



XVIII
**REUNIÓN TÉCNICA
NACIONAL**
DE PALMA DE ACEITE
2023

Sistemas de tratamiento natural, con énfasis en cero descargas, para el postratamiento y manejo de aguas agroindustriales

Nelson Rodríguez Valencia. Cenicafé
Septiembre 29 del 2023

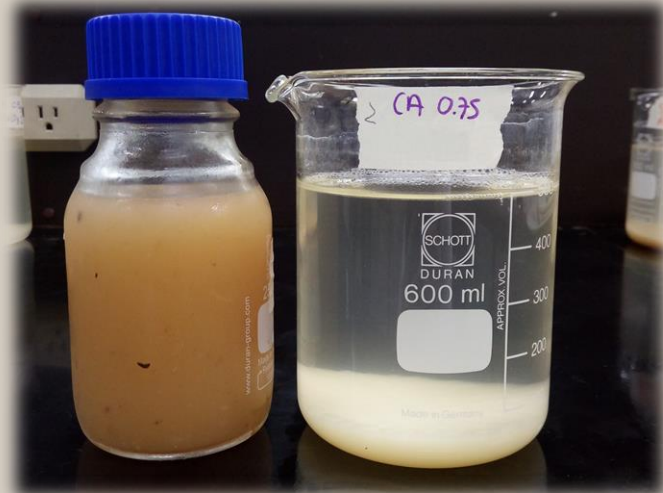




Pregunta 1

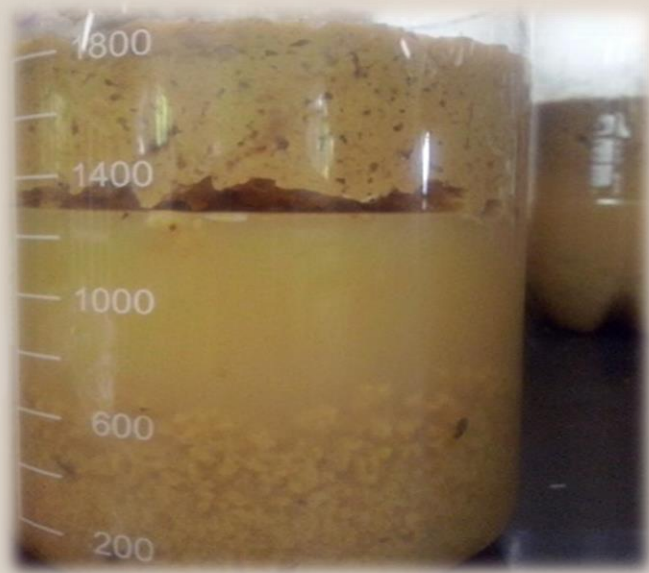
¿Porqué investigar en tecnologías de manejo de las aguas residuales que generen cero descargas?

Justificación



La nueva normativa colombiana del recurso hídrico para ARnD (Resolución 631 del 2015, Decreto 50 del 2018, Resolución 1256 del 2021), establece los parámetros de calidad que deben cumplir las aguas tratadas antes de su descarga o reúso, implicando unos costos legales ambientales anuales significativos para el productor, representados en la solicitud de un permiso de vertimientos, el muestreo y caracterización del vertimiento, el pago de la visita por parte del funcionario de la CAR y el pago de la tasa retributiva (superiores a 2 millones/año).

Posibilidades de disposición de las aguas residuales.



(ARnD)

Alcantarillado público

No requiere permiso de vertimientos.
Cumplimiento de las disposiciones del prestador del servicio de alcantarillado.

Pago al prestador del servicio \$
1.500/m³

A cuerpos de agua

Al suelo

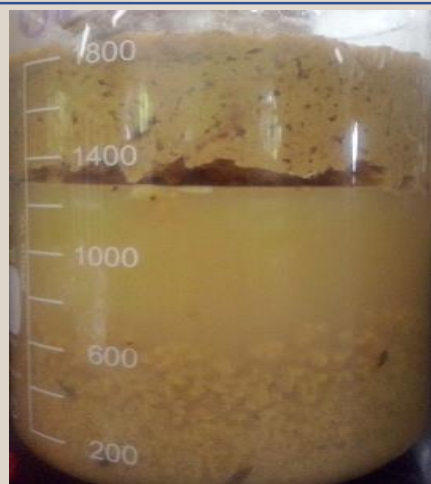
Reúso

Evaporación

Posibilidades de disposición de las aguas residuales.



Costo tratamiento
\$ 7.500/m³



ARnD

A cuerpos de agua

Requiere permiso de vertimientos (Decreto 3930 del 2010).

Cumplimiento de normativa nacional (Resolución 631 del 2015).

Posible cumplimiento de la normativa local.

Pago tasa retributiva (Decreto 2667 del 2012)

pH (5-9)

DQO < 3000 ppm

SST < 800 ppm

Ssed < 10 ppm

GyA < 30 ppm

P_T N_T Color

Permiso vertimientos: \$ 20,000
 Visita funcionario CAR: \$ 250,000
 Caracterización efluentes: \$ 500,000 (por punto y por planta)
 Pago Tasa retributiva: \$ 50/@ cps – \$ 150/@ cps
Total: \$ 1,000.000/año

Aceites y Grasas	\$ 166.550,00	\$ 92.100,00
Color Real	\$ 16.300,00	\$ 16.300,00
DQO	\$ 121.100,00	\$ 72.600,00
Fósforo	\$ 54.300,00	\$ 55.700,00
Nitrógeno Kjeldahl	\$ 134.000,00	\$ 68.400,00
pH	\$ 13.600,00	\$ 14.200,00
Sólidos Sedimentables	\$ 24.500,00	\$ 32.300,00
Sólidos Suspendidos	\$ 46.500,00	\$ 39.700,00
	\$ 576.850,00	\$ 391.300,00

Posibilidades de disposición de las aguas residuales.



