

# ACTIVIDAD ACIDOGENICA EN REACTORES ANAEROBIOS

## ESTUDIO COMPARATIVO DE DOS MODELOS CINETICOS

*La determinación de la actividad acidogénica es de gran utilidad para el control del digestor y para optimizar el rendimiento del proceso de degradación del residuo orgánico a depurar. Se determina por aplicación de un modelo cinético. El artículo presenta una comparación entre dos modelos y las circunstancias en las que cada uno presenta más ventajas.*

J.L. GARCIA MORALES,  
E. NEBOT SANZ,  
L.I. ROMERO GARCIA  
y D. SALES MARQUEZ  
Dpto. de Ingeniería Química.  
Tecnología de Alimentos y  
Tecnologías del Medio Ambiente.  
Universidad de Cádiz.

### 1. INTRODUCCION

El proceso completo de digestión anaerobia de residuos orgánicos implica la interacción de una mezcla heterogénea de especies microbianas con unos requerimientos nutricionales complejos. La comunidad microbiana puede dividirse genéricamente en dos grupos tróficos (acidogénica y metanogénica). De ellos, la población acidogénica es con diferencia la más numerosa, siendo más del 90% de la población total del digestor [18].

El comportamiento de la fase acidogénica se ha demostrado que afecta a la composición y desarrollo de la fase metanogénica y, con ello, al proceso microbiano global de digestión. La comunidad de un digestor es dependiente del sustrato con el que se alimenta y, por lo tanto, es diferente para cada tipo de reactor en función de la alimentación y las condiciones de operación. Por ello, es de gran importancia conocer la composición microbiana y el equilibrio dinámico existente entre las distintas poblaciones del digestor. A pesar de que los aspectos tecnológicos de la digestión anaerobia han recibido

una gran atención, la cuantificación y el conocimiento de la actividad fisiológica de la población microbiana implicada en la primera fase del proceso, la población acidogénica, es relativamente pequeño [5]. La determinación de una característica global de dicha población, como es el caso de la actividad, puede ser de una gran utilidad de cara al control del digestor y para optimizar la eficiencia del proceso de degradación del residuo orgánico que se pretende depurar. Esta puede ser un factor de gran importancia en procesos de inoculación y puesta en marcha de los reactores, o puede ser de utilidad para la detección de la presencia de tóxicos o inhibidores en un proceso.

La actividad máxima de una población, en general, es un parámetro de gran utilidad en el control rutinario del funcionamiento de los procesos que impliquen a los microorganismos, como son los procesos depurativos, ya que ésta condicionaría, por ejemplo, la máxima velocidad de carga orgánica de un reactor [3] parámetro de gran importancia en el diseño de reactores.

En los procesos anaerobios, la determinación de la actividad, generalmente actividad metanogénica, ha sido abordada por múltiples autores en los últimos veinte años, y en la bibliografía se han descrito múltiples bioensayos y metodologías para determinarla experimentalmente [3, 7, 2, 10, 15]. En general, todos los procedimientos de medida de la actividad poseen como denominador común la medida de la velocidad de consumo de sustrato o producción de un producto, en unas condiciones concretas y determinadas. La obtención de la actividad, generalmente, la actividad máxima, se realiza mediante la aplicación de un modelo cinético adecuado a los resultados experimentales obtenidos en las condiciones de operación seleccionadas, ya que este parámetro está íntimamente asociado a la cinética de las reacciones que tienen lugar en el proceso de digestión anaerobia.

En el trabajo que se presenta se aborda la aplicación de un modelo cinético, modelo propuesto para procesos fermentativos por Romero y col. (1993), a la determinación de la actividad, actividad acidogénica máxima, en un proceso anaerobio. Este modelo se compara con el modelo de Monod (1949), ampliamente utilizado en la bibliografía por distintos autores [16, 3]. Para la obtención de la actividad acidogénica se desarrollaron unos tests específicos para la población acidogénica y fueron aplicados a la microbiota acidogénica de reactores de tanque agitado adaptados al tratamiento de efluentes de destilerías vínicas en el rango termofílico (55°C).

## 2. FUNDAMENTOS CINÉTICOS

La actividad expresa la velocidad de un proceso por unidad de masa

de microorganismos empleados. Desde un punto de vista práctico, se puede calcular como el cociente entre la velocidad global de degradación de sustrato, de producción de producto o de crecimiento celular y la concentración de microorganismos responsables de ese proceso.

