con el de la mate-

ria orgánica soluble. Como se aprecia en la Figura 4.4, el oxígeno se consume por completo en los 150 primeros metros del canal. Si se compara con el perfil de materia orgánica soluble, es en este mismo punto donde el perfil se estabiliza y se vuelve constante; cuando el oxígeno se agota, la reacción se para. El pico que aparece a tiempos más cortos, se debe a zonas de baja concentración de biomasa, en las cuales el consumo de oxígeno por parte de los microorganismos es menor. Es necesario señalar que este pico aparece en el mismo lugar donde se sitúa el frente de avance de agua residual. Con el paso del tiempo el pico avanza con el frente y se dispersa, llegando a desaparecer por completo.

Tras esta batería de ensayos y a la vista de los resultados, se puede concluir que, en las mismas condiciones, el rendimiento de la reacción biológica es muy inferior en el caso real (ecuaciones ASM1) que en el caso ideal (Modelo de Monod). Además, al ir avanzando en los casos, que supone la incorporación de más sustancias al proceso, el rendimiento también se ve afectado, disminuyendo la tasa de eliminación de materia orgánica soluble. Al incorporar la influencia de las sustancias nitrogenadas, entra en juego el proceso de amonificación del nitrógeno orgánico soluble. Este proceso se modeliza con una cinética de orden 1 respecto a S_{ND} y respecto a la biomasa heterótrofa. Es frecuente que se omita este proceso en las versiones modificadas del ASM1 debido a su rapidez. La rapidez de este proceso se refleja en la caída brusca de la concentración de oxígeno disuelto y de nitrógeno orgánico biodegradable soluble, S_{ND} y esto, a su vez se traduce en un incremento de la concentración de materia orgánica soluble, S_S , de la concentración de alcalinidad, S_{ALK} y de la concentración de sustancias amoniacales, S_{NH_4} , como se observa en la Figura 4.5.

4.2.2. Caso sin aireación. Malla de baja densidad

Con el fin de estudiar la influencia del tamaño de la malla se repiten los casos del apartado anterior, en las mismas condiciones, pero sobre una malla menos densa, formada por 600 celdas, lo que supone la mitad de celdas de cálculo que la malla anterior, que tenía 1200.

Como se observa en la Figura 4.6, para ambos casos, coinciden los resultados calculados con las diferentes mallas. Esto se debe a que el proceso biológico que se trata en este proyecto, es lo suficientemente lento para reducir el número de celdas de cálculo sin que esto repercuta en los resultados. Además, trabajar con menos celdas supone realizar menos cálculos, con lo que se con-

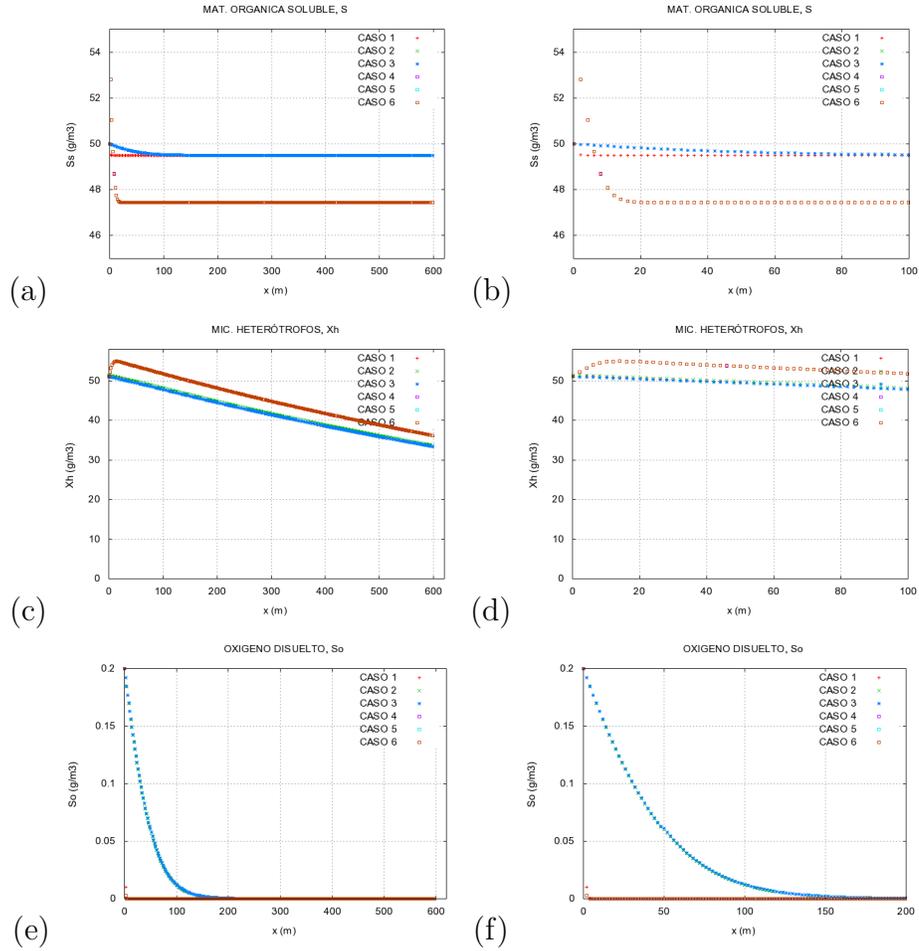


Figura 4.5: Comparativa de los casos 1D en estado estacionario. (a) y (b) Materia orgánica soluble, rápidamente degradable. (c) y (d) Biomasa heterótrofa activa. (e) y (f) Oxígeno orgánico disuelto.

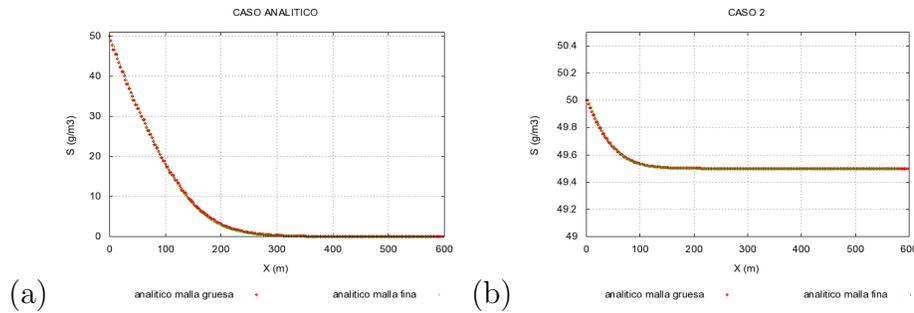


Figura 4.6: Comparativa del perfil longitudinal de concentración de Materia orgánica soluble, en estado estacionario. (a) Caso analítico. (b) CASO 2.

sigue reducir el tiempo de duración de la simulación de manera considerable. A partir de este momento, los ensayos que siguen se llevarán a cabo con esta malla.

4.2.3. Evaluación de la influencia de la concentración de oxígeno disuelto

Como se ha comprobado en los casos anteriores, las simulaciones implementando el ASM1 presentan un rendimiento de remoción de materia orgánica soluble muy inferior al caso ideal que supone el Modelo de Monod. Hay que recordar, que en las expresiones que da el Modelo de Monod, no interviene la concentración de oxígeno disuelto en el agua, mientras que en el ASM1 es una de las variables principales. Para estudiar la influencia de la concentración de oxígeno disuelto, se realizaron una serie de simulaciones aportando oxígeno en forma de fuente. Se decidió introducir el oxígeno por este método para simular el aporte que producirían los aireadores mecánicos, pero al mismo tiempo, evitar las variaciones en el flujo que éstos ocasionan y de esta manera, poder observar únicamente, el efecto que se produce al variar la concentración de oxígeno disuelto.

Los ensayos se llevaron a cabo en el mismo canal que en los casos anteriores y los cálculos se realizaron sobre la malla gruesa presentada en la sección anterior. Las condiciones de entrada, así como la situación inicial se mantienen igual que en los casos anteriores. Estos ensayos, son simulaciones del Caso 1, que es el más sencillo, pero con diferentes cantidades aportadas de oxígeno. La descripción de los diferentes ensayos se presenta en la Tabla

Cuadro 4.4: Resumen de los casos 1D para el estudio de oxígeno disuelto

Test case	1	2	3
N Fuentes	1	45	54
Localización Fuentes	x=50 m	$50 \leq x \leq 500$ (cada 10 m)	$50 \leq x \leq 600$ (cada 10 m)
Caudal O_2 aportado	$2,35 \cdot 10^{-4}$ gO_2/s	$2,35 \cdot 10^{-3}$ $gO_2/2$ por fuente	$2,35 \cdot 10^{-2}$ $gO_2/2$ por fuente

La concentración de saturación de oxígeno en agua a una temperatura de 25° C y una presión de 1 bar, es de aproximadamente 8 g/m^3 . Siendo conscientes de este dato, en el último ensayo se supera este valor con el objeto de comprobar si, los resultados obtenidos con el ASM1 tienden hacia la solución exacta calculada con el Modelo de Monod.

