



*Humedales artificiales: Una alternativa para el postratamiento de aguas residuales agroindustriales. Parte 1. Conceptos y resultados en el sector cafetero.*



**Nelson Rodríguez Valencia.**  
**Investigador Científico III.**  
**FNC - Cenicafé.**

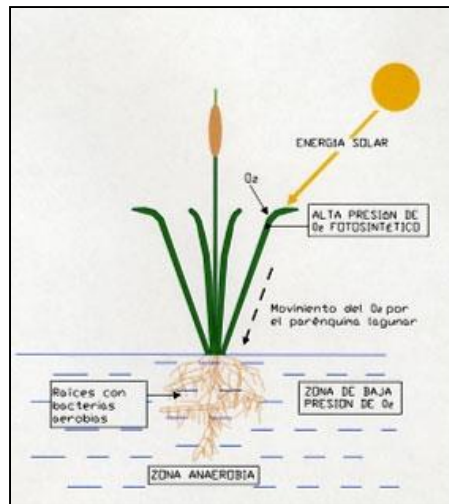
# Contenido de la presentación

1. Sistemas de tratamiento natural de aguas residuales
2. Definición de un humedal para el tratamiento de aguas residuales
3. Componentes de un humedal artificial
4. Clasificación de los humedales artificiales
5. Mecanismos de remoción de los contaminantes en un humedal artificial
6. Ventajas y desventajas de los humedales artificiales en el tratamiento de aguas residuales
7. Tipos de plantas acuáticas utilizadas con frecuencia en los humedales artificiales
8. Diseño y construcción de humedales artificiales
9. Experiencias del uso de humedales artificiales en el postratamiento de las aguas residuales del café
10. Aprovechamiento de la biomasa generada en los humedales artificiales



# 1. Sistemas de tratamiento natural de aguas residuales

## ¿Qué son?

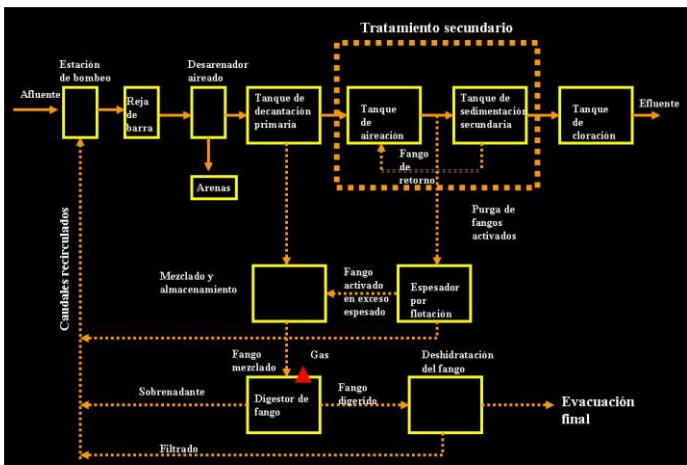


Esquema SAT (Fernández, 2005).

➤ Son aquellos sistemas en los cuales se presenta una interacción entre el agua a tratar con el suelo, las plantas, los microorganismos y la atmósfera.

➤ En estos sistemas intervienen muchos de los procesos utilizados en las plantas de tratamiento convencional, físicos, químicos y biológicos (sedimentación, filtración, transferencia de gases, absorción, intercambio iónico, precipitación química, oxidación y reducción química y conversión y descomposición biológicas), junto con procesos propios de los sistemas de tratamiento natural tales como la fotosíntesis, la fotooxidación y la asimilación por parte de las plantas (Metcalf y Eddy, 1995).

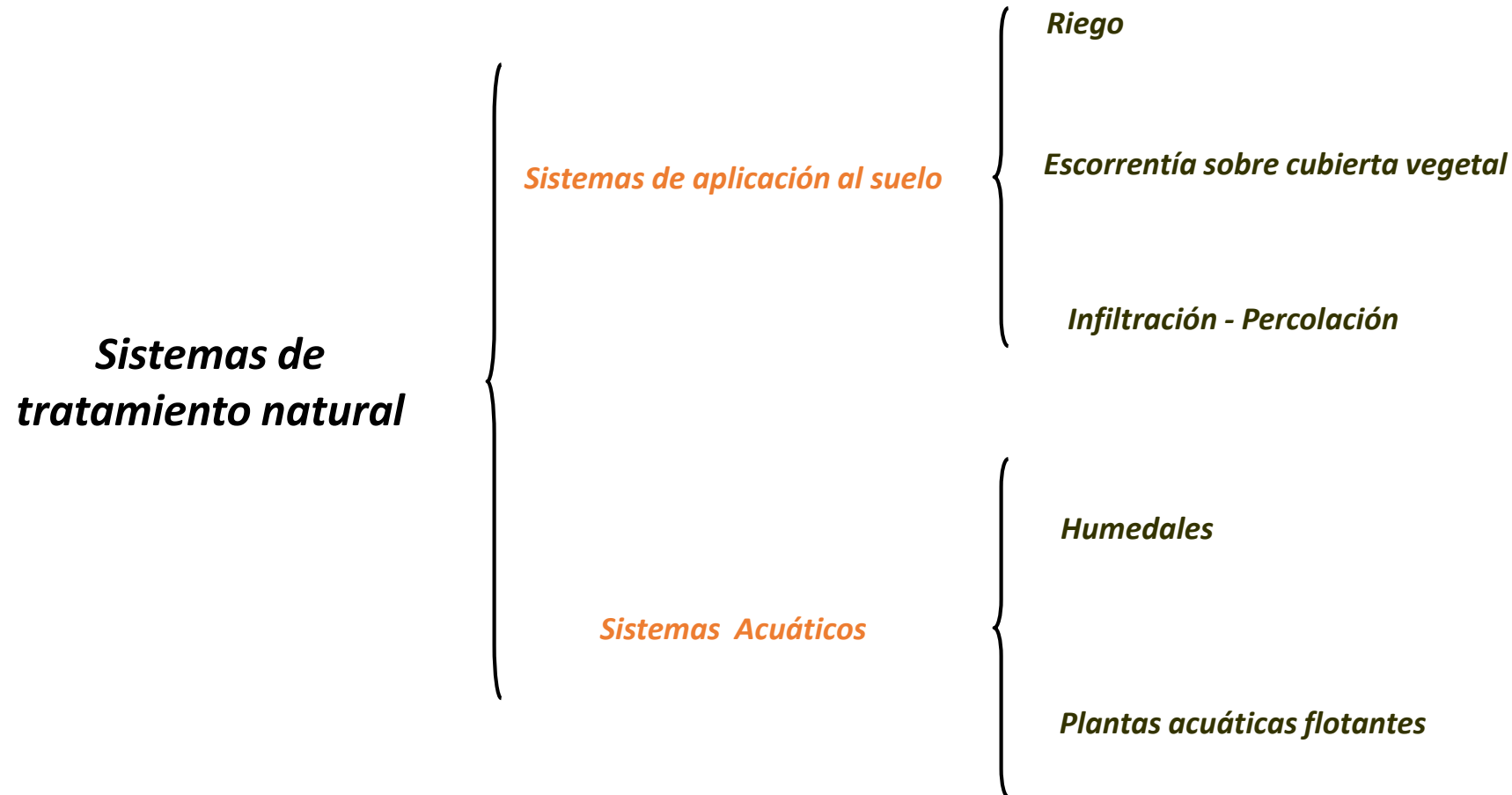
➤ A diferencia de los sistemas convencionales de tratamiento, en los cuales los procesos se llevan a cabo de forma secuencial, en diferentes tanques y reactores a velocidades aceleradas, en los sistemas naturales los procesos se producen a velocidades naturales y se realizan en forma simultánea en un único “reactor-ecosistema”.



Esquema PTAR (Rodríguez, 2006).

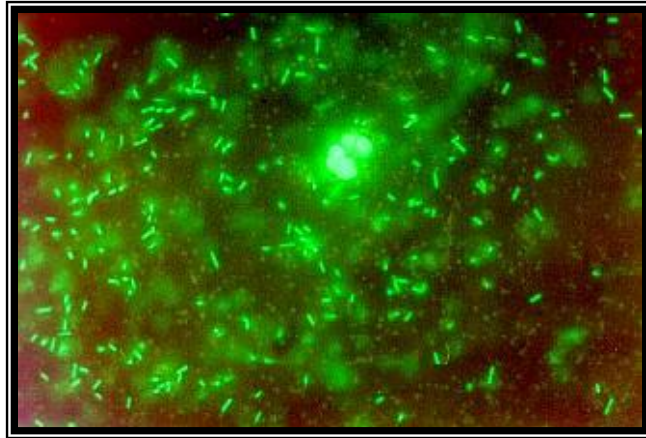
# 1. Sistemas de tratamiento natural de aguas residuales

## ¿Cómo se clasifican?



# 1. Sistemas de tratamiento natural de aguas residuales

## ¿Cuáles componentes vivos actúan?



*Bacterias metanogénicas (Gómez, 2000).*



*Protozoo (personales.alumno.upv.es, 2010).*

### ➤ *Microorganismos y organismos inferiores heterótrofos (Curt, 2005).*

En este grupo se incluyen bacterias, protozoos, actinomicetos y hongos, los cuales participan en el proceso de descomposición de la MO y a la vez son productores primarios de biomasa. Se concentran alrededor de la superficie de partículas sólidas, sedimentos, detritos y partes sumergidas de las plantas.

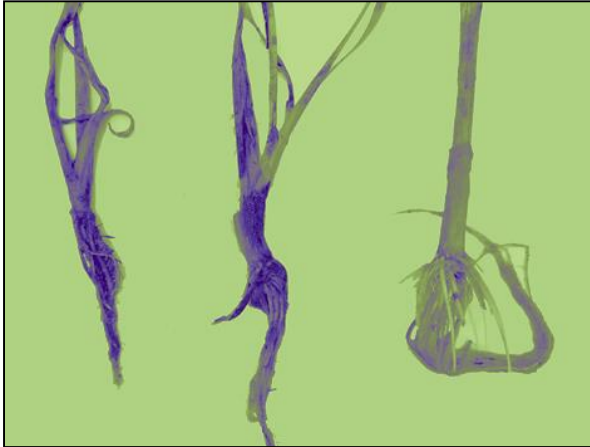
Las bacterias son responsables de la degradación de la MO, la transformación del N a formas asimilables para las plantas (Amonio, nitratos), la solubilización del P para que sea asimilado por las plantas y la reducción y oxidación de compuestos de S.

Los protozoos son importantes en la cadena trófica del sistema, ya que al alimentarse de las bacterias regulan la población bacteriana responsables de la degradación de la MO. Como productos de su metabolismo generan ortofosfatos y amonio fácilmente asimilables por las plantas. Contribuyen a la floculación de SS.

# 1. Sistemas de tratamiento natural de aguas residuales

## ¿Cuáles componentes vivos actúan?

*Algas afectando raíces de Typha ssp.*



Fuente: Curt, 2005.

*Sibine spp atacando hojas de Typha ssp.*



Fuente: Rodríguez, 2009.

### ➤ **Algas (Curt, 2005).**

Al ser organismos acuáticos contribuyen a generar un ambiente aerobio liberando oxígeno necesario para los procesos oxidativos de la materia orgánica contaminante.

La eutrofización (proliferación incontrolada de algas, N, P) no es deseable porque ocasiona un incremento en los SS, la turbidez (bloqueo del paso de la luz), competencia por nutrientes con las plantas superiores y afección a las raicillas de la vegetación del sistema.

### ➤ **Fauna (Curt, 2005).**

Está compuesta por diferentes especies de insectos y en menor medida aves, peces, anfibios y reptiles ocasionales. Los insectos juegan un papel importante en la cadena trófica y sirven de alimento a organismos superiores como aves y peces.

Algunos insectos pueden ser plagas de la vegetación y otros molestos para el hombre (mosquitos).

# 1. Sistemas de tratamiento natural de aguas residuales

## Sistemas de aplicación al suelo. Riego



Consiste en la aplicación controlada del AR sobre un suelo con vegetación. Parte del agua se evapotranspira y el resto percola ya depurada. Los suelos más adecuados son los bien drenados, de tipo franco a arenoso y sin excesiva pendiente (Martín, 1993).

Matos y Col. (2001), ARD y ARL en fertirrigación Coffea arabica. Dosis entre 210 y 1260 L ARC/planta-año. Determinan que los rendimientos del cultivo se redujeron con el incremento en las dosis aplicadas. Dosis entre 600 y 700 L permitieron recuperar rendimientos (incremento en P disp.). [N, P, K] del suelo no fue alterada.



*Paisajes cafeteros. Archivo fotográfico, Cenicafé, 2001.*

Lo Mónaco (2005), ARC filtrada a través de cisco (ST entre 2000 y 17000 ppm). Concluye que es posible la fertirrigación de los cafetales con dosis ARC con contenidos de K < 3 veces los requerimientos por parte del cultivo. ARC lixivian macronutrientes del perfil del suelo y proporcionan condiciones para la absorción de macro y micronutrientes por la planta.

Lima y Col. (2007), encontraron que la aplicación, una sola vez, de ARC decantadas, filtradas y diluidas en agua de irrigación (1:1), equivalente a 25 mm no altera la capacidad de campo, la densidad del suelo ni la composición química del mismo. Lo Mónaco y Col. (2007), encontraron que las ARC proveen un incremento en [K] intercambiable en la capa de suelo entre 0 y 40 cm, y un decremento en las [Zn, Ca, Mg].

# 1. Sistemas de tratamiento natural de aguas residuales

## Sistemas de aplicación al suelo. Escorrentía sobre cubierta vegetal



Corrientes de superficie (Rodríguez, 2009).

En estos sistemas el AR fluye a lo largo de una estrecha capa de suelo con vegetación hasta unos colectores de recogida. Parte del agua se evapotranspira, otra se desplaza en lámina por escorrentía superficial y el resto percola hasta zonas impermeables ( Martín, 1993).

Los suelos más adecuados son los de baja permeabilidad (arcillosos o franco - arcillosos). Pendiente (2-6%) y superficie del suelo lisa. Se utilizan cubiertas vegetales de especies herbáceas de pastizal.

Matos y Col. (2005), reportan aplicaciones de 2,7 m<sup>3</sup> de ARC/m-h (con 1974 ppm de DBO, ) en el cultivo de Centeno, equivalente a 250 kg DBO<sub>5</sub>/ha-d.

## Sistemas de aplicación al suelo. Infiltración –Percolación

Los vertidos se aplican al suelo de forma intermitente, en dosis elevadas y penetran hacia los acuíferos. Los suelos adecuados son los de permeabilidad elevada (tipo arenoso), los caudales normales de vertido oscilan entre 100 y 500 mm/semana (Martín, 1993).



Avena ( luirig.altervista.org, 2010).



# 1. Sistemas de tratamiento natural de aguas residuales

## Filtros verdes con recirculación de las aguas residuales del café

Los Filtros Verdes (FVs) son un tipo de tecnología de aplicación de agua al terreno, que se basan en la aplicación del agua residual pre-tratada a un cultivo forestal o herbáceo, valiéndose de la capacidad autodepuradora de la zona no saturada y de la captación de nutrientes por parte de la vegetación para la depuración.

El uso de especies arbóreas o pastos de rápido crecimiento, con gran requerimiento hídrico y cuyas raíces son tolerantes a condiciones parcialmente saturadas y anaerobias permiten la aplicación de importantes volúmenes de agua residual (Herschbach *et al.*, 2005).

