

DEPURACION DE AGUAS RESIDUALES CON UN REACTOR BIOPELICULA

Este artículo describe un estudio realizado sobre la eliminación biológica simultánea de carbono y nitrógeno utilizando una biopelícula de población mixta desarrollada en un reactor biopelícula de soporte permeable (RBSP) a escala de laboratorio. El medio soporte de la biopelícula lo constituyó una membrana de politetrafluoretileno (PTFE) o teflón) hidrófoba permeable a gases. A través del soporte se alimentó oxígeno puro a la biopelícula en contracorriente con los sustratos disueltos aportados desde el agua residual. Los rendimientos máximos en eliminación de carbono y nitrógeno alcanzaron 94% y 46%, respectivamente. La biopelícula alcanzó grandes espesores: entre 1 y 3,5 mm, así como altas densidades: entre 87 y 105 kg/m³.

J.A. JACOME

Becario de FPI del MEC
E. EGUIA y T. VIDART
Profesores Titulares de la
Escuela Superior de la Marina
Civil. Universidad de Cantabria
J.I. TEJERO
Catedrático de la E.T.S.I.C.C.P.
Universidad de Cantabria

1. INTRODUCCION

Los sistemas biopelícula para la depuración de las aguas residuales son la base de procesos muy conocidos y de amplia utilización como los biodiscos, lechos bacterianos, biofiltros, etc. Un sistema biopelícula está constituido por cuatro compartimentos [8]; el soporte, la biopelícula, el seno del agua y un espacio gaseoso (Fig. 1).

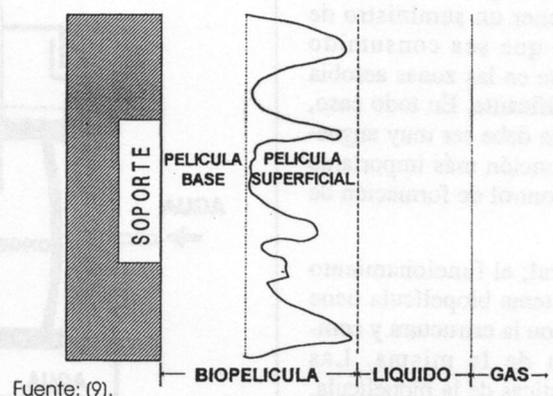
El soporte suele ser de un material rígido, a través del cual no existe flujo de materiales. La biopelícula es una matriz constituida por células microbianas y material extracelular, embebida por el agua residual. El transporte de materiales en la biopelícula se realiza por difusión molecular. El agua residual es la que lleva en sí los contaminantes que serán degradados por la biopelícula, siendo necesario

que aquéllos sean transportados hacia ésta.

Los mecanismos de este transporte pueden ser: turbulento y/o difusivo.

El espacio gaseoso o atmósfera del sistema, en el caso de un mecanismo aerobio de depuración, está constituido por aire u oxígeno que se transfiere al agua, y posteriormente desde ésta a la biopelícula. Los fundamentos y mecanismos de los fenómenos de transporte y transferencia de materiales, aun-

Fig. 1. El sistema biopelícula con sus 4 compartimentos.



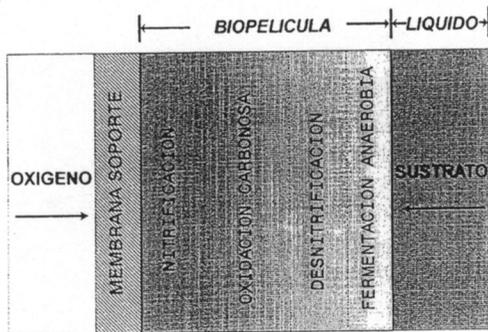
que desempeñan un papel trascendental, no nos ocupan en este caso.