Como se observa en la Figura 4.7(c), aún introduciendo cantidades de oxígeno imposibles de conseguir, dadas las características físicas del sistema, el perfil dado por el ASM1 se aleja bastante del perfil de la solución exacta. Cada uno de los escalones que se observan en la Figura 4.7 (a), corresponde al aumento en la concentración de oxígeno que supone cada una de las fuentes. Para una fuente aislada, Figura 4.7 (b), el primer pico corresponde al consumo del oxígeno que entra con el agua. A continuación, en la misma figura, se observa un segundo pico que representa el incremento de concentración que supone la fuente y su posterior consumo.

4.2.4. Respuesta frente a la variación del volumen de agua tratada

Con el objetivo de conseguir una mayor aproximación a la realidad, se realizó una nueva serie de simulaciones en las que se aumentó el volumen de agua tratada. La valoración de estos ensayos permite comprobar cómo reacciona el modelo ante un cambio del volumen de agua tratada y si esto afecta de algún modo al cálculo. Se introdujo un caudal de entrada de $0.4 \text{ m}^3/s$ y se fijó una altura a la salida de 4 m, con una velocidad de 0.1 m/s. Se partió de una situación inicial en la que el canal se encontraba con una altura de 4 m de agua limpia que lleva una velocidad longitudinal de 0.1 m/s.

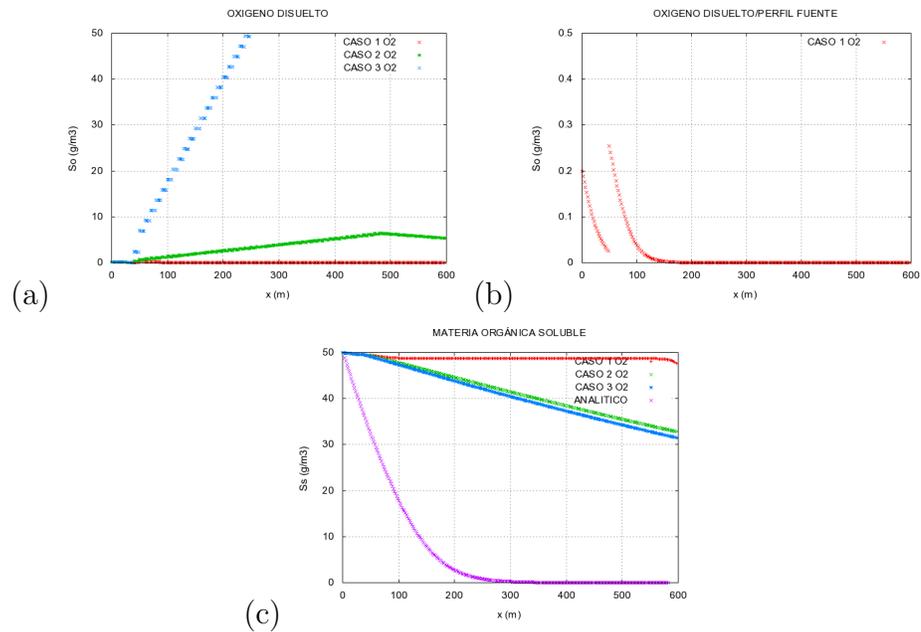


Figura 4.7: Resultados del estudio de oxígeno disuelto. (a) Perfil longitudinal de oxígeno disuelto. (b) Perfil longitudinal de una fuente aislada. (c) Perfil longitudinal de Materia orgánica soluble.

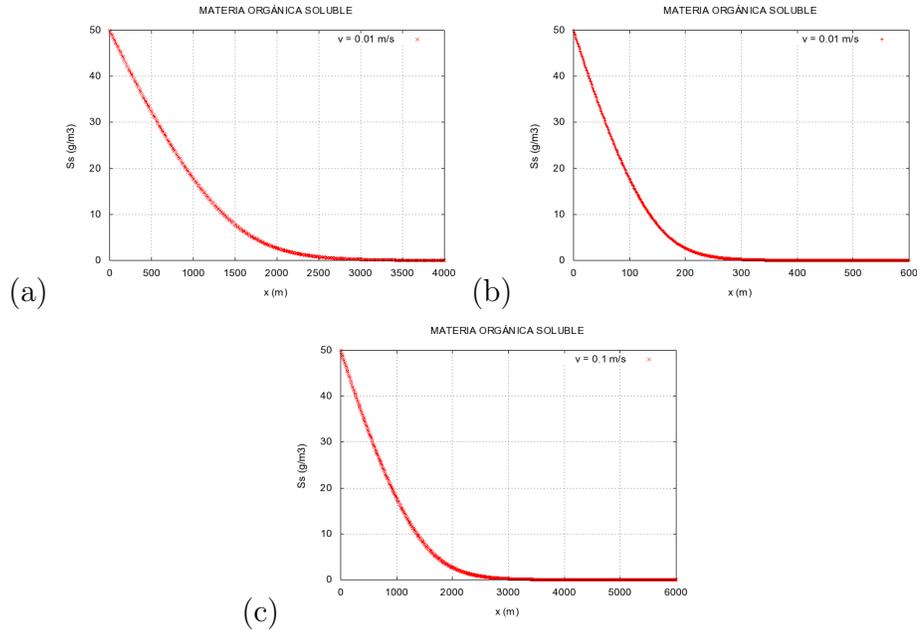


Figura 4.8: Representación gráfica de la solución exacta

Estos ensayos consistieron en la repetición de los casos 1, 2 y 6 de la Sección 4.2.1, además del caso analítico, con las condiciones que se acaban de definir. Al aumentar la velocidad, el tiempo medio de residencia de las partículas dentro del reactor disminuye para un volumen de reactor dado, es decir, al aumentar 10 veces la velocidad del flujo, se necesitaría un reactor con una longitud 10 veces mayor para conseguir el mismo porcentaje de remoción de materia orgánica. Esto se puede comprobar si se comparan las representaciones gráficas de la solución exacta para ambos valores de velocidad. Como se aprecia en la Figura 4.8, se obtiene en ambos casos exactamente el mismo perfil, con la diferencia de que en el caso de mayor velocidad, la variable x es 10 veces mayor. Matemáticamente este hecho, puede explicarse utilizando el concepto de tiempo de residencia τ , calculado como

$$\tau = \frac{V}{Q} = \frac{A x}{A u} = \frac{x}{u} \quad (4.7)$$

donde V es el volumen del reactor, Q es el caudal que atraviesa una sección transversal, x la longitud de reactor desde la entrada y u la velocidad del flujo en dirección x . Para una determinada longitud de reactor, si se aumenta

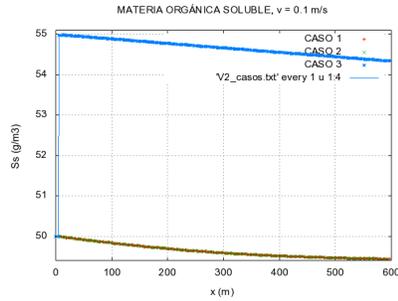


Figura 4.9: Resultados de la simulación para los casos 1D con una velocidad, $u=0.1$ m/s

la velocidad del flujo en dirección x , el tiempo medio de residencia de las partículas dentro del mismo disminuirá en la misma proporción en la que se aumentó la velocidad y viceversa.

Con estos ensayos se prueba que el modelo no presenta ninguna inestabilidad con caudales de agua residual a tratar más realistas.

4.3. Aireadores mecánicos

La utilización de aireadores mecánicos supone un cambio en la evolución del proceso biológico, pero al mismo tiempo, supone una perturbación en el flujo. La transferencia de energía de los discos Orbal al fluido se introduce con la modificación del modelo explicada en el Capítulo 2. En este caso se realizaron tres experimentos numéricos repitiendo los 3 casos del apartado anterior, incluyendo el modelo ASM1.

En todos los test numéricos se colocaron 6 sistemas de aireación mecánica repartidos uniformemente a lo largo del canal cada 50 m, hasta una longitud de 300 m. Cada uno de estos sistemas está formado por 4 discos Orbal. En todos los casos se parte de una situación inicial de agua limpia circulando en dirección x a una velocidad de 0.1 m/s y con una altura de 4 m.