El uso de turnos cortos de poda (2-3 años) en caso de especies forestales o continuas cortas del pasto, así como el uso de elevadas densidades de plantación, resulta en un aumento en la capacidad de asimilación de nutrientes por parte del cultivo (Dimitriou y Aronsson, 2011; Holm y Heinsoo, 2013).



# 1. Sistemas de tratamiento natural de aguas residuales

## Filtros verdes con recirculación de las aguas residuales del café



**Filtro verde beneficiadero experimental Cenicafé. 200 m<sup>2</sup>**

# 1. Sistemas de tratamiento natural de aguas residuales

## Sistemas Acuáticos de Tratamiento (SAT)

Incluyen macrofitas (cualquier vegetal visible a simple vista: herbáceas, arbustos, árboles) y se pueden clasificar en humedales y sistemas de tratamiento mediante plantas acuáticas flotantes. Tienen su gran aplicación para el tratamiento de AR en poblaciones pequeñas y descentralizadas.



## 2. Humedales. Definición



Humedal la Conejera. Bogotá, Colombia (sites. google.com)

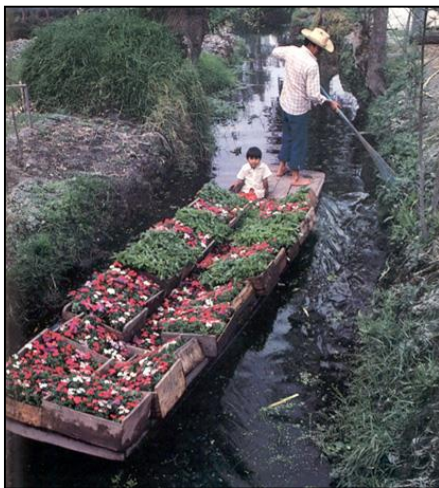
**Humedales:** son terrenos inundados con profundidades de agua  $< 0,6$  m y con plantas emergentes como espadañas, juncos y eneas.

Pueden ser naturales o artificiales.

**Los humedales naturales** desde el punto de vista normativo, se consideran cuerpos de agua receptores y por lo tanto los vertidos a ellos están condicionados por la normativa ambiental local.

**Los humedales artificiales** son aquellos contruidos por el hombre, simulando los naturales.

Un humedal artificial consiste en una laguna impermeabilizada, con una profundidad inferior a un metro, que puede estar empacada con grava, a la que se conducen las aguas residuales tratadas y en la cual se siembran diferentes tipos de plantas con capacidad para crecer en condiciones de alta humedad y de eliminar contaminantes orgánicos e inorgánicos, aún presentes en las aguas residuales tratadas, ya sea provenientes de la vivienda o de un proceso agroindustrial, permitiendo realizarles un tratamiento posterior, con el fin de mejorar su calidad, antes de ser descargadas al suelo o a cuerpos de agua superficiales.



Chinampa. Ciudad de Méjico.  
(latinamericastudies.org.)

La chinampa es un sistema artificial de tierras de cultivo que se construye de forma similar a los humedales y que tuvo su apogeo en el imperio azteca y de la cual aún se conservan cerca de 1000 activas en Méjico (Martínez, 2004).

## 2. Humedales artificiales

### ¿Para que se aplican?

*Aplicación  
humedales  
artificiales*

*Tratamiento Aguas residuales domésticas.*

*Tratamiento Aguas residuales industriales.*

*Tratamiento Aguas residuales agrícolas.*

*Tratamiento Aguas residuales porquerizas.*

*Tratamiento Aguas residuales ganadería.*

*Tratamiento Aguas de escorrentía.*

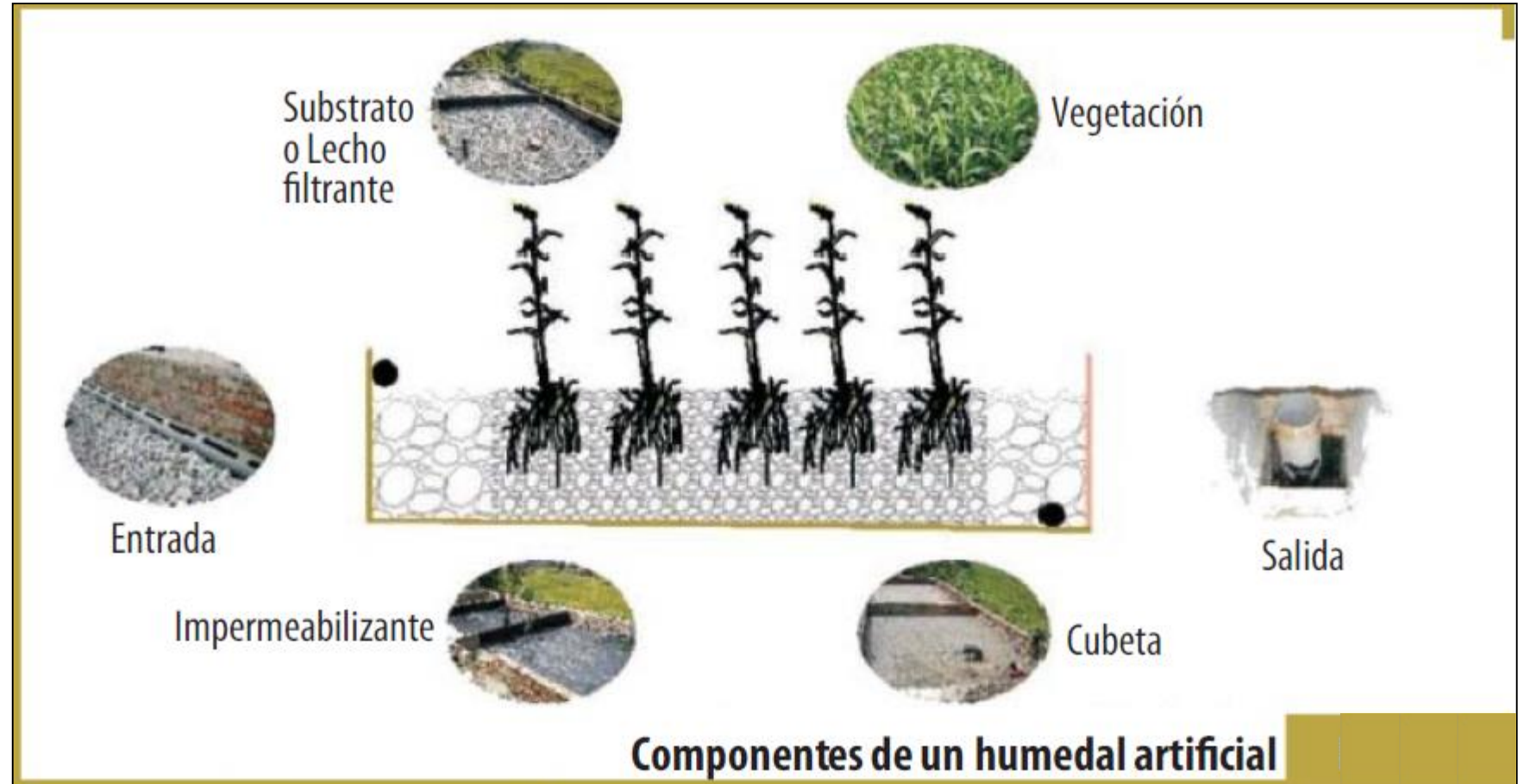
*Tratamiento lixiviados rellenos sanitarios.*

*Tratamiento lodos de plantas convencionales.*

### 3. Componentes de un humedales artificial

Los humedales están constituidos básicamente por cuatro elementos a saber:

1. Depósito impermeabilizado por el que transita el agua residual
2. Dispositivos de entrada y salida del agua residual
3. Agua residual a tratar
4. Vegetación



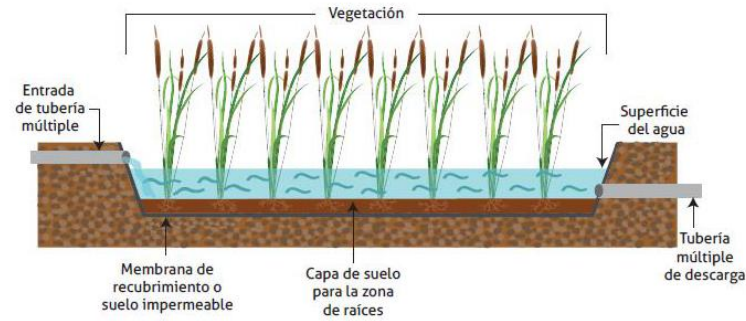
Fuente: ONU-HABITAT, 2008

# 4. Clasificación de los Humedales artificiales

Humedales artificiales

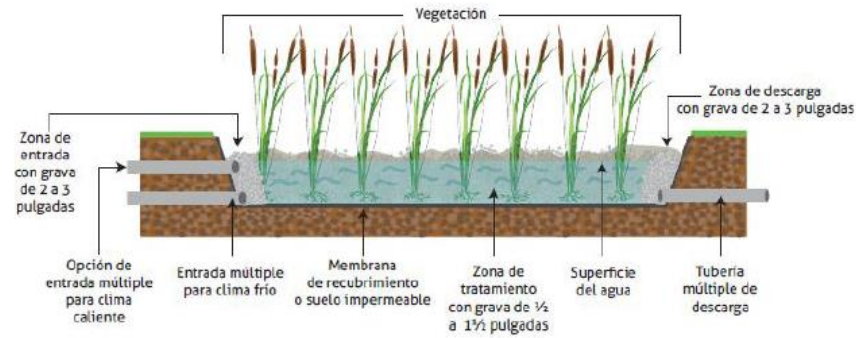
Flujo horizontal

Flujo libre superficial (SHFL)



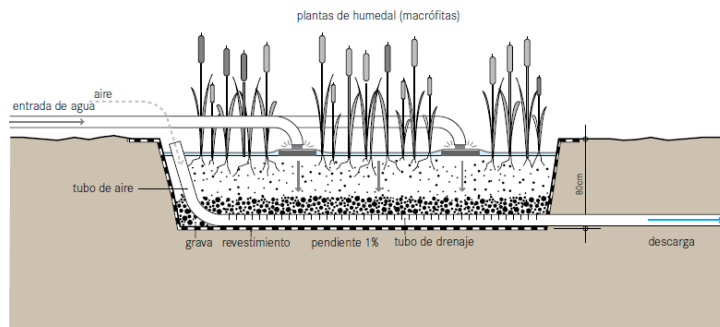
Fuente: Adaptado USEPA, 2000.

Flujo subsuperficial (SHFS)



Fuente: Adaptado USEPA, 2000.

Flujo vertical

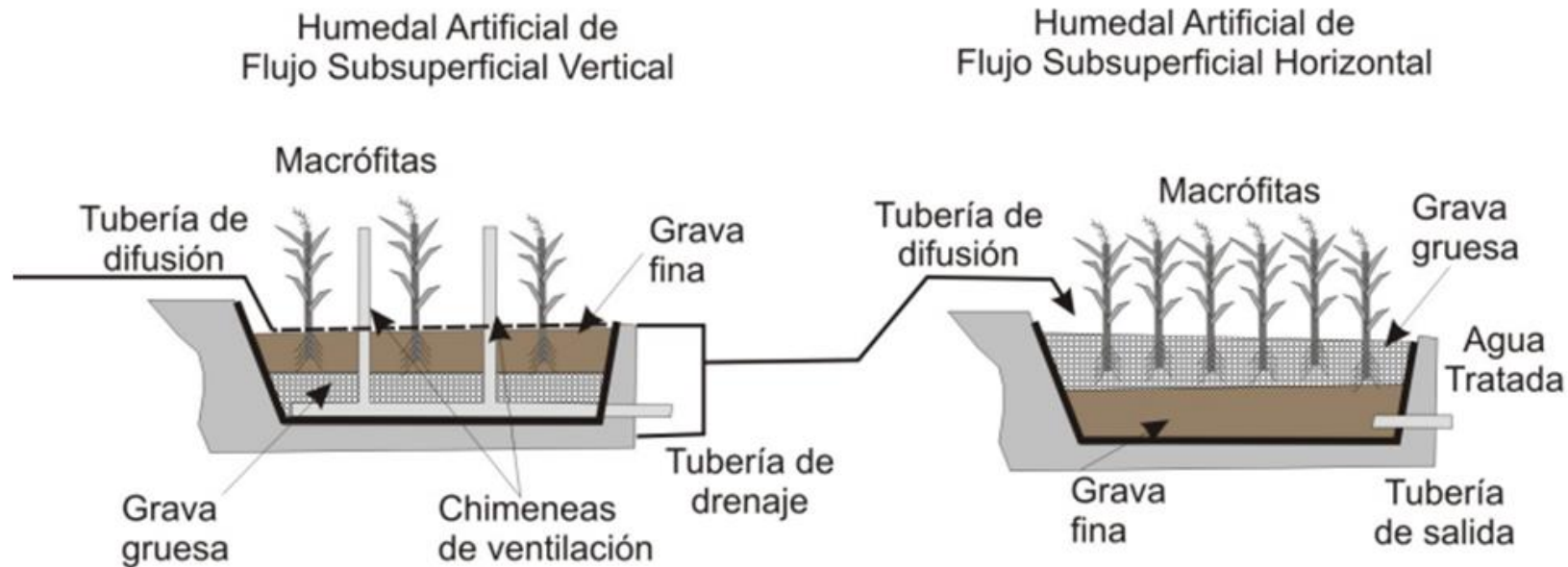


Fuente: Tilley et al., 2014.

Los sistemas de humedales se describen típicamente por la posición de la superficie del agua y el tipo de vegetación presente (U.S.EPA, 2000).

# 4. Clasificación de los Humedales artificiales

## Humedales combinados

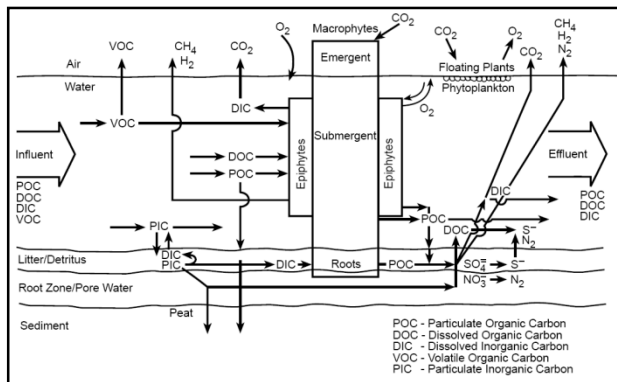
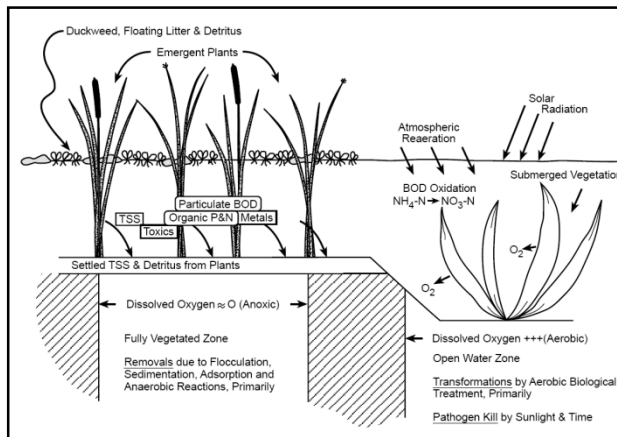


**Fuente:** Govern de les Illes Balears, 2011.

Tratamiento en serie, favoreciendo procesos aeróbicos y luego anaeróbicos para una mayor eficiencia en la eliminación de carga orgánica, nitrógeno y patógenos.



