

MODELO MATEMÁTICO PARA EL DISEÑO DE REACTORES BIOLÓGICOS

**APLICACIÓN AL TRATAMIENTO
DE AGUAS POR TECNOLOGÍAS
NO CONVENCIONALES**





MODELO TAR PARA EL DISEÑO DE REACTORES BIOLÓGICOS. APLICACIÓN A LOS TRATAMIENTOS NO CONVENCIONALES DE AGUAS RESIDUALES.

El MODELO TAR se ha desarrollado para calcular coeficientes de diseño y márgenes de operación en la explotación de los procesos de tratamiento no convencionales de aguas residuales, aunque las posibilidades de aplicación son mucho más amplias. Es un modelo basado en el comportamiento de los organismos vivos, y a partir de este se deben resolver los problemas constructivos del reactor. El modelo ofrece vías de mejoras constructivas, que darían mejores comportamientos. En definitiva, este modelo es de los primeros que se ocupa de los seres vivos, para los que se construye un hábitat adecuado, el reactor.

En el modelo en concreto, autodenominados biomasa de transformación de materia orgánica o simplemente "bio" al grupo de diferentes organismos vivos que interactúan con el sistema, ya sean árboles, arbustos, algas, hongos, o bacterias de asociaciones más o menos diversas, que operan en el proceso de tratamiento.

Se estudia su comportamiento como seres vivos unicelulares o multicelulares bajo multitud de variables, llevadas incluso a condiciones extremas, y sus resultados son analizados por unidad de tratamiento (especificado para cada uno de los procesos) con el objeto de conocer lo máximo posible sobre su función, actuación, comportamiento, rendimiento y los márgenes de seguridad que deberían adoptarse. De este modo pueden calcularse los volúmenes, caudales a tratar, máximo de carga orgánica, etc.; sabiendo experimentalmente las cargas soportadas por unidad de tratamiento.

Se ha encontrado que el proceso (el ser vivo que actúa), colapsa en todos los casos, por exceso hidráulico, caudal crítico o por exceso nutricional, carga orgánica crítica. Se han preparado ya propuestas o aproximaciones para definir los márgenes de seguridad, para calcular los caudales y cargas orgánicas de operación, o diseño.

Este comportamiento ha sido además objeto de estudio en una gran cantidad de plantas de tecnología no convencional durante periodos de hasta doce años, tanto operativas como en proyectos piloto, bien con funciones de mantenimiento ordinario como en Andalucía o experimentales como en Tetuán. Aplicando el modelo ha podido explicarse su comportamiento, y calcularse los coeficientes de diseño de diferentes tecnologías en configuraciones básicas. El modelo se ha revelado eficaz, también para el filtro de turba, donde la acción de la adsorción pesa más, en principio, que la acción biológica.

MODELO TAR UNITARIO PARA EL DISEÑO DE PROCESOS BIOLÓGICOS BASADOS EN SU COMPORTAMIENTO. APLICACIÓN AL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES PARA ELIMINACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA.

Se ha desarrollado el MÉTODO TAR de diseño de procesos biológicos, que se aplica al tratamiento de aguas residuales, basado en el estudio experimental del comportamiento de una gran cantidad de plantas experimentales y reales, en funcionamiento continuo y rutinario.

Las consideraciones que se han tenido en cuenta para desarrollar el presente modelo matemático son las siguientes:

1. Se han estudiado una gran variedad de procesos, donde el peso fundamental de la eliminación de la materia orgánica del agua residual corresponde a organismos vivos, por variados que puedan ser. Estos organismos vivos son árboles, arbustos, cañizos, algas, bacterias, etc.
2. Se ha considerado el proceso como un organismo vivo en sí mismo, aunque puede haber una gran cantidad de especies diferentes, como es el caso de los humedales artificiales, estudiando sus respuestas a diferentes estímulos exteriores.
3. Se llama biomasa transformadora de materia orgánica, "Bio", a la suma de todas las especies vivas que actúan en el proceso, considerando sus interacciones entre ellas y el entorno creado de forma natural o artificial.
4. El reactor biológico marca el entorno físico, químico y biológico, donde de forma natural, acelerada o francamente modificada ocurren los procesos de transformación de materia orgánica.
5. Cuanto menos modificado más multivariable será el sistema, por ello deben especificarse mejor las condiciones mínimas que permitan el cálculo y la posterior aplicación del modelo de diseño.



6. Sobre los resultados experimentales obtenidos en el seguimiento de las plantas estudiadas se han realizado los balances de masa pertinentes: crecimientos de biomasa transformadora de materia orgánica, "Bio", y la reducción consiguiente de la materia orgánica aportada.

7. Los rendimientos, se han relacionado con las unidades específicas de cada tipo de reactor, de forma que se ha establecido la eliminación de materia orgánica, o la depuración conseguida por unidad específica de tratamiento: m^3 de laguna anaerobia, m^2 de filtro de turba, m^2 de laguna facultativa (m^2 de insolación), etc.

La elección de la unidad específica nos orienta al diseño posterior, y condiciona las conclusiones obtenidas, por eso es uno de los puntos clave en la obtención de un modelo adecuado que explique el comportamiento del sistema.

Una vez desarrollado el modelo matemático, con las consideraciones anteriores, se ha aplicado a una serie de tratamientos no convencionales para los que se quiere aplicar una nueva forma de diseño.

Se han evaluado una serie de datos experimentales de plantas pilotos y reales para estudiar su comportamiento y calcular los parámetros de diseño, y los límites posibles en el mantenimiento de cada una de las diferentes tecnologías de tratamiento.

Antes de desarrollar el modelo, se van a definir una serie de parámetros que se han considerado necesarios para su elaboración.

PARÁMETROS:

F = CAUDAL DE ENTRADA.

DBO_e = CONCENTRACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA DEL AGUA DE ENTRADA.

DBO_s = CONCENTRACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA DEL AGUA SALIDA.

X = BIOMASA TRANSFORMADORA DE MATERIA ORGÁNICA.

V = VOLUMEN DEL REACTOR BIOLÓGICO.

F_p = CAUDAL DE EXCESO DE FANGOS.

CARGA MÁSICA:

$$C_m = \frac{F \cdot \text{DBO}_e}{V \cdot X}$$

TIEMPO RETENCIÓN DE SÓLIDOS:

$$E = \frac{V \cdot X_{\text{reactor}}}{F_{\text{salida}} \cdot X_{\text{salida}}}$$

CARGA VOLUMÉTRICA:

$$C_v = \frac{F \cdot \text{DBO}_e}{V}$$

RENDIMIENTO:

$$R(\%) = \frac{\text{DBO}_e - \text{DBO}_s}{\text{DBO}_e} \cdot 100$$

TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO:

$$\text{TRH} = \frac{V}{F}$$

Se han escogido intervalos de tiempo suficientes para promediar el comportamiento del sistema, descartando los puntos extremos de rendimientos, por encima o por debajo del nivel medio. Se ha trabajado en la elaboración de series de datos medios a lo largo de todo el año.

Al tomar coeficientes por unidad específica de tratamiento, pueden relacionarse los comportamientos (por unidad de tratamiento) de las diferentes plantas, con lo que las curvas experimentales cubren la mayoría de las variaciones espaciales y temporales posibles, consiguiendo un modelo lo más representativo posible. El modelo debe considerar, explicar y calcular el comportamiento del sistema en las condiciones más desfavorables, dando un margen a la mejora de resultados en el mantenimiento posterior.

La influencia de las condiciones climatológicas, queda recogidas en las series anuales de datos las plantas que se han evaluado, permitiendo diseñar considerando las épocas más desfavorables. En todo caso, el seguimiento se ha realizado íntegramente en Andalucía y en Tetuán, regiones típicas de clima mediterráneo no extremo.

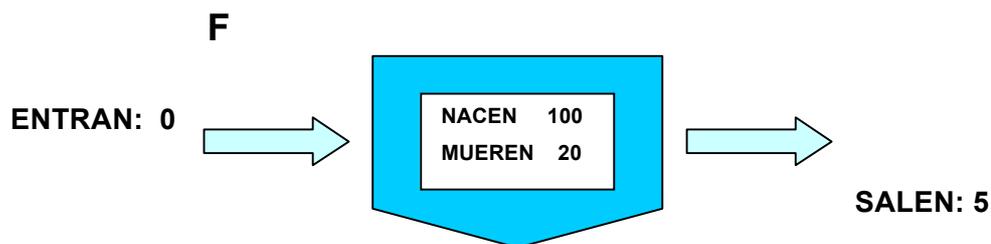
A. DISEÑO DE REACTORES BIOLÓGICOS MEDIANTE EL MÉTODO DE CÁLCULO TAR.

En el presente método de diseño TAR vamos a partir de dos condiciones de partida para el desarrollo de la teoría experimental:

CONDICIÓN PRIMERA

Para que un reactor biológico sea viable, debe mantener un mínimo de población de biomasa transformadora de materia orgánica, "Bio", en su interior. Los componentes que mueren más los que salen en el efluente deben ser compensados, al menos, por los que nacen en la unidad de tiempo evaluada.

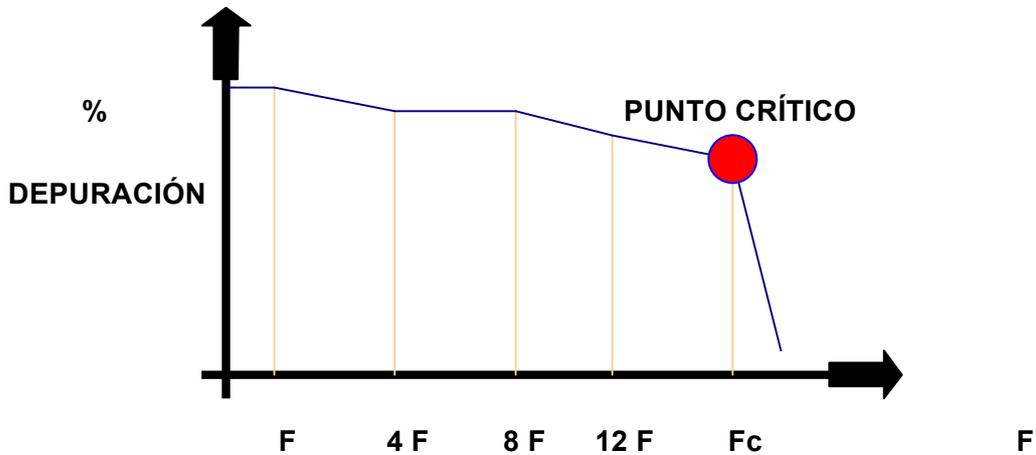
Supongamos un reactor biológico con el siguiente balance en unidades "Bio" en un tiempo t . En un esquema simplificado del proceso, sin considerar otras interacciones, sería el siguiente:



RELACIÓN DE SALIDA DE MATERIA BIOMASA TRANSFORMADORA DE MATERIA ORGÁNICA		
2F	SALEN 10	SISTEMA VIABLE
10F	SALEN 50	SISTEMA VIABLE
15F	SALEN 75	SISTEMA VIABLE
16F	SALEN 80	PUNTO CRÍTICO 100 NACIMIENTOS – 20 MUERTES – 80 SALIDA

FIGURA 1. EXPLICACIÓN DEL LAVADO DEL REACTOR

SI CONTINUAMOS CON EL PROCESO, EVALUANDO EL % RENDIMIENTO EN DEPURACIÓN, TENDRÍAMOS UNA GRÁFICA DE ESTE TIPO.



Fc = caudal máximo de entrada.

El punto crítico, conlleva un concepto importante, es aquel en el que sale del sistema la mayor cantidad de biomasa transformadora de materia orgánica, sin una pérdida significativa de eficacia en el reactor, lo que significa que se compensa por el mayor crecimiento de biomasa posible en las condiciones de trabajo del reactor. El punto crítico, como es obvio, no debe alcanzarse en ningún caso dentro de un reactor biológico, puesto que el riesgo de lavado es grande, y la recuperación del reactor puede ser muy complicada, ya que seguramente se necesita de un tiempo y un coste elevado.

Considerando el tiempo de retención hidráulico:

Se debe diseñar con un margen de seguridad, con un caudal de diseño F operación con porcentaje menor al F crítico.

TIEMPO DE RETENCIÓN CRÍTICO DEL REACTOR: $TRH_{CRÍTICO} = \frac{V_{REACTOR}}{F_{CRÍTICO}}$

CONDICIÓN 2

A igualdad de otros factores, el rendimiento de un reactor depende del grado de contacto de la biomasa existente con la materia orgánica del agua residual. Para mejorar los rendimientos debe incrementarse dicho contacto, bien agitando el agua residual, o buscando biomazas más móviles o estimulando las existentes. En todo caso debe mejorarse el volumen “útil” del reactor.

Las operaciones que vamos a emplear para mejorar el rendimiento del reactor biológico son:

1. Agitación.
2. Mayores recorridos de la alimentación.
3. Recirculaciones.
4. Mejor disponibilidad de la biomasa.

Tomando como ejemplo una laguna anaerobia, y un digestor anaerobio agitado podemos distinguir claramente ambos conceptos.

