



Editorial de la Universidad  
Tecnológica Nacional

**Gestión y Tratamiento de Agua Subterránea**  
Caso Planta Fraccionadora de Gas  
Polo Petroquímico Bahía Blanca

Seminario Agua

**Docente: Dr. Roberto Rodríguez**

Equipo de trabajo:

**Fiotto, Sebastián**  
**Gonta, Sebastián**  
**González, Mariana**  
**Torres, Noelia**

**Especialización y Maestría en Ingeniería Ambiental**  
**Facultad Regional Bahía Blanca**  
**Universidad Tecnológica Nacional - U.T.N.**

Año 2008

**Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional – U.T.N. - Argentina**  
**edUTecNe**  
<http://www.edutecne.utn.edu.ar>

## **TABLA DE CONTENIDOS**

<i>PRESENTACION</i> .....	2
<i>INTRODUCCIÓN</i> .....	3
<i>OBJETIVOS</i> .....	5
<i>DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA INDUSTRIAL</i> .....	6
<i>UTILIZACIÓN DEL RECURSO. CARACTERÍSTICAS.</i> .....	7
<i>PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA.</i> .....	9
<i>TRATAMIENTO DEL AGUA SUBTERRÁNEA</i> .....	9
<i>TRATAMIENTOS DE EFLUENTES</i> .....	11
<i>BIBLIOGRAFÍA</i> .....	29

## **PRESENTACION**

En el marco de carrera Especialización y Maestría en Ingeniería Ambiental se desarrolla el seminario Agua, siendo los objetivos particulares del mismo la caracterización del elemento agua, sus posibilidades de uso y los tratamientos aplicados de acuerdo a los límites de calidad físico químicos y microbiológicos.

Es objetivo de dicho seminario el desarrollo de un trabajo en el cual se aborde algunos de los problemas y/o tecnologías asociadas al uso del recurso.

Mediante este trabajo se pretende presentar al agua como un recurso de vital importancia en los procesos de una Planta Fraccionadora de Gas ubicada en la zona industrial de la ciudad de Bahía Blanca. Se abordarán las distintas fuentes de aprovisionamiento y usos, los tratamientos aplicados para volverla apta para su consumo humano e industrial, su aprovechamiento, monitoreos, y caracterización y tratamiento de los efluentes generados.

## **INTRODUCCIÓN**

### **El agua como un recurso que condiciona el Desarrollo Sustentable**

El agua es un elemento escaso y vulnerable, esencial para la vida y el progreso social. Probablemente es el único recurso natural que compromete la vida humana en todos sus aspectos. En consecuencia, la supervivencia de la humanidad depende en gran medida del uso prudente, armónico, eficiente y sustentable de los recursos hídricos del planeta.

La escasez de agua dulce a nivel mundial es un problema de dramática prioridad: el agua dulce representa un porcentaje limitadísimo del agua total del planeta, aproximadamente un 3%, del cual menos del 1% es accesible. El 97% restante es agua salada, no apropiada para la mayor parte de las actividades humanas. En la actualidad, cerca del 40% de la población mundial vive en zonas con escasez de agua.

Del total de la aguas del planeta:

97,6 % SON AGUAS SALADAS DE LOS OCEANOS  
1,9 % HIELOS POLARES  
0,5 % AGUA SUBTERRÁNEA  
0,0009 % AGUA DULCE DE LOS LAGOS, RIOS Y ARROYOS.

El agua debe ser utilizada para promover las metas económicas y sociales de desarrollo de un país pero de tal manera que no comprometa la sustentabilidad de ecosistemas vitales ni perjudique la capacidad de las futuras generación para satisfacer sus necesidades de agua.

El agua es un elemento trascendental para el desarrollo sostenible. El agua es un ingrediente primordial para facilitar la subsistencia rural, el cultivo de alimentos, la producción de energía, y para promover el crecimiento de los sectores industriales y de servicios y asegurar la integridad de los ecosistemas y los bienes y servicios que estos proporcionan.

El agua también nos plantea sus propios retos de desarrollo—inundaciones, sequías y enfermedades relacionadas con el agua pueden tener un gran impacto en las comunidades y, de hecho, en las economías nacionales.

### **Aguas Subterráneas**

Por su volumen, calidad química y disponibilidad, el agua subterránea constituye el recurso hídrico más importante del planeta para el abastecimiento humano.

En la zona de Bahía Blanca se pueden distinguir tres acuíferos principales:

- El Acuífero Profundo o Sistema Hidrotermal Profundo de Bahía Blanca (SHP)
- Acuífero Intermedio
- Acuífero Freático

### **Acuífero Profundo (SHP)**

Tiene una extensión continental de 3000 Km<sup>2</sup>. Se descubrió en Argerich en 1912. Se ubica en una profundidad de aproximadamente 650m.

Son aguas surgentes, termales con temperaturas entre los 50 y 60 °C y poseen muy buena calidad química.

Hasta fines de la década del 60, la ciudad se abastecía con agua de 25 perforaciones del SHP. Una vez inaugurado en 1978 el Dique Paso de las Piedras, en su gran mayoría fueron reemplazadas.

## **OBJETIVOS**

Se define como objetivo general del presente trabajo el estudio del sistema de gestión del recurso hídrico en una Planta Industrial del Polo Petroquímico Bahía Blanca.

Como objetivos particulares en el marco de dicho estudio se plantean:

- Identificar de los distintos usos, observando los parámetros límites asociados a los mismos,
- Caracterizar los efluentes líquidos, observando los puntos de generación y vertido de los mismos,
- Dar marco teórico respecto de los tratamientos utilizados,
- Relacionar el uso de las tecnologías aplicadas en el tratamiento de aguas vs. parámetros de calidad.

## **DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA INDUSTRIAL**

Esta Planta Industrial pertenece a una empresa dedicada al Transporte de Gas y sus derivados desde Tierra del Fuego y Neuquén hasta la Provincia de Buenos Aires. A través de gasoductos y plantas compresoras transporta el gas natural hasta llegar a la Planta ubicada en cercanías de la localidad de General Cerri.

Las operaciones realizadas son correspondientes a proceso, almacenaje, transporte y mantenimiento.

En la siguiente imagen puede observarse una vista aérea de la Planta:



## **UTILIZACIÓN DEL RECURSO. CARACTERÍSTICAS.**

Respecto del recurso hídrico, el mismo es utilizado para diversos usos, a saber:

- Agua potable.
- Uso industrial.
- Riego forestal.
- Otros.

La fuente de provisión de agua en Planta para los distintos procesos es de origen termal proveniente de dos pozos surgentes ubicados dentro del predio de la misma, denominados pozos surgentes N° 1 y N° 2 los cuales brotan desde una profundidad aproximada de 700 metros con una temperatura que oscila los 65 °C. Estos pozos no pueden ser bloqueados para regular su caudal.