Siquiendo los estándares de operación, los discos se han programado de forma que existe una curva de funcionamiento que relaciona la sumergencia con la potencia y el caudal de oxígeno aportado. Además, se permite elegir entre dos velocidades de rotación y el sentido de giro de los discos.

La Figura 4.11 muestra el perfil longitudinal en estado estacionario para h y u . Como se observa en la Figura 4.11 (a), el aporte de energía el los disco Orbal

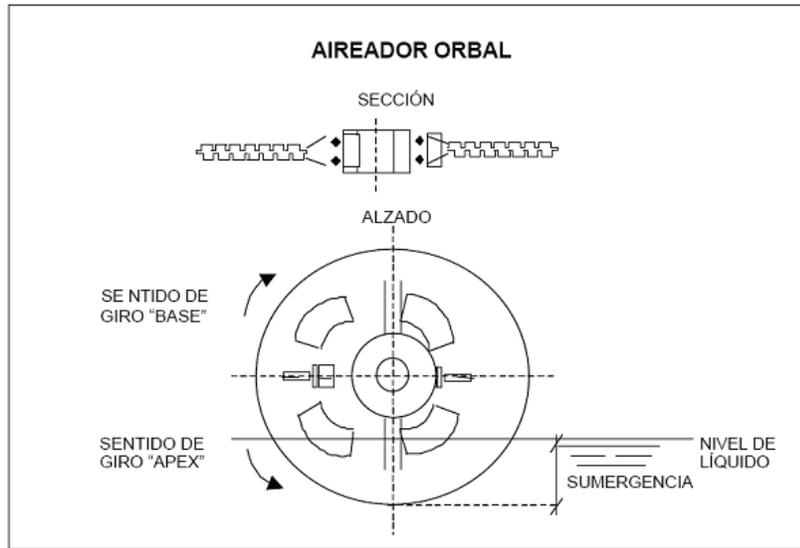
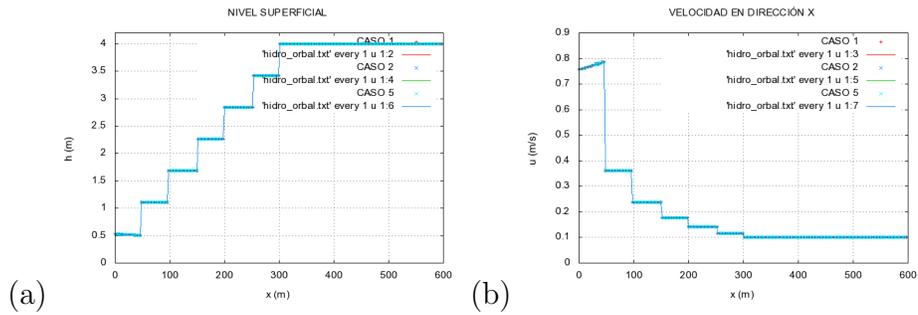


Figura 4.10:

Figura 4.11: Perfil longitudinal en estado estacionario para la altura de columna de agua, (a) y para la velocidad en dirección x , (b).

suministra al fluido se traduce en un aumento de la altura del fluido. Este aumento de la altura, supone un aumento de la sección transversal del canal. Al ser el caudal constante, un aumento de la sección supone un descenso de la velocidad, que es precisamente lo que se observa en la representación gráfica de esta variable, Figura 4.11 (b).

4.4. Conclusiones

Tras el análisis de los resultados de los casos test realizados sobre el canal de flujo unidimensional, se puede concluir que para el caso ideal no se observan diferencias entre los valores numéricos fruto de la simulación y los generados al resolver la solución exacta. Con la programación de las expresiones que corresponden al ASM1, se obtiene una simulación más realista, cuyos resultados no se han podido comparar con información experimental, pero que resultan coherentes a la vista de las ecuaciones que definen dicho modelo. El proceso que tiene lugar es lo suficientemente lento en lo que a la cinética se refiere y si el flujo es lo suficientemente sencillo se puede reducir el número de celdas sin que los resultados sufran alteraciones. La concentración de oxígeno es un parámetro fundamental por su efecto limitante en las reacciones biológicas. Este aspecto queda patente al observar la diferencia de rendimiento entre una cinética simplificada (Monod) con los resultados obtenidos de una cinética más realista (ASM1). Por último, las simulaciones realizadas incluyendo los sistemas de aireación ofrecen unos resultados coherentes, en los que se observa el intercambio de energía entre los discos y el fluido a través de una variación en la altura de la lámina de agua.

Capítulo 5

Aplicación a una Estación de Depuración de Aguas Residuales

Una vez evaluado el modelo numérico sobre un sistema sencillo, un canal recto con flujo unidimensional, en esta parte del trabajo se ensaya sobre un sistema complejo: un reactor tipo Orbal perteneciente a una Estación de Depuración de Aguas Residuales (EDAR). En el primer grupo de ensayos presentados en esta parte del trabajo, se evalúa la correcta modelización y programación en la herramienta de cálculo, de los discos Orbal. Se ensayan las diferentes modalidades de funcionamiento que estos equipos de aireación permiten, incluyendo sentido y velocidad de giro. Este conjunto de ensayos se realiza partiendo de una situación inicial en la que se tiene agua limpia (libre de cualquier sustancia) y en reposo, con una altura de lámina de agua dentro del reactor constante e igual a 4.5 m. En estos casos no se simula el proceso de lodos activados, es decir, no ocurre ninguna reacción, sino que se pretende analizar la respuesta del flujo ante las diferentes situaciones que suponen las distintas modalidades de operación de los discos Orbal.

En el segundo grupo de experimentos, se presenta un caso en el que se simula el proceso Orbal completo, incluyendo todas las modificaciones introducidas en el modelo numérico. En este caso, sí ocurre el proceso de lodos activados, e intervienen todas las sustancias y procesos involucrados en el ASM1.

La presencia de caudales pico, es un fenómeno al que un reactor de este tipo tiene que enfrentarse de manera cotidiana. Esta es una de las finalidades de la herramienta informática desarrollada. Como ejemplo de la evolución del

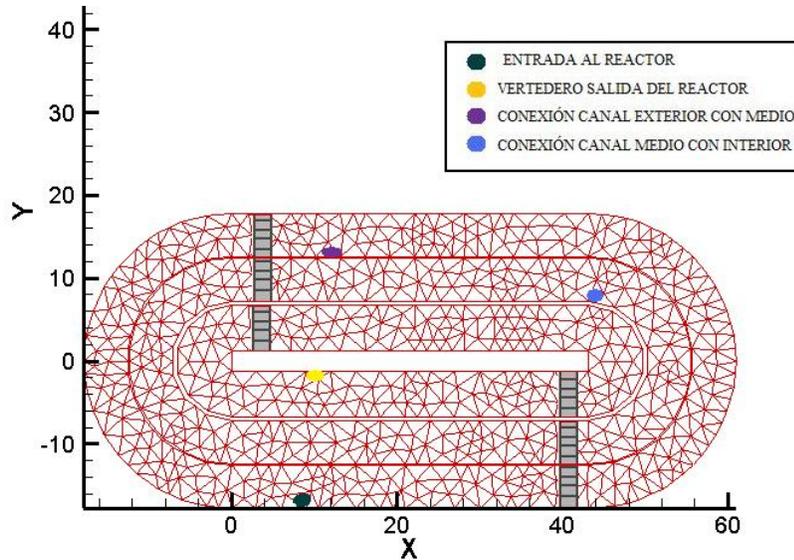


Figura 5.1: Malla que representa la geometría de un reactor Orbal.

sistema frente a esta situación se realizan dos ensayos, cada uno de ellos con una curva de caudal de entrada diferente, partiendo del estado estacionario alcanzado en el caso de simulación del proceso Orbal completo, con un caudal de entrada constante.

En todos los ensayos mostrados en este apartado, se incluyen 2 zonas de aireación en cada uno de los tanques, colocados como se muestra en la Figura 5.1. El modelo permite al usuario el diseño del sistema de aireación Orbal referente a las siguientes variables:

- Sentido de giro de los discos
- Velocidad de giro de los discos
- Número de discos en cada sistema de aireación
- Curva de funcionamiento sumergencia-potencia-caudal de oxígeno aportado

Los siguientes aspectos se van a mantener constantes en todos los ensayos:

- Para cada tanque el número de discos Orbal que forman el sistema de aireación es diferente, debido a que el volumen de agua a tratar también

es distinto. El número de discos que forman cada sistema de aireación para cada tanque es el que se presenta en la Tabla 5.1

- En todos los casos la curva de operación de los discos, para cada una de las velocidades de giro, va a ser la mostrada en la Tabla 5.2
- A excepción del último caso, en el resto de ellos, se parte de una situación inicial tal que el tanque se encuentra lleno de agua limpia y en reposo hasta una altura de 4.5 m. Se introduce un caudal de agua residual a tratar $0.1 \text{ m}^3/s$.

