

# Biodegradación: aspectos conceptuales

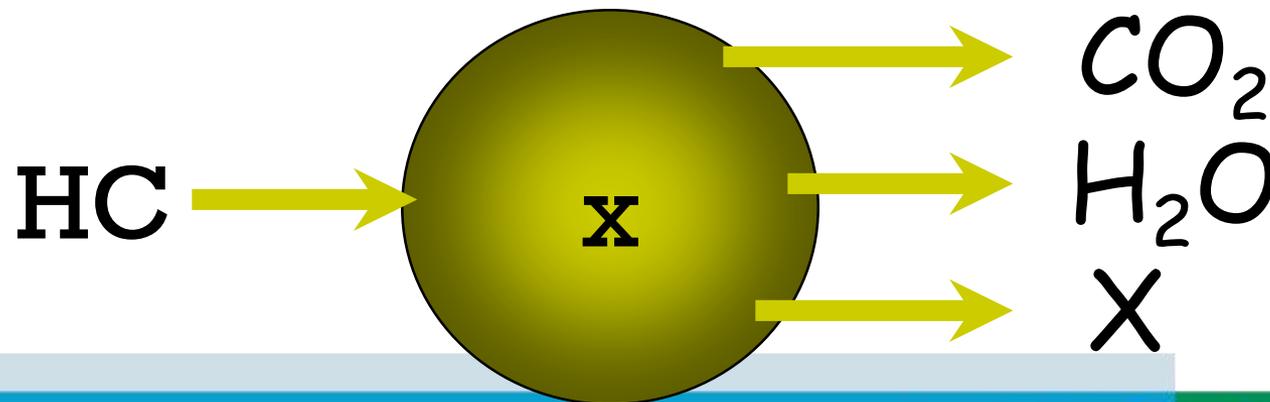
---





**actividad  
biológica  
degradadora**

biodegradación: proceso natural por el cual microorganismos consumen hidrocarburos en condiciones aerobias y producen  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , X y productos parcialmente oxidados



# CONDICIONES NUTRICIONALES

Fuente de Carbono: hidrocarburo a degradar

Fuente de Nitrógeno: urea, nitrato de amonio

Fuente de fósforo: fosfato diamónico, superfosfato

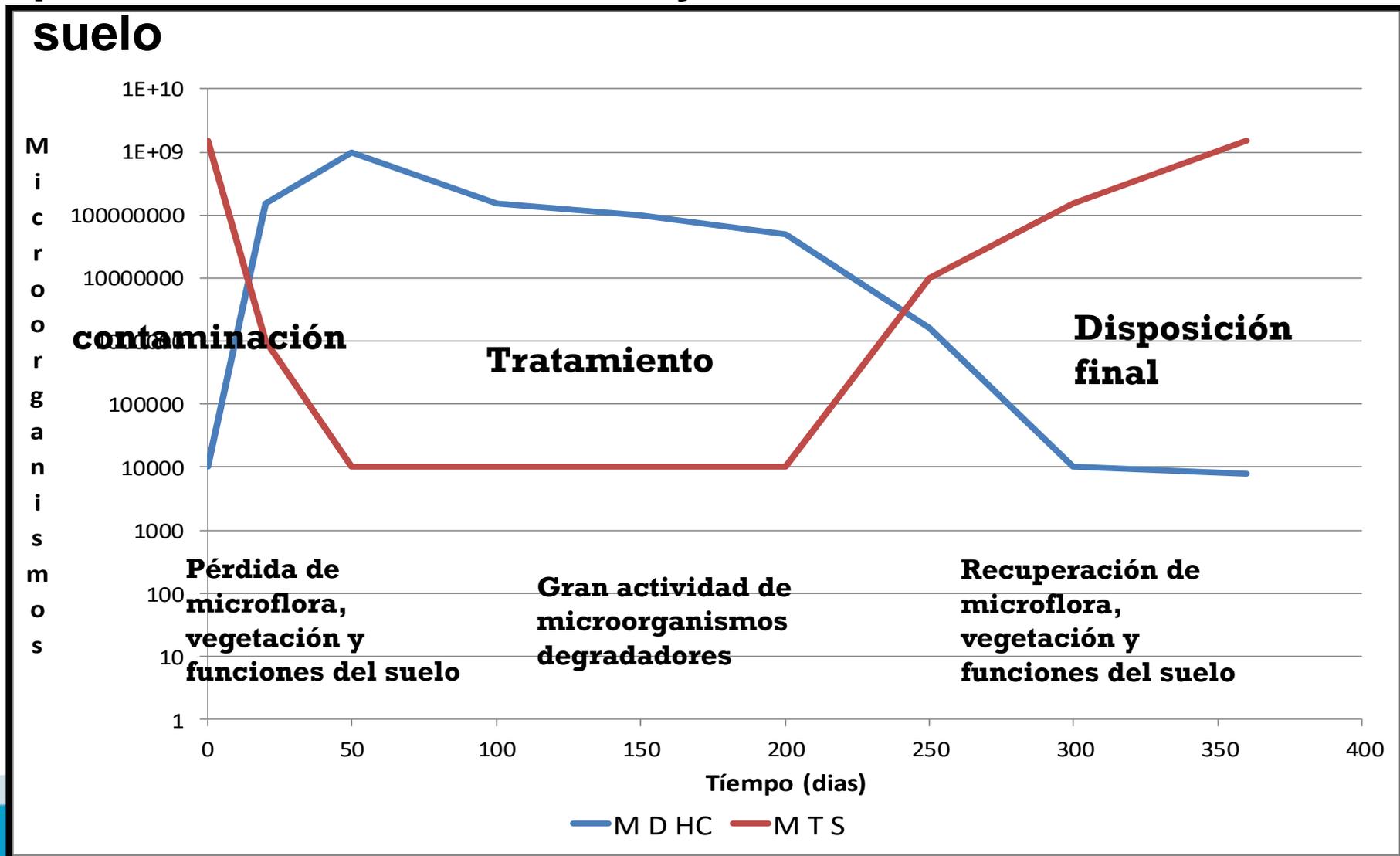
Fuente de oxígeno: aireación

Fuente de Potasio: fertilizante compuesto

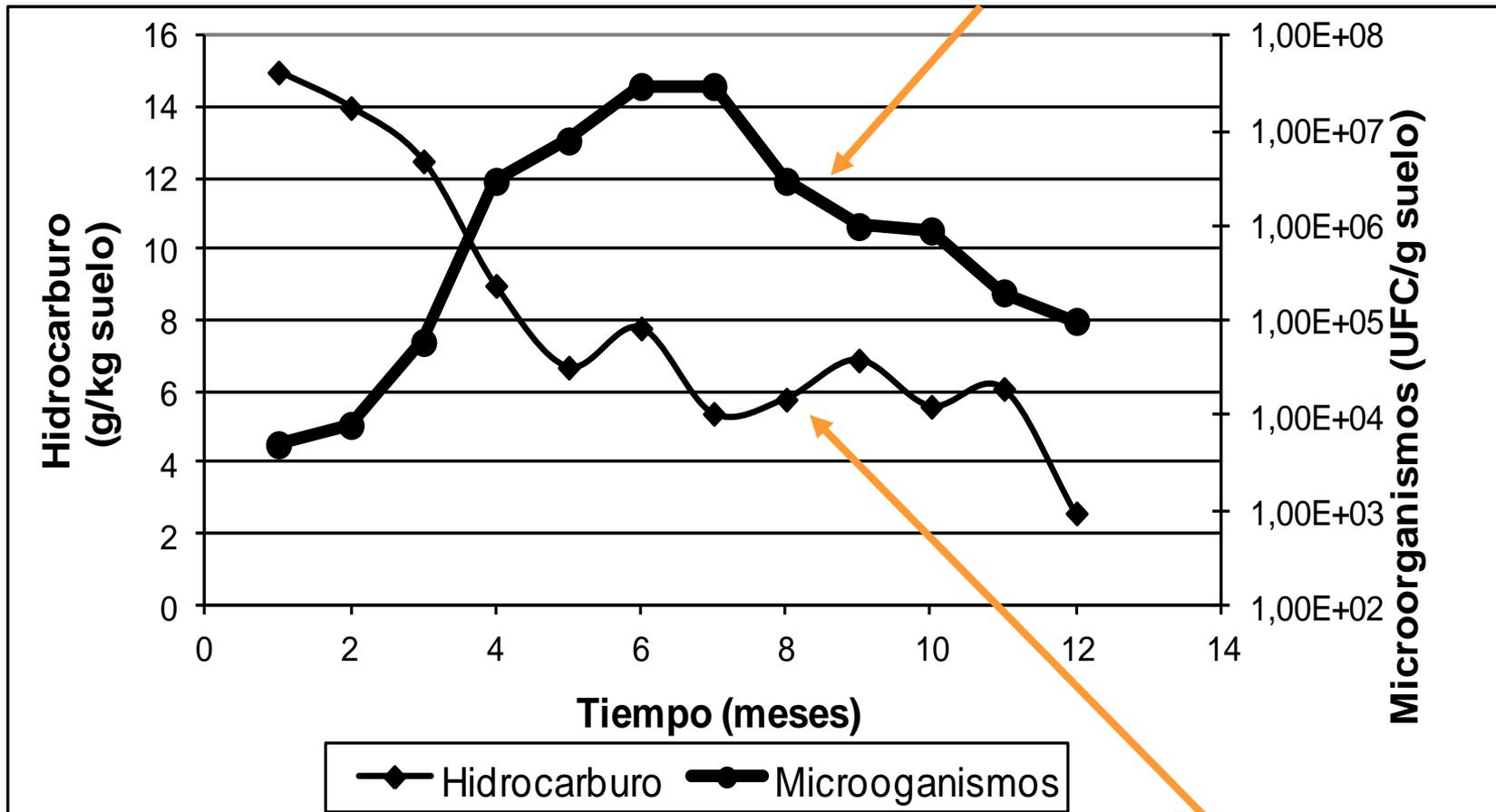
Nutrientes especiales: hierro, azufre, magnesio, vitaminas, en general están en el suelo en las cantidades requeridas o se pueden incorporar con un fertilizante compuesto



# Evolución de los microorganismos durante un proceso de contaminación y tratamiento del suelo



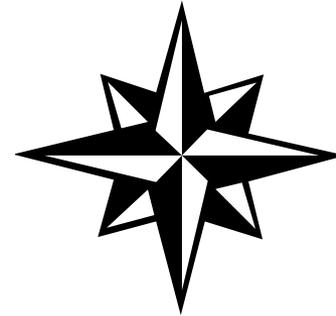
microorganismos



biodegradación



# **PARAMETROS CRITICOS DE CONTROL**



**Análisis de criterios para monitoreo y control de variables de proceso en degradación de hidrocarburos en sistemas de fase sólida**

**Ercoli y otros, IAPG.-**

# Suelo contaminado con crudo

Además de los componentes mencionados tiene:

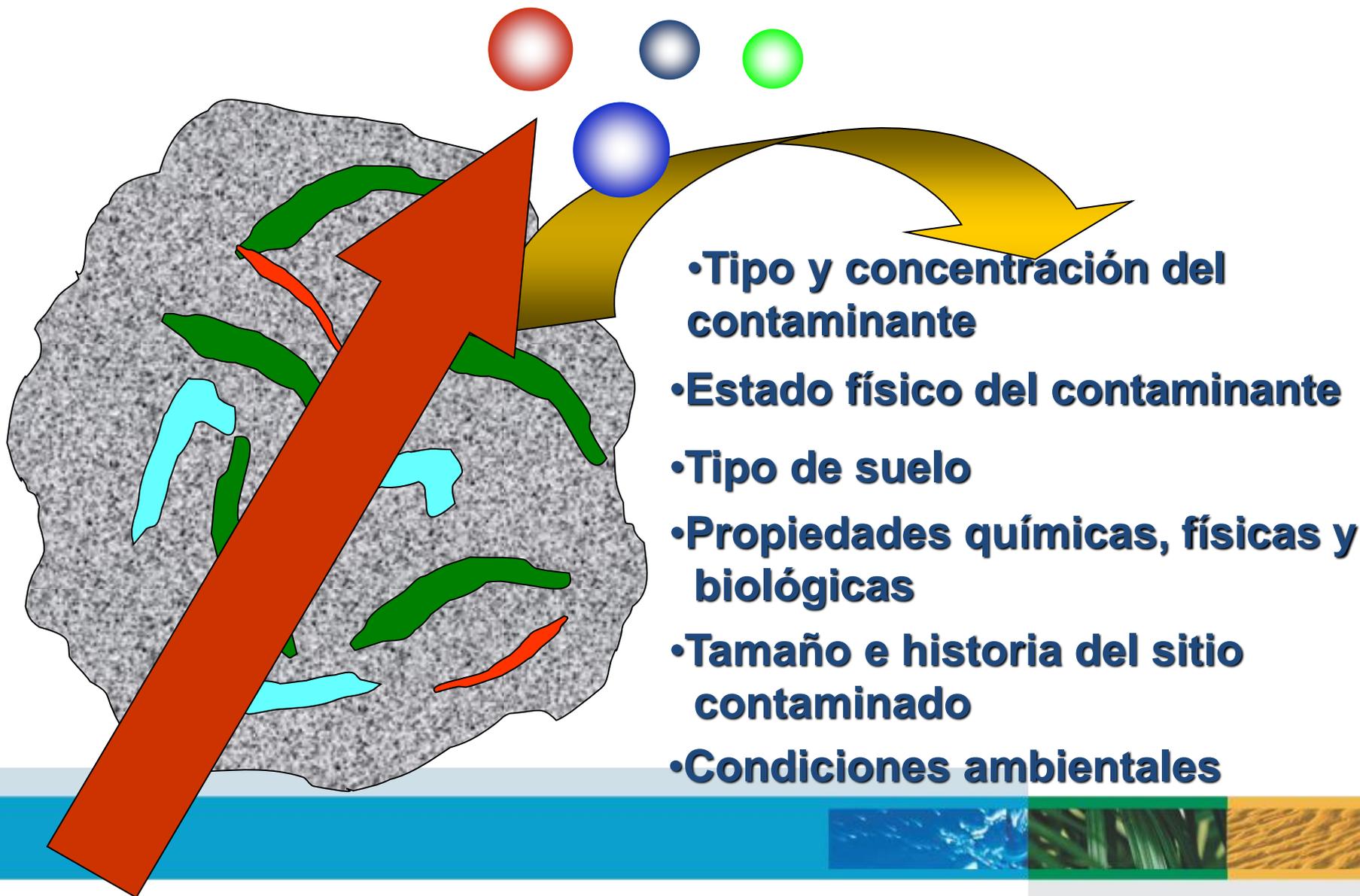
- Hidrocarburos
- NaCl
- Metales pesados
- Otros contaminantes