# 5. Mecanismos de remoción de los contaminantes en los HA



COMPONENTE	MECANISMO DE REMOCIÓN
Materia orgánica biodegradable	Bioconversión por bacterias aerobias, anaerobias y facultativas y detritos de la superficie (DBO soluble) Adsorción, Filtración, Floculación, Sedimentación (DBO particulada)
Sólidos suspendidos	Floculación/Sedimentación Filtración/intercepción
Nitrógeno	Procesos físicos filtración, intercepción, floculación, sedimentación. Procesos de sorción (biopelículas) Nitrificación – Desnitrificación Asimilación vegetal Volatilización
Fósforo	Procesos físicos filtración, intercepción, floculación, sedimentación. Procesos de sorción (biopelículas) Asimilación vegetal
Organismos patógenos	Decaimiento natural Predación Sedimentación Excreción de antibióticos por parte de las raíces de las plantas Irradiación UV

Fuente: Crites y Tchobanoglous, 2000.

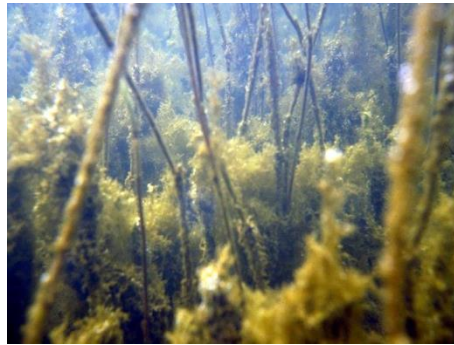
# 5. Mecanismos de remoción de los contaminantes en los HA

## ¿Cuál es el papel de las plantas?



➤ La vegetación desempeña un papel fundamental en el buen funcionamiento del sistema, se trata de actuaciones *activas* derivadas de la acción fisiológica de la misma y actuaciones *pasivas* en la que intervienen procesos físicos por efecto de la presencia de las plantas en el sistema (Curt, 2005).

### ➤ **Actuaciones pasivas.**



Las plantas pueden ejercer funciones de *desbaste*, reteniendo sólidos gruesos, favorecer la *floculación* y *sedimentación* al actuar como barrera viva que reduce la velocidad del influente y actuar como filtro reteniendo SS.

Las partes de la planta que están en contacto con el agua actúan como soporte de microorganismos y crean en sus proximidades ambientes propicios para su desarrollo de biopelículas en las que crecen bacterias, protozoos y algas.



Las partes aéreas, cuando la vegetación tiene un cierto porte, tiene un *efecto amortiguador* de temperaturas extremas, aislando la superficie del agua. Los agujeros en el suelo causados por el movimiento de los tallos por la acción del viento, incrementan la infiltración del agua superficial y mantienen la aireación del suelo (Brix, 2010).

Actuaciones pasivas (Brix, 2010).

# 5. Mecanismos de remoción de los contaminantes en los HA

## ¿Cuál es el papel de las plantas?

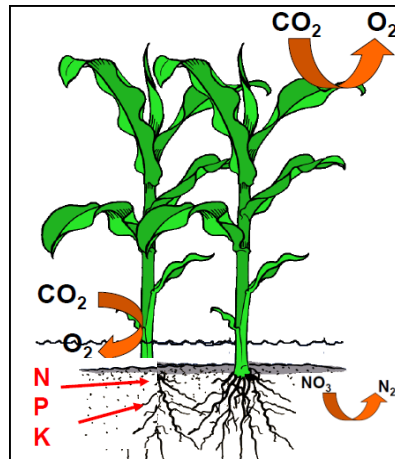
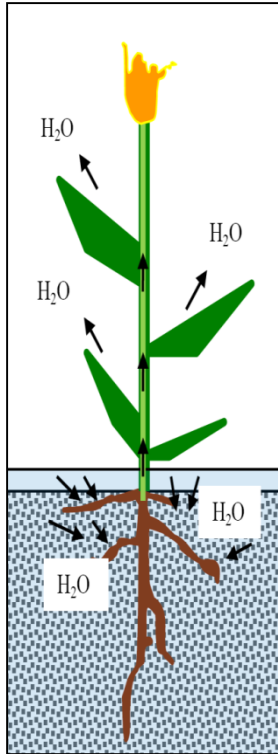
### ➤ Procesos activos.

Durante el proceso de *transpiración*, el agua residual es bombeada por las raíces hacia las hojas y muchos de los contaminantes entran en contacto con las raíces (absorción de iones, nitratos y fosfatos). Las plantas de los sistemas incrementan la tasa de evapotranspiración y por lo tanto la pérdida de agua (Brix, 2010).

Durante el proceso de *fotosíntesis* se presenta la oxigenación del agua, incrementando el valor de  $O_2$  y del pH. El contenido  $O_2$  en el agua depende de los mecanismos de transporte gaseoso, la demanda de  $O_2$  en los sedimentos, la permeabilidad de las raíces y las especies de plantas utilizadas en el sistema de tratamiento (Brix, 2010).

Algunos estudios indican que *Phragmites australis* puede liberar hasta  $4,3 \text{ g de } O_2/\text{m}^2\text{-d}$  y las plantas flotantes entre  $0,25$  y  $9,6 \text{ g de } O_2/\text{m}^2\text{-d}$  (Curt, 2005).

La *extracción de nutrientes* por incorporación al tejido vegetal es significativa en los sistemas naturales.



Procesos activos (Brix, 2010).

# 6. Ventajas y Desventajas de los Humedales artificiales

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Proporcionan tratamiento efectivo en forma activa y pasiva y minimizan la necesidad de equipos mecánicos.	Requieren un área extensa en comparación con los sistemas mecánicos convencionales de tratamiento.
Son menos costosos de construir, de operar y mantener que los procesos convencionales (para igual calidad efl).	El P, metales y algunos comp. orgánicos permanecen en los sedimentos y por ello se acumulan con el tiempo.
La operación a nivel de tratamiento secundario es posible durante todo el año con excepción de los climas más fríos.	En climas fríos las bajas T durante el invierno reducen la tasa de remoción de DBO, N-NH <sub>3</sub> y N-NO <sub>3</sub> . TRH altos compensa pero incrementa el tamaño del humedal.
La operación a nivel de tratamiento terciario avanzado es posible durante todo el año en climas cálidos o semicálidos.	La mayoría del agua contenida en los humedales es anóxica, limitando la nitrificación del amoníaco. Métodos alternos de nitrificación en combinación con los humedales han sido utilizados con éxito.
Proporcionan una adición valiosa al "espacio verde" de la comunidad, e incluye la incorporación de hábitat de vida silvestre y oportunidades para recreación pública.	No pueden ser diseñados para lograr una remoción completa de compuestos orgánicos, SST, N <sub>2</sub> o CT. Los ciclos en el sistema producen concentraciones naturales de esos compuestos en el efluente.
No producen biosólidos ni lodos residuales que requerirían tratamiento subsiguiente y disposición.	Los mosquitos y otros insectos vectores de enfermedades pueden ser un problema (SHFL).
Son muy efectivos en la remoción de DBO, DQO, SST, metales y CT de ARD. La remoción de N, P requiere de un tiempo de retención mucho mayor.	SHFS pueden ser de menor superficie que los SHFL para la remoción de la mayoría de los constituyentes del AR, el costo mayor del medio de grava en SHFS incrementa sus costos.

Fuente: Adaptado de USEPA, 2000.

# Sistemas de tratamiento con plantas acuáticas flotantes



*Eichhornia crassipes* (Rodríguez, 2003).



*Salvinia auriculata* (Rodríguez, 2003).

*Los sistemas de plantas acuáticas flotantes son, conceptualmente, similares a los humedales SHFL, excepto por el hecho de que se emplean especies de plantas flotantes (jacinto, lechuga, lenteja, oreja de agua).*

*Las ecuaciones de diseño para estos sistemas son las mismas que para los humedales artificiales de flujo libre.*

*Para el caso de las especies emergentes sembradas sobre un lecho de grava, se utilizan las mismas ecuaciones de diseño que para los humedales artificiales de flujo subsuperficial.*

*Las profundidades de agua suelen ser mayores que en los sistemas de terrenos pantanosos y varían entre 0,5 y 1,8 m.*

*Para aumentar la capacidad de tratamiento y asegurar el mantenimiento de las condiciones aerobias necesarias para el control biológico de los mosquitos, en los sistemas de plantas acuáticas flotantes, se han empleado sistemas complementarios de aireación (Metcalf y Eddy, 1995).*

# Sistemas de tratamiento con plantas acuáticas flotantes

## ¿Para que se aplican?

*Aplicación  
sistemas con  
plantas  
acuáticas  
flotantes*

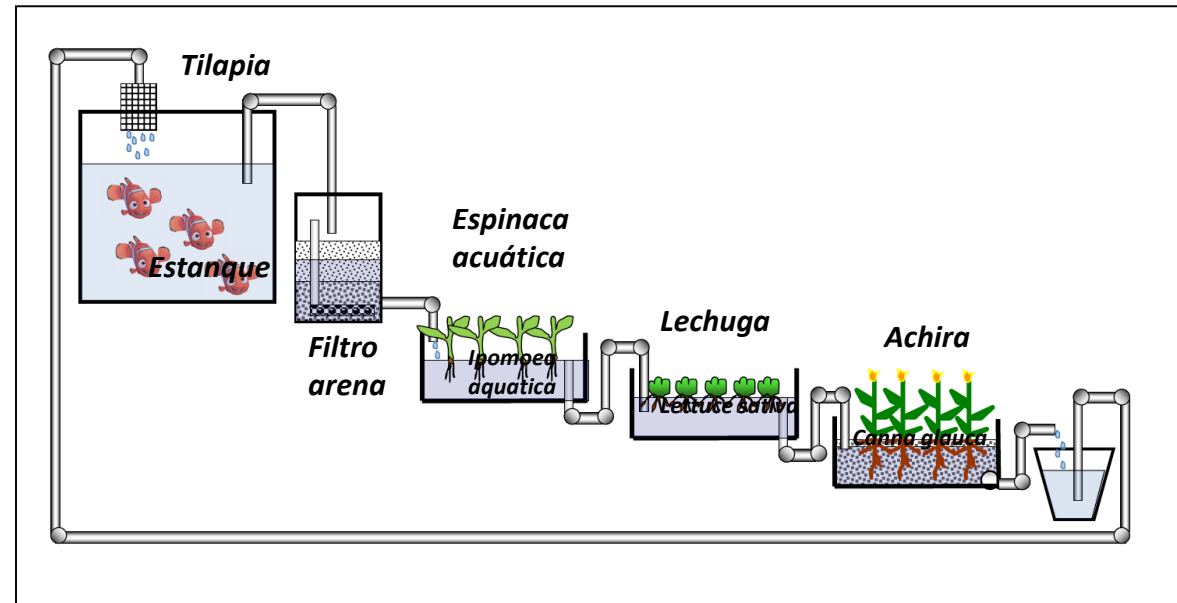
**Tto AR domésticas.**

**Tto AR industriales.**

**Acuicultura.**

**Tto AR agrícolas.**

**Tto AR producción animal.**



*Adaptado de Konnerup and Brix, 2010.*

# 7. Tipo de vegetación empleado en los HA

¿Qué vegetación se emplea? (Familias: *Cyperacea*, *Tifacea*, *Juncacea*, *Poaceae*, *Iridiácea*)



*Carex bebbii*



*Carex nebrascensis*



*Carex utriculata*



*Carex aquatilis*



*Cyperus papyrus*



*Typha latifolia*



*Typha angustifolia*



*Juncus arcticus*



*Juncus torreyi*



*Phragmites australis*



*Calamagrostis canadensis*



*Phalaris arundinacea*



*Iris missouriensis*



*Schoenoplectus acutus*

Fuente: Stein, 2010.

# 7. Tipo de vegetación empleado en sistemas con plantas flotantes

## ¿Y cómo se clasifican las plantas acuáticas?

### Plantas Acuáticas

Jacinto acuático (Rodríguez, 2003)



#### Flotación libre

Tienen su parte fotosintética sobre la superficie del agua y sus raíces extendidas bajo ella.

Esta categoría incluye al jacinto acuático, la lechuga de agua, la salvinia, la lemna y la azolla. Las plantas flotantes

Hydrilla spp (wikipedia, 2010)



#### Sumergidas

Las partes vegetativas de estas plantas no aparecen sobre la superficie del agua. Pueden estar o no fijas al fondo.

Algunas plantas de esta categoría son la hydrilla y las angiospermas marinas, conocidas como pastos del mar (Stanley, 1982).

Enea (Rodríguez, 2003)

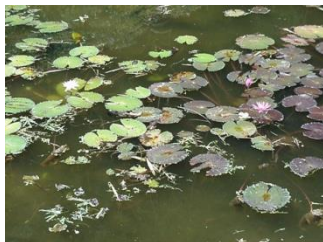


#### Enraizadas que emergen

Están enraizadas en el sustrato y tienen su parte fotosintética sobre la superficie de agua.

La mayoría de las plantas que crecen en las orillas de los cuerpos de agua pertenecen a esta categoría (Stanley, 1982).

Lirio acuático (Rodríguez, 2003)



#### Enraizadas de hojas flotantes

Enraizadas en el fondo, con tallos y pecíolos débiles y hojas gruesas y parafinosas.

Los lirios acuáticos pertenecen a este grupo.



# 7. Tipo de vegetación empleado en sistemas con plantas flotantes

## ¿Qué vegetación se emplea?

### Jacinto Acuático (*Eichhornia crassipes*)



#### Tratamiento de aguas residuales

- Polprasert y Khatiwada (1998)
- Bich y Col. (1999)
- Soltan y Rashed (2002)
- Xie y Yu (2003)
- El-Gendy y Col. (2005)
- Mahmood y Col. (2005)
- Rodríguez y Janssen (2005).

- Familia Pontederiaceae.
- Nativa de América del Sur.
- No tolera el clima frío.

### Lechuga de agua (*Pistia stratiotes*)



#### Tratamiento de aguas residuales

- Reddy y DeBusk (1985)
- Pedraza (1994)
- Aoi y Hayashi (1996)
- Ying-Feng y Col. (2002)
- Jing y Col. (2002)
- Everitt y Col. (2003)
- Sooknah y Wilkie (2004).

- Familia Araceae.
- Nativa regiones tropicales y subtropicales.
- No tolera períodos prolongados de clima frío.

### Enea (*Typha angustifolia*)



#### Tratamiento de aguas residuales

- Ansola y De Luis (1994)
- Hill y Col. (1997)
- Williams y Col. (1999)
- Perkins y Hunter (2000)
- Zuñiga y Col. (2003)
- Bernal y Col. (2003)
- Valdés y Col., (2005)
- Álvarez y Col. (2005)
- Marín y Col. (2006)

- Familia Typhaceae.
- Nativa Regiones templadas Hemisferio Norte.
- Amplio rango de temperaturas (entre 10 y 30°C).

### Oreja de agua (*Salvinia auriculata complex*)



#### Tratamiento de aguas residuales

- Reddy y DeBusk (1985)
- Nichols y Col. (2000)
- Pott y Pott, (2002)
- Olguín y Col. (2003)
- Upadhyay y Panda (2005)

- Familia Salviniaceae.
- Nativa de América del Sur.
- Ts extremas letales para *S. molesta* (-3 y 43°C).