Costo tratamiento

\$ 7.500/m³



ARnD

Al suelo

**Sí requiere permiso de vertimientos.
(Decreto 3930 del 2010).**

Cumplimiento de normas nacionales y locales (Decreto 1076 de 2015).

Caracterización del suelo
(Decreto 50 del 2018)

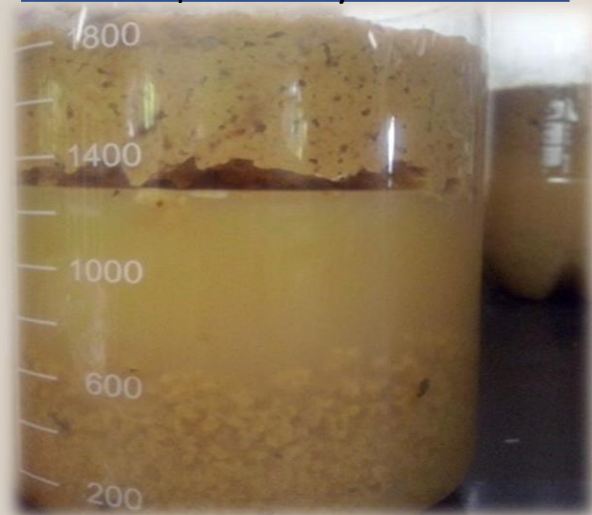
Caracterización del agua
(Norma a expedirse en el 2022-2023).

Permiso vertimientos: \$ 20,000
Visita funcionario CAR: \$ 250,000
Caracterización efluentes > \$ 2.000,000
Caracterización suelo > \$ 2,000,000
Total: > \$ 5,000,000/año

Posibilidades de disposición de las aguas residuales.



Costo tratamiento
\$ 15.000/m³



ARnD

Reúso total

No requiere permiso de vertimientos. Cumplimiento de norma
(Resolución 1256 del 2021 que derogó a la Resolución 1207 del 2014).

Caracterización del agua > \$ 3.000.000.

No pago de tasa retributiva

7 veces menor que para AP

37 parámetros
caracterizadores

Tabla 2. Criterios de calidad de aguas residuales para uso agrícola. Fuente: Decreto Único 1076 del 2015 (MADS, 2015); Resolución 1256 del 2021 (MADS, 2021).

Variable	Unidad de medida	Valor límite máximo permisible
Físicos		
pH	Unidades	4,5–9,0
Conductividad	µS/cm	1.500
Microbiológicos		
Coliformes termotolerantes	NMP/100 mL	<1 x 10 ³
Enterococos fecales	NMP/100 mL	<1 x 10 ³
Químicos		
Fenoles totales	mg/L	0,20
Hidrocarburos totales	mg/L	1,0
Iones		
Cianuro libre	mg/L	0,20
Cloruros	mg/L	300,0
Fluoruros	mg/L	1,0
Sulfatos	mg/L	500,0
Metales		
Aluminio	mg/L	5,0
Berilio	mg/L	0,10
Cadmio	mg/L	0,01
Cinc	mg/L	2,0
Cobalto	mg/L	0,05
Cobre	mg/L	0,20
Cromo	mg/L	0,10
Hierro	mg/L	5,0
Litio	mg/L	2,5
Manganeso	mg/L	0,2
Mercurio	mg/L	0,001
Molibdeno	mg/L	0,01
Níquel	mg/L	0,20
Plomo	mg/L	5,0
Sodio	mg/L	200,0
Vanadio	mg/L	0,10
Metaloides		
Antimonio	mg/L	0,10
Arsénico	mg/L	0,10
Boro	mg/L	Entre 0,30 y 4,0
No metales		
Selenio	mg/L	0,02
Otros parámetros		
Cloro total residual (con mínimo 30 minutos de contacto)	mg/L	<1,0
Nitratos (expresado como N)	mg/L	11,0
Relación de absorción de sodio (RAS)	Adimensional	Análisis y Reporte
Porcentaje de sodio posible (PSP)	%	Análisis y Reporte
Salinidad efectiva y potencial	meq/L	Análisis y Reporte
Carbonato de sodio residual	meq/L	Análisis y Reporte
Radionucleidos	Bq/kg	Análisis y Reporte

MADS, Noviembre del 2021

Posibilidades de disposición de las aguas residuales.



MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL

DECRETO NÚMERO DE 2023

Por medio del cual se modifica y adiciona el Decreto 1071 de 2015 Único Reglamentario del Sector Administrativo Agropecuario, Pesquero y de Desarrollo Rural, en cumplimiento del artículo 61 de la Ley 2294 de 2023 "Por el cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 "Colombia Potencia Mundial de la Vida" y se dictan otras disposiciones" y se reglamenta la Ley 160 de 1994

ARTÍCULO 2.14.19.4.8. Extinción del dominio por incumplimiento de la función ecológica de la propiedad. *De conformidad con lo señalado en el Artículo 59, de la Ley 160 de 1994, será causal de extinción del derecho del dominio, la explotación o uso que se haga de un predio cuando la misma se haga con violación de las normas sobre conservación, mejoramiento y utilización racional de los recursos naturales renovables y las relacionadas con la preservación y restauración del ambiente contenidas en el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente y demás disposiciones pertinentes*

En concordancia con lo anterior, y de conformidad con el Artículo 61, de la Ley 160 de 1994, se entiende que existe causal para la extinción del derecho del dominio, cuando en el procedimiento administrativo agrario se compruebe que concurren en el predio objeto de la actuación, el uso con deterioro o perjuicio sobre los recursos naturales renovables y del ambiente, cuando se realizan conductas o se producen abstenciones que los destruyen, agotan, contaminan, disminuyen, degradan, o cuando se utilizan por encima de los límites permitidos por normas vigentes, alterando las calidades físicas, químicas o biológicas naturales, o se perturba el derecho de ulterior aprovechamiento en cuanto éste convenga al interés público, en el marco de lo cual, deberá entenderse en consonancia, con el derecho a la alimentación.