Por lo tanto, la actividad genéricamente puede expresarse como:

$$A = \frac{(\pm r_i)}{X_v} \quad (1)$$

en la que:

A = actividad del cultivo.

$r_i$  = cinética de formación o consumo (signo + ó -) de la variable de estado  $i$ .

$X_v$  = concentración de microorganismos viables o activos.

Según la variable de estado que se considere, microorganismos, sustrato o producto, se obtienen tres posibles definiciones de actividad,  $A_x$ ,  $A_s$ ,  $A_p$  o también denominadas como velocidades específicas, respectivamente  $\mu$ ,  $(-q_s)$  y  $(q_p)$  [14]. De forma similar se pueden definir la actividad máxima como el máximo valor que pueden alcanzar la actividad correspondiente para un cultivo concreto y en unas condiciones determinadas. Así, se denominarán  $A_{Xm\acute{a}x}$ ,  $A_{Sm\acute{a}x}$  y  $A_{Pm\acute{a}x}$  a los valores máximos de ACTIVIDAD;  $m_{m\acute{a}x}$ ,  $(-q_s)_{m\acute{a}x}$  y  $(q_p)_{m\acute{a}x}$ ; del cultivo referidos a crecimiento de microorganismos, utilización de sustrato y formación de productos, respectivamente.

En la etapa acidogénica, los productos fundamentales formados son ácidos grasos volátiles a través de un mecanismo asociado al crecimiento, ya que se generan en las correspondientes rutas catabólicas. Si, la formación de productos complejos y el consumo de sustrato para el mantenimiento son despre-

ciables frente al consumo de sustrato para el crecimiento celular [12], entonces la relación existente entre las diferentes definiciones de actividad se puede observar en las siguientes ecuaciones:

$$(-r_s) = \frac{(r_x)}{Y_{X/S}} = \frac{(r_p)}{Y_{P/S}} \quad (2)$$

$$(-q_s) = \frac{\mu}{Y_{X/S}} = \frac{(q_p)}{Y_{P/S}}$$

$$A_S = \frac{A_x}{Y_{X/S}} = \frac{A_p}{Y_{P/S}}$$

$$(A_S)_{max} = \frac{(A_x)_{max}}{Y_{X/S}} = \frac{(A_p)_{max}}{Y_{P/S}}$$

donde  $Y_{P/S}$ ,  $Y_{X/S}$  son los coeficientes de rendimiento producto/sustrato y microorganismos/sustrato.

En consecuencia, las distintas expresiones de actividad son proporcionales, ya que las correspondientes cinéticas se encuentran interrelacionadas en virtud del metabolismo microbiano. La elección de la expresión de actividad a utilizar se realizará, normalmente, en función de los datos experimentales disponibles. Ya que, la determinación de la actividad es dependiente de la cinética del proceso, dependiendo de la ecuación que se admita para representar la cinética, las expresiones resultantes tanto para la actividad como para la actividad máxima serán diferentes.

## 3. MATERIAL Y METODOS

### 3.1. TEST DE ACTIVIDAD ACIDOGENICO

Con este tipo de ensayos se pretende calcular la actividad expresada en velocidad de consumo de glucosa, éstos se realizaron en viales de pequeño volumen (126 ml de volumen total, 100 ml de volumen útil), sellables y con un septum que permite la toma de muestra. El protocolo de realización de los ensayos es análogo al descrito por García-Morales *et al.*, (1996). La biomasa era medida como concentración de sólidos volátiles en suspensión (gSVS/L) siguiendo métodos estandarizados al comienzo

	LAS-0	LAS-5	LAS-10	LAS-15	LAS-20	LAS-25	LAS-35	LAS-50
(LAS) <sub>0</sub> (ppm)	0	5	10	15	20	25	35	50
X <sub>0</sub> (gSVS/l)	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
S <sub>0</sub> (gGlucosa/l)	2,30	2,34	2,22	2,23	2,22	2,20	2,18	2,10

del ensayo [1]. Como medida de la actividad acidogénica se realizó el seguimiento de la cinética de consumo de sustrato (glucosa), efectuando una medida de la cantidad de azúcares reductores en las muestras tomadas usando ácido dinitrosalicílico como reactivo [6].