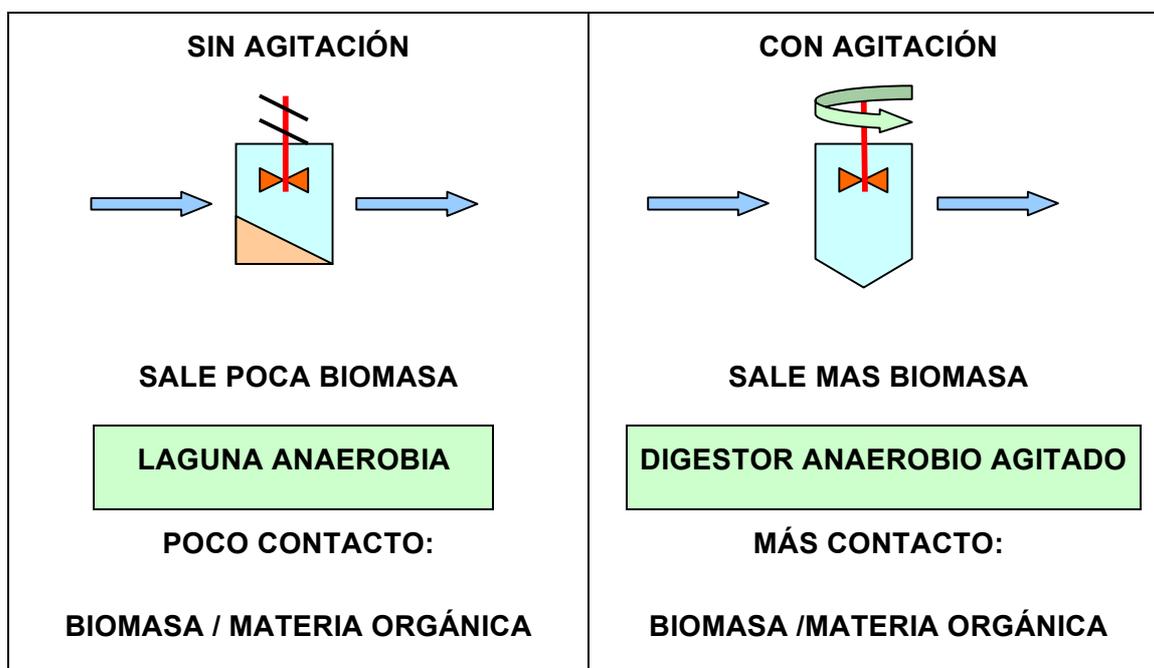


FIGURA 2: RELACIÓN CON LA AGITACIÓN DEL REACTOR

Se pueden comparar ambos reactores de acuerdo con las condiciones 1 y 2:

1. CAUDAL	LAGUNA ANAEROBIA	DIGESTOR ANAEROBIO AGITADO
F. ALIMENTACIÓN ADMITIDA	MAYOR	MENOR
F. CRÍTICO	MAYOR	MENOR
F. OPERACIÓN	MAYOR	MENOR

2. TRH TIEMPO DE RETENCIÓN CRÍTICO	LAGUNA ANAEROBIA	DIGESTOR ANAEROBIO AGITADO
TRH CRÍTICO	MENOR	MAYOR
TRH OPERACIÓN	MENOR	MAYOR

3. TRS TIEMPO DE RETENCIÓN SÓLIDOS	LAGUNA ANAEROBIA	DIGESTOR ANAEROBIO AGITADO
TRS	MUCHO MAYOR	MUCHO MENOR

4. SSV SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN VOLÁTILES	LAGUNA ANAEROBIA	DIGESTOR ANAEROBIO AGITADO
EFLUENTE	MUCHO MENOR	MUCHO MAYOR

5. DISEÑO DEL VOLUMEN DEL REACTOR	LAGUNA ANAEROBIA	DIGESTOR ANAEROBIO AGITADO
VOLUMEN REACTOR	MENOR	MAYOR

6. RENDIMIENTO EN ELIMINACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA	LAGUNA ANAEROBIA	DIGESTOR ANAEROBIO AGITADO
% DEPURACIÓN DEPENDE DE LA AGITACIÓN	MENOR	MAYOR



B. BALANCE DE MASA EN LOS REACTORES BIOLÓGICOS:

Suponiendo que en una parte muy importante, el crecimiento de la biomasa esté relacionado con la transformación de materia orgánica, o en su caso que sea proporcional a dicha transformación, pueden relacionarse los siguientes balances de masa en los reactores biológicos.

BALANCE PRIMERO. MATERIA ORGÁNICA CONSUMIDA:

La materia orgánica que entra en el reactor, es igual a la que sale del mismo más la que se consume por la biomasa.

$$F \cdot DBO_E = F \cdot DBO_S + RXV$$

F = caudal de entrada.

DBO_E = concentración de materia orgánica en la entrada medida como DBO. Demanda biológica de oxígeno.

F · DBO_E = Kg materia orgánica que entran en la unidad de tiempo.

DBO_S = concentración de materia orgánica en el agua de salida como DBO.

F · DBO_S = Kg materia orgánica que salen en la unidad de tiempo

R = coeficiente de sustrato (materia orgánica) consumido por unidad de biomasa en la unidad de tiempo $\Delta DBO / \Delta t$

X = concentración de biomasa en el reactor.

V = volumen de reactor.

XV = kg de biomasa en el reactor.

RXV = kg de sustrato consumidos por la biomasa del reactor.



Vamos a relacionar nuestro balance de materia orgánica consumida con el tiempo de retención hidráulico.

$$F \cdot \text{DBO}_E = F \text{ DBO}_S + \text{RXV}$$

$$F (\text{DBO}_E - \text{DBO}_S) = \text{RXV}$$

$$\text{DBO}_E - \text{DBO}_S = \text{DBO consumido en el proceso}$$

$$F \text{ DBO consumido} = \text{RXV}$$

Procedemos a calcular ahora el coeficiente de concentración de biomasa del reactor (R).

$$R = \frac{F \cdot \text{DBO}_{\text{consumido}}}{M \cdot V} = \frac{\text{DBO}_{\text{consumido}}}{\left(\frac{V}{F}\right) \cdot X} = \frac{\text{DBO}_{\text{consumido}}}{\text{TRH} \cdot X}$$

$$R = \frac{\text{DBO}_{\text{consumido}}}{\text{TRH} \cdot X}$$



BALANCE SEGUNDO. BIOMASA GENERADA:

La materia orgánica de entrada es igual a la que sale, más la que se transforma en biomasa.

$$F \cdot \text{DBO}_{\text{ENTRADA}} = F \cdot \text{DBO}_{\text{SALIDA}} + X \cdot \frac{F}{Y}$$

Y = coeficiente de transformación de materia orgánica en biomasa = Kg Biomasa / Kg DBO.

XF = Kg biomasa.

XF / Y = Kg biomasa / (Kg biomasa / Kg DBO transformada).

$$F(\text{DBO}_{\text{ENTRADA}} - \text{DBO}_{\text{SALIDA}}) = F\text{DBO}_{\text{CONSUMIDA}} = X \frac{F}{Y}$$

$$Y = F \frac{X}{F \cdot \text{DBO}_{\text{CONSUMIDA}}}$$

$$X = Y \text{DBO}_{\text{CONSUMIDA}}$$

SUSTITUYENDO X EN EL PRIMER BALANCE:

$$R = \frac{1}{\text{THR}} \cdot \frac{\text{DBO}_{\text{CONSUMIDA}}}{X} = \frac{1}{\text{THR}} \cdot \frac{\text{DBO}_{\text{CONSUMIDA}}}{Y \cdot \text{DBO}_{\text{CONSUMIDA}}} = \frac{1}{\text{THR} \cdot Y}$$

$$Y \cdot R = \frac{1}{\text{TRH}}$$



Ahora lo relacionamos con la concentración de biomasa en el reactor en función del tiempo:

$$YR = \frac{\Delta X}{DBO_{CONSUMIDA}} \cdot \frac{\Delta DBO_{CONSUMIDA}}{\Delta t} = \frac{\Delta X}{\Delta t}$$

El incremento de la concentración de biomasa en la unidad de tiempo es el CRECIMIENTO de la biomasa transformadora de materia orgánica, μ , y es inverso al tiempo de retención hidráulico del sistema.

$$\mu = \frac{1}{TRH}$$

Si queremos determinar el crecimiento máximo de biomasa, podemos estudiarlo en el punto crítico:

Crecimiento máximo = cantidad de biomasa que se va en el efluente de salida más la cantidad de biomasa que muere.

$$\mu_{MÁXIMO} = \frac{1}{TRH_{CRITICO}} + Kd$$

Kd es el coeficiente de muerte endógena.

La $\mu_{máxima}$ permite realizar cálculos analíticos específicos para cada tipo de reactor y proceso.

La “edad del fango”, en procesos bacterianos con procesos bacterianos con recirculación puede asociarse a “acumulación de biomasa transformadora de materia orgánica”.

$$\mu_{\text{MAXIMO}} = \text{CRECIMIENTO BIOMASA} - \text{MUERTE BIOMASA}$$

$$\mu_{\text{MAXIMO}} = \frac{dX}{dt} = K \frac{dX}{dt} - k_d X$$

K = Constante del crecimiento del proceso.

$$\frac{\frac{dX}{dt}}{X} = K \frac{\frac{dX}{dt}}{X} - K_d$$

En procesos “acelerados” para tratar materia orgánica, el crecimiento debe ser, en general, bastante mayor que la muerte de biomasa, para que el proceso de lugar a una tecnología competitiva. Por ello, en muchos casos K_d puede despreciarse, en un cálculo que exige trabajar con márgenes de seguridad como es el diseño de reactores.

$$\frac{X}{\frac{dX}{dt}} = \frac{\text{BIOMASA}_{\text{TOTAL}}}{\text{BIOMASA}_{\text{CRECIMIENTO}}} = \text{TIEMPO DE RESIDENCIA DE BIOMASA}$$

El tiempo de transformación y el crecimiento de biomasa, permiten el cálculo de diseño de la biomasa en exceso, que según los casos, debe ser retirada del proceso.

C. RELACIÓN DEL MODELO DE COMPORTAMIENTO TAR CON LOS MODELOS CINÉTICOS DE CRECIMIENTO.

Una vez que se calcule μ_m , crecimiento máximo, se puede relacionar con el crecimiento bacteriano a lo largo de toda la evolución del sistema. Para ello debe escogerse el modelo cinético adecuado, dependiendo del proceso biológico con más peso en el tratamiento estudiado.

El Modelo más genérico y utilizado en los procesos bacterianos es el de J. Monod, y modificado razonablemente, se ha utilizado para muy diversos sistemas.

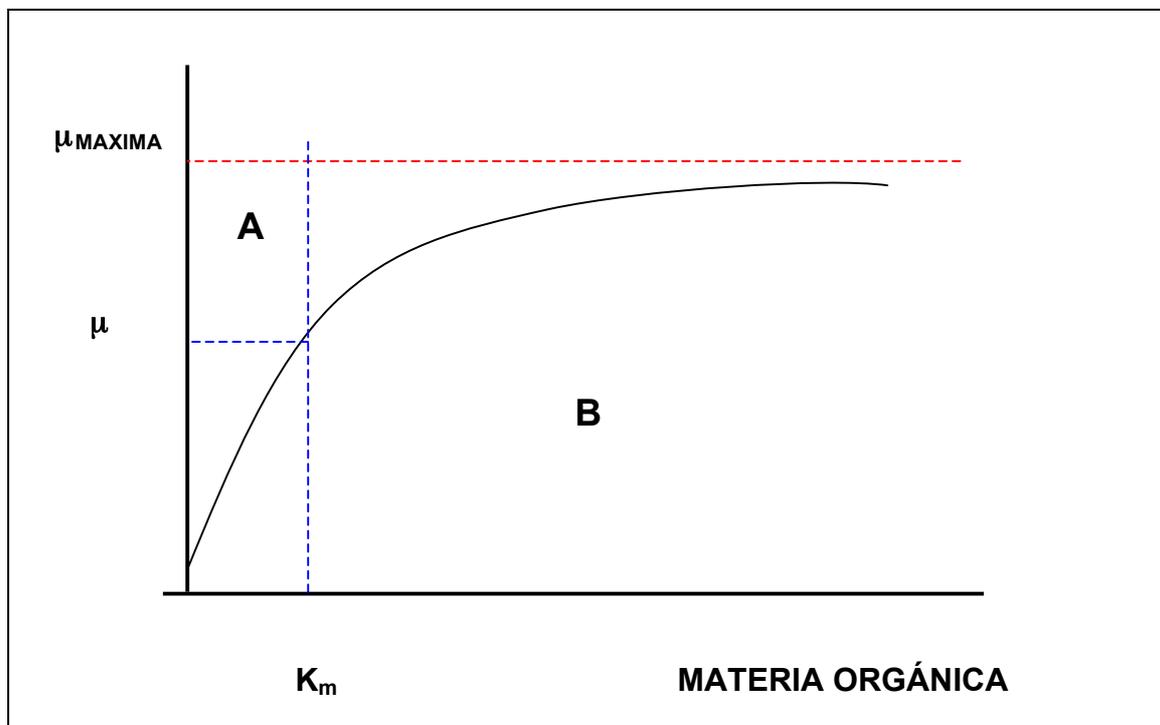


FIGURA 3: GRÁFICA DEL MODELO DE J. MONOD

A bajas concentraciones (**A**), la reacción es de primer orden, el crecimiento depende de la concentración de sustrato.

$$\mu = K C$$

A altas concentraciones (**B**), el crecimiento se hace constante e igual a μ_{\max} , y la reacción es de orden 0.

En los procesos naturales, las reacciones para la utilización de sustrato son múltiples, se considera como la suma total de todas ellas, y se le puede aplicar la ecuación de J. Monod, en la mayoría de los casos, y no solo a los procesos bacterianos.

$$\mu = \mu_{\max} \frac{C}{K_m + C}$$

K_m = concentración de sustrato para $\mu = \mu_{\max} / 2$

μ_{\max} = crecimiento máximo.

Este modelo no permite predecir simultáneamente el comportamiento de sistema a tiempos de retención largos y cortos y para sustratos complejos no se pueden obtener los parámetros.

Los modelos de primer orden son de uso muy simple y se ajusta bien a los datos experimentales. Pero no permiten predecir las condiciones de máxima actividad biológica, zona (B) de la Figura, ni los desajuste del sistema.

Después del modelo de Monod, se han usado muchos, como el de Contois, el de Chen y Hasimoto (1978), de aplicación excelente en procesos anaerobios o de crecimientos lentos.

$$\mu = \left(\mu_{\text{MAX}} \frac{C}{C_0} \right) \left[K + (1 - K) \frac{C}{C_0} \right]$$

Donde:

C = concentración de sustrato en el digestor.

C_o = concentración de sustrato en la alimentación.

K = constante cinética adicional.

Concentraciones expresadas como DQO en el caso de procesos anaerobios, aunque no todo sea admisible por los microorganismos, pero su variación en ausencia de oxidantes debe ser proporcional a la producción de metano.

Este modelo da respuestas lógicas a las condiciones extremas de alimentación.

Así, cuando la dilución de la alimentación se acerca al punto de lavado, *tiempo de residencia hidráulica crítico*, μ tiende a μ_{max} .

Para alimentación tendiendo a cero μ tiende a 0.

Además Chen y Hasimoto, desprecian el factor K_d frente a $1/\text{TRH}$, en reactores de mezcla completa y estado estacionario.

$$\mu = \left(\frac{1}{\text{TRH}} \right) + K_d$$

$$\mu = \frac{1}{\text{TRH}}$$

De aquí podemos calcular μ_{ma75}

x si conocemos experimentalmente TRH crítico



TRANSFORMACIÓN EN LOS REACTORES BIOLÓGICOS:

$$\mu_{\text{MAXIMO}} = \frac{dX}{dT} = K \frac{dX}{dT} - K_d X$$

$K \frac{dX}{dT} =$ Crecimiento de biomasa.