Entendido esos usos con deterioro, entre otros:

- *El uso de los predios, con contaminación de fuentes de agua*
- *El uso de los predios con procesos de deforestación*
- *El uso de los predios, cuando generen deterioro del suelo, que perturbe el derecho de ulterior aprovechamiento.*
-] *El uso de los predios se dé, con violación de las condiciones establecidas en las licencias ambientales respectivas, según concepto de la ANLA*
- *Usos de los predios con violación o transgresión las determinantes ambientales*

Posibilidades de disposición de las aguas residuales.

Evaporación



Tasa de evaporación en secado solar: $2,74 \text{ L/m}^2\text{-d}$
Ramírez *et al.* , 2015

Costo estimado \$ 30,000/m³

Fuente de energía	\$/m ³
Eléctrica	320,000
Gas propano	250,000
Gas natural	100,000



Tratamiento Químico

Ventajas

Son sistemas de tratamiento que requieren de poca área para su implementación y permiten obtener el agua tratada en un tiempo corto (menor a 2 días). Sus rendimientos, en términos de depuración, son muy altos (superiores al 90%).

Desventajas

El costo de los compuestos químicos utilizados en la depuración, además de requerir un poco de automatización para la aplicación de los mismos y ser más exigente en aspectos relacionados con seguridad y salud en el trabajo. El costo de remover 1 kg de DQO supera los \$1000 COP. El agua tratada genera un vertimiento cuando se realiza su disposición final, lo que genera unos costos legales ambientales anuales que deben ser cubiertos por el caficultor.

Sistemas de Tratamiento



Tratamiento Biológico

Ventajas

No requieren el uso de compuestos químicos, por lo que los costos de tratamiento son más económicos del orden de \$300 COP/kg de DQO.

Desventajas

Los tiempos de proceso para el tratamiento de las aguas residuales pueden variar entre 2 ó 3 días para los tratamientos aerobios hasta más de una semana para los tratamientos anaerobios. Las necesidades de área son superiores a las de los tratamientos químicos. Ante eventos de sobrecarga orgánica, la recuperación de los sistemas es lenta. El agua tratada genera un vertimiento cuando se realiza su disposición final, lo que genera unos costos legales ambientales anuales que deben ser cubiertos por el caficultor

Rotoplast
 Rotomoldeados y productos plásticos
 5000 LL

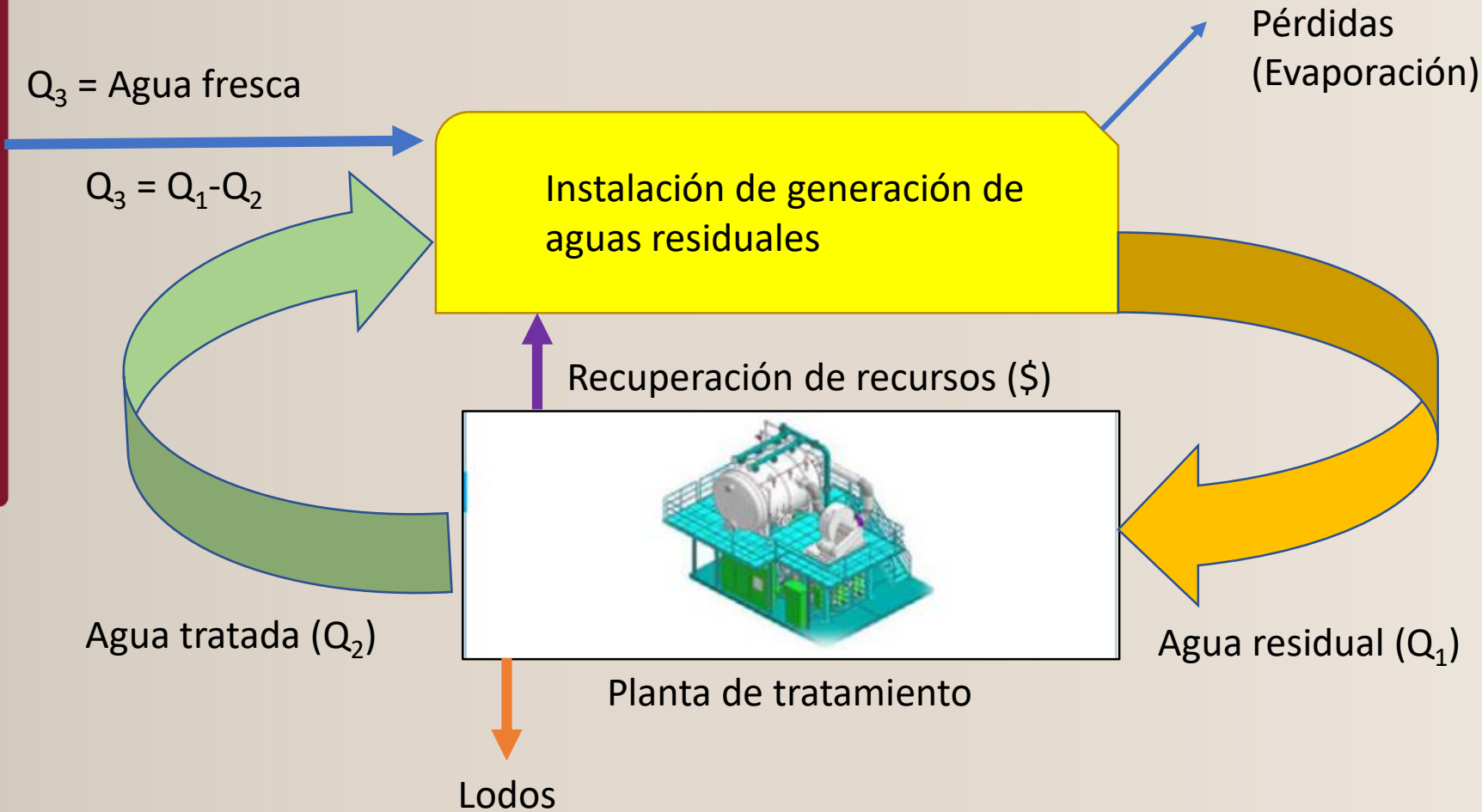
Sistemas de Tratamiento

¿Porqué investigar en tecnologías de manejo de las aguas residuales del café que generen cero descargas?

