



**COMPORTAMIENTO DEL RENDIMIENTO DE LAS BACTERIAS HETEROTROFAS
 Y_H CON LA VARIACIÓN DE LA RELACIÓN S_0/X_0 EN UN REACTOR CON FLUJO
DISCONTINUO A ESCALA LABORATORIO**

Presentado por:

CAMILO VELEZ ESTRADA

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA HIDRAULICA Y MEDIO AMBIENTE
MASTER EN INGENIERIA HIDRAULICA Y MEDIO AMBIENTE
INTENSIFICACION TRATAMIENTO DE AGUAS**



**COMPORTAMIENTO DEL RENDIMIENTO DE LAS BACTERIAS HETEROTROFAS
 Y_H CON LA VARIACIÓN DE LA RELACIÓN S_0/X_0 EN UN REACTOR CON FLUJO
DISCONTINUO A ESCALA LABORATORIO**

Presentado por:
CAMILO VELEZ ESTRADA

Trabajo de Grado presentado como requisito parcial para optar al título de Máster en
Hidráulica y Medio Ambiente

Director: Dr. JOSE FERRER POLO
Co-directora: Dr. MARCELA GATTI

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA HIDRAULICA Y MEDIO AMBIENTE
MASTER EN INGENIERIA HIDRAULICA Y MEDIO AMBIENTE
INTENSIFICACION TRATAMIENTO DE AGUAS
VALENCIA, DICIEMBRE DE 2009**

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la fuerza y voluntad para sacar el trabajo adelante, a pesar de las dificultades encontradas colocando en mi camino personas que me ayudaron para sacar un proyecto más en mi vida personal y académico.

A Marcela Gatti, quien me brindo su apoyo y colaboración con paciencia y empeño durante las pruebas de laboratorio y la redacción del documento. Gracias por las correcciones, guiarme por el mejor camino para obtener un buen trabajo de investigación y ayudarme para terminar a tiempo.

A mi familia, por estar presente en todo momento brindándome un apoyo desde lejos pero siempre importante para mí.

A Claudia por acompañarme durante todo el proceso, ayudándome a redactar y a corregir el documento, dándome ánimo para continuar.

A los compañeros del laboratorio: Javier, Berta, Sara, Luisa y Luís por todos los conocimientos y consejos compartidos, pero sobre todo por la dinámica de trabajo que siempre fue muy alegre y divertida.

A Oscar Álvarez, quien me brindo un espacio en su oficina del CPI para poder terminar la tesis, ya que debido a eso pude tener un mejor ambiente de trabajo y no depender de los puestos libres de la biblioteca.

RESUMEN

Un parámetro importante en la modelación de procesos biológicos y caracterización del agua residual es el rendimiento de la biomasa heterótrofa (Y_H), el cual se determina habitualmente por medio de análisis respirométricos. Una determinación inadecuada de este parámetro puede afectar notablemente la simulación de los procesos biológicos, dado que este parámetro da información de cuanta materia orgánica las bacterias emplean para el crecimiento. Dada la importancia del rendimiento Y_H , en este trabajo se estudió si la relación inicial entre el sustrato y la biomasa (S_0/X_0) influye en el valor del parámetro. Para analizar la influencia de S_0/X_0 en el rendimiento Y_H se realizaron ensayos respirométricos a diferentes relaciones iniciales, entre 0.0147 – 1.13 gDQO/gSSV. En cada ensayo se empleó agua residual filtrada con un tamaño de filtro de 0.1 μ m y fango activado proveniente de una planta piloto de aguas residuales urbanas.

A partir de los resultados obtenidos, el valor de Y_H aumenta con el incremento de la relación S_0/X_0 . Cuando el valor de S_0/X_0 es muy bajo las bacterias destinan una gran proporción de la materia orgánica a la producción de energía para el mantenimiento principalmente y una pequeña a la producción de biomasa. En cambio cuando el valor de S_0/X_0 es elevado las bacterias emplean una gran cantidad de materia orgánica al crecimiento y una mínima parte a la generación de energía. Los resultados obtenidos muestran que el valor de Y_H varió entre 0.52 y 0.83 gDQO/gDQO en el intervalo de S_0/X_0 estudiado.

SUMMARY

An important parameter in modeling biological processes and wastewater characterization is the heterotrophic biomass yield (Y_H) which is usually determined by respirometric analysis. An inadequate determination of this parameter can significantly affect the simulation of biological processes as this parameter gives information of the amount of organic matter is consumed for growing. Given the importance of this yield, in this work, the influence of the initial ratio substrate to biomass (S_0/X_0) on the Y_H parameter was studied. To analyze the influence of S_0/X_0 ratio on the Y_H parameter respirometric analysis were carried out at different initial ratio in the interval 0.0147 - 1.13 gCOD / gSSV. Wastewater filtered with a 0.1 μ m filter size and activated sludge from a pilot plant was used in each assay.

The results obtained here showed that the parameter Y_H increases as S_0/X_0 ratio increases. When the value of S_0/X_0 ratio is low, microorganisms consume a large proportion of organic matter to produce energy mainly for maintenance and a small for growing. However, if the value of S_0/X_0 is high, a large amount of organic matter is consumed for growing and a minimum proportion is used for energy production. The results show the value of Y_H ranges from 0.52 to 0.83 gCOD/gCOD in the interval of S_0/X_0 studied.

RESUM

Un paràmetre important en la modelació de processos biològics i caracterització de l'aigua residual és el rendiment de la biomassa heteròtrofa (Y_H), el qual es determina habitualment per mitjà d'anàlisi respiromètric. Una determinació inadequada d'aquest paràmetre pot afectar notablement la simulació dels processos biològics, atés que este paràmetre dóna informació de quanta matèria orgànica els bacteris empen per al creixement. Donada la importància del rendiment Y_H , en aquest treball s'ha estudiat si la relació inicial entre el substrat i la biomassa (S_0/X_0) influïx en el valor del paràmetre Y_H . Per a analitzar la influència de S_0/X_0 en el rendiment Y_H , es van realitzar assajos respiromètrics a diferents relacions inicials, entre 0.0147 - 1.13 gDQO/gSSV. En cada assaig s'emplenà aigua residual filtrada amb un filtre de 0.1 μm i fang d'una planta pilot d'aigües residuals urbanes

A partir dels resultats obtinguts, el valor de Y_H augmenta amb l'increment de la relació S_0/X_0 . Quan el valor de S_0/X_0 és davall els bacteris destinen una gran proporció de la matèria orgànica a la producció d'energia per al manteniment principalment i una menor proporció a la producció de biomassa. En canvi quan el valor de S_0/X_0 és elevat els bacteris empen una gran quantitat de matèria orgànica al creixement i una mínima part a generació d'energia. Els resultats obtinguts mostren que el valor de Y_H varia entre 0.52 i 0.83 gDQO/gDQO en l'interval de S_0/X_0 estudiat

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCION	1
1.1	DEPURACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES.....	1
1.2	ELIMINACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA POR BACTERIAS HETERÓTROFAS	3
1.3	COMPONENTES DEL AGUA RESIDUAL.....	4
1.4	CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL.....	5
1.4.1	Método físico-químico	5
1.4.2	Métodos biológicos	6
1.5	RENDIMIENTO Y_H	10
1.5.1	Determinación de Y_H con el método respirométrico	11
1.5.2	Antecedentes en el comportamiento del rendimiento Y_H	12
2.	OBJETIVO.....	17
	GENERAL.....	17
3.	METODOLOGIA.....	18
3.1	PLANTA PILOTO	18
3.2	FILTRACION DEL AGUA RESIDUAL	20
3.3	CARACTERIZACIÓN FÍSICO - QUIMICA.....	20
3.4	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA EXPERIMENTAL.....	21
3.5	FANGO EN CONDICIONES ENDÓGENAS	23
3.6	PROGRAMACION DE LAS EXPERIMENTACIONES	23
5.	RESULTADOS	25
5.1	PLANTA PILOTO	25
5.2	CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL.....	26
5.3	EXPERIMENTOS RESPIROMÉTRICOS PARA LA DETERMINACIÓN DE Y_H	29
5.3.1	Grupos de experimentación.....	29
5.3.2	Análisis Respirométrico	32
5.4	EXPERIMENTOS RESPIROMÉTRICOS	34
5.4.1	Respirometrías grupo I.....	34
5.4.2	Respirometrías grupo II.....	36
5.4.3	Consumo de OD total	40
5.5	RESULTADO DEL CÁLCULO DEL RENDIMIENTO Y_H	43

6.	DISCUSION DE RESULTADOS	48
6.1	PLANTA PILOTO	48
6.2	ENSAYOS RESPIROMÉTRICOS	48
6.3	OXÍGENO DISUELTO TOTAL	51
6.4	RENDIMIENTO Y_H	52
7.	CONCLUSIONES	56
8.	BIBLIOGRAFIA	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Metabolismo Bacterias Heterótrofas.....	3
Figura 1.2 División de la DQO en componentes.....	4
Figura 1.3 Comportamiento de OUR ideal, observado en un experimento.....	7
Aerobio Discontinuo (HenryK y col., 2003)	7
Figura 1.4: Efecto de diferentes relaciones de S_o/X_o en la OUR. (Ekama y col., 1986).....	8
Figura 1.5: Comportamiento de OD en una respirometría	12
Figura 1.6 Comportamiento de OUR en un ensayo respirométrico	12
Figura 1.7: Yobs como función de la relación S_o/X_o : A: Rao y Gaudy, 1966; B: Chudoba y col., 1991;.....	14
C: Chang y col, 1993; D: Liu y coll, 1998. Fuente: Liu y col, (1996, 1998).	14
Figura 3.1 Esquema planta piloto.....	18
Figura 3.2: Planta piloto de Carraixet con un esquema UCT.....	19
Figura 3.3: Equipo de filtración con membrana de 0,1 μm	20
Figura 3.4 (1) Reactor discontinuo, (2) Agitador mecánico, (3) Difusores, (4) Aireador, (5) Sonda de medición de OD, (6) Oxímetro, (7) Ordenador, (8) Modulo de control.	21
Figura 3.5 Montaje experimental.....	22
Figura 3.6 Imágenes del programa computacional; (A): pantalla principal, (B): Figura de OUR en el tiempo	23
Figura 5.1 Datos experimentales de N, P y SSV aerobio de la planta piloto.....	25
Figura 5.2 Metodología para análisis respirométrico del grupo I	32
Figura 5.3. Metodología para análisis respirométrico para el grupo II.....	33
Figura 5.4 OUR fase endógena con adición de agua residual filtrada	34
Figura 5.5 OUR para $S_o/X_o = 0.0147 \text{ gDQO/gSSV}$	35
Figura 5.6 OUR para $S_o/X_o = 0.0158 \text{ gDQO/gSSV}$	35
Figura 5.7 OUR para $S_o/X_o = 0.0176 \text{ gDQO/gSSV}$	35
Figura 5.8 OUR para $S_o/X_o = 0.02 \text{ gDQO/gSSV}$	35
Figura 5.9 OUR para $S_o/X_o = 0.025 \text{ gDQO/gSSV}$	35
Figura 5.10 OUR para $S_o/X_o = 0.03 \text{ gDQO/gSSV}$	35
Figura 5.11 OUR para $S_o/X_o = 0.04 \text{ gDQO/gSSV}$	36
Figura 5.12 OUR para $S_o/X_o = 0.067 \text{ gDQO/gSSV}$	36

Figura 5.13 OUR para $S_o/X_o = 0.09$ gDQO/ gSSV	36
Figura 5.14 OUR para $S_o/X_o = 0.104$ gDQO/gSSV	37
Figura 5.15 OUR para $S_o/X_o = 0.134$ gDQO/gSSV	37
Figura 5.16 OUR para $S_o/X_o = 0,156$ gDQO/gSSV	37
Figura 5.17 OUR para $S_o/X_o = 0,26$ gDQO/gSSV	37
Figura 5.18 OUR para $S_o/X_o = 0,31$ gDQO/gSSV	37
Figura 5.19 OUR para $S_o/X_o = 0,41$ gDQO/gSSV	37
Figura 5.20 OUR para $S_o/X_o = 0,46$ gDQO/gSSV	38
Figura 5.21 OUR para $S_o/X_o = 0,55$ gDQO/gSSV	38
Figura 5.22 OUR para $S_o/X_o = 0,6$ gDQO/gSSV	38
Figura 5.23 OUR para $S_o/X_o = 0,63$ gDQO/gSSV	38
Figura 5.24 OUR para $S_o/X_o = 0,72$ gDQO/gSSV	38
Figura 5.25 OUR para $S_o/X_o = 0,89$ gDQO/gSSV	38
Figura 5.26 OUR para $S_o/X_o = 1,13$ gDQO/gSSV	39
Figura 5.27 línea de respiración endógena con variación de $\pm 5\%$	40
Figura 5.29 Comportamiento de Y_H con la relacion S_o/X_o	44
Figura 5.30 Comportamiento de Y_H con la relacion S_o/X_o	45
Figura 5.31 Comportamiento del modelo para Y_H y resultados experimentales de Y_H	47
Figura 6.1 Area total de OD para dos ensayos respirométricos.....	51
Figura 6.2 Movilización de recursos al mantenimiento y crecimiento.	52
Figura 6.3 Movilización de recursos para mantenimiento y crecimiento.....	53

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 Principales procesos biológicos empleados en el tratamiento de aguas residuales.....	2
Tabla 1.2. Valores de Y_H utilizados para aguas residuales urbanas.....	11
Tabla 3.1. Métodos y equipos empleados en la caracterización	21
Tabla 3.2 Grupos planteados en la experimentación	24
Tabla 5.1 Resultados de caracterización del agua residual influente de la planta piloto de Carraixet	26
Tabla 5.2 Caracterización de efluente de planta piloto de Carraixet.....	27
Tabla 5.3 Porcentaje de eliminación de contaminantes de la planta piloto de Carraixet	28
Tabla 5.4 Valores de los componentes de la DQO del agua residual influente	29
Tabla 5.5 Grupos de ensayos para la ejecución de las respirometrías.	32
Tabla 5.6 OD total a partir de una variación del $\pm 5\%$ en la línea endógena en ensayos respirométricos.	40
Tabla 5.7 Relación S_o/X_o y OUR obtenida en cada ensayo respirométrico.....	41
Tabla 5.8 Rendimiento Y_H para los 22 experimentos respirométricos	43
Tabla 5.9 Ajuste del modelo para Y_H	46

1. INTRODUCCION

Con el avance de los procesos de tratamiento biológico del agua residual se ha extendido el uso de modelos matemáticos. Entre los más ampliamente utilizados es posible citar el ASM2d (Wentzel y col., 1999) el cual permite describir la eliminación biológica de materia orgánica y nutrientes. Basado en este modelo, el grupo de investigación CALAGUA propuso el BNRM1 (Seco y col., 2004), el cual es una herramienta fundamental para el diseño, operación y control de estaciones depuradoras.

Para lograr una adecuada implementación de un modelo matemático y representación del proceso biológico, es necesario profundizar en dos aspectos fundamentales:

- Determinación del orden de los parámetros del modelo.
- Desarrollo adecuado de procedimientos para la caracterización de la materia orgánica y nutrientes presentes en el agua residual.

Por lo expuesto anteriormente, a continuación se presenta los principios generales del tratamiento de aguas residuales, así como la revisión bibliográfica de los métodos de caracterización de los componentes del agua residual.

1.1 DEPURACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES

La utilización del agua a nivel comunitario en las poblaciones y en la industria, ocasiona un deterioro de su calidad asociado a las características físicas, químicas y biológicas. La contaminación de las fuentes receptoras, disminuye los niveles de oxígeno y modifica de manera excesiva las concentraciones de los elementos que la componen. Esto conduce a la implementación de tratamientos que disminuya los contaminantes, reduciendo el impacto negativo que producen.

Existen diferentes procesos de tratamiento, entre los cuales se encuentran los procesos fisicoquímicos y biológicos, los cuales tienen como objetivo la eliminación de materia orgánica y nutrientes. Sin embargo, en este trabajo de investigación interesa el proceso biológico dado que permite la eliminación de diferentes contaminantes sin la adición de reactivos.

En los tratamientos biológicos participan microorganismos que metabolizan los contaminantes presentes en el agua residual. Estos microorganismos utilizan los contaminantes del agua como fuente de carbono y/o de energía, convirtiéndolos en nuevos microorganismos, dióxido de carbono y otros compuestos inocuos.

La fuente de carbono y/o energía se denomina sustrato, por lo que en estos tratamientos la eliminación de contaminantes se conoce como consumo de sustrato.

Los procesos de crecimiento de biomasa y de consumo de sustrato están totalmente relacionados, denominándose rendimiento a la cantidad de biomasa generada por unidad de sustrato eliminado (Ferrer y col., 2007).

Aunque se han desarrollado diferentes tipos de tratamientos biológicos, los más empleados para depurar aguas residuales urbanas e industriales son el proceso de fangos activados y la tecnología de biopelícula. En la Tabla 1.1 se exponen los principales procesos de tratamiento clasificados de acuerdo al aceptor final de electrones en la cadena respiratoria de los microorganismos. Si el aceptor final es el oxígeno, el proceso se desarrolla en condiciones aerobias. En cambio, el proceso es anóxico si el aceptor es el nitrato. Si la materia orgánica es el aceptor final de electrones, se desarrollan condiciones anaerobias (Metcalf & Eddy., 1995; Ferrer y col., 2007).

Tabla 1.1 Principales procesos biológicos empleados en el tratamiento de aguas residuales.

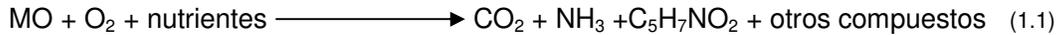
Procesos Aerobios	Cultivo en suspensión	Fangos Activados	Continuos	Flujo en pistón Mezcla completa
		Lagunas aireadas	Discontinuos	Aireación prolongada Canales de oxidación Nitrificación
Procesos Anóxicos	Cultivo fijo	Biodiscos rotativos		
		Filtros percoladores	Alta carga Baja carga	
Procesos Anaerobios	Cultivo en suspensión	Digestión anaerobia	Alta carga Baja carga Doble etapa	
	Cultivo fijo	Filtro anaerobio Lecho expandido		
Procesos combinados (anaerobios-anóxicos-aerobios)		Nitrificación-desnitrificación Nitrificación-desnitrificación-eliminación de fósforo		

(Metcalf & Eddy., 1995)

En los procesos de depuración biológica se lleva a cabo la eliminación de materia orgánica, nitrógeno y fósforo. Si bien los procesos de eliminación de nutrientes presentan una elevada complejidad y han sido objeto de numerosos estudios, en este trabajo interesa la eliminación de materia orgánica dado que se pretende estudiar la caracterización de la misma. A continuación se presenta el metabolismo que llevan a cabo las bacterias para eliminar la materia orgánica presente en el agua residual.

1.2 ELIMINACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA POR BACTERIAS HETERÓTROFAS

La materia orgánica (MO) presente en el agua residual afluyente es utilizada como sustrato por las bacterias heterótrofas como fuente de carbono para la síntesis celular. Las reacciones de oxidación y de síntesis celular se pueden expresar de la forma genérica:



En la reacción, los microorganismos utilizan el oxígeno y nutrientes para la producción de energía y la síntesis de nuevas células, representado en la reacción como $\text{C}_5\text{H}_7\text{NO}_2$. En la figura 1.1 se muestra un esquema de las etapas que participan en el metabolismo.

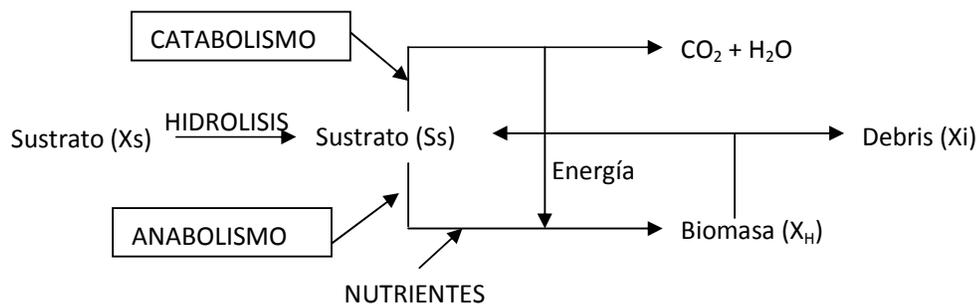


Figura 1.1 Metabolismo Bacterias Heterótrofas.

En la figura 1.1 sobresalen dos nombres que determinan los procesos de mantenimiento y de crecimiento de las bacterias. En el Catabolismo se consume oxígeno para la oxidación del sustrato fácilmente biodegradable (Ss). Con este mecanismo se genera energía, CO_2 y H_2O . Las bacterias en ausencia de Ss, deben primero transformar el sustrato lentamente biodegradable (X_s) en fácilmente biodegradable, por un proceso enzimático extracelular denominado Hidrólisis.

En el Anabolismo, las bacterias utilizan la energía producida en el catabolismo, los nutrientes y la materia orgánica para la síntesis de tejido celular. De igual manera con la muerte de microorganismos se aporta al sistema material orgánico, siendo éste de carácter lentamente biodegradable, por lo que debe ser hidrolizado para su utilización nuevamente en el ciclo.

Dado que la materia orgánica juega un papel fundamental en el proceso de depuración biológica del agua residual, al ser el contaminante que se encuentra en mayor proporción, resulta de gran interés estudiar los métodos que permiten caracterizarla. A continuación se presentan las fracciones de la materia orgánica que componen el agua residual.

1.3 COMPONENTES DEL AGUA RESIDUAL

Los modelos matemáticos desarrollados para simular los procesos de tratamiento del agua residual basan la caracterización de la materia orgánica en términos de DQO (demanda química de oxígeno).

La DQO total se divide en varias fracciones (Sperandio y col., 2000; Henryk y col., 2003). En la figura 1.2 se presenta la división de la DQO en sus diferentes componentes.