Cuadro 5.1: N° de discos Orbal según canal.

Canal	N° Discos
Exterior	25
Medio	20
Interior	11

Cuadro 5.2: Curvas de funcionamiento discos Orbal

Velocidad de Giro (rpm)	Sumergencia (m)	Potencia (W)	gO_2/s aportados
43	0	0	0
	0.229	176.64	$1,056 \cdot 10^{-4}$
	0.305	220.8	$1,31 \cdot 10^{-4}$
	0.381	264.96	$1,56 \cdot 10^{-4}$
	0.457	306.912	$1,81 \cdot 10^{-4}$
57	0	0	0
	0.229	331.2	$1,69 \cdot 10^{-4}$
	0.305	412.16	$2,08 \cdot 10^{-4}$
	0.381	485.76	$2,5 \cdot 10^{-4}$
	0.457	566.72	$2,89 \cdot 10^{-4}$

5.1. Estudio del funcionamiento del sentido de giro de los discos Orbal.

Con relación al sentido de giro de los discos Orbal, existen dos modalidades:

- Base: el disco gira en sentido horario.
- Vértice: el disco gira en sentido antihorario.

En el modelo que se presenta en este proyecto, el usuario puede definir si los Orbal giran en Base, en Vértice, pueden encontrarse parados, o incluso, introducir una curva de funcionamiento con el tiempo para que el sentido de giro cambie de forma automática en un momento determinado. Para comprobar que la modelización del sentido de giro de los Orbal es correcta, se han realizado los casos definidos en la Tabla 5.3

Cuadro 5.3:

Casos test	1	2	3
Sentido giro	Base	Vértice	Curva

En el Caso 3, en lugar de definir un sentido único de giro para todo el ensayo, se introdujo una curva que relacionaba el sentido de giro con el tiempo, en concreto, para este ensayo, se utilizó la siguiente curva (Tabla 5.4):

Cuadro 5.4: Curva de funcionamiento para el Caso 3

Tiempo (s)	Sentido de giro
0	Base
1000	Parada
1050	Vértice

Si se compara la distribución del nivel superficial, D , en estado estacionario para los Casos 1 y 2 (Figura 5.2), se observa que la distribución correspondiente al Caso 2 presenta cambios más bruscos y un nivel superficial más elevado, en general, que el Caso 1. Además, en esta misma figura se puede comprobar que en cada caso, el flujo lleva la dirección que le corresponde

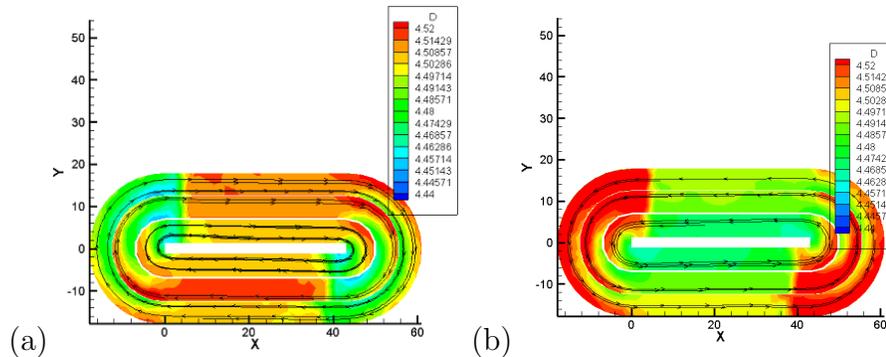


Figura 5.2: Distribución espacial del nivel superficial, D , para (a) Caso 1 y (b) Caso 2

según se han definido, ya que también se han representado las líneas de corriente. La Figura 5.6 muestra el perfil espacial de altura de columna de agua, h , para distintos instantes de tiempo, en la mitad inferior del canal, que incluye la entrada de agua residual a tratar y uno de los dos sistemas de aireación. En dicha figura, se observa la presencia del sistema de aireación con un pico en $x = 40$ aproximadamente.

También se ha estudiado el módulo de la velocidad, cuyo perfil espacial en estado estacionario se muestra en la Figura 5.4. En dicha figura se observa cómo para el Caso 2, en el que los discos giran en modalidad Vértice, se obtienen valores menores del módulo de la velocidad que en el Caso 1. Para esta variable, también se han representado los perfiles de la mitad inferior del reactor, en los que se observa una zona donde esta variable es más inestable y que corresponde a la presencia del sistema de aireación.

La Figura 5.7 muestra la distribución espacial del módulo de la velocidad en diferentes instantes de tiempo para el Caso 3. Hay que recordar, que en este caso, se definió una curva de sentido de giro frente a tiempo para describir el funcionamiento de los discos Orbal. En esta figura se observa transcurrido un tiempo de simulación de 1000 s, que el flujo sigue girando en modalidad Base, como indican las líneas de corriente. Según la curva definida en la Tabla 5.4, los discos se paran cuando ha pasado un tiempo de 1050 s desde el comienzo del ensayo. Este hecho explica que a $t = 1100$ s, el flujo siga girando en sentido Base, debido a la inercia del sistema, pero el módulo de la velocidad, presente valores más bajos. A partir de $t = 1150$ s, ya se aprecian zonas en las que el flujo es desordenado, principalmente en las cercanías de los

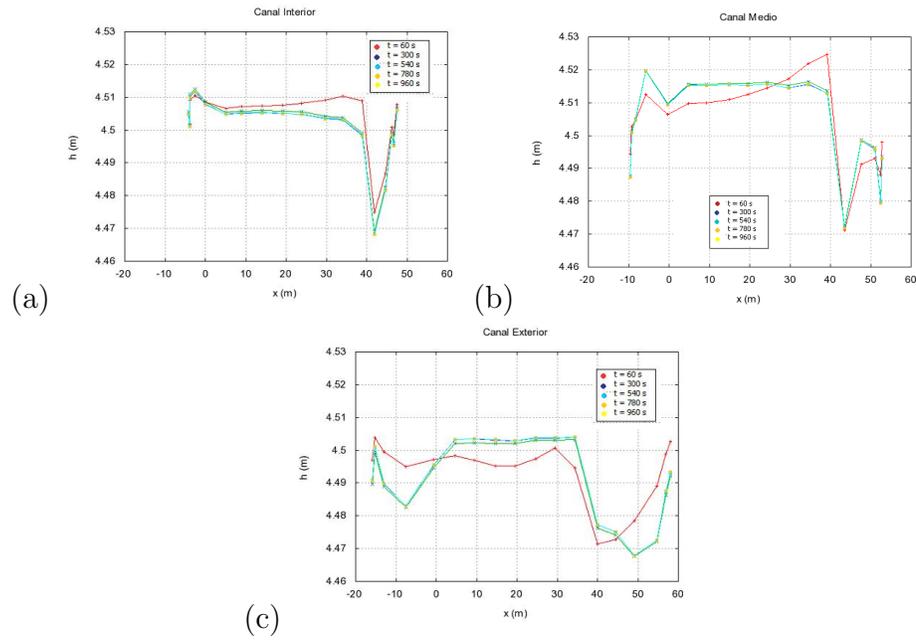


Figura 5.3: Perfil espacial de altura de columna de agua, h , para el Caso 1

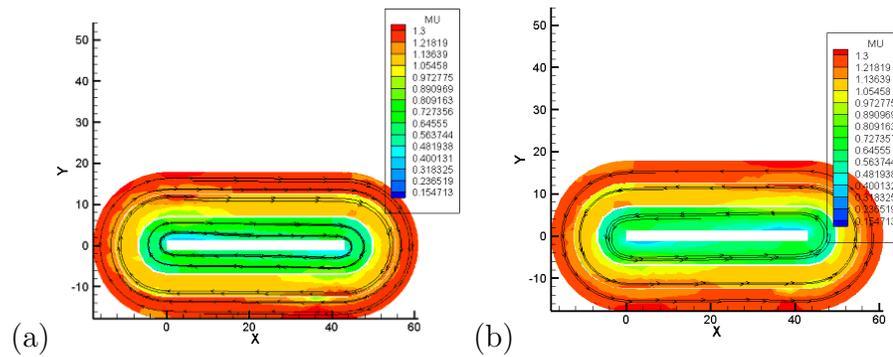


Figura 5.4: Distribución espacial del modulo de la velocidad, u , para (a) Caso 1 y (b) Caso 2