Respuesta 1

- Por los altos costos ambientales asociados a la descarga de vertimientos al agua (> \$ 1,000,000/año)
- Por los altos costos ambientales asociados a la descarga de vertimientos al suelo (> \$ 5,000,000/año)
- Por los altos costos ambientales asociados al reúso de las aguas en agricultura (> \$ 3,000,000/año)
- Por los altos costos para evaporar el agua (> \$ 30,000/m³)

Tendencias Mundiales en GIRH.



- **Ciudades esponja**
- **PUEAA**
- **Cero descarga (ZLD)**

Diagrama del modelo cero descarga (ZLD) adaptado de Yaqub y Lee (2019)

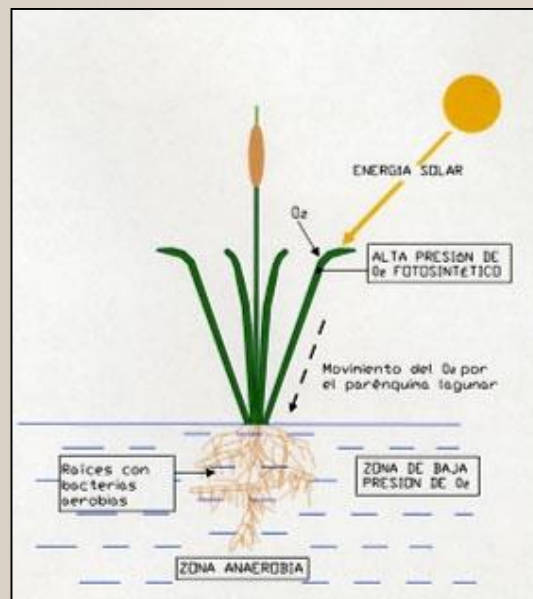


Considerando las dificultades económicas de implementar el reúso de las aguas residuales en la agricultura en Colombia y de realizar su evaporación para no generar descargas...

Pregunta 2

¿Qué tecnologías de manejo de las ARnD se pueden implementar que puedan contribuir al objetivo de generar cero descargas?

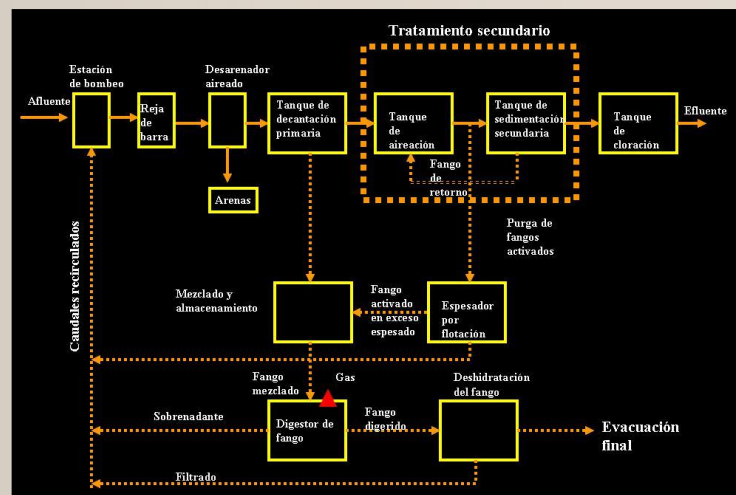
Sistemas de tratamiento natural de aguas residuales



Esquema SAT (Fernández, 2005).

¿Qué son?

➤ 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.



Esquema PTAR (Rodríguez, 2006).

➤ 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).

¿Cómo se clasifican?