Aquí describimos el comportamiento de una biopelícula de población mixta, desarrollada sobre un soporte permeable a gases, efectuando eliminación simultánea de carbono y nitrógeno. En biopelículas del tipo más general, el oxígeno y sustratos van desde el seno del agua hacia la biopelícula, y en ésta debido a gradientes de concentración difunden hacia el soporte. Las reacciones bioquímicas que se producen en el interior de la biopelícula mantienen o generan los gradientes de concentración de sustratos. En nuestro caso, el oxígeno se insufla a través del soporte: en contraccorriente con los sustratos. Es importante que el oxígeno sea consumido totalmente en la biopelícula, pues el agua en la medida de lo posible debe tener concentración nula de oxígeno disuelto. Este peculiar sistema biopelícula permite que en el interior de la zona de reacción (biopelícula) se disponga de condiciones ambientales oxidoreductoras. Así en las proximidades del soporte se tendría una zona aerobia (nitrificante y de oxidación carbonosa), y cerca de la superficie de la biopelícula en contacto con el agua una anóxica o anaerobia (desnitrificante y de fermentación anaerobia) (Fig. 2). Los nitratos producidos en la zona de oxidación difundirían en dirección hacia el seno líquido, encontrando a su paso una zona anóxica con fuente de carbono produciéndose una desnitrificación.

La zona anaerobia se puede llegar a formar por lo difícil que es mantener un suministro de carbono que sea consumido totalmente en las zonas aerobia y desnitrificante. En todo caso, esta franja debe ser muy angosta y su función más importante sería el control de formación de fangos.

En general, el funcionamiento de un sistema biopelícula tiene que ver con la estructura y composición de la misma. Las características de la biopelícula, como densidad y espesor, aun-

Fig.2. El sistema biopelícula con soporte de membrana.



Fuente: (7).

que suelen considerarse constantes de cara sobre todo a modelación del sistema, no son tales. Se ha visto que la densidad de una biopelícula en las zonas profundas de ella (próximas al soporte) llega a ser 4 a 7 veces más alta que en las secciones superficiales [11].

2. MATERIALES Y METODOS

2.1. AGUA RESIDUAL AFLUENTE

Como afluente del proceso se empleó agua residual sintética, con las siguientes características [5]:

- Fuente de carbono: 200 mg/l de glucosa.
- Fuente de nitrógeno: 63 mg/l de CIN_4 .
- Fuente de fósforo: 139 mg/l de PO_4HN_2 ; 67 mg/l de $\text{PO}_4\text{H}_2\text{K}$.

- Oligoelementos: 2,5 mg/l de $\text{SO}_4\text{Mg} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; 2,5 mg/l de $\text{SO}_4\text{Mn} \cdot \text{H}_2\text{O}$; 1,5 mg/l de Cl_2Ca ; 150 $\mu\text{g/l}$ de $\text{Cl}_3\text{Fe} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.

El afluente con las características anotadas se obtenía al diluir, con agua potable declorada, una solución madre 20-30 veces más concentrada (4.000 a 6.000 mg/l de glucosa). El sistema de alimentación estuvo constituido por una bomba peristáltica ($Q_{\text{máx}} = 0,06$ l/h) y otra de membrana ($Q_{\text{máx}} = 6$ l/h) que transportaban la solución madre y el agua de dilución, respectivamente.

2.2. REACTOR BIOPELICULA DE SOPORTE PERMEABLE

El RBSP (Fig. 3) se construyó con metacrilato de 5 mm de espesor. El volumen útil del reactor fue de 10,7 l. El soporte permeable lo constituyó una membrana hidrófoba de politetrafluoretileno (PTFE o teflón) con poro de $2\mu\text{m}$, y con punto de burbuja entre 0,8 a 0,9 bar. La superficie útil de soporte fue 628,32 cm^2 . Las membranas se montaron entre dos marcos unidos herméticamente formando así el conjunto marcos-membranas un paralelepípedo hueco a cuyo interior se insufló el oxígeno a una presión entre 0,1 a 0,35 bar.

2.3. PUESTA EN MARCHA DEL RBSP

La puesta en marcha del RBSP se realizó con un ensayo para determinar el tipo de flujo. Como trazador se utilizó CIN_4 ; se observó que el flujo era de mezcla completa.

La siembra del reactor se hizo con licor mezcla obtenido de la unidad de aireación prolongada de la depuradora de aguas residuales de la fábrica Nestlé S.A. (Cantabria), que trata los desechos líquidos ocasionados por la elaboración de alimentos (lácteos y derivados del cacao principalmente). Estos fangos activos contenían 5.000 mg/l de sólidos volátiles totales. A los microorganismos, durante su siembra y adaptación, se les aportó oxígeno y sustrato. Se prolongó durante tres días la

Fig.3. Esquema del Reactor Biopelícula de Soporte Permeable (RBSP).