### 3.2. MODELOS CINETICOS

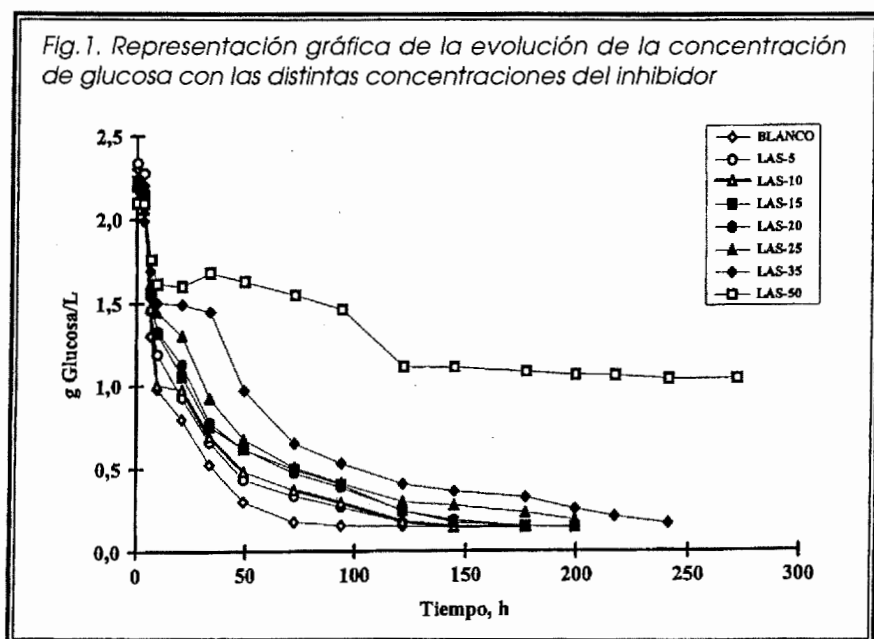
Para la obtención de la medida de la actividad acidogénica máxima a partir de los resultados experimentales se utilizaron los modelos de Monod (1949) y Romero (1991) realizando los ajustes matemáticos necesarios con el programa Statistica 4.0. El procedimiento de ajuste y las condiciones de realización del mismo se indicarán a continuación.

### 3.3. PLAN DE TRABAJO

Para la determinación de la actividad se han realizado una serie de ensayos con concentraciones crecientes de un inhibidor. En estos ensayos se pone de manifiesto el efecto que tiene un agente inhibidor sobre la actividad de los microorganismos, en general, y, en el caso de estudio, sobre la microbiota anaerobia. El efecto que un inhibidor tiene sobre la biomasa anaerobia ya se puso de manifiesto por autores como Oven y col. (1979) o Soto y col., (1993). En esta ocasión se ha utilizado como agente inhibidor el tensioactivo aniónico LAS (Alquilbenceno sulfonato lineal), cuyo carácter inhibidor se puso de manifiesto para ensayos de degradación aerobia por Pérez y col. (1996). Las condiciones de realización de los ensayos se recogen en la Tabla I.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSION

A partir de las condiciones iniciales expuestas en la Tabla I para los diferentes ensayos se obtuvieron los resultados que se exponen en la figura 1 en la que se representa la evolución de la concentración de glucosa con el tiempo para los diferentes ensayos. A continuación, se presentan los cálculos de la actividad para el caso de la utilización de ambos modelos cinéticos previamente comentados.



### 4.1. CALCULO DE LA ACTIVIDAD ADMITIENDO EL MODELO DE MONOD

Monod propuso en 1949 una ecuación para el crecimiento de los microorganismos que, aun hoy en día, sigue siendo ampliamente utilizada:

$$\mu = \mu_{\max} \frac{S}{K_s + S} = A_X \quad (3)$$

donde:  $\mu$ , velocidad específica de crecimiento microbiano, coincide con  $A_X$ , el parámetro  $K_s$  se denomina constante de saturación por sustrato y coincide con el valor de sustrato para el que  $\mu$  tiene un valor igual a la mitad del máximo ( $\mu_{\max}$ ). El valor de  $K_s$  es representativo de la afinidad del microorganismo por el sustrato; de forma que cuanto mayor es  $K_s$  menor es la afinidad y viceversa. A partir de esta expresión de  $A_X$  y teniendo en cuenta la ecuación 2, se puede expresar  $A_S$  y  $A_{S_{\max}}$  como:

$$A_S = \frac{A_X}{Y_{X/S}} = \frac{\mu_{\max}}{Y_{X/S}} \frac{S}{K_s + S} \quad (4)$$

$$A_{S_{\max}} = \frac{\mu_{\max}}{Y_{X/S}}$$

Como se deduce de la ecuación 2, el valor de  $\mu_{\max}$  se obtiene cuando la concentración de sustrato presente en el medio es muy elevada frente al valor de la constante  $K_s$ ,  $S \gg K_s$ .