*Sistemas de
tratamiento natural*

Sistemas de aplicación al suelo

Sistemas de baja carga

Infiltración rápida

Flujo superficial

Sistemas acuáticos

Humedales

Plantas acuáticas flotantes

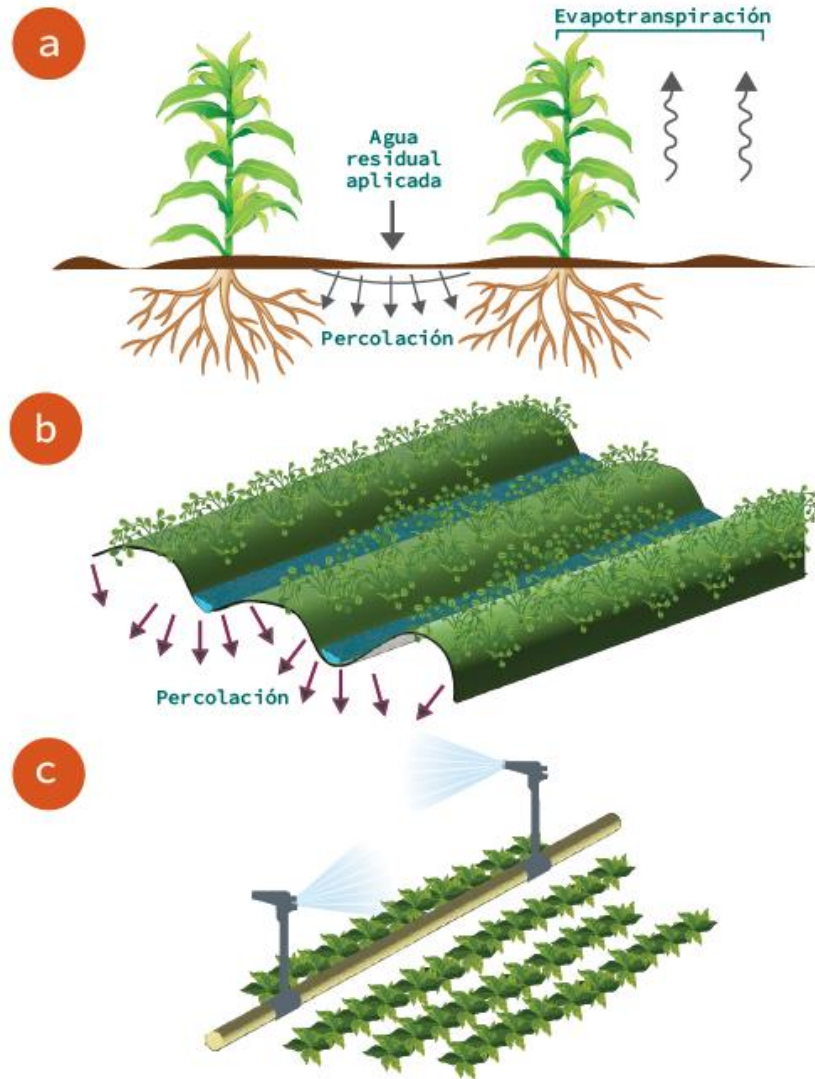


Figura 1. Sistemas de tratamiento de baja carga. **a.** Trayectoria hidráulica; **b.** Distribución superficial y **c.** Aspersión. Fuente: Adaptado de Metcalf & Eddy (1995).

Sistemas de baja carga.

Son los sistemas de TN más comunes.

Consisten en la aplicación controlada del AR sobre un suelo con vegetación para alcanzar su depuración (Tipo I) o el crecimiento de la vegetación (Tipo II).

Parte del agua se evapotranspira y el resto percola ya depurada.

Los suelos más adecuados son los bien drenados, de tipo franco a arenoso (Martín, 1993).

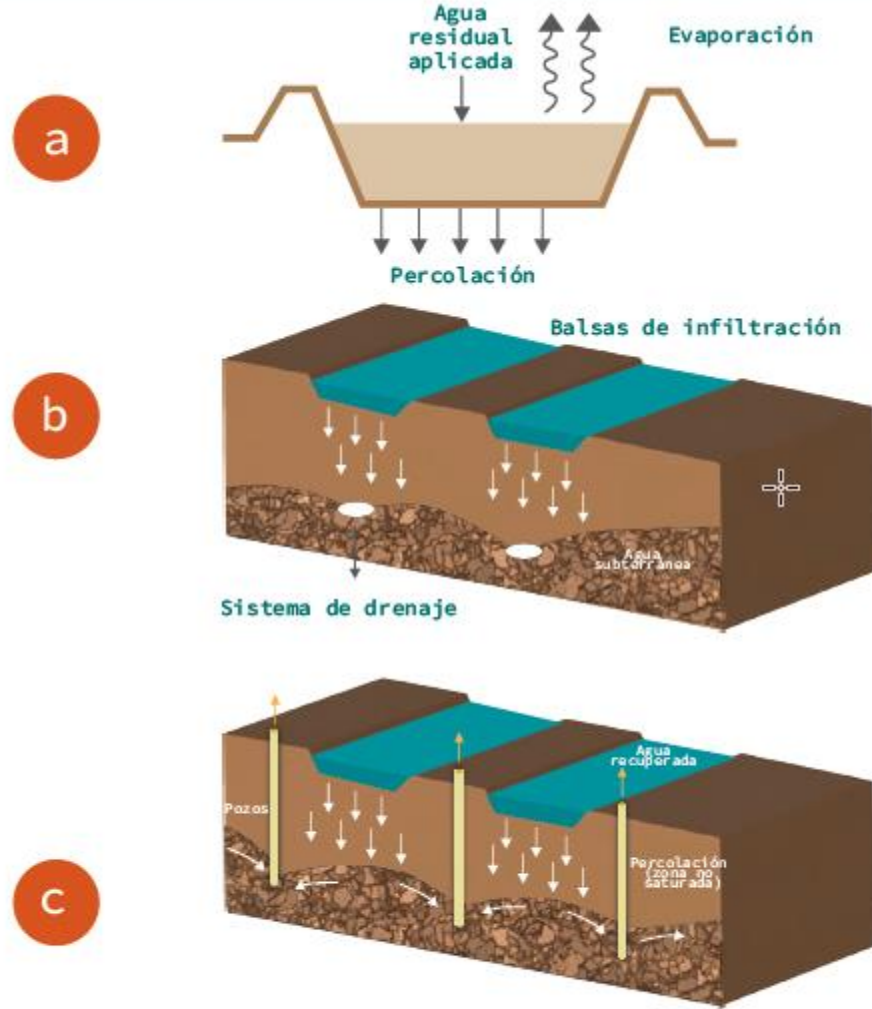


Figura 2. Trayectorias hidráulicas en sistemas de infiltración rápida. (a) trayectoria hidráulica; (b) recuperación mediante drenes, y c) recuperación mediante pozos de extracción.