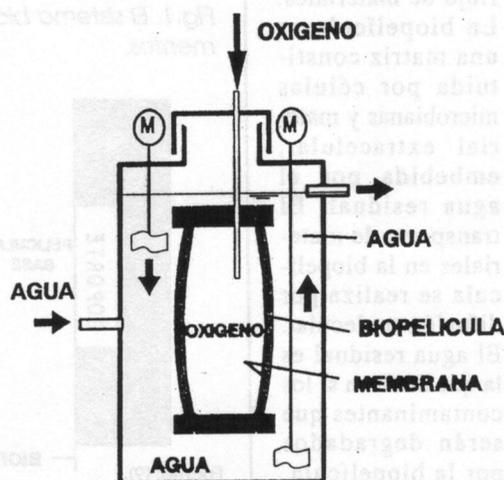
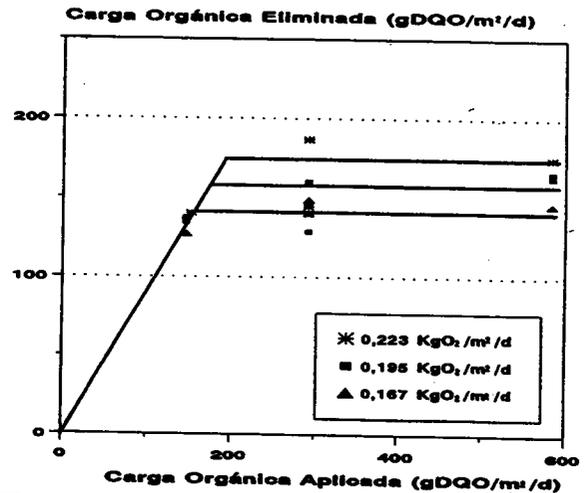
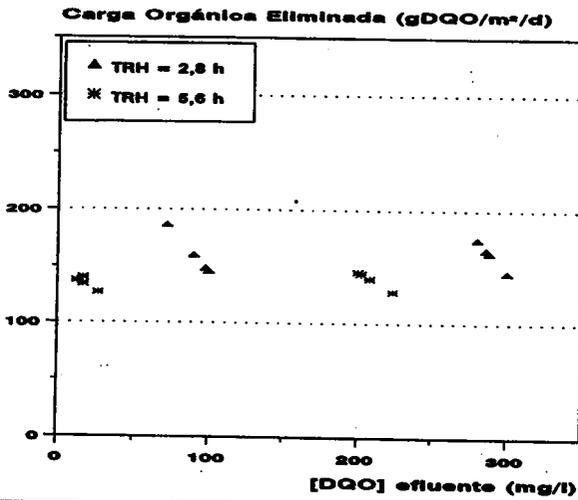


Fig.4. Cinética de eliminación de materia orgánica carbonosa (glucosa)

Fig.5. Influencia del flujo límite de oxígeno sobre la oxidación de la glucosa.



siembra, obteniéndose al cabo una película de 40 μm de espesor. Concluida la inoculación, se vació el reactor, se rellenó el RBSP con el agua residual a tratar y arrancó el primer experimento. Cada experimento duraba el tiempo necesario para alcanzar el estado estacionario.

Como parámetros de control de proceso se midió: alcalinidad, DQO, DBO_5 , N-NO_2 , N-NO_3 , y sólidos suspendidos según las técnicas analíticas 403, 508B, 507, 419, 418 y, 209C del Standard Methods (1985), respectivamente y; N-NH_3 , según el método del Indofenol de Rodier (1989). Para las medidas rutinarias de pH, temperatura y oxígeno disuelto se emplearon sonda y electrodo.

El desarrollo de la biopelícula se observó midiendo y estimando su espesor, acumulación y densidad. Para medir el espesor se utilizaron dos técnicas: de microscopía óptica [3] y gravimétrica [2]. Los valores de espesor obtenidos mediante ambos métodos guardaron buena aproximación.

3. RESULTADOS Y DISCUSION

3.1. ELIMINACION DE MATERIA ORGANICA CARBONOSA

Para un rango de concentración de DQO efluente de 10 a 300 mg/l, el proceso funcionó con una veloci-

dad de reacción aproximadamente de orden cero (Fig. 4). En consecuencia, la calidad del efluente se vio afectada directamente por la concentración de DQO en el afluente.