Los resultados experimentales que se obtienen en los *tests* de actividad corresponden a valores de la concentración de sustrato presentes en el medio a diferentes tiempos de incubación. Por tanto, para determinar la actividad se procederá al cálculo de los valores de los parámetros cinéticos del modelo a partir de los mencionados resultados experimentales. Teniendo en cuenta la definición de  $A_S$  y su relación con  $-r_s$ , podrá obtenerse la expresión representativa de la evolución de la concentración de sustrato en función de  $A_{S_{\max}}$ .

$$(A_S) = \frac{1}{X_V} \left( - \frac{dS}{dt} \right) \quad (5)$$

$$\left( - \frac{dS}{dt} \right) = \frac{\mu_{\max}}{Y_{X/S}} \frac{S}{K_s + S} X_V$$

La integración de la anterior expresión conduce a la evolución de la concentración de sustrato con el tiempo. Sin embargo, la principal dificultad de este procedimiento estriba en que la concentración de microorganismos activos  $X_V$  que suele ser una función dependiente del tiempo y, en cultivos anaerobios, difícilmente calculable. Una posibilidad para simplificar dicho cálculo es utilizar inóculos con concentraciones muy elevadas en microorganismos activos,  $X_{V_0}$ . Así, se puede considerar que la concentración de microorganismos inoculados es mucho mayor

que la que podría formarse a partir de la utilización de todo el sustrato alimentado en el bioensayo, y  $X_V$  podría considerarse aproximadamente igual a  $X_{V_0}$  y constante durante todo el proceso de medida de la actividad. Introduciendo esta aproximación obtenemos:

$$X_V \approx X_{V_0} \quad (6)$$

$$\left(-\frac{dS}{dt}\right) \approx \frac{\mu_{max}}{Y_{XS}} \frac{S}{K_s + S} X_{V_0}$$

Aún es posible una nueva simplificación a la ecuación 6 que consiste en utilizar únicamente los valores de la concentración de sustrato  $S$ , que sean suficientemente altos como para que se cumpla la siguiente condición:

$$S \gg K_s \quad \frac{S}{K_s + S} \approx 1 \quad (7)$$

$$\left(-\frac{dS}{dt}\right) \approx A_{Smax} X_{V_0}$$

En estos casos, el valor de la actividad máxima del cultivo puede calcularse directamente determinando el valor de la pendiente del tramo recto inicial de la evolución de la concentración de sustrato con el tiempo y dividiéndolo entre el valor de la concentración inicial de microorganismos inoculados [3, 16]. Así, partiendo del conjunto de resultados experimentales de la evolución de la concentración de sustrato en el medio con el tiempo de operación, el cálculo de la actividad acidogénica máxima podrá realizarse mediante la determinación de la pendiente de la zona de la curva que responda a las hipótesis formuladas.

La primera hipótesis,  $X_V \approx X_{V_0} = \text{cte}$ , no seleccionaría el rango de valores experimentales a considerar; pero, es condición de obligado cumplimiento para que el tratamiento sea aplicable, ya que en caso contrario la concentración de microorganismos activos también variaría con el tiempo y no se observaría un tramo recto y, por tanto, dicha aproximación no sería válida.

La segunda hipótesis,  $S \gg K_s$ , obliga a considerar solamente

aquellos datos para los que no se ha producido una elevada degradación del sustrato. Así, un cálculo detallado obligaría a determinar previamente el valor de  $K_s$ , para seleccionar el rango de valores de la concentración de sustrato utilizable. No obstante, algunos autores [3] consideran que, como mínimo, debe utilizarse el conjunto de valores experimentales para los que la degradación del sustrato, añadido inicialmente, sea superior al 50%.

El método propuesto de determinación de la actividad presenta como principal ventaja que solamente requiere los valores iniciales de evolución de la concentración de sustrato con el tiempo y, por tanto, la actividad puede determinarse en un corto intervalo de tiempo tras la inoculación. Este fenómeno puede ser de gran importancia para posibilitar el control de los procesos fermentativos.

El resultado del ajuste a la expresión lineal de los resultados experimentales obtenidos (Fig. 1) se presenta a continuación en la Tabla II.