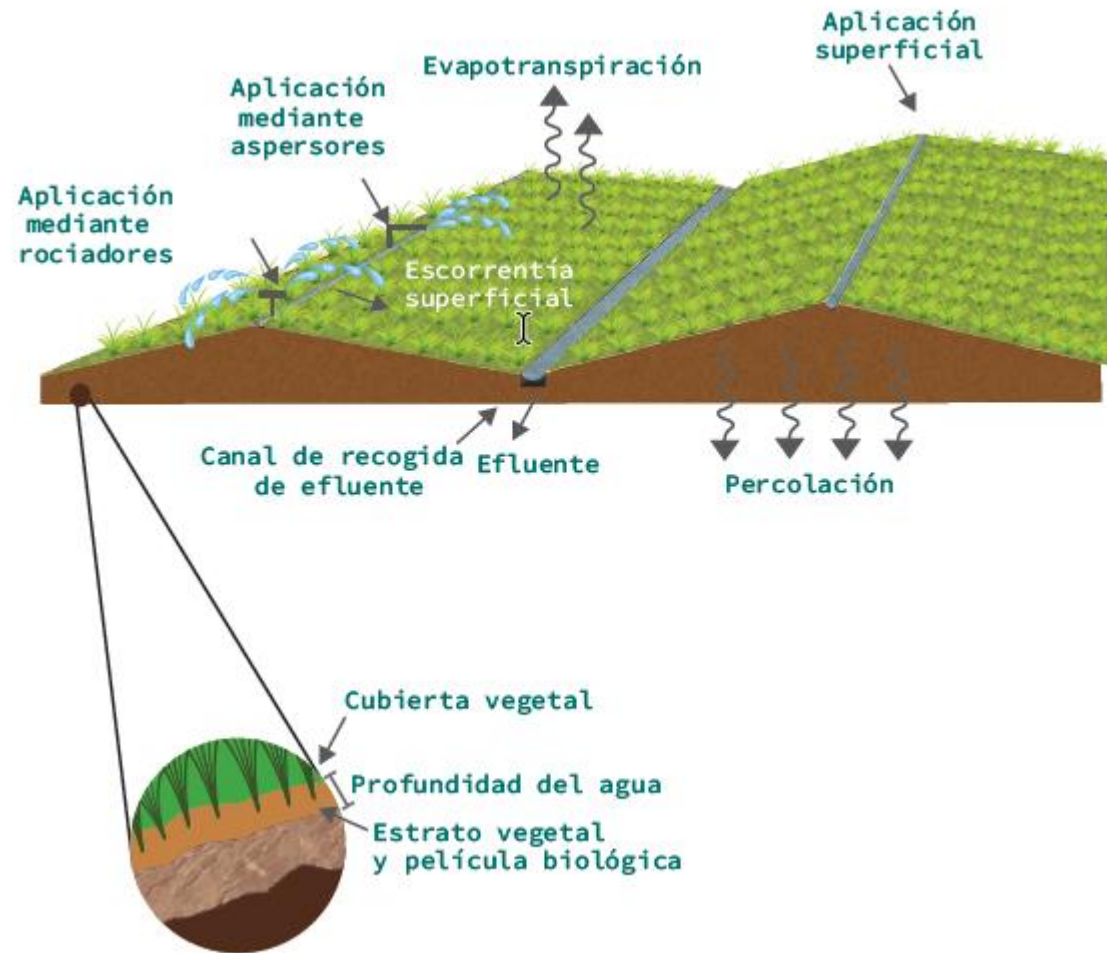
Fuente: Adaptado de Metcalf & Eddy (1995).

Sistemas de Infiltración rápida.

Sistemas de Infiltración - Percolación, dado que la percolación es el principal mecanismo de evacuación del agua residual aplicada.

Los vertidos se aplican al suelo de forma intermitente, en dosis elevadas, siendo su objetivo principal el tratamiento de las aguas residuales y evitar su descarga directa a fuentes de agua superficial.

Los suelos adecuados son los de permeabilidad elevada (tipo arenoso) (Martín, 1993).



Sistemas de flujo superficial.

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).

Se pueden utilizar como unidades de tratamiento preliminar para un sistema de reutilización de agua o para lograr un tratamiento secundario

Los suelos más adecuados son los de baja permeabilidad (arcillosos o franco – arcillosos).

Figura 3. Esquema de un sistema de flujo superficial. Fuente: Adaptado de Metcalf & Eddy (1995).

Sistemas Acuáticos de Tratamiento (SAT)



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



Humedal Cenicafe, Granja

Incluyen macrofitas 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.

Consisten en estanques o canales de profundidad variable (0,4 a 1,5 m) alimentados con agua residual sin tratar o tratadas previamente, en los que se desarrolla una especie flotante. La biomasa producida se recolecta en cortos intervalos de tiempo, antes de que se produzca su descomposición en el agua (Martin, 1993).

Humedales artificiales

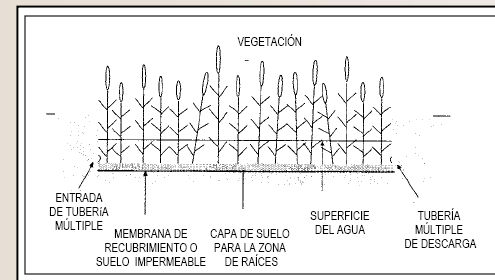
¿Cómo se clasifican?



Humedales artificiales

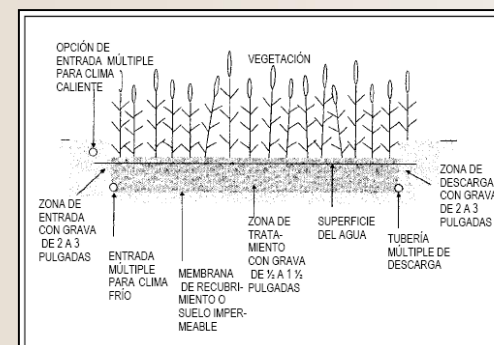
Flujo horizontal

Flujo libre superficial (FWS)



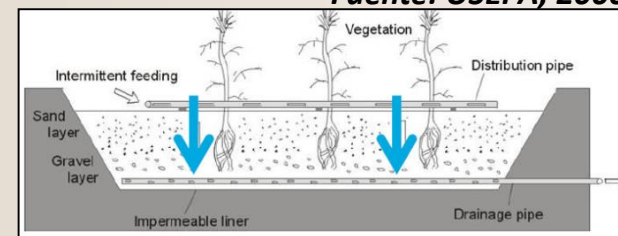
Fuente: USEPA, 2000.