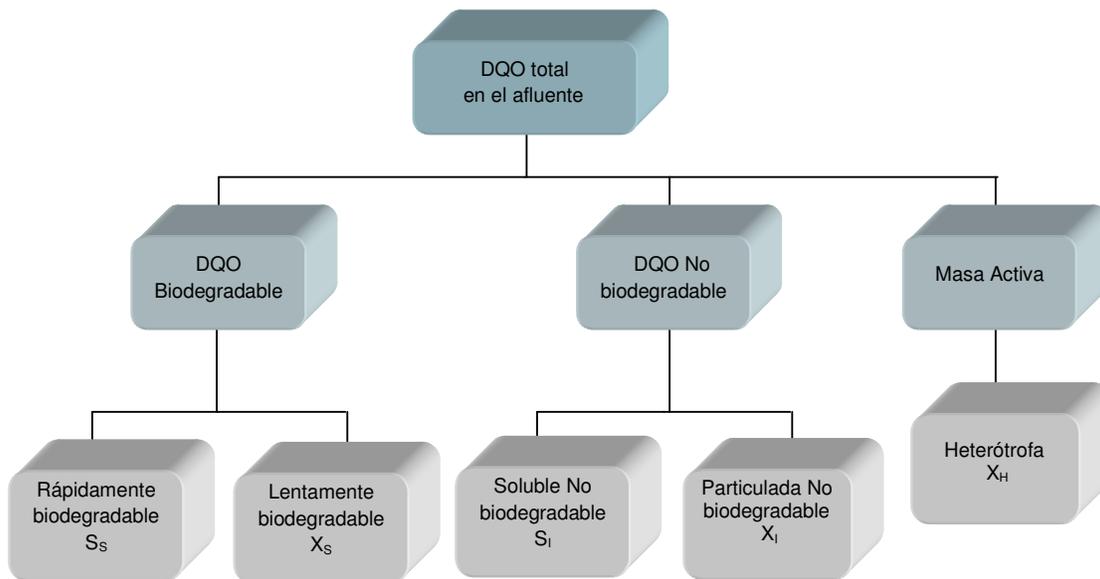


Figura 1.2 División de la DQO en componentes

La materia orgánica biodegradable se subdivide en rápida o fácilmente biodegradable (S_s), también denominada por otros autores como DQORB y en lentamente biodegradable (X_s), denominada también DQOLB (Orhon y col., 1997; Henryk y col., 2003; Dimock y col., 2006). La porción S_s es material que puede entrar rápidamente al interior de la célula y ser metabolizado para la producción de energía y material celular. La porción X_s es derivada de materia particulada/coloidal y moléculas orgánicas complejas que requieren una hidrólisis previa para su posterior utilización.

Las componentes S_1 y X_1 no se eliminan en el tratamiento biológico. La componente X_1 se acumula con el fango producido en el proceso, por lo cual se extrae con la purga de sólidos del sistema. La S_1 por su parte se mantiene aproximadamente constante debido a que no puede ser degradada, siendo su valor en el efluente prácticamente igual al del afluente (Petersen., 2000; Henryk y col., 2003).

Las diversas fracciones de materia orgánica que componen el agua residual y su importancia en el metabolismo de los microorganismos, hace necesario llevar a cabo un adecuado procedimiento de caracterización. Por esta razón se exponen las principales metodologías publicadas en la literatura.

1.4 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL.

Diferentes métodos han sido propuestos para caracterizar el agua residual. Entre los más ampliamente empleados se encuentra el método físico-químico y el biológico. A continuación se dará una descripción de ambas metodologías.

1.4.1 Método físico-químico

El método físico-químico emplea una etapa de filtración para separar la componente soluble de la particulada. De esta manera, el tamaño de las moléculas es un indicador de la biodegradabilidad de la materia orgánica. Es decir, la componente S_s está formada por partículas relativamente pequeñas, las cuales pueden entrar rápidamente al interior de la célula microbiana. En cambio, la componente X_s incluye moléculas más complejas y de mayor tamaño que necesitan una hidrólisis previa para poder ser asimiladas (Wentzel y col., 1995).

Habitualmente, la fracción soluble está asociada a micropartículas y a material coloidal. Estos últimos pueden ser de carácter orgánico, inorgánico o mixto y el procedimiento de separación dependerá del diámetro del poro del material con que se realiza la filtración, siendo el filtro más comúnmente utilizado de porosidad de $0,45 \mu\text{m}$ (Hu y col., 2002; Laborda y col., 2002; Henryk y col., 2003). Los coloides incluyen sustancias entre $1 \text{ nm} - 1 \mu\text{m}$, por lo que sólo están parcialmente incluidos en la fracción soluble, ocasionando una sobre-estimación de la concentración de S_s (Dold y col., 1980)

Para mejorar el procedimiento de caracterización, varios autores recomiendan diferentes procedimientos. Mamais y col. (1993) proponen la floculación del material coloidal antes de realizar la filtración. Spanjer y col., (1995) proponen realizar una centrifugación previa durante 10 min a 25000 rpm antes de llevar a cabo la filtración con un tamaño de filtro de $0,45 \mu\text{m}$. Por otro lado, Ekama y col., (1986) proponen una relación entre la S_s y la DQO verdaderamente soluble dada por la siguiente ecuación:

$$DQOFB = DQOvs - DQOnBS \quad (1.2)$$

Donde:

- DQOFB : DQO fácilmente biodegradable
- DQOvs : DQO verdaderamente soluble
- DQOnBS : DQO no biodegradable soluble

Torrijos y col., (1993) llevaron a cabo un estudio del agua residual doméstica. En su trabajo mencionan que los filtros con tamaño de poro de 0,1 μm , proporcionan una estimación adecuada de la Ss, sin necesidad de aplicar la pre-floculación (Wentzel y col.,1995).

Una vez definido el tamaño de filtro que se empleará en la separación de las fracciones soluble y particulada, la identificación de los componentes utilizando las pruebas de DQO y DBO (Demanda Biológica de Oxígeno) será la siguiente:

$$S_I = \text{DQO}_{\text{soluble efluente}} - \text{DBO}_{\text{soluble efluente L}} \quad (1.3)$$

$$S_S = \text{DQO}_{\text{soluble influente}} - S_I \quad (1.4)$$

$$X_I = \text{DQO}_{\text{total influente}} - \text{DBO}_{\text{total influente}} - S_I \quad (1.5)$$

$$X_S = \text{DQO}_{\text{total influente}} - S_S - S_I - X_I \quad (1.6)$$

Donde: DBO_L es la demanda biológica de oxígeno de 20 días.

Se observa que para completar el método físico-químico es necesario determinar la demanda biológica de oxígeno, el cual es un método biológico del que se hablara a continuación.

1.4.2 Métodos biológicos

Se basa en la respuesta biológica por medio de la medición del consumo de oxígeno disuelto (OD). Con estos métodos es posible determinar las componentes de la DQO como Ss, Xs y X_H .

El método tradicional es la determinación de la demanda biológica de oxígeno (DBO), por la vía de la oxidación bioquímica, la cual permite cuantificar la cantidad de materia orgánica biodegradable. Este método es lento, siendo poco práctico para controles rutinarios en la explotación de depuradoras. En un período de 5 días (DBO_5) se llega a oxidar entre el 60 y 70% de la DQO biodegradable, siendo necesario incrementar el tiempo de incubación a 20 días (DBO_{20}) para alcanzar del 95 al 99% del total. (Metcalf y Eddy., 1995)

Otro método biológico ampliamente utilizado es el análisis respirométrico. Este método se basa en la determinación de la velocidad de consumo de oxígeno de los microorganismos al degradar un sustrato - OUR (Oxygen Uptake Rate). Este análisis que permite determinar las componentes Ss y Xs, combinando volúmenes conocidos de agua residual y de fango aerobio en un reactor discontinuo. Este tipo de reactor brinda una operación sencilla y minimiza interferencias (Cokgor y col.,1998; Liu y col.,1998; Nuhoglu y col., 2004).

Los ensayos respirométricos se emplean para la determinación de parámetros cinéticos de los microorganismos como la velocidad máxima de crecimiento μ_H y la velocidad de lisis celular b_H , como también la porción de biomasa heterotrofa X_H , y el rendimiento de crecimiento Y_H (Yu Liu y col., 1998; Sperandio y col., 2000; Nuhoglu y col., 2004).

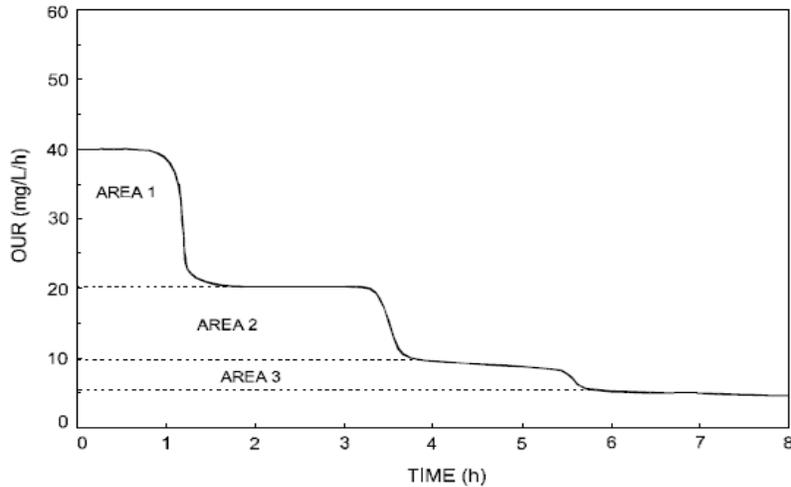


Figura 1.3 Comportamiento de OUR ideal observado en un experimento aerobio discontinuo (HenryK y col., 2003)

En la Figura 1.3 se muestra un perfil ideal del comportamiento de OUR. Se observa que el área bajo la curva se subdivide en 4 secciones: el área 1 indica la cantidad de OD utilizado para la oxidación de la DQO rápidamente biodegradable S_s . Esta componente es la responsable de provocar una respuesta respirométrica rápida debido a que puede ser metabolizado fácilmente por los microorganismos (Cokgor y col., 1998). La componente S_s está formada por compuestos de bajo peso molecular, como ácidos volátiles grasos, alcoholes, etc. facilitando así su asimilación. La ecuación que permite determinar S_s es la siguiente (Orhon y col., 1996)

$$S_s = \frac{1}{(1-Y_H)} \int_0^{t_1} OUR dt \quad (1.7)$$

Siendo: Y_H : Rendimiento de las bacterias heterótrofas.

El area 2 de la Figura 1.3 indica la cantidad de OD utilizada para la nitrificación. El area 3 denota la cantidad consumida para la oxidación de la DQO lentamente biodegradable X_s (velocidad limitada por la hidrólisis). Esta fracción está compuesta por materia orgánica de elevado peso molecular que necesita una etapa previa de hidrólisis para entrar al espacio celular (Nuhoglu y col., 2004). El area restante está relacionado al consumo de OD asociado con la respiración endógena. (Henryk y col., 2003)

Para realizar las pruebas respirométricas es necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- a) **Relación inicial S_o/X_o :** El resultado obtenido en las pruebas respirométricas está gobernado por la relación inicial S_o/X_o entre la concentración de sustrato S_o (gDQO) y la biomasa (g Sólidos Suspendidos Volátiles-SSV). (Ekama y col., 1986; Spanjers y col., 1995).

En la figura 1.4 se presenta las posibles curvas resultantes de ensayos respirométricos, que dependerá principalmente de la relación inicial S_o/X_o .

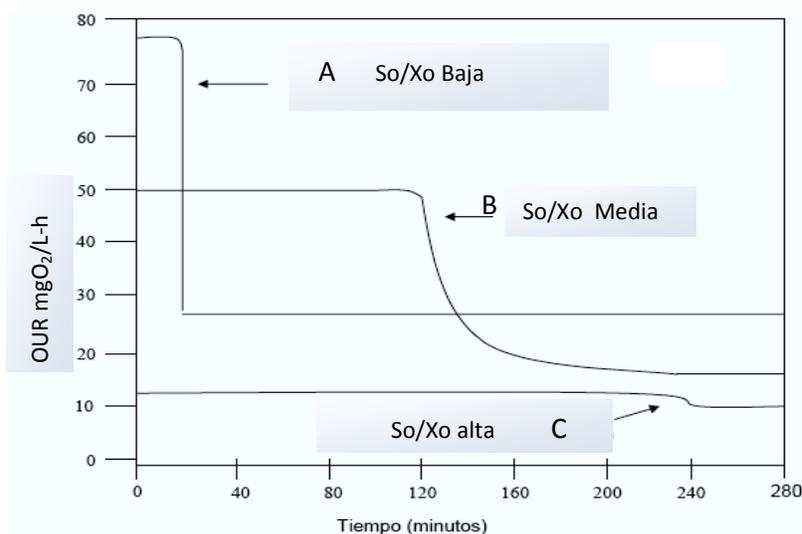


Figura 1.4: Efecto de diferentes relaciones de S_o/X_o en la OUR. (Ekama y col., 1986)

El uso de relaciones S_o/X_o bajas (menores a 0,2 gDQO/gSSV) conduce a un rápido consumo de la materia orgánica rápidamente biodegradable añadida (curva A). Debido al corto período de tiempo en el cual se consume la fracción S_s es necesario aumentar la frecuencia de determinación de la OUR para lograr un adecuado muestreo de esta variable. En este tipo de experimentos dada la elevada proporción de microorganismos respecto al sustrato presente se considera que no se produce crecimiento durante el ensayo, es decir, la velocidad de respiración endógena no varía. (Sperandio y col., 2000)

Relaciones superiores a 1 gDQO/gSSV permiten observar más fácilmente la degradación de los compuestos (curva B). En este caso, debido a la elevada proporción de materia orgánica fácilmente biodegradable respecto a la biomasa presente se produce el crecimiento de los microorganismos. En este caso varía el nivel de respiración endógena con lo cual cambian las condiciones experimentales durante el desarrollo del ensayo. Si la relación inicial S_o/X_o es alta, el área bajo la curva puede resultar demasiado baja y ancha como para establecer el momento en que la S_s ha sido completamente consumida (curva C).

Debido a los inconvenientes de trabajar con relaciones bajas o altas, diversos autores proponen intentar encontrar relaciones S_o/X_o intermedias que generen una curva tipo B. Una relación S_o/X_o determinada no es garantía, debido a que su valor depende del fango utilizado en la prueba del OUR y del tipo de agua residual.

Sperandio y col., (2000), emplean los datos obtenidos de pruebas respirométricas llevadas a cabo con relaciones bajas de S_o/X_o (0,01 -0,2 mgDQO/mgSSV) y altas (superiores a 1 mgDQO/mgSSV) para estimar materia orgánica rápida y lentamente biodegradable. El modelo planteado por estos autores, se basa en el modelo ASM1 propuesto por la IAWQ que asume en ambos casos, un valor de Y_H constante de 0,66 (gDQO/gDQO).

b) Fango en condiciones endógenas

Cuando el fango se toma de un sistema de tratamiento de aguas residuales, es evidente la presencia de una porción de materia orgánica que no ha sido asimilada por los microorganismos. Por lo tanto se tendrán demandas adicionales de OD en el momento de realizar las pruebas respirométricas, dificultando la identificación del OD gastado únicamente por el sustrato añadido.

Para evitar esta interferencia, el fango debe estar en condiciones endógenas. Esto consiste en airear el fango por un largo período determinado hasta alcanzar una velocidad de consumo de oxígeno constante. Cuando se alcanza el nivel de respiración endógeno, los microorganismos consumen el sustrato que se libera de la lisis celular.

c) Interferencias por nitrificación

Si el fango empleado en el ensayo respirométrico contiene microorganismos nitrificantes (bacterias autótrofas), puede generar interferencias dado que el valor del OD consumido involucrará lo utilizado por las bacterias heterótrofas para la oxidación del carbono orgánico y la nitrificación. Esto generaría un consumo superior del OD al que se produciría por la adición de la materia orgánica biodegradable. Para evitarlo, diferentes autores proponen añadir tiourea al fango. Una concentración de 20 mg/l garantiza una completa inhibición de los microorganismos nitrificantes (Ekama y col., 1986; Vollertsen y col., 1999; Sperandio y col., 2000; Orhon y col., 2002).

Otro factor importante al emplear pruebas respirométricas para caracterizar el agua residual es el rendimiento de los microorganismos heterótrofos, Y_H . Generalmente los investigadores emplean un valor de Y_H determinado en pruebas respirométricas

preliminares o utilizan el valor propuesto por el modelo ASM2d de 0.63 gDQO/gDQO. A continuación se lleva a cabo un análisis de la metodología empleada para determinar este parámetro.

1.5 RENDIMIENTO Y_H

Para lograr una adecuada modelación, diseño y operación de los sistemas de tratamiento biológico, es fundamental conocer la cinética de los microorganismos heterótrofos. Uno de los parámetros más importantes es el rendimiento de producción de biomasa (Y_H) definido como la relación entre la materia celular producida y la materia orgánica soluble total degradada, gDQO/gDQO. Este parámetro no sólo se emplea para conocer la componente de materia orgánica biodegradable sino además está asociado a la producción de fango por el crecimiento de microorganismos. (Vollertsen y col., 1998; Petersen., 2000; Boursier y col., 2005) Una determinación inadecuada de este parámetro puede llevar a estimaciones poco favorables del fango producido en la EDAR.

En los modelos matemáticos como el ASM2d o el BNRM1, Y_H es el parámetro que participa continuamente en las combinaciones de parámetros en los procesos de degradación de la materia orgánica y crecimiento de los microorganismos. Interviene en la caracterización del agua residual al participar en estimación de las concentraciones de los componentes S_s y X_s , así, como en el OD consumido, asociado con su degradación ($(1-Y_H)S_{So}$ y $(1-Y_H)X_{So}$) (Sperandio y col., 2000)

Conocido el valor del rendimiento Y_H también es posible identificar la velocidad máxima de crecimiento μ_H y la concentración de la biomasa asociada por medio del incremento de OUR en ensayos respirométricos. Esto permite estimar en los modelos la producción de los fangos en los procesos de tratamiento de las depuradoras, necesario para su diseño y control.

Dada la importancia de este parámetro se han publicado numerosos trabajos en los cuales se proponen diferentes metodologías para la determinación de Y_H . Autores como Nuhoglu y col., (2004) plantean el cálculo de Y_H como la relación entre Δ_{cell} DQO y Δ DQO soluble, basado en las publicaciones de la IAWQ. Cuando el cálculo se realiza con el total de la materia orgánica soluble, dicho cálculo no es del todo verdadero, dado que no se distingue entre el S_s usado para crecer y el usado para mantenimiento cuando no se produce crecimiento (Vollertsen., 1999).

Otros autores plantean encontrar el valor de Y_H por medio de ensayos respirométricos (Vollertsen., 1999; Sperandio y col.,1998; Sollfrank y col.,1991; Liu y col., 1998). Esta metodología que es la más ampliamente empleada se lleva a cabo en combinación con los métodos físico-químicos debido a la necesidad de conocer la concentración de sustrato a agregar. El rendimiento Y_H se calcula a partir de la DQO degradada y el OD utilizado para ello (Vollertsen y col., 1999; Petersen, 2000).

$$Y_H = \frac{\text{DQO degradada} - f_{OUR}}{\text{DQO degradada}} = 1 - \frac{f_{OUR}}{\text{DQO degradada}} \quad (1.8)$$

Siendo la DQO degradada, la diferencia entre la DQO al inicio menos la DQO al final.

En la bibliografía es posible hallar diferentes valores del parámetro Y_H , el cual es una característica del fango y del agua residual empleada. En la tabla 1.2 se presentan los valores de Y_H mencionados por diferentes autores.

Tabla 1.2. Valores de Y_H utilizados para aguas residuales urbanas

Autor	Valor de Y_H (gDQO/gDQO)
Marco Von Sperling., (2007)	0.5-0.7
Ferrer y col., (2007)	0.6
Henze y col.,(1987)	0.66
Henze y col.,(1999)	0.625
Dold y Marais (1986)	0.666
Wentzel y col., (1999)	0.645
Vollertsen y col., (1999)	0.65
Sperandio y col., (1998)	0.62-0.67

1.5.1 Determinación de Y_H con el método respirométrico

El procedimiento consiste en obtener y evaluar el perfil de la variación de la respuesta del OD (curva de OUR) de los microorganismos bajo condiciones de S_0/X_0 conocidas. Previamente al ensayo respirométrico, es necesario que el fango se encuentre en condiciones endógenas.

Esta condición se alcanza sometiendo el fango a una aireación prolongada. De esta manera el sustrato presente decrece hasta un nivel insuficiente para que se produzca crecimiento y solamente sea cubierto el requerimiento energético para el mantenimiento. Por lo tanto, los microorganismos consumen su propia biomasa resultado de la lisis celular. (Vollertsen y col., 1999).

Durante este período, se debe realizar el registro de la OUR. Para ello se fija un valor máximo y su valor mínimo de OD en el interior del reactor. Cuando se alcanza el máximo valor se desconecta la aireación y se registra el OD. Cuando el OD alcance el mínimo se activa nuevamente la aireación iniciando otro ciclo de medición.