Como se observa en los valores de  $r^2$ , tan sólo en los casos en que las concentraciones del inhibidor, [LAS], son menores, la aproximación lineal realizada sobre los datos correspondiente al 50% de sustrato consumible es válida. Este hecho también se puede observar gráficamente en la figura 2 donde se muestra en trazo discontinuo.

Este método de obtención de la actividad cuenta con una serie de inconvenientes:

- El principal inconveniente del método propuesto radica en que la selección de los valores experimentales que han de utilizarse para la determinación de la pendiente es totalmente arbitraria. Así, dependiendo de las condiciones del cultivo han de despreciarse los períodos de latencia iniciales y los períodos finales en los que la concentración de sustrato no es muy superior a  $K_s$ , esto supone un alto grado de incertidumbre.

- Otro inconveniente del procedimiento propuesto estriba en la consideración de que  $X_{V_0}$  sea mucho mayor que  $Y_{XS} \cdot S_0$ . La degradación anaerobia de la materia orgánica implica el concurso de, al menos, cuatro grupos bacterianos diferentes; por ello, la obtención de inóculo con altas concentraciones de todos ellos no es siempre posible.

Debido a la existencia de estos inconvenientes, en el presente trabajo se ha utilizado también otro modelo cinético que permite obviarlos.

#### 4.2. CALCULO DE LA ACTIVIDAD ADMITIENDO EL MODELO DE ROMERO

Romero (1991) propuso un modelo cinético general para describir el comportamiento de los procesos fermentativos y que ha sido utilizado, con éxito, para modelizar diferentes procesos (aerobios y anaerobios) [9, 11], con distintos sustratos (vinazas de vino, tensioactivos, alimentaciones sintéticas, etc.) y en condiciones muy diferentes (cultivos discontinuos,

Tabla II  
Parámetros obtenidos del ajuste lineal al modelo de Monod simplificado y  $A_{Smax}$

(LAS) (ppm)	Pendiente	Ordenada en origen	$r^2$	$A_{Smax}$ gGluc./gSVS/d
0	-0,156	2,437	0,92	20,85
5	-0,137	2,464	0,90	18,25
10	-0,139	2,378	0,90	18,53
15	-0,059	2,122	0,83	7,73
20	-0,041	2,034	0,83	5,49
25	-0,035	2,019	0,86	4,64
35	-0,020	1,955	0,81	2,61
50	-0,005	1,862	0,84	0,62

semicontinuos y continuos). El modelo parte de la hipótesis básica de que los procesos fermentativos pueden ser considerados como reacciones autocatalíticas, ya que los microorganismos son, simultáneamente, reactivos y productos de los mismos. El modelo supone que las cinéticas de consumo de sustrato y de crecimiento de microorganismos son directamente proporcionales, siendo  $Y_{X/S}$  el coeficiente de proporcionalidad como se deducía de la ecuación 2 del apartado de fundamentos cinéticos. A partir de estas hipótesis se obtiene la ecuación de la velocidad de consumo de sustrato:

$$(-r_s) = \frac{\mu_{max}}{Y_{X/S}} X_V \frac{(S - S_{NB})}{(S_0 - S_{NB})} \quad (8)$$

$$A_s = (-q_s) = \frac{\mu_{max}}{Y_{X/S}} \frac{(S_t - S_{NB})}{(S_0 - S_{NB})}$$

$$A_{Smax} = \frac{\mu_{max}}{Y_{X/S}}$$

siendo:

$\mu_{max}$  = velocidad máxima de crecimiento de los microorganismos.

$S$  = concentración de sustrato presente en el medio (biodegradable y no biodegradable).

$S_{NB}$  = concentración de sustrato no biodegradable.

$S_0$  = concentración inicial de sustrato total añadida al sistema.

No obstante, cuando se cumple la condición aplicada en la ecuación 6 para el caso del modelo de Monod,  $X_{V0} \gg Y_{X/S} \cdot S_{00}$ , la expresión anterior se simplifica para dar la siguiente ecuación:

$$X_V \approx X_{V0} \quad (9)$$

$$(-r_s) = \frac{\mu_{max}}{Y_{X/S}} X_{V0} \frac{(S_t - S_{NB})}{(S_0 - S_{NB})}$$

La principal ventaja que presenta esta simplificación del modelo de Romero es que permite obtener el valor de la actividad realizando un ajuste a todos los resultados experimentales sin necesidad de despreciar arbitrariamente ninguno de ellos.