Flujo subsuperficial (SFS)



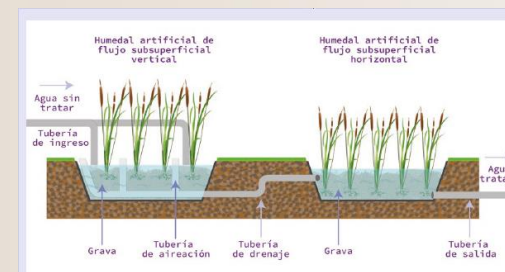
Fuente: USEPA, 2000.

Flujo vertical



Fuente: Langergraber, 2010.

Combinados



Fuente: Rodríguez et al., 2022.

Sistema con plantas acuáticas flotantes



Eichhornia crassipes



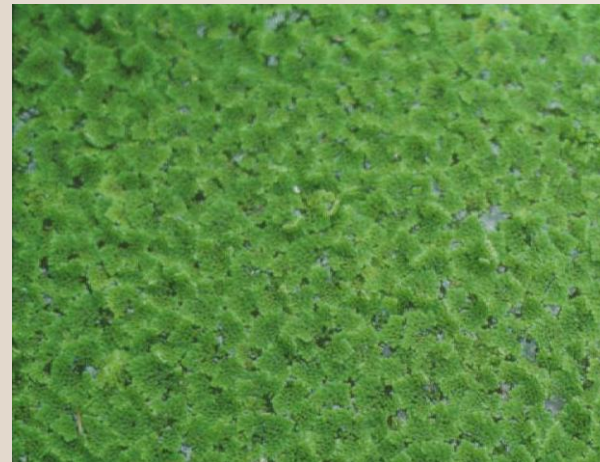
Pistia stratiotes



Typha angustifolia



Salvinia auricula



Azolla filiculoides

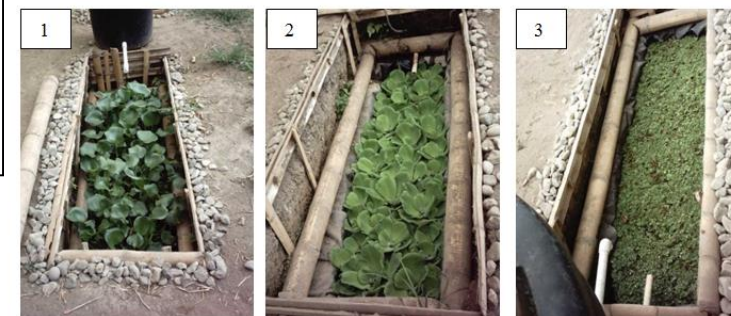
Resumen de las eficiencias de tratamiento.

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 ₅ (%)	Remoción SST (%)	Remoción N _T (%)	Remoción P _T (%)
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.