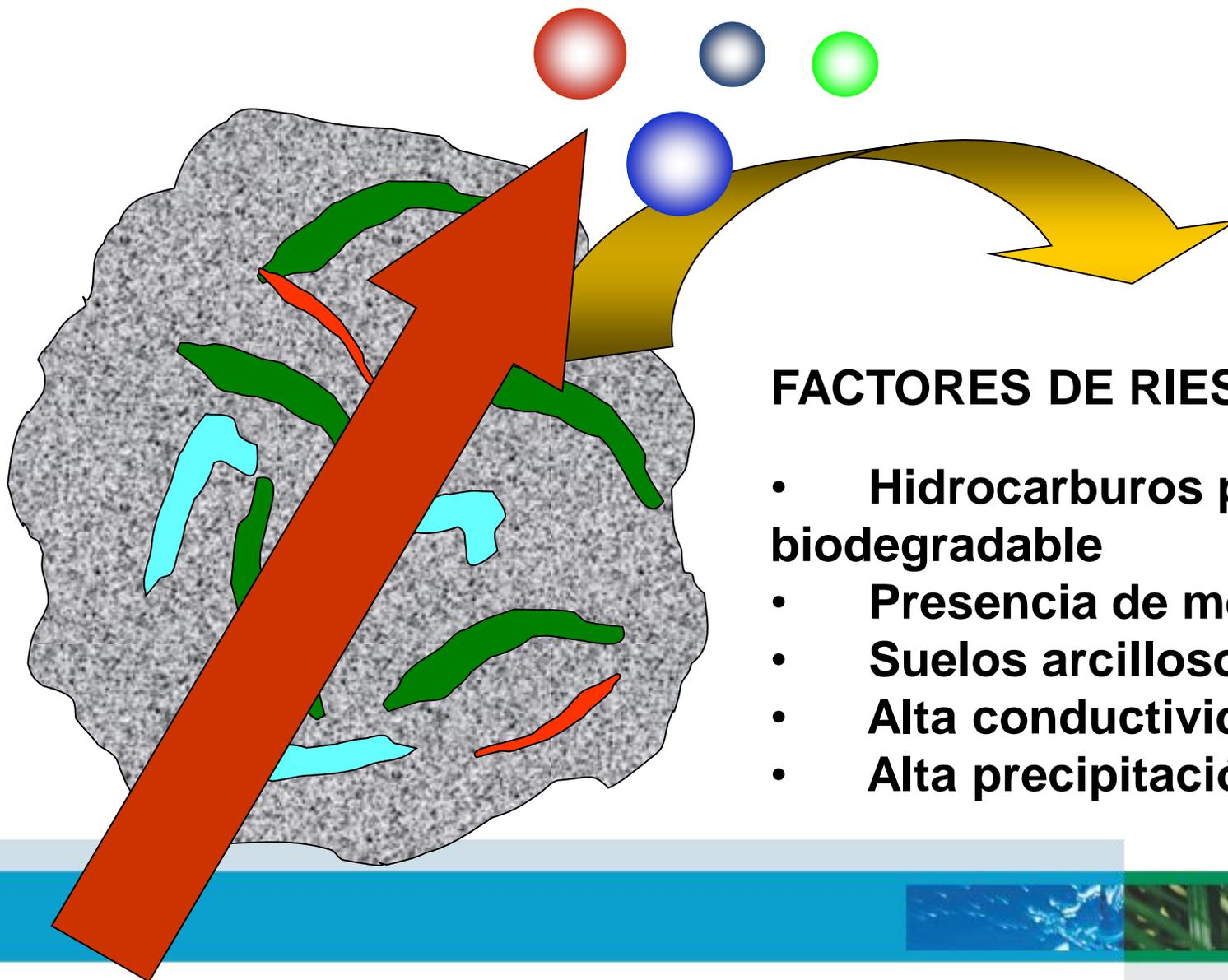
Que traen como efecto degradación de la calidad del suelo en particular:

- Modificación de la flora microbiana



# Factores que gobiernan la posibilidad de remoción de un contaminante desde el suelo





## FACTORES DE RIESGO

- Hidrocarburos poco biodegradable
- Presencia de metales
- Suelos arcillosos
- Alta conductividad
- Alta precipitación pluvial

# Tipo y concentración de contaminantes

- Tipo de hidrocarburos
  - alifáticos
  - aromáticos
  - nitrogenados y azufrados
- Concentración de hidrocarburos
- Antigüedad de la contaminación



# Biodegradabilidad relativa de hidrocarburos

Perry and Cerniglia, 1973.

## Más biodegradable

- Alcanos lineales (C10 a C19)
- Alcanos ramificados (C12 a C18)
- Gases (C2 a C4)
- Alcanos (C5 a C9)
- Alquenos (C3 a C11)
- Alquenos ramificados
- Aromáticos
- Cicloalcanos
- Compuestos halogenados
- Compuestos nitrogenados y azufrados
- Fibras sintéticas
- Polímeros

## Menos biodegradable



## Estado físico del contaminante

Componente particulado de un tamaño menor, igual, mayor que la partícula del suelo con contaminado

Contaminante presente como película líquida

Contaminante adsorbido a la partícula de suelo

Contaminante adsorbido a la partícula orgánica de suelo

Contaminante presente como fase sólida o líquida en los poros de la partícula de suelo

Contaminante disuelto en la fase acuosa en los poros de la partícula de suelo

## Propiedades del contaminante usadas como base para la selección técnica del tratamiento

- Volatilidad
- Solubilidad en agua o en disolventes orgánicos
- Inestabilidad térmica/química
- Biodegradabilidad



## La tasa de biorremediación es controlada por tres procesos principales :

- ✓ El proceso de transferencia de oxígeno desde el aire a la solución acuosa
- ✓ El proceso de transferencia del hidrocarburo desde el suelo a la solución acuosa
- ✓ La tasa de biodegradación del hidrocarburo en la solución acuosa

En general la tasa de transferencia de masa de hidrocarburo es menor que la tasa de transferencia de oxígeno y la tasa de biodegradación, y es la etapa controlante de la biorremediación en suelo contaminado con hidrocarburos

### **BIOREMEDIATION OF OIL-CONTAMINATED SOIL USING SURFACTANT AND ADSORBENTS.**

Aare Selberg, Toomas Tenno

University of Tartu, Jakobi 2, 51014 Tartu, Estonia

e-mail: [aare.selberg@mail.ee](mailto:aare.selberg@mail.ee)



# Restricciones a la biorremediación de contaminantes del suelo

## Físicas

- Absorción de orgánicos a la superficie del suelo
- Entrampado de orgánicos en poros pequeños
- Pobre distribución de aceptores de electrones
- Falta de humedad

## Biológicas

- Falta de capacidad metabólica
- Falta de nutrientes balanceados
- Toxicidad de los contaminantes
- Intolerancia al pH, sales o metales

Estrategia para mejorar la bioactividad de procesos microbianos



# Tecnologías de Bioremediación

## Ventajas

- Costo mas bajo que otras tecnologías convencionales.
- Los contaminantes se convierten usualmente en productos inocuos.
- Los contaminantes se destruyen, no se transfieren a medios diferentes
- No invasiva, permite usos continuos del sitio, una vez saneado.
- Relativa facilidad de implementacion.
- **Desventajas**
- Puede ser difícil de controlar.
- Los nutrientes introducidos en el ambiente para mejorar la biorremediación puede causar otro problema de contaminación.
- Puede no alcanzar los niveles requeridos de contaminantes.
- Requiere mucho tiempo.
- Puede requerir un monitoreo extensivo.
- Caída del control hidráulico.
- Proceso dinámico, que es difícil de predecir el nivel de efectividad

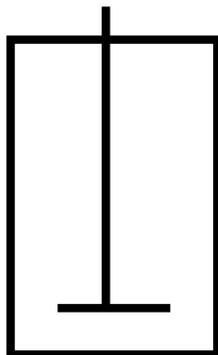


# Factores favorables a la biorremediación

- Concentraciones no-tóxicas  $< 50$  g/kg de hidrocarburos
- Microorganismos degradadores de hidrocarburos  $> 1000$  UFC/g
- Contenido de metales pesados  $< 2000$  mg/kg
- Población microbiana diversa
- PH 6-9