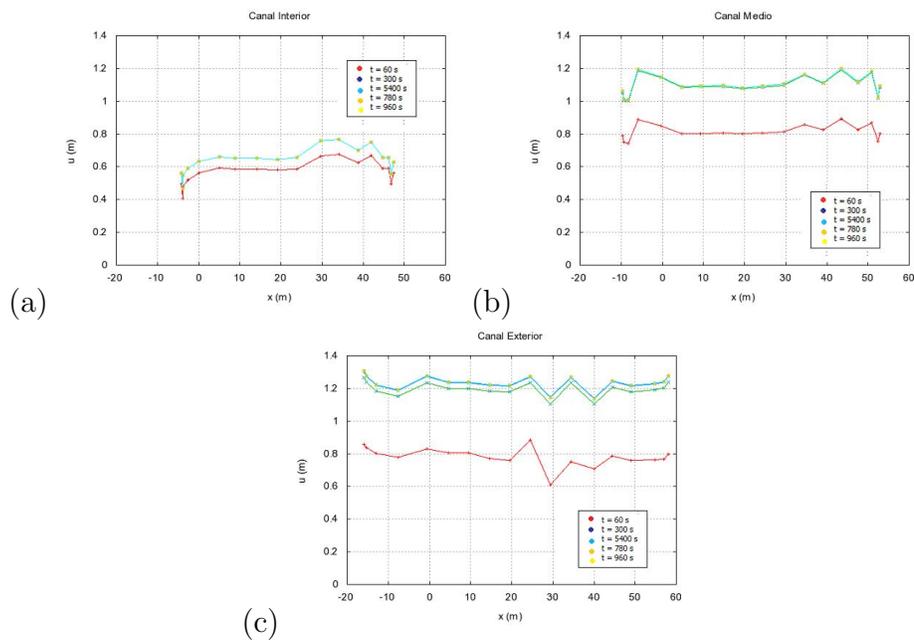


Figura 5.5: Perfil espacial del módulo de la velocidad para el Caso 1

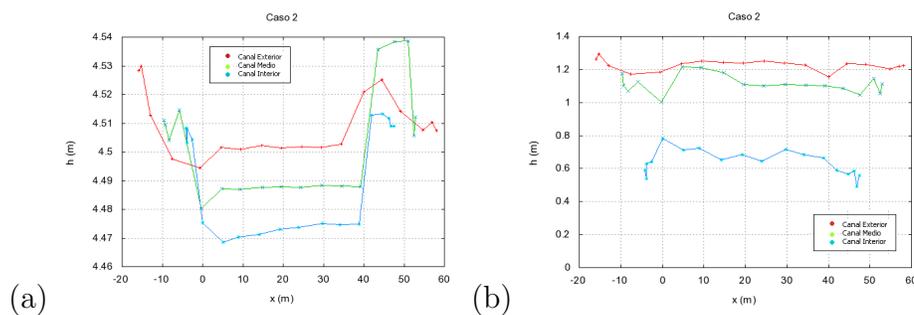


Figura 5.6: Perfiles espaciales para el Caso 2. (a) Altura de columna de agua; (b) Módulo de la velocidad

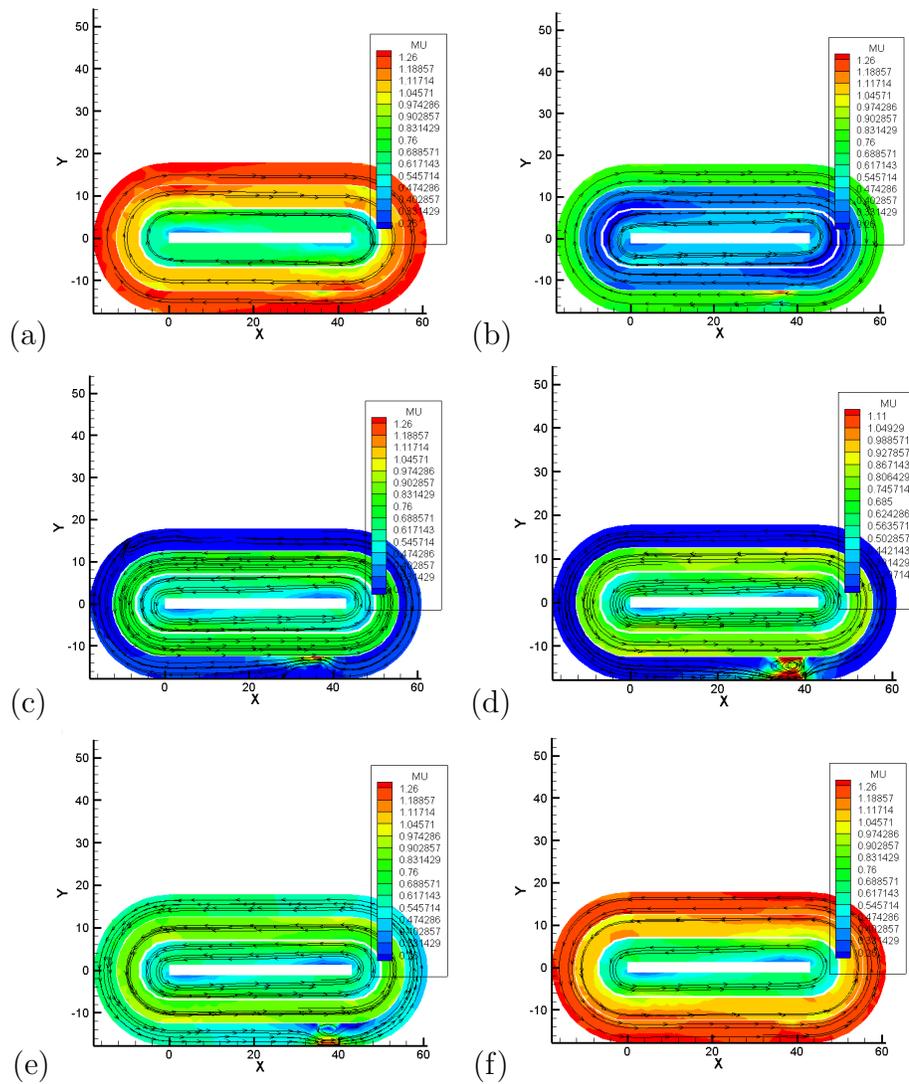


Figura 5.7: Representación del módulo de la velocidad, u y líneas de corriente para el Caso 3. (a) $t = 1000$ s; (b) $t = 1100$ s; (c) $t = 1150$ s; (d) $t = 1160$ s; (e) $t = 1180$ s; (f) $t = 1600$ s

sistemas de aireación, debido a que la dirección del flujo comienza a cambiar. Como muestra la Figura 5.7, transcurrido un tiempo de simulación de 1600 s, el flujo vuelve a ser ordenado, las líneas de corriente indican que los discos Orbal están funcionando en modalidad Vértice y aumentan los valores del módulo de la velocidad.

Los resultados de este conjunto de ensayos permiten comprobar que el sentido de giro de los discos Orbal está correctamente modelado y que responde de la forma esperada en los casos estudiados. Por otro lado, se observa, que para un consumo dado de potencia por parte de los discos, el giro en sentido Base proporciona unos perfiles espaciales de nivel superficial menos drásticos y mayores valores del módulo de la velocidad que los observados para las situaciones en las que los discos trabajan en modalidad Vértice.

5.2. Influencia de la velocidad de giro de los discos Orbal.

Hasta este momento, los ensayos se han realizado con una velocidad de giro de los Orbal de 57 rpm. Sin embargo, este es un aspecto que también se puede modelar, pudiendo elegirse para cada sistema de aireación la velocidad de giro deseada. Este tipo de aireadores puede funcionar a velocidad baja, de 43 rpm, o alta, de 57 rpm. Para comprobar su influencia, se llevaron a cabo dos nuevas simulaciones, que se compararon con los realizados a velocidad baja. En todos los ensayos que se presentan en esta sección, el flujo circula en modalidad Base. La relación de casos se describe en la siguiente tabla:

Cuadro 5.5:

Casos test	1	4	5
Velocidad	57 rpm	43 rpm	Curva

En el Caso 5 en lugar de definir una velocidad de giro única para todo el ensayo, se introdujo una curva que relacionaba la velocidad de giro con el tiempo, en concreto, para este ensayo se utilizó la siguiente curva:

En la Figura 5.8 se observa que el Caso 4 presenta valores del módulo de la velocidad más bajos que el Caso 1, como era de esperar, ya que en el primero la velocidad de giro de los discos es mayor. Esto se traduce en un perfil de