Las características de los mismos son:

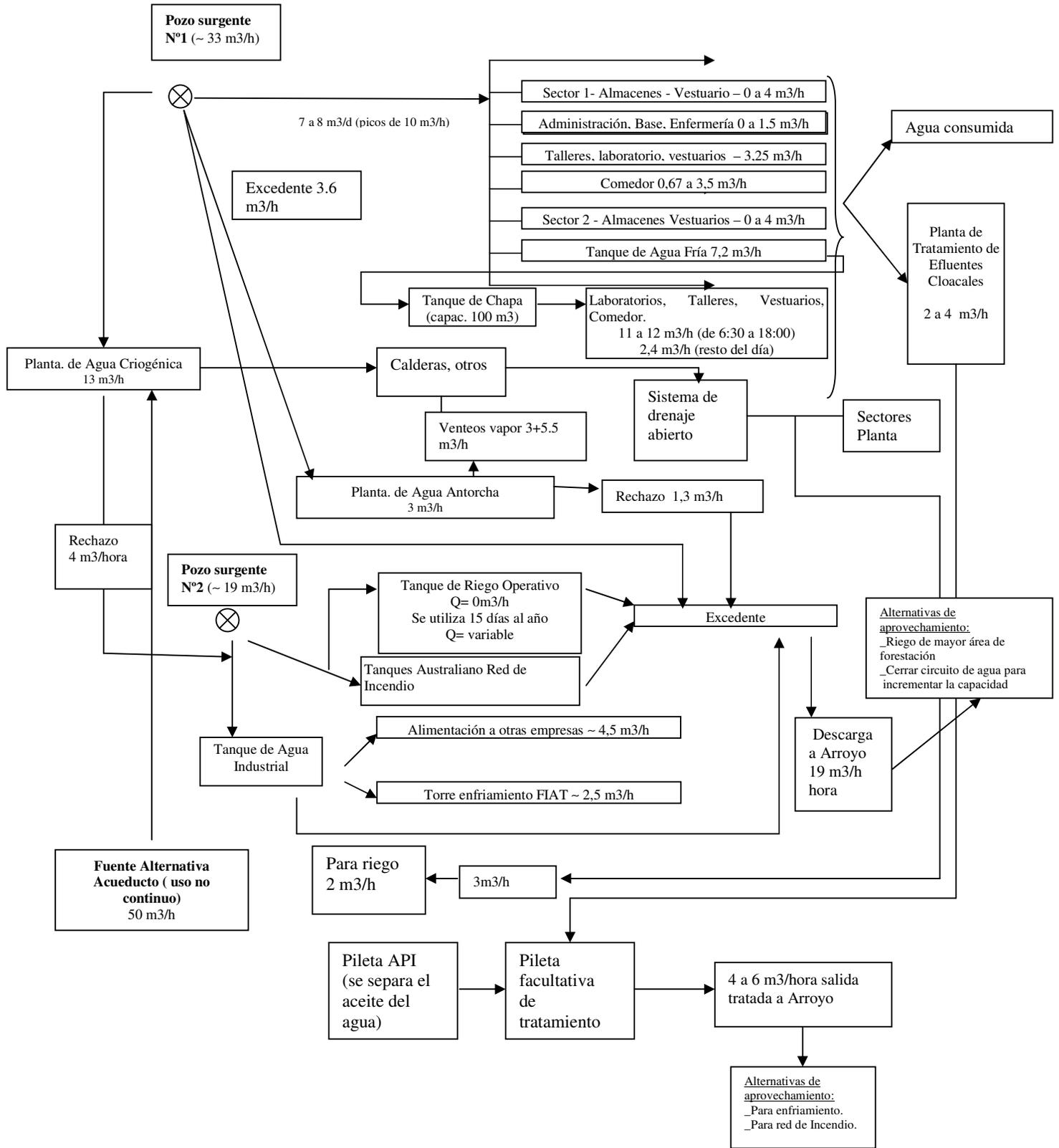
### *Pozo surgente 1:*

- Suministro de agua potable a la Planta y otras dos plantas menores que son privadas
- Suministro de agua industrial y riego operativo
- Suministro de agua a las plantas de osmosis inversa para el tratamiento de calderas y agua para el área de descarbonatación (reposición)
- Suministro de agua para la reserva de red de incendio
- Suministro de agua para riego árboles, césped, plantas
- Conductividad: 1400 microsiemens
- Caudal: 40 m<sup>3</sup>/h
- Sílice: 35 ppm

### *Pozo surgente 2:*

- Suministro de agua industrial y riego operativo
- Suministro de agua para la reserva de la red de incendio
- Suministro de agua para riego árboles, césped, plantas
- Conductividad: 900 microsiemens
- Caudal: 19 m<sup>3</sup>/h
- Sílice: 25 ppm

La ubicación de estos pozos y las distintas alternativas de aprovechamiento pueden observarse en el siguiente esquema:



## PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA.

A continuación se observan los parámetros de calidad del agua subterránea en comparación con el Artículo 982 del Código Alimentario Argentino:

PARAMETRO	LIMITE REQUERIDO	VALOR OBSERVADO
<b>Bacterias aerobias heterótrofas</b>	30 ufc/ml	< 10 ufc/ml
<b>Bacterias coliformes totales</b>	3 NMP/100 ml	< 3 NMP/100 ml
<b>Escherichia Coli</b>	ausencia en 100 ml	negativo
<b>Pseudomonas aeruginosa</b>	ausencia en 100 ml	negativo
<b>Cloro residual total</b>	0,2 mg/l	< 0,05 mg/l
<b>TDS</b>	1.500 mg/l	<b>3.948 mg/l</b>

## TRATAMIENTO DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Debido al alto contenido de TDS, este agua es sometida a un proceso de ósmosis inversa, se describen a continuación los fundamentos del mismo:

La ósmosis es un proceso natural. En un recipiente que contiene dos soluciones con los mismos constituyentes pero con distintas concentraciones separadas por una membrana semipermeable, es decir, que sólo permita la difusión a su través de uno de los constituyentes, como por ejemplo el agua, produce la difusión del agua desde el compartimento de mayor concentración al de menor aumentando su nivel. Al alcanzar el equilibrio la difusión del agua terminará. En este momento la presión generada por el aumento de nivel contrarresta el potencial que hace difundir el agua a través de la membrana.

Si la solución diluida fuera agua pura ( $C = 0$ ), a la diferencia de alturas que existiría entre ambos compartimentos cuando se alcanzase el equilibrio, se la llamaría "presión osmótica" de la solución concentrada.

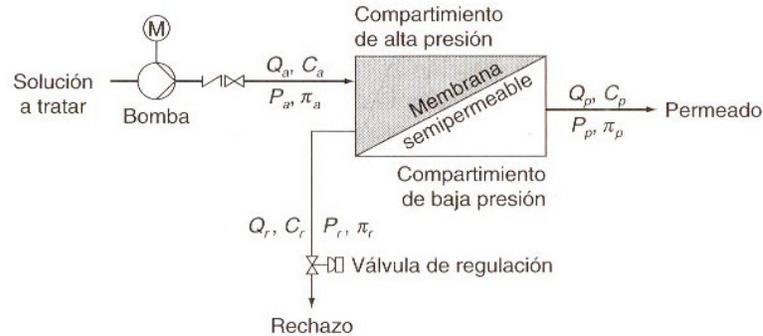
La presión osmótica de agua pura se considera nula por convenio.

Si se considera el mismo sistema anterior pero suponiendo que sobre el compartimento de la solución concentrada se ejerce una presión superior a la diferencia de presión osmótica, esta presión provocaría la difusión del agua hacia la solución más diluida. Este fenómeno es conocido con el nombre de "ósmosis inversa".

El proceso industrial consiste en una bomba que envía la solución a tratar a una presión superior a la osmótica hacia la membrana semipermeable. En uno de sus lados de la membrana la presión se mantiene alta, con lo que se fuerza al solvente a atravesar la membrana y junto con él lo hará una pequeña cantidad de soluto. Tanto la solución que atraviesa la membrana como la que es rechazada por ella se evacúan en continuo de sus

compartimentos. Una válvula de regulación situada en la tubería de rechazo controla el porcentaje de solución que es convertida en producto.