La carga media eliminada de carbono en términos de DQO rondó los 150 $\text{g/m}^2/\text{d}$. En todo caso, este análisis cinético realizado en base a la DQO en el seno del agua (efluente por ser proceso de mezcla completa) es útil de cara a evaluar variables operacionales de diseño a escala de laboratorio, pues, desde un estricto punto de vista como el que se utiliza en la ingeniería de las reacciones químicas la "verdadera" unidad de reacción lo constituye el compartimento biopelícula del sis-

Fig.6. Cinética de eliminación de nitrógeno total.

Fig.7. Relación entre carga orgánica aplicada y espesor de biopelícula.

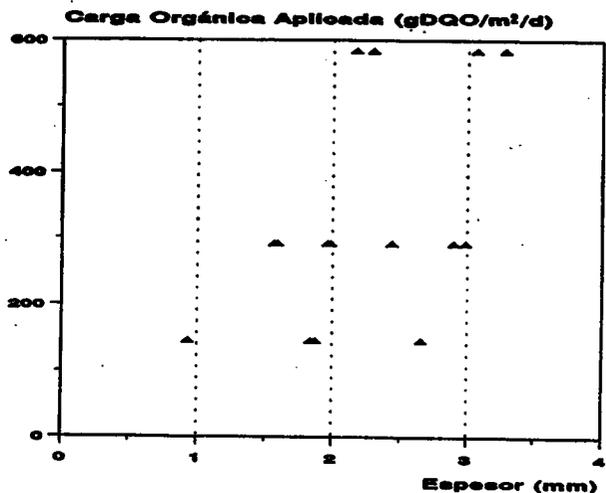
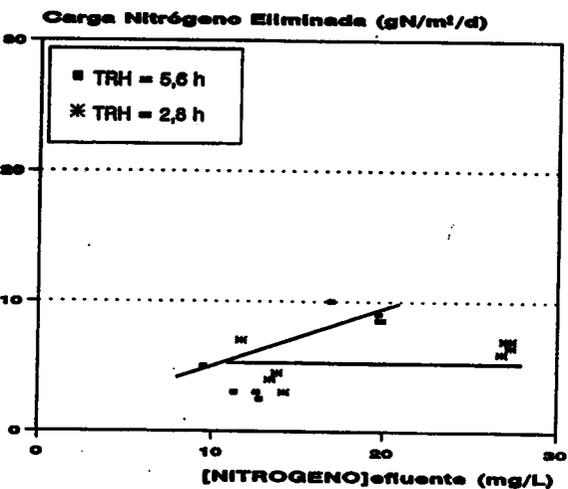


Fig.8. Influencia del espesor sobre la cinética de eliminación de glucosa.

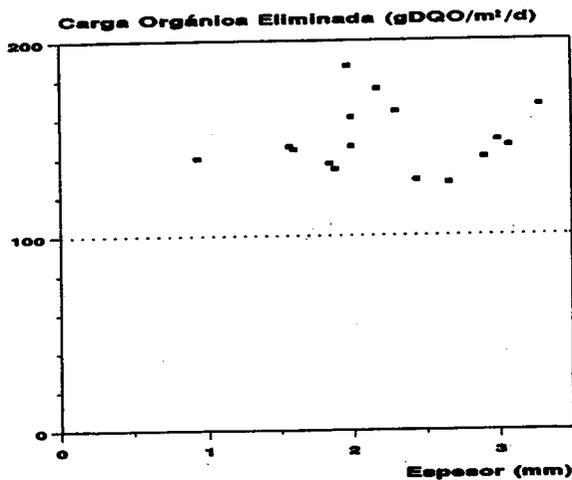
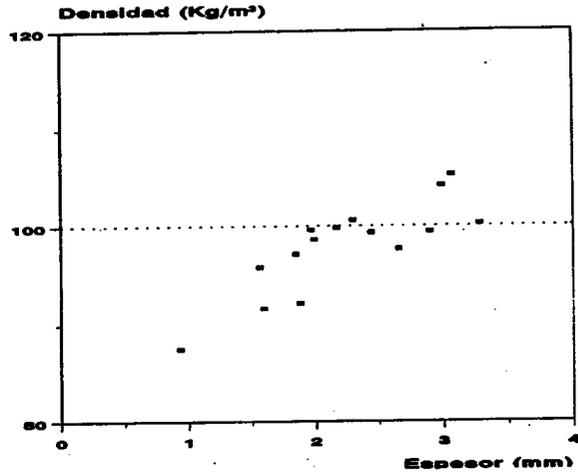


Fig.9. Relación observada entre espesor y densidad de biopelícula.



tema. La Motta (1974) observó que la cinética de reacción en un sistema biopelícula es de orden intrínseco cero. Determinar el orden intrínseco de reacción en una biopelícula implica que el sistema funcione en régimen controlado por la reacción (régimen cinético): no deben existir o ser mínimas las barreras al transporte externo de sustrato. Estas biopelículas en régimen cinético fueron definidas posteriormente como totalmente penetradas [2].