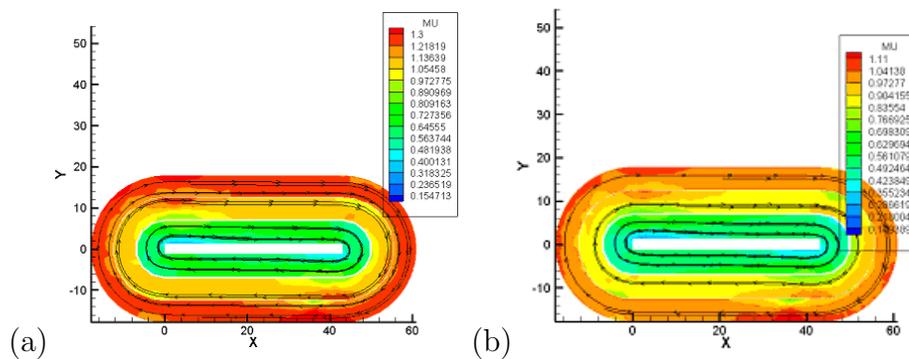


Figura 5.8: Comparativa del modulo de la velocidad, u . (a) Caso 1 y (b) Caso 4

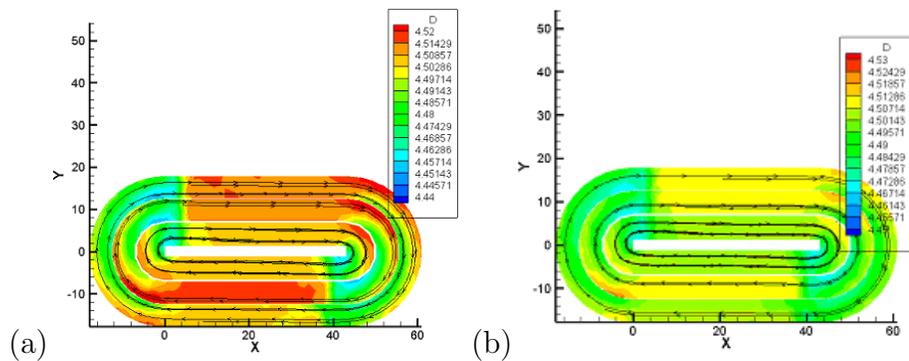


Figura 5.9: Comparativa del nivel superficial, D . (a) Caso 1 y (b) Caso 4

Cuadro 5.6: Curva de funcionamiento para el Caso 5

Tiempo (s)	Sentido de giro
0	Base
1000	Parada
1050	Vértice

altura de columna de agua más acusado en el caso de velocidad alta, Caso 1, que en el de velocidad baja, como se observa en la Figura 5.9

La Figura 5.10 muestra la distribución espacial del módulo de la velocidad para varios instantes de tiempo. La curva de funcionamiento presentada en la Tabla 5.6, indica que los discos se paran cuando ha transcurrido un tiempo de simulación de 1050 s. Antes de este momento, se obtiene el perfil de velocidades mostrados en la Figura 5.10 (a) y que corresponde al funcionamiento de los discos a velocidad alta. Cuando $t = 1100$ s, la Figura 5.10 muestra cómo el campo de velocidades presenta valores mucho más bajos, que indica que los discos se han parado. A partir de $t = 1150$ s, el flujo alcanza un estado estacionario con una distribución de velocidades más bajas que al inicio, lo que indica que los discos se encuentran girando a velocidad baja.

5.3. Estudio del movimiento de un soluto a través del reactor biológico.

En esta sección se estudia el movimiento de un sólido que no sufre reacción dentro del tanque, para comprobar la correcta ubicación y definición de las conexiones entre los canales y de la entrada y salida al reactor. En este caso también se parte de la situación inicial de agua limpia y en reposo con una altura dentro del reactor de 4.5 m y los discos Orbal comienzan a funcionar para $t > 0$. Se recogen datos en función del tiempo en los puntos de entrada y salida del reactor, así como en la conexión entre el canal exterior y medio, conexión 1, y la conexión entre el canal medio y el interior, conexión 2.

En la Figura 5.12 se muestra la evolución temporal de concentración del soluto a través de los puntos de estudio que se acaban de definir. Al observar esta figura, se comprueba que el soluto se mueve como se esperaba, ya que en los primeros segundos, el soluto que entra comienza a salir a través de la conexión 1, que comunica el canal exterior con el medio. A continuación,

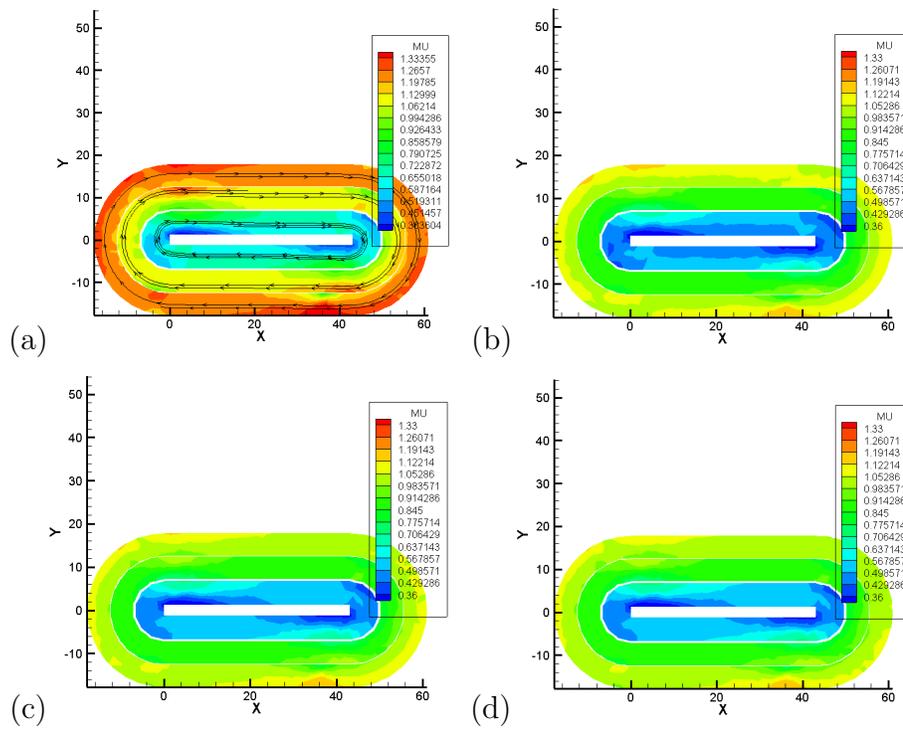


Figura 5.10: Representación del módulo de la velocidad, \mathbf{u} y líneas de corriente para el Caso 5. (a) $t = 1000$ s; (b) $t = 1100$ s; (c) $t = 1150$ s; (d) $t = 1200$ s.

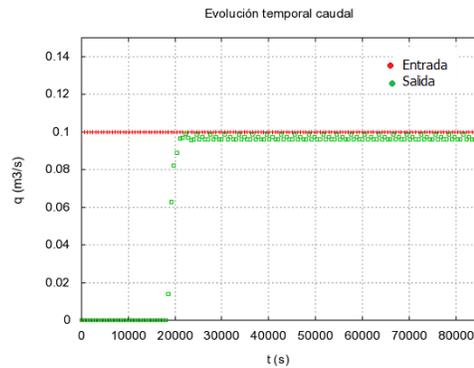


Figura 5.11: Evolución temporal del caudal en el caso de estudio de movimiento de un soluto

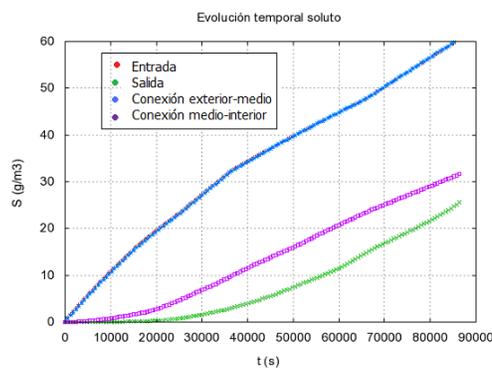


Figura 5.12: Evolución temporal de la concentración de soluto en el caso de estudio de movimiento de un soluto

pasados 10000 segundos, aproximadamente, el soluto comienza a atravesar la conexión 2, que comunica el canal medio con el interior y por último, sale a través del vertedero de regulación del reactor cuando se llevan aproximadamente 20000 segundos de simulación. En la Figura 5.12, se observa una tendencia creciente en la concentración de soluto que se debe a que en este caso, no existe reacción.