En cada ciclo se calcula la pendiente de la recta en el período en el cual se suspendió la aireación, obteniéndose un valor de la OUR como se muestra en la Figura 1.5. Finalmente los valores de OUR obtenidos se grafican con relación al tiempo, realizando un diagrama conocido como respirograma. (Ver figura 1.6)

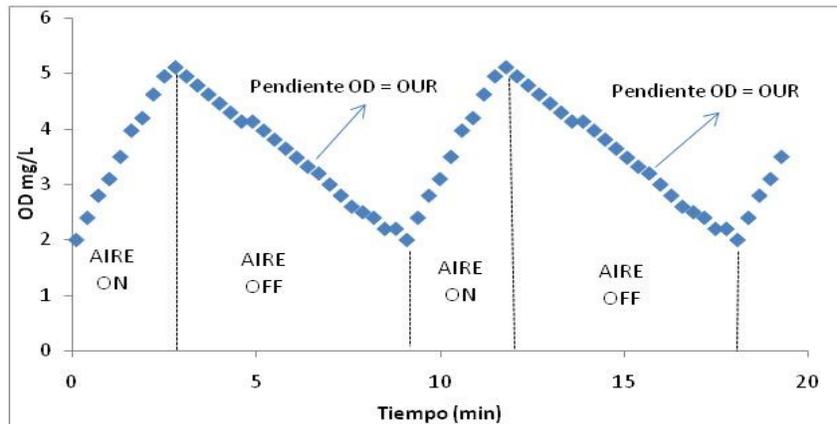


Figura 1.5: Comportamiento de OD en una respirometría

En la figura 1.6 se presentan los valores obtenidos de OUR en un ensayo respirométrico durante la fase endógena y después de la adición del sustrato. La fase endógena termina cuando los valores de OUR se estabilizan. Este comportamiento es similar al mostrado en la figura 1.6 antes de la adición del sustrato. Una vez alcanzada la fase endógena, se agrega el sustrato (S_s) y se registra el valor de OUR.

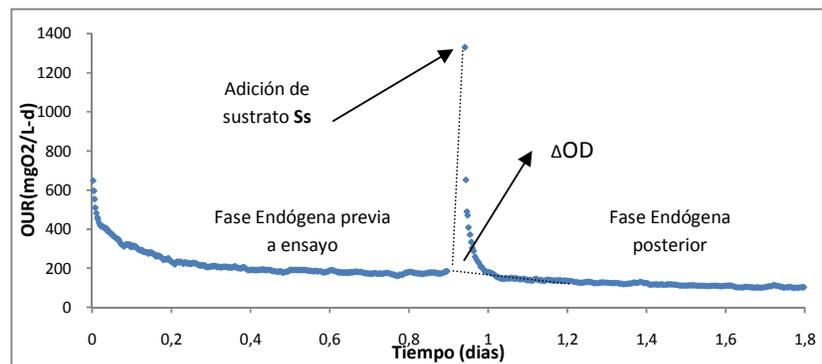


Figura 1.6 Comportamiento de OUR en un ensayo respirométrico

En la figura 1.6 el área delineada por la curva de OUR encima del nivel de la respiración endógena está asociado al consumo de oxígeno necesario para oxidar la S_s (Orhon y col., 2003).

1.5.2 Antecedentes en el comportamiento del rendimiento Y_H

La modelación es una herramienta ampliamente utilizada para entender y diseñar sistemas de tratamientos de aguas residuales. Permite obtener un impacto sobre parámetros importantes para ser analizados y ayudar a la definición y optimización de procesos. En este contexto, la modelación depende de información experimental disponible, lo que involucra el conocimiento de las diferentes porciones de la DQO del agua residual, así como los parámetros cinéticos y estequiométricos de los microorganismos. (Orhon y col., 1997)

Dold y col.,(1980); Ekama y col.,(1986); Wentzel y col.,(1999); Vollertsen y col.,(1999); Sperandio y col.,(2000); Orhon y col.,(2002); Henryk y col.,(2003); Nuhoglu y col.,2004 han llevado a cabo trabajos orientados a brindar herramientas que mejoren las caracterizaciones y determinaciones de estos parámetros estequiométricos en el tratamiento de las aguas residuales. La herramienta más utilizada por los anteriores investigadores hasta el momento ha sido el método biológico. Ekama y Marais (1977) han sido de los primeros investigadores que utilizan ensayos respirométricos con reactores de flujo discontinuo para la identificación de la porción rápidamente y lentamente biodegradable. También han realizado investigaciones de la calibración de constantes cinéticas de los microorganismos que participan, asociadas al tipo de sustrato que se esté utilizando.

En los diferentes trabajos de caracterización e identificación de parámetros cinéticos asociados a la eliminación de M.O. se puede notar que el rendimiento Y_H es uno de los parámetros más utilizados. Se realizan experimentos para la determinación de su valor o simplemente es tomado de estudios previos. Generalmente, el valor de Y_H es tomado como un valor constante que depende del fango y del agua residual en la que se trabaje.

Como ejemplo, trabajos como el de Orhon y col., (1997, 2003) y Nuhoglu y col.,(2004) presentan experimentos en los cuales utilizan un valor constante de Y_H para la caracterización de aguas residuales municipales. En estos trabajos utilizan diferentes relaciones de S_0/X_0 : 0.06 - 0.1 gDQO/gSSV para relaciones bajas y 0.4 -1.65 gDQO/gSSV para relaciones altas.

Sperandio y col, (2000), plantearon un método respirométrico para la estimación de la materia orgánica rápida y lentamente biodegradable. Trabajaron con relaciones S_0/X_0 bajas entre 0.01 -0.2 mgDQO/mg SSV y altas superiores a 0.2 mgDQO/mg SSV. En su trabajo realizaron una linealización a partir de consideraciones realizadas al modelo ASM1, simplificando el crecimiento de los microorganismos (X_H) en condiciones de sustrato-insuficiente y asumiendo en ambos casos, un valor de Y_H constante con un valor de 0,66 (gDQO/gDQO). Este valor se obtuvo de trabajos anteriores (Henze y col., 1987; Sperandio y col. 1998).

En otros estudios, diversos autores plantean la necesidad de conocer la influencia de la relación S_0/X_0 sobre el rendimiento Y_H , debido a su importancia en el modelo de crecimiento de los microorganismos en los procesos de tratamiento y en las caracterizaciones por métodos biológicos.

Vollertsen y col., (1999) llevaron a cabo un estudio en sistemas de alcantarillado combinado. Estos autores realizaron 27 determinaciones del valor de Y_H , mediante pruebas respirométricas empleando como sustrato (S_s) el acetato de sodio, en las cuales no es claro las relaciones S_0/X_0 utilizadas. Como resultado encontraron un valor de Y_H de 0.67 gDQO/gDQO ± 0.05 utilizando fango de aguas residuales doméstica s y un valor de Y_H de 0.62 gDQO/gDQO ± 0.05 utilizando sedimentos de un

alcantarillado combinado. Finalmente no encontraron correlación entre Y_H y el Ss adicionado.

Autores como Rao y col., (1966); Chudoba, (1992); Chang y col., (1993); Liu y col., (1998), han realizado estudios del comportamiento de Y_{obs} , con respecto a la variación de la relación S_0/X_0 en condiciones de sustrato-suficiente. Sus ensayos se basaron en métodos biológicos, como la respirometría en reactores de flujo discontinuo, con sustratos sintéticos solubles (Ss) y fango provenientes de plantas de lodos activados. En la figura 1.7 se presentan gráficas de los resultados obtenidos en las investigaciones de cada investigador. Los experimentos fueron llevados a cabo con sustratos sintéticos. Esto evidencia una posible discusión acerca de que el rendimiento Y_H encontrado es diferente al producido si se emplea fango y aguas residuales (Dircks y col., 1999).

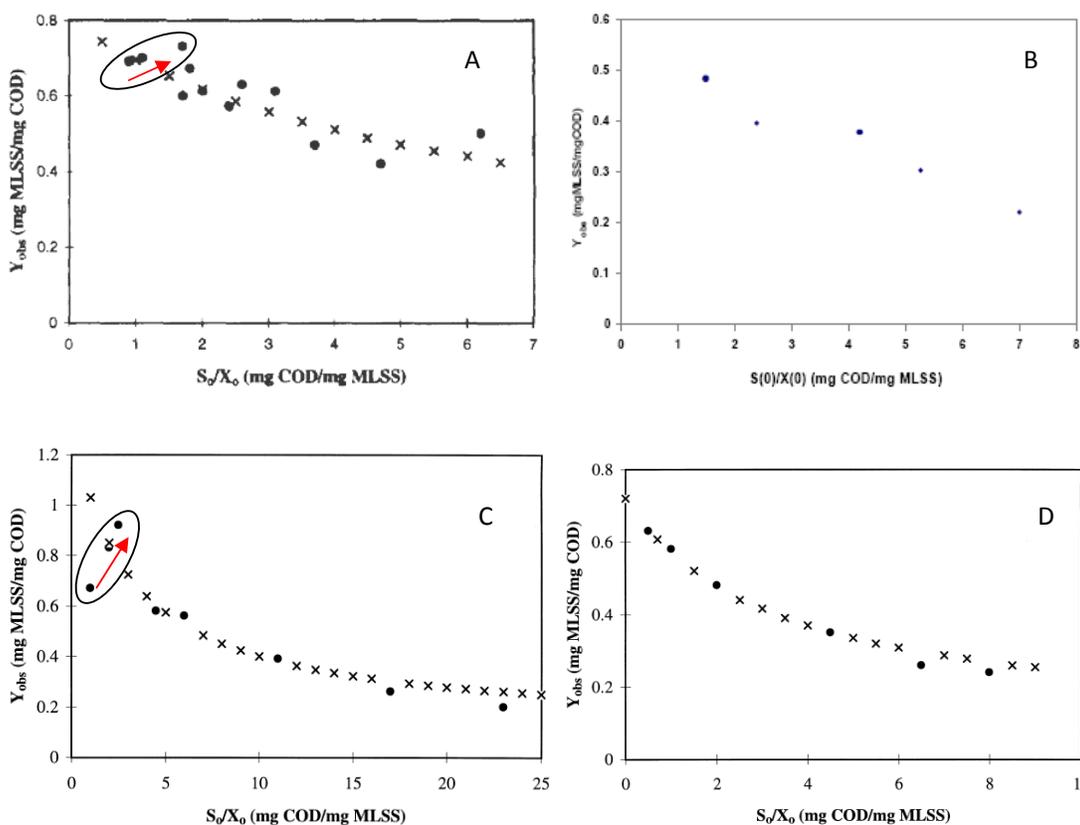


Figura 1.7: Y_{obs} como función de la relación S_0/X_0 : A: Rao y Gaudy, 1966; B: Chudoba y col., 1992; C: Chang y col, 1993; D: Liu y coll, 1998. Fuente: Liu y col, (1996, 1998).

En la figura 1.7 (A, B y D) se muestran datos de Rao y Gaudy, (1966); Chudoba y col., (1992) y Liu y col., (1998), que evalúan bajo condiciones de sustrato-suficiente, en un rango entre 0.5 y 8 mgDQO/mgSSV. Chang y col, 1993 en la figura 1.8 - C aumentó este rango a una relación superior a 20 mgDQO/mgSSV.

Los estudios mostraron como resultado, la disminución Y_{obs} con el aumento de la relación S_o/X_o . Se observó que con el aumento de S_o/X_o , el rendimiento de producción de los microorganismos disminuye, sin que lo haga el consumo de oxígeno. Chang y col., (1993) mencionan con respecto a esto que el 64% del OD consumido, no fue debido al crecimiento de microorganismos para relaciones superiores a 10 mgDQO/mgSSV.

Liu y col., (1998), basados en los ensayos de Chudoba y col., (1992) y Chang y col., (1993), Asociaron el comportamiento de Y_{obs} a un proceso llamado "Spilling" o desacoplamiento del metabolismo de los microorganismos. Su discusión se basó en que en condiciones de relaciones S_o/X_o elevadas, se presenta un exceso de la fuente de energía potencial en lo que concierne a las enzimas catabólicas de las células. La producción de bioenergía puede ser más rápida que la velocidad de utilización por los microorganismos en el anabolismo.

En los trabajos realizados por Rao y col., (1966) y Chan y col., (1993) (Figuras A y C) no es claro el comportamiento que tiene el rendimiento Y_H . Se observa que los datos experimentales no siguen el comportamiento del modelo planteado en relaciones S_o/X_o inferiores 2 gDQO/gSSV. Este rango es de gran interés debido a que el tratamiento de aguas residuales urbanas de fangos activados se utilizan generalmente relaciones S_o/X_o entre 0.07 a 0.5 gDQO/gSSV. (Sperling 2007).

Strotman y col., (1999) también realizaron investigaciones sobre la variación de Y_H con diferentes sustratos como el acetato, la glucosa y agua residual doméstica, donde se utilizaron diferentes relaciones iniciales S_o/X_o . En sus resultados se observa que para cada sustrato, el Y_H varía en un rango diferente. En el caso en que utilizan el agua residual doméstica con un rango de S_o/X_o entre 0.02 y 0.468 gDQO/gSSV, Y_H varía entre 0.7 y 0.87 gDQO/gDQO. Sin embargo, su análisis no asocia esta variación, con los diferentes S_o/X_o implementados.

Dentro de este mismo contexto, trabajos como el de Gatti (2009) plantea la necesidad de profundizar en el comportamiento de la Y_H . En diferentes experimentos de determinación de la componente S_s por métodos respirométricos, encontró que la relación S_o/X_o influye en el valor de parámetro Y_H .

Por lo anteriormente planteado, el objetivo de nuestro trabajo será estudiar la variación del rendimiento Y_H por medio de ensayos respirométricos utilizando agua residual doméstica como sustrato. El trabajo estará enfocado a evaluar el comportamiento de Y_H con relaciones de S_o/X_o inferiores a 2 mgDQO/mgSSV, dado que este intervalo es cercano al que se emplea en fangos activados. Hasta la fecha, para la caracterización, modelación y diseño de los sistemas de tratamiento de aguas residuales se ha utilizando un valor constante de Y_H , que depende del fango y del agua residual empleada.

El procedimiento a utilizar en nuestra experimentación será una combinación del método físico-químico y el biológico, implementando el método respirométrico con

reactores discontinuo. Se utilizará como sustrato el agua residual doméstica y el fango aerobio de una planta piloto de lodos activados.

A continuación se presentan los objetivos planteados para la realización del trabajo de investigación.

2. OBJETIVO

GENERAL

Por lo anteriormente expuesto en el apartado introducción, en este trabajo se ha propuesto estudiar la influencia de la relación inicial alimento/microorganismos (S_0/X_0) en el rendimiento de las bacterias Heterótrofas Y_H .

Para alcanzar este objetivo, se han planteado las siguientes tareas, las cuales se mencionan a continuación:

- ✓ Estudio del agua residual y del fango biológico de la planta piloto ubicada en el Barranco de la cuenca del Carraixet, Valencia.
- ✓ Caracterización del agua residual que entra a la planta piloto empleando el método físico-químico.
- ✓ Determinación del parámetro Y_H empleando el método respirométrico y diferentes relaciones iniciales de S_0/X_0 .
- ✓ Implementación de experimentos respirométricos que permitan trabajar en un amplio intervalo de variación de S_0/X_0 .
- ✓ Evaluación de las condiciones óptimas de determinación del rendimiento Y_H empleando el método respirométrico.

3. METODOLOGIA

En este apartado se discutirá la metodología empleada para llevar a cabo el trabajo de investigación propuesto. El fango y el agua residual empleados para desarrollar los experimentos se tomaron de la planta piloto de tratamiento de agua residual urbana e industrial ubicada en el Barranco de la cuenca del Carraixet (Alboraia, Valencia).

El trabajo experimental se llevó a cabo en las instalaciones de los laboratorios del grupo CALAGUA ubicado en el Departamento de Ingeniería Química, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Valencia, en el Campus de Burjassot – Valencia.

3.1 PLANTA PILOTO

La planta piloto en la cual se desarrollo el trabajo presenta una configuración UCT (University of Cape Town). En la figura 3.1 se muestra su configuración.

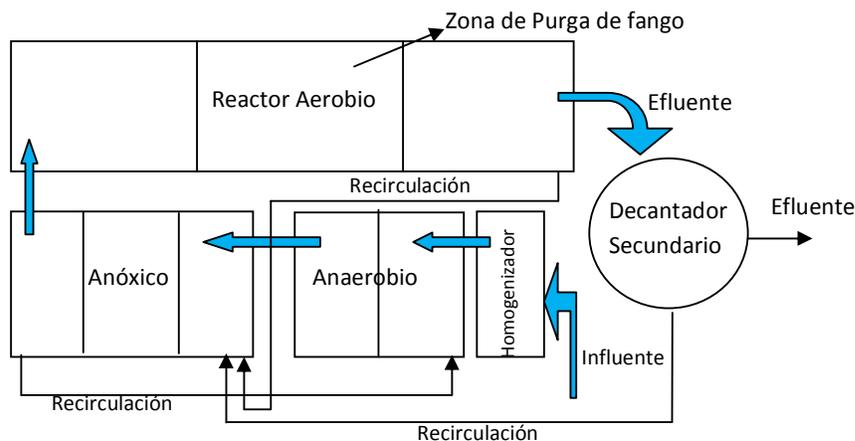


Figura 3.1 Esquema planta piloto

El sistema está compuesto por una serie de reactores biológicos con un volumen total de 813 litros. El primer reactor es anaerobio, con un volumen de 172 litros y está dividido en dos compartimentos. Seguidamente se encuentra el reactor anóxico con un volumen de 257 litros que se divide en 3 compartimentos al igual que el reactor aerobio, con un volumen de 384 litros. El caudal de alimentación es de 84l/h procedente de la arqueta de salida del desarenador de la planta depuradora grande. Esta corriente es el influente de la planta piloto que ingresa al tanque homogenizador instalado contiguo al tanque anaerobio.

Cada etapa funciona como un reactor de mezcla completa. El número de los agitadores y su velocidad presentes en la zona anaerobia y anóxica, es el necesario

para garantizar la mínima transferencia de oxígeno al fango activado. La aireación en la etapa aerobia se realiza mediante difusores ubicados en el fondo del reactor.

La configuración de la planta permite realizar la depuración de materia orgánica, eliminación de nitrógeno por nitrificación - desnitrificación y la eliminación del fósforo. El tiempo de retención hidráulico (TRH) es 9.6 h y el tiempo de retención celular (TRC) es 7 días. La purga diaria del fango se realiza de la parte media del reactor aerobio. En la figura 3.2 se muestra la imagen real de la planta

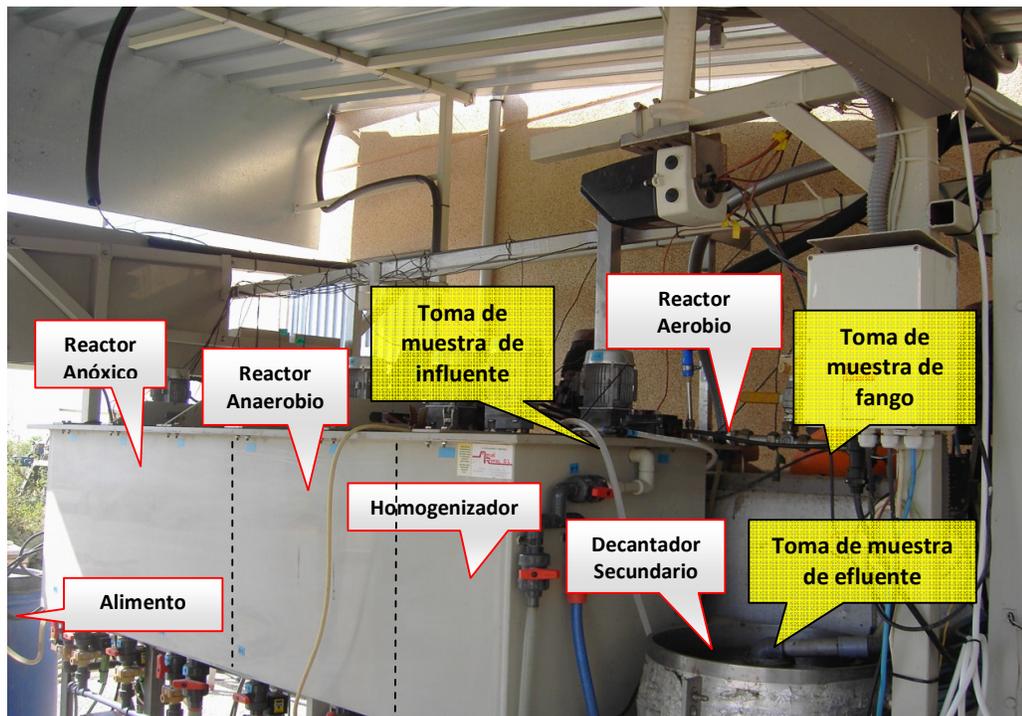


Figura 3.2: Planta piloto de Carraixet con un esquema UCT

La planta piloto cuenta con un recolector de muestras automático del influente y efluente. En el caso del influente, del tanque homogenizador se extrae un volumen de alícuota cada 10 min durante 24 horas el cual se deposita en un tanque que se encuentra en nevera 4°C. En el caso del efluente, el muestreo se llevó a cabo en la superficie del decantador secundario. El fango se muestreo de la parte intermedia del reactor aerobio.

En el análisis respirométrico se emplea la muestra del influente integrada de 24 horas y en la caracterización físico-química la muestra integrada de 24 horas del influente y efluente.

3.2 FILTRACION DEL AGUA RESIDUAL

El agua residual empleada en el análisis respirométrico se filtró empleando la planta de membrana que se observa en la figura 3.3. Esta planta permite recoger un importante volumen de permeado en un período corto de tiempo. El volumen filtrado fue almacenado en nevera a 4°C para preservar la muestra hasta su utilización. Esta planta de biomembrana tiene un tamaño de poro de 0,1µm. Diversos autores recomiendan este tamaño de filtro para separar la fracción de materia orgánica verdaderamente soluble (Laborda y col., 2008; Roeleveld y col., 2002; Torrijos y col., 1993).