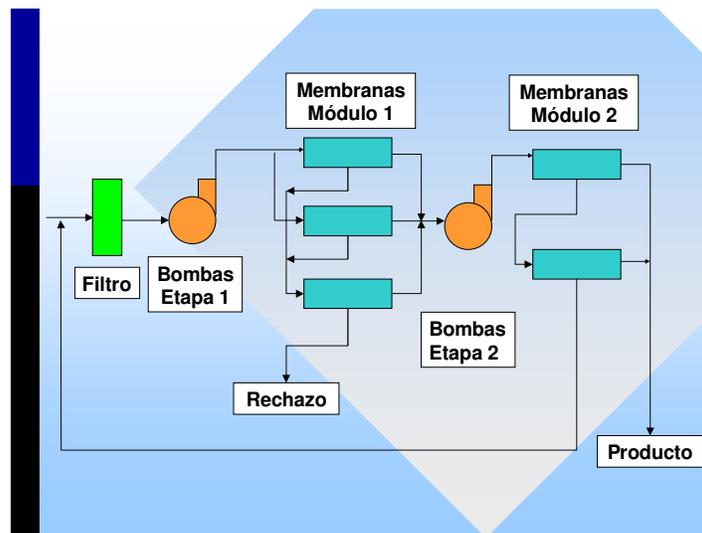
A continuación puede observarse un esquema del proceso industrial de la ósmosis inversa:



En el caso de esta Planta Industrial en particular, la misma cuenta con dos plantas de ósmosis inversa:

#### **Planta de Ósmosis Inversa de Planta de Proceso:**

Esta planta para su funcionamiento consta de un pre-tratamiento de filtrado, a través de filtros multimedia y de allí ingresa a la planta de osmosis inversa, cuyas características son las siguientes. Allí el tratamiento se realiza en dos etapas que pueden observarse en la siguiente figura:



- La primer etapa consta de tres tubos, de los cuales dos tubos se encuentran en paralelo y el tercero en serie con los anteriores.
- El producto de rechazo de la primera etapa se reutiliza en otras operaciones en la Planta.

- El producto de la primera etapa se alimenta a los dos tubos de la segunda etapa.
- El producto de la segunda etapa se almacena en tanques de reserva y se utiliza como agua de alimentación de calderas, reposición del agua del área descarbonatadora etc.
- El producto de rechazo de la segunda etapa, por su bajo contenido de sales se vuelve a reinyectar en la primera etapa.
- Datos de performance:
  - o Caudal de agua entrada 16 m<sup>3</sup>/h conductividad: 1400 microsiemens
  - o Caudal producto: 12 m<sup>3</sup>/h conductividad: <2 microsiemens
  - o Caudal rechazo 1° Etapa: 4 m<sup>3</sup>/h
  - o Membranas: TRISEP polyamida 8040-ACM-1-TSA
  - o Cantidad: 21

**Planta de Ósmosis Inversa de Antorcha:**

Esta planta consta de un pre-tratamiento de filtrado (filtros cartucho) y es de un solo paso con cinco tubos el producto obtenido se utiliza como agua de alimentación a la caldera pirotubular del sistema de antorchas sin humo.

- Datos de performance:
  - o Q agua de entrada 4.3 m<sup>3</sup>/h conductividad :1400 microsiemens
  - o Q producto: 3 m<sup>3</sup>/h conductividad: <60 microsiemens
  - o Q rechazo: 1.3 m<sup>3</sup>/h
  - o Membranas TRISEP (Dupont ACM tm) Mod: 4040-ACM4-TSF
  - o Diámetro 4" Tipo espiral

**TRATAMIENTOS DE EFLUENTES**

**Efluentes Cloacales**

La Planta de tratamiento de efluentes cloacales recibe todos los líquidos provenientes de sanitarios, comedores, etc. La Planta onsieste en un sistema de barros activados compuestos por una cámara de aireación y un sedimentador secundario. Esta planta suministra los microorganismos suficientes para el tratamiento en la facultativa de los efluentes industriales.

La composición típica del efluente cloacal crudo es:

Contaminantes	Unidades	Concentración		
		Débil	Media	Fuerte
Sólidos totales (ST)	mg/l	350	720	1.200
Disueltos totales (SDT)	mg/l	250	500	850
Fijos	mg/l	145	300	525
Volátiles	mg/l	105	200	325
en suspensión	mg/l	100	220	350
Fijos	mg/l	20	55	75

Contaminantes	Unidades	Concentración		
		Débil	Media	Fuerte
Volátiles	mg/l	80	165	275
Sólidos sedimentables	ml/l	5	10	20
DBO <sub>5</sub> (20 °C)	mg/l	110	220	400
COT	mg/l	80	160	290
DQO	mg/l	250	500	1.000
Nitrógeno total (como N)	mg/l	20	40	85
Orgánico	mg/l	8	15	35
Amoníaco libre	mg/l	12	25	50
Nitritos	mg/l	0	0	0
Nitratos	mg/l	0	0	0
Fósforo total (como P)	mg/l	4	8	15
Orgánico	mg/l	1	3	5
Inorgánico	mg/l	3	5	10
Cloruros	mg/l	30	50	100
Sulfatos	mg/l	20	30	50
Alcalinidad (como CaCO <sub>3</sub> )	mg/l	50	100	200
Gasa	mg/l	50	100	150
Coniformes totales	NMP/100ml	10 <sup>6</sup> ~ 10 <sup>7</sup>	10 <sup>7</sup> ~ 10 <sup>8</sup>	10 <sup>7</sup> ~ 10 <sup>9</sup>
COV's	mccg/l	<100	100 ~ 400	> 400

Para este caso en particular nos encontramos con un agua residual de mediana carga orgánica.

Los microorganismos presentes en el agua residual cloacal cruda son:

Organismo	Concentración
	NMP/ml
Coliformes totales	10 <sup>5</sup> ~ 10 <sup>6</sup>
Coliformes fecales	10 <sup>4</sup> ~ 10 <sup>5</sup>
Estreptococos fecales	10 <sup>3</sup> ~ 10 <sup>4</sup>
Enterococos	10 <sup>2</sup> ~ 10 <sup>3</sup>
Shigella	Presentes
Salmonella	10 <sup>0</sup> ~ 10 <sup>2</sup>
Pseudomonas aeruginosa	10 <sup>1</sup> ~ 10 <sup>2</sup>
Clostridium perfringens	10 <sup>1</sup> ~ 10 <sup>3</sup>
Mycobacterium tuberculosis	Presentes
Cistos de protozoos	10 <sup>1</sup> ~ 10 <sup>3</sup>
Cistos de giarda	10 <sup>-1</sup> ~ 10 <sup>2</sup>



materia orgánica del agua residual con el fin de obtener energía para la síntesis de materia orgánica que resulta en nuevas células. Solo parte de la materia orgánica del agua residual es oxidada a compuestos de cómo  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{CO}_2$ , el resto se sintetiza en forma de nueva materia celular.

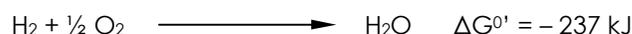
Las bacterias que intervienen este proceso incluyen los géneros *Pseudomonas*, *Zoogloea*, *Achromobacter*, *Flavobacterium*, *Nocardia*, *Bdellovibrio*, *Mycobacterium*, *Nitrosomas* y *Nitrobacter*. Además se pueden presentar diversas formas filamentosas tales como *Sphaerotilus*, *Beggiatoa*, *Thiothrix*, *Lecicothrix* y *Geotrichum*.

Las bacterias son los microorganismos que degradan la materia orgánica del afluyente, pero además son de importancia en este proceso de barros activados las actividades metabólicas de diversos microorganismos como los protozoos que consumen las bacterias dispersas que no han floculado y los rotíferos que consumen cualquier tipo de partícula biológica que no haya sedimentado.

En la degradación de la materia orgánica por parte de las bacterias se forman flóculos los cuales permiten la separación de esta materia orgánica por sedimentación en el clarificar.

### Procesos Aeróbicos Oxidación del Hidrógeno

La generación de ATP durante la oxidación del  $\text{H}_2$  es el resultado de la oxidación de  $\text{H}_2$  por  $\text{O}_2$  que lleva a la formación de una fuerza protón motriz. La reacción es altamente exotérmica y puede producir al menos una molécula de ATP. La reacción está catalizada por la enzima hidrogenasa.