$K_d X =$ Muerte de biomasa.

K= Constante de crecimiento del proceso.

$$\frac{\frac{dX}{dT}}{X} = K \frac{dX}{dT} - K_d$$

$$\frac{X}{\frac{dX}{dt}} = \frac{\text{BIOMASA}}{\text{CRECIMIENTO BIOMASA}} = \text{TIEMPO DE ACTUACIÓN DE LA BIOMASA}$$

(SIMILAR A LA EDAD DEL FANGO EN PROCESOS BACTERIANOS)

D. DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE μ_{MAX} :

Se representará el rendimiento del proceso frente a caudales crecientes de entrada, esperando encontrar un punto crítico, caudal crítico, en el cual el rendimiento disminuye drásticamente.

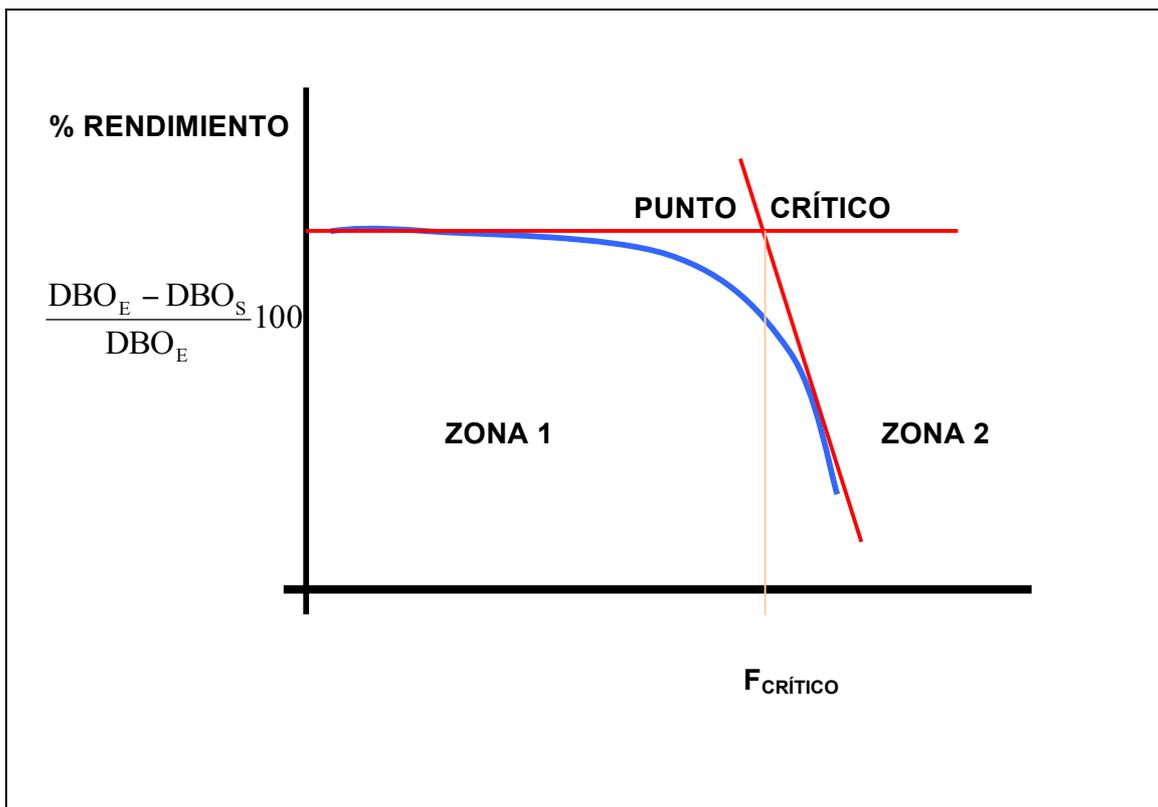


FIGURA 4: GRÁFICA DEL CAUDAL CRÍTICO

Prolongando asintóticamente las pendientes de las zonas anterior y posterior al punto crítico, se obtiene F crítico.

El rendimiento se escogerá sobre la producción de producto (Ej. biogás en procesos anaerobios) o en eliminación de sustrato y materia orgánica, cuya expresión matemática es:

$$\frac{DBOE - DBOS}{DBOE} 100 = \% \text{ DEPURACIÓN. SE ELIGE ESTE ÚLTIMO, POR}$$

SER MAS GENERAL, a los diferentes procesos biológicos estudiados.

E. MÁXIMA CARGA CONSUMIDA EN EL REACTOR BIOLÓGICO:

En un reactor biológico en el que, en un principio, la alimentación sea un factor limitante, conforme va aumentando ésta, aumentará la concentración de materia orgánica en el sistema con el consiguiente consumo de dicha materia por la biomasa del reactor. Esta tendencia, llegará a un punto máximo, donde el consumo de la materia orgánica por la biomasa, estará limitada por la cantidad de la misma que pueda colonizar el reactor en condiciones mínimas de rendimiento, el volumen del reactor empezará a ser el factor limitante.

Para obtener el punto crítico se enfrentarán la producción del reactor, o en su defecto la materia orgánica consumida frente a la alimentación de entrada por unidad de tratamiento. En el punto crítico, un aumento de la alimentación de entrada da lugar a una disminución de la producción del reactor, o de su consumo de materia orgánica. Nuestro ser vivo, se ha empachado.

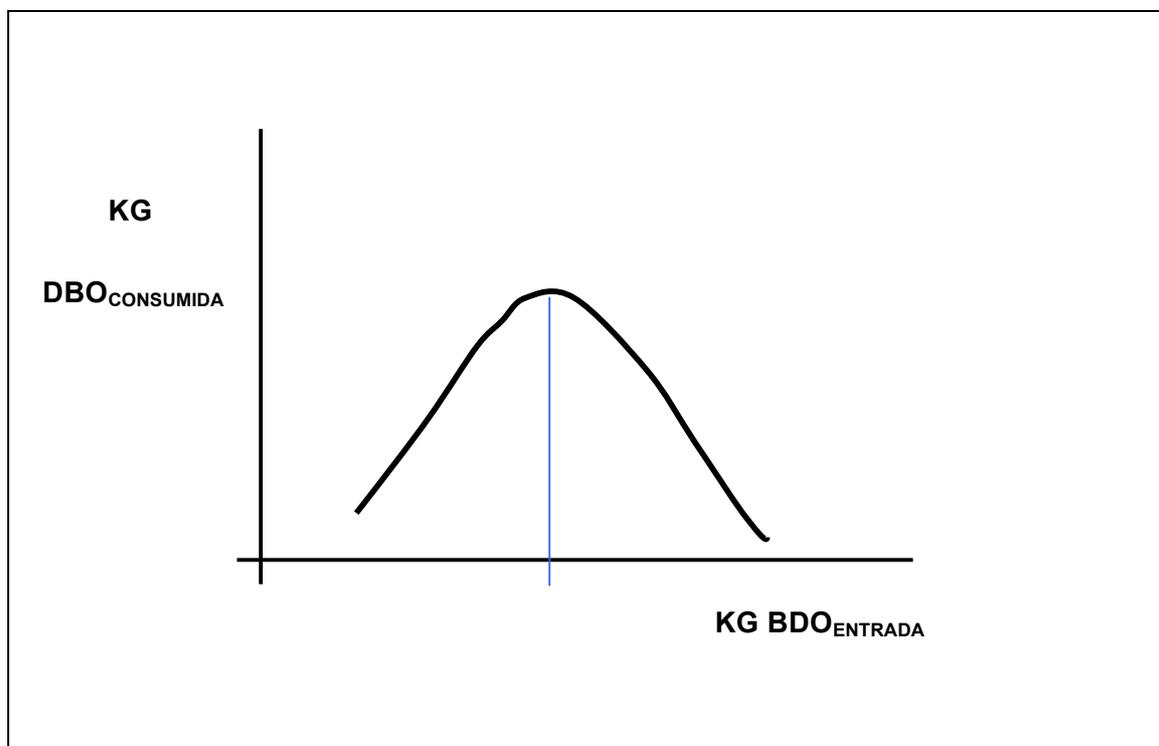


FIGURA 5: CURVA DE LA CONCENTRACIÓN MÁXIMA

Tomando una serie de datos simulados, en eliminación de DBO, puede verse gráficamente el punto crítico.

Kg DBO _E	Kg DBO _{CONS.}	(Kg DBO _{CON} / Kg DBO _E) 100 PRODUCTIVIDAD
10	9	90%
20	17	85%
30	24	80%
40	30	75%
50	35	70%
60	39	65%
70	42	60%
80	44	55%
90	45	50%
100	46	46% PUNTO CRÍTICO
110	44	40%
120	42	35%

Al conocer experimentalmente la cantidad máxima de alimentación que puede eliminarse en un determinado reactor biológico, si se relaciona con la unidad de tratamiento (m^3 , m^2 superficie,...) puede conocerse el volumen o cantidad de tratamiento necesario (m^2 de superficie de instalación, etc.) del reactor necesario para procesar una determinada carga orgánica conocida previamente y las necesidades de una determinada población, con unas actividades propias que den lugar a unos vertidos determinados.

Este volumen calculado experimentalmente será diferente del que se hubiera determinado si el punto crítico del sistema estuviera en el caudal de entrada.

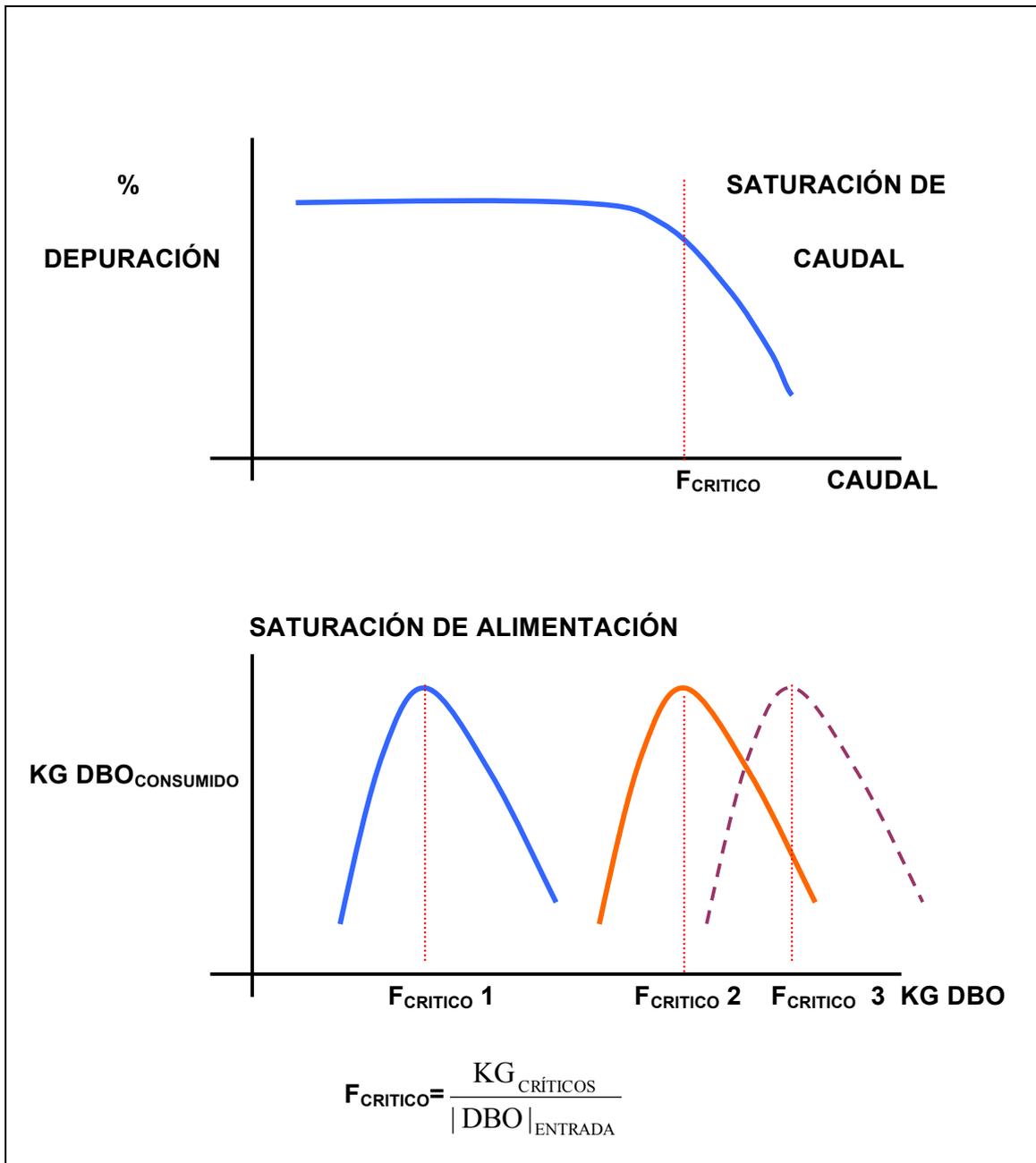


FIGURA 6: COMPARACIÓN DE AMBAS GRÁFICAS



Se pueden comparar los puntos críticos por exceso de caudal, FCRÍTICO, con los caudales que porten la alimentación crítica, dividiendo los kilogramos de alimentación por la concentración de materia orgánica en la alimentación.

Si el caudal con la cantidad consiguiente de $Kg_{CRITICOS}$ de DBO es menor, el sistema se descompensa por SOBREALIMENTACION, pero si por el contrario el sistema soporta bien la carga orgánica (alimentación diluida) se vendrá abajo al superar el caudal crítico, F_c .

En resumen el proceso biológico, entendido como un ser vivo, con diferentes poblaciones (así se puede entender el cuerpo humano) se comporta como una “biomasa” única, que se desequilibra y se descompensa en sus funciones por efecto de una sobrecarga de:

1. ALIMENTACIÓN, $Kg_{DBO_{ENTRADA}}$ críticos: **SATURACIÓN NUTRICIONAL.**
2. LÍQUIDO, caudal crítico: **SATURACIÓN HIDRÁULICA.**

Por ello para desarrollar el presente modelo, que ofrezca los parámetros de diseño del reactor, alimentación de operación (alimentación crítica minorada por un porcentaje de seguridad), Kg_{DBO} que se pueden tratar por unidad de tratamiento de un determinado sistema, o bien el caudal de operación (caudal crítico minorado en un porcentaje de seguridad), m^3 de agua residual que pueden tratarse por unidad de tratamiento, debe estudiarse el comportamiento de dichos procesos llevados al límite de estabilidad, y determinar cuál es el factor determinante de la saturación, y a partir de ahí, calcular los parámetros de diseño, adecuado a esa determinada configuración.