# ALTERNATIVAS BIOLÓGICAS PARA TRATAMIENTO DE SUELOS



**REACTORES BIOLÓGICOS**

*... días*



**BIOPILAS**

*... semanas*

**TRATAMIENTO EN SUELO**

*... meses-años*



# Tratamientos de Suelos empetroolados por Land farming



## Land farming

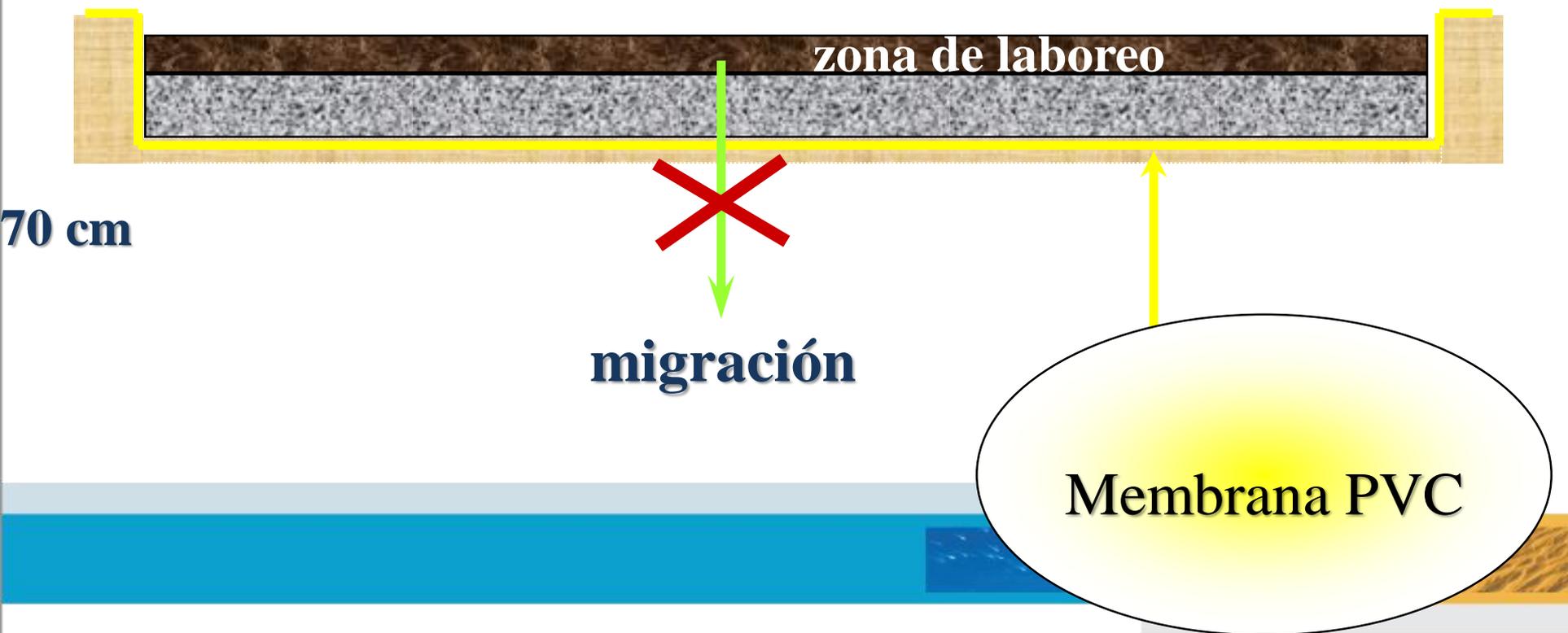
zona de laboreo

zona de  
acumulación  
y  
pretratamiento  
del suelo

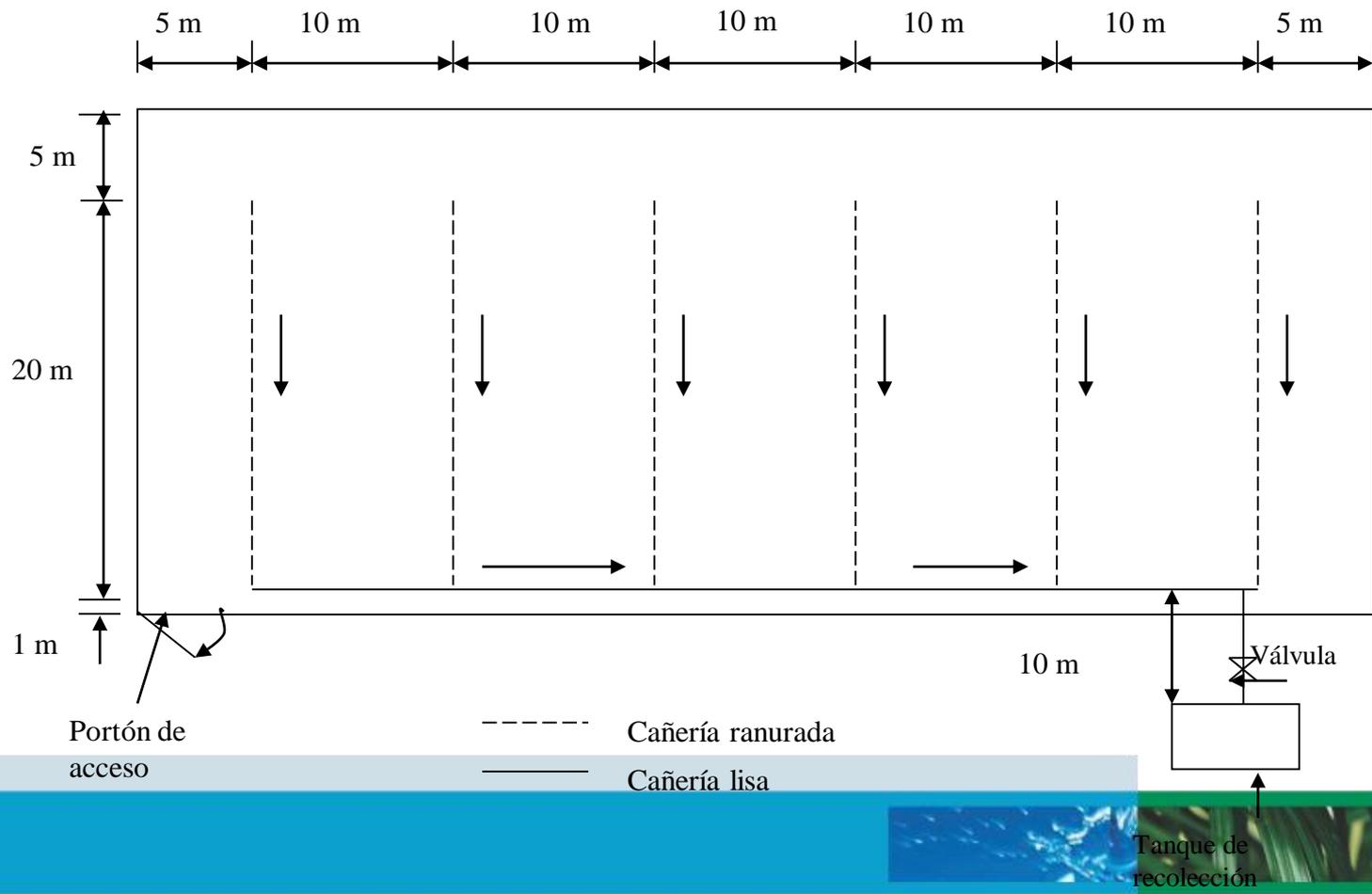
# Alambrado perimetral



# Landfarming



# Landfarming



# Landfarming

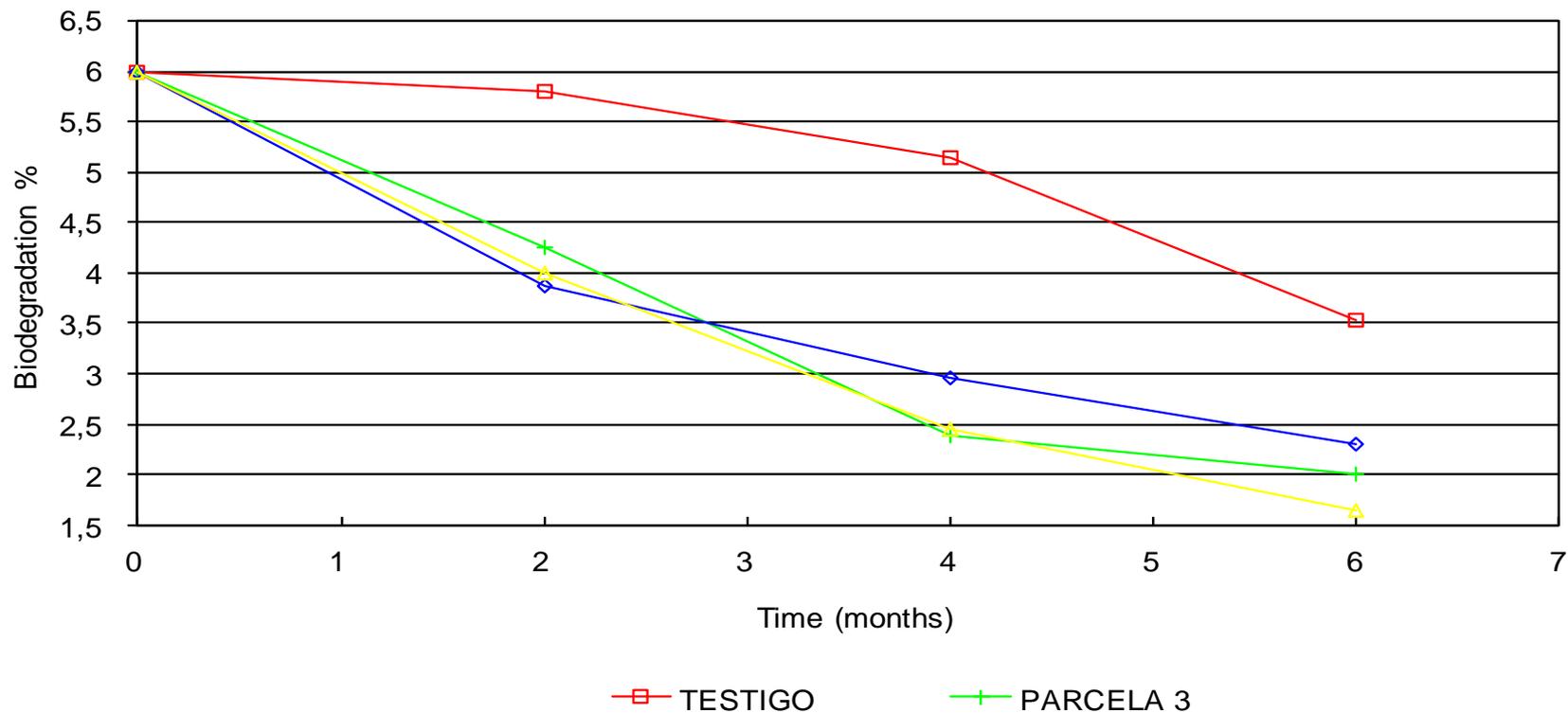






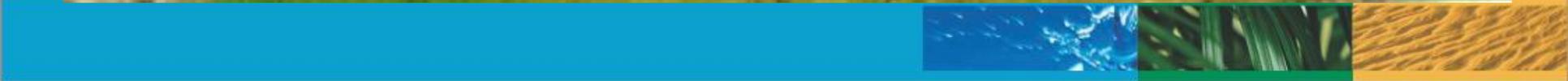


# Degradabilidad de Hidrocarburo



**C : N : P : K**



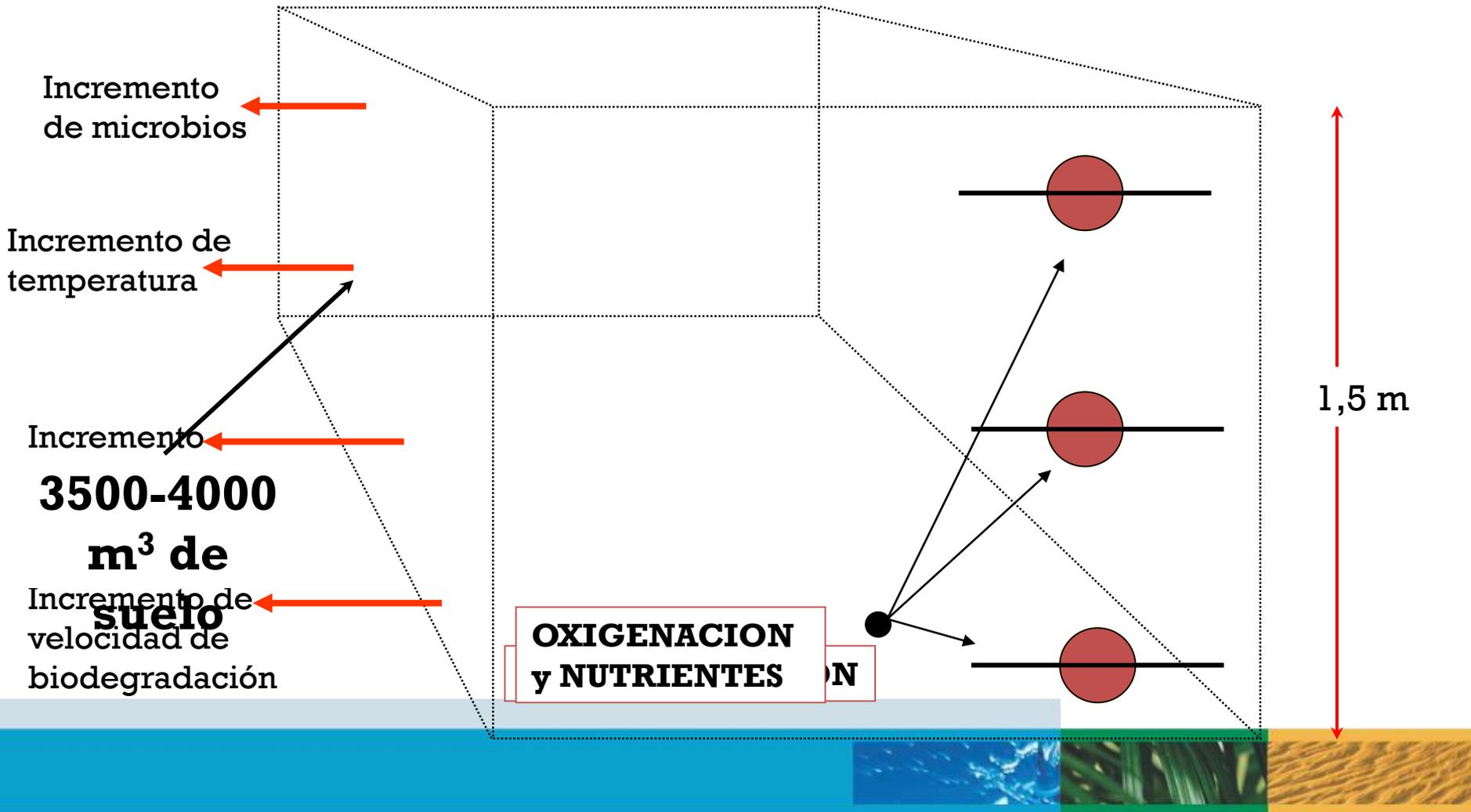


Tratamiento de suelos con  
hidrocarburos por la técnica  
de

Biopilas

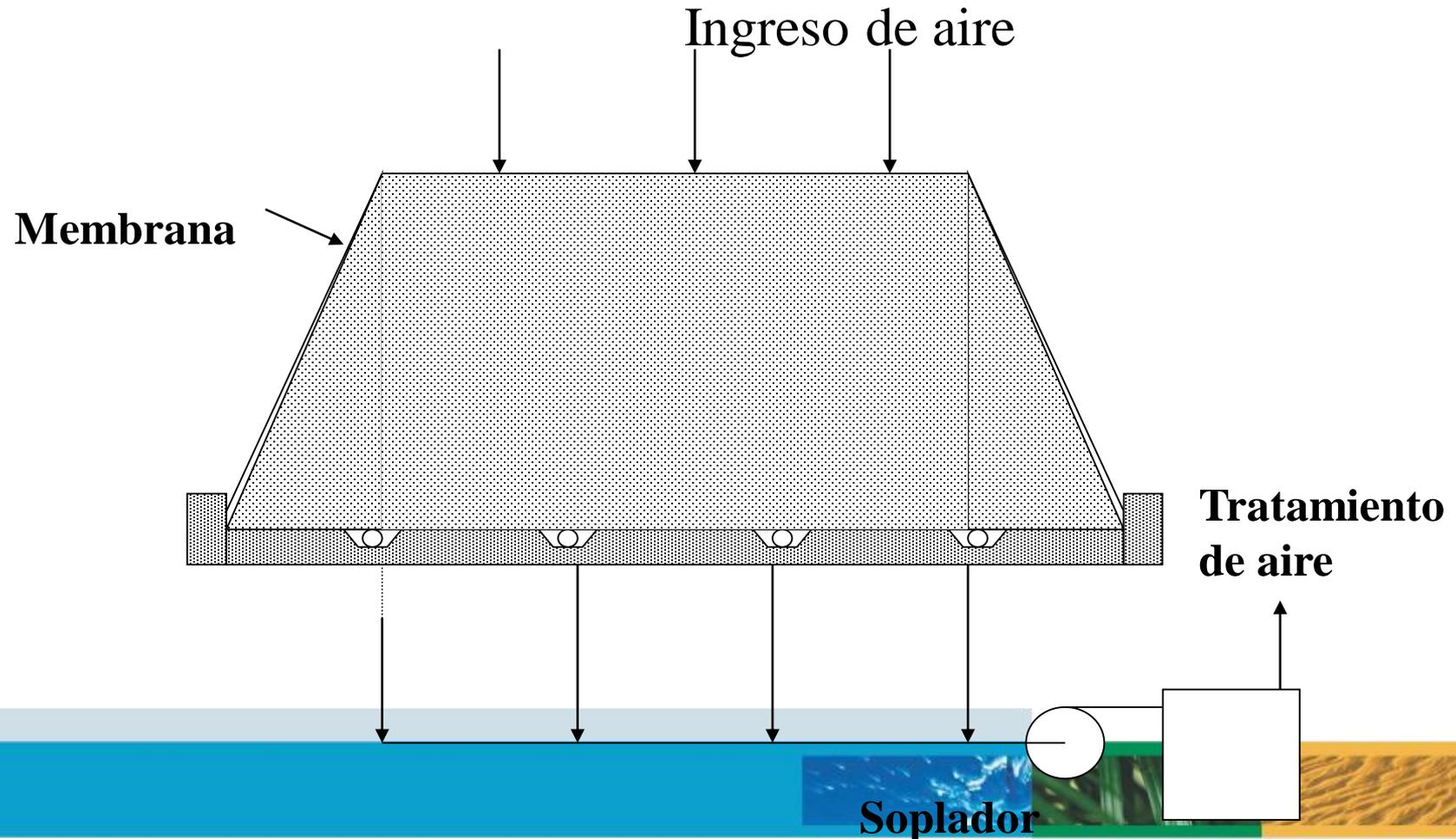


# UNIDAD DE PROCESO BIOPILA *modelo conceptual*



# Tratamientos de Suelos empetroados

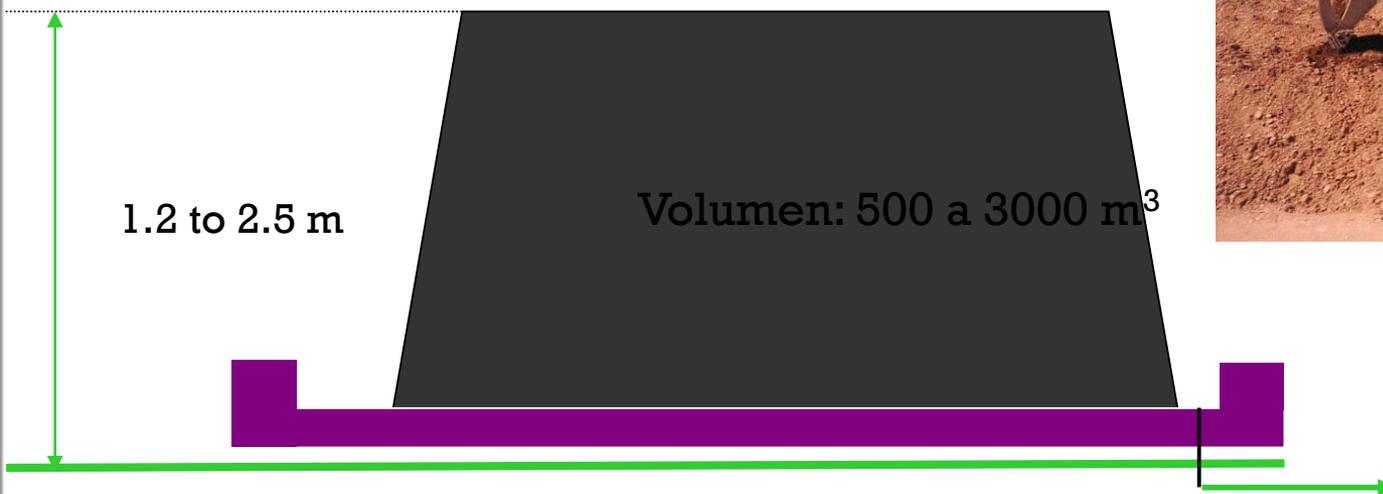
- Biopila (Sistema Neumático)



# Biopila aireada por remoción mecánica

1.2 to 2.5 m

Volumen: 500 a 3000 m<sup>3</sup>



# Secuencia de aireación y remoción



# Sitio de tratamiento en la Patagonia (vista aérea)



# Vistas de detalle de biopilas



## Incorporación de nutrientes



# Biopilas Aireadas por Remoción Mecánica

## Características

- Intensa actividad biológica
- Alto consumo de fósforo
- Alto consumo de nitrógeno
- Incremento de la temperatura

## Ventajas técnicas

- Conservación de la humedad
- Autogeneración de temperatura
- Retención de temperatura
- Amplio rango de aplicabilidad
- Alta velocidad de degradación
- No incremento de volumen de suelo

## Ventajas adicionales

- Escaso requerimiento de área
- Modesto esfuerzo constructivo
- Fácil recolección de lixiviado



# La biorremediación por biopilas no es la panacea

Está limitada a

- materiales que pueden ser tratados: SUBSTANCIAS ORGÁNICAS
- las condiciones del sitio
- la disponibilidad de tiempo

## Es adecuada para:

- Compuestos orgánicos volátiles
- Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos
- Compuestos fenólicos
- Hidrocarburos aromáticos policíclicos, HAPs simples
- Hidrocarburos de petróleo
- Compuestos nitroaromáticos

## No es adecuada para:

- Metales (con ciertas restricciones)
- Hidrocarburos aromáticos policíclicos, HAPs complejos
- Hidrocarburos clorados

Se utilizan en Europa y América



Tratamiento de suelos con  
hidrocarburos por la técnica  
de

# Compostaje



# COMPOSTAJE

Suelo  
contaminado

Enmiendas  
orgánicas

Residuos  
vegetales

Actividad microbiana termofílica  
**54-65 °C**

Proceso biológico aeróbico, mediante el cual los microorganismos actúan sobre la materia rápidamente biodegradable (restos de cosecha, excrementos de animales y residuos urbanos), permitiendo obtener "compost", abono para la agricultura

•Factores: temperatura, humedad, pH, oxígeno, relación C/N equilibrada, población microbiana



## Aplicabilidad

El Compostaje es aplicable a suelos y sedimentos contaminados con compuestos orgánicos biodegradables.

Proyectos piloto y en escala de trabajo han demostrado que el compostaje es capaz de reducir la concentración de explosivos como TNT a niveles aceptables.

El compostaje termofílico aeróbico es aplicable a suelos contaminados con HAPs.

## Limitaciones

- se requiere espacio generalmente grande
- se requiere excavar el suelo y puede haber desprendimiento de volátiles
- el compostaje resulta en un incremento de volumen
- no se pueden tratar metales pesados



# Fases del compostaje

En el proceso de compostaje, los microorganismos degradan la materia orgánica produciendo dióxido de carbono, agua, calor y humus. En condiciones óptimas este proceso se cumple en tres etapas:

- Fase de temperatura moderada o mesófila: en esta etapa que dura pocos días se degradan los compuestos solubles aumentando la temperatura rápidamente
- Fase de temperatura alta o termófila: durante este período se degradan proteínas, grasas y carbohidratos complejos como celulosa y hemicelulosa
- Fase de maduración: esta etapa es mesófila, es decir de temperaturas bajas y en ella se completa la maduración del compost degradándose la materia orgánica remanente.