El flujo límite de oxígeno suministrado (flujo de oxígeno máximo alimentado al proceso) tiene una ligera influencia sobre el rendimiento del proceso (Fig. 5). Se observa que a mayor flujo de oxígeno para una misma carga aplicada la velocidad de eliminación de DQO aumenta. No obstante, a medida que la carga orgánica aplicada se hace muy alta (584 gDQO/m²/d) el aumento en eliminación de DQO es de un 20%, mientras que el flujo límite de oxígeno incrementa en un 34%. Incluso para la carga aplicada de 150 gDQO/m²/d, el aumento del flujo límite suministrado de oxígeno no genera un mayor rendimiento en eliminación de carbono, explicable si pensamos que bajo esta condición de carga el sistema funcionó estequiométricamente con el menor flujo de oxígeno (167 gO₂/m²/d).

Por el oxígeno debió establecerse una competencia entre especies autotrofas y heterotrofas. Observaciones al microscopio y sondeos

con microelectrodos muestran que las biopelículas son elevadamente heterogéneas en distribución de especies y en concentraciones químicas, tanto a lo largo del espesor como a través de un plano horizontal de la misma [10].

3.2. ELIMINACION DE NITROGENO

El nitrógeno fue aportado al proceso en forma de radical amonio. El amonio pasa por un proceso de oxidación a nitrato, seguido de una desnitrificación. El TRH parece afectar en alguna medida a la cinética de eliminación global de nitrógeno (Fig. 6). Con TRH tan bajos como 2,8 h la cinética es independiente de la concentración de nitrógeno total en el seno del agua: orden cero. Con TRH de 5,6 h la velocidad de transformación está en función de la concentración de nitrógeno total.

3.3. CARACTERISTICAS DE LA BIOPELICULA

La biopelícula a lo largo de la experimentación tuvo apariencia homogénea y muy compacta. El espesor alcanzó valores entre 1 y 3,4 mm. El espesor no siguió una relación determinada con la carga orgánica aplicada (Fig. 7).

Como puede verse los rangos de espesores alcanzados para cada carga se superponen. En principio, esto es atribuible a que el plan experimental no exigía que primero se hicieran todos los experimentos con la carga menor y una vez

acabados éstos se experimentara con el siguiente valor superior, y así sucesivamente. Por tanto, ocurrió que algún ensayo con cierta carga empezara después de haberse efectuado otro con una mayor carga aplicada, y en consecuencia disponía de una biopelícula desarrollada con un cierto espesor.

Sobre la cinética de eliminación de materia orgánica tampoco se ve una clara influencia del espesor (Fig. 8). Se da el caso que para un mismo espesor, 2 mm, se alcanzan distintas velocidades de consumo de DQO con una notable diferencia entre ellas: 50 gDQO/m²/d.

Grady (1983) realizó una excelente revisión sobre modelación de biopelícula que incluyó la influencia del espesor de biopelícula sobre la velocidad de consumo. Encontró que hasta espesores de 70 a 100 µm, la cinética de consumo es función directa del espesor, pero que a partir de esos valores se torna independiente. Se definió como el espesor activo aquel para el cual se alcanzaba la velocidad máxima de consumo. Trulear y Characklis (1982) observaron un fenómeno similar, pero también vieron que el espesor activo aumentaba si a su vez lo hacía la concentración de sustrato en el seno del agua.

La biopelícula fue siempre muy densa: entre 87 y 105 kg/m³. La densidad suele estar entre 25 y 45 kg/m³; se informó sobre valores hasta de 147 kg/m³ [11]. La relación entre densidad y espesor es característica de los sistemas bio-

película (Fig. 9), tras de una fase en que la densidad aumenta a la par del espesor, se llega a una meseta en la que un incremento del espesor no tiene mayor influencia sobre el valor de la densidad.

4. CONCLUSIONES

El RBSP explotado para la eliminación biológica conjunta de carbono y nitrógeno de las aguas residuales ha demostrado ser un proceso viable, destacándose bajo las condiciones de operación a que fue sometido que:

La cinética de eliminación de carbono resultó de orden cero respecto de su concentración en el seno del agua residual.