Este método de calcular el máximo de estabilidad de una determinada configuración de un sistema, es adecuado para sistemas naturales, como los humedales, o las tecnologías no convencionales, que imitan a la naturaleza lo más posible, ya que muchas de las condiciones del reactor permanecen invariables, y no pueden manipularse fácilmente al no poder instalar herramientas que consuman demasiada energía, o den lugar a mantenimientos complicados, que las convertirían en tecnologías convencionales, con otros rangos de aplicación.

Por ello, el método TAR de diseño propuesto es especialmente útil para estas tecnologías naturales, debido a su carácter multivariable, pero también para el resto de tecnologías convencionales, aunque no son objetivo de esta publicación.

Una vez calculados los parámetros básicos de diseño, volúmenes, cargas, alimentaciones asumibles, el mantenedor puede mejorar los rendimientos del sistema, calculado en el diseño para unas condiciones medias debido al promedio obtenido al funcionar el modelo por los resultados reales de plantas en funcionamiento.

Pueden cambiarse especies vegetales, mejorar técnicas de cultivo y poda, adaptar la biomasa a los vertidos específicos, introducir mayor diversidad ecológica, mejorar los circuitos hidráulicos, el volumen útil, el reparto del agua residual, introducir realimentaciones, favorecer el contacto aire-agua y mejorar las operaciones de limpieza entre otros.

Como todo diseño en el tratamiento se ofrece una herramienta básica, mejorable en el mantenimiento, dentro de los límites de cada sistema a explotar.

F. CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN:

Los parámetros de operación en el modelo matemático TAR son:

1. VOLUMEN: Se considera que el volumen del reactor calculado, es siempre VOLUMEN ÚTIL, dependiendo de las condiciones del proceso deberá sobredimensionarse convenientemente.

2. CAUDAL, CAUDAL CRÍTICO Y CAUDAL DE OPERACIÓN O DE DISEÑO:
La propia curva que permite calcular el caudal crítico, F_c , que obliga a una mayor o menor entrada de caudal, o porcentaje de seguridad para calcular el caudal de operación o de diseño.

Definiremos la “inercia” del sistema como el intervalo de caudal en el cual disminuye significativamente el porcentaje de depuración, que puede variar, de acuerdo a la configuración del reactor.

La filtración del agua en una parcela de suelo, puede ser lenta, y en el filtro de turba, podría ser más rápida, con lo que la saturación sería diferente en cada caso.

En los procesos bacterianos en suspensión, el sistema es muy sensible a la pérdida de biomasa en el punto de lavado, ya que la salida es rápida, y los efectos entre generaciones sucesivas se detectan inmediatamente, ya que no hay biomasa fija. La dependencia de las pérdidas en la salida es absoluta.

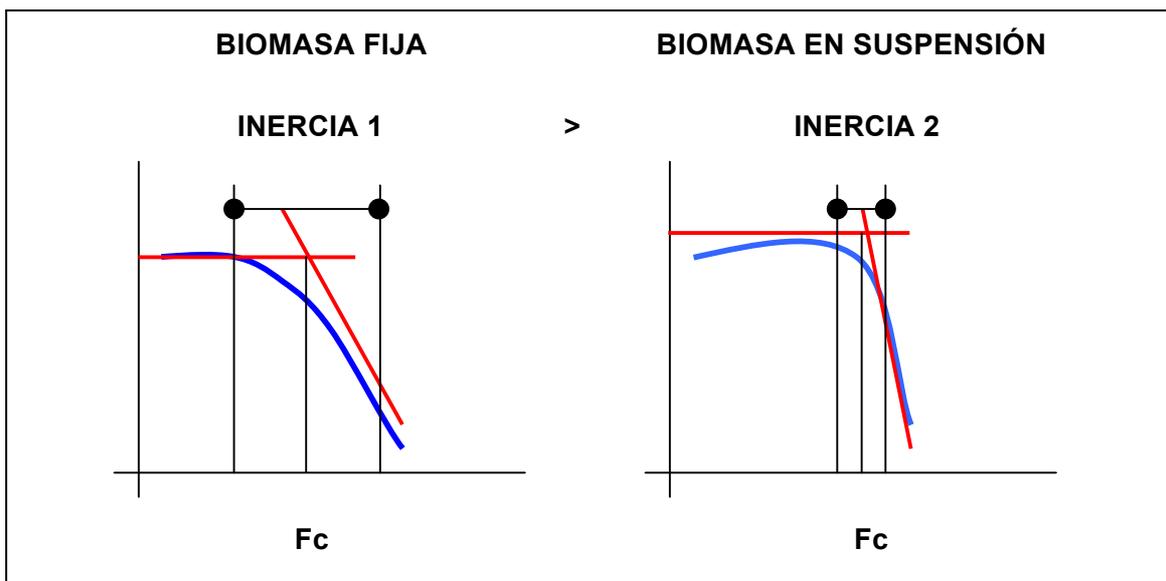


FIGURA 7: EXPLICACIÓN DE LA INERCIA.

En cambio en los procesos de película fija las pérdidas de biomasa bacterianas serán siempre menores, y la inercia del sistema será en todos los casos, mayor.

Para calcular la inercia se valorará el ΔF , incremento de caudal, que disminuye el porcentaje de depuración en un 30% (porcentaje arbitrario escogido por los autores y variable en función de cada tecnología a estudiar). Si la caída en depuración no es drástica, el desequilibrio del sistema no estaría obligatoriamente asociado al lavado del sistema, a la pérdida de biomasa o a la colmatación del terreno, no sería seguro identificarlo como un SATURACIÓN HIDRÁULICA.

Si de verdad ocurre una SATURACIÓN HIDRÁULICA, la depuración conseguida disminuirá, con la inercia que tenga el sistema, progresivamente, y para considerarlo como tal deberá ser mayor del 30% en los puntos experimentales tomados y si se siguieran teniendo puntos, seguiría descendiendo la depuración. No siempre será fácil obtener más puntos debido al fracaso del reactor, que obliga al mantenedor a actuar de alguna forma, cambiando la dinámica del sistema.

G. CÁLCULO EXPERIMENTAL DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO DE LOS TRATAMIENTOS NO CONVENCIONALES DE AGUAS RESIDUALES EVALUADOS.

Una vez establecidos las rutinas de cálculo del modelo TAR, se ha procedido a chequear el mayor número posible de plantas, piloto y reales en funcionamiento continuo. Se han considerado sus datos de rendimientos en los mayores periodos de tiempo disponibles, de forma que el comportamiento de los procesos estudiados sea lo más representativo.

El establecimiento de coeficientes unitarios, por unidad de tratamiento, permite relacionar los comportamientos de las diferentes plantas de una misma tecnología, en configuraciones de unos entornos similares (turbas, plantaciones, procedencia y características diversas de entrada y de proceso) y obtener puntos representativos en el modelo desarrollado.

Cuando se estudian periodos de tiempo, en una determinada planta, con entradas y rendimientos similares, se toma una media de los datos obtenidos, y se suma al modelo.

Considerando, que a lo largo de periodos largos, las plantas tienen momentos más problemáticos debidos al mantenimiento, se evalúa los datos experimentales de rendimientos en un intervalo de tiempo cercano, tomándose un valor medio de los parámetros para dicho intervalo.

Se ha constatado, que a pesar de que en las plantas reales, por razones obvias no se han llevado a las plantas a zonas extremas de comportamiento, se han conseguido datos de desequilibrios importantes en el mantenimiento, en casi todos los casos, lo que permite observar las tendencias de cada proceso.

El desarrollo del modelo, orienta los futuros trabajos de investigación y desarrollo tecnológicos en las plantas piloto disponibles, en que sentido deben forzarse los diferentes procesos para encontrar los parámetros mas adecuados. También establece claramente la normalización de los procesos estudiados, y lo que es más importante, define las variables a estudiar, para diseñar, mejorar el proceso, y comparar sistemáticamente sus rendimientos.

También aparecen en la explicación de las curvas experimentales, una serie de causas que llevar a un determinado comportamiento del sistema, que deben confirmarse, midiendo los fenómenos que ocurren en el proceso. Este seguimiento de las variables del sistema, ofrece una batería de ensayos que, nos acerca al DIAGNÓSTICO de los PROCESOS, al chequeo y evaluación del funcionamiento, para realizar las futuras inspecciones técnicas, que den lugar a un mantenimiento preventivo de los procesos.

Evoluciona en las técnicas de diagnóstico de cada tecnología, es una mejora que el modelo deja también abierto, tanto en los conceptos, como en la sugerencia de instrumentos para hacerlo.

Al calcular las graficas de comportamiento de cada una de las diferentes tecnologías, pueden cotejarse conclusiones distintas frente a diferentes unidades de tratamiento, m^2 de superficie, m^3 de volumen, número de árboles y de biomasa verde, sólidos en suspensión volátiles en el cultivo entre otros, la unidad que ofrezca mejores datos en el estudio del comportamiento del proceso define el factor con más peso en la evolución del sistema.

Por ejemplo, en una laguna facultativa, ¿qué factor será de mayor peso, la superficie soleada y por tanto con la actividad fotosintética de las algas y el aporte de oxígeno correspondiente o será el volumen del reactor, como en otros tipos de procesos?. Realizando las graficas frente a uno u otro valor pueden determinar puntos críticos, que permiten reconocer el factor limitante del proceso, y por tanto la unidad de tratamiento.

Una vez recogidos los datos de las diferentes plantas de una misma tecnología, en configuraciones y condiciones de funcionamiento similares, se refieren a la unidad de tratamientos con lo que pueden ser comparados los rendimientos en depuración, cargas y otras variables

Así se pueden realizar las representaciones escogidas, relacionando los datos experimentales de cada planta referidos a la correspondiente unidad de tratamiento. Además pueden escogerse planos diferentes, correr el modelo y comparar sus comportamientos.

En cada tratamiento se procesan los datos experimentales obtenidos de las plantas estudiadas.

H. CÁLCULO EXPERIMENTAL DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO DE LOS TRATAMIENTOS NO CONVENCIONALES ESTUDIADOS.

Para una determinada localidad, se establecen los horizontes de población oportunos, se calculan las dotaciones, y las cargas a depurar, y así se establece el dato de partida, caudal diario, concentración de materia orgánica, y sólidos en suspensión, como variables fundamentales. No pueden olvidarse lo especiales que son, en general, las poblaciones rurales en el uso del agua. Una evaluación desafortunada de caudales, calidades, y de la gestión del agua, lleva ineludiblemente a problemas, que luego la planta construida, difícilmente podrá solventar sin sufrimiento.

Determinados, los parámetros iniciales, el caudal, y la materia orgánica diaria marcan el diseño del proceso biológico. Los sólidos en suspensión obligan al desarrollo del pretratamiento, y condicionan la elección del tratamiento biológico posterior. Los demás parámetros, no pueden ser mejorados en la estación depuradora de aguas residuales urbanas, y deben regularse previamente a la planta, mediante un oportuno control de vertidos, y tratamiento en origen.

Por ello para diseñar el reactor biológico debe calcularse su volumen, y las cargas diarias de caudal y de materia orgánica que puede soportar, y por ello los óptimos de diseño y los márgenes de tolerancia permitidos en el mantenimiento.

I. PROCESO DE CÁLCULO DE PARÁMETROS DE DISEÑO:

Para cada tratamiento diferente se calculan y se enfrentan los datos de depuración conseguidos frente al caudal de entrada por unidad de tratamiento, para calcular el caudal crítico, y por tanto el tiempo de residencia crítico.

Así mismo se enfrentan los datos de materia orgánica consumida por la materia orgánica de entrada diaria por unidad de tratamiento, para determinar la materia orgánica máxima consumida, y a partir de ahí las cargas orgánicas máximas de diseño, y los márgenes de operación en el mantenimiento.

Los kilogramos de materia orgánica consumidos diariamente con la producción de biogás, biomasa verde, etc., según el proceso de que se trate, se pueden enfrentar la materia orgánica de entrada, de acuerdo a los balances de producción ya citados. Es decir, la producción / consumo de materia orgánica frente a materia orgánica por unidad de tratamiento.

Normalmente una de las dos curvas nos dará un punto crítico antes que la otra, y ese factor, caudal o Kg de materia orgánica de entrada será el limitante del proceso, en las condiciones evaluadas. Si por ejemplo, tenemos un caudal crítico, y por lo que fuera, aumentáramos la concentración de materia orgánica, la alimentación podría llegar a ser crítica antes que el caudal, y convertirse en el nuevo factor limitante. De la misma forma podría ocurrir al contrario. Así pueden calcularse los márgenes, entre los que debe manejarse el mantenimiento de la planta.