# 7. Tipo de vegetación empleado en sistemas con plantas flotantes

## ¿Qué vegetación se emplea?

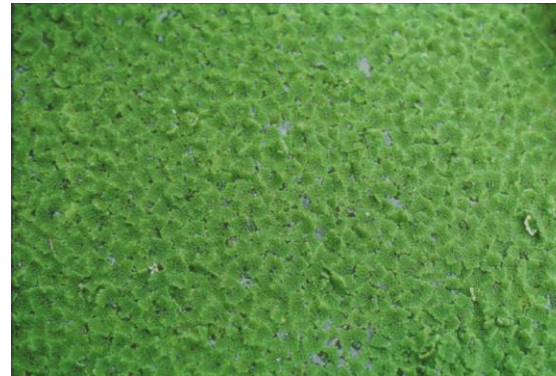
### Espinaca de agua (*Ipomoea aquatica*)



Fuente: dogonlanguages.org.

- Familia Convolvulaceae.
- Nativa de Asia.
- No tolera el clima frío.

### Helecho de agua (*Azolla filiculoides*)



Fuente: Rodríguez, 1997.

- Familia Azollaceae.
- Nativa de América.
- No tolera el clima frío.

### Lenteja de agua (*Lemna minor*)



Fuente: Rodríguez, 1997.

- Familia Araceae.
- Origen Cosmopolita.
- No tolera el clima frío.

### Pasto elefante morado (*Pennisetum purpureum*)

- Familia Gramínea.
- Origen en el trópico húmedo.



### Pasto vetiver (*Chrysopogon zizanioides*)

- Familia Gramínea.
- Origen de Asia.

## 7. Tipo de vegetación empleado. Densidad de arranque

Plantas flotantes	Densidad inicial Biomasa fresca/m <sup>2</sup>	Densidad operacional Biomasa fresca/m <sup>2</sup>	Densidad inicial % cubrimiento*	Densidad operacional % cubrimiento*
Jacinto de agua	Entre 7 y 9 kg	Entre 5 y 20 kg	50	75
Lechuga de agua	Entre 1 y 2 kg	Entre 2 y 7 kg	50	75
Oreja de agua	Entre 0,4 y 1 kg	Entre 0,4 y 2,4 kg	50	75
Helecho de agua	Entre 0,1 y 0,3 kg	Entre 0,1 y 0,8 kg	50	75
Lenteja de agua	Entre 0,1 y 0,4 kg	Entre 0,1 y 1,2 kg	50	75
Plantas emergentes	Densidad inicial Plantas/m <sup>2</sup>	Densidad operacional Plantas/m <sup>2</sup>		
Enea	8-12	25-35		
Pasto vetiver	8-12	25-50		
Pasto elefante	8-10	20-30		
Heliconias	8-10	20-30		
Papiro	8-10	20-30		

(\*) Para las plantas flotantes se puede utilizar cualquiera de los 2 métodos: 1. Pesar la biomasa y adicionarla a la laguna o cubrir la laguna con las plantas flotantes hasta cubrir el 50% del espejo de agua al iniciar el tratamiento y mantener, mediante la cosecha periódica, el valor de la biomasa en el rango recomendado de operación o mantener un 75% de cobertura del espejo de agua, durante el proceso de operación de los humedales, en este segundo caso no sería necesario retirar toda la biomasa para reincorporar el peso necesario, como sucede con el primer método, sólo se retira la biomasa que esté cubriendo más del 75% del espejo de agua.

# 7. Tipo de vegetación empleado.

## Manejo de humedales artificiales

*Incluyen el control de mosquitos, manejo de la vegetación, vida silvestre y monitoreo.*



*Cosecha vegetación (Rodríguez, 2009).*



*Monitoreo y control. Laboratorio Biodigestión, Cenicafé.*

**Control de mosquitos:** *Esencial en SHFL. Se utilizan redes con peces que se alimentan de las larvas de mosquitos, uso de control biológicos (*Bacillus thuringensis*), utilización de predadores y manejo de la vegetación que permita que los peces alcancen las larvas (Crites y Tchobanoglous, 2000).*

**Cosecha de la vegetación:** *Para mantener la capacidad hidráulica, promover el crecimiento activo, evitar los mosquitos y la contaminación por material vegetal muerto, se debe cosechar la vegetación de los humedales.*

**Vida silvestre:** *Si uno de los objetivos es promover hábitats, es necesario diseñar estrategias para conservar los animales silvestres que se sienten atraídos por el humedal (aves, patos, tortugas, entre otros).*

**Monitoreo y Control:** *Dentro de los aspectos que son necesarios controlar, en los humedales artificiales, están el flujo, la calidad del agua superficial y la calidad de las aguas subterráneas.*

# 7. Tipo de vegetación empleado.

## Manejo de sistemas con plantas acuáticas flotantes

*Incluyen el control de mosquitos, manejo de la vegetación y el manejo de lodos.*



*Cosechadora de Jacinto (Arias, 2010).*



*Cosechadora de lemna (Arias, 2010).*

**Control de mosquitos:** La propagación de los mosquitos puede ser un factor crítico que signifique su aceptación o rechazo. El objetivo del control de mosquitos (peces larvívoros o control biológico) es llevar dicha población a un nivel que esté por debajo del umbral requerido para la transmisión de enfermedades o niveles de tolerancia de molestias (Crites y Tchobanoglous, 2000).

**Cosecha de la vegetación:** Si la remoción de nutrientes mediante la asimilación por parte de las plantas es un objetivo del sistema, se necesitará cosechar una vez por semana para las lentejas de agua y cada 15 días para los buchones.

**Manejo de lodos:** Entre los sólidos que se acumulan en los sistemas acuáticos se hallan los detritos de las plantas, los sólidos inorgánicos y el lodo biológico. Por lo general, estos sólidos se remueven con poca frecuencia en los sistemas con jacintos y lentejas de agua (anualmente o con menos frecuencia, según se necesite) (Crites y Tchobanoglous, 2000).

**Utilización de la biomasa:** En un intento de controlar la proliferación de plantas acuáticas se han hallado varios métodos para utilizar la biomasa de dichas plantas, llegando a la conclusión de que si la cosecha de las plantas puede ser provechosa, las medidas de control ya no serían necesarias (Lord, 1982).

*En consecuencia, se han propuesto diversas formas de aprovechamiento, algunas ya muy utilizadas y otras que constituyen innovaciones: Producción de abonos orgánicos, producción de biocombustibles (bioetanol, biogás), cultivo de hongos comestibles, alimentación animal, producción de papel.*

# 8. Diseño y construcción de humedales artificiales.

## ¿Cómo se diseñan?

Los principales parámetros de diseño de humedales artificiales incluyen el tiempo de detención hidráulica (TRH), la profundidad (d), geometría de los estanques (ancho y longitud), la carga orgánica ( $C_L$ ) e hidráulica ( $L_w$ ).

Área superficial necesaria

$$A_s = L * W = \left[ \frac{Q \ln \left( \frac{C_o}{C_e} \right)}{K_T * d * n} \right]$$

Área Transversal necesaria

$$A_c = \left[ \frac{Q}{K_s * S} \right]$$

Ancho

$$W = \left( \frac{A_c}{d} \right)$$

Tiempo de detención hidráulica

$$TRH = \left[ \frac{L * W * n * d}{Q} \right]$$

Carga hidráulica

$$L_w = \left[ \frac{Q}{L * W} \right]$$

Carga orgánica

$$C_L = \left[ \frac{Q * C_o}{A_s} \right]$$

# 8. Diseño y construcción de humedales artificiales.

## ¿Cómo se diseñan?

Parámetro de diseño	Unidades	Tipo de humedal	
		Flujo libre (FWS)	Flujo Subsuperficial (SFS)
Tiempo de detención hidráulica.	d	2 – 5 DBO 7 – 14 N	3 – 4 DBO 6 – 10 N
Velocidad de carga de DBO	kg/ha - d.	< 110	< 110
Velocidad de carga de SST	kg/m <sup>2</sup> - d		0,04
Profundidad del agua.	m	0,06 – 0,45	0,3 – 0,61
Profundidad del medio	m		0,46 – 0,76
Tamaño mínimo	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> - d	5,3 – 10,7	
Relación L:W		2:1 a 4:1	
Control de mosquitos.		Requerido	No se requiere
Intervalo de cosecha.	Año	3-5/año	No se requiere
Calidad esperada del efluente.			
DBO <sub>5</sub>	mg/L	< 20	< 20
SST	mg/L	< 20	< 20
NTK	mg/L	< 10	< 10
PT	mg/L	< 5	< 5

Fuente: Crites y Tchobanoglous, 2000.

# 8. Diseño y construcción de humedales artificiales.

## Sistemas de tratamiento con plantas acuáticas flotantes

### ¿Cómo se diseñan?

Elemento	Tipo de tratamiento con Jacintos de agua			Sistemas de tratamiento con lentejas de agua
	Secundario aerobio (no aireado)	Secundario aerobio (aireado)	Eliminación nutrientes (aerobio no aireado)	
<b>Criterios típicos designados</b>				
Agua residual afluente.	Desbastada o sedimentada.	Desbastada o sedimentada.	Secundario.	Efluente de estanques facultativos.
DBO afluente, mg/l.	130 – 180	130 - 180	30	40
Carga de DBO, kg/ha - d.	45 - 90	165 - 330	11 - 44	22 – 33
Profundidad de agua, m.	0,45 – 0,90	0,90 – 1,20	0,60 – 0,90	1,20 – 1,80
Tiempo de detención, d.	10 - 36	4 - 8	6 - 18	20 - 25
Carga hidráulica, l/m <sup>2</sup> -d	18 - 56	93 - 280	37 - 150	56 – 84
Temperatura del agua, °C.	> 10	> 10	> 10	> 7
Programa de cosecha.	Anual a estacional.	Entre 2 veces al mes y de forma continua.	Entre 2 veces al mes y de forma continua.	Para secundario periodicidad mensual; para eliminación de nutrientes periodicidad semanal.
<b>Calidad del efluente esperada</b>				
DBO, mg/L	< 20	< 15	< 10	< 30(< 10)
SST, mg/L	< 20	< 15	< 10	< 30(< 10)
N <sub>T</sub> , mg/L	< 15	< 15	< 5	< 15(< 5)
P <sub>T</sub> , mg/L	< 6	< 1-2	< 2-4	< 6(< 1-2)



# 8. Diseño y construcción de humedales artificiales.

## ¿Cómo se construyen?



**Sistema GBH para el tratamiento de aguas residuales domésticas de la FMM. Especie *T. angustifolia*. Remociones  $C_L > 90\%$ . 1998. Fuente: (Zambrano, 1997)**

# 8. Diseño y construcción de humedales artificiales.

## ¿Cómo se construyen?



***Humedal SFS para el postratamiento de aguas residuales domésticas de la vereda la bananera (Pereira). Especies *T. Latifolia*, *Musa velutina*, *Scirpus holoschoenus*, *Alocasia macrorrhiza*. Remociones  $C_L$  40-50%. 2009.***



# 9. Utilización de SAT en el postratamiento de aguas residuales del café



Fuente: Rodríguez, 2009.

Determinación	Aguas de lavado
pH (unidades)	3,92
Conductividad (us/cm)	232
Sólidos Totales (ppm)	9393
Sólidos Disueltos (ppm)	4938
Sólidos Suspendidos (ppm)	4455
Cenizas (ppm)	400
Materia orgánica (ppm)	8993
DQO (ppm)	9484
NTK (ppm)	65,6
Oxígeno Disuelto (ppm)	3,85
Pectinas (ppm)	3855
Fructuosa (ppm)	207
Galactosa (ppm)	64
Glucosa (ppm)	125
Sacarosa (ppm)	511
Azúcares (Suma) (ppm)	904
Acido láctico (ppm)	687
Acido acético (ppm)	54
Acido cítrico (ppm)	1512
Acido propiónico (ppm)	
Acido tartárico (ppm)	
Acido fórmico (ppm)	
Acido málico (ppm)	
Acido galacturónico (ppm)	90
Ácidos carboxílicos (suma) (ppm)	2297
Cafeína (ppm)	26,7
Acido clorogénico (ppm)	4,47
Ca (ppm)	11,6
Na (ppm)	3,5
K (ppm)	92,5
Mg (ppm)	4,5
Fe (ppm)	1,2
Metales (suma) (ppm)	113,3

Parámetro	Valor
Agua utilizada (l/kg de fruto)	Entre 4,2 y 5,0
DQO total p (ppm)	27400

“Las aguas mieles que se producen durante el proceso de beneficio húmedo del fruto del café, son biodegradables, pero poseen características fisicoquímicas particularmente agresivas con el medio ambiente: pH bajos, acidez alta y concentraciones de materia orgánica alta correspondiente a poderes contaminantes 60 veces superiores a las aguas residuales domésticas” (Zambrano y Rodríguez, 2008).

# 9. Utilización de SAT en el postratamiento de aguas residuales del café

## Sistemas Modulares de Tratamiento Anaerobio (SMTA)

### *Reactor hidrolítico*



### *Recámara dosificadora*



### *Reactor metanogénico*



En los SMTA, la carga aplicada es de cerca de 8 kg DQO/m<sup>3</sup>d, TRH de 5 días y los porcentajes de remoción de la DQO oscilan entre el 80 y el 85% .

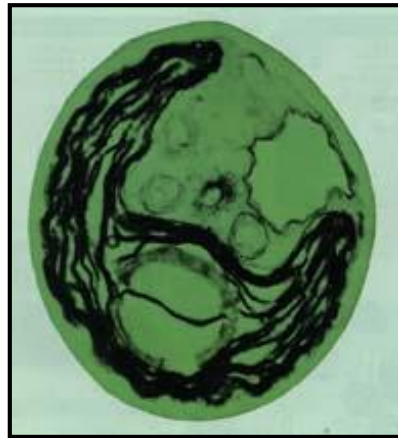
Fuente: Zambrano y Col., 1999

## 9. Utilización de SAT en el postratamiento de aguas residuales del café

### Estudios de Ecotoxicología



CL<sub>50</sub> para el microcrustáceo *Daphnia pulex* fue 700 ppm como DQO en aguas mieles tratadas anaerobiamente.



CE<sub>50</sub> para el alga *Clorella vulgaris* fue 890 ppm como DQO en aguas mieles tratadas anaerobiamente.



CL<sub>50</sub> para el pez *Lebistes reticulatus* fue 490 ppm como DQO en aguas mieles tratadas anaerobiamente.

*Fuente: Matuk y Col., 1997*

“Considerando que los efluentes de los SMTA generan efectos tóxicos sobre la vida acuática, se concluye que estos deben ser postratados, antes de ser vertidos a los cuerpos de agua de la zona cafetera, mediante la implementación de un sistema de tratamiento que sea económico y de fácil adopción por parte de los productores y que tenga la capacidad de reducir la carga orgánica de los efluentes del SMTA a valores por debajo de 490 y 279 ppm, en términos de DQO y DBO<sub>5</sub>, respectivamente, con el fin de minimizar su impacto ecológico”.

## 9. Utilización de SAT en el postratamiento de aguas residuales del café

### Objetivo de las investigaciones en SAT

“Generar la información necesaria para el diseño de un biosistema integrado que utilice macrófitas para el postratamiento de las aguas mieles del café, de forma que sus efluentes generen el menor impacto negativo posible sobre el ecosistema acuático cafetero, presentando alternativas viables, desde el punto de vista técnico, económico, ambiental y social, para la adecuada disposición de la biomasa generada durante el proceso de depuración”.