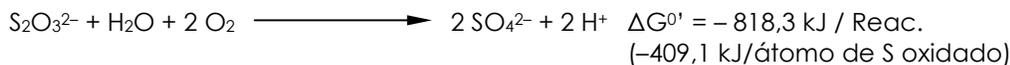
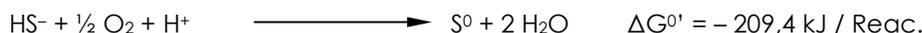
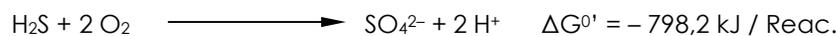
Las bacterias del hidrógeno autótrofas fijan el  $\text{CO}_2$  por el ciclo de Calvin:



siendo  $(\text{CH}_2\text{O})$  la representación del material celular

### Oxidación de Compuestos Reducidos del Azufre

A continuación se detallan los compuestos reducidos del azufre más comunes utilizados como fuente de energía (donadores de electrones) por las bacterias del azufre:



### Oxidación del Hierro

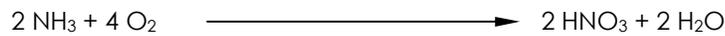
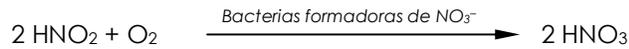
Las bacterias del hierro son quimiolitotrofos capaces de usar el hierro ferroso como única fuente de energía. La mayor parte crece sólo a pH ácido y a menudo se presentan asociadas a la contaminación ácida de las actividades mineras. Algunas bacterias fotótrofas son capaces de oxidar el hierro ferroso a hierro férrico en condiciones anaeróbicas.

La oxidación aeróbica del hierro ferroso a férrico se da de la siguiente manera:

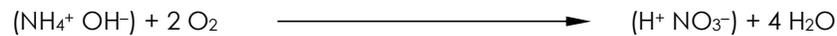
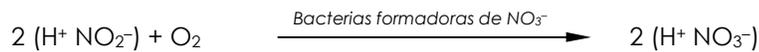


### Nitrificación

Durante el proceso de hidrólisis de proteínas se produce materia no carbonosa como por ejemplo el amoníaco ( $\text{NH}_3$ ). Existen dos tipos de bacterias autótrofas (quimiolitótrofos) capaces de oxidar el  $\text{NH}_3$  a nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) y luego a nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ). Las reacciones generalizadas son las siguientes:



O bien en forma ionizada:



### Factores de crecimiento bacteriano

Los factores fundamentales para el desarrollo del crecimiento de los microorganismos son:

- Temperatura
- pH
- Efectos osmóticos
- Oxígeno

### Datos Técnicos de la Planta de barros Activados

Los datos relevantes del efluente crudo a tratar son:

Caudal diario: 21 m<sup>3</sup>/día

Caudal pico: 1,8 m<sup>3</sup>/h

DBO: 200 mg/lit

Sólidos suspendidos: 200 mg/lit

La carga orgánica que llega al sistema de tratamiento viene dada por la DBO y el caudal diario:

$$200 \text{ g/m}^3 * 21 \text{ m}^3/\text{d} = 4,2 \text{ Kg DBO/día}$$

La eficiencia de remoción de DBO para un sistema de barros activados es del 80%, por lo tanto la DBO residual del efluente tratado será de:

$$(1 - 0,80) * 200 \text{ mg DBO/l} = 40 \text{ mg DBO/l}$$

Para el vuelco a cuerpo de agua superficial el límite de DBO es de 50 mg/l

La planta consta de un tanque de aireación de 100 m<sup>3</sup> de capacidad operativa donde llega el efluente cloacal y es aireado mediante un aireador superficial mecánico de 5 KW de potencia, y de un sedimentador secundario rectangular de 3 x 6 m y de 3 m de profundidad, del cual el efluente clarificado va hacia la laguna de tratamiento de los efluentes industriales.

El tiempo de retención del efluente dentro del tanque de aireación es de:

$$100 \text{ m}^3 / 21 \text{ m}^3/\text{día} = 4,76 \text{ días}$$

En un sistema de barros activados el parámetro fundamental de diseño es la relación entre alimento a los microorganismos y los microorganismos presentes en el tanque de aireación. Esta relación se denomina F/M, y viene dada por la carga orgánica medida en Kg DBO/d, y por los microorganismos presentes que se determinan a través de los sólidos suspendidos volátiles en el líquido de mezcla expresado en Kg SSVML.

$$\begin{aligned} \text{Concentración de SSVML: } & 1.500 \text{ mg/l} \\ \text{SSVML en el reactor: } & 1,5 \text{ g/l} * 100.000 \text{ Lts} = 150 \text{ Kg} \end{aligned}$$

$$F/M = 4,2 \text{ Kg DBO/día} / 150 \text{ Kg SSVML} = 0,03$$

La carga volumétrica viene dada por:

$$4,2 \text{ Kg DBO/día} / 100 \text{ m}^3 = 0,042 \text{ Kg DBO/d.m}^3$$

Ambos valores muestran que la planta está trabajando a muy baja carga ya que valores típicos de F/M y de carga superficial están en 0,3 y 0,45 respectivamente.

A fin de satisfacer la demanda de oxígeno de 4,2 Kg O<sub>2</sub>/d, se utiliza el aireador de 5 KW. Se estima que en condiciones reales de funcionamiento por cada KW del aireador entrega un caudal másico de oxígeno de 1 Kg/h. De nuevo aquí se puede apreciar la capacidad ociosa de aireación.

La carga superficial máxima del sedimentador secundario viene dada por:

$$1,8 \text{ m}^3/\text{h} / 18 \text{ m}^2 = 0,1 \text{ m/h}$$

Esta velocidad es extremadamente baja y permite la sedimentación de los microorganismos y la materia orgánica que luego será recirculada al tanque de aireación. El efluente clarificado con baja carga de bacterias y de sólidos suspendidos se vuelca en la laguna de tratamiento de efluentes industriales.

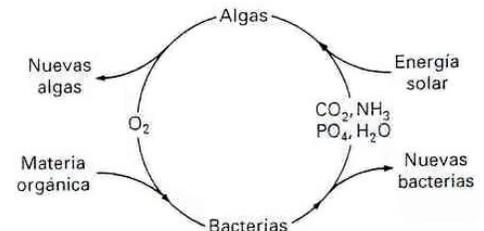
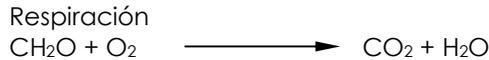
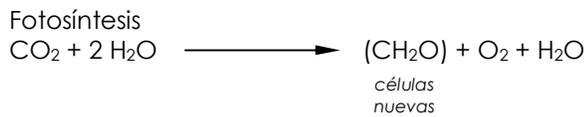
## Efluentes Industriales

Se generan en las áreas de Compresores, Turbogeneradores, Tratamiento de Etano, Glicol, Deshidratación del Gas y aquel producido a partir de las operaciones de limpieza de Planta.