El flujo máximo de nitrógeno eliminado parece quedar influido por el tiempo de retención hidráulica.

Puede lograrse efectuar oxidación carbonosa, nitrificación y desnitrificación, agrupando estos procesos en un RBSP.

La biopelícula puede llegar a obtener simultáneamente un gran espesor y alta densidad garantizando así un buen tiempo de retención celular.

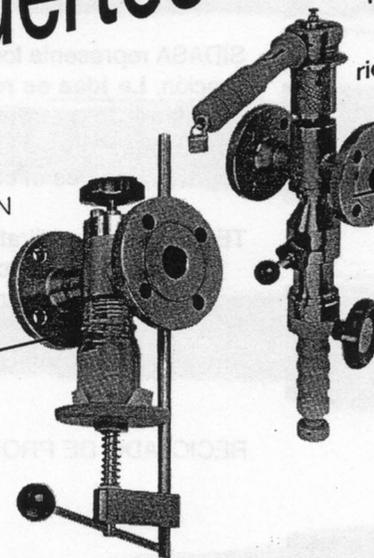
5. BIBLIOGRAFIA

- [1] La Motta E.J. External Mass Transfer in a Biological Film Reactor. *Biotech. Bioeng.* 18, pág. 1.359-1.370 (1974).
- [2] Williamson K. y McCarty P.L. A Model of Substrate Utilization by Bacterial Films. *J. WPCF*, 48, 1, pág. 9-24 (1976).
- [3] Trulear M. y Characklis W. Dynamics of Biofilm Processes. *J. WPCF*, 54, 9, pág. 1.228-1.301 (1982).
- [4] APHA-AWWA-WPCF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, EE.UU. (1985).
- [5] Grady C.P.L. Modeling of Biological Fixed Films. A State of the Art Review. En *Fixed-film Biological Processes for Wastewater Treatment*. Eds.: Y.C. Wu y E.D. Smith. Edit.: NDC, EE.UU. (1983).
- [6] Amieva J.J. Diseño de una planta piloto para depuración de aguas residuales por el sistema RBC. Tesina de Máster de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Universidad de Cantabria (1987).
- [7] Timberlake D.L., Strand S.E. y Williamson K.J. Combined Aerobic Heterotrophic Oxidation, Nitrification and Denitrification in a Permeable Support Biofilm. *Wat. Res.*, 22, 12, pág. 1.513-1.517 (1988).
- [8] Rodier J. Análisis de las aguas. Edit.: OMEGA. Barcelona (1989).
- [9] Characklis W.G. Biofilms: A Basis for an Interdisciplinary Approach. En *BIOFILMS*. Eds.: W.G. Characklis and K.C. Marshall. Edit. John Wiley & Sons (1990).
- [10] Eguía E. Desarrollo de la biopelícula en medio soporte permeable. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria, Santander (1991).
- [11] Roé A. Presentation of the Center for Biofilm Engineering at Montana State University. *IAWQ Specialist Group on Biofilm Systems, Newsletter*, N° 2 (1983).
- [12] Zhang T.C. y Bishop P.L. Structure, Activity, and Composition of Biofilms. *First International Specialized Conference on Microorganisms in Activated Sludge and Biofilm Processes*. pág. 303-312. Septiembre, París (1993).



Valvula toma-muestras en continuo, libre de espacios muertos

PRISEMASSON
System 1000
Recogida de
muestras en
recipiente de
Laboratorio.



PRISEMASSON
System 2000
Recogida de
muestra en
Pistón Inyector
(Normas EPA)
eliminando
riesgo de fugas,
emisiones y
exposición
abierta del
producto.

MUESTRA LIMPIA,
SEGURA Y TOTALMENTE
REPRESENTATIVA
de sustancias
líquidas y gaseosas
en la propia tubería
de circulación.

PRISEMASSON

BIAR SA Chemical Engineering
CH-1948 Lourtier (VS), Tel. 026-38 15 33, Fax 026-38 14 57
Marketing Sales Hans Vock
CH-8335 Hittnau (ZH), Tel. 01-950 03 07, Fax 01-950 56 30

Representante exclusivo en España

RIERA NADEU, S.A.

Monturiol, 28-30, 08018 Barcelona
Tel. 307 53 01, Fax 307 53 02