Como los discos Orbal están en funcionamiento, para provocar el movimiento, del fluido, de forma simultánea, se produce un aporte de oxígeno. En este caso, como ocurre con el soluto, la evolución temporal también es creciente, ya que no existe proceso que lo consuma, como se aprecia en la Figura 5.13

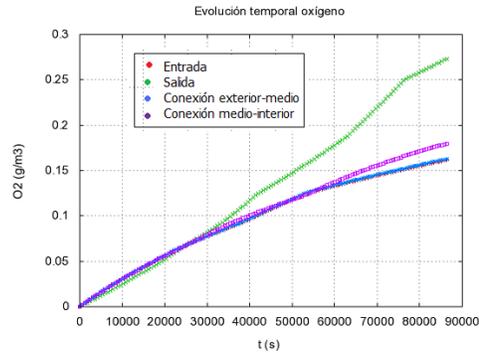


Figura 5.13: Evolución temporal de la concentración de oxígeno disuelto en el caso de estudio de movimiento de un soluto

5.4. Aplicación real. Caso completo.

Como aplicación, se llevó a cabo un ensayo en el que intervienen las 13 sustancias definidas por el ASM1, que evolucionan según las ecuaciones de dicho modelo. Se introdujo el sistema de aireadores definido en las secciones anteriores operando como sigue:

Cuadro 5.7:

Sistema de aireación:	6 (Ubicados según Figura 5.1)
Velocidad de giro:	53 rpm
Sentido de giro:	Base

Como se muestra en la Figura 5.14 se produce un consumo de materia orgánica cercano al 50 % tras un día de tratamiento. La geometría del reactor Orbal permite optimizar el volumen de reactor. Este hecho queda patente si se comparan los resultados obtenidos en este caso con los recogidos de realizar las simulaciones con el reactor unidimensional. En la Figura 5.14 se observa, también, que la cantidad de oxígeno disuelto tras este periodo de tratamiento es muy baja y que la concentración de biomasa heterótrofa activa se ha reducido en un porcentaje muy alto.

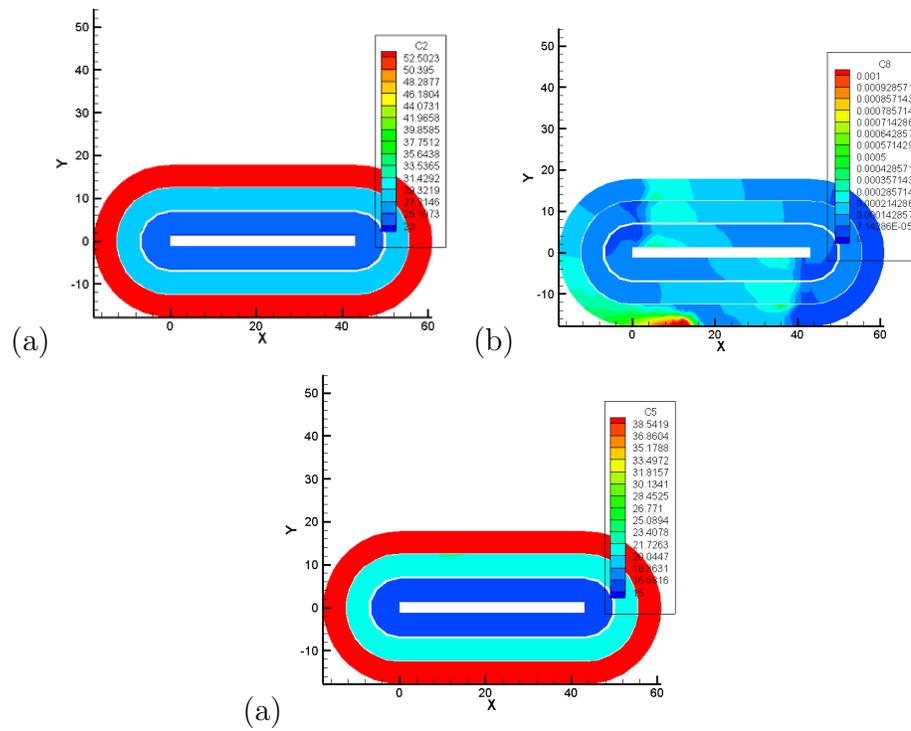


Figura 5.14: Perfiles en estado estacionario para el Caso7. (a) Materia orgánica fácilmente biodegradable; (b) Oxígeno disuelto; (c) Biomasa heterótrofa activa

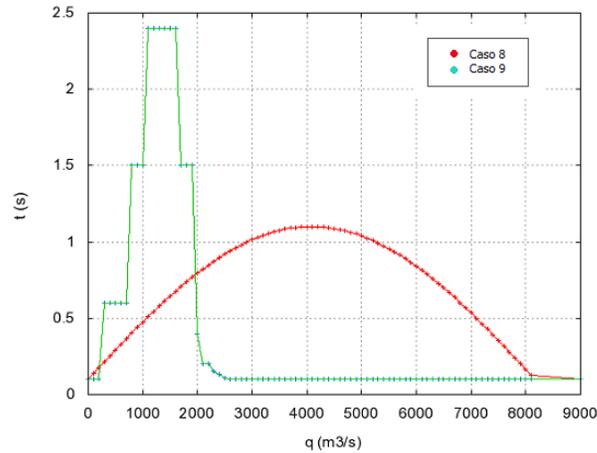


Figura 5.15: Curva de caudal de entrada para los Casos 8 y 9

5.5. Estudio de la evolución de un pico en el caudal de entrada.

Los picos de consumo de agua y por tanto de agua residual que llegan a las depuradoras son situaciones que ocurren de forma diaria. Para comprobar cómo responde a una situación de este tipo el modelo matemático, incluyendo todas las modificaciones anteriormente expuestas, se realizaron dos nuevos casos test, con distinta curva de caudal a la entrada. La Figura 5.15 indica cual es la curva del caudal de entrada para cada caso.

Ambos casos de estudio se realizan partiendo del estado estacionario al que se llega en el ensayo realizado en la sección anterior. Se ensayan los casos durante un tiempo de simulación de 1 día y durante ese tiempo se recogen los valores del caudal de salida dando lugar a los resultados mostrados en la Figura 5.16

En la Figura 5.16, se observa cómo en la curva del caudal de salida, el pico introducido inicialmente se suaviza de forma importante. Esto se debe a que el volumen de agua introducido a través del hidrograma de entrada, en este caso transitorio respecto del caso estacionario, es muy pequeño frente al volumen de agua tratada en el reactor. Esto se traduce en un pequeño incremento de la altura de la lámina de agua en las distintas zonas del reactor.

En particular, en la zona de salida, el caudal de agua depurada se calcula a través de una ley de vertedero que es función de la diferencia entre la altura

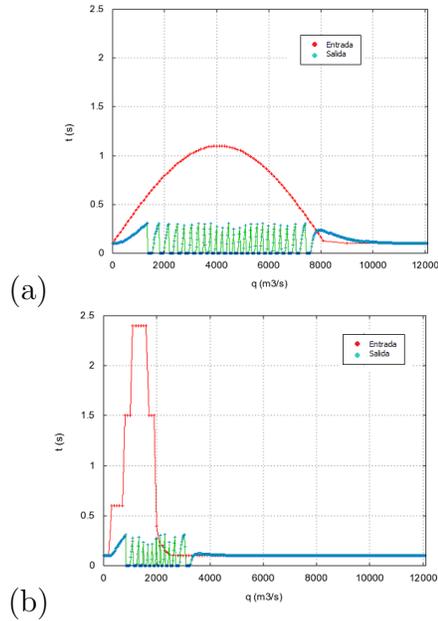


Figura 5.16: Comparativa de los caudales de entrada y salida para los Casos (a) 8 y (b) 9

de la lámina de agua y la altura del labio del vertedero. Al utilizar una malla de cálculo con un bajo número de celdas, el incremento de tiempo entre dos estados da lugar a caudales de vertido demasiado grandes que hacen que el caudal de salida en algunos momentos sea nulo, lo que explica las oscilaciones que presentan las representaciones gráficas del caudal de salida. Estas oscilaciones se podrían evitar utilizando una malla de cálculo más densa o disminuyendo el paso de tiempo, lo que significaría en ambos casos, un incremento considerable en el tiempo requerido para realizar cada simulación.

5.6. Conclusiones.

Una vez evaluados los resultados obtenidos de los casos de estudio presentados en este capítulo, se puede concluir que el modelo describe de forma completa y coherente el funcionamiento de los discos Orbal. El funcionamiento de los discos incluye sentido y velocidad de giro de los mismos y para ambos casos se obtienen resultados acordes con las especificaciones descritas para cada ensayo. Los resultados obtenidos para el caso de estudio de movimiento

70 Aplicación a una Estación de Depuración de Aguas Residuales

del soluto sin reacción a través del reactor, demuestran que, efectivamente, el soluto pasa de un canal a otro a través de las conexiones especificadas en su geometría. Los resultados del caso completo muestran que la evolución de las sustancias dentro del reactor es la esperada. Además, el último caso test presentado, que simulaba un pico de caudal, muestra que el reactor amortigua este efecto y que la instalación es capaz de hacer frente a una situación de este tipo.