# 9. Utilización de SAT en el postratamiento de aguas residuales del café

## Efecto de la concentración del efluente del SMTA sobre SAT



Fuente: Rodríguez, 2009.

- Pocos trabajos publicados para AR DQO>1000 ppm.
- Resultados son contrastantes (tamaño de los ensayos, tipo de tratamiento, naturaleza del agua residual, TRH y condiciones climáticas de los ensayos).
- Robles y Col. (1983), reportan que *E. crassipes* soporta ARC con DQO hasta de 3000 ppm.
- Calzada y Porres (1987), reportan que *E. crassipes* soporta ARC tratadas anaerobiamente con DQO de 1726 ppm.
- Reddy y Debusk (1986), reportan inhibición en el crecimiento de *E. crassipes*, postratando efluentes anaerobios de excretas de vacuno para DBO<sub>5</sub> entre 694 y 1101 ppm.
- Pedraza (1994), reporta crecimiento de *E. crassipes*, postratando efluentes anaerobios de excretas de vacuno con DQO de 86000 ppm y de *P. stratiotes* para DQO de 17000 ppm.
- Sooknah y Wilkie (2004), reportan que efluentes anaerobios de excretas de vacuno, inhiben *E. crassipes* y muerte de *P. stratiotes*, DQO de 2010 ppm.

# 9. Utilización de SAT en el postratamiento de aguas residuales del café

## Efecto de la concentración del efluente del SMTA sobre SAT



- Cenicafé, La granja, Chinchiná (1310 msnm, T=21,4°C).
- Duración 209 días.
- Muestras totales 27.
- Muestras en EE 4.



- Efluentes SMTA ( $\approx$  1 tonelada de frutos/día).
- *E. crassipes*, *P. stratiotes*, *S. auriculata*, *T. angustifolia*.
- *E. crassipes*: 9 kg/m<sup>2</sup> (Reddy y DeBusk, 1984)
- *P. stratiotes*: 2 kg/m<sup>2</sup> (Reddy y DeBusk, 1984)
- *S. auriculata*: 1,5 kg/m<sup>2</sup> (Reddy y DeBusk, 1985)
- *T. angustifolia*: 30 plantas/m<sup>2</sup> (Dentro del rango, DeBusk y Col., 1995)



- 4 tipos de material biológico (EC, PS, SA, TA).
- 2 controles (CF, CE).
- 3 concentraciones de afluente ( $C_1$ ,  $C_{0,4}$ ,  $C_{0,1}$ )
- Caudal 70 ml/min ( $Q_1$ )
- Total 18 tratamientos.



# 9. Utilización de SAT en el postratamiento de aguas residuales del café

## Efecto de la concentración del efluente del SMTA sobre SAT

### Análisis del agua (Standard Methods y Manual HACH)



- pH: Potenciométrico
- Oxígeno disuelto: Polarográfico.
- Alcalinidad: Jenkis y Col. (1983).
- DBO<sub>5</sub>: Winkler
- DQO: Colorimétrico, reflujo cerrado.
- P<sub>T</sub>: Absortométrico del ácido ascórbico.
- Nitratos: Absortométrico de reducción con Cd.
- Potasio: Absortométrico tetrafenilborato.
- Sulfatos: Absortométrico Sulfaver 4.
- N-NTK, N-NH<sub>3</sub>: Titulométrico semi-micro-Kjeldahl.
- ST y SST: Gravimétrico.
- Turbiedad: Absortométrico.
- Color Verdadero: Absortométrico.
- Coliformes totales y fecales: Fermentación en tubo múltiple.

### Análisis de minerales (biomasa plantas)

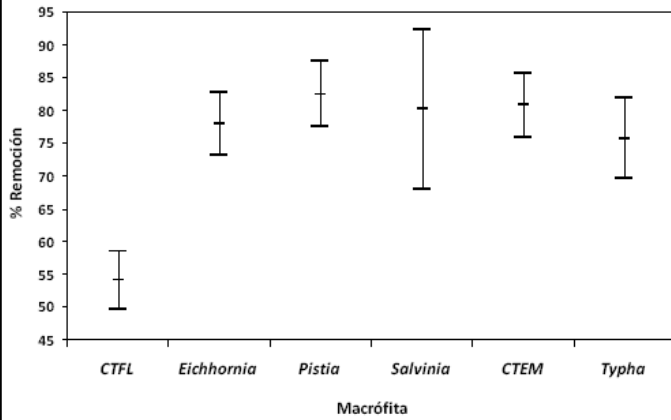
- Nitrógeno: Semimicro Kjeldahl.
- Fósforo: Colorimétrico (molibdovanadato de amonio).
- K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn y Cu: EAA.
- Boro: Colorimétrico (azometina H).

# 9. Utilización de SAT en el postratamiento de aguas residuales del café

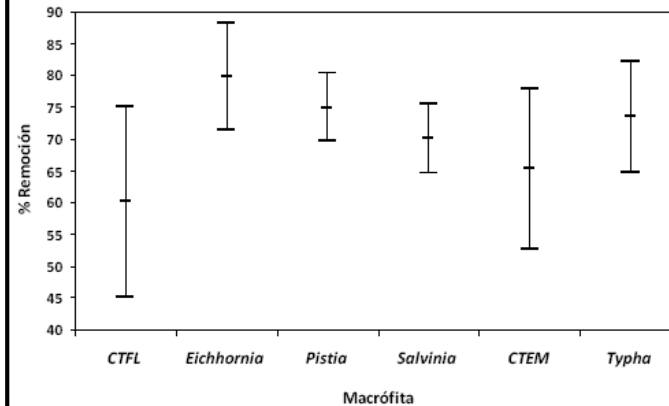
## Efecto de la concentración del efluente del SMTA sobre SAT

### Resultados

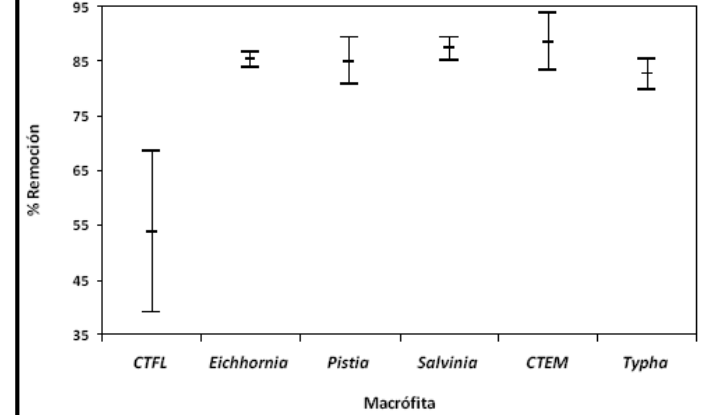
Intervalos de Confianza  
Remoción DBO<sub>5</sub> para C<sub>1</sub>



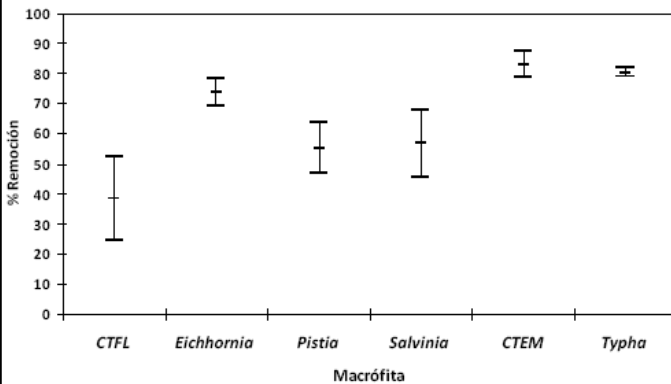
Intervalos de Confianza  
Remoción DBO<sub>5</sub> para C<sub>0,4</sub>



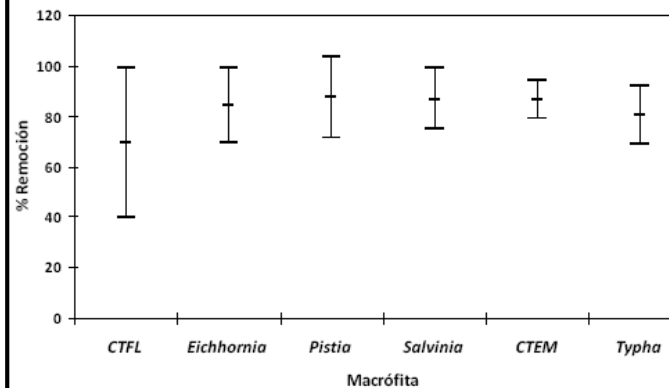
Intervalos de Confianza  
Remoción DBO<sub>5</sub> para C<sub>0,1</sub>



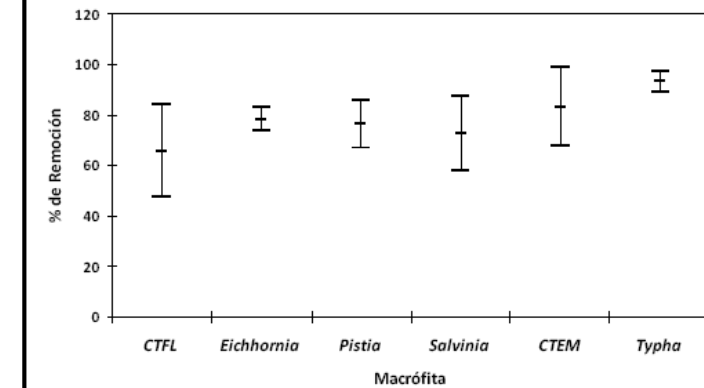
Intervalos de Confianza  
Remoción SST para C<sub>1</sub>



Intervalos de Confianza  
Remoción SST para C<sub>0,4</sub>



Intervalos de Confianza  
Remoción SST para C<sub>0,1</sub>

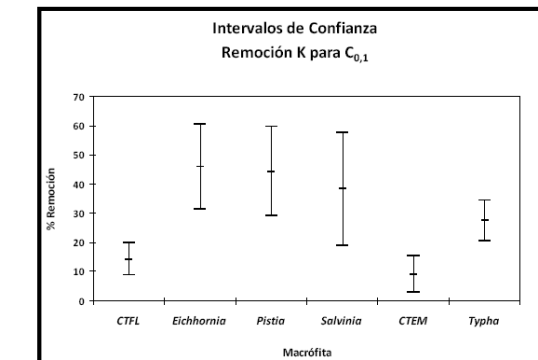
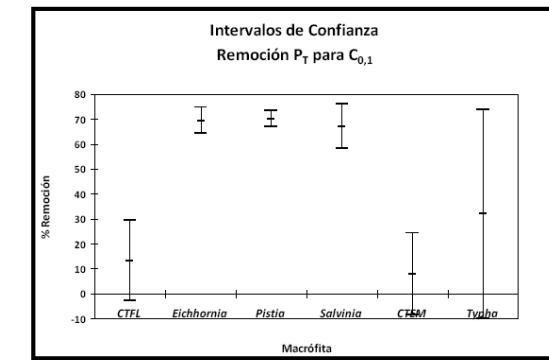
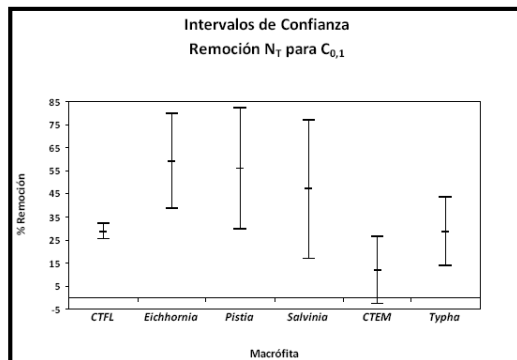
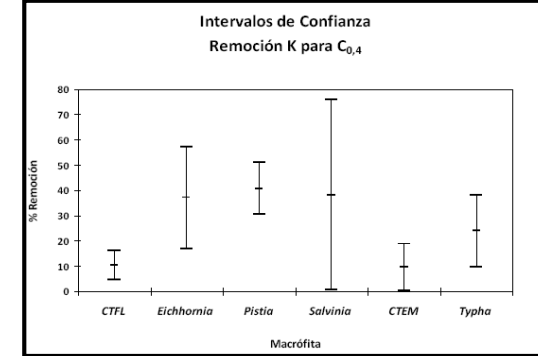
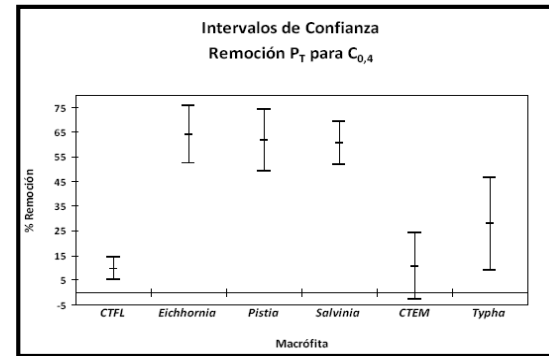
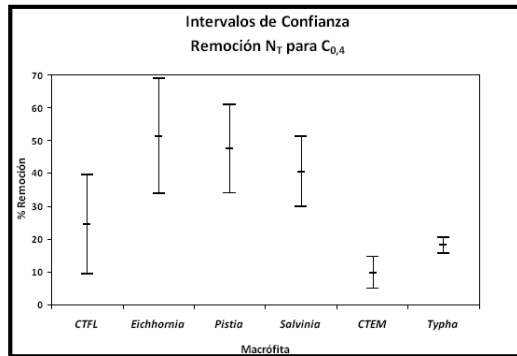
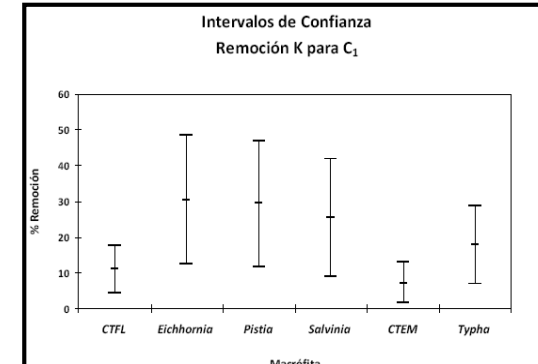
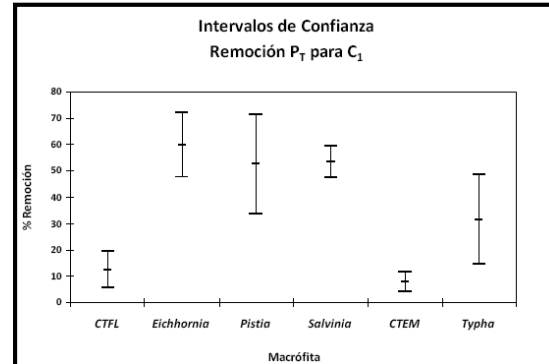
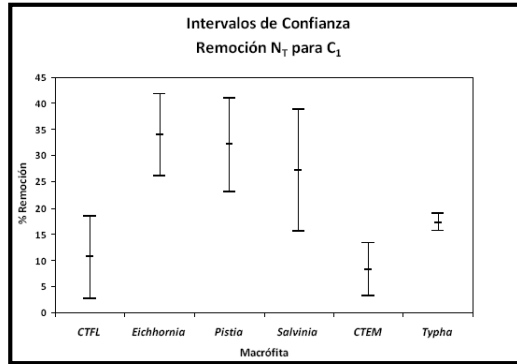


# 9. Utilización de SAT en el postratamiento de aguas residuales del café

## Efecto de la concentración del efluente del SMTA sobre SAT

### Resultados

La eliminación de la DQO, DBO<sub>5</sub>, SST, N<sub>T</sub>, P<sub>T</sub>, K siguió un modelo cinético de primer orden.