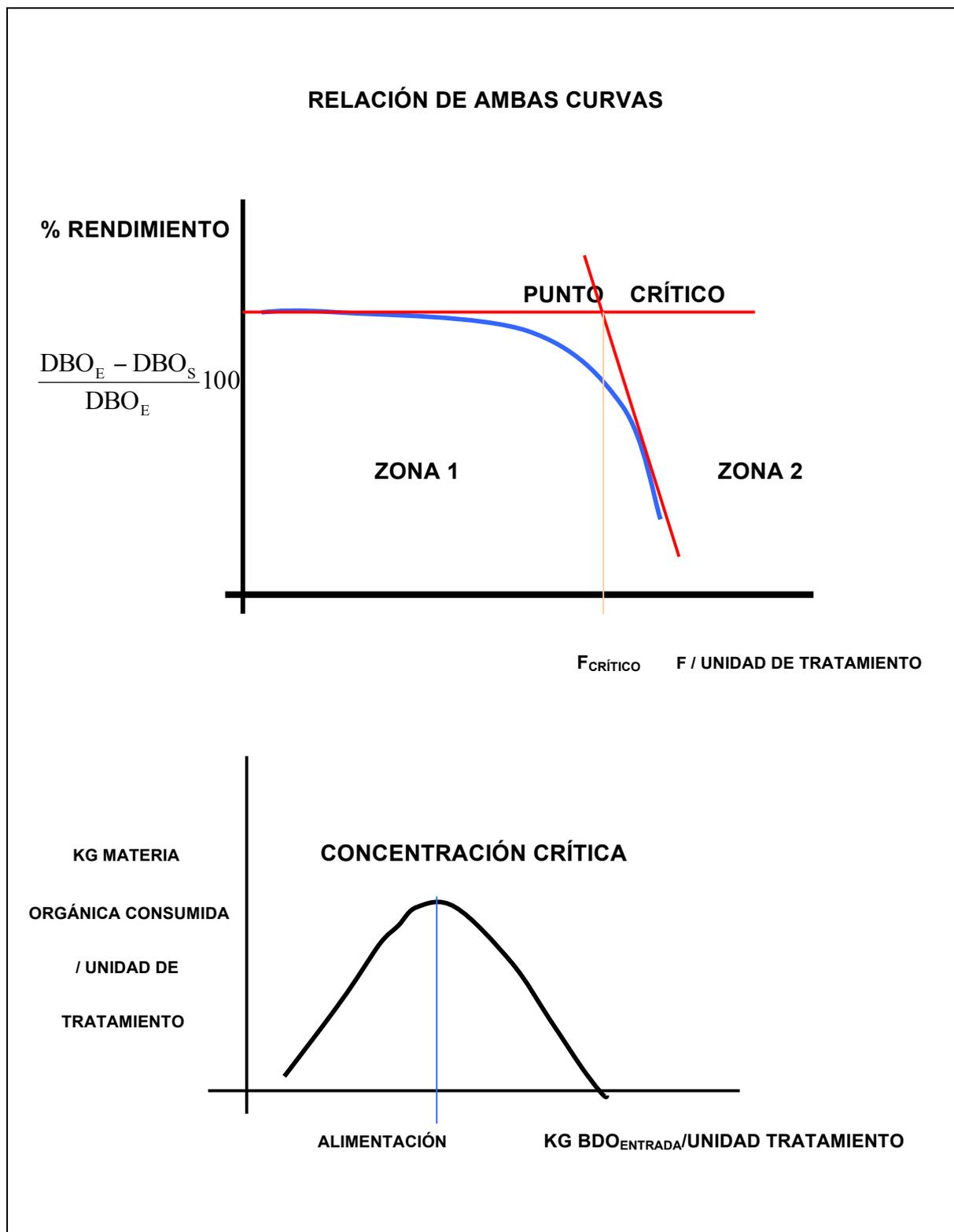


FIGURA 8: RELACIONES CRÍTICAS.



J. CÁLCULO DEL VOLUMEN O “CANTIDAD” DEL REACTOR, DE ACUERDO A LA VARIABLE CRÍTICA, CAUDAL, O ALIMENTACIÓN

1. CAUDAL CRÍTICO.

Sabiendo el caudal a tratar, y el F de operación por unidad de tratamiento (con el margen de seguridad respecto al crítico).

$$\text{Cantidad de Tratamiento} = \frac{\frac{F_{\text{DIARIOATRATAR}}}{F_{\text{OPERACIÓN}}}}{\text{UNIDAD}_{\text{TRATAMIENTO}}}$$

(volumen, superficie iluminada, etc.)

F operación, calculado experimentalmente.

$$\text{TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO} = \frac{\text{CANTIDADDETRATAMIENTO}}{F_{\text{OPERACIÓN}}}$$

2. MATERIA ORGÁNICA CRÍTICA DIARIA.

Si se conoce la cantidad de materia orgánica de diseño a tratar diariamente, caudal por concentración de materia orgánica de la población, y se calcula la carga orgánica diaria máxima tratable, por unidad de tratamiento, y a partir de este, la de operación (con el margen de seguridad respecto al crítico).

La cantidad de tratamiento a realizar es:

$$\text{CANTIDAD DE TRATAMIENTO} = \frac{\frac{\text{KG}_{\text{CARGADISEÑO}}}{\text{KG}_{\text{CARGAOPERACION}}}}{\text{UNIDAD}_{\text{TRATAMIENTO}}}$$

(VOLUMEN, SUPERFICIE, ...)

CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS Y FUNCIONALES

1. DISTRIBUCIÓN DEL AGUA

La distribución del agua residual debe ser lo más uniforme posible y varía en cada una de las tecnologías:

LECHOS BACTERIANOS: La distribución se hace normalmente por aspersores que pueden ser fijos o móviles. Los móviles consisten en brazos giratorios dispuestos radialmente, con boquillas incorporadas y movidos por carga hidráulica.

LECHOS DE TURBA: Normalmente a través de tuberías rígidas o de polietileno flexible, sobre una vigueta que atraviesa el lecho de turba por su parte central, o sobre el propio lecho. Cada cierto tramo aparecen boquillas por donde sale el agua.

BIODISCOS: El agua se encuentra en el interior del tanque sobre el que van entrando los discos.

LAGUNAS: La entrada del agua residual a la laguna anaerobia debe realizarse de tal forma, que el agua circule aprovechando al máximo el volumen útil de la laguna. Por otra parte, dentro de laguna anaerobia es necesario asegurar una zona de tranquilidad para favorecer la decantación, por ello lo más conveniente sería que el agua se introdujera por una tubería sumergida verticalmente, hasta la parte intermedia, para evitar crear un régimen turbulento que dificulte la decantación. En el caso de las lagunas facultativas la orientación debe ser perpendicular a la dirección del viento, para evitar la formación de zonas preferenciales. La entrada del agua residual a la laguna facultativa debe orientarse de forma que el agua circule aprovechando el máximo del volumen útil de la laguna y que ayude a crear un régimen turbulento que favorezca el funcionamiento de la laguna. Por ello se aconseja que el agua sea introducida en la laguna facultativa por una tubería sumergida hasta el fondo para asegurar una mayor turbulencia.

FILTRO VERDE: El agua residual a la que previamente se ha sometido a un tratamiento primario o al menos a un desbaste, se descarga controladamente sobre el terreno generalmente por inundación.

Se produce el encharcamiento del terreno por parcelas rotándose la boca de alimentación para favorecer la aireación del terreno. Aproximadamente cada subparcela recibe agua durante una semana y reposa otras cinco.

ESCORRENTÍA: La entrada de agua en los canales de escorrentía se realiza en cabecera distribuyéndose por todo el canal por la gravedad producida por la pendiente del canal, hasta que llega a la cola donde se recoge en zanjas o canales de evacuación.

2. MATERIAL DE SOPORTE DEL TRATAMIENTO

LECHOS BACTERIANOS: Es conveniente que la masa filtrante tenga la mayor superficie específica posible, para que se pueda formar la mayor cantidad de película biológica. Esta característica hay que conjugarla con el índice de huecos, ya que éstos serán los que permitirán el paso del aire y del agua. Los materiales de soporte pueden ser naturales o artificiales. Hay que cuidar la uniformidad del medio poroso, su durabilidad y resistencia. Los materiales más utilizados son la piedra sílice, el pórfido o pulzonadas. Los materiales artificiales pueden ser desde escorias hasta elementos plásticos, fabricados especialmente para conjugar superficie y huecos, de forma que se aumente el rendimiento por unidad de volumen.

Las características del medio poroso ideal deben ser: la economía, duración, la elevada superficie específica, y un índice de huecos que asegure su no atascamiento.

El volumen de agua retenido depende de la superficie y tamaño de los materiales del lecho, de donde resulta que la elección de los materiales filtrantes de los lechos es de suma importancia pues su diámetro o tamaño define las superficies disponibles.

LECHO DE TURBA: la turba es un material carbonado de materia vegetal. Se usan dos variedades denominadas: turba morena y turba rubia. La turba tiene un papel de filtración y además de degradación biológica. Se dispone sobre diferentes capas de otros materiales, de abajo a arriba, tenemos:

- a. Capa de grava de 30 cm
- b. Capa de gravilla de 10 cm.
- c. Capa de arena de 10 cm.
- d. Capa de turba de 40 a 80 cm.

BIODISCOS: El medio soporte debe seleccionarse, para hacer máximo el rendimiento sin sacrificar la duración ni sus prestaciones. El polietileno (PE) de alta densidad ha desplazado el poliestireno (PS) por tener un coste más reducido. Los medios llevan un inhibidor de la radiación UV como es el negro de humo, para aumentar su duración. Los medios presentan una superficie corrugada, que tiene por objeto, incrementar la superficie por unidad de volumen de medio y aumentar la exposición al aire entre otras.

LAGUNAS: El medio de soporte en este tipo de sistemas de tratamiento puede hacer referencia al propio terreno sobre el que descansa las balsas y medio impermeable que se utilice.

FILTRO VERDE: Como unidad de depuración se utilizan plantas superiores caracterizadas por tener una gran capacidad de absorber agua, y una gran resistencia a situaciones de encharcamiento. Éstas se disponen sobre un suelo de permeabilidad moderada, buena productividad y textura franco-arenosa principalmente.

ESCORRENTÍA: El medio de soporte usado para el cultivo de las macrofitas emergentes en este tipo de tecnología, es un material inerte con el fin de que las plantas tomen los nutrientes exclusivamente del agua residual, y así obtener un mayor porcentaje de depuración.

El canal debe estar impermeabilizado para evitar que se produzca la percolación del agua a través del terreno.

3. VENTILACIÓN

LECHOS BACTERIANOS: La ventilación puede ser natural o forzada. La ventilación natural se produce por efecto de la diferencia de temperaturas del aire y el agua. Al calentarse o enfriarse el aire en el interior del lecho se produce una variación de densidad que provoca el movimiento de la masa. Se ha comprobado que una diferencia de 6° de temperatura produce un tiro de 0.3 m³/m². min. Cuando la diferencia es de 2°, se para el tiro. En algunos tipos para evitar este paro de oxigenación, se recurre a la ventilación forzada, inyectando 0.3 m³/m². min. De forma artificial. Se recurre a este sistema cuando, por causas exteriores como frío, hay que cerrar los lechos. Habrá que tener en cuenta que esto representa un incremento de potencia instalada.

LECHOS DE TURBA: cuando se seca el lecho de turba se realiza una retirada de los lodos. La turba se remueve para que se oxigene y regenere.

BIODISCOS: Se trata de un sistema que gira introduciéndose en el interior del tanque donde se encuentra el agua residual. Por consiguiente, los discos quedan expuestos alternativamente al agua y al aire. Cuando la superficie del disco se encuentra en contacto con el aire, la biomasa adherida al mismo toma el oxígeno necesario para que durante el período de inmersión se produzca la degradación de la materia.

LAGUNAS: Las lagunas anaerobias necesitan ausencia de oxígeno, por lo que la ventilación no tiene sentido. Las lagunas facultativas necesitan oxígeno en su estrato superior y ausencia de oxígeno en el estrato inferior. El estrato superior dispone de oxígeno directamente del aire y de la fotosíntesis que se realiza en estas capas superiores de las lagunas. Las dos fuentes de oxígeno en estas lagunas son la actividad fotosintéticas de las algas y la reaireación a través de la superficie.

ESCORRENTÍA: La oxigenación del suelo se produce gracias a la actividad de las plantas, éstas toman el oxígeno atmosférico a través de sus hojas y lo liberan por las raíces.

FILTRO VERDE: la aireación del suelo sólo es posible dividiendo el terreno en subparcelas, y rotando el riego, permitiendo así la aireación del suelo.

4. RECOGIDA DEL AGUA

LECHOS BACTERIANOS. La recogida de agua residual tratada se efectúa por medio de un dispositivo de drenaje en el fondo del lecho bacteriano. Este sistema contará con un sistema de canales de recogida, con la característica fundamental de que no deben existir sedimentaciones, ya que el agua residual lleva flóculos que sedimentarán en el decantador secundario. Para ello la pendiente será del 1% o 2%, y la sección no irá nunca llena, ya que deberá servir también como canal de aireación. Una recomendación de diseño marca que, la zona de salida al falso fondo de agua y aire, sea el 15 ó 20% de la superficie total del filtro.

LECHOS DE TURBA: El influente tras su paso por las diferentes capas, es recogido en unos canales o tuberías de drenaje, desde donde se recoge a la arqueta de salida.

BIODISCOS: El agua residual se encuentra en un reactor donde se produce la depuración, el efluente sale del tanque por el lado opuesto al de entrada, y después del tiempo de residencia suficiente para conseguir una buena decantación de la biopelícula desprendida.

LAGUNAS: el agua pasa de una laguna a otra a través de canales o tuberías que pueden estar cubiertos o no, normalmente en el lado opuesto al de entrada.

FILTRO VERDE: el agua pasa a través del terreno, y como es un sistema abierto, no existe ningún tipo de recogida. El efluente percola a través del terreno una vez depurado.

ESCORRENTÍA: el agua residual una vez depurada se recoge en una arqueta de salida en la cola del canal.

DISEÑO EXPERIMENTAL

De las 261 de plantas de tratamiento de aguas residuales de tecnologías no convencionales que hay en Andalucía, se han tratado datos de unas 29 plantas, así como a la planta Experimental CTT de Tetuán(Marruecos).

De cada una de las plantas tenemos registros durante períodos de tiempo diferentes, e incluso en la misma planta hay huecos en los registros, por lo que se han encontrado cierta dificultad a la hora de tratar los datos. Pero aún en condiciones no ideales se ha sido posible estudiar los datos disponibles de forma coherente y obteniéndose resultados consistentes.

Sin embargo, se observa la necesidad de obtener más datos experimentales y con mayor continuidad para aumentar la exactitud de los resultados expuestos, para mejorar el diseño, el mantenimiento y la aplicabilidad de cada tipo de proceso.