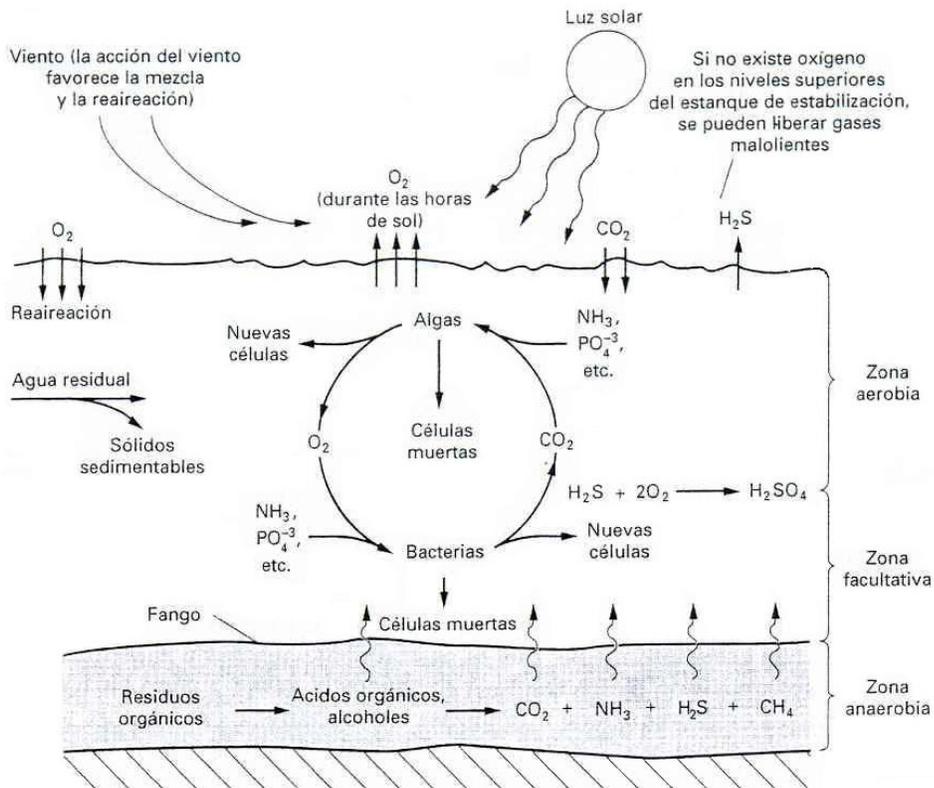
Para el tratamiento de estos efluentes se utiliza una laguna facultativa.

En este tipo de laguna existe una convivencia de bacterias aerobias, facultativas y anaerobias, que se distribuyen en tres zonas: la superficial en la cual tenemos la relación simbiótica de bacterias aerobias y algas, una zona inferior anaerobia en la cual se descomponen activamente los sólidos acumulados, y una zona intermedia que es parcialmente aerobia y anaerobia en la cual la descomposición la llevan a cabo las bacterias facultativas.

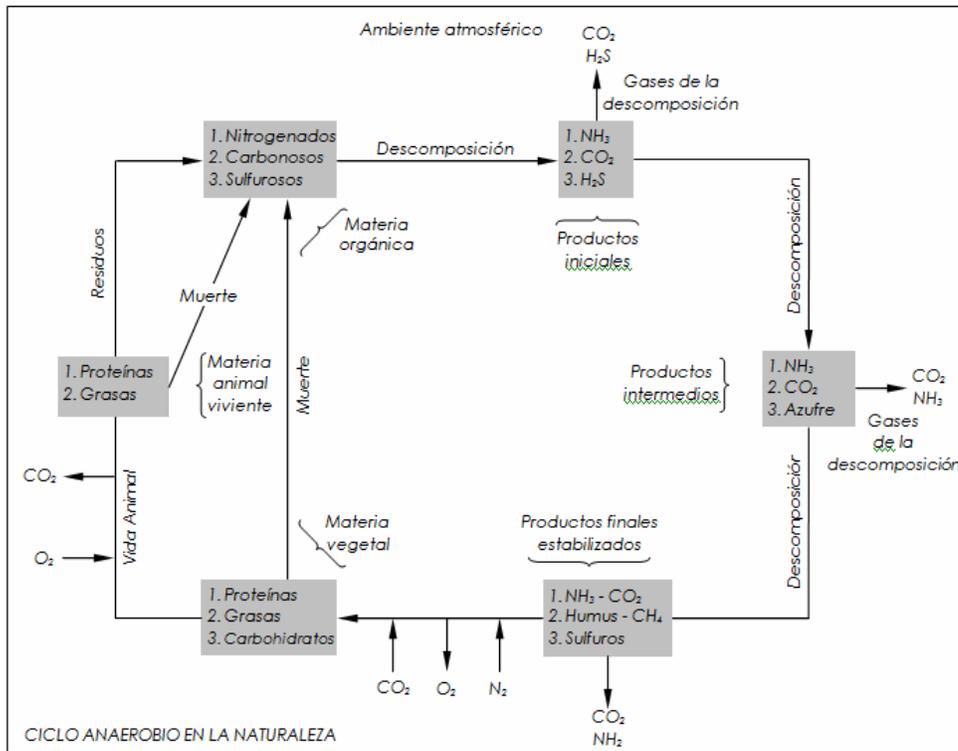
Las reacciones bioquímicas simplificadas de la fotosíntesis y de la respiración son:



En la siguiente figura se muestra en forma esquemática las distintas zonas de una laguna de estabilización facultativa.



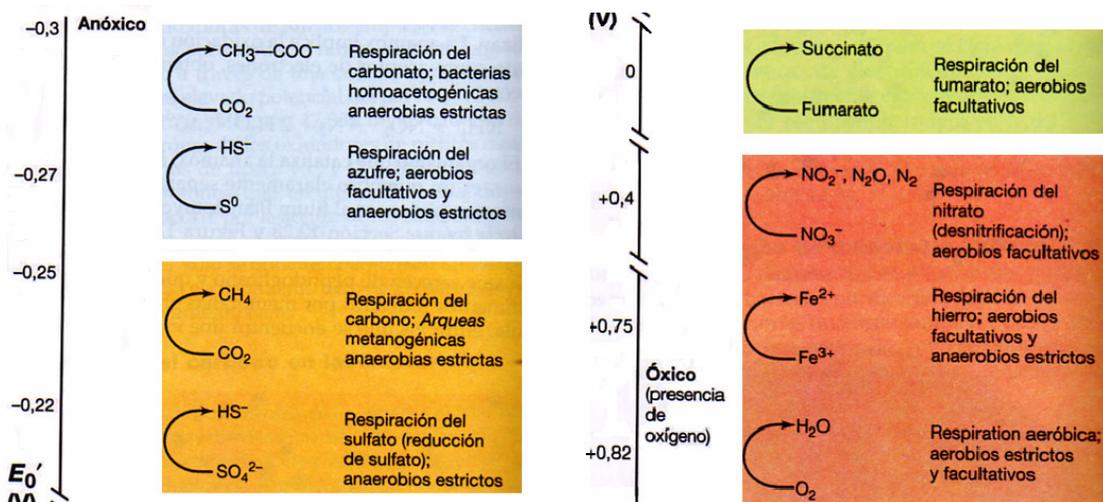
Además de los procesos aeróbicos detallados anteriormente, en este tipo de lagunas también se desarrollan procesos anaeróbicos como la respiración anaerobia, reducción del nitrato y desnitrificación, reducción del sulfato y fosfito, metanogénesis y acetogénesis



### Respiración Anaerobia

Cuando los organismos reducen compuestos inorgánicos como el NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> o CO<sub>2</sub> para utilizarlos como aporte nutricional estamos en presencia de un metabolismo asimilador. Por el contrario cuando estos compuestos solo son utilizados como donadores de electrones para producir energía, el proceso se denomina metabolismo desasimilador.

La figura muestra ejemplos de respiración anaeróbica.