Tabla III  
Parámetros del ajuste no lineal al modelo de Romero simplificado y  $A_{Smax}$

(LAS) (ppm)	$S_0$ gGluc./l	$S_{NB}$ gGluc./l	$\mu_{max}/Y_{X/S}$	$r^2$	$A_{Smax}$ gGluc./gSVS/d
0	2,30	0,20	0,872	0,96	20,93
5	2,34	0,26	0,709	0,96	17,01
10	2,22	0,25	0,624	0,94	14,98
15	2,23	0,26	0,485	0,97	11,65
20	2,22	0,25	0,454	0,97	10,90
25	2,20	0,27	0,366	0,98	8,78
35	2,18	0,22	0,219	0,96	5,24
50	2,10	1,03	0,091	0,86	2,18

La integración de la expresión de la velocidad de la ecuación 8 conduce a la siguiente ecuación de evolución de la concentración de sustrato con el tiempo:

Expresión integrada (10)

$$S = S_{NB} + (S_0 - S_{NB}) e^{-\frac{\mu_{max}}{Y_{X/S}} \frac{X_{V0}}{(S_0 - S_{NB})} t}$$

Este modelo integrado surge del modelo general propuesto por Romero para procesos en los que se considera la aproximación de que, al igual que en el caso anterior, la concentración inicial de microorganismos es muy superior a la que podría formarse en el transcurso del propio proceso fermentativo (ecuación 9). Al integrar esta ecuación se obtiene la expresión de ajuste utilizada, y que corresponde con la (ecuación 10) anteriormente desarrollada. Por tanto, realizando una regresión no lineal a los valores experimentales de la concentración de sustrato frente al tiempo, puede obtenerse el valor de la actividad máxima.

Aplicando a los resultados experimentales obtenidos el modelo simplificado de Romero, (ecuación 10), se obtiene un valor de la actividad máxima que proviene del ajuste de la totalidad de los datos obtenidos, sin que sea necesario ceñirse únicamente a una parte de la curva.

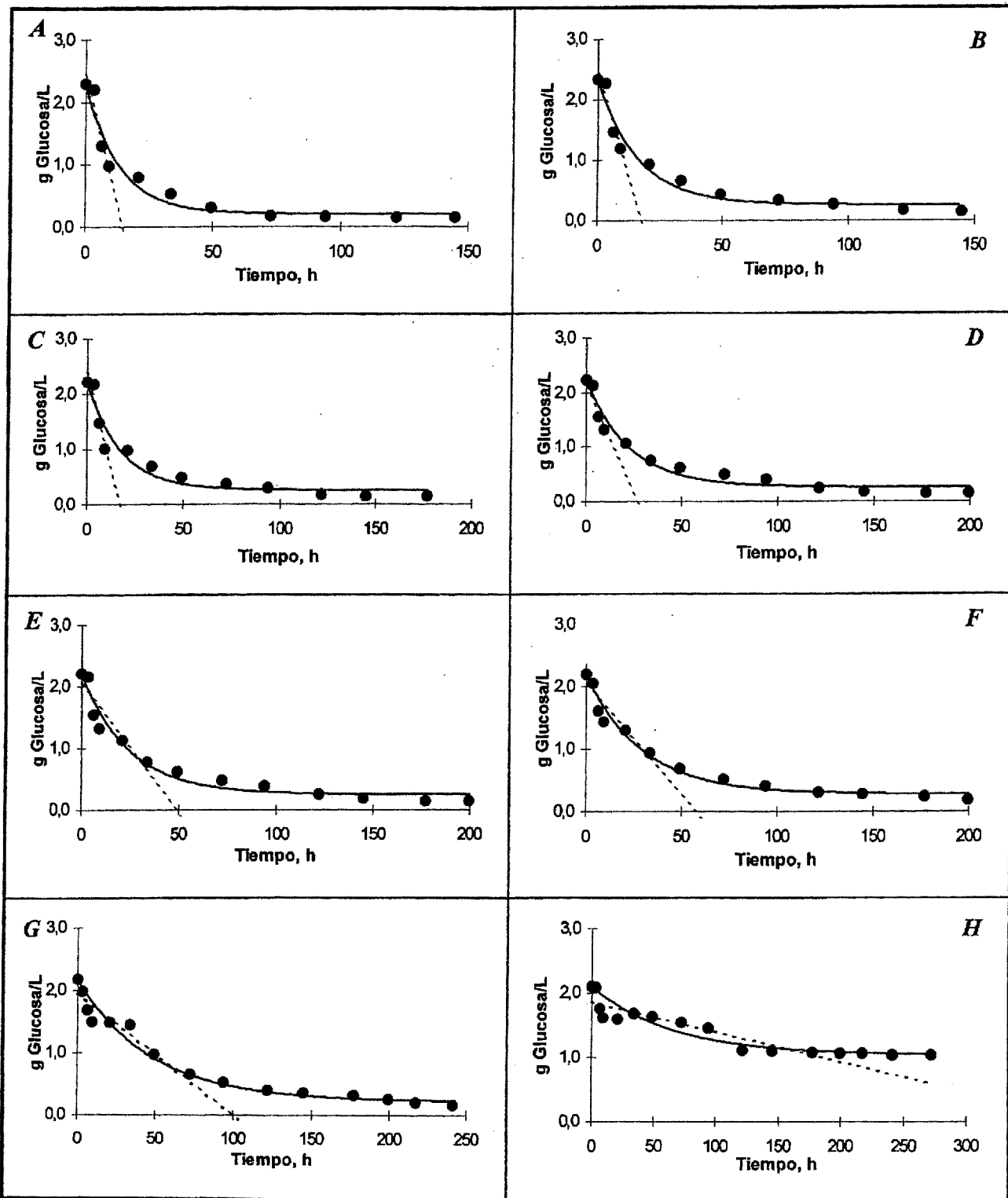
Los resultados del ajuste de los diferentes parámetros del modelo,  $S_{NB}$  y  $\mu_{max}/Y_{X/S}$ , y el valor de la actividad máxima obtenida se muestran en la Tabla III para los diferentes ensayos.