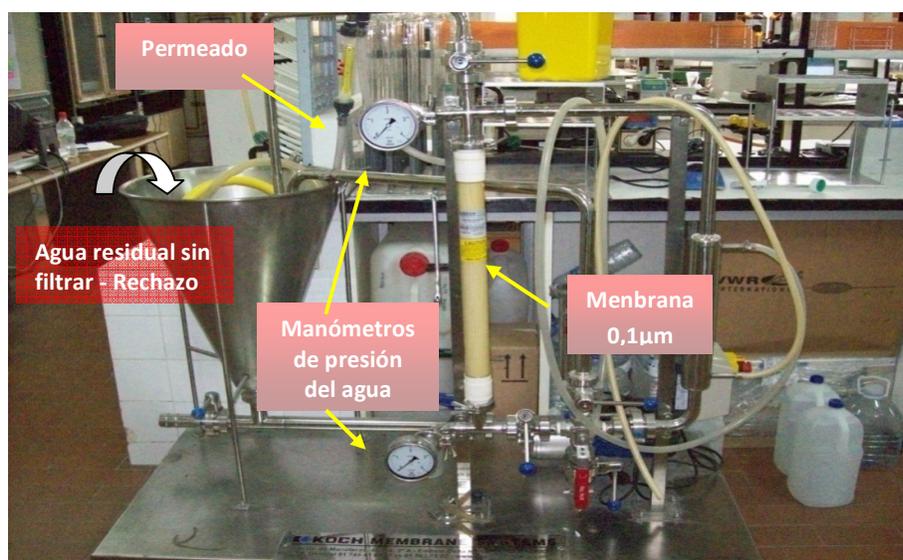


Figura 3.3: Equipo de filtración con membrana de 0,1 µm

3.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICO - QUÍMICA

La caracterización del agua residual se realizó utilizando el método físico – químico, implementando las técnicas propuestas en el Standard Method (2005). Las pruebas realizadas fueron la DQO_T, DQO_s, DBO_T, DBO_s, SST y SSV. La fracción soluble del influente se obtuvo con la planta de la figura 3.3 y la fracción soluble del efluente con filtros de 0.1µm empleando un sistema de filtrado por vacío.

La identificación de las diferentes componentes del agua residual como S_s, S_i, X_i, X_s se realizaron a partir de las caracterizaciones planteadas anteriormente de DQO y DBO, para lo cual se utilizaron las ecuaciones mostradas en las ecuaciones 1.3 a 1.6.

Además se determinó N-NH₄⁺, N-NO₃⁻ y P-PO₄⁻ siguiendo de igual manera los procedimientos planteados en el Standard Method (2005). Esto permite observar el comportamiento de la eficiencia de eliminación de contaminantes del sistema.

En la tabla 3.1 se muestran los métodos y equipos empleados en la caracterización.

Tabla 3.1. Métodos y equipos empleados en la caracterización

PARAMETRO	METODO ESTANDAR	EQUIPO
Demanda química de oxígeno (DQO)	Reflujo cerrado. (Método Colorimétrico.)	Espectroquant Pharo 300 (Merck)
	reflujo abierto	Tubos de reflujo abierto / valoración por titulación
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₂₀)	Método manométrico	Controlador Oxitop – OC110
Sólidos suspendidos totales (SST) y volátiles (SSV)	Gravimétrico	Horno 110°C y Mufla 550 °C
N-NH ₄ ⁺ , N-NO ₃ ⁻ , P-PO ₄ ⁻	Método colorimétrico	Analizador multiparamétrico (Smartchem)

3.4 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA EXPERIMENTAL

En la figura 3.4 se muestra el montaje experimental utilizado para llevar a cabo el análisis respirométrico.

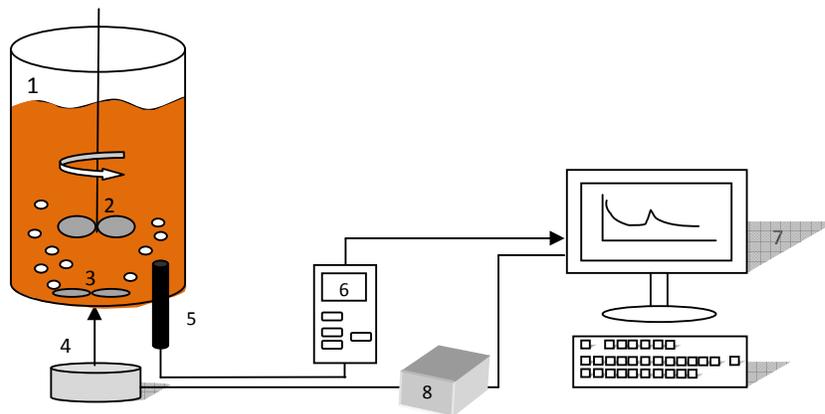


Figura 3.4 (1) Reactor discontinuo, (2) Agitador mecánico, (3) Difusores, (4) Aireador, (5) Sonda de medición de OD, (6) Oxímetro, (7) Ordenador, (8) Modulo de control.

El reactor discontinuo se construyó en acrílico con una capacidad máxima de 9 litros. Para garantizar la mezcla continua del fango en las diferentes etapas de la prueba se empleó un agitador mecánico que permite trabajar entre 200 y 2000 rpm. Se utilizó una adecuada velocidad de giro para evitar la sedimentación o reaireación por una excesiva mezcla.

El suministro del OD se llevó a cabo utilizando un aireador pequeño y su distribución fue por medio de 4 difusores de burbuja fina que se instalaron en la parte inferior del reactor. El registro de OD se realizó por medio de un oxímetro ubicado en la parte inferior del reactor para evitar interferencias con las burbujas de oxígeno que pueden alojarse sobre el cabezal y proporcionar valores erróneos de medición.

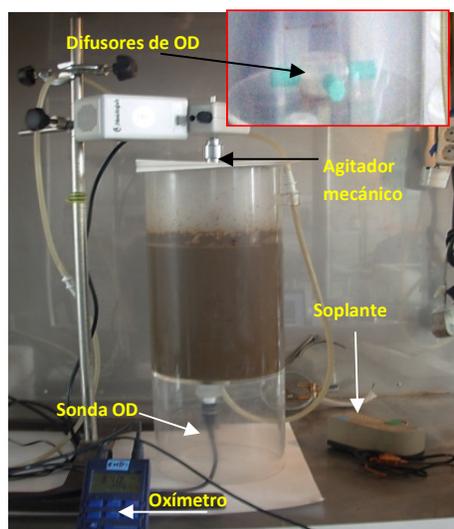


Figura 3.5 Montaje experimental

En la figura 3.5 se muestra una fotografía del montaje empleado para las respirometrías. El reactor se ubicó dentro de una campana, quedando aislado de corrientes de aire que puedan intervenir en las mediciones y garantizando durante todo el período de experimentación una temperatura ambiente de 20 °C.

El nivel de OD en el fango se mantuvo en un intervalo de 2-4 mg/l. El almacenamiento de los datos se llevó a cabo por medio de un programa específico diseñado por el grupo CALAGUA, el cual registra los valores de oxígeno y temperatura durante el periodo de trabajo.

En función del contenido de oxígeno del fango, el programa actúa bajo un módulo de control, apagando o encendiendo el aireador. De este modo el programa permite controlar la aireación en el interior del reactor. El programa activa la aireación al registrar valores inferiores a un mínimo establecido y la suspende al alcanzar un valor máximo de OD. Los datos obtenidos en el período en el cual no se airea, se emplean para calcular el valor de OUR.

En la figura 3.6 se muestra el programa utilizado. En la imagen A, se observan los registros de OD y temperatura en la columna del recuadro izquierdo y los valores de OUR, en la columna del recuadro derecho. También se observa en la parte superior las casillas para el control del OD mínimo y máximo, así como el número de puntos y

la correlación deseada para el cálculo de OUR. En la figura 3.6 B se puede observar la gráfica de OUR vs el tiempo que el programa construye, actualizándose con cada dato nuevo que se obtenga.

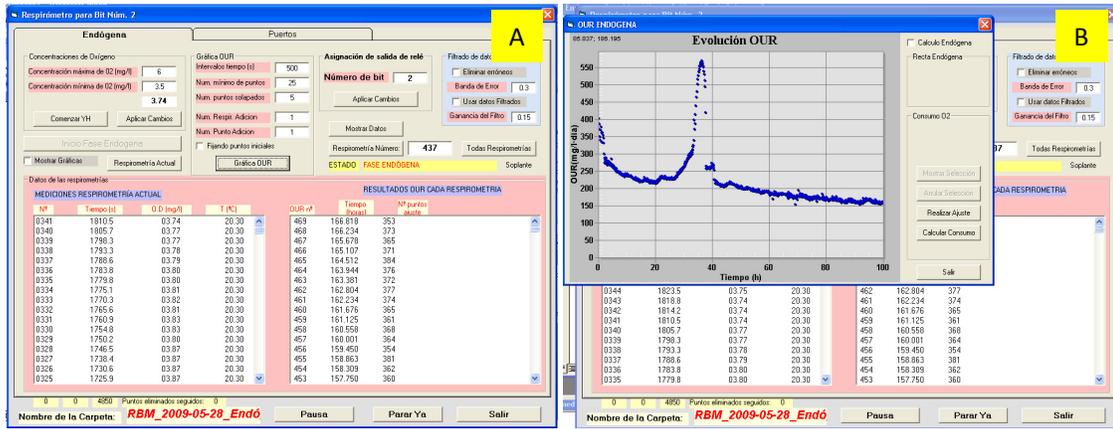


Figura 3.6 Imágenes del programa computacional; (A): pantalla principal, (B): Figura de OUR en el tiempo

3.5 FANGO EN CONDICIONES ENDÓGENAS

Para la realización de cada prueba respirométrica es necesario emplear fango en condiciones endógenas. En estas condiciones todo el sustrato externo se ha consumido. Los microorganismos utilizan la materia orgánica procedente de la lisis celular.

Para tal fin, el fango se coloca en el reactor mostrado en la figura 3.5 durante un período superior a 20 horas. Durante este tiempo se lleva a cabo el registro del cambio de la OUR. Se considera que se ha alcanzado la fase endógena cuando los valores de OUR se mantienen prácticamente constantes.

3.6 PROGRAMACION DE LAS EXPERIMENTACIONES

Se propusieron dos tipos de experimentos que permitan estudiar la influencia de la relación S_o/X_o inicial en el parámetro Y_H . El primer grupo con un valor bajo de S_o/X_o y el segundo grupo con un valor elevado de S_o/X_o .

En la tabla 3.2 se muestran los grupos planteados para la realización de los experimentos.

Tabla 3.2 Grupos planteados en la experimentación

Grupo de experimento	So/Xo gDQO/gDQO
I	bajo
II	alto

En los grupos de experimentos se trabajara con un amplio rango de relaciones So/Xo acorde a lo manejado frecuentemente en la depuración de aguas residuales urbanas con tecnologías de fangos activados que se encuentran entre 0.07 – 0.5 gDQO/gSSV (Sperling., 2007).

5. RESULTADOS

Durante el período de experimentación, se obtuvieron datos de las características del agua residual y del fango utilizados en los distintos ensayos respirométricos, lo cual se resume en este apartado. También se exponen los datos obtenidos de la OUR y el rendimiento Y_H frente a la variación de la relación S_o/X_o . A continuación se presentan los resultados obtenidos.

5.1 PLANTA PILOTO

En el período de investigación, se estudió el comportamiento de la planta piloto monitorizando su funcionamiento. En la figura 5.1 se presentan los datos de nitrógeno $N-(NH_4 + NO_3)$ y el fósforo soluble $P-(PO_4)$ del influente y efluente y los datos de SSV del fango aerobio.

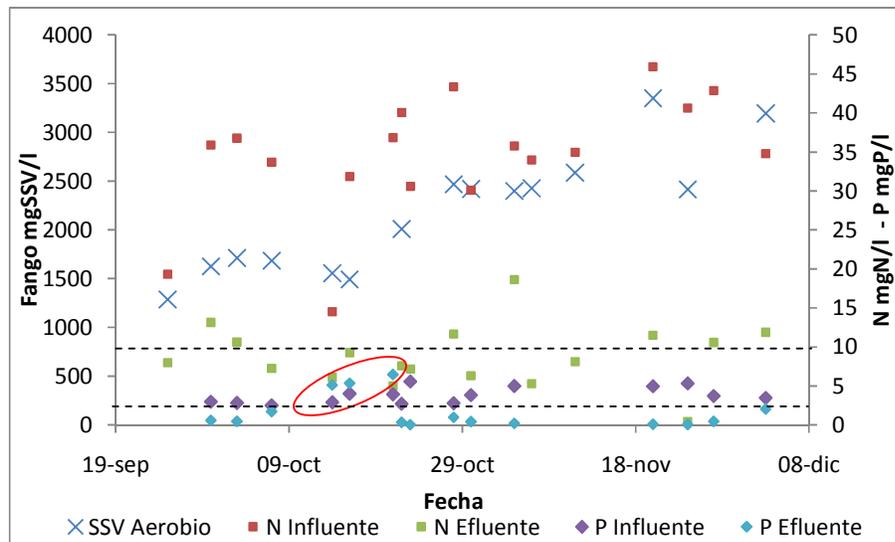


Figura 5.1 Datos experimentales de N, P y SSV aerobio de la planta piloto.

Durante el seguimiento de la planta piloto las diferentes variables mostraron un buen comportamiento. En la figura 5.1 se observa que los valores de las variables $N-(NH_4 + NO_3)$ y $P-(PO_4)$ en el efluente se mantuvieron por debajo de lo establecido por la normativa 91/271/CE. Sin embargo, el mes de octubre se observó un incremento de los valores en las concentraciones de $P-PO_4$ en el efluente. En la normativa se establecen concentraciones máximas de N total entre 10 -15 mgN/l y el P entre 1-2 mgP/l en el efluente.

También se observó un incremento en los SSV del fango aerobio, debido a un aumento del TRC del sistema de 6 días a 8 días. Este aumento brinda mejores condiciones a los microorganismos responsables de los diferentes procesos, especialmente la eliminación de nitrógeno y fósforo.

El comportamiento de la planta piloto anterior estuvo influenciado por la temporada vacacional de los meses de verano, que afectó la estabilidad del sistema. Por lo tanto, durante el período de septiembre a octubre el sistema estuvo en un período de recuperación, observándose al final, buenos resultados de eliminación.

5.2 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL

Para conocer las características del agua residual empleada en los análisis respirométricos, se llevó a cabo una caracterización exhaustiva. Se realizaron las siguientes determinaciones: DQO, DBO, SST, SSV, N-NH₄, N-NO₃ y P-PO₄. En la tabla 5.1 se presentan los datos obtenidos.

Tabla 5.1 Resultados de caracterización del agua residual influente de la planta piloto de Carraixet

FECHA	DQO _T mgDQO/l	DQO _S mgDQO/l	DBO _T mgDQO/l	DBO _S mgDQO/l	SST mgSS/l	SSV mgSS/l	N-NH ₄ mgN/l	N-NO ₃ mgN/l	N (NH ₄ +NO ₃) mgN/l	P-PO ₄ mgP/l
23/09/08	98	19	73	14	46	35	15,7	0,3	16,0	1,7
30/09/08	218	63	158	36	67	54	34,0	1,9	35,9	2,9
21/10/08	236	83	186	76	62,5	54	33,7	3,2	36,9	4,0
29/10/08	300	101	204	77	95	89	37,5	0,0	37,5	4,3
04/11/08	280	78	190	72	85	85	35,9	0,0	35,9	3,9
11/11/08	302	90	205	78	78	77	32,3	0,0	32,3	3,7
26/11/08	511	140	347	132	210	160	37,5	0,0	37,5	4,3

T: Total - Medición realizada sin filtrar.

S: Soluble – Muestra filtrada por 0.1 µm

Se observa en la tabla 5.1 que el agua residual utilizada tiene una composición media típica de aguas residuales domésticas (Metcalf y Eddy, 1995). Debe tenerse en cuenta que se muestreó después de la etapa de sedimentación primaria, en la que ya se ha producido una reducción considerable de materia orgánica particulada.

El agua residual recogida el 23/09/08 presentó concentraciones bajas con respecto a las demás, debido a que en este período se presentaron lluvias en el área de acción de la depuradora. Esto favoreció la dilución del agua residual, evidenciado en los valores obtenidos.

De igual manera que el influente, se caracterizó el efluente y el fango de la planta piloto de Carraixet, con el fin de observar el comportamiento del sistema. En la tabla 5.2 se recogen los datos obtenidos.

Tabla 5.2 Caracterización de efluente de planta piloto de Carraixet

FECHA	Efluente									Fango Aerobio	
	DQO _T mgDQO/l	DQO _s mgDQO/l	DBO _s mgDQO/l	SST mgDQO/l	SSV mgSS/l	N- NH ₄ mgN/l	N- NO ₃ mgN/l	N (NH ₄ +NO ₃) mgN/l	P- PO ₄ mgP/l	SST mgSS/l	SSV mgSS/l
23/09/08	89	17	14	-	-	0,1	7,7	7,8	0,1	1764	1292
30/09/08	63	23	15	45	36	0,4	12,8	13,2	0,6	1944	1555
21/10/08	108	37	21	106	80	1,0	3,9	4,9	0,4	2937	2240
29/10/08	72	32	18	49	25	6,9	4,1	11,0	0,9	3403	2590
04/11/08	155	30	17	104	86	12,8	5,6	18,4	0,1	3410	2973
11/11/08	80	39	22	71	62	0,8	6,9	7,7	0,1	3093	2580
26/11/08	76	52	29	58	42	6,9	4,1	11,0	0,9	3470	2790

T: Total - Medición realizada sin filtrar.

S: Soluble – Muestra filtrado por 0.1 µm

De acuerdo a los resultados de la tabla 5.2, en la mayoría de los muestreos realizados el efluente de la planta piloto no superó los valores máximos de vertido expuestos en la normativa 91/271/CE a excepción de los sólidos.

En términos de DQO, Nitrógeno y fosforo, los resultados estuvieron por debajo de 150mg/l, 15mg/l y 1mg/l respectivamente como la normativa lo exige. Sin embargo, el día 04/11/08 se obtuvo un valor de 155 mg/l y 18mg/l de DQO y nitrógeno respectivamente. En esta fecha se produjo un mal funcionamiento del decantador secundario, generando una mayor presencia de sólidos en el efluente.

Con respecto a las concentraciones del fango aerobio, se observaron concentraciones entre 1292 mg/l y 1555 mg/l de SSV en el mes 09/2008. Debe tenerse en cuenta como se comentó anteriormente, que el sistema venia de un período vacacional por lo cual se encontraba en recuperación. A partir de este mes, fue evidente un aumento en la concentración de los SSV del fango aerobio por un aumento en los sólidos de la entrada y del TRC del sistema. Las variaciones del TRC se hicieron para ayudar al sistema a estabilizarse y mejorar la depuración del agua residual adecuadamente, aumentando la concentración de SSV en promedio a 2635 mg/l.

A partir de los datos de DQO y DBO del influente y efluente se llevó a cabo el cálculo de las eficiencias de eliminación del sistema. En la tabla 5.3 se muestran los resultados.

Tabla 5.3 Porcentaje de eliminación de contaminantes de la planta piloto de Carraixet

Fecha	% Eliminación					
	SST mgSS/l	SSV mgSS/l	DQO _T mgDQO/l	DBO _S mgDQO/l	N (NH ₄ +NO ₃) mgN/l	P-PO ₄ mgP/l
23/09/2008	-	-	9	0	51	94
30/09/2008	0	46	71	57	63	79
21/10/2008	0	0	54	72	87	89
29/10/2008	37	74	76	77	71	79
04/11/2008	0	0	45	77	49	97
11/11/2008	9	21	74	72	76	99
26/11/2008	56	80	85	87	71	79

T: Total - Medición realizada sin filtrar.

S: Soluble – Muestra filtrado por 0.1 µm

El bajo porcentaje de eliminación en sólidos mostrados en la tabla 5.3, fue consecuencia de la elevada presencia de fango suspendido en el efluente. En diferentes días de muestreo, la presencia de sólidos en el efluente superó la concentración de entrada al sistema, obteniendo eficiencias de eliminación nulas.

Es de notar que el resto de variables medidas en el efluente presentan un buen porcentaje de eliminación, principalmente en los valores de DBO, N y P-PO₄. Esto muestra que las condiciones operacionales del sistema favorecieron el crecimiento de los microorganismos responsables de su degradación. Por lo tanto, el buen comportamiento del sistema garantiza unas buenas condiciones del fango utilizado en las pruebas respirométricas.

En términos de DQO, las eficiencias de eliminación son poco estables, aunque las concentraciones del efluente cumplen con la legislación de vertidos. Esta variabilidad en las eficiencias de eliminación posiblemente pueda deberse a la presencia de los fangos suspendidos en el efluente y a la gran variabilidad de la calidad del agua de entrada. El día 23/09/2008 se observó una pobre eliminación de contaminantes debida principalmente a la dilución de la DQO del agua residual de entrada, por las lluvias caídas en la zona.

A partir de las mediciones registradas en la tabla 5.1 y 5.2, se calcularon las diferentes componentes de la DQO total. En la tabla 5.4 se muestran los resultados.

Tabla 5.4 Valores de los componentes de la DQO del agua residual influente

Fecha	S _s mgDQO/l	S _i mgDQO/l	X _s mgDQO/l	X _i mgDQO/l
23/09/08	16	3	57	22
30/09/08	55	8	103	52
21/10/08	67	16	118	35
29/10/08	87	14	117	82
04/11/08	64	13	126	76
11/11/08	73	17	132	78
26/11/08	117	23	230	140

Como resultado se observó en la tabla 5.4 que la parte soluble S_s se encuentra en un rango entre el 22 y 28% de la DQO_T. Por lo tanto el agua residual utilizada presentó concentraciones de S_s suficiente para cada experimento.

Fue notoria en las caracterizaciones anteriores la dilución presentada en el agua residual colectada el 23/09/08, afectando de igual manera la cantidad de S_s presente, y siendo esta la más baja obtenida durante las experimentaciones.

De la caracterización sobresale que la mayor parte se encuentra en forma de X_s siendo en promedio el 52% de la DQO total. De igual manera en la componente X_i se obtuvieron altos valores, siendo en promedio 24,3% de la DQO total.