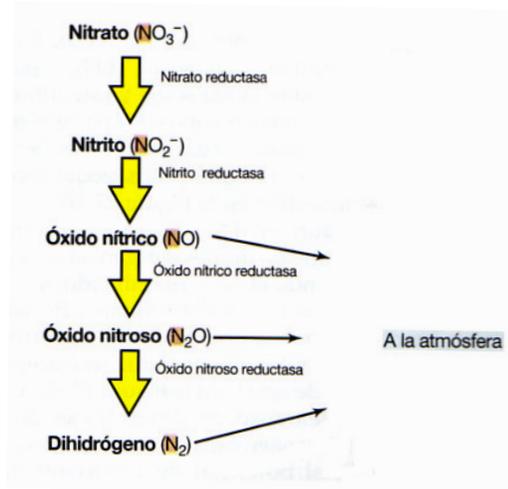
### Reducción de Nitrato y Desnitrificación

El nitrato es un aceptor de electrones muy común en la respiración anaeróbica. Para su utilización es necesaria la enzima nitrato reductasa, que reduce el  $\text{NO}_3^-$  a  $\text{NO}_2^-$ . Muchas bacterias que utilizan nitrato en la respiración anaeróbica producen nitrógeno gaseoso mediante un proceso denominado desnitrificación.

Los distintos estados de oxidación de los compuestos nitrogenados se muestran en la siguiente tabla:

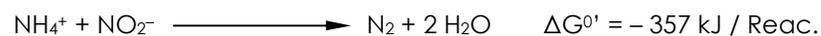
Compuesto	Estado de oxidación
N orgánico ( $R - \text{NH}_2$ )	-3
Amoníaco ( $\text{NH}_3$ )	-3
Gas nitrógeno ( $\text{N}_2$ )	0
Óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ )	+1
Óxido de nitrógeno ( $\text{NO}$ )	+2
Nitrito ( $\text{NO}_2^-$ )	+3
Dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ )	+4
Nitrato ( $\text{NO}_3^-$ )	+5

La reducción de nitrato a nitrógeno gaseoso es un proceso de desasimilación en el que interviene la enzima nitrato reductasa, cuya síntesis es reprimida por el  $\text{O}_2$ , por lo tanto este proceso debe realizarse en condiciones anóxicas. La figura muestra el proceso de desnitrificación.



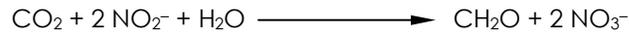
### Anamox

La oxidación anóxica del  $\text{NH}_3$  llamada anamox, utiliza como aceptor de electrones al  $\text{NO}_2^-$  obteniendo nitrógeno gaseoso:



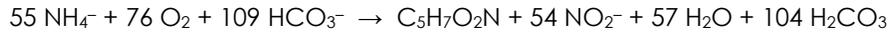
Este proceso es muy útil para el tratamiento de desnitrificación de las aguas residuales con alta carga de nutrientes.

Durante el proceso de anamox también se produce la fijación del CO<sub>2</sub> y la oxidación del nitrito a nitrato:



#### Nitrificación Biológica

Son dos los géneros de bacterias asociadas a este proceso, nitrosomas y nitrobacter. Los nitrosomas oxidan el amoníaco a nitrito, y los nitrobacter transforman el nitrito a nitrato:



Se puede observar que se necesitan aproximadamente 4,4 mg de O<sub>2</sub> por cada mg de NH<sub>4</sub><sup>-</sup> oxidado a NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Hay que tener en cuenta que este proceso no implica la eliminación de nitrógeno, pero sí permite eliminar la DBO asociada al proceso de nitrificación. Para que se lleva a cabo este proceso de nitrificación es necesario controlar que el pH se encuentre entre 7,5 y 8,6, y que el oxígeno disuelto se encuentre por encima del valor 1 mg/l. De esta forma se puede asegurar las condiciones para el desarrollo de las bacterias nitrificantes.

#### Desnitrificación Biológica

En condiciones anóxicas las bacterias Achromobacter, Aerobacter, Alcaligenes, Bacilus, Brevibauterium, Flavobacterium, Lactobasillus, Micrococcus, Proteus, Pseudomonas y Spirillum. Las secuencias de reducción del nitrato a nitrógeno gaseoso son:



Los tres últimos compuestos son gaseosos y pueden liberarse a la atmósfera. El pH óptimo para este proceso de desnitrificación es de 7 a 8.

Los procesos de desnitrificación se pueden llevar a cabo tanto en cultivos en suspensión como en cultivos fijos, y siempre en ausencia de oxígeno molecular, ya que este inhibe el proceso enzimático para llevar a cabo la desnitrificación.

#### Reducción de Sulfato

Las bacterias sulfato reductoras reducen SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> a H<sub>2</sub>S. Los donadores de electrones son el hidrógeno, compuestos orgánicos e incluso fosfito. La siguiente tabla muestra los compuestos de azufre y los donadores de electrones en la reducción de sulfato.

Compuesto	Estado de oxidación
S orgánico (R – SH)	- 2
Sulfuro (H <sub>2</sub> S)	- 2
Azufre elemental (S <sup>0</sup> )	0
Triosulfato (S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>2-</sup> )	+ 2
Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> )	+ 4
Sulfito (SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> )	+ 4
Sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	+ 6
Donadores de e para la reducción de SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	

<i>H<sub>2</sub></i>	Acetato
Lactato	Propionato
Piruvato	Butirato
Etanol y otros alcoholes	Ácidos grasos de cadena larga
Fumarato	Benzoato
Malato	Indol
Colina	Hexadecano

El rendimiento de las bacterias sulfato reductoras indican que por cada SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> reducido a HS<sup>-</sup> se produce una molécula de ATP. Con H<sub>2</sub> la reacción es:



Numerosas bacterias sulfato reductoras pueden oxidar completamente acetato a CO<sub>2</sub> como un donador de electrones para la reducción de sulfato:

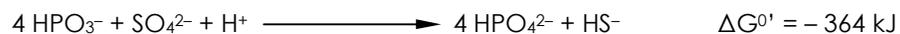


Algunas bacterias sulfato reductoras llevan a cabo una forma singular de metabolismo llamado reducción desproporcionada, usando compuestos de azufre de estado de oxidación intermedio. La reducción desproporcionada implica la rotura de un compuesto en dos nuevos, de los cuales uno está más oxidado y otro más reducido:



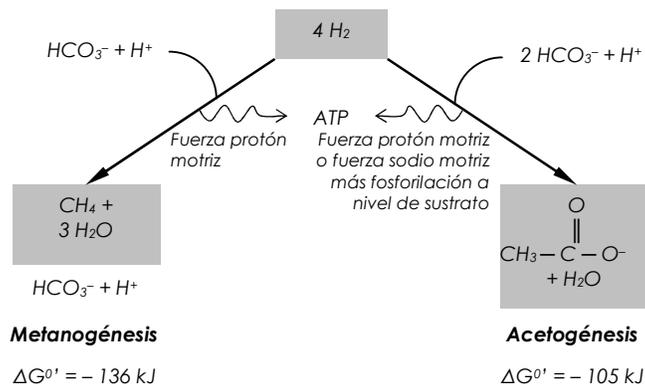
#### Reducción de Fosfito

Se ha aislado una bacteria capaz de acoplar la oxidación de fosfito (HPO<sub>3</sub><sup>-</sup>) a la reducción de sulfato. Se trata de una reacción quimiolitotrófica y los productos son fosfato y sulfuro:

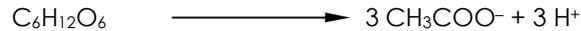


#### Acetogénesis

El CO<sub>2</sub> abunda en los ambientes anóxicos ya que es uno de los principales productos del metabolismo energético de los quimioorganotrofos. Existen dos grupos de procariontes anaerobios estrictos que usan el CO<sub>2</sub> como aceptor de electrones, los homoacetógenos y los metanógenos. En la figura se muestran ambos procesos:

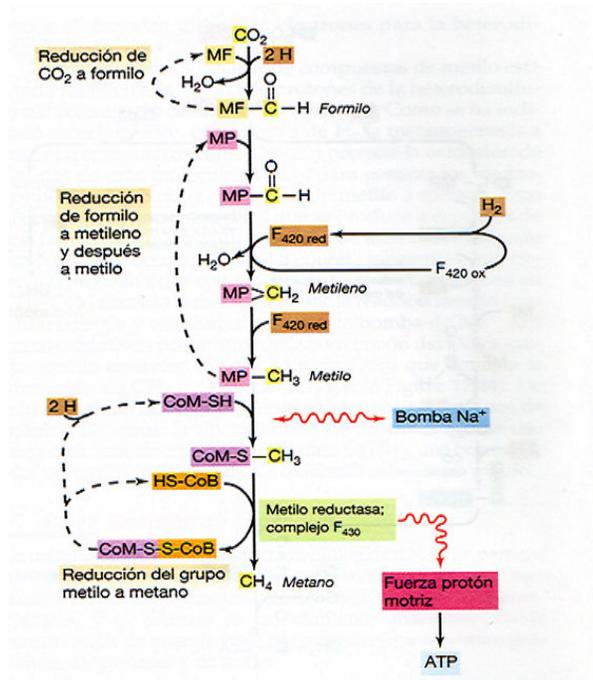


Los organismos homoacetógenos pueden llevar las siguientes reacciones:



### Metanogénesis

La metanogénesis es la producción biológica de  $\text{CH}_4$  a partir de dos vías, de la reducción de  $\text{CO}_2$  con  $\text{H}_2$ , o de compuestos metilados. En la metanogénesis intervienen diversas coenzimas exclusivas, y el proceso es estrictamente anaerobio. En la conservación de energía en la metanogénesis intervienen gradientes de protones y de sodio.



### Oxidación de Hidrocarburos

Además de su papel de aceptor de electrones, el  $\text{O}_2$  es también un reactante en algunos procesos bioquímicos. El  $\text{O}_2$  es introducido a los compuestos bioquímicos por la acción de las enzimas oxigenasa y monooxigenasa.

Muchos microorganismos degradan hidrocarburos alifáticos y aromáticos. El catabolismo aeróbico requiere la acción de coenzimas oxigenasa. La degradación anaeróbica de hidrocarburos aromáticos se produce por vías reductoras y no oxidativas.

Las figuras muestran la oxidación de un hidrocarburo alifático, las funciones de las oxigenasas en el catabolismo de compuestos aromáticos, y la degradación anóxica del benzoato.



### Metanotrafia

La metanotrofia es la utilización del CH<sub>4</sub> como fuente de energía y carbono. La enzima metano monooxigenasa es clave en el catabolismo del metano. Los pasos individuales en la oxidación de CH<sub>4</sub> a CO<sub>2</sub> se pueden resumir de la siguiente forma:



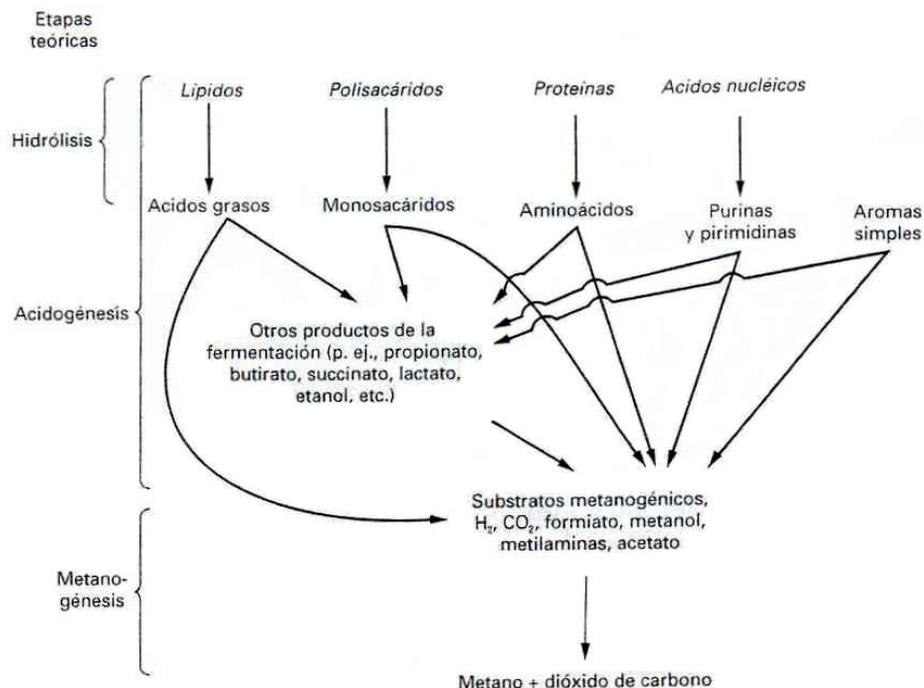
En los microorganismos metanotrofos el carbono es asimilado al material celular en el nivel de formaldehído.

### Digestión Anaerobia

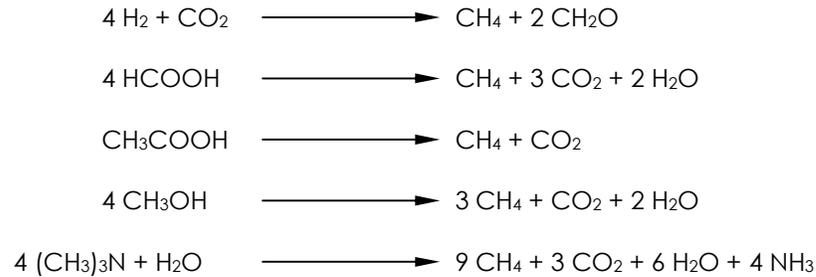
Este proceso genera la descomposición de la materia orgánica e inorgánica en ausencia de oxígeno molecular. Su principal aplicación es la estabilización de los barros provenientes del tratamiento del agua residual.

En el proceso de digestión anaeróbica la materia orgánica de los barros primarios y biológicos se convierten biológicamente en condiciones anaerobias a metano y dióxido de carbono.

La conversión biológica de la materia orgánica de los barros ocurre en tres etapas. En la primera se produce la hidrólisis por vía enzimática de los compuestos orgánicos de alto peso molecular como las proteínas. De esta manera se forman compuestos menos complejos que sirven como fuente de energía y carbono a los microorganismos presentes. Luego se produce la acidogénesis (acetogénesis) que implica la conversión bacteriana de los productos de la hidrólisis en compuestos más simples y de menor peso molecular. Finalmente se produce la metanogénesis donde los productos finales principales son el metano y el dióxido de carbono. Estos procesos pueden observarse en la siguiente figura.



Un grupo de microorganismos anaerobios se ocupan de la hidrolización de los polímeros orgánicos y de los lípidos para formar elementos estructurales básicos como los monosacáridos y los aminoácidos. Un segundo grupo de bacterias anaerobias fermenta los productos de la descomposición enzimática para producir ácidos orgánicos simples, siendo el más común el ácido acético. Finalmente un tercer grupo de microorganismos convierten el hidrógeno y el ácido acético originado por las bacterias acidogénicas en metano y dióxido de carbono. Las reacciones típicas dentro del reactor anaeróbico son:



### Ecosistemas Microbianos

En un ecosistema microbiano, el crecimiento celular forma poblaciones. Las poblaciones metabólicamente relacionadas se denominan gremios, y los conjuntos de agrupaciones interactúan formando comunidades microbianas.