## Parámetros Químicos:

### Relación Carbono – Nitrógeno

De todos los elementos necesarios para la descomposición microbiana, el carbono y el nitrógeno son los más importantes. El carbono es la fuente de energía de los microorganismos y constituye el 50% de la masa celular. El nitrógeno es un componente crítico para el crecimiento y la función celular debido a que forma parte de las proteínas, ácidos nucleicos, aminoácidos, enzimas y coenzimas.

La relación C/N más adecuada para compostaje es de **30:1**. Si la relación es baja se produce liberación de amoníaco, causando olores desagradables y si la relación es alta el proceso de degradación es más lento por la falta de nitrógeno para el crecimiento.



## **Oxígeno**

Es esencial para el éxito del compostaje. Aunque en la atmósfera la concentración es de 21%, los microbios pueden sobrevivir a concentraciones de hasta 5%, el óptimo para mantener un compostaje aeróbico es del 10%.

## **Balance de nutrientes**

El Fósforo, Potasio y minerales traza como Calcio, Hierro, Boro y Cobre son esenciales para el metabolismo microbiano. En un compostaje estos nutrientes no están limitados ya que se encuentran presentes en amplias concentraciones en los materiales compostados.

## **pH**

El pH óptimo para un compostaje se encuentra entre 5.5 y 8.5.



## Temperatura

El calor en un compost es uno de los productos de la degradación microbiana. La producción de calor depende del tamaño de la pila, del contenido de humedad, aireación y relación C/N.

## Tamaño de partícula

La actividad microbiana ocurre generalmente en la superficie de las partículas orgánicas. A medida que disminuye el tamaño de partícula, aumenta el área y por ello se incrementa la velocidad de descomposición. Sin embargo a medida que las partículas son más pequeñas tienden a compactarse impidiendo la circulación de aire y provocando la inhibición de los microorganismos.

El tamaño de partícula también afecta a la disponibilidad del carbono y nitrógeno. Por ejemplo la viruta de madera es un buen agente **porosante** que ayuda a mejorar la aireación de la pila pero provee de menos carbono disponible que si utilizáramos aserrín.



## Tamaño y forma del sistema

El tamaño de la pila debe ser suficientemente grande para permitir la disipación del calor y la humedad sin comprometer la eficiencia de la circulación de aire.

La forma de la pila ayuda a controlar el contenido de humedad. En regiones húmedas con sistemas al aire libre pueden necesitar protección contra las lluvias, en regiones áridas las pilas deben construirse con la parte superior cóncava para captar agua proveniente de las lluvias o la incorporada

## Recubrimiento de las pilas

Se utilizan para prevenir que las lluvias entren en contacto con las pilas. La cubierta debe permitir el intercambio de gases entre la atmósfera y el compost, permitiendo también las maniobras de la maquinaria.

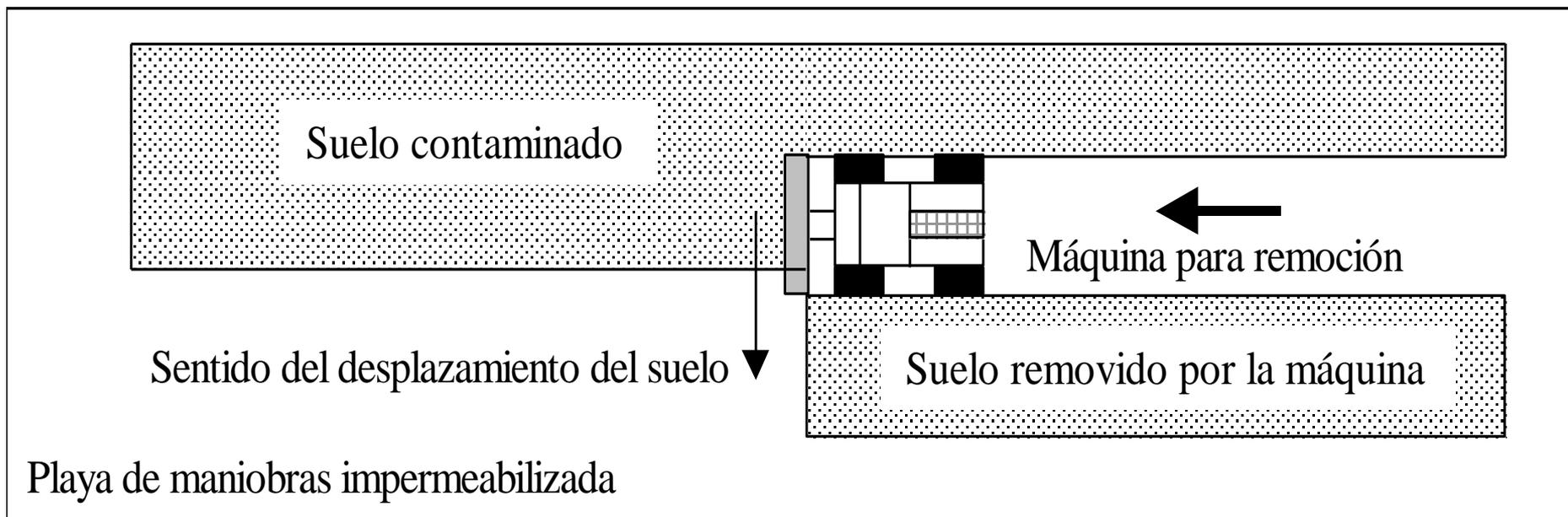


## **Propiedades del Compost**

- ◆ La materia orgánica favorece la estabilidad de la estructura del suelo, reduce la densidad aparente, aumenta la porosidad y permeabilidad, y aumenta su capacidad de retención de agua en el suelo
- ◆ Aumenta el contenido en macronutrientes N, P, K, y micronutrientes, la capacidad de intercambio catiónico (C.I.C.) y es fuente y almacén de nutrientes para los cultivos
- ◆ Actúa como soporte y alimento de los microorganismos ya que viven a expensas del humus y contribuyen a su mineralización
- ◆ La población microbiana es un indicador de la fertilidad del suelo.

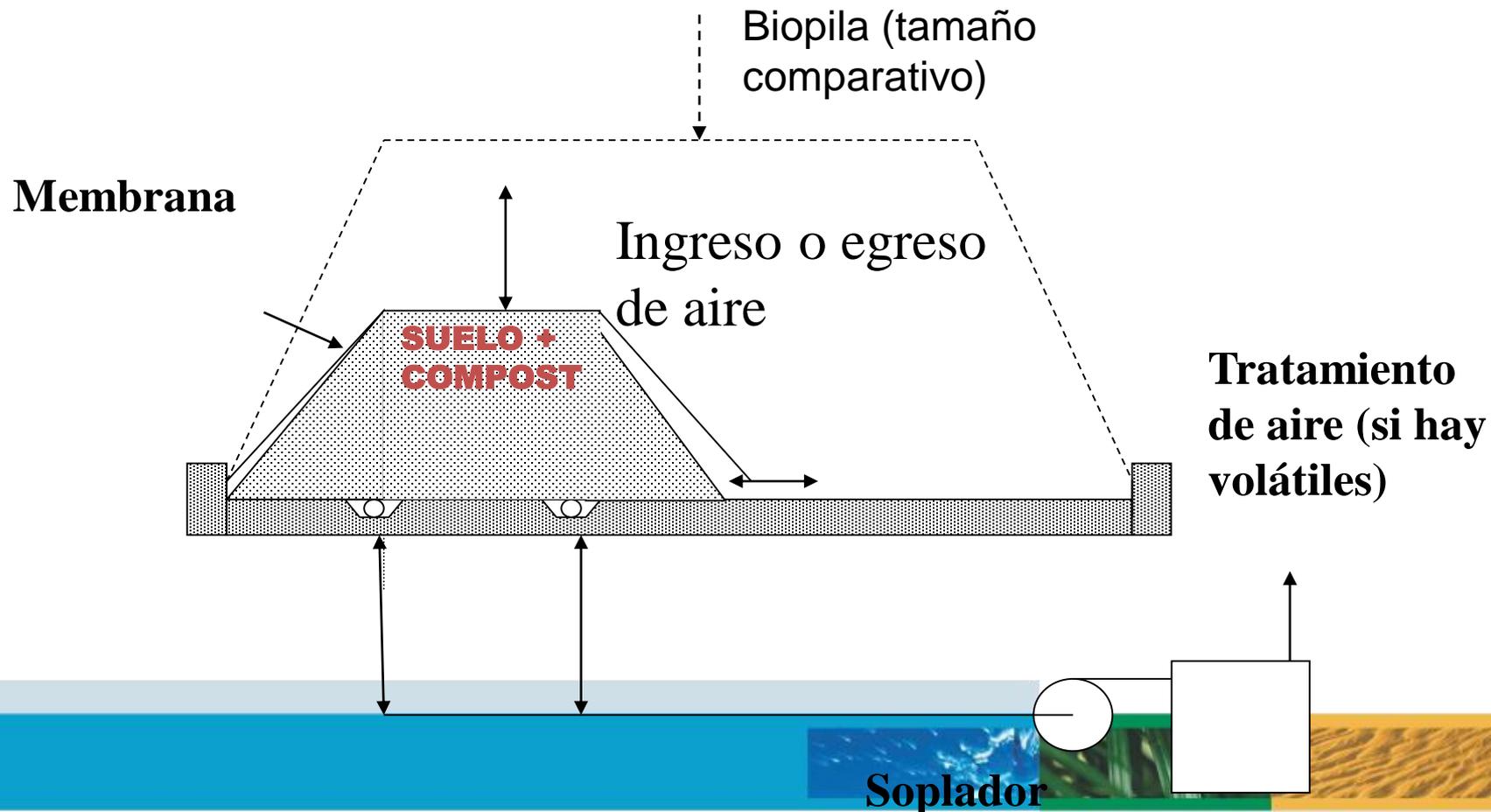


## COMPOSTAJE EN CAMELLONES O WINDROWS



# Tratamientos de Suelos empetroados

- Compostaje (Sistema Neumático)



Tratamiento de suelos con  
hidrocarburos por la técnica  
de  
reactores biológicos



# REACTOR BIOLÓGICO

**Constituye un ambiente mas o menos confinado donde se mantienen las condiciones ambientales adecuadas para el desarrollo de los microorganismos y los procesos metabólicos requeridos para una biotransformación deseada.**

**Se pueden dividir en tres grandes grupos:**

- \* FASE LIQUIDA**
- \* FASE SOLIDA**
- \* FASE SLURRY (LODO)**



# TIPOS DE REACTORES

## FASE SOLIDA

- LANDFARMING
- BIOPILAS
- REACTORES DE COMPOSTAJE
- REACTORES EN LECHO FLUIDIZADO
- REACTORES ROTATORIOS

## FASE SLURRY

- DITS
- REACTORES ROTATORIOS
- REACTORES TANQUE AGITADO
- REACTORES AIRLIFT



## FASE SOLIDA

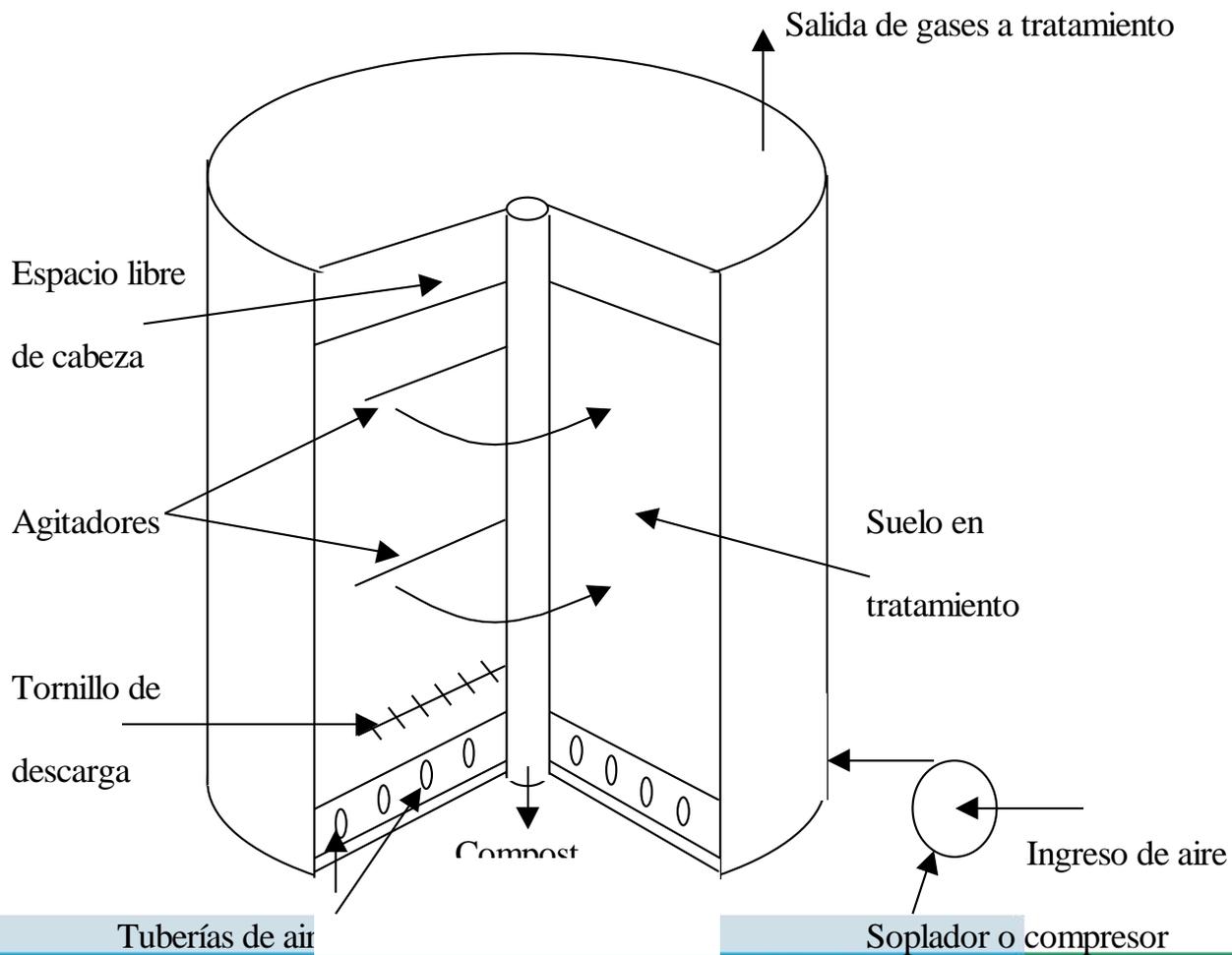
### VENTAJA:

- PERMITEN TRABAJAR A NIVELES DE CONTAMINACION QUE SERIAN TOXICOS EN SISTEMAS DE FASE LIQUIDA
- REQUIEREN UN MINIMO DE AGUA Y MINIMAS OPERACIONES POSTERIORES AL TRATAMIENTO PARA DISPONER EL SUELO
- PUEDEN SOPORTAR MICROORGANISMOS QUE NO DESARROLLAN BIEN EN FASE LIQUIDA
- SON BASTANTE RESISTENTES A LA CONTAMINACIÓN CON OTROS MICROORGANISMOS