Capítulo 6

Conclusiones

Tras la presentación y evaluación de los resultados obtenidos en el presente proyecto se puede concluir que en el caso de laboratorio, en el que se estudiaba un flujo en un codo de 90° , el modelo ofrece resultados adecuados al ampliar el sistema de ecuaciones para incorporar el modelo de turbulencia promediado. El esquema numérico presentado es válido para una situación con una variación rápida de las cantidades transportadas dentro del fluido en un caso donde participan complejos procesos de reacción y difusión. Si como hemos dicho, el modelo κ - ϵ se caracteriza por tener una gran sensibilidad y una gran rapidez de respuesta a las variaciones espaciales y temporales tanto del flujo como de las variables transportadas, en casos donde el sistema de ecuaciones contenga términos donde los procesos reactivos sean más lentos y no interfieran en el flujo (como el modelo ASM1), podemos suponer que el esquema numérico generará información fiable.

Tras el análisis de los resultados de los casos test realizados para flujo unidimensional, se puede concluir que para el caso ideal no se observan diferencias entre los valores numéricos fruto de la simulación y los generados al resolver la solución exacta. Con la programación de las expresiones que corresponden al ASM1, se obtiene una simulación más realista, cuyos resultados no se han podido comparar con información experimental, pero que resultan coherentes a la vista de las ecuaciones que definen dicho modelo. El proceso que tiene lugar es lo suficientemente lento en lo que a la cinética se refiere y si el flujo es lo suficientemente sencillo se puede reducir el número de celdas sin que los resultados sufran alteraciones. La concentración de oxígeno es un parámetro fundamental por su efecto limitante en las reacciones biológicas. Este aspecto queda patente al observar la diferencia de rendimiento entre una cinética

simplificada (Monod) con los resultados obtenidos de una cinética más realista (ASM1). Por último, las simulaciones realizadas incluyendo los sistemas de aireación ofrecen unos resultados coherentes, en los que se observa el intercambio de energía entre los discos y el fluido a través de una variación en la altura de la lámina de agua.

Una vez evaluados los resultados obtenidos de los casos de estudio de aplicación a una Estación de Depuración de Aguas Residuales, se puede concluir que el modelo describe de forma completa y coherente el funcionamiento de los sistemas de aireación mecánica compuestos por discos Orbal. El funcionamiento de los discos incluye sentido y velocidad de giro de los mismos y para ambos casos se obtienen resultados acordes con las especificaciones descritas para cada ensayo. Los resultados obtenidos para el caso de estudio de movimiento del soluto sin reacción a través del reactor, demuestran que, efectivamente, el soluto pasa de un canal a otro a través de las conexiones especificadas en su geometría. Los resultados del caso completo muestran que la evolución de las sustancias dentro del reactor es la esperada. Además, el último caso test presentado, que simulaba un pico de caudal, muestra que el reactor amortigua este efecto y que la instalación es capaz de hacer frente a una situación de este tipo.

Una posible continuación del trabajo presentado en este proyecto sería la toma de datos experimentales en una Estación de Depuración de Aguas Residuales de las mismas características de la que aquí se presenta. La medida de valores experimentales de variables como altura de columna de agua, velocidades o concentraciones, serían una buena herramienta para verificar el modelo desarrollado. Una vez contrastada la información obtenida de las simulaciones con los valores experimentales, en un paso siguiente, se podría pasar al estudio en profundidad del proceso biológico, consistente en un tratamiento de lodos activados.

Otro punto a estudiar, sería la optimización del funcionamiento de los discos Orbal. Variando la velocidad y el sentido de giro de los mismos o incluso manteniéndolos parados cuando la ocasión lo requiera, se pueden variar condiciones del proceso como velocidad del flujo y concentración de oxígeno disuelto en el agua, parámetros esenciales del sistema. En esta misma línea, se podría llevar a cabo un estudio económico relacionado con la potencia consumida por los discos Orbal.

Bibliografía

- [1] P. BRUFAU, P. GARCÍA NAVARRO. Conceptos básicos de hidrodinámica de superficie.
- [2] L.D. BENEFIELD, C.W. RANDALL. Biological process design for wastewater treatment. (*Prentice-Hall*)
- [3] L. CEA. Tesis Doctoral. *Universidad de La Coruña*, 2005.
- [4] J.A. CUNGE, F.M. HOLLY, A. VERWEY. *Practical aspects of computational river hydraulics*. Pitman Pub. Inc., 1989.
- [5] J.C. KABOURIS, A.P. GEORGAKAKOS. Parameter and state estimation of the Activated Sludge Process-I. Model development. *Pergamon* , 0043-1354(95)00325-8, 1996.
- [6] R.J. LEVEQUE. Finite Volume Methods for Hyperbolic Problems. *Cambridge University Press, New York, 2002*, p. 380, 2002.
- [7] J. MAKINIA, S.A. WELLS. A general model of the activated sludge reactor with dispersive flow-I. Model development and parameter estimation. *PII: S0043-1354(00)00150-0* **32**, 2000.
- [8] J. MAKINIA, S.A. WELLS. A general model of the activated sludge reactor with dispersive flow-II. Model verification and application. *PII: S0043-1354(00)00151-2* **32**, 2000.
- [9] R.M. MARTIN, S.C. MCCUTCHEON. Hydrodynamics and transport for water quality modeling. *CRC Press, Florida, 1999*
- [10] METCALF AND EDDY. Wastewater engineering: treatment and reuse. *McGraw Hill, 1998*

-
- [11] J. MURILLO, J. BURGUETE, P. BRUFAU, AND P. GARCÍA-NAVARRO. Coupling between shallow water and solute flow equations: analysis and management of source terms in 2D. *International Journal of Numerical Methods in Fluids* **49**, 267–299, 2005.
- [12] J. MURILLO, J. BURGUETE AND P. GARCÍA-NAVARRO. Coupling between shallow water and solute flow equations: analysis and management of source terms in 2D. *International Journal of Numerical Methods in Fluids* **54**, 543–590, 2007.
- [13] J. MURILLO, J. BURGUETE AND P. GARCÍA-NAVARRO. Analysis of a second-order upwind method for the simulation of solute transport in 2d shallow water flow. *International Journal of Numerical Methods in Fluids* **56**, 661–686, 2008.
- [14] J. MURILLO, P. GARCIA-NAVARRO AND J. BURGUETE. Conservative Numerical Simulation of Multicomponent Transport in Two-Dimensional Unsteady Shallow Water Flow, *Journal of Computational Physics* **228**, 5539–5573, 2009.
- [15] J. MURILLO, P. GARCIA-NAVARRO. Weak solutions for partial differential equations with source terms: Application to the shallow water equations, *Journal of Computational Physics* **229**, 4327–4368, 2010.
- [16] A.K. RASTOGI AND W. RODI. Predictions of heat and mass transfer in open channels. *Journal of the Hydraulic Division, ASCE*, 397-420, 1978.
- [17] P.L. ROE. A basis for Upwind Differencing of the Two-Dimensional Unsteady Euler Equations. *Numerical Methods in Fluid dynamics, vol II (Oxford University Press, Oxford)*, 1986.
- [18] G. ROSATTI, J. MURILLO, L. FRACCAROLLO. Generalized Roe schemes for 1D two-phase, free-surface flows over a mobile bed. *Journal of Computational Physics* **54**, 543–590, 2007.
- [19] J.C. RUTHERFORD. River Mixing. (*Wiley, New York, 1994*), p. 21, 1994.

-
- [20] E.F. TORO. Riemann solvers and numerical methods for fluid dynamics. (*Springer, Berlin, 1997*), p. 526, 1997.
- [21] E.F. TORO. Shock-Capturing Methods for Free-Surface Shallow Flows. (*Wiley, New York, 2001*), p. 109, 2001.
- [22] M.E. VÁZQUEZ-CENDÓN. Improved treatment of source terms in upwind schemes for the shallow water equations in channels with irregular geometry. *Journal of Computational Physics* **148**, 497–498, 1999.
- [23] M. PLATTES, E. HENRY, P.M. SCHOSSELER, A. WEIDENHAUPT. Modelling and dynamic simulation of a moving bed bioreactor for the treatment of municipal wastewater. *Biochemical Engineering Journal* **32**, 61-68, 2006.
- [24] I.Y. SMETS, J.V. HAEGEBAERTA, R. CARRETTEB, J.F. VAN IMPEA. Linearization of the activated sludge model ASM1 for fast and reliable predictions. *Water Research* **37**, 1831-1851, 2003.