LAGUNAJE ANAEROBIO

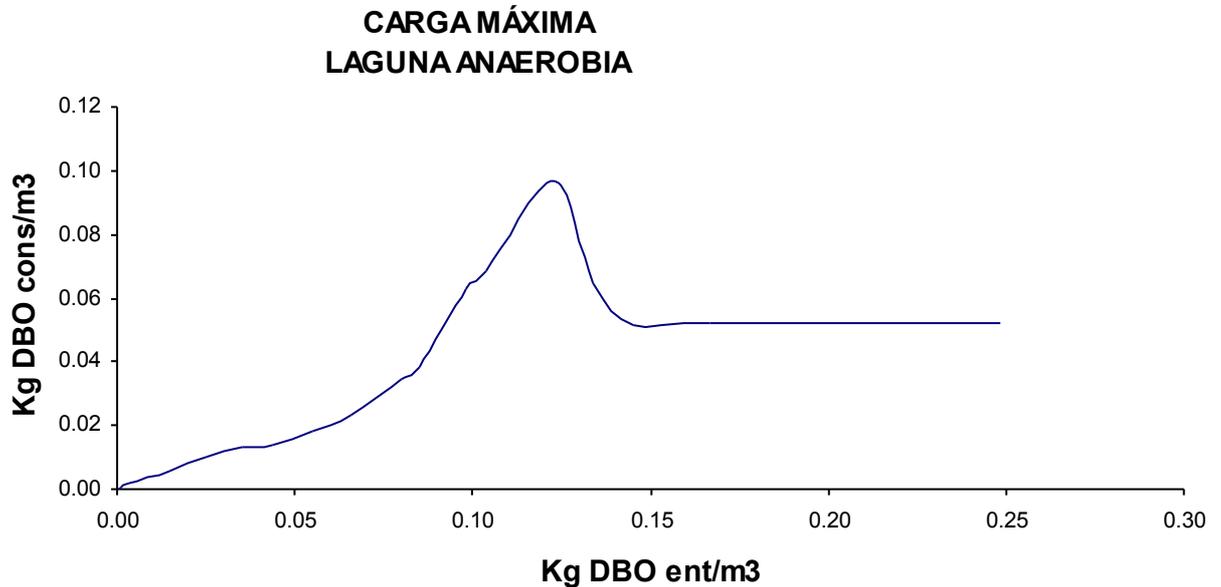
La depuración en medio anaerobio una vez asegurada una profundidad mínima, es independiente de los fenómenos de superficie (reaireación, fotosíntesis), por lo que los procedimientos de diseño estarán basados en la carga volumétrica ($\text{DBO}_5/\text{m}^3/\text{día}$).

La importancia de conseguir condiciones anaerobias en las lagunas anaerobias nos lleva a elegir como unidad de tratamiento el volumen útil (m^3), para referir los datos de las distintas plantas de estudio.

Las gráficas de carga máxima y caudal crítico que mostramos a continuación han sido construidas con los datos recogidos de las siguientes plantas depuradoras, durante los períodos y frecuencia señalados:

	PERÍODO MUESTREO	FRECUENCIA
CARRIÓN	30/08/99 a 1/07/01	Semanal
CTT	30/04/97 a 23/07/97	Semanal
EL GASTOR	14/05/96 a 9/09/97	Mensual
FUENTE DE PIEDRA	8/06/94 a 20/12/95	Mensual
ZAHARA DE LA SIERRA	21/05/96 a 9/09/97	Mensual
CUEVAS BAJAS	24/05/96 a 22/12/97	Mensual
LOS GALLARDOS	28/09/95 a 29/10/96	Mensual
ZURGENA	14/05/96 a 9/09/97	Mensual

DETERMINACIÓN DE LA CARGA MÁXIMA ORGÁNICA:



Como se puede observar en la gráfica de carga máxima al mismo tiempo que va aumentando la carga de entrada aumenta la materia orgánica consumida hasta un máximo de un 80 %. A partir de una carga contaminante de entrada de 0.13 kg DBO₅/m³ deja de aumentar el porcentaje de depuración, disminuyendo rápidamente hasta un 35 % donde se mantiene estable.

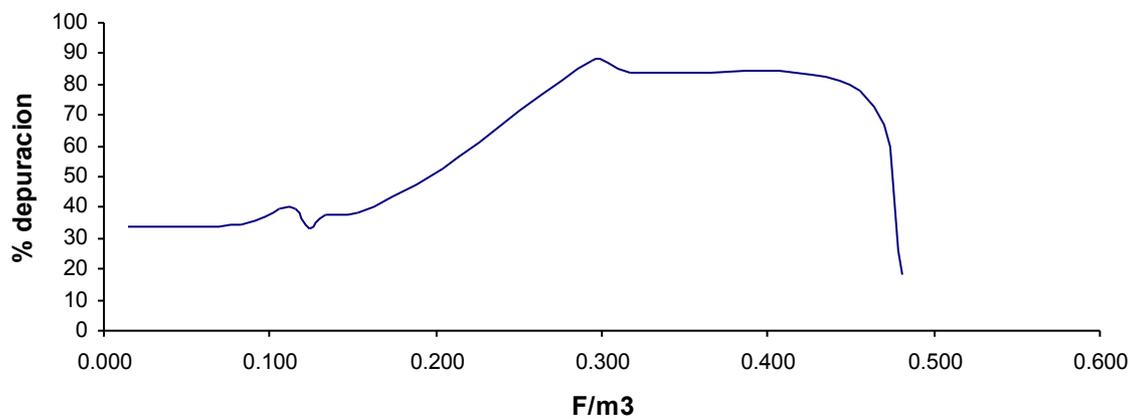
Para explicar este fenómeno, se estima que una vez que se llega a la saturación del sistema por carga máxima la laguna cesa su función biológica y comienza una actuación meramente decantadora, explicación de la línea horizontal que aparece en la gráfica.

Generalmente la laguna anaerobia se combina con otras tecnologías actuando de tratamiento primario para disminuir la carga contaminante de entrada en el secundario. En este caso un porcentaje de depuración del 35 % sería suficiente, siempre que no se llegue al caudal crítico que provocaría el lavado del sistema. Dicho caudal crítico se supera, como se ve en la gráfica de caudal, con un punto crítico al partir del cual se disminuye sensiblemente el rendimiento del decantador-digestor.

En el caso del uso de la laguna anaerobia como sistema único es recomendable trabajar con cargas próximas a 0,123 Kg DBO₅/m³ para obtener máximos porcentajes de depuración (aprox. 78%).

DETERMINACIÓN DEL CAUDAL MÁXIMO:

CAUDAL CRÍTICO LAGUNA ANAEROBIA



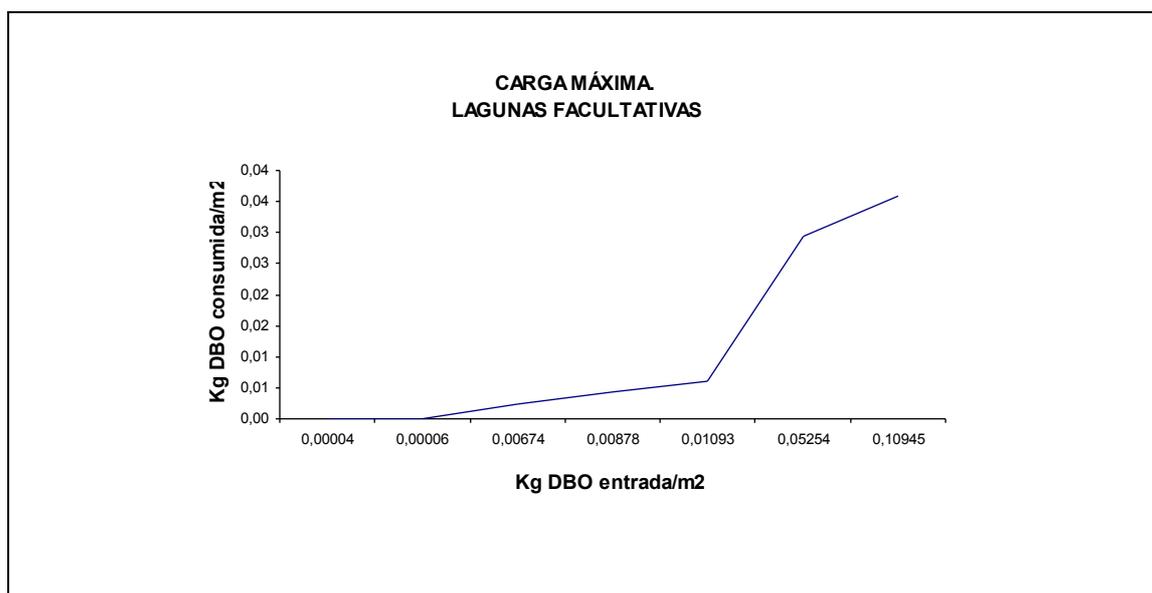
LAGUNAJE FACULTATIVO

Las dos fuentes de oxígeno en las lagunas facultativas son la actividad fotosintética de las algas y la reaireación a través la superficie.

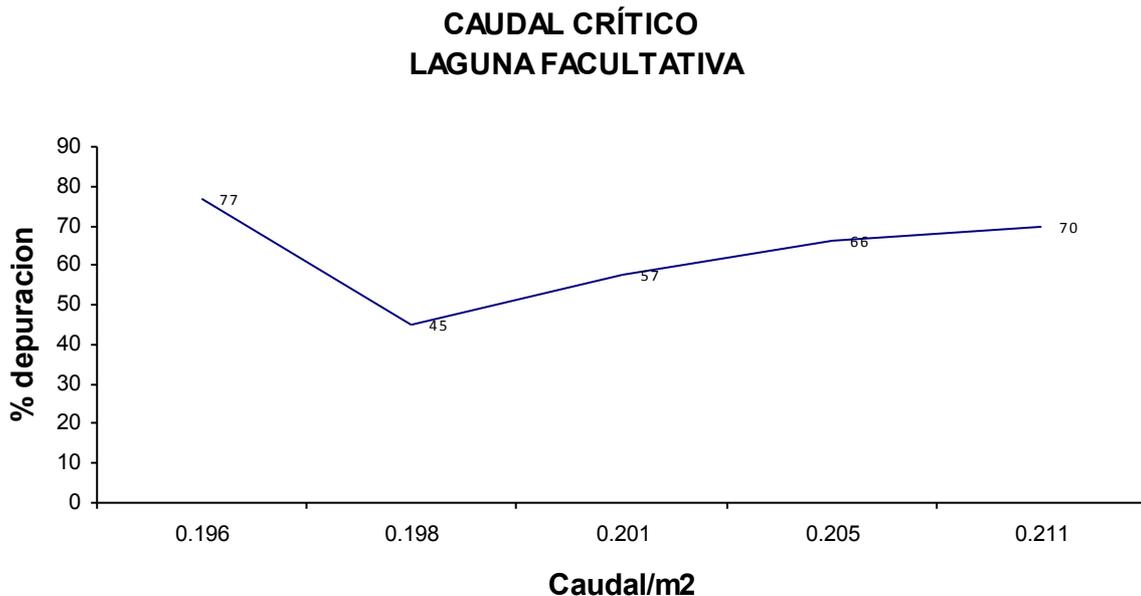
Debido a la importancia de estos dos factores, definimos como unidad de tratamiento el m² de superficie, unidad a la que referimos los datos de estudio.

Con los datos recogidos se han construido las gráficas de carga máxima y caudal crítico, que a continuación se acompañan, la procedencia de los datos y su periodicidad vienen recogidos en la siguiente tabla:

	PERÍODO MUESTREO	FRECUENCIA
FUENTE DE PIEDRA	8/06/94 a 20/12/95	Mensual
ZURGENA	3/08/95 a 28/10/96	Mensual
CTT	30/04/97 a 23/07/97	Semanal



De la observación de este gráfico se deduce que no se ha llegado al punto crítico de carga máxima, se necesitarían más datos para poder determinar la carga de entrada a la que comienza a disminuir el valor de DBO consumida.



Esta representación gráfica nos muestra claramente el comportamiento de las distintas bacterias que intervienen en la depuración en una laguna facultativa. Podemos observar que en principio actúan las bacterias aerobias que degradan la materia rápidamente ya que existe en el medio oxígeno en abundancia y la carga de entrada es pequeña, a medida que aumenta la carga de entrada y va disminuyendo la cantidad de oxígeno por el consumo de las bacterias comienzan a trabajar peor, lo que justifica el carácter decreciente de la gráfica en el primer tramo.

En ese punto crítico comienzan a trabajar las anaerobias que producen CO_2 hacia la superficie favoreciendo la fotosíntesis de las algas, éstas producen O_2 , lo que provoca la actuación de las bacterias aerobias de nuevo.

GRACIAS A LA ACCIÓN CONJUNTA DE AEROBIAS Y ANAEROBIAS SE PRODUCE UN AUMENTO DEL PORCENTAJE DE DEPURACIÓN QUE EXPLICA LA PENDIENTE POSITIVA DEL SEGUNDO TRAMO DE LA GRÁFICA.

LECHOS DE TURBA

Como posible unidad de diseño se ha tomado la denominada carga contaminante máxima por unidad de superficie de lecho de turba, Kg DBO₅ entrada/m², y el denominado caudal crítico, F/m², (m³/m²)

Debido a la importancia de la interacción entre la turba y el agua residual tomamos como unidad de tratamiento la superficie del lecho (m²).

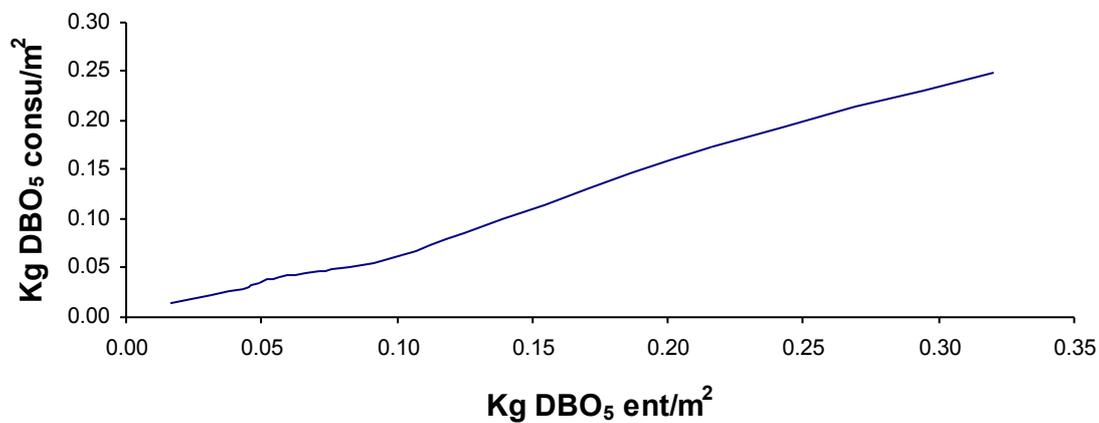
CARGA CONTAMINANTE MÁXIMA

Se ha tomado como datos de partida, Kg de DBO₅ de entrada y salida, obteniéndose Kg de DBO₅ consumida y se han referenciado a la unidad de superficie (m²) tomada, representándose frente a los kg DBO₅/m² de entrada

Al utilizar en el tratamiento de datos parámetros unitarios de diseño (kg DBO₅/m²), se pueden comparar los valores obtenidos en las siguientes estaciones obteniéndose sus gráficos correspondientes.