La representación de los ajustes ofrecidos por ambos modelos para cada una de las experiencias se puede observar en la figura 2, el ajuste lineal aparece en trazo discontinuo y el correspondiente al modelo integrado de Romero en trazo continuo. Los resultados de los distintos ajustes, y las representaciones gráficas de los mismos, permiten abordar un estudio comparativo entre los diferentes modelos y su posible aplicación a cada uno de los ensayos.

Los ajustes que ofrece el modelo simplificado de Romero para la totalidad de la batería de ensayos tienen unos coeficientes de correlación ( $r^2$ ), en su mayoría, de 0,94 o superiores (salvo para 50 ppm de LAS Fig. 2H). Los valores de actividad obtenidos son, en general, mayores a los obtenidos por la aproximación lineal del modelo de Monod, salvo en los casos de menor inhibición: 0 y 5 ppm de LAS (Figs. 2 A y B), donde son similares. La aplicación del modelo de Romero al conjunto de puntos experimentales del ensayo, permite prescindir del proceso de elección, en muchos casos aproximado, de una parte de ellos que se debe realizar en la aproximación lineal en el rango de consumo de al menos el 50% del sustrato.

En la figura 2 que recoge los resultados para ambos modelos, para el Blanco (Fig. 2.A), se observa que el modelo de Monod (trazo discontinuo) con la aproximación lineal utiliza la pendiente de la curva en la región donde la velocidad de consumo de sustrato corresponde

Fig. 2. Modelización de los resultados obtenidos de los tests acidogénicos, aplicando los modelos de Monod (trazo discontinuo) y Romero (trazo continuo) a los ensayos sin inhibidor (A) testigo (0 ppm LAS) y con inhibidor LAS: (B) 5 ppm, (C) 10 ppm, (D) 15 ppm, (E) 20 ppm, (F) 25 ppm, (G) 35 ppm, (H) 50 ppm.





al máximo, resultando una actividad máxima de 20,85 gGlucosa/gSVS/d. El modelo simplificado propuesto (trazo continuo), también para el Blanco, se ajusta mucho mejor a la totalidad de los puntos experimentales dando un valor para la actividad máxima de 20,93 gGlucosa/gSVS/d, similar al anterior.

La diferencia entre los valores obtenidos es muy pequeña, sin embargo, el primer valor se estima cuando únicamente han transcurrido 10 horas, el 12% del tiempo total de duración del ensayo, aproximadamente unas 73 horas. Un análisis parecido se puede realizar con los resultados obtenidos para las experiencias con una menor concentración del inhibidor LAS (5 y 10 ppm, figuras 2 B y C, respectivamente), en los cuales las diferencias entre ambos valores de actividad rondan el 7 y el 19%, respectivamente.

## 5. CONCLUSIONES

Los resultados globales de la aplicación de ambos modelos a los resultados experimentales de la batería completa de ensayos presenta, por tanto, distintos aspectos según al ensayo al que se aplique.