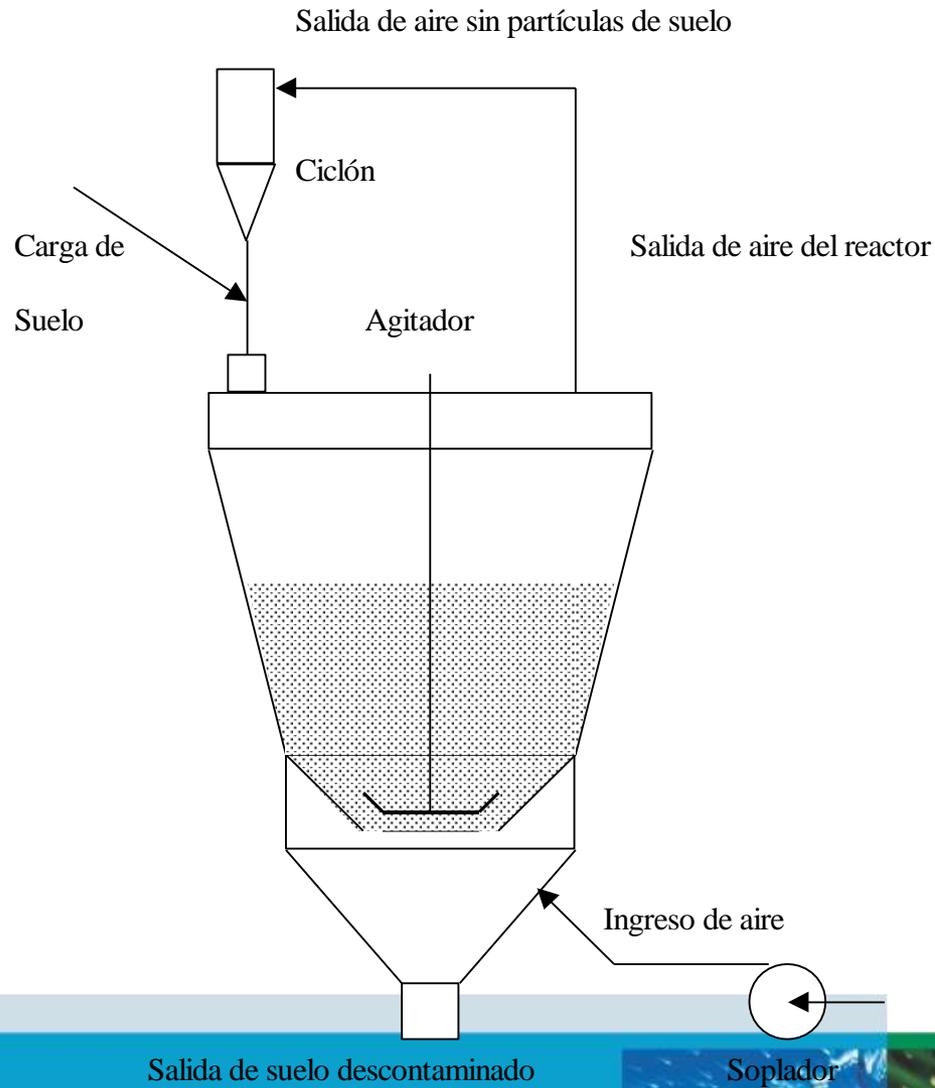
### DESVENTAJAS:

- ALTAS RESTRICCIONES POR TRANSFERENCIA DE MATERIA
- EN LOS REACTORES ROTATORIOS O AGITADOS EXISTE UN FUERTE EFECTO ABRASIVO
- ALTA HETEROGENEIDAD, EN PARTICULAR EN LOS REACTORES ESTÁTICOS

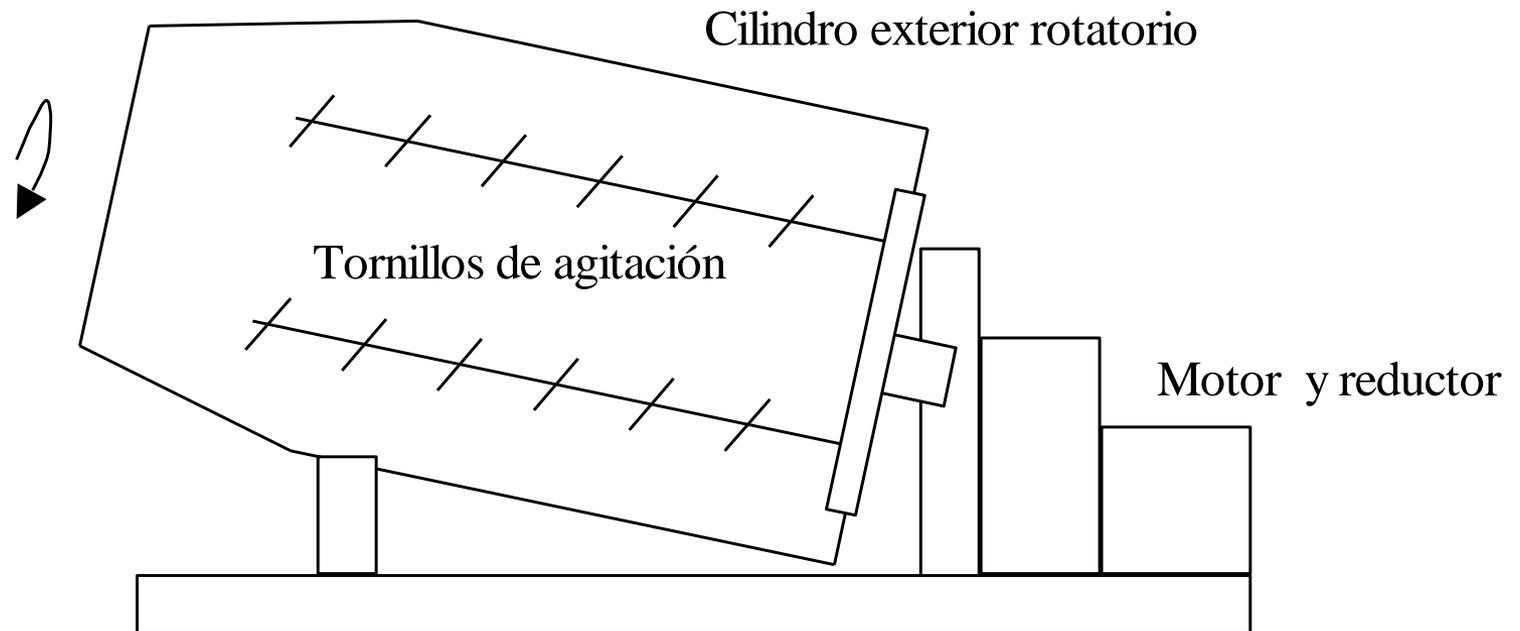
# REACTORES DE COMPOSTAJE



# REACTORES DE LECHO FLUIDIZADO



# REACTORES DE TAMBOR ROTATORIO



## VENTAJAS

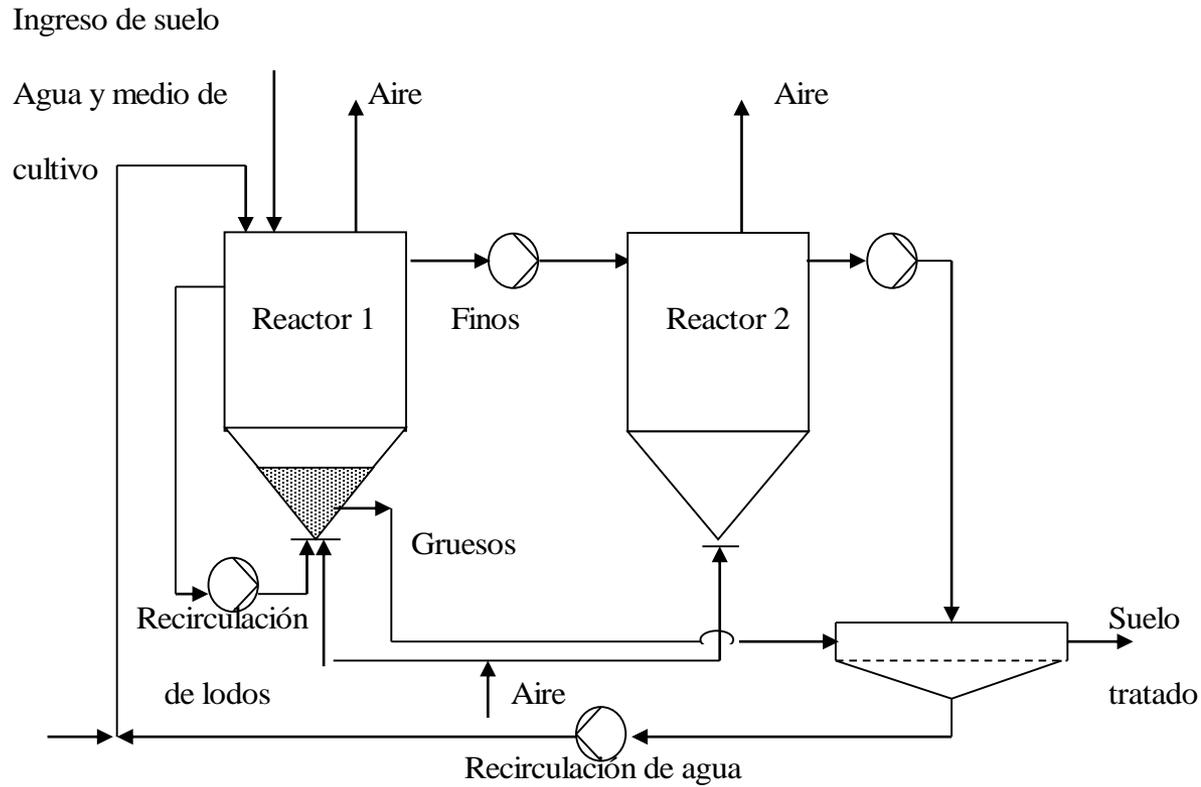
- Control de proceso mayor y mas uniforme
- Mejora de la solubilización de los productos químicos
- Rotura física de las partículas suelo lodo
- Incrementa el contacto entre microorganismos y contaminantes
- Posibilita el uso de surfactantes
- Mejora la homogeneidad y la distribución de nutrientes
- Mayores velocidades de degradación
- Permiten hacer uso de microorganismos específicos o bien realizar una bioaumentación controlada

## DESVENTAJAS

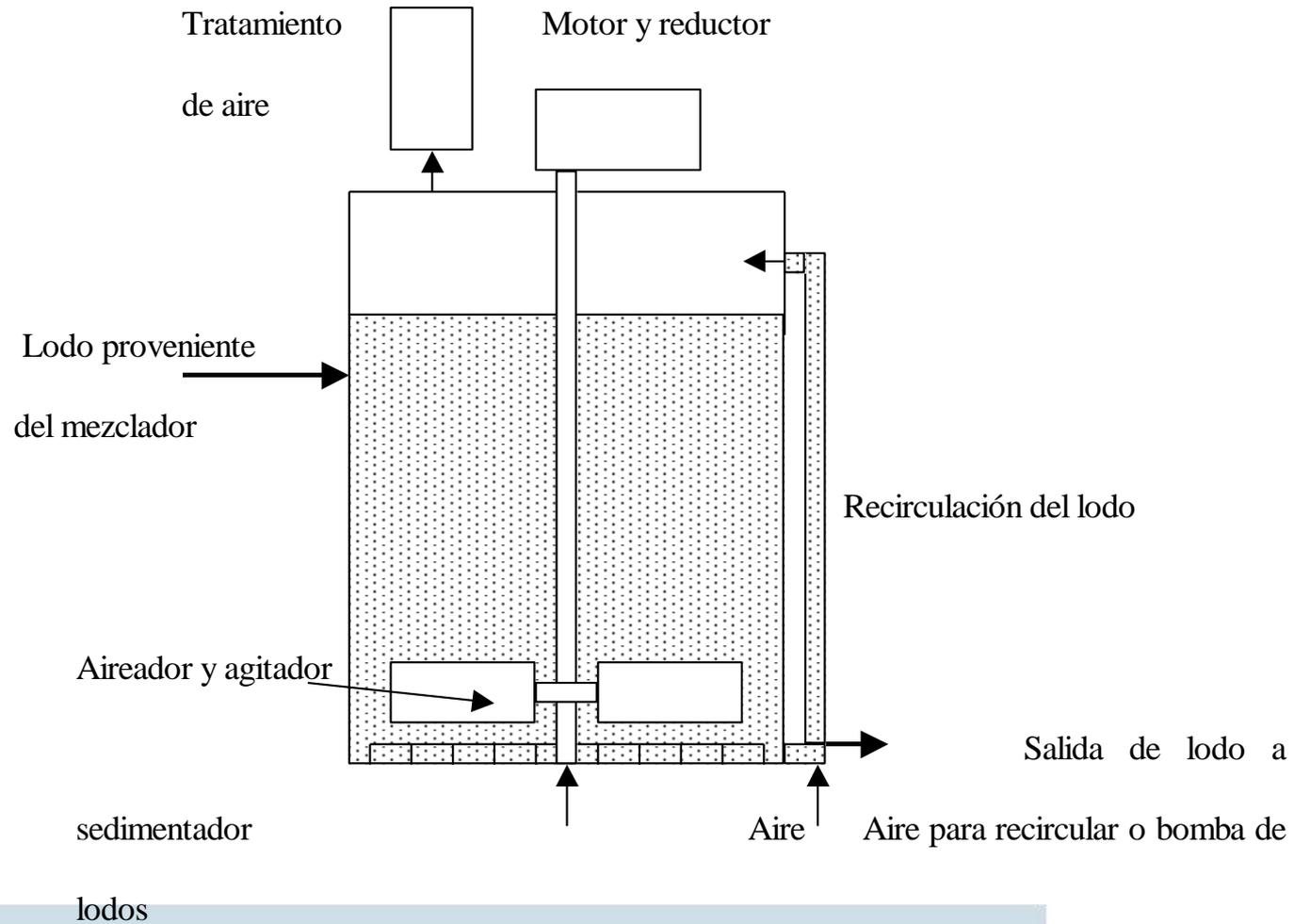
- Tratamiento del lodo resultante y producción de agua residual
- Preparación del suelo a tratar: tamizado, mezclado con agua