5.3 EXPERIMENTOS RESPIROMÉTRICOS PARA LA DETERMINACIÓN DE Y_H.

Se llevaron a cabo una serie de experimentos respirométricos con el fin de estudiar la influencia de la relación So/Xo con el rendimiento Y_H. Dado que el propósito es estudiar esta influencia en un amplio intervalo de medición, se llevaron a cabo dos grupos de experimentos.

En el primer grupo se realizaron ensayos que abarcaron valores bajos de So/Xo. El segundo grupo involucró las relaciones So/Xo más altas. De esta manera es posible estudiar esta influencia en un mayor rango de medición de So/Xo.

5.3.1 Grupos de experimentación

En el planteamiento de los dos grupos se tuvo en cuenta que el fango aerobio debe estar en condiciones endógenas antes de su utilización en cada ensayo respirométrico. A continuación se describen ambos grupos de experimentos.

Grupo I: En el primer grupo se llevaron a cabo ensayos con una relación baja de So/Xo entre 0.015 y 0.1 gDQO/gSSV. Para lograr valores más bajos de So/Xo fue necesario sedimentar el fango. Se empleó un tiempo de sedimentación inferior a los 30 min.

Los cálculos preliminares utilizados para conocer los volúmenes finales de fango (V_{fangoF}) y agua residual (V_{art}) necesarios para alcanzar los valores proyectados de S_o/X_o , se realizaron con el siguiente procedimiento.

- Para conocer la concentración del fango en un volumen final después de la sedimentación se empleó la siguiente ecuación.

$$C_{fangoS} = \frac{C_{fangoE} \left(\frac{mg}{l} \right) * V_{fangoE}}{V_{FangoS}} \quad (5.1)$$

Donde:

V_{fangoE} = Volumen de fango endógeno. (l)

V_{fangoS} = Volumen de fango endógeno sedimentado. (l)

C_{fangoE} = Concentración de SSV del fango endógeno. (mgSS/l)

C_{fangoS} = Concentración de SSV del fango endógeno sedimentado. (mgSS/l)

Conocido el volumen del fango y la concentración asociada, se debe establecer un volumen de agua residual. Por lo cual se obtendrá el volumen final de la mezcla agua residual y fango en el reactor.

$$V_f = V_{FangoS} + V_{AR} \quad (5.2)$$

Donde:

V_f = Volumen final en el reactor

V_{AR} = Volumen de agua residual a agregar

Antes de realizar el cálculo de la relación resultante según las concentraciones asociados a los volúmenes del fango y agua residual filtrada, se debe llevar a cabo el ajuste de la DQO final en el reactor. Esto es debido principalmente a que el fango endógeno contiene DQO soluble inerte, que al ser mezclada con la DQO del agua residual, diluirá la mezcla. De esta manera el contenido de DQO final está dado por la ecuación 5.3.

$$DQO_f = \frac{(DQO_i * V_{AR}) + (DQO_s * V_{fangoS})}{V_f} \quad (5.3)$$

Donde:

DQO_s = DQO soluble presente en el fango endógeno sedimentado. (mg/l)

DQO_i = DQO inicial. (mg/l)

DQO_f = DQO final después de la mezcla y dilución. (mg/l)

Una vez obtenida la DQO final, se podrá calcular el valor de S_o/X_o resultante con la siguiente ecuación.

$$S_o/X_o = \frac{DQO_f}{\frac{(C_{fangoS} + V_{fangoS})}{V_f}} \quad (5.4)$$

Previo a cada ensayo se llevó a cabo una prueba de IVL para observar la sedimentabilidad del fango y garantizar la obtención del volumen esperado en un tiempo mínimo. También se verificó que el volumen final (V_f) en ningún caso fuera menor a 3 litros para evitar inconvenientes en la agitación y en la medición del OD durante la prueba respirométrica.

Grupo II: En la segunda fase se utilizaron valores de S_o/X_o superiores a 0,1 (gDQO/gSSV). La metodología empleada para estimar los valores proyectados de S_o/X_o consistió en agregar un volumen de fango sin sedimentar en condiciones endógenas a un volumen de agua residual filtrada. En este caso se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- ✓ No es necesario llevar a cabo el procedimiento de sedimentación, debido a que por las características del agua residual filtrada, para obtener las relaciones de S_o/X_o deseadas, el volumen de fango es pequeño.
- ✓ Una vez establecido el volumen final (V_f) del reactor, se proponen volúmenes de agua residual filtrada (V_{AR}). Utilizando la ecuación 5.2 se despeja el volumen del fango a agregar (V_{fango}). Estos valores variaran dependiendo del valor de S_o/X_o que se requiera.
- ✓ De igual manera como en el grupo I, la DQO soluble presente en el fango deberá ser tomada en cuenta, por lo que para el cálculo de la DQO de la relación S_o/X_o , se implementará la ecuación 5.3
- ✓ Para estimar la relación S_o/X_o se tuvo en cuenta que no hay fango sedimentado por lo que la concentración de la biomasa dependerá del volumen propuesto de fango a adicionar. La ecuación entonces será la siguiente:

$$S_o/X_o = \frac{DQO_f}{\frac{(C_{fangoE} + V_{fangoE})}{V_f}} \quad (5.5)$$

Donde:

C_{fango} : Concentración de fango endógeno (mgSSV/l)

Debe tenerse en cuenta que estos cálculos se llevaron a cabo para obtener las proporciones del fango y de agua residual necesarias para obtener las relaciones S_o/X_o propuestas. En la tabla 5.5 se presentan los rangos utilizados para cada grupo de ensayo.

Tabla 5.5 Grupos de ensayos para la ejecución de las respirometrías.

Grupo	So/Xo	Rango So/Xo gDQO/gDQO
FASE I	Bajo	0,01- <0,1
FASE II	Alto	0,1-1,1

5.3.2 Análisis Respirométrico

El análisis respirométrico para cada grupo se realizó siguiendo un esquema de trabajo específico. En la figura 5.2 se presenta el esquema para el grupo I.

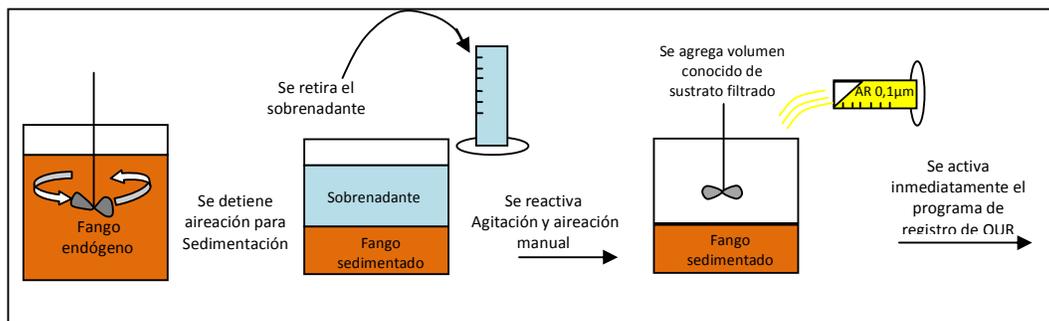


Figura 5.2 Metodología para análisis respirométrico del grupo I

El esquema de la figura 5.2 muestra que una vez que el fango este en condición endógena, se detiene la agitación y aireación para permitir la sedimentación del fango. De esta manera se cuantifica la cantidad de fango al retirar el sobrenadante.

Antes de agregar el agua filtrada se agita el fango y airea. Esta última deberá conectarse manualmente, con el fin de aumentar el nivel de OD en el fango, debido a que por el proceso de sedimentación realizado anteriormente, el nivel de OD del fango será bajo. Lo anterior evita que en el momento de iniciar el programa de registro de OUR, se pierda mucho tiempo en alcanzar el nivel máximo de OD, dado que solo hasta ese momento empezará el registro de los valores de OD necesarios para el cálculo de OUR.

Antes de empezar la prueba, se desconecta la aireación directa, permitiendo desde ese momento que el programa sea quien maneje la aireación. Terminado los pasos anteriores, se podrá agregar el agua residual filtrada, tratando que el tiempo empleado sea lo más corto posible.

Terminada la adición se deberá activar de inmediato el programa de registro de OD. A partir de ese momento, se registra los valores de OUR hasta que se estabilicen nuevamente, alcanzando el nivel endógeno.

La metodología seguida en los experimentos del grupo II, se presenta en el esquema mostrado en la figura 5.3

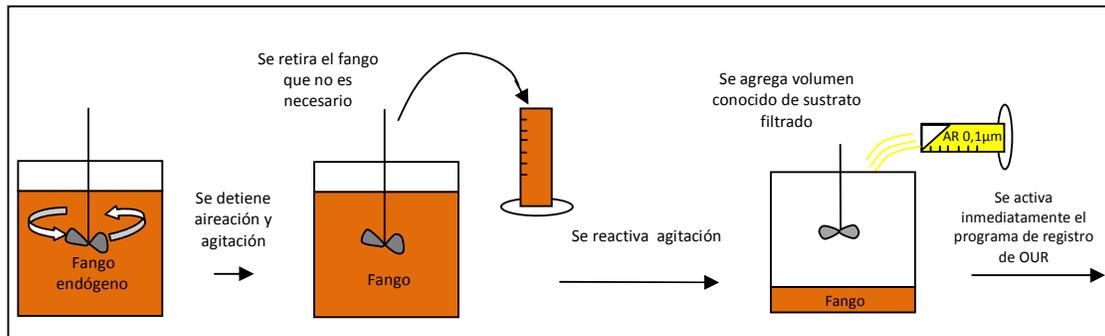


Figura 5.3. Metodología para análisis respirométrico para el grupo II

La figura 5.3 muestra que una vez el fango se encuentre en condiciones endógenas, el primer paso a seguir es detener la agitación y la aireación. En este grupo de experimentaciones no será necesario realizar sedimentación previa, por lo cual solo será necesario retirar el fango sobrante, dejando únicamente el volumen necesario para obtener la relación S_0/X_0 deseada.

Medido el volumen de fango requerido, se podrá entonces reactivar la agitación. Con respecto a la aireación, no será necesario activarla previo a la adición del sustrato, como en el caso del grupo I. Lo anterior es debido a que con el grupo de experimentaciones altas, el volumen de fango por lo general es mucho menor al volumen de agua residual a adicionar, (en nuestras condiciones de experimento). Por lo tanto, en el momento de llevar a cabo la adición del agua residual filtrada, la mezcla se airea con la caída del agua residual sobre el fango.

Lo anterior provocara entonces que el nivel de OD en el interior del reactor aumente, reduciendo la necesidad de inyección de OD inicial por parte de los aireadores en el momento de activar el programa de registro de OUR, reduciendo de esta manera el tiempo de inicio de registro de OD.

Para empezar la prueba solo faltará adicionar el agua residual filtrada, activando de inmediato el programa de registro de OUR. El registro se mantendrá hasta que los valores de OUR alcancen nuevamente el nivel endógeno.

En el siguiente apartado se muestran los resultados obtenidos de los dos grupos de experimentos.

5.4 EXPERIMENTOS RESPIROMÉTRICOS

Como se mencione anteriormente, en cada experimento respirométrico el fango aerobio debe estar en condiciones endógenas. Durante esta etapa se observó que el comportamiento en general de los experimentos fue similar al comportamiento mostrado en la figura 5.4.

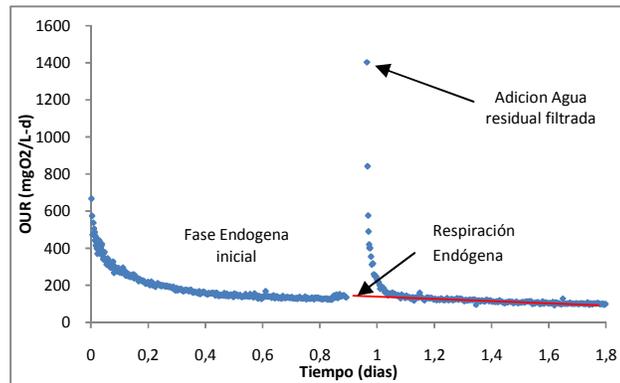


Figura 5.4 OUR fase endógena con adición de agua residual filtrada

En la figura 5.4 se observa la estabilización del registro de la OUR, característica de la respiración endógena. La figura corresponde al ensayo con una relación de S_o/X_o de 0.04 gDQO/gSSV. Debido a que el comportamiento de la fase endógena fue repetitiva en cada experimento, con la diferencia únicamente en la magnitud del valor de la OUR endógena, para cada ensayo respirométrico se muestra únicamente el comportamiento de la OUR a partir de la adición del sustrato.

Los resultados de las respirometrías se reunieron en los dos grupos planteados inicialmente, mostrando a continuación los resultados obtenidos en las respirometrías del grupo I.

5.4.1 Respirometrías grupo I

Este grupo de respirometrías involucró las relaciones bajas de S_o/X_o . Se realizaron ensayos con diferentes relaciones iniciales de S_o/X_o entre 0.0147gDQO/gSSV hasta 0.09 gDQO/gSSV. A continuación se presentan las gráficas del comportamiento de OUR obtenidas en cada uno de los ensayos respirométricos.

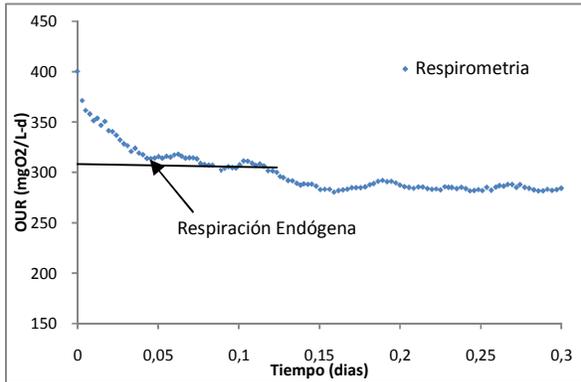


Figura 5.5 OUR para $S_o/X_o = 0.0147$ gDQO/gSSV

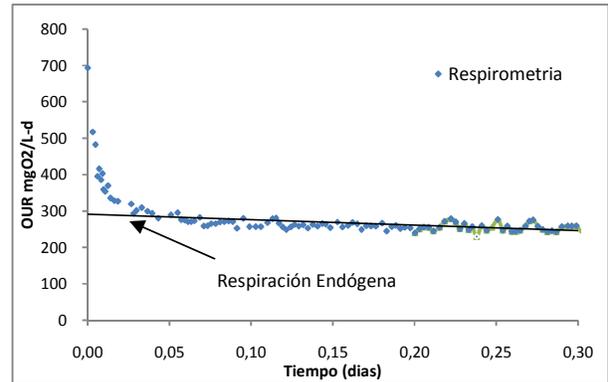


Figura 5.6 OUR para $S_o/X_o = 0.0158$ gDQO/gSSV

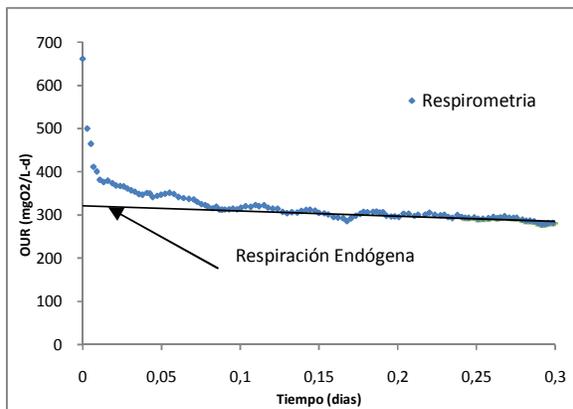


Figura 5.7: OUR para $S_o/X_o = 0.0176$ gDQO/gSSV

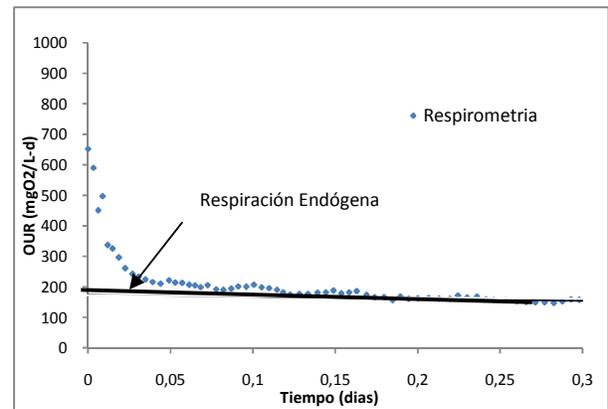


Figura 5.8: OUR para $S_o/X_o = 0.02$ gDQO/gSSV

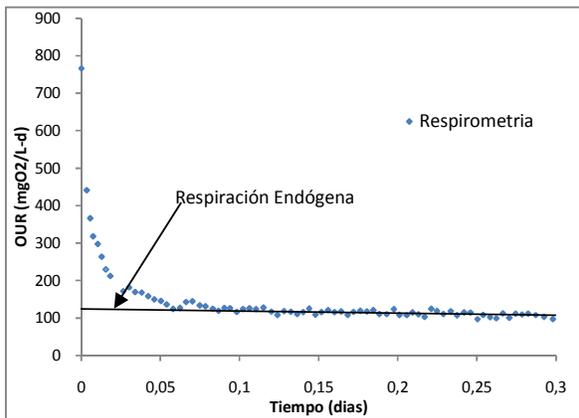


Figura 5.9: OUR para $S_o/X_o = 0.025$ gDQO/gSSV

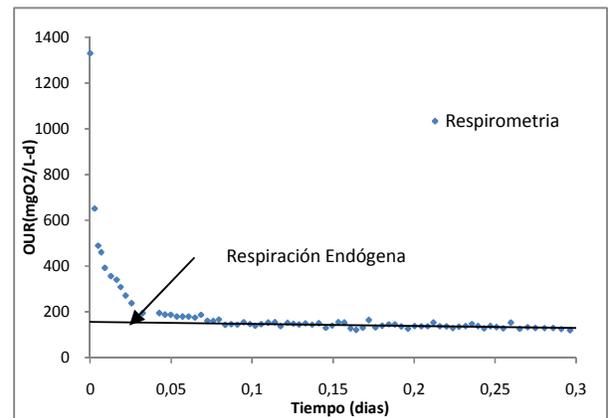


Figura 5.10: OUR para $S_o/X_o = 0.03$ gDQO/gSSV

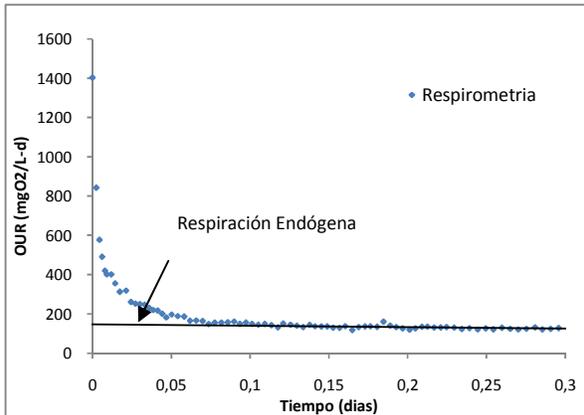


Figura 5.11: OUR para $S_o/X_o = 0.04$ gDQO/gSSV

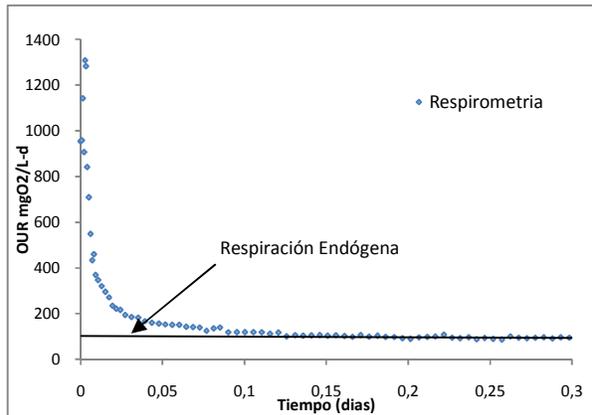


Figura 5.12: OUR para $S_o/X_o = 0.067$ gDQO/gSSV

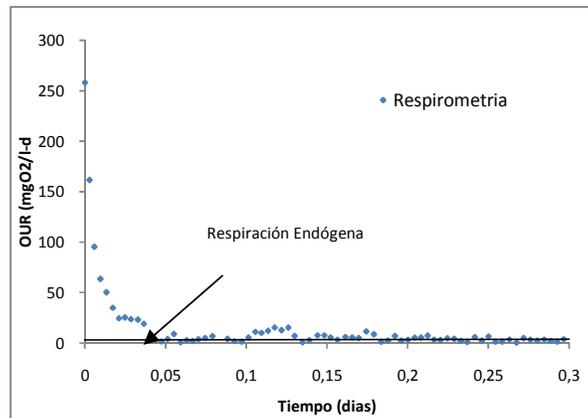


Figura 5.13: OUR para $S_o/X_o = 0.09$ gDQO/ gSSV

En el grupo I se realizaron 9 experimentos respirométricos. En este grupo se evidenció una disminución rápida de la curva de OUR, debido a la poca disponibilidad de alimento y a su rápida asimilación por parte de los microorganismos al sustrato.

Para lograr las relaciones bajas de S_o/X_o , la concentración del fango fue más alta que la concentración de DQO en el agua residual. La máxima concentración de fango alcanzada en la relación S_o/X_o mas baja fue de 4470 mgSSV/l. Dicha concentración dependió directamente de la concentración inicial del fango colectado.

A medida que la relación S_o/X_o aumentó, se observó que la caída de la curva de OUR se suavizó, aumentando el tiempo en que se consume el OD total. El agotamiento de la M.O. soluble adicionada, en promedio se llevó a cabo en un tiempo inferior a 1.8 horas, tiempo en el cual corta la recta de la fase endógena con la curva de la OUR.

5.4.2 Respirometrías grupo II

Este grupo de respirometrías involucró las relaciones altas de S_o/X_o . Se realizaron ensayos con diferentes relaciones iniciales de S_o/X_o entre 0.104gDQO/gSSV hasta

1.13 gDQO/gSSV. A continuación se presentan las gráficas del comportamiento de OUR obtenidas en cada uno de los ensayos respirométricos.