La aproximación lineal del modelo de Monod es válida tan sólo en aquellos casos en los que no se producen efectos inhibitorios o éstos son muy pequeños. Los valores obtenidos en estos casos pueden tener un valor estimativo y ser de utilidad ya que pueden ser calculados a partir de un conjunto de puntos muy pequeño, y dentro de las primeras horas del ensayo. El resultado obtenido de los ensayos con mayores concentraciones del inhibidor llevan a valores de actividad muy diferentes a los obtenidos con el ajuste de la globalidad de los resultados, y no recogen, como se puede observar en figura 2 (D-H), la zona del conjunto de puntos experimentales donde se produce la mayor velocidad de consumo de sustrato. Esto se debe a que, en estos ensayos, se puede

observar un período de latencia intermedio en el cual la velocidad de consumo de sustrato se ralentiza, y la medida de estimación lineal con tan sólo alguno de los puntos obtenidos, puede llevar a grandes errores de estimación en la actividad máxima del ensayo (caso de los ensayos con mayor grado de inhibición).

La aplicación del modelo simplificado de Romero permite, en contraposición al anterior, el ajuste de los resultados experimentales de la totalidad de los ensayos propuestos dentro de todo el rango de concentraciones del inhibidor. Los coeficientes de correlación del ajuste de dicho modelo son del orden de  $r^2 = 0,94$  o superiores para la mayoría de ellos.

La actividad máxima determinada se obtiene del ajuste del conjunto completo de los resultados obtenidos sin despreciar ninguno de los valores. El modelo propuesto de ajuste de los resultados recoge la evolución completa de los mismos en todos los casos con valores de actividad que siguen una gradación respecto a la cantidad de inhibidor añadida a cada ensayo.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Apha-AWWA-WPCF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 16<sup>th</sup> edition (1989).
- [2] Dolfing, J. y Bloemen, W.G.B.M. Journal of Microbiological Methods. 4:1-12 (1985).
- [3] Field, J.; Sierra Alvarez, R. y Lettinga, G. 4<sup>o</sup> Seminario de Depuración Anaerobia de Aguas Residuales. Ed.: Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Valladolid. Valladolid. 52-81 (1988).
- [4] García-Morales, J.L., Nebot E., Cantoral, J.M., Romero, L.I. y Sales D. Biotechnol. Tech. 10(4),249-252 (1996).
- [5] Kaseng, K.; Ibrahim, K., Paneerselvan, S.V. y Hassan, R.S. Process Biochem. 27:43-47 (1992).
- [6] Lorenz, M.G. Analytical Chemistry. 31(3), 426-428 (1959).
- [7] Méndez, R.; Tomás, P. y Lema, J.M. Proc. of 4<sup>th</sup>. Mediterranean Congress on Chemical Engineering. Barcelona. España. 752-753 (1987).
- [8] Monod, J. Ann. Rev. Microbiology. 3, 371-394 (1949).
- [9] Nebot, E. Tesis Doctoral. Universidad de Cádiz (1992).
- [10] Oven, W.F., Stuckey, D.C., Healy, J.B., Young, L.Y. y McCarty, P.L. Wat. Res. 13: 485-492 (1979).
- [11] Pérez, M.; Romero, L.I.; Quiroga, J.M. y Sales, D. Tenside, Surf. & Detergents 6:473-478 (1996).
- [12] Romero L.I. Tesis Doctoral. Universidad de Cádiz (1991).
- [13] Romero, L.I., Nebot, E. y Sales, D. Proc. of 6<sup>th</sup> Mediterranean Congress on Chemical Engineering, Barcelona, Spain. 393-394 (1993).
- [14] Sinclair C.G. Basic Biotechnology, Bu'lock J., Kristiansen B. (Eds.), Academic Press, Londres (1987).
- [15] Soto, M.; Méndez, R. y Lema, J.M. Proceedings Of The Sixth ISAD. Sao Paulo. Brasil (1991).
- [16] Soto, M., Méndez, R. y Lema, J.M. Wat. Res. 27 (8), 1361-1376 (1993).
- [17] Zeikus, J.G. en Anaerobic digestion.. D.A. Stafford et al. (Ed.) , pp. 61-89 Applied Science Published, Londres (1980).

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido financiado por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT), Proyecto BIO 92-0859. J.L. García Morales ha sido Becario del P.F.P.I. del Ministerio de Educación y Ciencia.