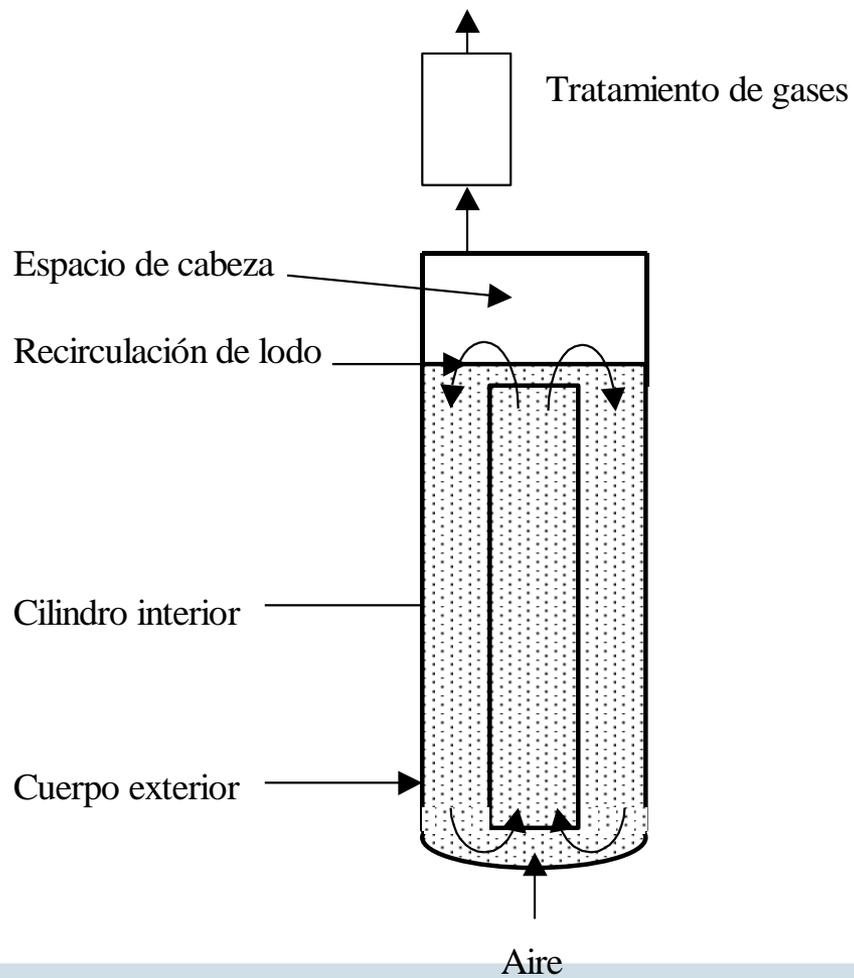
# REACTOR DITS



# REACTOR TANQUE AGITADO

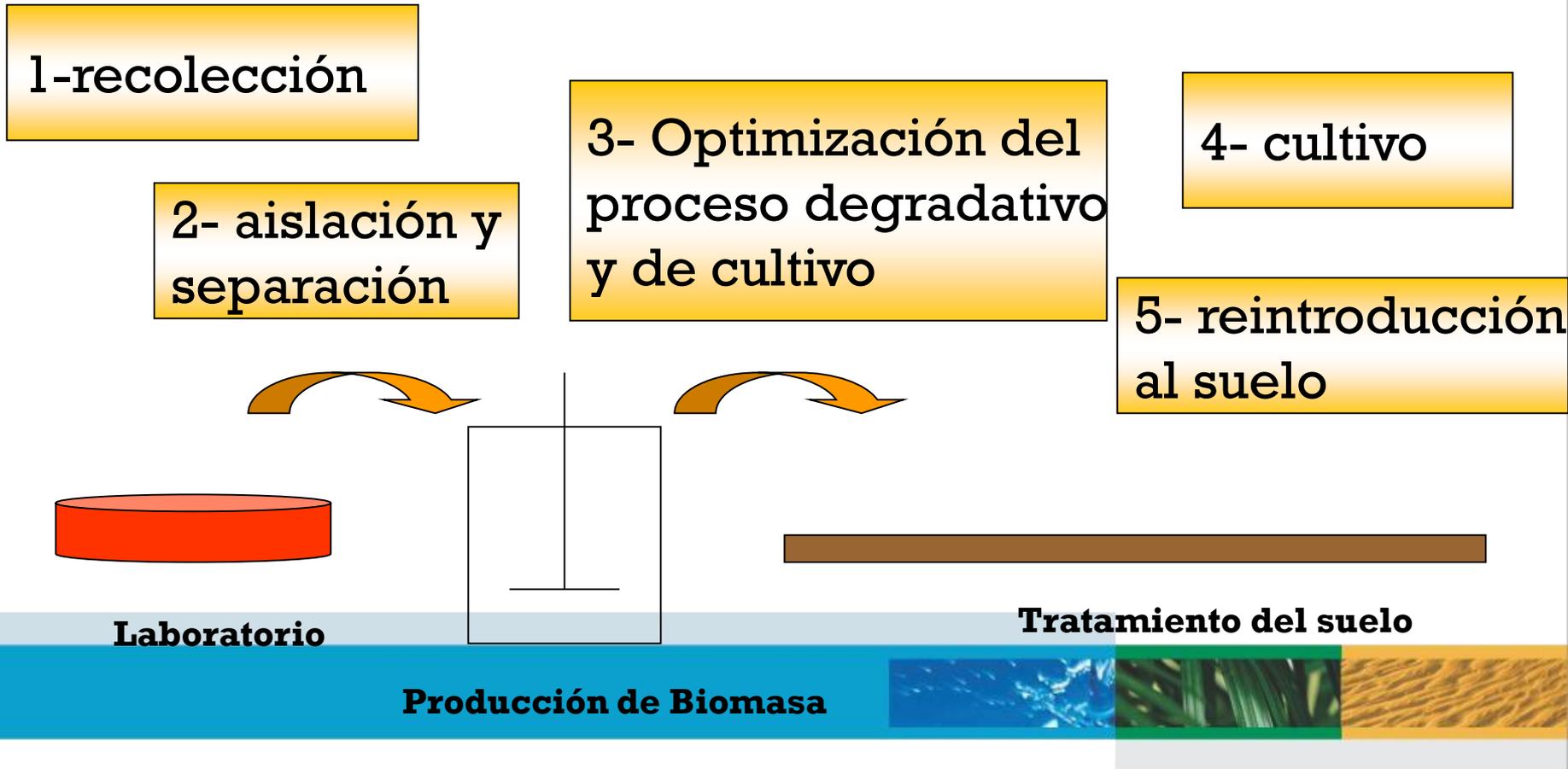


# REACTOR AIRLIFT



Involucra el uso de cultivos microbianos que han sido especialmente desarrollados para degradar:

- Contaminantes específicos
- Grupos de contaminantes



# Reactores para tratamiento de agua superficiales y gases



## Tipos de biorreactores:

**Microorganismos suspendidos:** Los sistemas suspendidos pueden ser lodos activados, lechos fluidizados o reactores discontinuos secuenciales. El agua circula en un sistema donde los microorganismos degradan el contaminante. De acuerdo al tipo de contaminante el tratamiento puede ser anaerobio o aerobio o una combinación secuencial de ambos. Las células forman un lodo que se separa y se dispone o bien se recircula según el caso.

## Microorganismos inmovilizados

En los sistemas inmovilizados el agua se pasa sobre un biofilm adherido a una superficie sólida que puede formar un bioreactor de lecho fijo, un reactor biológico de contacto (RBCs) o un filtro de goteo.

## Nuevas tecnologías:

**Reactores con carbón activado:** libera el contaminante lentamente.

**Humedales**

**Reactores en columna**



**Filtro de goteo: es un sistema que el agua se distribuye sobre un medio filtrante formado por un medio altamente poroso y un sistema de drenaje.**

**El contaminante se degrada aeróbicamente al circular sobre un medio con microorganismos inmovilizados. Las dimensiones del filtro varían de 0,9 a 2,5 m.**

**Posee un sistema de recolección del agua en la parte inferior y puede ser tratada en otro reactor para su purificación**

**La duración del tratamiento y el mantenimiento del sistema de rociado depende de la cantidad de tiempo necesario para tratar el contaminante. Se requiere monitoreo del agua tratada y de la acumulación de metales**



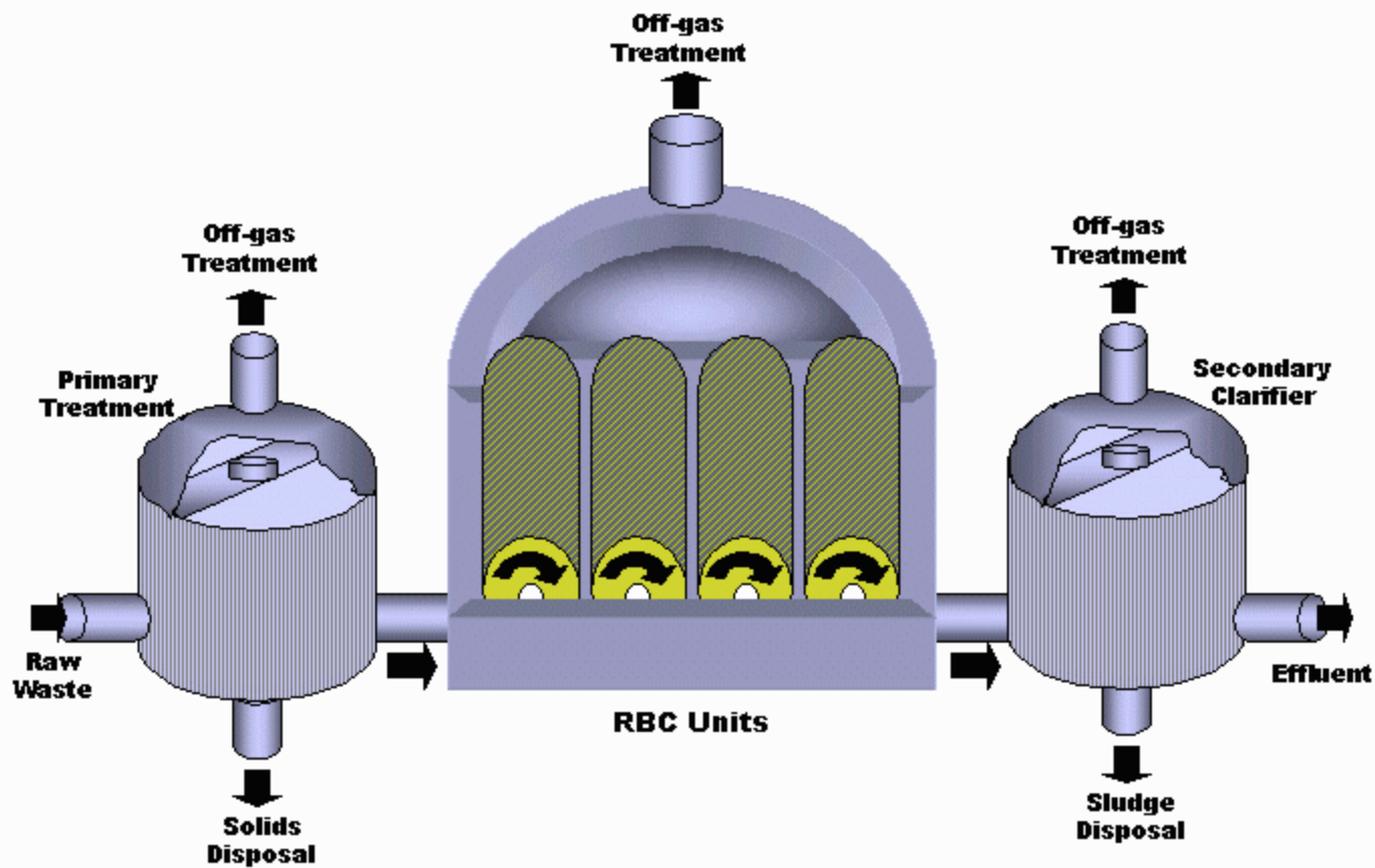
## Aplicación

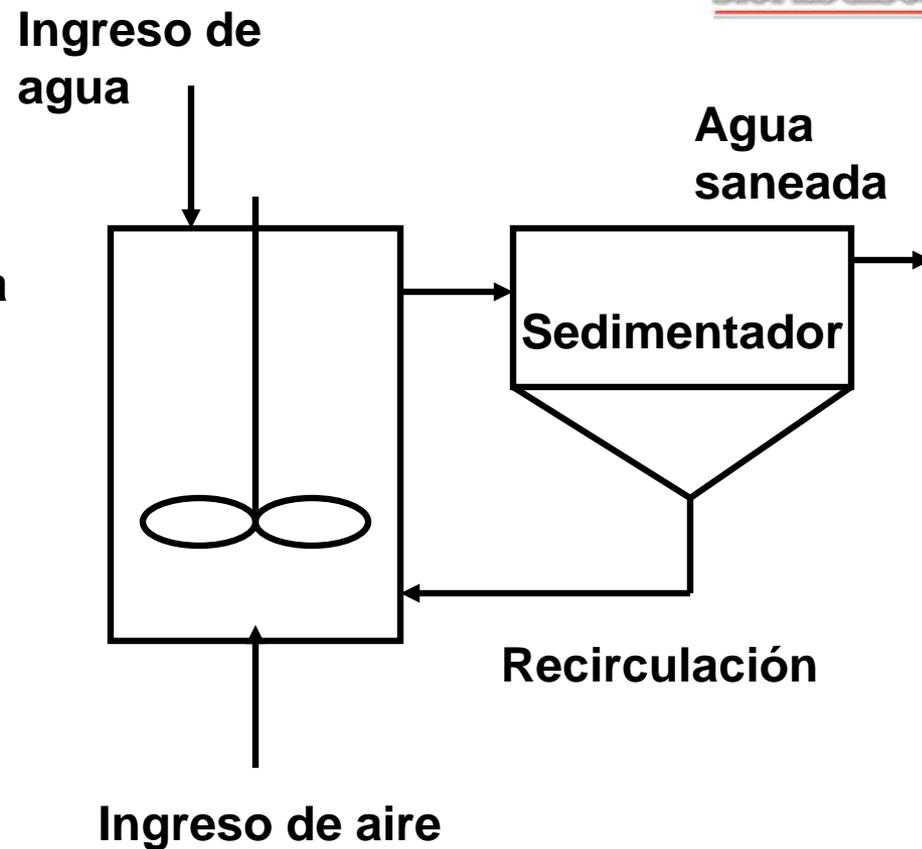
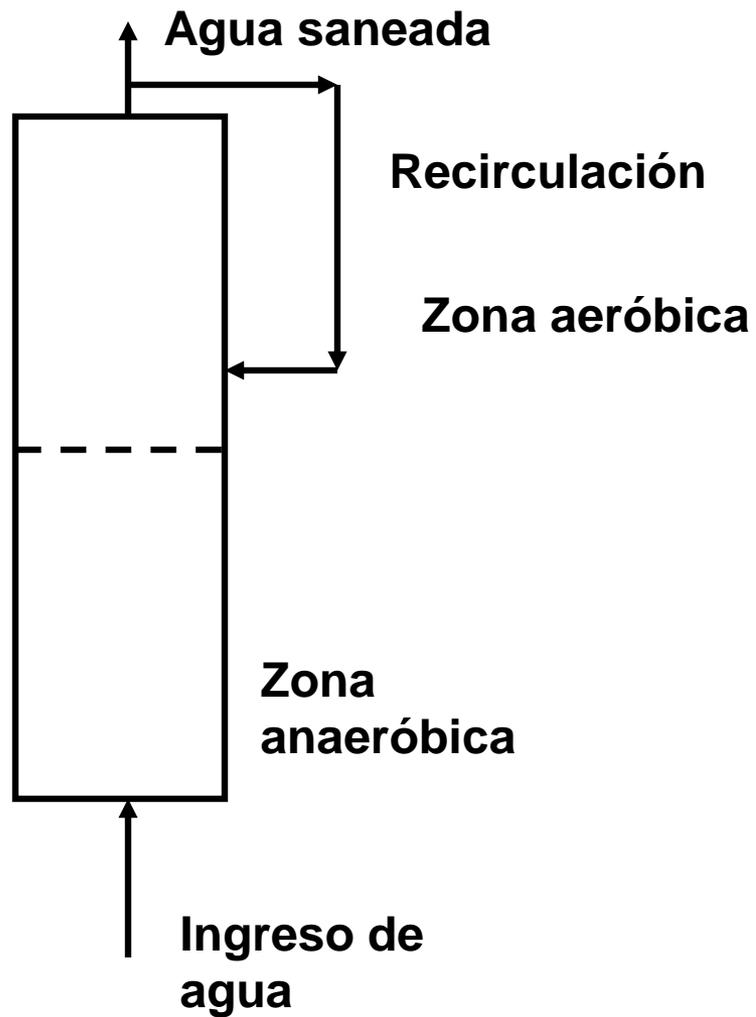
**SVOCs, hidrocarburos (combustibles), y cualquier material orgánico biodegradable. Algunos pesticidas, PCP, clorobenzeno y sus isómeros. Cuando se usan cometabolitos: PCBs, VOCs halogenados, y SVOCs.**