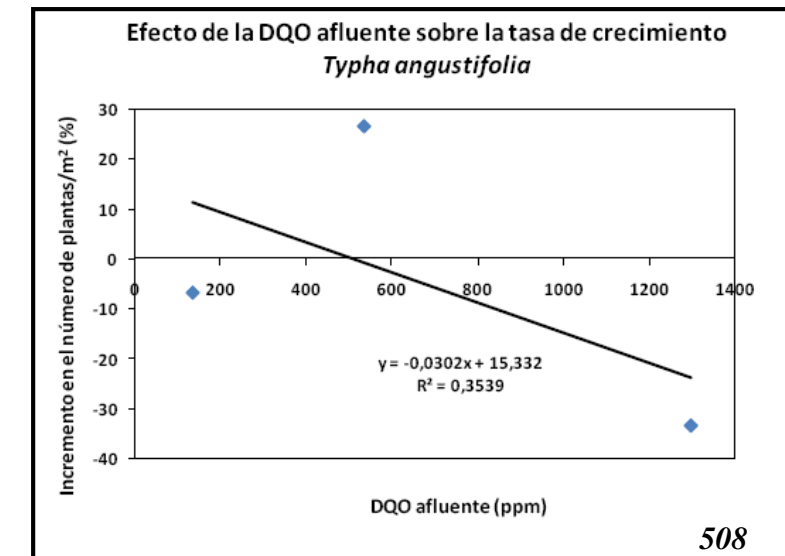
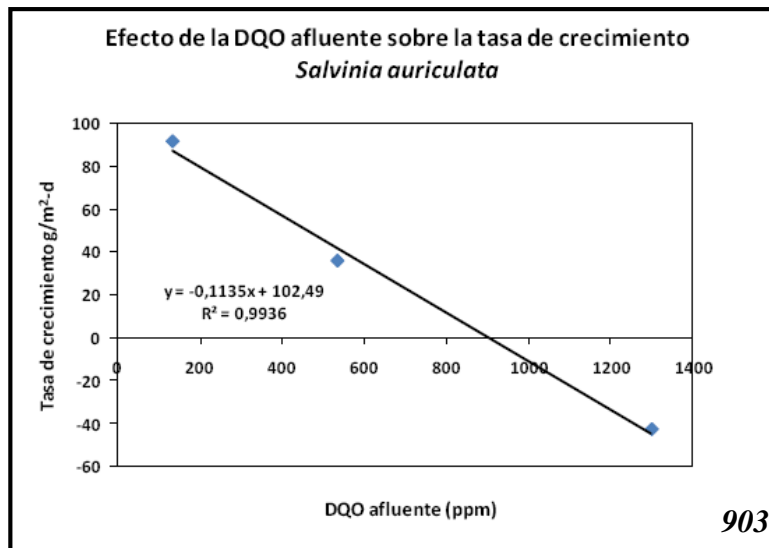
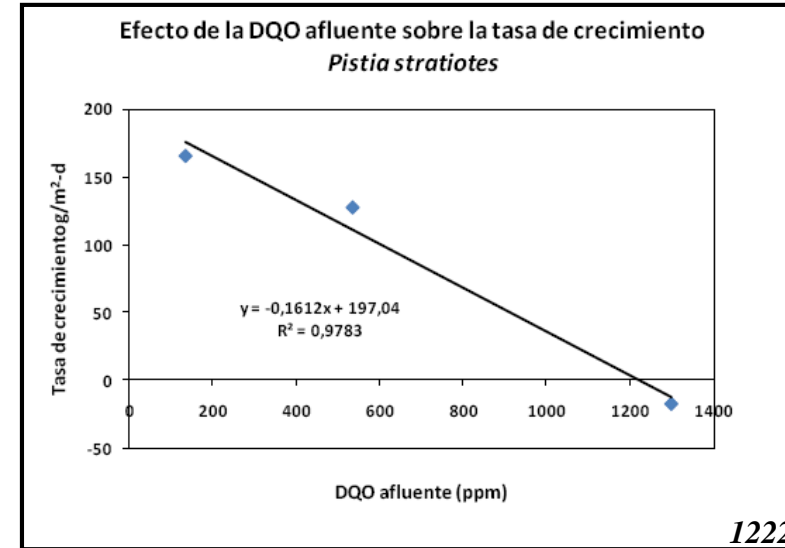
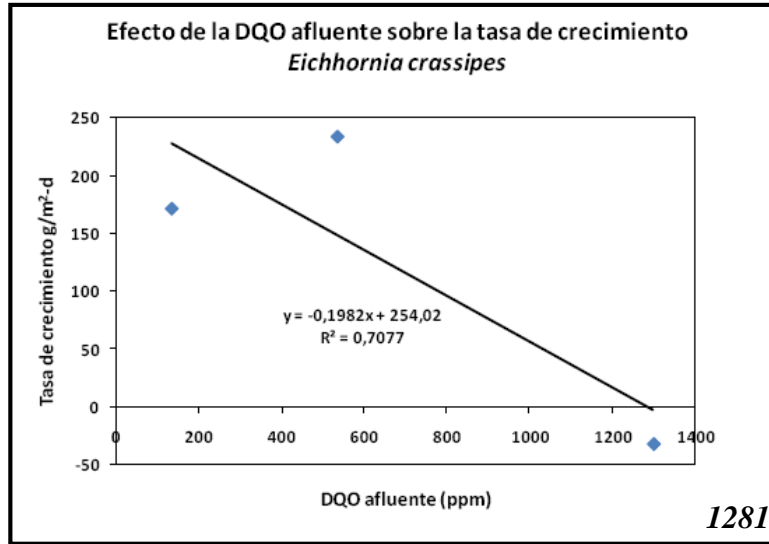
Eliminación de DBO<sub>5</sub>, SST, N<sub>T</sub>, P<sub>T</sub> y K (mg/m<sup>2</sup>-día),  
*E. crassipes* >  
*P. stratiotes* >  
*S. auriculata* >  
*T. angustifolia*.

# 9. Utilización de SAT en el postratamiento de aguas residuales del café

## Efecto de la concentración del efluente del SMTA sobre SAT

### Resultados

Se presenta inhibición del crecimiento de *E. crassipes*, *P. stratiotes* y *S. auriculata* a DQO de 1281, 1222 y 903 ppm e inhibición en el incremento del número de plantas de *T. angustifolia* a 508 ppm.



# 9. Utilización de SAT en el postratamiento de aguas residuales del café

## Efecto de la concentración del efluente del SMTA sobre SAT

NPK tomado por las macrófitas, en el estado estable, operando a $Q_1C_{0,4}$				
Variable	<i>E. crassipes</i>	<i>P. stratiotes</i>	<i>S. auriculata</i>	<i>T. angustifolia</i>
Humedad de la planta (%)	94,60	88,04	90,32	79,51
Tasa crecimiento mg secos/m <sup>2</sup> -d	12635	15205	3456	10360
mg N/m <sup>2</sup> -d incorporado por la planta	327	418	106	154
mg P/m <sup>2</sup> -d incorporado por la planta	120	123	19	33
mg K/m <sup>2</sup> -d incorporado por la planta	1111	1692	215	437
mg N/m <sup>2</sup> -d removidos en la laguna	2700	2362	2113	922
mg P/m <sup>2</sup> -d removidos en la laguna	545	497	512	229
mg K/m <sup>2</sup> -d removidos en la laguna	6287	6500	6427	3946
% N removido en los tejidos de la planta	12,11	17,70	5,02	16,74
% P removido en los tejidos de la planta	22,02	24,75	3,71	14,48
% K removido en los tejidos de la planta	17,67	26,03	3,35	11,08

NPK tomado por las macrófitas, en el estado estable, operando a $Q_1C_{0,1}$				
Variable	<i>E. crassipes</i>	<i>P. stratiotes</i>	<i>S. auriculata</i>	<i>T. angustifolia</i>
Humedad de la planta (%)	95,63	92,18	94,91	80,18
Tasa crecimiento mg secos/m <sup>2</sup> -d	7489	12905	4654	7795
mg N/m <sup>2</sup> -d incorporado por la planta	174	335	128	129
mg P/m <sup>2</sup> -d incorporado por la planta	57	112	21	24
mg K/m <sup>2</sup> -d incorporado por la planta	708	1732	259	331
mg N/m <sup>2</sup> -d removidos en la laguna	1099	1073	920	536
mg P/m <sup>2</sup> -d removidos en la laguna	230	240	235	107
mg K/m <sup>2</sup> -d removidos en la laguna	1444	1439	1272	880
% N removido en los tejidos de la planta	15,83	31,22	13,96	24,00
% P removido en los tejidos de la planta	24,78	46,67	9,11	22,58
% K removido en los tejidos de la planta	49,03	-	20,38	37,65

Tasas de crecimiento en el EE, *E. crassipes* > *P. stratiotes* > *S. auriculata* > *T. angustifolia*

Tanner y Col. (1995) reportan que las plantas incorporan en sus tejidos entre 3-20% del  $N_T$  rem. y entre 3-60% del  $P_T$  rem.

Crites y Tchobanoglous (2000) reportan que la asimilación de  $N_T$  por parte de las plantas sólo explica el 10% de la remoción.

## 9. Utilización de SAT en el postratamiento de aguas residuales del café

### Efecto de la $C_L$ de los efluentes del SMTA sobre SAT.



Fuente: Rodríguez, 2009.

- La  $C_L$  es importante en el diseño de los SAT.
- Crites y Tchobanoglous (2000), SAT, *E. crassipes*,  $C_L$  (66 y 495 kg DBO/ha-d) y problemas de olor y mosquito cuando  $C_L > 220$  kg DBO/ha-d.
- Cossu y Col. (2001), lixiviados de rellenos sanitarios tratados anaerobiamente, EC,  $C_L > 50$  kg DQO/ha-d (baja remoción, stress, desaparición partes verdes).
- Fia (2008) reporta fitotoxicidad y senescencia de *Typha* spp, SHFS, ARC sin tratar,  $C_L$  (400 y 850 kg DBO/ha-d).

# 9. Utilización de SAT en el postratamiento de aguas residuales del café

## Efecto de la $C_I$ de los efluentes del SMTA sobre SAT.



- Cenicafé, La granja, Chinchiná (1310 msnm, T=21,4°C).
- Duración 146 días.
- Muestras totales 7.
- Muestras en EE 4.



- Efluentes SMTA ( $\approx$  2 tonelada de frutos/día).
- E. crassipes, P. stratiotes, S. auriculata, T. angustifolia.
- E. crassipes: 9 kg/m<sup>2</sup>
- P. stratiotes: 2 kg/m<sup>2</sup>
- S. auriculata: 1,5 kg/m<sup>2</sup>
- T. angustifolia: 30 plantas/m<sup>2</sup>



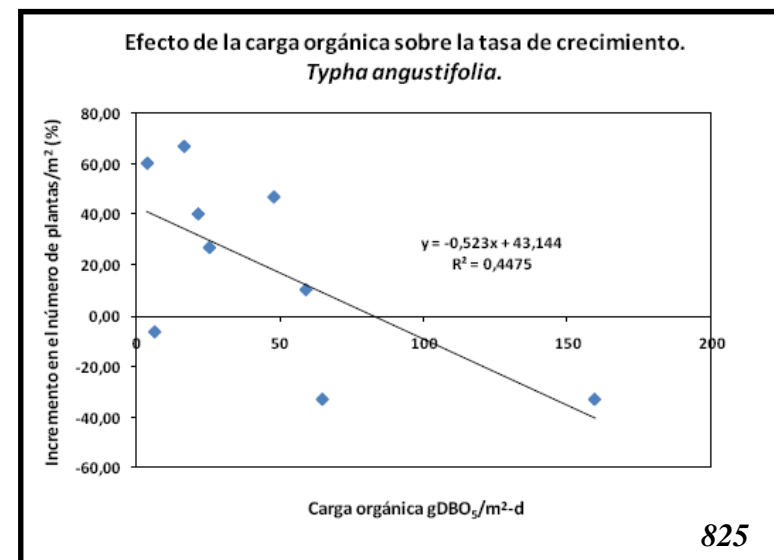
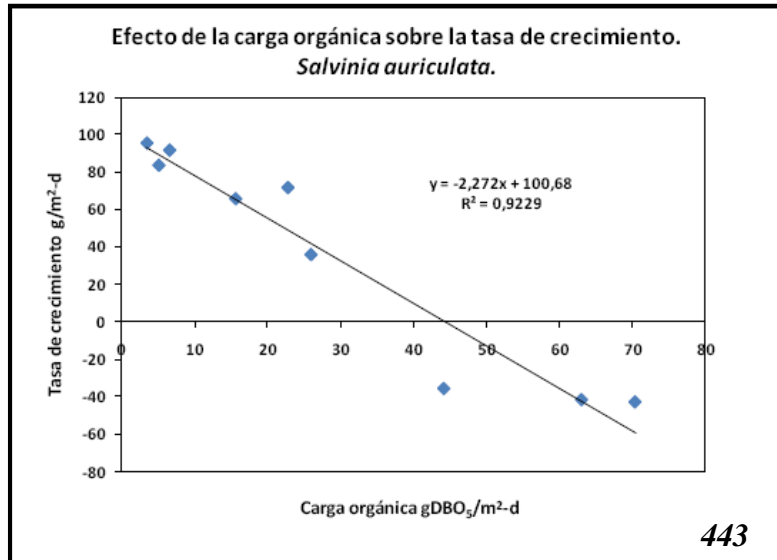
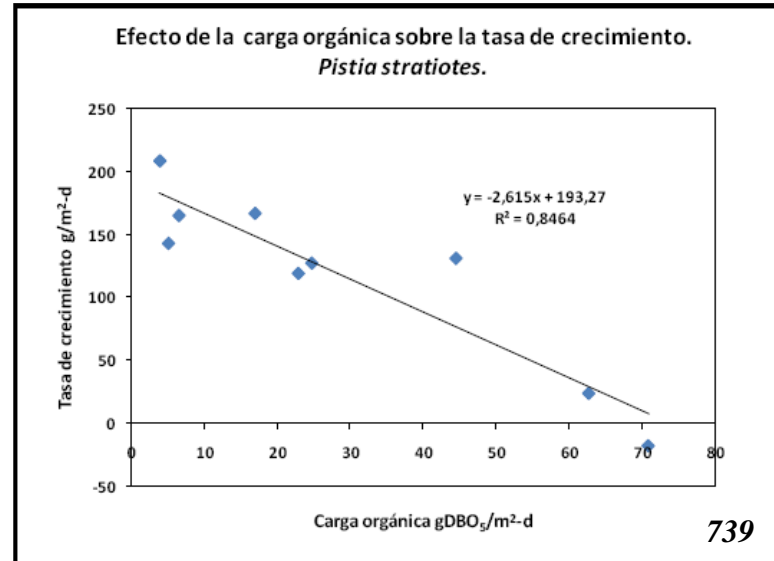
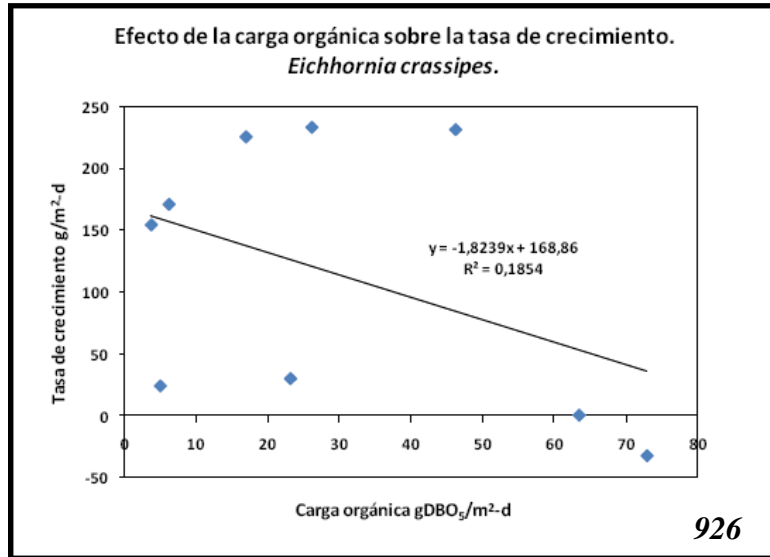
- 4 tipos de material biológico (EC, PS, SA, TA).
- 3 concentraciones de afluente ( $C_1$ ,  $C_{0,4}$ ,  $C_{0,1}$ ).
- 2 regímenes de caudal ( $1,5Q_1$ ,  $2Q_1$ ).
- Total 24 tratamientos.