Por ejemplo en un ecosistema lacustre tenemos tres comunidades diferentes según la zona del mismo:

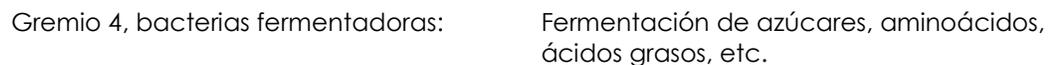
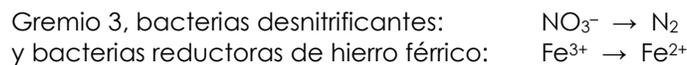
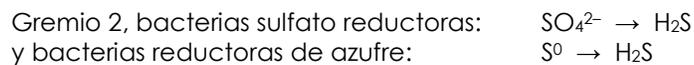
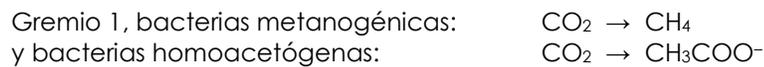
Sobre la superficie tenemos la zona fótica donde encontramos una comunidad de fotótrofos oxigénicos:

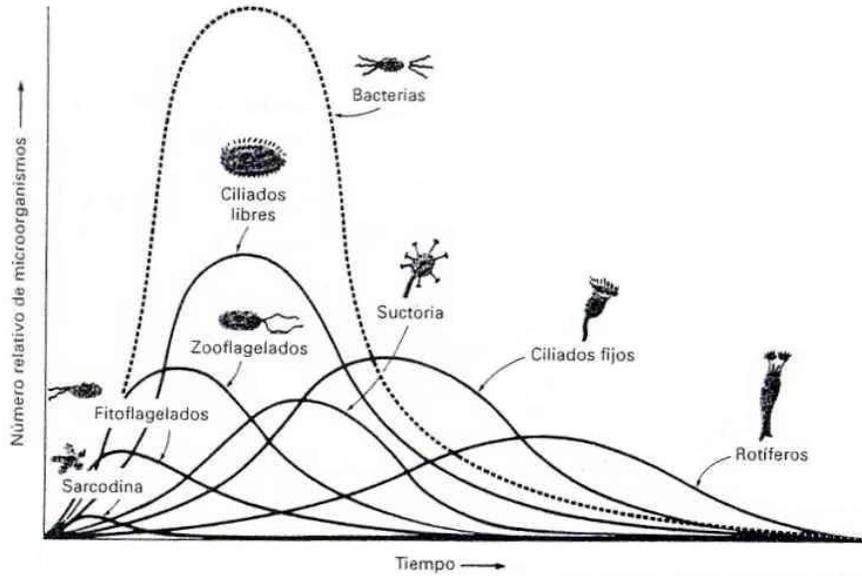


En la zona óxica encontramos una comunidad de aerobios y aerobios facultativos:



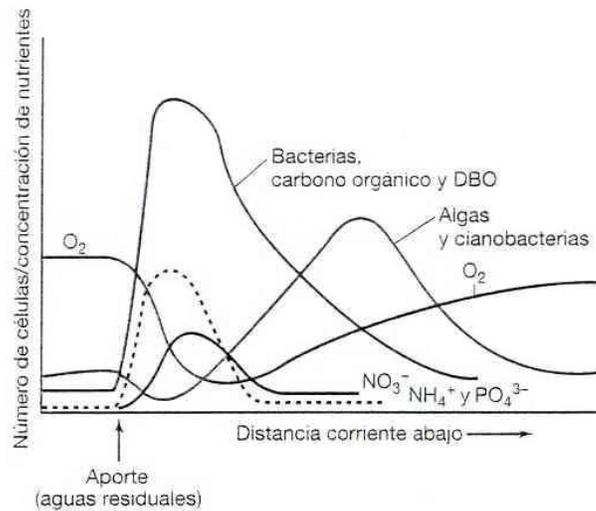
Por último en la zona anóxica encontramos una comunidad de fermentadores y otros anaerobios distribuidos en diferentes gremios:





Cuando se incorporan aguas residuales ricas en materia orgánica, la influencia de estos desechos sobre los ecosistemas acuáticos es altamente notoria en el lugar del vertido, pero estas acciones contaminantes pueden reducirse a lo largo del curso de agua cuando el cuerpo receptor se trata de ríos con gran caudal. La dinámica de los cambios puede apreciarse en el siguiente gráfico.

En cambio cuando estos vertidos se realizan a cursos de agua estancos, de bajo caudal o de una dinámica muy lenta, como es el caso de lagunas se produce la acumulación de nutrientes que favorece el proceso de eutrofización.



### **Datos Técnicos de la Laguna de Tratamiento**

Los datos relevantes del efluente industrial crudo son:

DBO: 200 mg/lit  
DQO: 400 mg/lit  
Caudal Diario: 100 m<sup>3</sup>/día  
Caudal Pico: 3 m<sup>3</sup>/h  
Carga orgánica: 20 Kg DBO/día

Carga orgánica de diseño: 50 Kg DBO/día  
Remoción de DBO: 80%  
Límites de vuelco: DBO: 50 mg/lit

### **Tratamiento Primario**

Consiste en una pileta API donde se produce la separación de flotantes (5,50 x 26,00 x 1,70 m) de 220 m<sup>3</sup> de capacidad. Ahí se produce la separación de los hidrocarburos por diferencia de densidad, quedando los mismos en el sobrenadante.

Los hidrocarburos separados son enviados a tratamiento diferenciado que puede consistir en incineración, recuperación por stripping, o landfarming dependiendo de la concentración de HCT en el agua residual.

### **Laguna Facultativa**

Es de sección rectangular de 30,00 x 70,00 m y de una profundidad media de 1,70 m, tiene una capacidad aproximada de 3.500 m<sup>3</sup>, esto asegura un tiempo de permanencia de:

$$3.500 \text{ m}^3 / 100 \text{ m}^3/\text{día} = 35 \text{ días}$$

En esta laguna se produce la oxidación y estabilización de la materia orgánica a expensas de oxígeno que generan por fotosíntesis las algas que se desarrollan normalmente en este tipo de lagunas, de allí su coloración verde botella característico de un buen funcionamiento.

El barro biológico que se genera en la unidad y sumado al que pueda contener el efluente cloacal tratado, sedimentará en el fondo de la laguna donde sufrirá un proceso de estabilización anaeróbica, transformándose parte en gases y un remanente compuesto por un porcentaje variable de materia orgánica no degradable y el resto mineral.

Esta laguna no presenta problemas de olores ambientales, debido a que se trata de un sistema biológico aeróbico y además la acumulación de barros en el fondo es muy lenta.

La laguna fue diseñada con una carga orgánica de 50Kg DBO/h día, carga que asegura una elevada remoción de materia orgánica obteniéndose un efluente que, en los periodos críticos de invierno, cumplirá con los límites permisibles establecidos por la legislación.

Cabe agregar que los barros sedimentados será necesario removerlos en periodos no menores a 10 años.

El efluente de la laguna facultativa pasa por una cámara la cual posee un sistema de ranura por rebalse que funciona como trampa de sólidos. De esta cámara pasa al vertedero triangular donde se realiza la medición de caudal y la cloración, previo a su descarga en el curso de agua del Arroyo.

La laguna cuenta también en su cabecera con dos aireadores los cuales incorporan c/u 6 kg de oxígeno disuelto por hora incrementando la capacidad de digestión y oxidación.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- Brock. Biología de los Microorganismos. Michael T. Madigan, John M. Martinko, Jack Parker. 10ª edición. 2004. Pearson - Prentice Hall.
- Metcalf & Eddy. Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, Vertido y Reutilización. 3ª edición. 1998. McGraw - Hill.
- Metcalf & Eddy. Tratamiento y Depuración de las Aguas Residuales. 2ª edición. 1981. Editorial Labor S.A.
- W. Wesley Eckenfelder, Jr. Principles of Water Quality Management. 1980. CBI Publishing Company, Inc.
- Fariñas Iglesias, Manuel. Ósmosis Inversa. Fundamentos, tecnología y aplicaciones. McGraw - Hill. España 1999.