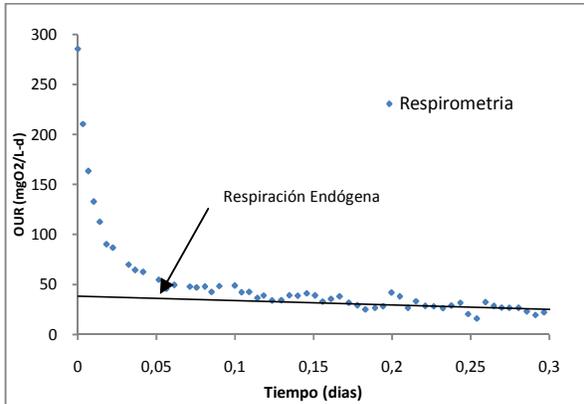


Figura 5.14: OUR para $S_o/X_o = 0.104$ gDQO/gSSV

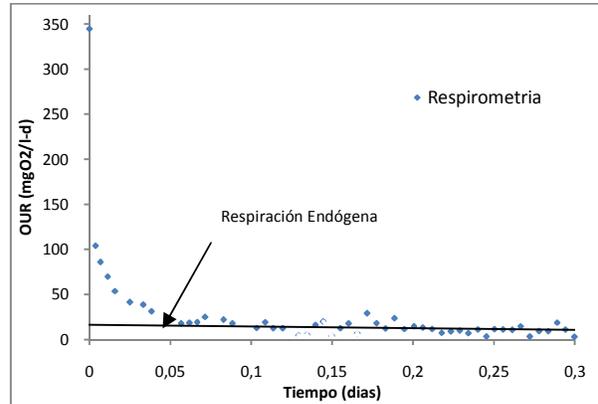


Figura 5.15: OUR para $S_o/X_o = 0.134$ gDQO/gSSV

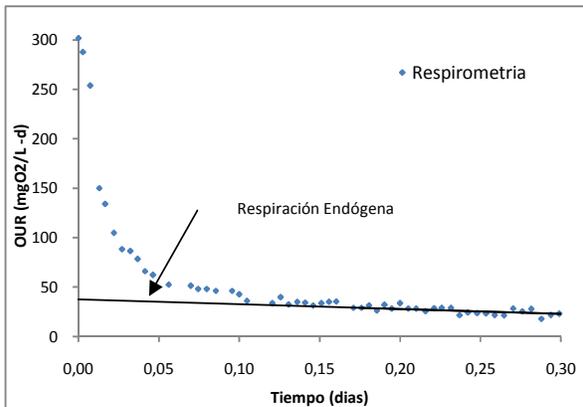


Figura 5.16: OUR para $S_o/X_o = 0.156$ gDQO/gSSV

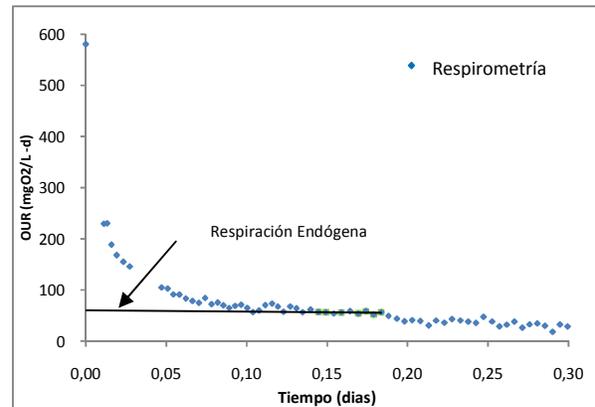


Figura 5.17: OUR para $S_o/X_o = 0.26$ gDQO/gSSV

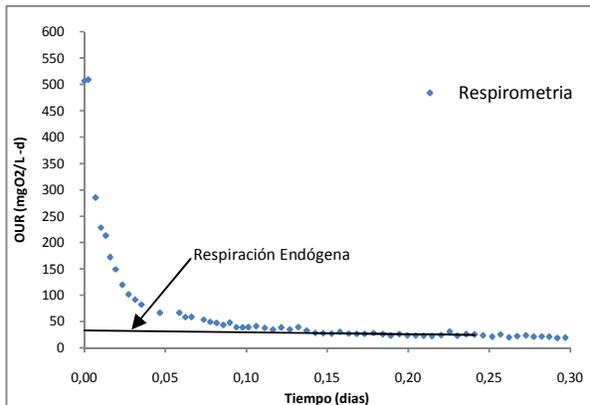


Figura 5.18: OUR para $S_o/X_o = 0.31$ gDQO/gSSV

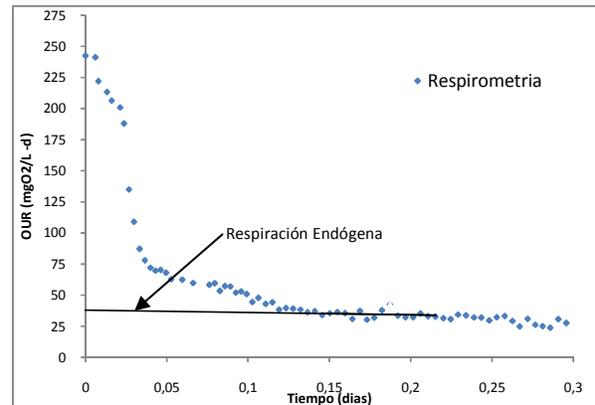


Figura 5.19: OUR para $S_o/X_o = 0.41$ gDQO/gSSV

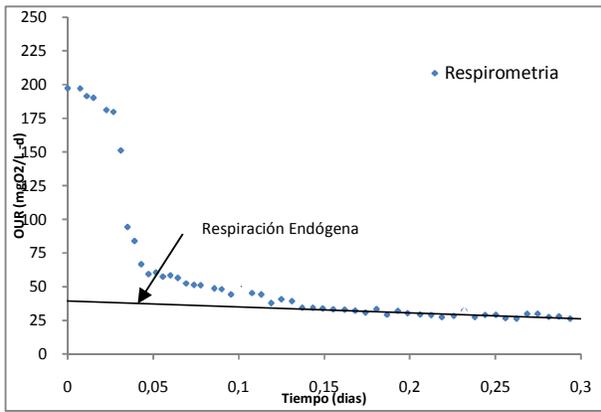


Figura 5.20: OUR para $S_o/X_o = 0,46$ gDQO/gSSV

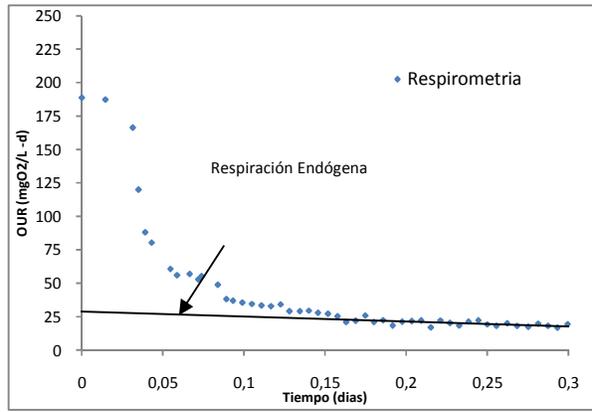


Figura 5.21: OUR para $S_o/X_o = 0,55$ gDQO/gSSV

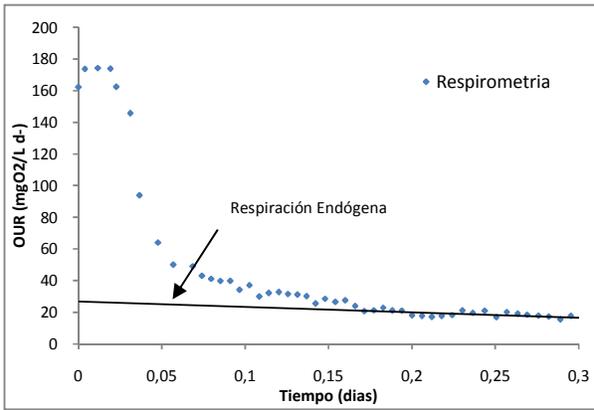


Figura 5.22: OUR para $S_o/X_o = 0,6$ gDQO/gSSV

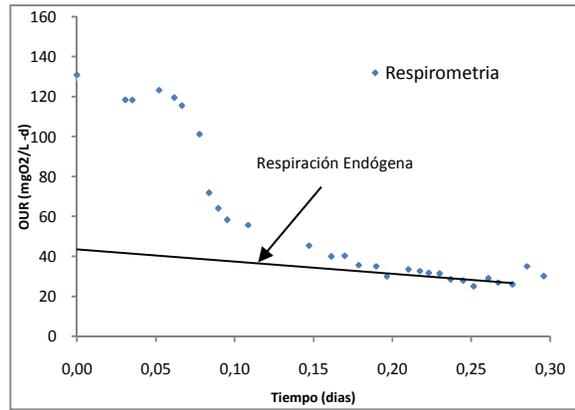


Figura 5.23: OUR para $S_o/X_o = 0,63$ gDQO/gSSV

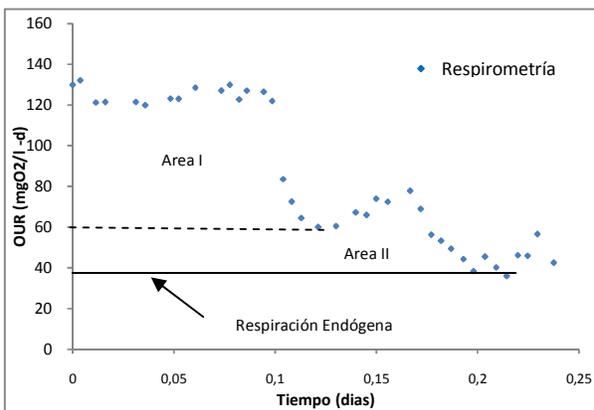


Figura 5.24: OUR para $S_o/X_o = 0,72$ gDQO/gSSV

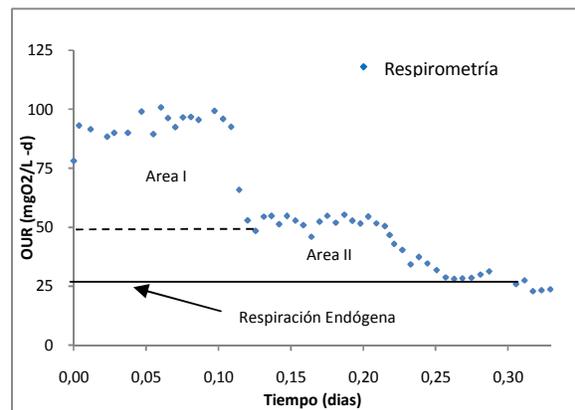


Figura 5.25: OUR para $S_o/X_o = 0,89$ gDQO/gSSV

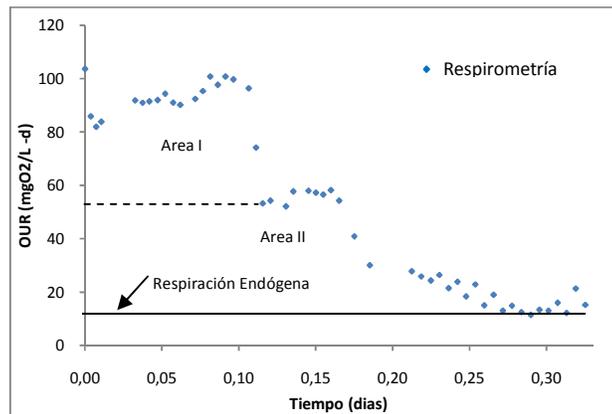


Figura 5.26: OUR para $S_o/X_o = 1,13$ gDQO/gSSV

En el grupo II se llevaron a cabo 13 experimentos. El comportamiento de la curva de la OUR fue similar al presentado en el grupo I, suavizándose a medida que se aumentó la relación S_o/X_o . El tiempo en el cual se consumió el OD asociado al agotamiento del S_s adicionado estuvo alrededor de 3 horas. El comportamiento descrito anteriormente de la OUR fue notorio sólo hasta la figura 5.18 con una relación $S_o/X_o = 0,31$ gDQO/gSSV, donde la velocidad de consumo de OD decae siempre a partir del primer valor de OUR medido. A partir de esta relación, el comportamiento de la curva cambia, manteniendo la velocidad máxima de consumo de OD por un tiempo mayor antes de empezar a descender.

En las figuras 5.24 a 5.26 se emplearon relaciones S_o/X_o superiores a 0.7 gDQO/gSSV observando un comportamiento diferente de la OUR al obtenido con las relaciones anteriores de S_o/X_o . En estas figuras fue evidente que la curva de OUR presenta un comportamiento escalonado, similar al mostrado en la figura 1.3 en la introducción.

En estas gráficas se identifican dos áreas, I y II. La primera está relacionada al consumo de oxígeno debido al S_s agregado. En esta zona el valor de OUR muestra un leve aumento por un periodo de tiempo de 2.4 horas, aproximadamente. En este tiempo se produce el crecimiento de los microorganismos dado que existe abundancia de alimento, lo cual explicaría el incremento de los valores de OUR. Cuando el S_s agregado se consume totalmente disminuyen rápidamente los valores de OUR hasta alcanzar un segundo nivel. Durante el periodo transcurrido también se produce la muerte de microorganismos, aportando materia orgánica lentamente biodegradable X_s al sistema. El consumo de X_s genera el segundo nivel de valores de OUR en el área II. Cuando este sustrato lentamente biodegradable se consume totalmente se produce la hidrólisis de los microorganismos, provocando una lenta disminución de los valores de OUR hasta alcanzar el nivel endógeno. Es posible observar en las tres figuras que a medida que aumenta la relación inicial S_o/X_o se incrementa el área II, indicando un mayor crecimiento de microorganismos durante el primer período y por lo tanto una mayor presencia de X_s .

5.4.3 Consumo de OD total

Para encontrar la cantidad de OD consumido en la oxidación del agua residual filtrada adicionada, se debe establecer de forma adecuada la recta a representar la respirometría endógena. La línea que delimita la respiración endógena en el experimento, dependerá de la serie de puntos escogidos desde el momento en que el perfil de OUR comienza a estabilizarse.

Sin embargo, el número de puntos utilizado puede ser diferente dependiendo de los criterios de cada investigador. Por lo tanto, para observar la sensibilidad de la línea de respiración endógena y conocer su incidencia sobre el OD total consumido, se realizó una pequeña variación del $\pm 5\%$ sobre la recta que la describe. En la figura 5.27 se muestra la variación propuesta a la recta que describe la respiración endógena.

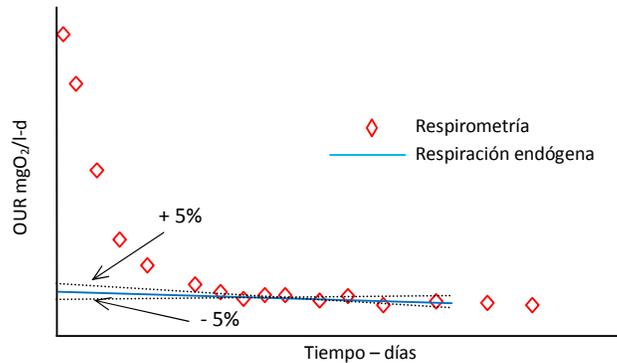


Figura 5.27: línea de respiración endógena con variación de $\pm 5\%$

En la figura 5.27 se observa que la pendiente de la recta que describe la fase endógena es negativa para nuestros experimentos. Al incrementar en un 5% la recta será más negativa, por lo que la recta subirá, disminuyendo de esta forma el OD total. Por el contrario, al reducir 5%, la recta será menos negativa, aumentando el OD total.

Esta comprobación se realizó para algunos experimentos, abarcando todo el rango de relaciones S_o/X_o trabajadas en nuestros ensayos respirométricos. En la tabla 5.6 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 5.6 OD total a partir de una variación del $\pm 5\%$ en la línea endógena en ensayos respirométricos.

S_o/X_o gDQO/gSSV	OD total (mgO ₂ /l)	Variación +5% mgO ₂ /l	error	Variación -5% mgO ₂ /l	error
0,025	6,279	5,582	11,105	7,173	14,24
0,066	13,48	12,44	7,6833	14,44	7,146
0,134	3,41	3,071	9,9179	3,746	9,855
0,155	5,945	5,602	5,7792	6,215	4,529
0,307	7,346	7,108	3,2285	7,672	4,449
0,596	6,94	6,800	1,9966	7,26	4,572

Los resultados registrados en la tabla 5.6 muestran que la variación del 5% causa mayor impacto en relaciones S_o/X_o bajas menores a 0,134 gDQO/gSSV. También se observa que el error es menor con el aumento de la S_o/X_o . La variación en la medición de OD total se ve más afectada cuando se aplica un cambio en la recta del -5%.

En la tabla 5.7 se muestran las relaciones iniciales S_o/X_o alcanzadas en los ensayos respirométricos. Además se presentan los valores de OUR máxima y OUR endógena iniciales encontrados en cada uno de los experimentos.

Tabla 5.7 Relación S_o/X_o y OUR obtenida en cada ensayo respirométrico.

Experimento	S_o/X_o gDQO/gSSV	OUR _{end} mgO ₂ /l	OUR _{max} mgO ₂ /l	f_{OUR} (OUR _{max} / OUR _{end})
1	0,0147	308	400	1,3
2	0,0158	291	693	2,4
3	0,0176	318	662	2,1
4	0,0193	167	651	3,9
5	0,0250	125	766	6,2
6	0,0302	156	1330	8,5
7	0,0404	147	1402	9,6
8	0,0668	101	954	9,4
9	0,0846	20	258	12,9
10	0,1037	16	345	21,0
11	0,1343	37	285	7,7
12	0,1556	35	302	8,6
13	0,2598	20	81	4,1
14	0,3077	40	507	12,7
15	0,4068	38	242	6,4
16	0,4569	39	197	5,0
17	0,5474	28	189	6,8
18	0,5949	27	162	6,0
19	0,6235	43	131	3,0
20	0,7342	60	130	2,2
21	0,8908	50	78	1,6
22	1,1315	50	103	2,1

end: endógeno; max: máximo

Como resultado en la tabla 5.7, se observa que la relación S_o/X_o más baja alcanzada en las experimentaciones fue de 0.0147 gDQO/gSSV hasta un valor máximo de 1.1315 gDQO/gSSV. Los valores de OUR endógena se presentan como la velocidad de consumo de OD en el momento de la adición del sustrato.

En la tabla 5.7 la OURmax corresponde a la tasa máxima de respiración presentada en cada ensayo inmediatamente después de la adición del agua residual filtrada. Se observó que la OURmax está influenciada por la variación en la relación So/Xo. Para este comportamiento se planteó hacer una relación entre la OURmax y la OURend, debido a que el valor de esta última no es igual en todos los experimentos.

Esta relación nos permitió conocer el incremento en la tasa de consumo de OD en cada ensayo realizado al adicionar el agua residual filtrada. La relación se denominó f_{OUR} y se basó en la ecuación 5.1.

$$f_{OUR} = \frac{OUR_{max}}{OUR_{end}} \quad (5.1)$$

Los resultados se exponen en la tabla 5.7, con los cuales se construyó la figura 5.28 donde se muestra el comportamiento de f_{OUR} con respecto a la variación de la relación So/Xo.

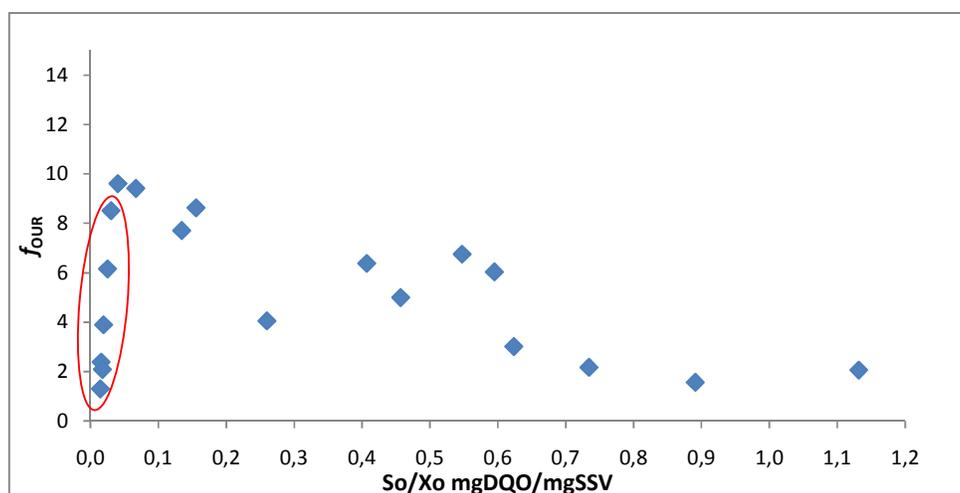


Figura 5.28 Comportamiento de OUR inicial en cada experimento

Se observó que el factor f_{OUR} presentó un comportamiento ascendente en un rango entre 0,0156 y 0,0302 gDQO/gSSV de So/Xo. Lo anterior fue debido principalmente al aumento de la OURmax, que pasó de 400 mg/IO₂-d a 1402 mg/IO₂-d para el valor más alto de f_{OUR} .

A partir de este punto, el valor de OURmax comenzó a decrecer, a medida que el valor de f_{OUR} desciende. El comportamiento decreciente de los puntos se mantuvo hasta la relación So/Xo mas alta.

5.5 RESULTADO DEL CÁLCULO DEL RENDIMIENTO Y_H

A partir de los resultados obtenidos de OD consumido y de sustrato degradado en cada ensayo respirométrico, se realizó el cálculo del rendimiento Y_H utilizando la ecuación 1.12. En la tabla 5.8 se presentan los resultados obtenidos para cada condición inicial de S_0/X_0 .