Fuente: Rodríguez, 2009.

# 9. Utilización de SAT en el postratamiento de aguas residuales del café

## Efecto de la $C_L$ de los efluentes del SMTA sobre SAT.

Se presenta inhibición del crecimiento de EC, PS y SA con  $C_L$  de 926, 739 y 443 kg DBO<sub>5</sub>/ha-d e inhibición en el incremento del número de plantas de TA a 825 kg DBO<sub>5</sub>/ha-d.



las mejores especies fueron EC y PS, entre las que no se presentó diferencias al 5%, en los % de remoción de DBO<sub>5</sub>, SST, N<sub>T</sub>, P<sub>T</sub> y K.



# Efecto de la $C_I$ de los efluentes del SMTA sobre SAT.



*E. crassipes* 1,5Q<sub>1</sub>C<sub>1</sub>



*E. crassipes* 2Q<sub>1</sub>C<sub>1</sub>



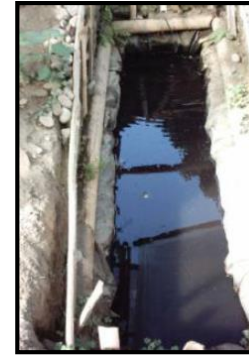
*P. stratiotes* 1,5Q<sub>1</sub>C<sub>1</sub>



*P. stratiotes* 2Q<sub>1</sub>C<sub>1</sub>



*S. auriculata* 1,5Q<sub>1</sub>C<sub>1</sub>



*S. auriculata* 2Q<sub>1</sub>C<sub>1</sub>



*E. crassipes* 1,5Q<sub>1</sub>C<sub>0,4</sub>



*E. crassipes* 2Q<sub>1</sub>C<sub>0,4</sub>



*P. stratiotes* 1,5Q<sub>1</sub>C<sub>0,4</sub>



*P. stratiotes* 2Q<sub>1</sub>C<sub>0,4</sub>



*S. auriculata* 1,5Q<sub>1</sub>C<sub>0,4</sub>



*S. auriculata* 2Q<sub>1</sub>C<sub>0,4</sub>



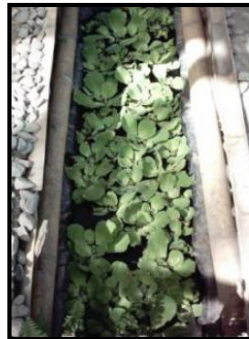
*E. crassipes* 1,5Q<sub>1</sub>C<sub>0,1</sub>



*E. crassipes* 2Q<sub>1</sub>C<sub>0,1</sub>



*P. stratiotes* 1,5Q<sub>1</sub>C<sub>0,1</sub>



*P. stratiotes* 2Q<sub>1</sub>C<sub>0,1</sub>



*S. auriculata* 1,5Q<sub>1</sub>C<sub>0,1</sub>



*S. auriculata* 2Q<sub>1</sub>C<sub>0,1</sub>

## 9. Utilización de SAT en el postratamiento de aguas residuales del café

### Monocultivo vs Policultivo en SAT operando con efluentes de SMTA.



Fuente: Rodríguez, 2009.

SAT que involucran varias especies de plantas pueden mostrar > capacidad de eliminación de contaminación y > estabilidad que los constituidos por una sola especie (Lord, 1982).

Coleman y Col. (2001), reportan en el tratamiento de ARD con las especies emergentes *Typha latifolia*, *Juncus effusus* y *Scirpus validus*, que se presentaron diferencias significativas entre especies y sugieren que los policultivos pueden tener un mejor desempeño que los monocultivos.

Sooknah y Wilkie (2004), reportan que un SAT postratando efluentes anaerobios de excretas de vacuno utilizando únicamente *EC* mostró, en términos de reducción de nutrientes, DQO, sólidos y salinidad > policultivo (mezcla de *E. crassipes*, *P. stratiotes* e *Hydrocotyle umbellata*) > *P. stratiotes* > *Hydrocotyle umbellata*.

# 9. Utilización de SAT en el postratamiento de aguas residuales del café

## Monocultivo vs Policultivo en SAT operando con efluentes de SMTA.



- Cenicafé, La granja, Chinchiná (1310 msnm, T=21,4°C).
- Duración 393 días.
- FI: 204 días. Muestréos totales 11 y Muestréos en EE 5.
- FII: 189 días. Muestréos totales 4.



- Efluentes SMTA(≈ 0,5 tonelada de frutos/día).
- E. crassipes, P. stratiotes, S. auriculata, T. angustifolia.
- E. crassipes: 9 kg/m<sup>2</sup>
- P. stratiotes: 2 kg/m<sup>2</sup>
- S. auriculata: 1,5 kg/m<sup>2</sup>
- T. angustifolia: 30 plantas/m<sup>2</sup>



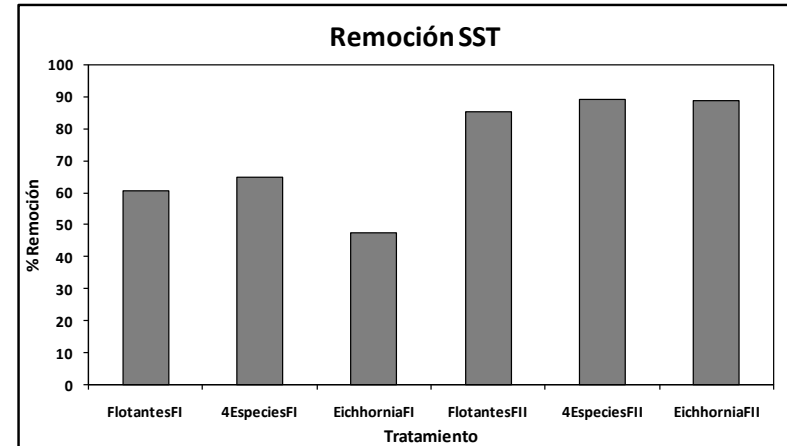
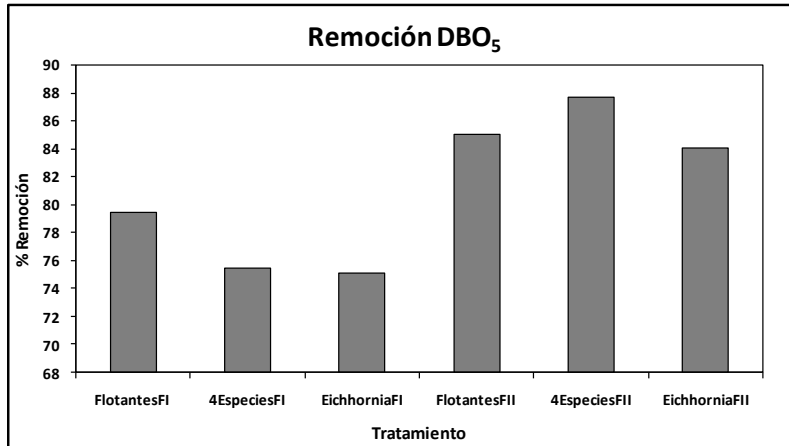
- 3 tipos de SAT (4 lagunas en serie/SAT).
- 2 concentraciones de afluente (C<sub>1</sub>, C<sub>0,2</sub>).
- Caudal: 105 ml/min.
- Total 6 tratamientos.

Fuente: Rodríguez, 2009.

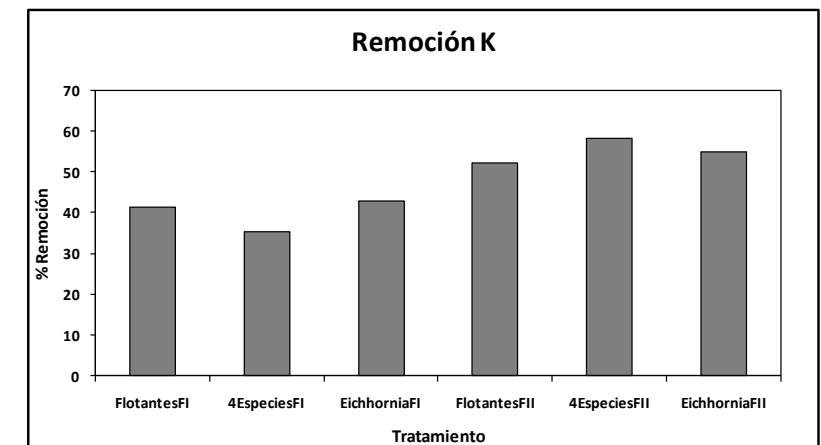
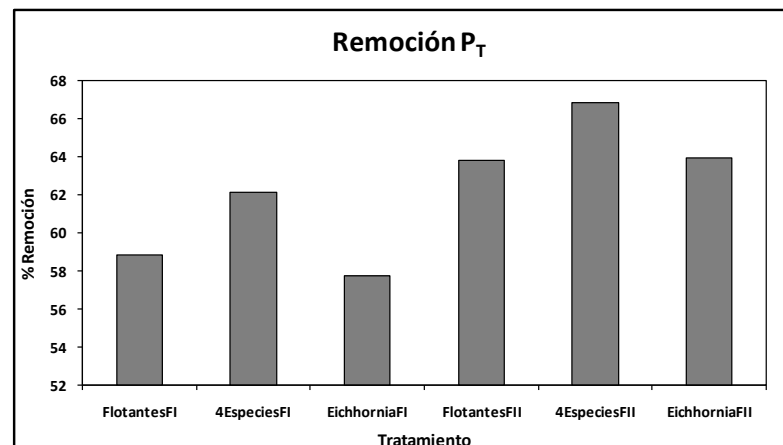
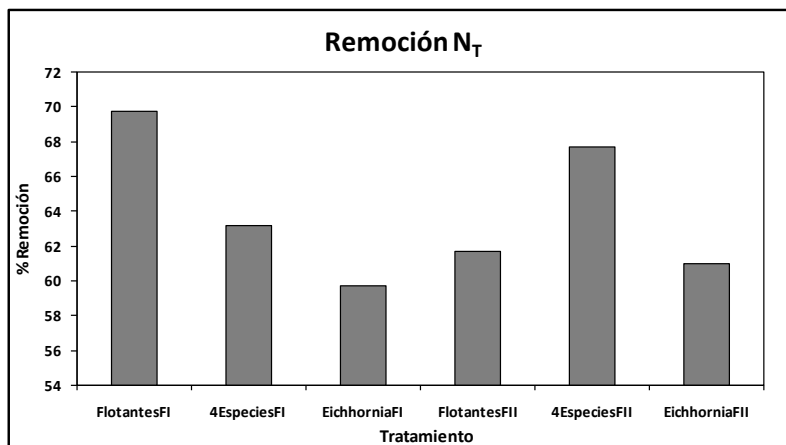
# 9. Utilización de SAT en el postratamiento de aguas residuales del café

## Monocultivo vs Policultivo en SAT operando con efluentes de SMTA.

No se presentaron diferencias estadísticas, en los porcentajes de remoción de la  $DBO_5$ , SST,  $N_T$ ,  $P_T$  y K, entre los 3 SAT durante las 2 fases de experimentación.



Considerando el desempeño de los 3 SAT en la remoción (medida como  $mg/m^2-d$ ) de los parámetros  $DBO_5$ , SST,  $N_T$ ,  $P_T$  y K, se puede inferir que policultivo > mezcla flotantes > *E. crassipes*



# 9. Utilización de SAT en el postratamiento de aguas residuales del café

REPÚBLICA DE COLOMBIA - MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE  
**CORPORACION AUTONOMA REGIONAL**  
NIT. 890.803.005-2

Subdir N Y C.A. No. 602030

Manizales, 31 MAR 2005


Doctora  
ARACELLY OSPINA TABORDA  
Directora  
UNIDAD MUNICIPAL DE ASISTENCIA TÉCNICA AGROPECUARIA  
U M A T A  
Alcaldía Municipal  
SAN JOSÉ, CALDAS

Asunto: Respuesta a oficio con Reg. 601611 de Febrero 24-2005



Con el fin de verificar el manejo apropiado a los residuos sólidos y líquidos generados en el proceso del beneficio de café, se realizó visita técnica el día 03 de marzo de 2005 al predio San Bernardo propiedad del señor Nelson Rodríguez Valencia con C.C. 10.263.484 ubicado en la Vereda la Paz jurisdicción del municipio de San José.

La visita fue acompañada por el señor José Orlando Ospina Taborda administrador de la finca y se constató el excelente manejo técnico que se tiene en el predio, sin ocasionar impactos ambientales adversos al ecosistema, lo que permite expedirle este documento como un Certificado Ambiental, para el predio mencionado.

Cualquier inquietud adicional con gusto la suministraremos.

Atentamente,  
  
SANTIAGO VILLEGAS YEPES  
Subdirector de Normatización y Calidad Ambiental  
Medio Ambiente, San José, marzo 16-05, Geap

EDIFICIO SEGUROS ATLAS COMPUTADOR 841409 FAX (863) 841952 APARTADO AEREO MANIZALES - COLOMBIA  
LINEA VERDE 018000 - 368613 E - MAIL: [corpocaldas@epm.net.co](mailto:corpocaldas@epm.net.co) WEB: [corpocaldas.gov.co](http://corpocaldas.gov.co)



**CERTIFICADO**  
- UTZ KAPEH -

CERTIFICADO NUMERO  
BT04770600CT1UK

Este Certificado se basa en la auditoria efectuada conforme a las regulaciones estipuladas en la versión del Código de Conducta UTZ KAPEH V.2006 Del Protocolo de Certificación de UTZ KAPEH y un contrato firmado, con Certificadora BIOTROPICO LTDA, se confirma que las superficies / instalaciones, detalladas abajo se encuentran en cumplimiento del Código de Conducta UTZ KAPEH, versión 2006. El presente Certificado garantiza que los criterios sociales, medioambientales y económicos para la producción de café verde conforme lo indica el Código de Conducta han sido cumplidos.