	PERÍODO DE MUESTREO	FRECUENCIA
TORRE ALHAQUIME	15/06/94 a 29/08/95	Mensual
CUEVAS BAJAS	24/05/96 a 22/12/97	Mensual
EL BOSQUE	28/09/95 a 29/10/96	Mensual
LOS GALLARDOS	4/08/95 a 29/10/96	Mensual
GRAZALEMA	•/05/97 a •/03/98	Mensual
SETENIL	•/12/97 a •/03/98	Mensual
VILLALUENGA DELROSARIO	8/05/97 a 4/03/98	Mensual

CARGA MAXIMA LECHO TURBA



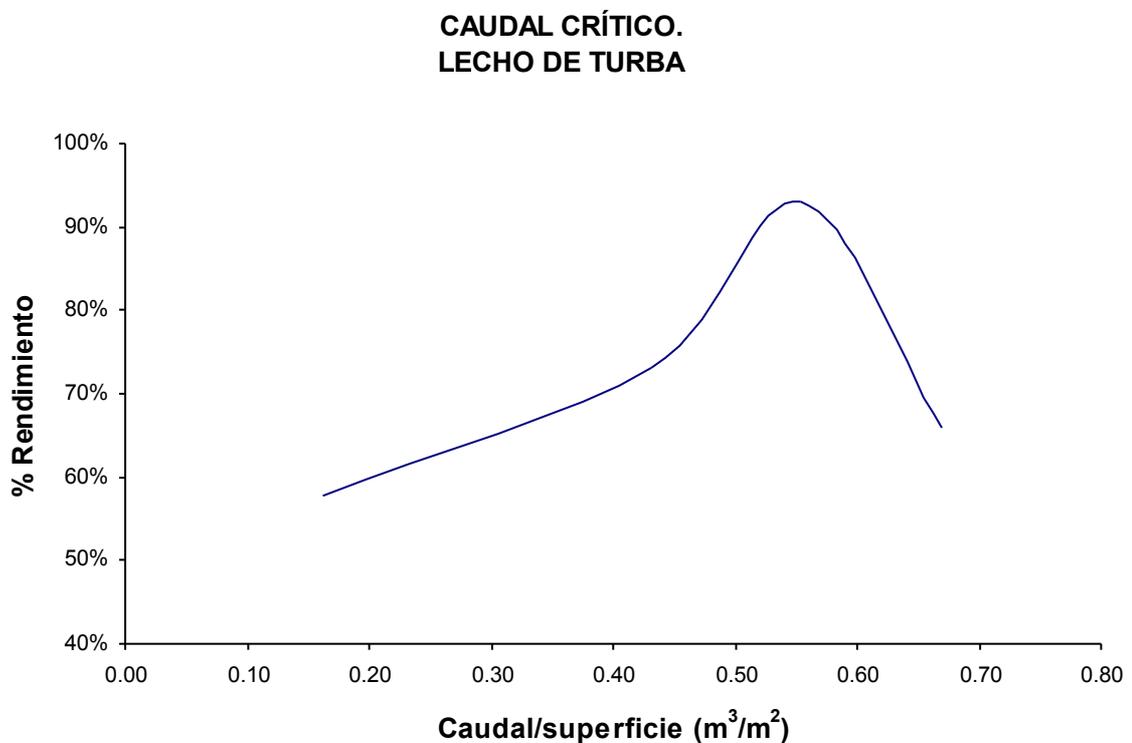
En la gráfica se puede observar como al ir aumentando la carga contaminante que va entrando en la planta, va aumentando progresivamente la carga consumida por el lecho de turba, no se puede apreciar la carga máxima que es capaz de absorber el sistema.

Se necesitaría mayor número de datos para poder continuar el diseño de la curva y obtener la carga contaminante por superficie (m²) máxima u óptima que este tipo de sistema es capaz de digerir.

CAUDAL CRÍTICO

Otro parámetro interesante de estudio, en cuanto a rendimiento del lecho de turba es el denominado caudal crítico (m^3/m^2), el volumen de agua máximo/ m^2 que podemos añadir a un sistema de lecho de turba atendiendo al rendimiento esperado.

En la siguiente gráfica obtenida al representar el caudal máximo a aportar frente al rendimiento en carga contaminante, se puede observar:



Aparece un máximo de rendimiento para un caudal de aproximadamente $0.55 \text{ m}^3/\text{m}^2$, a partir de ese punto aunque aumentemos la cantidad de agua en el lecho por unidad de superficie no aumenta el % de depuración, incluso baja el rendimiento por saturación del sustrato o colmatación de su capacidad de percolar agua.

El parámetro de dimensionamiento, sería la superficie necesaria de lecho de turba en función del caudal por unidad de superficie que le esta entrando a la planta.

$$\text{Superficie necesaria} = \frac{\text{Caudal a tratar}(\text{m}^3)}{F_{\text{operación}} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{m}^2} \right)} + \% \text{Rotación}$$

%Rotación = Depende del número de lechos que trabajen (recomendamos n° par para facilitar la labor del operario).

Considerando que serían como muy aceptables rendimientos alrededor del 80 % en depuración, el margen de actuación sería con cargas que puedan variar de 0.45 a 0.65 m³/m².

El dato de caudal máximo obtenido de 0.55 m³/m², corresponde con una media de carga máxima de 0.28 kgDBO₅e/m², para este valor la gráfica de carga máxima no ha llegado a saturación, lo que parece indicar que el lecho de turba ha llegado a colmatar su capacidad de filtración pero no su capacidad de depuración de agua .

LECHOS BACTERIANOS

En el diseño de lechos bacterianos juega un papel importante el material de soporte de las bacterias encargadas de la depuración así como el volumen de relleno, por lo que elegiremos como unidad de tratamiento a la que referimos los datos de las plantas de estudio el producto Superficie específica (m^2/m^3) x Volumen de relleno (m^3).

Para la realización de los cálculos experimentales hemos partido de los datos obtenidos en las siguientes estaciones depuradoras durante los períodos señalados:

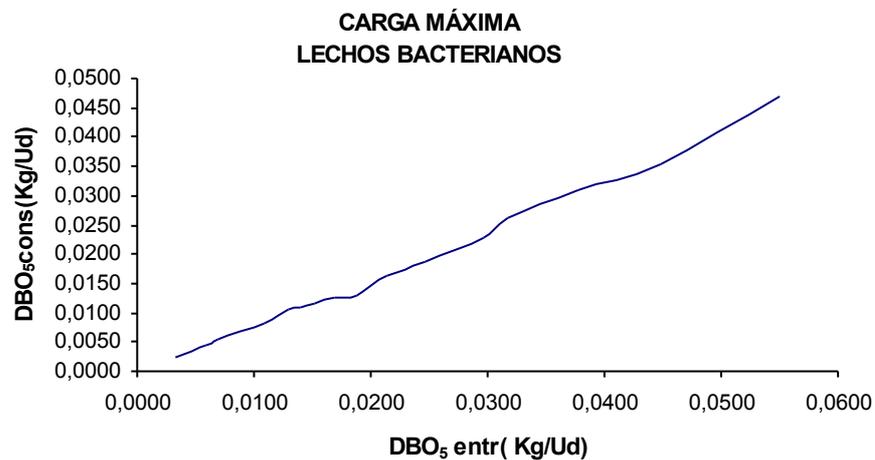
	PERÍODO DE MUESTREO	FRECUENCIA
CARRIÓN	30/08/99 a 1/07/01	Semanal
EL GASTOR	14/05/96 a 9/09/97	Mensual
ZAHARA DE LA SIERRA	21/05/96 a 9/09/97	Mensual

Con las siguientes representaciones gráficas se pretende estimar el comportamiento del sistema Lecho Bacteriano:

Ante diferentes cargas de DBO_5 .

Ante diferentes caudales de entrada a tratar.

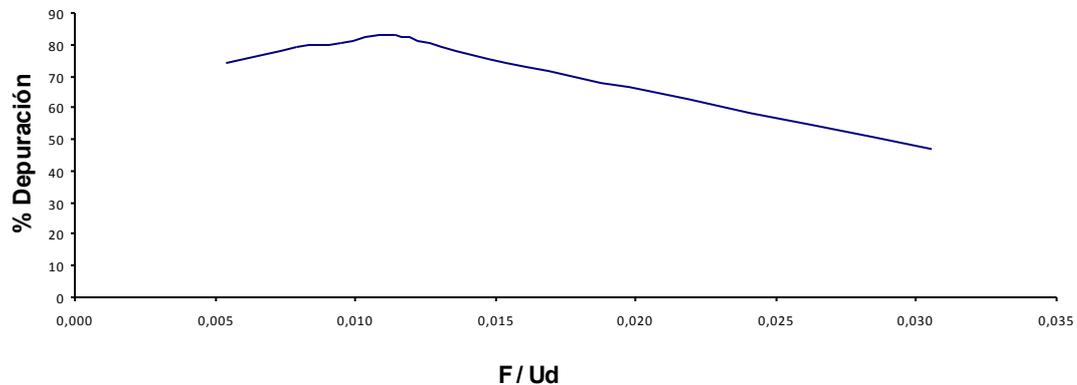
RESULTADOS DEL ESTUDIO DE DATOS:



Mediante la observación gráfica del comportamiento del sistema lecho bacteriano podemos decir que este sistema responde bastante bien a un intervalo amplio de cargas de entrada. De los valores experimentales que disponemos no hemos llegado a determinar la relación DBO cons./ DBO ent. a la que el sistema disminuye su rendimiento.

En la realización del seguimiento del lecho bacteriano en las plantas en las que hemos basado el estudio no se llegaron a utilizar efluentes con contenidos en carga orgánica superiores a los presentados, no pudiendo mostrar el rango de valores de DBO₅ ent para el que el sistema deja de dar buenos rendimientos.

CAUDAL CRÍTICO LECHOS BACTERIANOS



Es importante la información que nos da la gráfica del comportamiento del lecho ya que se puede observar que a medida que vamos aumentando la relación F/Ud el rendimiento del sistema aumenta hasta llegado a un punto crítico de entrada de caudal a partir del cual el rendimiento del sistema disminuye.

De esta gráfica podemos obtener el F óptimo.

Podemos observar que este sistema posee mucha inercia debido a la biomasa pegada a las piezas soporte, esto hace que tarde más en lavarse el sistema.

BIODISCOS

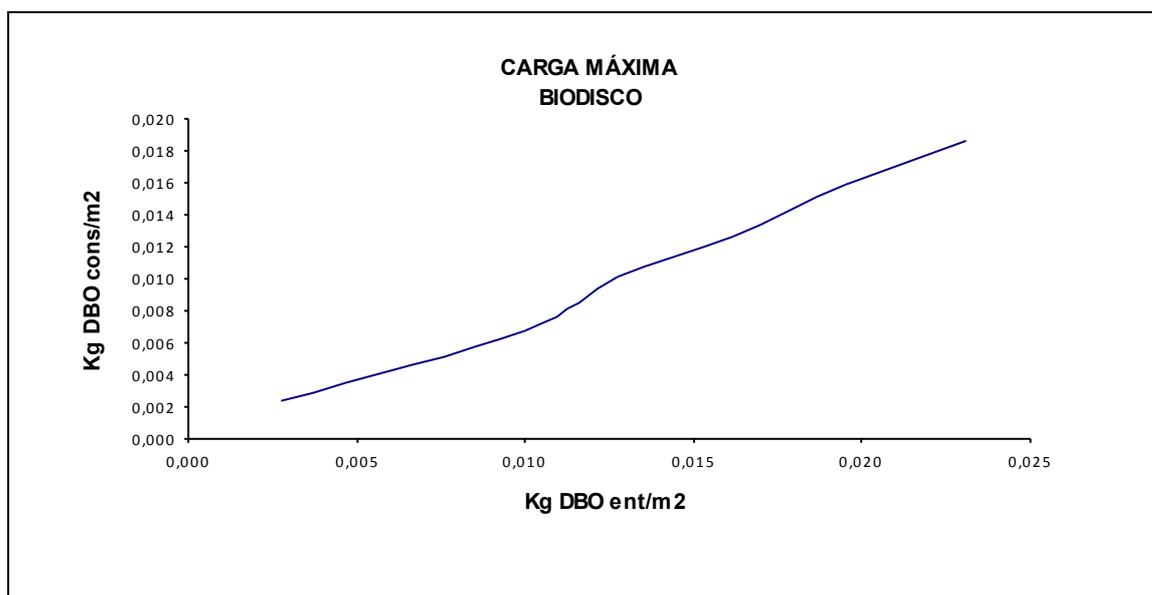
El buen funcionamiento de los biodiscos está directamente relacionado con la formación de la biopelícula sobre la superficie de los discos.

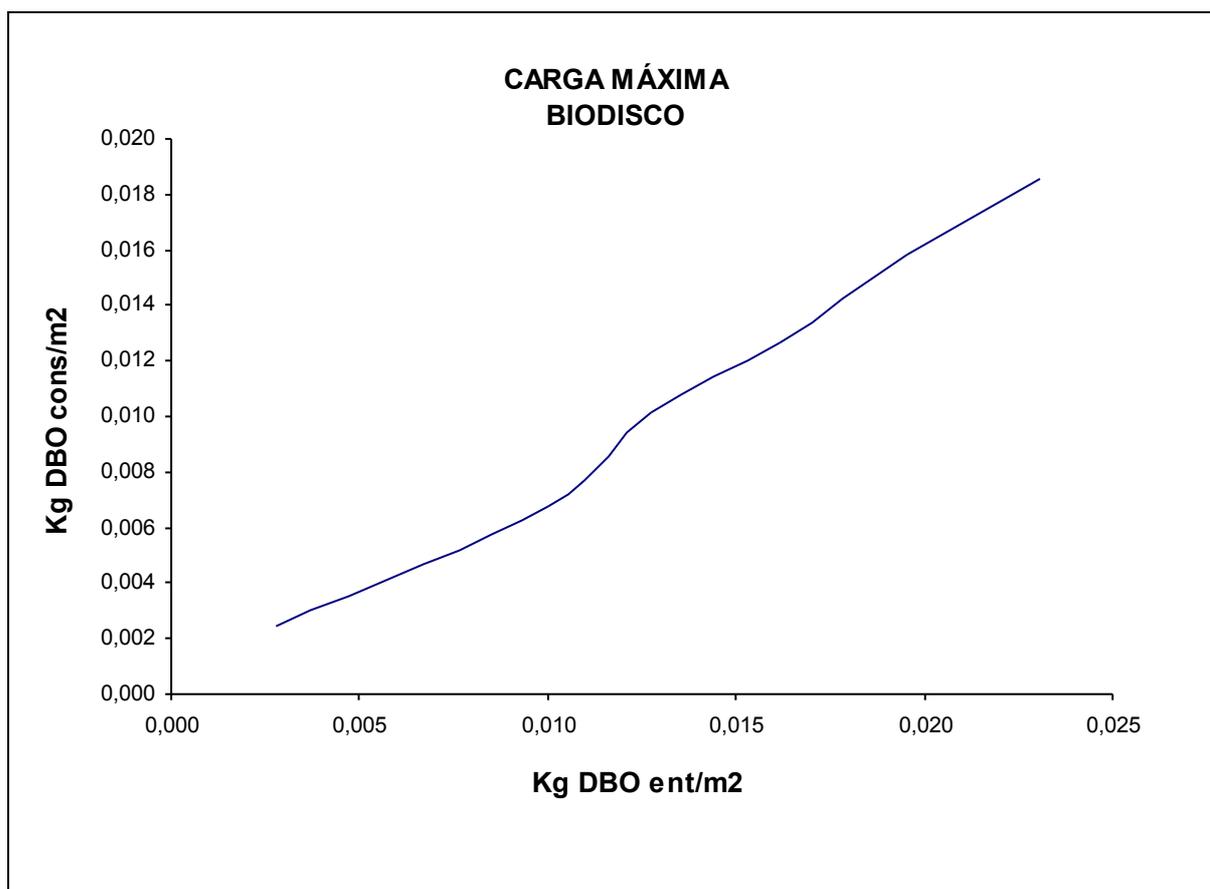
La película de biomasa bacteriana emplea la materia orgánica soluble presente en el agua residual como sustrato para su metabolismo.