Tabla 5.8 Rendimiento Y_H para los 22 experimentos respirométricos

Día de prueba	S_0/X_0 gDQO/gSSV	Desviación Estandar	Y_H (gDQO/gDQO) máximo	Y_H (gDQO/gDQO) mínimo	Y_H (gDQO/gDQO) promedio
26/11/2008	0,0146	0,108	0,65	0,40	0,55
26/11/2008	0,0158	0,040	0,56	0,48	0,53
26/11/2008	0,0176	0,082	0,62	0,42	0,52
11/11/2008	0,0195	0,032	0,61	0,52	0,56
11/11/2008	0,0251	0,032	0,56	0,50	0,53
11/11/2008	0,0302	0,020	0,55	0,51	0,53
11/11/2008	0,0404	0,044	0,63	0,52	0,57
16/09/2008	0,0668	0,023	0,65	0,58	0,61
30/09/2008	0,0942	0,051	0,69	0,59	0,63
30/09/2008	0,1037	0,167	0,75	0,44	0,62
30/09/2008	0,1344	0,021	0,67	0,61	0,65
30/09/2008	0,1560	0,043	0,71	0,61	0,66
04/11/2008	0,2600	0,063	0,79	0,65	0,72
04/11/2008	0,3080	0,039	0,73	0,60	0,69
21/10/2008	0,4067	0,009	0,75	0,73	0,74
21/10/2008	0,4569	0,046	0,78	0,63	0,72
21/10/2008	0,5473	0,022	0,76	0,70	0,73
21/10/2008	0,6000	0,041	0,80	0,63	0,74
29/10/2008	0,6240	0,060	0,81	0,63	0,74
29/10/2008	0,7340	0,018	0,83	0,78	0,77
29/10/2008	0,8487	0,024	0,86	0,78	0,83
29/10/2008	1,1310	0,035	0,87	0,75	0,81

Los resultados observados de Y_H muestran que el valor es diferente dependiendo de la relación inicial de S_o/X_o . Se construyó la figura 5.29, con el fin de observar el comportamiento con respecto a la relación S_o/X_o .

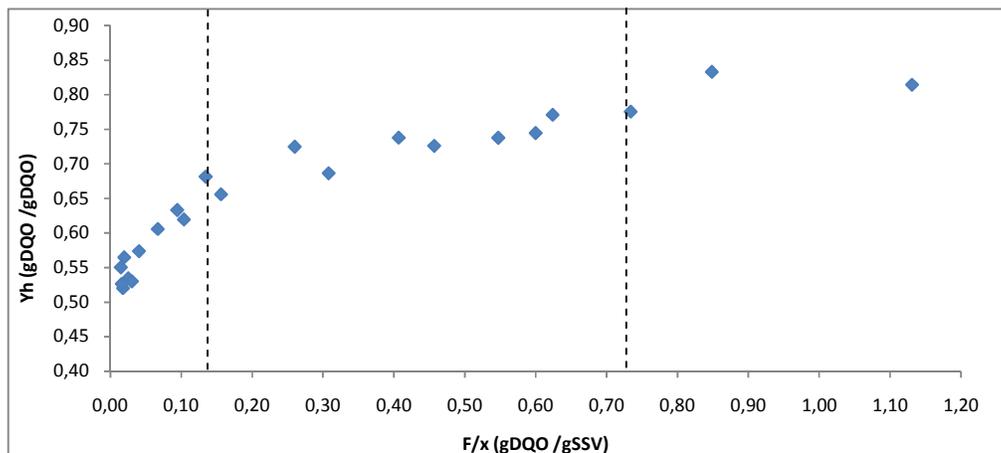


Figura 5.29 Comportamiento de Y_H con la relación S_o/X_o

Como resultado se observó que el rendimiento Y_H varió entre valores de 0.52 y 0.83. La tendencia de la curva de Y_H fue a incrementar su valor a medida que la relación S_o/X_o aumentó.

La variación más importante se presentó con relaciones S_o/X_o inferiores de 0,134gDQO/gSSV, mostrando una zona de alta sensibilidad al cambio de S_o/X_o . A partir de la relación anterior, la variación en el valor de Y_H es menor, aunque mantiene el incremento en su valor. Al final de la curva es notorio que el comportamiento se atenúa, sugiriendo una tendencia a un valor cercano de Y_H de 0.8, con relaciones de S_o/X_o entre 0.84 y 1.13 gDQO/gSSV.

Los valores de la Y_H presentaron una variación estándar en promedio de ± 0.05 , los cuales pueden ser observados en la figura 5.30.

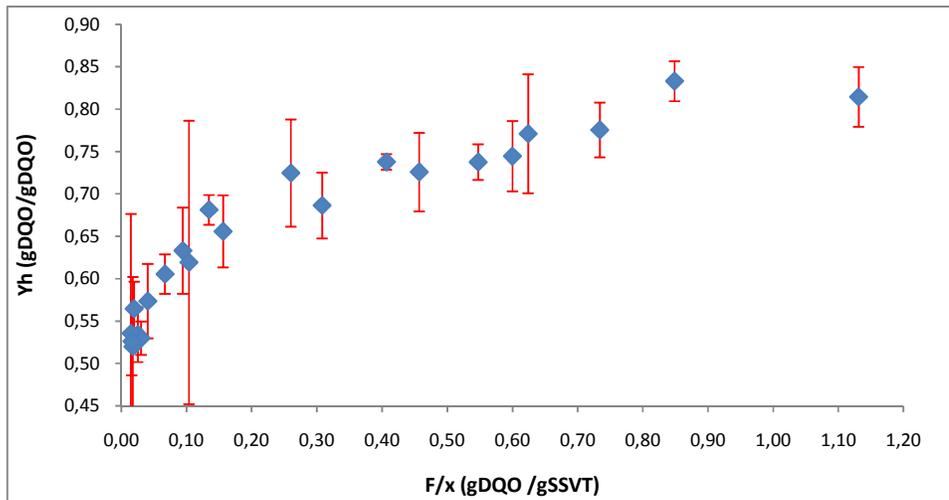


Figura 5.30 Comportamiento de Y_H con la relación S_o/X_o

En la figura 5.30 es notable que los puntos con mayor desviación están ubicados al inicio de la curva, rango de relaciones S_o/X_o más bajo y también es el rango en el cual se encontró que el cambio de Y_H es más sensible. La tendencia de los puntos con su respectiva desviación, continúa siendo ascendente.

A partir de los resultados obtenidos con los valores de Y_H , se propuso un modelo, similar al propuesto por Liu (1996), que describa el comportamiento de la curva de la figura 5.29. Para tal fin se planteó la ecuación 5.2 donde se expresa la variación de Y_H .

$$Y_H = (Y_{max} - Y_{min}) * \frac{S_o/X_o}{S_o/X_o + K} + Y_{min} \quad (5.2)$$

Donde:

- Y_{max} : Rendimiento máximo en condiciones de alimento suficiente.
- Y_{min} : Rendimiento mínimo en condiciones de alimento insuficiente.
- K: Constante

El ajuste de Y_{max} , Y_{min} y K en el modelo se llevaron a cabo minimizando el error cuadrático medio entre los resultados experimentales y los teóricos. En la tabla 5.9 se presentan los resultados del ajuste del modelo.

Tabla 5.9 Ajuste del modelo para Y_H

S_o/X_o gDQO/gSSV	Y_H (gDQO/gDQO) Experimental	Y_H (gDQO/gDQO) Calculada	error ²
0,067	0,606	0,595	0,00010
0,094	0,633	0,619	0,00020
0,104	0,619	0,626	0,00005
0,134	0,681	0,647	0,00119
0,156	0,656	0,659	0,00001
0,407	0,738	0,740	0,00000
0,457	0,726	0,749	0,00050
0,547	0,738	0,761	0,00056
0,600	0,745	0,768	0,00052
0,624	0,771	0,770	0,00000
0,734	0,776	0,780	0,00002
0,849	0,833	0,788	0,00200
1,131	0,815	0,803	0,00014
0,260	0,725	0,703	0,00047
0,308	0,687	0,717	0,00095
0,020	0,565	0,541	0,00056
0,025	0,534	0,549	0,00020
0,030	0,530	0,555	0,00064
0,040	0,574	0,568	0,00004
0,015	0,550	0,534	0,00026
0,018	0,520	0,538	0,00034
0,016	0,526	0,536	0,00009
	\sum Error2		0,00886
	YMAX		0,856
	YMIN		0,511
	K		0,207
	R₂		0,958

$$\text{Erro}^2 = (Y_H \text{ experimental} - Y_H \text{ calculada})^2$$

Con el ajuste del modelo, se establece entonces valores máximos y mínimos para Y_H dentro de las condiciones de nuestros experimentos. En la figura 5.31 se muestra la representación gráfica del comportamiento del modelo planteado conjunto con el resultado de obtenido en la experimentación.

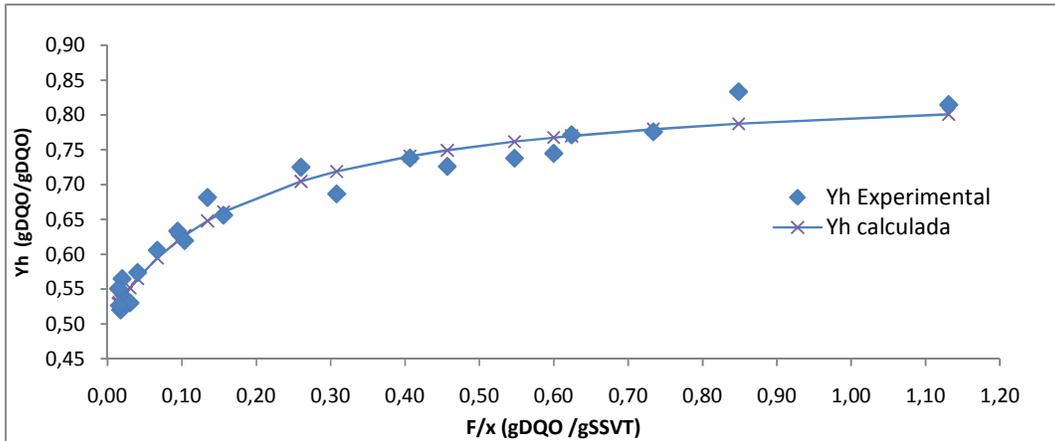


Figura 5.31 Comportamiento del modelo para Y_H y resultados experimentales de Y_H

Se observó en la figura 5.31 que el comportamiento del modelo reproduce satisfactoriamente el comportamiento del rendimiento Y_H . Usando el modelo propuesto es posible determinar los valores máximos y mínimos de Y_H . Cuando la relación S_o/X_o es baja, los microorganismos tendrán un rendimiento mínimo de crecimiento $Y_{HMIN} = 0.51 \text{ gDQO/gDQO}$. Por el contrario, si aumentamos esta relación por encima de 1 gDQO/gSSV , los microorganismos presentan un rendimiento máximo dado por $Y_{HMAN} = 0.8 \text{ gDQO/gDQO}$.

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación se realiza la discusión de los resultados obtenidos en la fase experimental con los ensayos respirométricos. Lo anterior con el fin de entender y discutir el comportamiento de las gráficas de OUR y los resultados en la variación de S_o/X_o sobre el rendimiento Y_H .

6.1 PLANTA PILOTO.

Durante el período de investigación, los resultados mostraron un buen comportamiento del sistema de tratamiento. A pesar de venir de un período vacacional que perjudicó la estabilidad del sistema, éste se recuperó satisfactoriamente entrando en un período de recuperación, manteniendo niveles de eliminación en la mayoría del tiempo ajustados a la normativa 91/271/CE. Lo anterior pudo evidenciarse en los resultados obtenidos de las caracterizaciones del influente y efluente expuestos en las tablas 5.1 y 5.2.

El buen comportamiento del sistema, involucra también la fase aerobia del tratamiento, punto del cual fue colectado el fango para los ensayos respirométricos. Debido a esto se considera que las condiciones del fango fueron aceptables, brindando confianza en los resultados obtenidos a partir de su utilización en las pruebas respirométricas.

Entre los componentes de la DQO del agua residual cruda, se resalta la componente S_s . De las caracterizaciones llevadas a cabo, S_s estuvo en promedio un 25.5 % de la DQO total influente, concentración suficiente para elaborar adecuadamente nuestros ensayos respirométricos. De igual manera fue notoria la presencia de X_s . Esta componente se presentó en mayor porcentaje dentro de las caracterizaciones realizadas con un 52% de la DQO total.

Los resultados de la caracterización también permitieron conocer que la composición del agua residual doméstica utilizada presentó una composición típica media. Esta clasificación es dada principalmente por la concentración inicial de los constituyentes así como a su biodegradabilidad.

6.2 ENSAYOS RESPIROMÉTRICOS

Como resultado se establecieron dos grupos de experimentos, en los cuales se planteó trabajar en un amplio rango de S_o/X_o cercano al manejado en depuradoras de agua residual doméstica.

En el grupo I, conformado por las figuras 5.5 a 5.13, con relaciones S_o/X_o entre 0.0147 – 0.09 gDQO/gSSV, se observó un comportamiento similar entre las curvas de OUR. En ellas se observó que la velocidad de consumo de OD decreció rápidamente a partir del primer valor medido de OUR. El consumo del sustrato añadido se desarrolló

en períodos cortos de tiempo que se incrementaron lentamente con el aumento de S_0/X_0 . En promedio el consumo del sustrato se presentó en un período de 1.8 horas.

La rápida disminución de la curva se debió principalmente a la baja concentración de alimento y a su característica, ya que el agua residual fue filtrada para obtener únicamente la parte soluble (S_s). Debido a esto, los microorganismos utilizan menos tiempo en consumir el sustrato ya que no deben realizar el proceso de hidrólisis. Los microorganismos presentes en el fango presentaban una aclimatación previa al sustrato añadido, dado que el agua residual utilizada es la que ingresa al sistema de donde proviene el fango.

En el grupo I también se observó el comportamiento mostrado por la OUR_{max} en cada ensayo respirométrico. Se mostraron diferencias en su valor con el cambio de la relación S_0/X_0 . Para evaluar este comportamiento se utilizó el factor f_{OUR} calculado en la tabla 5.7 y graficado en la figura 5.28. En la figura se observó que el valor de f_{OUR} aumenta entre las relaciones bajas S_0/X_0 de 0.0147 a 0.0302 gDQO/gSSV. Este resultado es contrario a lo esperado, debido a que se preveía un comportamiento decreciente, es decir, iniciando con valores más altos de lo reportado de f_{OUR} y disminuyendo con el aumento de S_0/X_0 como se evidencia en relaciones S_0/X_0 posteriores más altas.

Este comportamiento en los valores de f_{OUR} resta relacionado con el valor obtenido de la OUR_{max} . Al utilizar relaciones bajas de S_0/X_0 se obtiene una concentración mayor de microorganismos que de sustrato. Por lo tanto, la demanda de OD inicial en el momento que se agrega el sustrato deberá ser alta y decrecer si se aumenta la relación S_0/X_0 , dado por la reducción en la cantidad de microorganismos.

Como ejemplo esta el caso donde se alcanzó el máximo valor de f_{OUR} obtenido con una relación S_0/X_0 de 0.04 gDQO/gSSV. En esta relación inicial se obtuvo un valor de OUR_{max} de 1402 mgO²/l-d. A partir de esta relación, el valor de OUR_{max} decreció con el aumento de S_0/X_0 en los ensayos respirométricos posteriores.

Una posible explicación para lo sucedido radica en los valores establecidos en el programa de ordenador utilizado para el almacenamiento y procesamiento de datos de las mediciones de OD para el cálculo de las OUR. En el programa debe detallarse el número de puntos mínimos con los que se debe realizar el cálculo de la OUR en cada momento. En la mayor parte de las experimentaciones, el número de puntos mínimo utilizado fue 50, con un tiempo promedio entre 2 y 5 min para calcular el primer dato de OUR. Es posible entonces que el número de puntos inicial determinado en el programa fuera excesivo para las relaciones bajas de S_0/X_0 , debido a que en estas relaciones se presenta una cantidad de alimento disponible pequeño en comparación a la concentración de microorganismos. Por lo tanto, el consumo del sustrato se presenta en un período de tiempo menor. Lo anterior entonces pudo ocasionar que el

programa no pudiera medir los valores de OUR del inicio más elevados q los registrados presentando como resultado un valor de OUR atenuado.

El programa también evalúa el ajuste de los datos experimentales con el R^2 . En nuestro caso se eligió un R^2 mínimo de 99%. En algunos casos con 20 datos se alcanzo este R^2 . En el resto de experimentos, al no alcanzar una buena correlación, el programa tomo 50 puntos para el cálculo de OUR.

Otro factor que puede afectar la correcta medición de OURmax, puede estar relacionado con el contenido OD antes de iniciar la prueba respirométrica. Cuando se trabaja con relaciones S_o/X_o bajas, la concentración del fango es bastante alta. Esto dificulta en el momento de arrancar el ensayo alcanzar el nivel máximo de OD necesario para que el ordenador inicie la medición de la OUR. En este tiempo, los microorganismos comienzan el consumo del sustrato, el cual no es registrado y por lo tanto no se tendría en cuenta en la determinación de la OUR máxima.

De la figura 5.26 también se observó que a partir de la relación S_o/X_o de 0,04 gDQO/gSSV se produce el descenso de la curva hasta la relación S_o/X_o de 0.623 gDQO/gSSV. Con los valores restantes de S_o/X_o , la variación de f_{OUR} es menor, evidenciando una posterior estabilidad.

Dentro del grupo II se destacan las últimas figuras obtenidas a partir de S_o/X_o de 0.72 gDQO/gSSV. En ellas es evidente el cambio en el comportamiento de la curva de OUR, identificándose dos áreas distintas de forma escalonada. El área I se debe al consumo de OD debido al agotamiento de S_s por parte de los microorganismos, como ocurre en todas las figuras anteriores. Durante este período se produce el crecimiento de bacterias debido a que existe abundante alimento.

El área II no es posible atribuirla al consumo de materia orgánica lentamente biodegradable X_s asociada al sustrato adicionado, debido a que el agua residual empleada fue filtrada, obteniendo únicamente la porción soluble S_s . Tampoco es posible atribuir el comportamiento de la OUR a procesos de nitrificación, dada que se ha inhibido con anterioridad dicho proceso con la adición de tiourea. Como se ha mencionado anteriormente, el comportamiento de la OUR podría estar ligado entonces al aporte de X_s por la muerte de microorganismos durante el periodo transcurrido del ensayo, por lo que su consumo genera el segundo nivel de valores de OUR. Cuando la X_s se consume los valores de OUR disminuyen paulatinamente hasta alcanzar el nivel endógeno, lo cual está asociado al proceso de hidrólisis de los microorganismos. El consumo de oxígeno que se produce en el área II no se tiene en cuenta en el cálculo de Y_H , debido a que el S_s no corresponde al alimento adicionado sino a la hidrólisis de biomasa.

6.3 OXÍGENO DISUELTO TOTAL

Al realizar la identificación de la pendiente que delimita la fase endógena se planteó la necesidad de observar la variación que podría sufrir la recta, ya que esta depende en muchos casos del criterio del investigador. Para ello se llevó a cabo una variación del $\pm 5\%$ a la pendiente de la recta que representa el comportamiento de la OUR endógena de los ensayos respirométricos.

A partir de los de la tabla 5.6, se observó que variar un 5% afecta más en las relaciones S_o/X_o bajas que en las altas. Esto es debido principalmente a la forma de la curva característica de relaciones bajas de S_o/X_o . En la figura 6.1 se muestra un ejemplo en el cual se compara dos curvas resultantes de ensayos respirométricos con una relación inicial diferente.

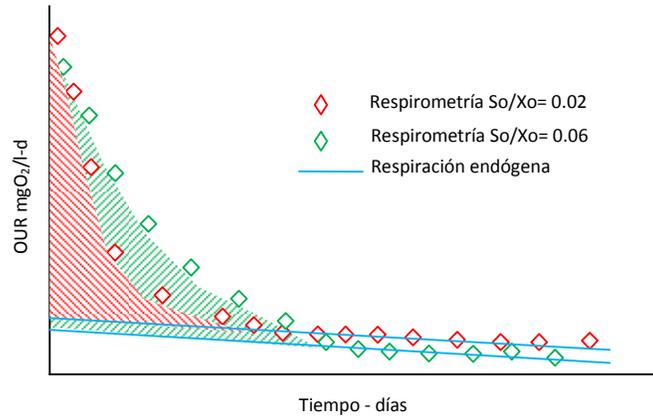


Figura 6.1 Area total de OD para dos ensayos respirométricos

Basado en los resultados obtenidos, entre más baja sea la relación S_o/X_o , el descenso de la curva será más rápido, dándose el consumo de OD en un tiempo menor. Por lo tanto, esto hará que el área de OD total sea pequeña, por lo que variaciones sobre la recta tendrán un mayor impacto en el OD final.

Por el contrario, con relaciones de S_o/X_o mayores, en la figura 6.1 se observa que la caída de la curva es más suave y el consumo del sustrato adicionado se da en un mayor tiempo. Entonces se obtienen áreas más grandes, disminuyendo el impacto causado por la variación de la recta de la respiración endógena.

De los resultados de la tabla 5.6 también fue evidente que variar un 5% negativamente causa mayor impacto que hacerlo de manera contraria. Esto se debe principalmente que la pendiente de la recta es negativa, por lo que variar en -5% hará menos negativa la pendiente, inclinándose en sentido contrario de las manecillas del reloj. Este efecto aumentará el área de OD permitiendo que más puntos de la OUR se consideren en la medición final de OD.

6.4 RENDIMIENTO Y_H

Los resultados observados a partir del cálculo del rendimiento Y_H en cada ensayo respirométrico expuestos en la figura 5.29 mostraron un comportamiento ascendente con el aumento de la relación S_o/X_o . En la parte baja de la curva de Y_H , en el rango de S_o/X_o entre 0.0146 gDQO/gSSV a 0.134 gDQO/gSSV, se observó que el valor de Y_H presenta mayor variación, evidenciando una zona sensible al cambio de S_o/X_o . Por lo anterior, debe brindarse mayor importancia al trabajar dentro de esta zona, dado que un cambio pequeño de S_o/X_o puede originar importantes variaciones del rendimiento Y_H . Esta zona se caracteriza por ser de relaciones S_o/X_o baja, con un medio de alimento insuficiente.