**DATOS DEL PRODUCTOR**  
EMPRESA CERTIFICADA:  
COOPERATIVA DE CAFICULTORES DE ANSERIMA  
ARACELLY OSPINA - SAN BERNARDO

**DIRECCIÓN / CIUDAD / MUNICIPIO**  
CARRERA 5 No. 22-04 Av. EL LIBERTADOR (ANSERIMA-CALDAS)

**NUMERO DE PRODUCTOR UTZ KAPEH**  
889-3-27

**DATOS DE LA PRODUCCIÓN**  
SUPERFICIE TOTAL CERTIFICADA: 7,8 HAS  
PRODUCCIÓN TOTAL CERTIFICADA: CAFÉ ARÁBICA PERGAMINO 13 TON., CAFÉ ORO 12 TON.  
CANTIDAD PROMEDIO COSECHADA EN LOS ÚLTIMOS 4 años: 15,6 TONELADAS


**DATOS DEL CERTIFICADO**  
NOMBRES DE LAS INSTALACIONES: FINCA SAN BERNARDO  
FECHA DE EMISIÓN DEL CERTIFICADO: 10 DE OCTUBRE DE 2006  
FECHA DE VENCIMIENTO: 29 DE SEPTIEMBRE DE 2007  
PRIMERA FECHA DE CERTIFICACIÓN: 10 DE OCTUBRE DE 2006

Este certificado permanece amparado por la póliza de garantía No.1011000058301 a nombre de BIOTROPICO LTDA y puede retirarse en caso de cancelaciones conforme se menciona en el contrato o en caso de que ocurran cambios o desviaciones en los datos descritos arriba. El Operador tiene la obligación de informar inmediatamente a la Certificadora BIOTROPICO LTDA cualquier cambio en los datos descritos arriba.

BIOTROPICO LTDA esta Acreditada conforme al alcance ISO 65 para productos, por la Entidad de Acreditación SUPERINTENDENCIA DE INDUSTRIA Y COMERCIO, de Colombia, y bajo la Resolución No. 2229 / 2005.

**WILLIAM ALBERTO FLOREZ C.**  
DIRECTOR DE CERTIFICACIÓN

Emitió por:  
BIOTROPICO LTDA.  
Calle 2a # 26 - 121, Segundo Piso.  
Barrio San Fernando  
Teléfonos: 864779 / 8617458  
E MAIL: [williamflorez@biotropico.com](mailto:williamflorez@biotropico.com)  
WEB: [www.biotropico.com](http://www.biotropico.com)  
Café Colombia III Sur América



La integración del SAT al SMTA permitió incrementar las remociones de la  $DBO_5$  de las aguas mieles del café del 92,19 al 98,64% y de los SST del 96,04 al 98,91%.

Los efluentes del SAT no mostraron efectos tóxicos en la producción de Tilapia roja y se constituyen en una oportunidad de aprovechamiento para la producción piscícola en fincas con oferta limitada de agua.

**Costo SMTA: 2,1 millones. Costo SAT 0,6 millones. Costo Total Sistema 2,7 millones.**  
**Sobrepeso UTZ \$ 2000/@\*844@ = 1,7 millones550€.**

## 9. Utilización de SAT en el postratamiento de aguas residuales del café

### Calidad de las aguas mieles después del tratamiento.



*Efluente de un SMTA.*

- Debido a la cantidad de parámetros que participan en el diagnóstico de la calidad del agua y a lo complejo que éste puede llegar a ser, se han diseñado índices para sintetizar la información proporcionada por esos parámetros.
- Desde el punto de vista físico-químico y microbiológico la Fundación Nacional de Saneamiento (USA) diseñó un índice multiparámetro, que utiliza 9 parámetros (DBO, SST, % de saturación de Oxígeno, CF, N-NH<sub>3</sub>, pH, T, Turbidez y P-PO<sub>4</sub>) para calcular el índice de calidad de un cuerpo de agua.
- En el se construyeron curvas promedios que permitieran relacionar el efecto de cada uno de los parámetros sobre la calidad del agua (Q), de acuerdo con el concepto de expertos.

# 9. Utilización de SAT en el postratamiento de aguas residuales del café

## Uso Como Agua Potable

90-100 E	- No requiere purificación para consumo.
80-90 A	- Purificación menor requerida.
70-80 LC	- Dudoso su consumo sin purificación.
50-70 C	- Tratamiento potabilizador necesario.
40-50 FC	- Dudosa para consumo.
0-40 EC	- Inaceptable para consumo.

## Uso En Agricultura

90-100 E	- No requiere purificación para riego.
70-90 A	- Purificación menor para cultivos que requieran de alta calidad de agua.
50-70 LC	- Utilizable en mayoría de cultivos.
30-50 C	- Tratamiento requerido para la mayoría de los cultivos.
20-30 FC	- Uso sólo en cultivos muy resistentes.
0-20 EC	- Inaceptable para riego.

## Uso En Pesca Y Vida Acuática

70-100 E	- Pesca y vida acuática abundante.
60-70 A	- Límite para peces muy sensitivos.
50-60 LC	- Dudosa la pesca sin riesgos de salud.
40-50 C	- Vida acuática limitada a especies muy resistentes.
30-40 FC	- Inaceptable para actividad pesquera.
0-30 EC	- Inaceptable para vida acuática.

## Uso Industrial

90-100 E	- No se requiere purificación.
70-90 A	- Purificación menor para industrias que requieran alta calidad de agua para operación.
50-70 LC	- No requiere tratamiento para la mayoría de industrias de operación normal.
30-50 C	- Tratamiento para mayoría de usos.
20-30 FC	- Uso restringido.
0-20 EC	- Inaceptable para cualquier industria.

## Uso Recreativo

70-100 E	- Cualquier tipo de deporte acuático.
50-70 A	- Restringir los deportes de inmersión, precaución si se ingiere dada la posibilidad de presencia de bacterias.
40-50 LC	- Dudosa para contacto con el agua.
30-40 C	- Evitar contacto, sólo con lanchas.
20-30 FC	- Contaminación visible, evitar cercanía
0-20 EC	- Inaceptable para recreación.

Excelente: 91-100

Buena: 71-90

Media: 51-70

Mala: 26-50

Muy Mala: 0-25

## Calidad de las aguas mieles después del tratamiento.

➤ *Efluentes SMTA (32,97). Agua de mala calidad. Se considera que está contaminada y requiere de tratamiento para ser utilizada en riego en la mayoría de cultivos y para su uso en la industria, es inaceptable para destinarla para consumo humano, inaceptable para actividad pesquera y se debe evitar el contacto en el uso recreativo.*

➤ *Efluentes SAT (53,21). Agua de calidad media. Se considera levemente contaminada y se puede utilizar en el riego agrícola de la mayoría de cultivos, en la mayoría de las industrias, requiere de un tratamiento potabilizador para destinarla al consumo humano, con restricciones para la actividad pesquera y restricciones para ser utilizada con fines recreativos (deportes de inmersión).*

# 10. Aprovechamiento de la biomasa de los de SAT



- Cenicafé, La granja, Chinchiná (1310 msnm, T=21,4°C).
- Duración 10 meses.

## SUSTRATOS

- Aserrín de tallo de café.
- Pulpa de café.
- Borra de café.
- Biomasa de EC, PS, TA, SA.



## MATERIAL BIOLÓGICO

- *Pleurotus pulmonarius*.
- *Pleurotus sajor caju*.
- *Lentinula edodes* (L54, L4055).

## TRATAMIENTOS

- *Pleurotus* spp (2 cepas\*3 tipos de sustratos) = 6 tratamientos.
- Controles (2 cepas\*2 tipos de sustratos) = 4 tratamientos control.
- 25 unidades experimentales de 1 kg/tratamiento.



- *Lentinula edodes* (2 cepas\* 2 tipos de sustratos) = 4 ttos.
- 50 unidades experimentales de 1 kg/tratamiento.

Fuente: Rodríguez, 2009.



# 10. Aprovechamiento de la biomasa de los de SAT

## Producción semilla hongos



*Multiplicación en agar*



*Inóculo primario*



*Inóculo secundario*

## Conformación sustratos



*C/N  $\approx$  40*

## Esterilización sustratos



*Con calor  
6h a 94°C*



*En frío  
10d Tamb*



## Inoculación



*2,5%*

Fuente: Rodríguez, 2009.

# 10. Aprovechamiento de la biomasa de los de SAT

## Lombricultura



### SUSTRATOS

- Biomasa de EC, PS, TA, SA.



### MATERIAL BIOLÓGICO

- *Eisenia foetida*.



### TRATAMIENTOS

- 2,5 kg de biomasa fresca
- 0,25 kg de biomasa deshidratada.
- Área 0,14 m<sup>2</sup>
- 250 g de lombrices.

# 10. Aprovechamiento de la biomasa de los de SAT

## Rendimientos - Pleurotus.

Tratamiento	Promedio
<i>P. pulmonarius</i> (Subproductos + biomasa de plantas)	128,55
<i>P. sajor caju</i> (Subproductos + biomasa de plantas)	103,85
<i>P. sajor caju</i> (Biomasa de plantas)	110,79
<i>P. pulmonarius</i> (Biomasa de plantas)	95,58
<i>P. sajor caju</i> (Subproductos del café)	61,88
<i>P. pulmonarius</i> (Subproductos del café)	69,39



*P. sajor caju* y *P. pulmonarius* sobre sustratos suplementados con biomasa de plantas acuáticas.

La biomasa de plantas acuáticas utilizada como suplemento de los sustratos tradicionales con subproductos del café para el cultivo de hongos comestibles del género *Pleurotus*, en valores del 16%, mostró efectos positivos en el rendimiento de los cultivos, sin alterar la sanidad del cultivo, permitiendo alcanzar valores de rendimiento del 128,55% con el hongo *P. pulmonarius* y del 103,85% con el hongo *P. sajor caju*, muy superiores a los alcanzados con los subproductos del café.

# 10. Aprovechamiento de la biomasa de los de SAT

## Valor fertilizante del Lombricomposteo.

Tipo de Biomasa	Especie	Rendimiento (% base seca)	g/100 g de materia seca inicial			N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O (%)
			N	P	K	
Seca	<i>E. crassipes</i>	47,50	2,67	0,67	3,14	5,63-6,42-15,90
	<i>P. stratiotes</i>	47,68	2,60	0,35	3,62	5,45-3,39-18,31
	<i>T. angustifolia</i>	57,65	3,82	0,50	11,18	6,63-3,94-46,74
	Mezcla	38,86	2,26	0,38	2,88	5,81-4,49-17,83
Fresca	<i>E. crassipes</i>	50,19	2,45	0,44	4,12	4,89-4,03-19,76
	<i>P. stratiotes</i>	72,93	2,97	0,28	1,55	4,07-1,74-5,11
	<i>T. angustifolia</i>	50,44	2,71	0,65	3,73	5,37-5,87-17,83
	<i>S. auriculata</i>	42,18	2,53	0,26	1,52	5,99-2,84-8,67
	Mezcla	51,33	2,35	0,50	2,87	4,57-4,49-13,49

Los rendimientos medios del proceso de lombricompostaje utilizando biomasa de plantas provenientes del sistema acuático de tratamiento fue de 51,73 ± 9,58%.

5,38% N – 4,13% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 18,18% K<sub>2</sub>O

...*Lombricultivos*...



Con *E. crassipes*



Con *P. stratiotes*



Con *T. angustifolia*



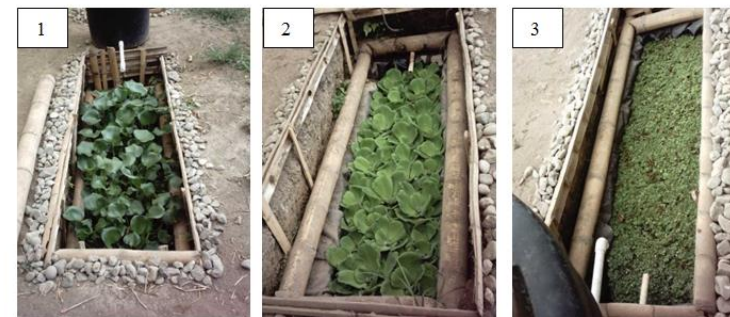
Con *S. auriculata*

# Resumen de las eficiencias de tratamiento.

## Investigaciones de SAT en el postratamiento de las aguas residuales del café

Eficiencias de remoción de algunos parámetros en humedales artificiales utilizados en el postratamiento de las aguas residuales del beneficio del café.

Especie	Remoción DQO (%)	Remoción DBO <sub>5</sub> (%)	Remoción SST (%)	Remoción N <sub>T</sub> (%)	Remoción P <sub>T</sub> (%)
Jacinto de agua	79,21	80,91	78,68	48,01	64,35
Lechuga de agua	79,78	80,72	72,87	45,06	61,39
Oreja de agua	76,83	79,09	71,83	38,06	60,21
Enea	73,78	77,19	84,58	21,18	30,26
Heliconia	74,71	76,10	82,12	28,37	37,14
Pasto vetiver	76,75	78,23	84,27	47,24-	62,15



Plantas utilizadas en los humedales para el postratamiento de las aguas residuales del beneficio del café. 1. Jacinto acuático. 2. Lechuga de agua. 3. Oreja de agua. 4. Enea. 5: Heliconias. 6. Pasto vetiver.

## **Bibliografía consultada**

**APHA, AWWA, WPCF. (1992). Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. Madrid (España), Ediciones Díaz de Santos. 1914 p.**

**CRITES, R.; TCHOBANOGLIOUS, G. (2000). Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados. Editorial McGraw-Hill. Bogotá (Colombia). 1082 p.**

**HAMMER, D.A. (1991). Constructed wetlands for wastewater treatment; Municipal, Industrial and Agricultural. Chelsea, Michigan (Estados Unidos), Lewis Publishers. 831 p.**

**LARA B., J. A. (1999). Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. Instituto Catalán de Tecnología. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona (España). 114 p.**

**MARTÍN, M., I. (1993). Sistemas de aplicación al suelo. Filtros verdes. In: Tratamiento de aguas residuales, basuras y escombros en el ámbito rural. Editorial Agrícola Española, S.A. Madrid (España). p. 155 - 185.**

**METCALF AND EDDY INC. (1995). Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. Tercera edición. Editorial McGraw-Hill. Madrid (España). 2 Volúmenes.**

**NALCO CHEMICAL COMPANY. (1989). Manual del agua. Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones. Editorial McGraw – Hill. México, D. F., Tomo III. p 32-1 a 43-20.**

**REDDY, K.R.; DEBUSK, W.F. (1985). Growth Characteristics of Aquatic Macrophytes Cultured in Nutrient – enriched Water: II. Azolla, Duckweed, and Salvinia. Economic Botany 39(2):200-208.**

**REDDY, K.R.; DEBUSK, W.F. (1984). Growth Characteristics of Aquatic Macrophytes Cultured in Nutrient - enriched Water: I. Water Hyacinth, Water Letucce, and Pennywort. Economic Botany 38(2):229-239.**

**RODRÍGUEZ V., N. (2009). Estudio de un biosistema integrado para el postratamiento de las aguas residuales del café utilizando macrófitas acuáticas. Valencia (España). Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, 2009. 508 p. Esp.**

**U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. EPA. (1999). Manual. Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters. EPA 625/R – 99/010. Cincinnati, Ohio. 165 p.**

# Síguenos



[www.cenicafe.org](http://www.cenicafe.org)



[agroclima.cenicafe.org](http://agroclima.cenicafe.org)



@cenicafe



cenicafé