## Limitaciones

- **La dilución en el agua del contaminante frecuentemente no permite mantener una densidad de población adecuada (poco Carbono)**
- **Se deben agregar nutrientes**
- **Hay restricciones para tratar contaminantes muy tóxicos y se requiere un diseño especial.**
- **Se requiere controlar la contaminación del aire en lodos activados.**
- **Si las temperaturas ambientales o el agua es fría se debe calentar el medio para llevar a cabo el proceso.**
- **Estos reactores a veces son colonizados por microorganismos no deseados.**
- **Los lodos residuales requieren tratamiento posterior.**
- **Puede haber problemas de descarga de efluentes**
- **Hace falta inocular el agua.**
- **Se deben agregar nutrientes**
- **Los procesos demoran algunos años**







columna

con recirculación  
biomasa



# Cinética de crecimiento continuo

$$dX/dt = \mu X - DX$$

Donde D es la velocidad de dilución

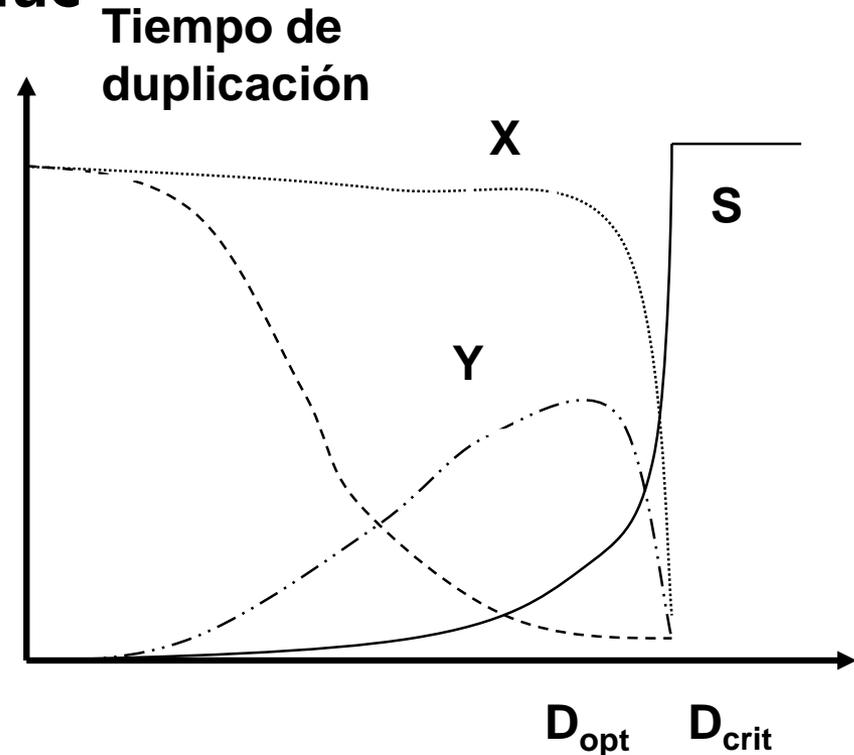
$$D = Q/V$$

Si  $\mu = 0$                        $dX/dt = -DX$

$$dX/dt = \mu_{max} \cdot S \cdot X / (Ks + S) - DX$$

$$Y = (dX/dt)/(dS/dt) = dX/dS$$

$$dS/dt = [\mu_{max} \cdot S \cdot X / (Ks + S) - DX]/Y$$



## Si definimos

$\theta_h$  = tiempo retención hidráulica =  $V/Q$

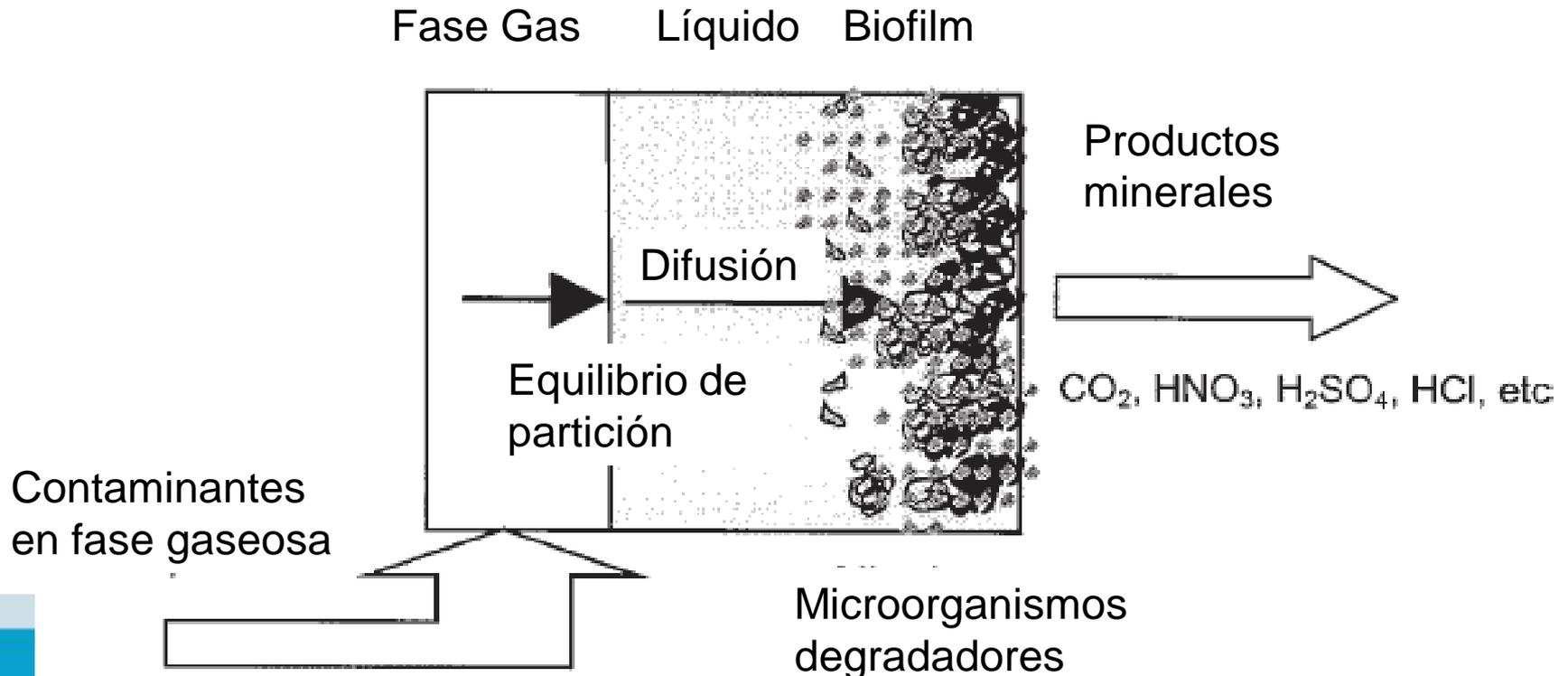
$\theta_c$  = tiempo de retención de sólidos =  $XV/\text{velocidad de eliminación de biomasa}$

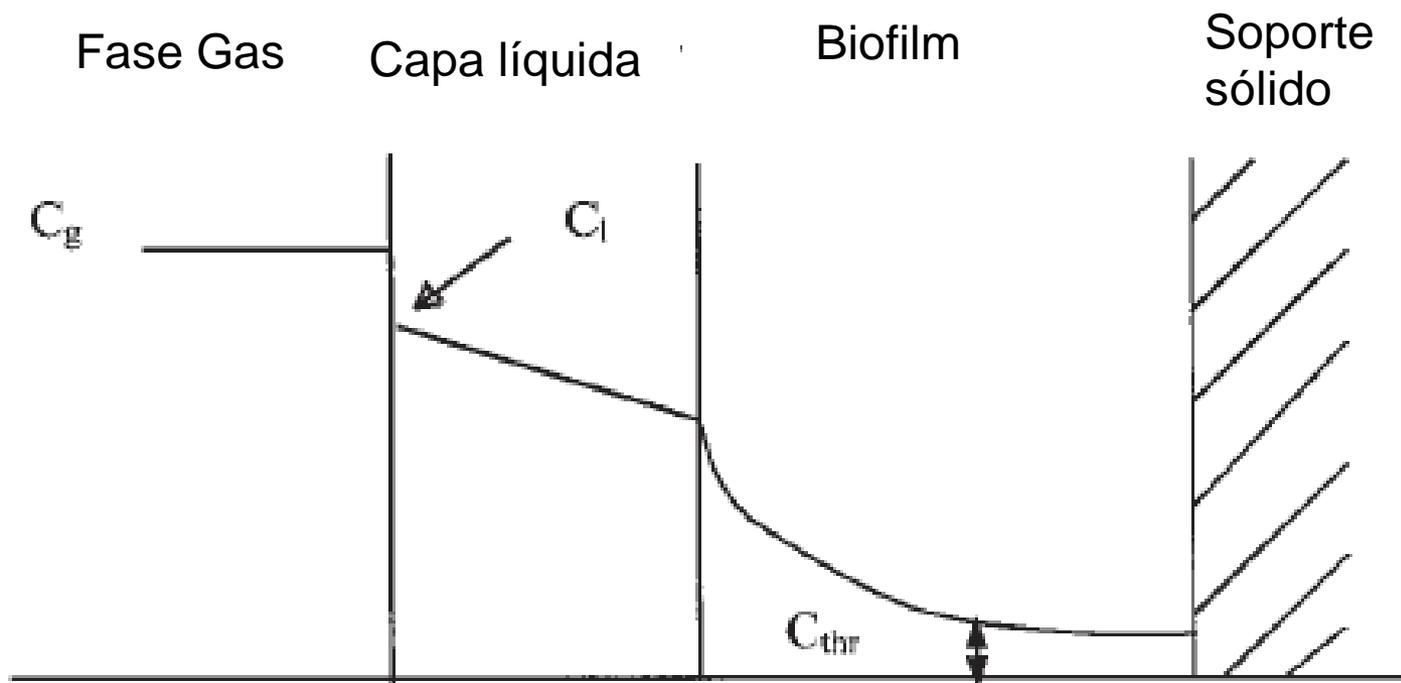
	Mezcla completa sin recirculación de sólidos	Mezcla completa con recirculación de sólidos
Concentración sustrato efluente	$S = K_s (1 + b \theta_c) / \theta_c (Yk - b) - 1$	$S = K_s (1 + b \theta_c) / \theta_c (Yk - b) - 1$
Concentración de biomasa	$X = Y(S_0 - S) / (1 + b \theta_c)$	$X = Y(S_0 - S) \theta_c / (1 + b \theta_c) \theta_h$
Tiempo crítico de retención de sólidos	$1 / (\theta_c)^M = YkS_0 / (K_s + S_0) - b$	$1 / (\theta_c)^M = YkS_0 / (K_s + S_0) - b$
Concentración del material inerte en el reactor	$I = I_0$	$I = I_0 \theta_c / \theta_h$



# PURIFICACIÓN BIOLÓGICA DE GASES

Consiste en disolver un gas contaminante arrastrado por una corriente en agua y luego degradarlo por los microorganismos presentes en el líquido o adherido sobre un soporte sólido





## Disolución del gas al líquido. Cte o coeficiente de Henry

$$K_H = \frac{C_g}{C_l} \qquad \ln K_H = \frac{a}{T} + b * Z + c \qquad S = \frac{C_m}{C_g}$$

$C_g$  = concentración en gas

$C_l$  = concentración en líquido

$T$  = temperatura absoluta

$Z$  = concentración de sales

$C_m$  = concentración en membrana

$S$  = coeficiente de solubilidad

<i>Compound:</i>	<i>Ethanol</i>	<i>Butanone</i>	<i>Isobuteral- dehyde</i>	<i>Dimethyl- sulfide</i>	<i>Trichloro- ethene</i>	<i>Limonene</i>	<i>Hexane</i>
$K_H$ (25 °C)	0.00021	0.0023	0.0074	0.0658	0.403	0.82	74

## Difusión en el líquido

$$J = -D * \frac{dC_l}{dx}$$

$J$ : Mol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> o g m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>

$D$ : m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>

<i>Compound</i>	$D_{air}$ (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )	$D_{water}$ (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )	<i>Membrane Material</i>	$D_{membrane}$ (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )
Oxygen			natural rubber	$2.5 \times 10^{-10}$
Oxygen (25 °C)	$1.40 \times 10^{-5}$	$2.50 \times 10^{-9}$	polydimethyl siloxane (35 °C)	$4.0 \times 10^{-9}$
Ethanol	$1.24 \times 10^{-5}$	$1.13 \times 10^{-9}$	poly(vinyl acetate)	$1.5 \times 10^{-13}$
CO <sub>2</sub>	$1.64 \times 10^{-5}$	$2.00 \times 10^{-9}$	PMDA-MDA (20 °C)	$9.0 \times 10^{-13}$
Benzene	$1.20 \times 10^{-5}$	$1.30 \times 10^{-9}$	poly(vinyl acetate)	$4.8 \times 10^{-17}$



## Degradación biológica del contaminante

Ecuación de Monod modificada

$$\frac{dC_l}{dt} = \left( \frac{\mu}{Y_{xs}} \right) * X$$

$X$  : concentración de biomasa  $\text{g m}^{-3}$

$Y_{xs}$  = rendimiento o productividad biomasa sustrato

$C_l$  concentración del contaminante en fase líquida  $\text{g m}^{-3}$

$\mu$  : Velocidad de crecimiento  $\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$

Ecuación de Monod

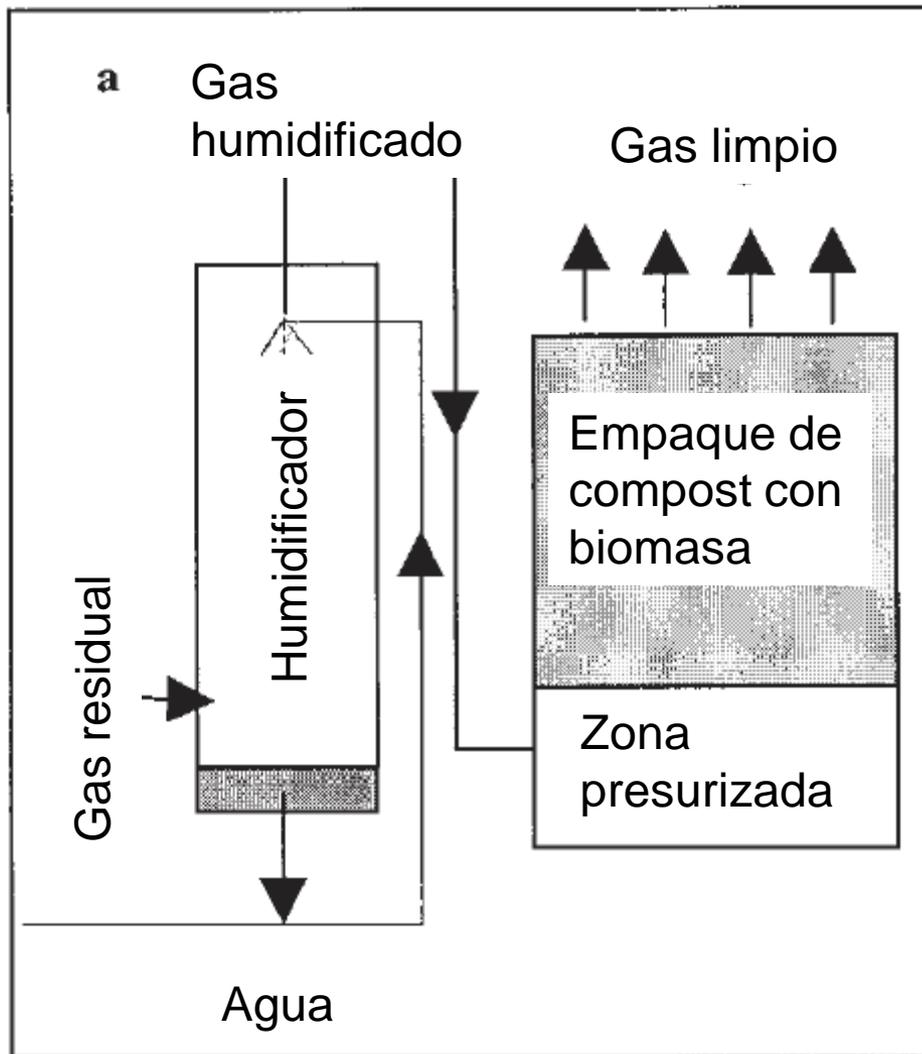
$$-\frac{dC_l}{dt} = K * \frac{C_l}{K_s + C_l}$$

$K$  : velocidad máxima de crecimiento

$K_s$  : Concentración de sustrato a la cual la velocidad de crecimiento es la mitad de la máxima

$$-\frac{dC_l}{dt} = k * C_l$$





## Biofiltro



La partícula de compost está rodeada por una capa de agua y bolsas de gas en el biofiltro