Con estas características el rendimiento Y_H varía debido a la autorregulación que los microorganismos son capaces establecer su propio metabolismo donde el mantenimiento de la célula es prioridad ante el crecimiento. Dicha autorregulación se hace por variación de la cinética enzimática donde la tasa de crecimiento depende de la disponibilidad de alimento (Kooijman y col., 2005).

Kooijman y col., (2005) presentan en su trabajo un esquema que se muestra en la figura 6.2, en el cual se observa la movilización de los recursos dentro del metabolismo para el mantenimiento y el crecimiento de los microorganismos.

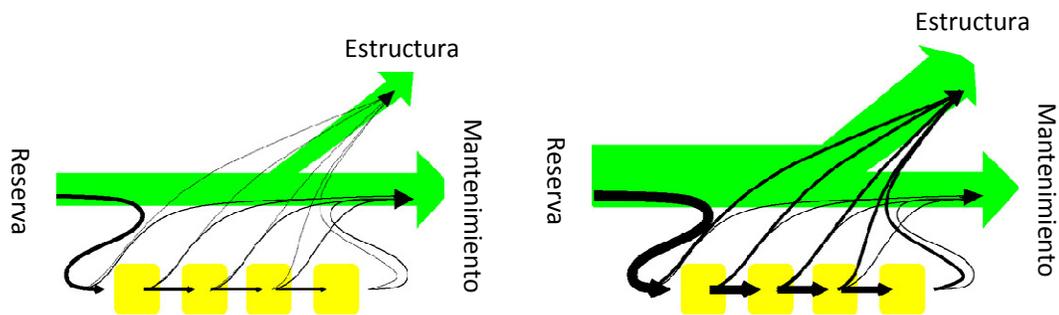


Figura 6.2 Movilización de recursos al mantenimiento y crecimiento.

En la figura 6.2 se observa que los recursos son movilizados desde la reserva del catabolismo al mantenimiento y crecimiento, este último por ejemplo al incremento de estructura (figura izquierda). Cuando la reserva se incrementa, como se observa en la figura de la derecha, el flujo catabólico aumenta, incrementando lo asignado al crecimiento, pero no aumenta lo asignado al mantenimiento. En este punto el flujo de sustrato en la vía enzimática es proporcional al flujo catabólico.

Con el planteamiento anterior es posible acondicionar nuestro resultado en el comportamiento de Y_H . En la figura 6.3 se presenta el comportamiento de Y_H dada por el modelo planteado en la ecuación 5.2. El área bajo la curva será la porción de M.O. utilizada para crecer y el área por encima de la curva será la M.O. utilizada para generación de energía en el catabolismo.

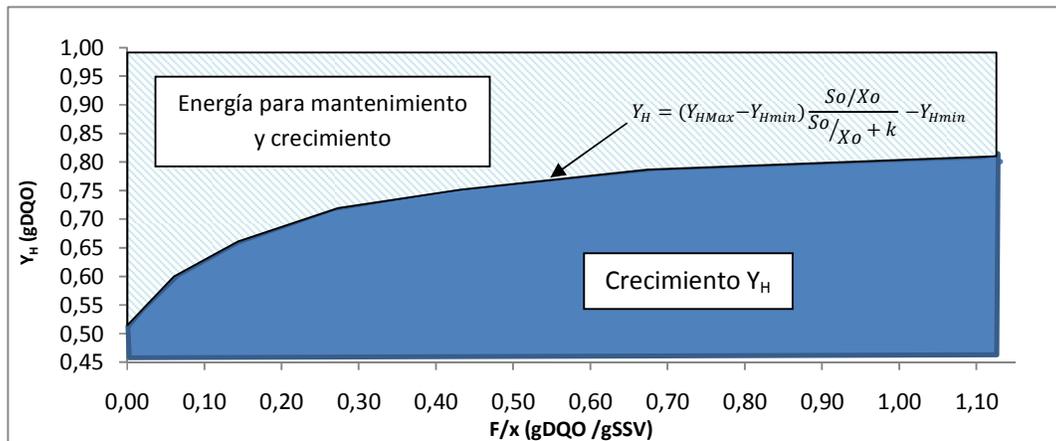


Figura 6.3 Movilización de recursos para mantenimiento y crecimiento.

En la figura 6.3 se observa que a medida que disminuye la disponibilidad de alimento los microorganismos asignan menos materia orgánica al crecimiento, favoreciendo la producción de energía para el mantenimiento. Este comportamiento es más fuerte con relaciones bajas de So/Xo , donde el mantenimiento se vuelve más importante y la energía disponible es gastada en diferentes procesos internos, entre los cuales se destacan el recambio de enzimas, proteínas, componentes de pared celular, transporte de iones, mantenimiento de gradientes de concentración (pH o presión osmótica), movilidad, etc. (Kooijman y col., 2005; Máximo 2008). Dentro de la zona de So/Xo baja, se observa que los microorganismos reducen rápidamente la asignación de energía al crecimiento con la disminución de So/Xo , siendo por lo tanto la zona donde Y_H varía rápidamente.

En las condiciones de nuestras experimentaciones, los microorganismos presentan con la relación más baja So/Xo de 0.0147 gDQO/gSSV un rendimiento Y_H de 0.52 gDQO/gDQO, es decir, los microorganismos utilizan el 52% de M.O. en el crecimiento. La tendencia de la curva en esta zona posiblemente permite pensar que al seguir disminuyendo la disponibilidad de alimento, el rendimiento Y_H continuará reduciéndose, hasta alcanzar la fase endógena, donde la energía producida solo será utilizada para el mantenimiento celular.

Bajo las condiciones de nuestro experimento, el modelo planteado (ec. 5.2) para simular el comportamiento de Y_H , arroja un valor para el rendimiento mínimo Y_{Hmin} . Este valor está sujeto a las condiciones de los experimentos realizados, dado que por las características del fango no fue posible alcanzar relaciones So/Xo más bajas. Con lo anterior, es posible que al disminuir la relación So/Xo por debajo de las realizadas en nuestro trabajo, el valor de Y_H continuara disminuyendo, encontrando un nuevo Y_{Hmin} .

La desviación estándar de los puntos de Y_H , destacada en la figura 5.30, muestra que la mayor variación se presenta en la zona más baja de So/Xo . Esa variación está ligada al exceso de biomasa, por lo que el sustrato es degradado en un corto tiempo,

obteniendo pocas mediciones en los mayores consumos de OD y dificultando la correcta medición de la oxidación de los componentes biodegradables.

Continuando con el comportamiento de la curva de Y_H , para valores de S_o/X_o entre 0.134 gDQO/gSSV y 0.308 gDQO/gSSV (ver figura 5.29), se observa que la pendiente disminuye, evidenciando una variación menor en los valores de Y_H . Esta variación se presenta entre valores de 0.6 y 0.69 gDQO/gDQO. Los valores son similares a los reportados por otros investigadores (ver tabla 1.2), lo que brinda mayor confianza a los resultados obtenidos.

Con los valores de S_o/X_o más altos utilizados en nuestra investigación entre 0.69 y 1.13 gDQO/gSSV, se observó que el rendimiento Y_H tienden a estabilizarse en valores entre 0.81 y 0.83 gDQO/gDQO, indicando que a pesar de estar en un medio de abundante alimento, los microorganismos solo están destinando el 82% a crecer, necesitando una producción mínima de energía que les permita este crecimiento. Estos porcentajes obtenidos en una condición de abundante alimento permitirán realizar una aproximación de la DQO como:

$$DQO = DQO_{cre} + DQO_{Ecre} + DQO_{Emant} \quad (6.1)$$

Donde

DQO_{cre} : DQO destinada a generación de biomasa

DQO_{Ecre} : DQO destinada a producción de energía utilizada en generación de biomasa.

DQO_{Emant} : DQO destinada a producción de energía utilizada en el mantenimiento.

De acuerdo al planteamiento de la ecuación 6.1, los microorganismos asignan de la DQO destinada para generación de energía, una porción para el mantenimiento DQO_{Emant} y otra para el crecimiento DQO_{Erec} . El consumo de la DQO en estos procesos variará dependiendo de la disponibilidad de alimento en el medio. En condiciones de insuficiencia de alimento, la porción de DQO_{Emant} será mayor que la DQO_{Ecre} , cubriendo principalmente procesos como transporte de iones, mantenimiento de gradientes de concentración (pH o presión osmótica), movilidad, etc. Por el contrario, en condiciones de abundancia de sustrato, se incrementa la porción de DQO_{Erec} , favoreciendo los procesos de crecimiento.

Si observamos el modelo planteado en la ecuación 5.2 y seguimos aumentando la relación S_o/X_o hasta el infinito, el valor de Y_H será máxima y tenderá a un valor de 0.8. En este caso, la energía mínima utilizada para suplir el gasto del microorganismo sería equivalente al 20%. A pesar de que aumentemos la disponibilidad de alimento, los microorganismos no destinarán más energía al crecimiento.

Trabajos posteriores no muestran el comportamiento desarrollado en este trabajo. las investigaciones de Liu y col., (1998); Xu y col., (1999); Rao y Gaudy., (1966), Chang y col.,(1993) y Chudoba y col., (1992) observaron una disminución de Y_H con el aumento de S_o/X_o en intervalos muy elevados de S_o/X_o . Este comportamiento tiene relación

con el gasto energético que no se destina al crecimiento. Esto se conoce como “*sobre flujo*” (overflow), “*Spilling*” o *desacoplamiento* de los procesos metabólicos entre el anabolismo y el catabolismo. Existen entornos bajo los cuales los microorganismos actúan como si el medio en el que se encuentran presentara un suministro permanente de recursos, por lo que gastan los recursos más que conservarlos para el futuro. En este caso, existirá un exceso de recursos de energía potencial en el catabolismo de la célula, donde la producción de energía es mucho más rápida de lo que el microorganismo puede usar.

Los resultados obtenidos por estos autores y los obtenidos en este trabajo indican que existe una relación S_o/X_o a partir de la cual se produce un desacoplamiento del catabolismo y el anabolismo. Cuando estos dos procesos están desacoplados el valor de Y_H disminuye, debido principalmente a que no se puede aumentar el crecimiento, sin embargo crece el consumo de M.O y OD.

Cabe mencionar que datos de Rao y Gaudy., (1966) y Chang y col., (1993) muestran que el aumento de S_o/X_o entre 0 y $2gDQO/SSV$ aumenta el rendimiento Y_H y que para valores de $S_o/X_o > 2gDQO/SSV$ la Y_H disminuye (ver gráficas 1.8 A y C). Esto evidencia que existe un valor de S_o/X_o a partir del cual se desacopla el anabolismo del catabolismo generando la disminución de Y_H .

Nuestros resultados difieren de lo planteado por autores como Vollertsen y col., (1998 y 1999). En sus investigaciones llevaron a cabo ensayos para la identificación de parámetros de los modelos entre los cuales se determina el valor de Y_H . Estos autores utilizan ensayos respirométricos en los que no encuentran una correlación entre el parámetro Y_H y el S_s adicionado.

7. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha llevado a cabo ensayos respirométricos variando a relación inicial de S_0/X_0 para estudiar el comportamiento del rendimiento Y_H por medio de ensayos respirométricos. El trabajo realizado ha permitido determinar que:

- Se observaron curvas tipo B (ver figura 1.4) en relaciones S_0/X_0 entre 0.04 – 0.6 dDQO/gSSV. Este tipo de curva permite la determinación fácilmente del momento en que se consume la totalidad del alimento agregado y los valores de OUR presentan mayor estabilidad.
- La variación en un 5% de la recta que representa la respiración endógena en una prueba respirométrica, afecta más la determinación del OD total en relaciones bajas de S_0/X_0 que en altas. Esto es debido principalmente al tamaño del área final de OD por estar sujeto al corto tiempo de consumo del alimento agregado. Esta variación afectan el cálculo del Y_H , y la estimación de las fracciones de DQO.
- El número de puntos de OD utilizados para calcular la OUR en los primeros instantes de las pruebas respirométricas es más crítico para relaciones bajas de S_0/X_0 inferiores a 0.04 gDQO/gSSV. Cuando el número de puntos de OD fue menor de 20, se logro captar los valores de OURmax con una correlación adecuada y acordes a la relación S_0/X_0 utilizada.
- Se encontró relación entre la variación de S_0/X_0 y el comportamiento del rendimiento Y_H de los microorganismos heterótrofos. En un rango S_0/X_0 entre 0.0147 – 1.103 gDQO/gSSV, Y_H varía desde 0.52 gDQO/gDQO hasta un valor de 0.81gDQO/gDQO para la relación S_0/X_0 mas alta alcanzada. No fue posible obtener relaciones S_0/X_0 más bajas debido a la concentración del fango aerobio de la planta piloto.
- La variación más fuerte en el valor de Y_H se presenta con relaciones bajas S_0/X_0 entre 0.0147 a 0.134 gDQO/gSSV. Esta variación está ligada a la asignación que los microorganismos hacen en el metabolismo, dado que el mantenimiento celular se hace más importante a velocidades de crecimiento bajas.
- El comportamiento del modelo planteado en la ecuación 5.2 reproduce satisfactoriamente el comportamiento del rendimiento Y_H . Se observa que bajo condiciones de alimento suficiente los microorganismos presentan un rendimiento máximo $Y_{HMAN} = 0.8$ gDQO/gDQO. En estas condiciones no destinan toda la DQO a aumentar o duplicar biomasa, dado que necesitan energía que les permita llevar a cabo ese crecimiento. En condiciones de alimento insuficiente $Y_{HMIN} = 0.51$

$gDQO/gDQO$. Sin embargo se podrían obtener valores menores de Y_{HMIN} si fuera posible trabajar con relaciones más pequeñas de S_o/X_o .

- En condiciones de abundancia de alimento, la mayor parte de la energía se emplea para llevar a cabo procesos de crecimiento. En cambio en condiciones de limitación de alimento, una parte importante de la DQO se emplea para la producción de energía para el mantenimiento y una mínima parte para la producción de energía destinada al crecimiento.

8. BIBLIOGRAFIA

Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2D and ASM3. IWA Task group on mathematical modeling for design and operation of biological wastewater treatment. London, UK: IWA Publishing; 2000.

Bjerre H. L. Hvitved Jacobsen T., Schlegel S., Teichgraber B. and te Heesen D.(1995). Experimental procedures characterizing transformations of wastewater organic matter in the Emscher River. Germany. Water Sci. Technol., 31 (7), 201-212.

Boursier H., F. Beline, E. Paul (2005). Piggery wastewater characterization for biological nitrogen removal process design. Bioresource Technology 96 (2005) 351–358.

Chang J., Chudoba P. and Capdeville B. (1993) Determination of the maintenance requirements of activated sludge. Wat. Sci. Technol. 28, 139-142.

Chudoba P, Capdeville B. and Chudoba J. (1992) Explanation of biological meaning of the So/Xo ratio in lab-scale cultivation. Water Sci. Technol., 26(3-4), 743 – 751.

Cokgor E. Ubay, S. Sozen, D. Orhon and M. Henze. (1998). Respirometric analysis of activated sludge behavior. Assessment of the readily biodegradable substrate. Water Res. 32 (2), 461–475.

Dircks K., Pind P.F., Mosbæk H. and Henze M. (1999) Yield determination by respirometry – The possible influence of storage under aerobic conditions in activated sludge. Water SA, 25, 69 – 74.

Dimocka Rachel, Eberhard Morgenroth (2006). The influence of particle size on microbial hydrolysis of protein particles in activated sludge. Wat. Res. 40, 2064 – 2074

Dold, P.L., Ekama, G.A. and Marais, G.V.R. (1980). A General model for the activated sludge process. Prog. Wat. Technology. 12(6), 47-77

Dold P.L, Bagg W.k. And Marais Gvr (1986). Measurement of Readily Biodegradable COD Fraction in Municipal Wastewater by Ultrafiltration. UCT Report No. W57, Dept. Civil Eng., Univ. of Cape Town, Rondebosch 7701, South Africa.

Ekama G.A., Dold P.L. and Marais GvR (1986). Procedures for determining influent COD fraction and the maximum specific growth rate of heterotrophs in activated sludge system. Wat. Sci. Tech.18, 91 – 114.

Ferrer Polo J. y Aurora Seco Torrecillas (2007). Tratamientos biológicos de aguas residuales. Grupo Editor Alfa omega.

Gatti M. (2009) Caracterización de las aguas residuales y calibración del modelo BMNR1 para la simulación de los procesos de eliminación biológica de materia orgánica y nutrientes. Tesis doctoral. Universidad de Valencia. E.T.S.E.

HenryK Melcer, Peter L. Dold, Richard M. Jones, Christopher M Bye, Imre Takacs (2003). Methods for Wastewater Characterization in Activated Sludge Modeling. Water Environment Research Foundation. IWA Publishing.

Henze, M., Gujer, W., Mino, T., Van Loosdrecht, M.C.M., 2000. Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3. IWA Scientific and Technical Report No. 9.

Hu Zhiqiang, Kartik Chandran, Barth F. Smets, Domenico Grasso (2002). Evaluation of a rapid physical–chemical method for the determination of extant soluble COD. Wat. Res. 36, 617–624

Kooijman S.A.L.M., L.A. Segel (2004). How growth affects the fate of cellular metabolites. Bulletin of Mathematical Biology 67 (2005) 57–77.

Laborda F., E. Bolea, S. Ruiz-Beguería y J.R. Castillo (2008). Desde los complejos solubles a los coloides y partículas: Distribuciones de elementos en función del tamaño mediante ICP-MS acoplado a SEC y FIFFF. Grupo de Espectroscopia Analítica y Sensores (GEAS).universidad de Zaragoza.

Liu Yu, Guang-Hao Chen and Etienne Paul (1998). Effect of the So/Xo ratio on energy uncoupling in substrate-sufficient batch culture of activated sludge. Wat. Res. Vol. 32, (10), 2883 – 2888.

Liu Yu (1996). Bioenergetics interpretation on the so/& ratio in substrate-sufficient batch culture. Wat. Res. Vol. 30 (11), 2766 – 2770

Mamais D., Jenkins D. and Pitt P. (1993). A rapid Physical- chemical method for the determination of readily biodegradable soluble COD in municipal wastewater. Water Res. 27 195 – 197.

Máximo Sabino Garro Ayala. (2008). Biología general I y II. Universidad de los Ángeles de Chimbote.

Metcalf & Eddy (1995) Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. Mc Graw Hill.

Nuhoglu Alper, Bulent Keskinler, Ergun Yildiz (2004). Mathematical modeling of the activated sludge process—the Erzincan case. Process Biochemistry 40, 2467–2473.

Orhon D., Emine Ubay Cokgör (1997). COD Fractionation in wastewater characterization – The state of the art. J.Chem.Tech. Biotechnol. Vol 68, 283 – 293.

Orhon D., Diden Okutman (2003). Respiriometric assessment of residual organic matter for domestic sewage. *Enzyme and Microbial Technology* 32, 560- 566.

Petersen Britta (2000). Calibration, identifiability and optimal experimental design of activated sludge models. Tesis Doctoral. Faculteit landbouwkundige en toegepaste biologische wetenschappen. Universiteit Gent.

Rao B. S. and Gaudy A. F. Jr (1966) Effect of sludge concentration on various aspects of biological activity in activated sludge. *J. War. Pollut. Control Fed.* 38, 794-812.

Roeleveld, P. J.; Van Loosdrecht, M. C. M., (2002). Experience with guidelines for wastewater characterisation in The Netherlands., *Water Sci. Tech.*, 45 (6), 77-87.

Seco A., Ribes J., Serralta, J. Ferrer (2004) Biological nutrient Removal model No. 1 (BNRM1). *Wat. Sci. Tech.* 50 (6), 69 – 78.

Sollfrank U. and Gujer W (1991). Characterization of domestic wastewater for modeling of the activated sludge process. *Wat. Sci. Tech.* 23, 1057 – 1066.

Spanjers Henri and Vanrolleghem Peter (1995). Respirometry as a tool for rapid characterization of wastewater and activated sludge. *Water Sci. Tech.*, 26(2), 105 – 114.

Sperandio M., Paul E. (2000). Estimation of wastewater biodegradable COD fractions by combining respirometric experiments in various S_o/X_o ratios. *Water Res.* 34 (4), 1233–1246.

Sperling, Marcos von (2007). Activated sludge and aerobic biofilm reactors. International Water Association. Volumen 5.

Standard Methods (2005). For the determination of water & wastewater. Centennial Edition.

Strotmann U.J., A. Geldern, A. Juhn, C. Gendig and S.Klein (1999). Evaluation of a respirometric test method to determine the heterotrophic yield coefficient of activated sludge bacteria. *Chemosphere*, Vol 38 (15), 3555 - 3570

Vollertsen J. and Hvitved – Jacobsen T. (1999). Stoichiometric and kinetic model parameters for microbial transformations of suspended solid in combined sewer systems. *Water Res.* 33 (14), 3127–3141.

Vollertsen J. and Hvitved – Jacobsen T. (2002). Biodegradability of wastewater - a method for COD- fractionation. *Water Sci. Technol.*, 45(3), 25 – 34.

Wentzel M. C., Mbewe A and Ekama G.A. (1995). Batch test for measurement of readily biodegradable COD and active organism concentrations in municipal waste waters. *Water SA* Vol. 21.

Wentzel, A Mbewe, MT Lakay and GA Ekama (1999). Batch test for characterization of the carbonaceous materials in municipal wastewaters. *Water SA* Vol. 25 (3), 327 – 335.

Xu B, Jahic M, Enfors SO (1999). Modeling of overflow metabolism in batch and fed-batch cultures of *Escherichia coli*. *Biotechnol Prog.* Vol15(1):81-90.