Debido a la importancia de la superficie disponible para la formación de la biomasa tomamos como unidad de tratamiento el m² de superficie de disco.

Los datos para la obtención de estos gráficos se recogen en la siguiente tabla:

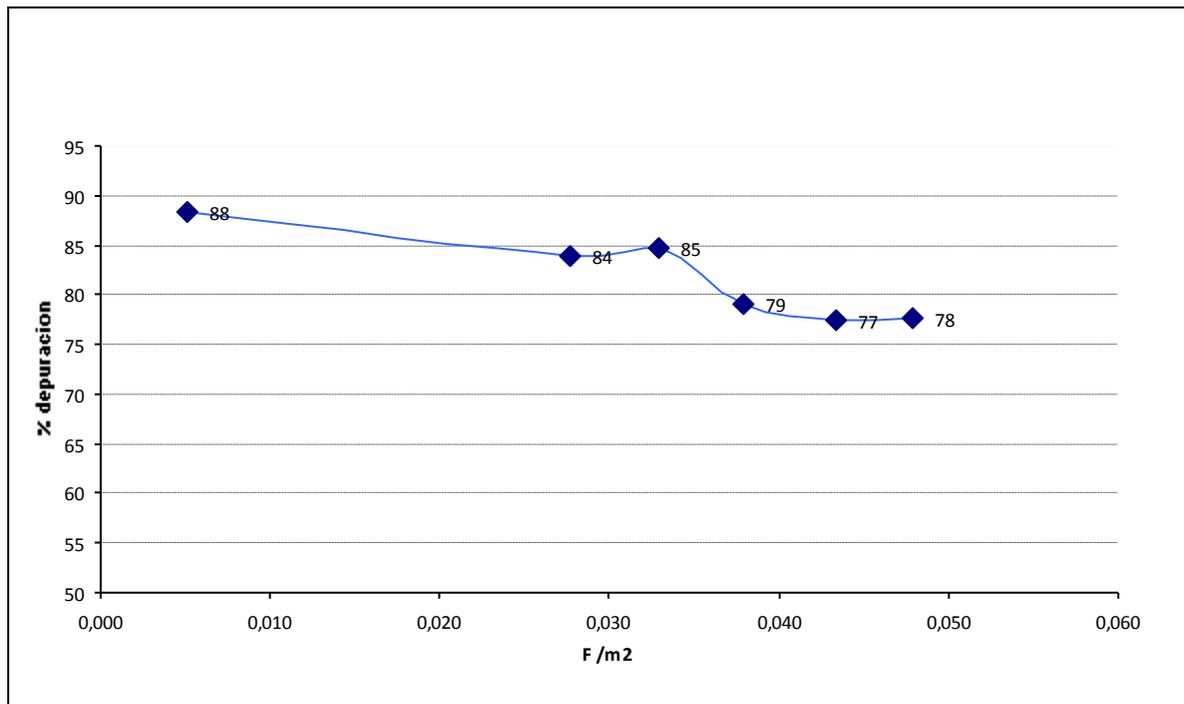
	PERÍODO DE MUESTREO	FRECUENCIA
CARRIÓN	8/08/99 a 1/07/01	Semanal
CTT	7/05/01 a 13/07/01	Mensual
PEDROCHE	28/09/94 a 20/11/95	Mensual





Según esta gráfica deducimos que el incremento de la carga de DBO/m² de la entrada es proporcional a la carga de DBO/m² consumida, y por tanto a mayor carga de DBO de entrada mayor será la carga de DBO consumida.

Sin embargo no hemos llegado a la carga máxima esperada por falta de datos analíticos, para ello se necesita un mayor seguimiento de las tres plantas citadas y de otras plantas que dispongan de biodisco como sistema de depuración de aguas residuales.



La figura representa la variación del caudal (F) por unidad de tratamiento(m²) en función del porcentaje de depuración.

En la grafica observamos que:

A mayor caudal menor porcentaje de depuración, pero esto no es significativo puesto que la diferencia entre el máximo % de depuración y el mínimo es del 10%, por lo tanto no se puede deducir que hemos llegado al caudal critico. Si queremos llegar a este punto crítico necesitamos realizar el seguimiento del sistema de biodisco para valores de caudal superiores a los estudiados.

FILTROS VERDES

Las dos características fundamentales para dimensionar la superficie de riego con aguas residuales son la determinación del consumo de agua y el balance de nutrientes del cultivo implantado.

Elegimos como unidad de tratamiento la superficie en m² de terreno ocupado por el chopo.

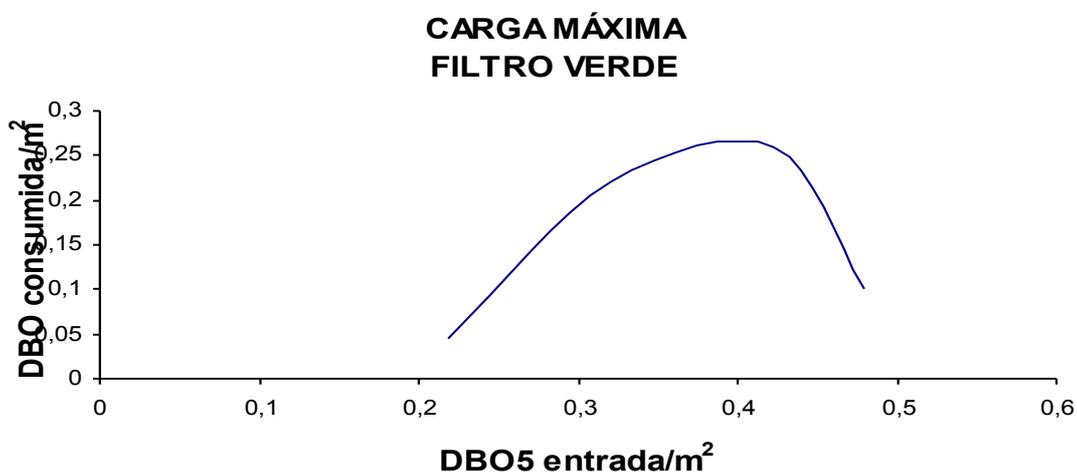
Hemos analizado los valores obtenidos por la planta experimental del Centro de Transferencia de Tecnología de Tetuán.

La especie arbórea implantada es el clon I-214 del *Populus euroamericana*, (*P. deltoides* **P nigra*). Se trata de un chopo hembra de buen enraizamiento y espléndido crecimiento, que produce una madera apta para la industria del desarrollo.

Con los datos evaluados del **Centro de Transferencia de Tecnología** se ha podido obtener magnitudes de diseño que nos indican la capacidad real de rendimiento en aquel caso concreto. No podemos extrapolar este gráfico a cualquier situación ya que en el diseño de Filtros Verdes intervienen variables externas muy importantes a tener en cuenta a la hora de asegurar un correcto funcionamiento de nuestra tecnología.

La superficie ocupada por el Filtro Verde en esta estación experimental es de 7500 m², suficiente para una capacidad de tratamiento de 150 habitantes equivalentes.

Obtenemos con dichos datos la siguiente gráfica:



Podemos observar que a medida que va aumentando la carga biodegradable del agua residual (mg/l DBO entrada) que va entrando en el terreno, va aumentando el rendimiento en depuración hasta llegar a un punto máximo en el que aumentar la carga no significa un aumento de rendimiento, sino que se produce una disminución.

Esta disminución del rendimiento puede ser debida a que la carga de entrada excede a la que el terreno es capaz de asimilar, provocada por una disminución de oxigenación (condición de anaerobiosis).

El punto de máximo rendimiento denominado Carga máxima efectiva alcanza un valor del 65%.

CIRCULACIÓN SUPERFICIAL EN LÁMINA O ESCORRENTÍA SUPERFICIAL

La unidad de diseño elegida es el m^2 de superficie plantada.

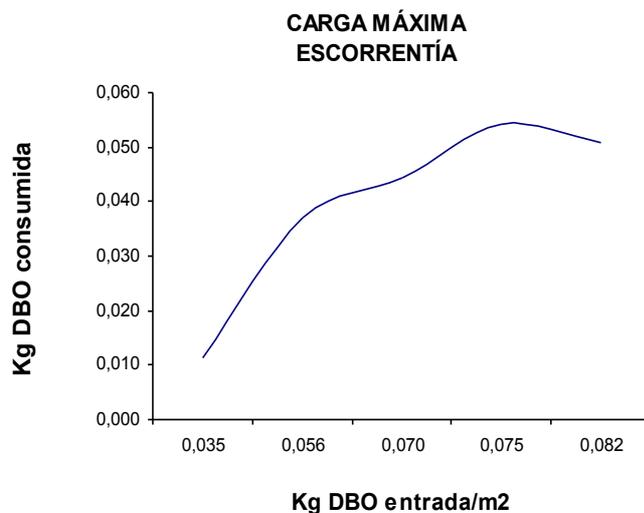
Al igual que en el caso de Filtros Verdes hemos contado con los datos experimentales de la planta del Centro de Transferencia de Tecnología.

El sistema está constituido de un canal impermeabilizado de 80 m de longitud y de 1,2 m de ancho, dotado de una pendiente que favorece la circulación del agua a depurar.

En los primeros 40 m del canal están plantados carrizos (*Phragmites australis*) sobre grava y arena, y en los 80 m restantes la especie aneas (*Typha angustifolia*) sobre gravas.

El sistema está elaborado para una capacidad de 50 habitantes equivalentes, y alimentado por un Tanque Imhoff que es un sistema de depuración basado en la degradación bacteriana anaerobia.

Con los datos recogidos semanalmente por el CTT hemos diseñado la gráfica de carga máxima que nos indica el rendimiento obtenido por la tecnología bajo las condiciones de diseño antes mencionadas.



Como podemos observar a medida que va aumentando la carga biodegradable del agua residual ($\text{Kg DBO}_5 \text{ entrada/m}^2$) por unidad de tratamiento va aumentando el rendimiento hasta llegar a un tope en el que parece que comienza a disminuir. Necesitaríamos más datos experimentales para determinar con exactitud el valor de carga de entrada para la que el sistema se satura.

INTERPRETACIÓN DE LAS GRÁFICAS.

La combinación de las gráficas antes presentadas para cada tecnología son una buena herramienta para obtener información sobre el diseño de los equipos. En efecto, para un sistema de tratamiento, las gráficas nos presentan un punto crítico de fallo por exceso de caudal y por exceso de carga orgánica respectivamente. En primer lugar hemos de visualizar la causa por la que falla el sistema, es decir, ver si el sistema se satura antes por caudal o por carga. Para poder comparar las gráficas es necesario obtener en primer lugar el valor de caudal a que corresponde el valor de carga máxima y una vez obtenido introducirlo en la gráfica de caudales ver en ella, a que punto corresponde. Pueden darse dos casos.

- Que este punto esté situado antes del caudal crítico por lo que el sistema fallará antes por exceso de carga que por caudal. La gráfica de carga máxima será nuestra base de diseño.
- Que este punto esté situado después del punto crítico de caudal lo que nos indica que fallará antes por exceso caudal que por carga. La gráfica de caudal máximo será la base de diseño.

EL PLANTEAMIENTO PARA REALIZAR EL DISEÑO SERÁ EL SIGUIENTE:

1. SATURACIÓN DE CARGA. SABIENDO EL VALOR DE DBO5 ENTRADA (KG/DÍA):

$$\frac{(\text{DBO}_5 \text{ MAX} (\frac{\text{Kg}}{\text{Ud}}) \cdot 0.8}{|\text{DBO}_5|_{\text{ENTRADA}}} = \frac{F_{\text{OPTIMO}}}{\text{Ud}}$$

Para un caudal diario de entrada tendremos:

$$\frac{F_{\text{DIARIO}}}{F_{\text{OPTIMO}}} = \text{UNIDAD DE TRATAMIENTO}$$

2. SATURACIÓN DE CAUDAL. CONOCIENDO F_{DIARIO} (M^3/DIA):

$$\frac{F_{\text{DIARIO}}}{F_{\text{OPTIMO}}} = \text{UNIDAD DE TRATAMIENTO}$$

UNIDADES DE TRATAMIENTO	
LECHOS BACTERIANOS	$\frac{\text{SUPERFICIE ESPECÍFICA MATERIAL SOPORTE (m}^2 / \text{m}^3)}{\text{VOLUMEN DE RELLENO (m}^3)} = (\text{m}^2)$
LECHOS DE TURBA	SUPERFICIE DE TURBA (m ²)
BIODISCOS Y CONTACTORES	SUPERFICIE DE DISCO Y CONTACTOR (m ²)
LAGUNAS	SUPERFICIE DE LAGUNA (m ²)
FILTRO VERDE	SUPERFICIE DE TERRENO PLANTADO (m ²)
ESCORRENTÍA	SUPERFICIE DEL CARRIL DE PLANTAS (m ²)