Combinando según Ottengraf y Van Den Oever para un biofiltro

$$\frac{C_{gsal}}{C_{gin}} = 1 - \frac{A_s H}{U_g} * \sqrt{\frac{kD}{2Cgin_m}}$$

$A_s$ : área específica ( $m^2/m^3$ )

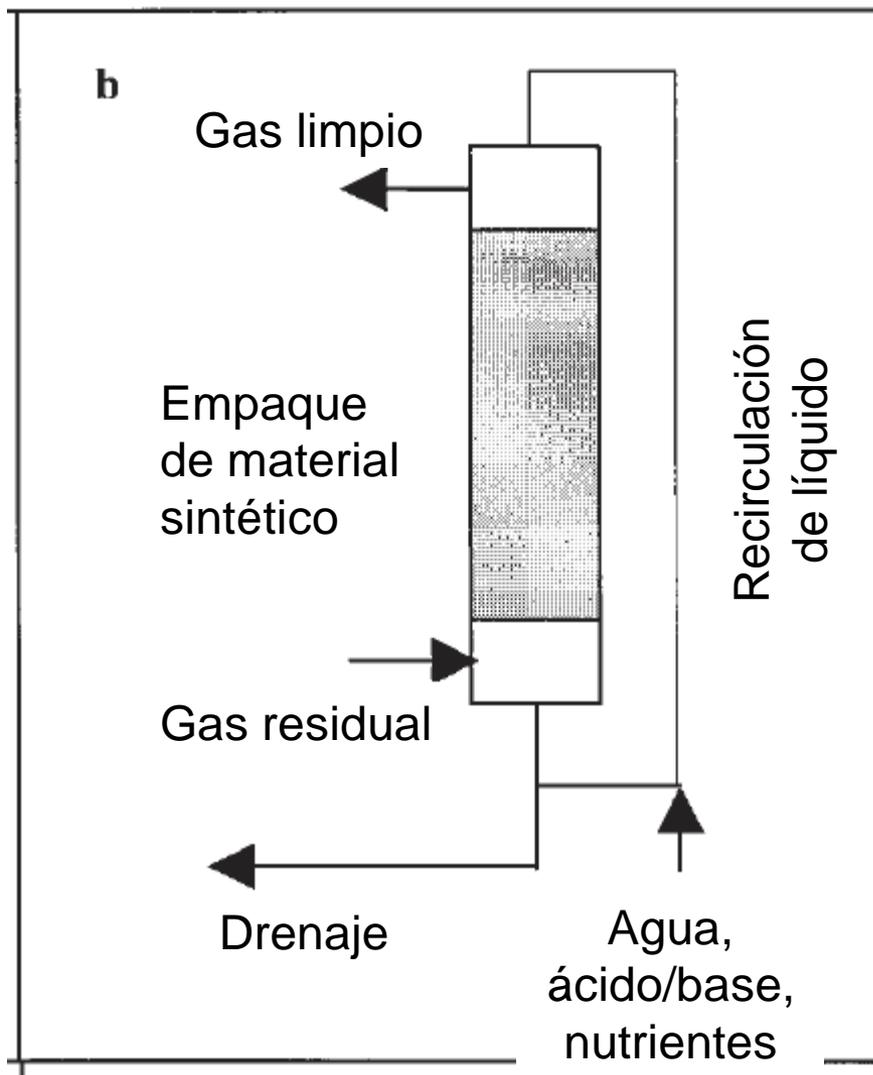
$D$  coeficiente de difusión ( $m^2/s^{-1}$ )

$H$  altura en metros

$U$  velocidad superficial del gas  $m^2s^{-1}$

$m$  coeficiente de distribución



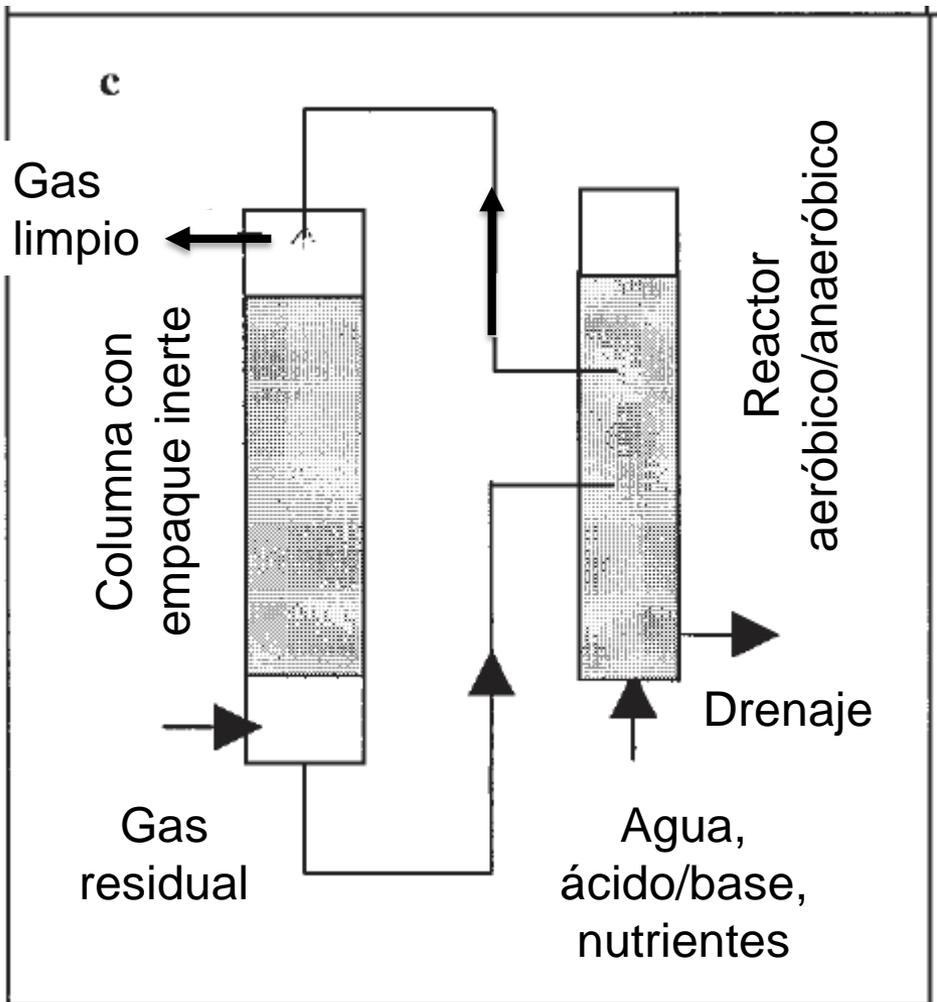


## Biofiltro de lecho empacado

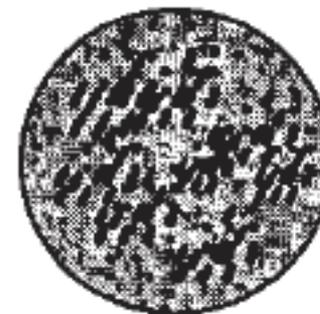


El empaque de material sintético esta parcialmente cubierto por agua, biomasa y gas



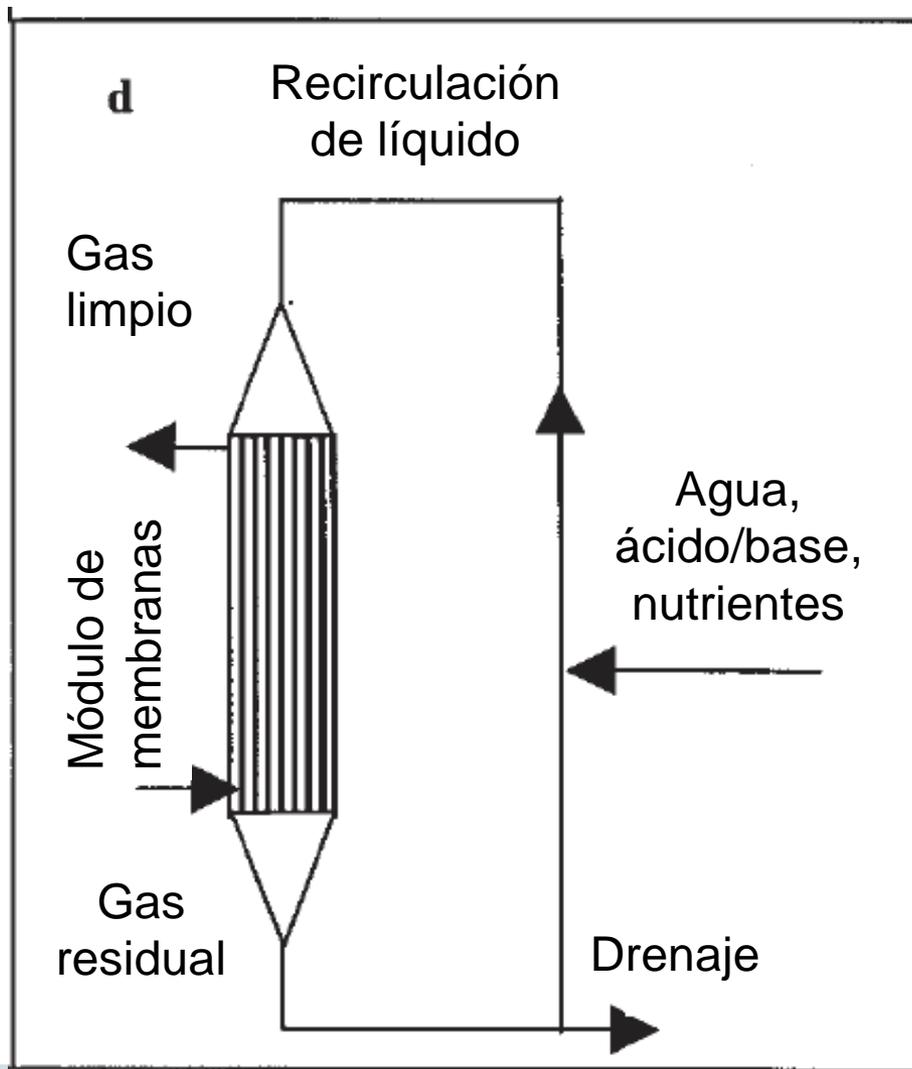


## Bio scrubber

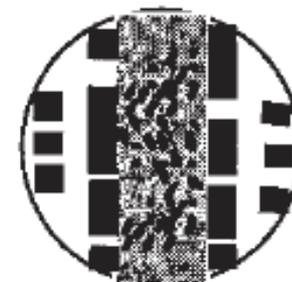


Flóculos o gránulos de bacterias en el bioreactor de bioscruber





## Bioreactor de membrana



Módulo de membrana con biomasa y fluido nutritivo en el interior del tubo y gas en el exterior



# Parámetros a considerar

- Tiempo de contacto real o tiempo de contacto de reactor vacío

$$T = 3600 * \frac{V}{Q} \quad V : \text{volumen del material de filtro, } Q : \text{caudal}$$

$$T = \varepsilon * 3600 * \frac{V}{Q} \quad \varepsilon : \text{porosidad real}$$

- Velocidad de carga superficial

$$B_A = \frac{Q}{A} \quad A \text{ área superficial del lecho}$$

- Tasa de carga de masa

$$B_V = Q * \frac{C_{gin}}{A} \quad C_{gin} \text{ concentración del gas a la entrada}$$



# Parámetros a considerar

- Tasa de carga volumétrica

$$V_s = \frac{Q}{V}$$

- Capacidad de eliminación

$$CE = Q * \frac{Cg_{in} - Cg_{sal}}{V}$$

$Cg_{sal}$  concentración de gas a la salida

- Eficiencia de remoción

$$ER = \frac{Cg_{in} - Cg_{sal}}{Cg_{in}} * 100$$



Parámetro	Biofiltro	Biofiltro de lecho empacado	Bioscurbber
Concentración de contaminante (g/m <sup>3</sup> )	<1	<0,5	<5
Constante de Henry	<10	<1	<0,01
Tasa de carga superficial (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> h <sup>-1</sup> )	50-200	100-1000	100-1000
Tasa de carga másica (gm <sup>-3</sup> h <sup>-1</sup> )	10-160	<500	<500
Tiempo de contacto en lecho vacío (s)	15-60	<500	<500
Tasa de carga volumétrica (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> h <sup>-1</sup> )	100-200		250-580
Capacidad de eliminación (gm <sup>-3</sup> h <sup>-1</sup> )	10-160		
Eficiencia de remoción (%)	95-99		85-90



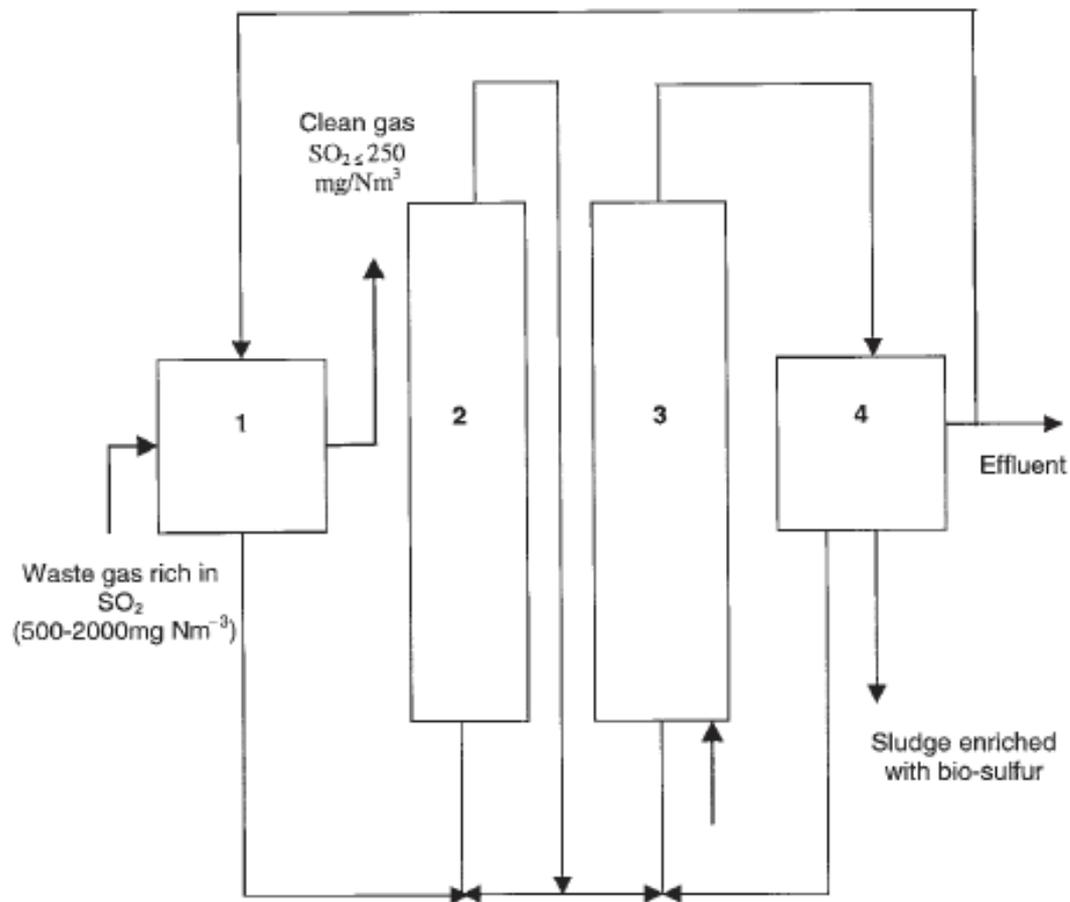


Fig. 17.4 Conversion of SO<sub>2</sub> by means of sulfate reduction and subsequent sulfide oxidation reactors to biologically formed elemental sulfur (after Grootaerd et al., 1977). 1: absorption of SO<sub>2</sub> gas; 2: sulfate reduction; 3: partial oxidation of hydrogen sulfide; 4: separation of sludge enriched with biosulfur.