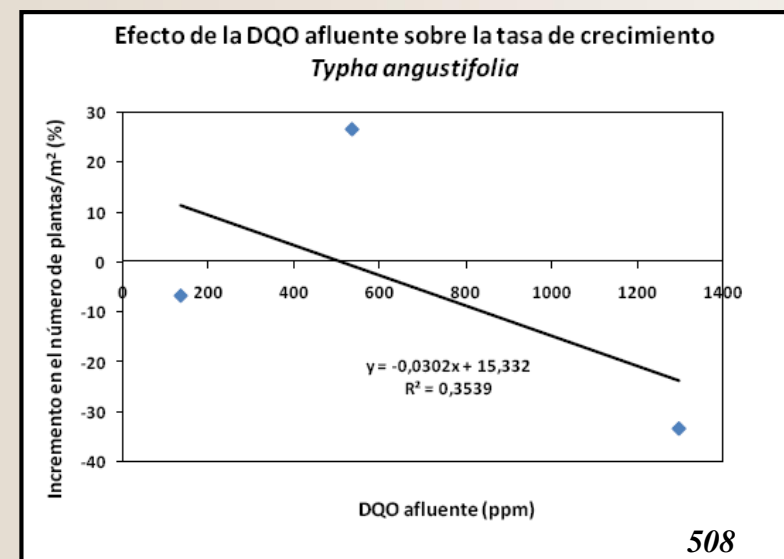
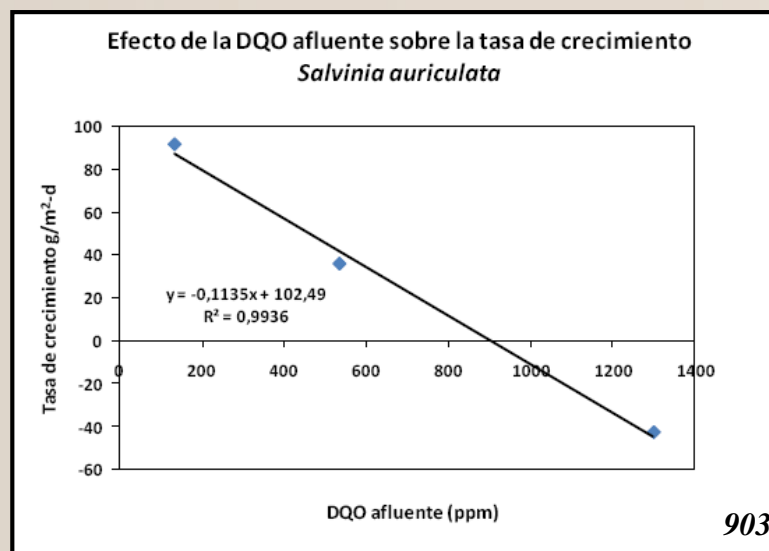
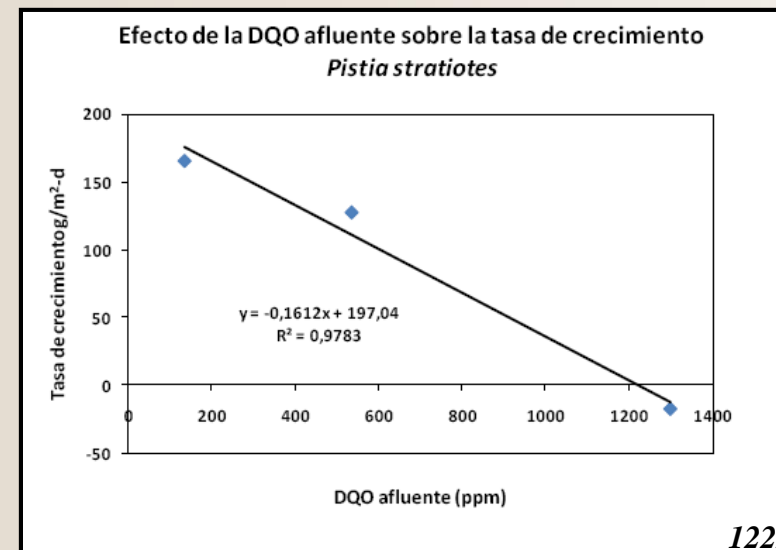
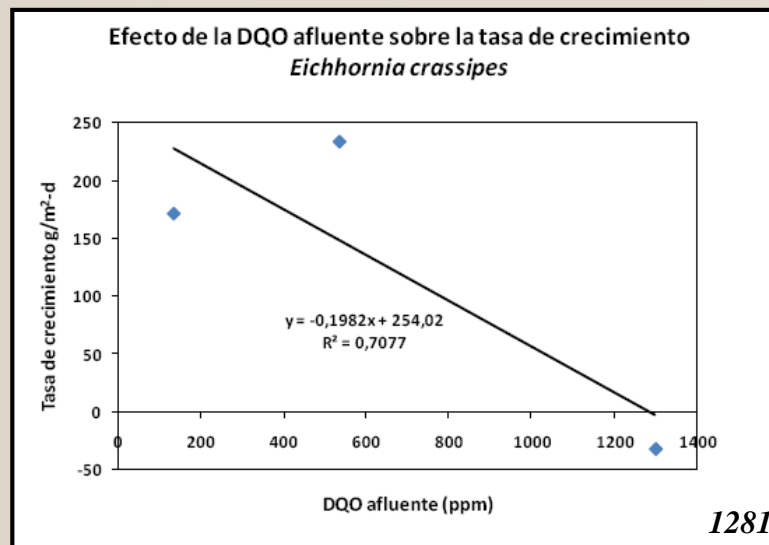
Utilización de SAT en el postratamiento de ARC

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.

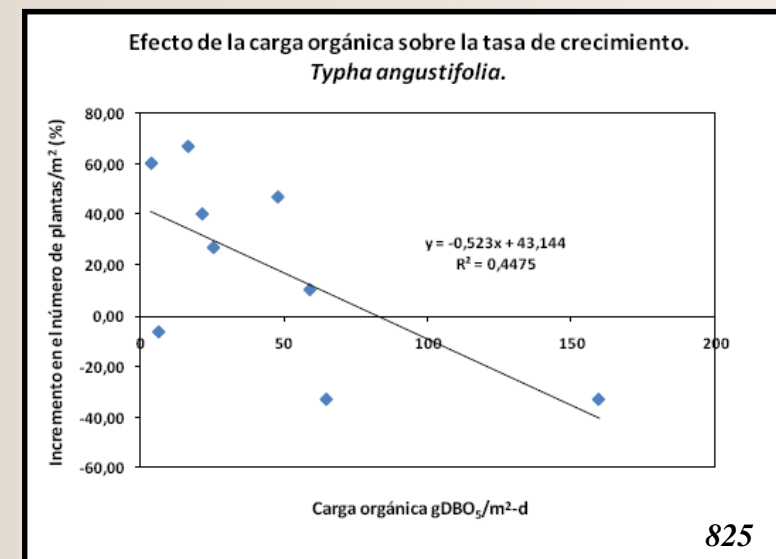
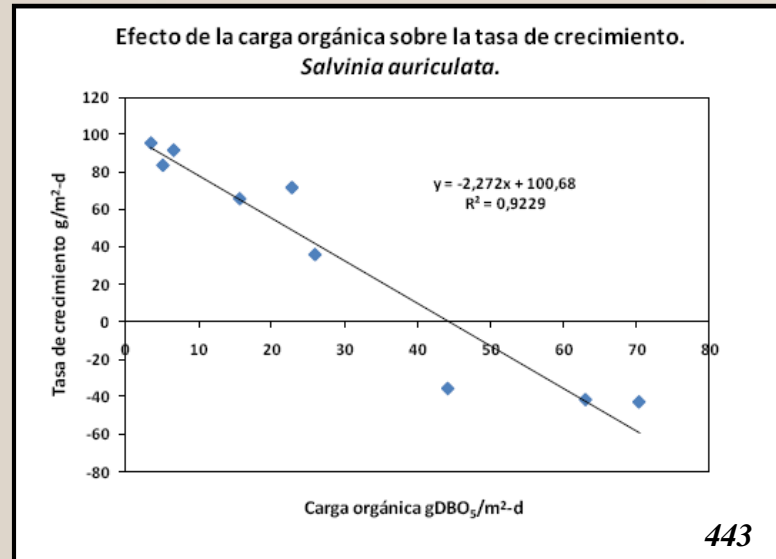
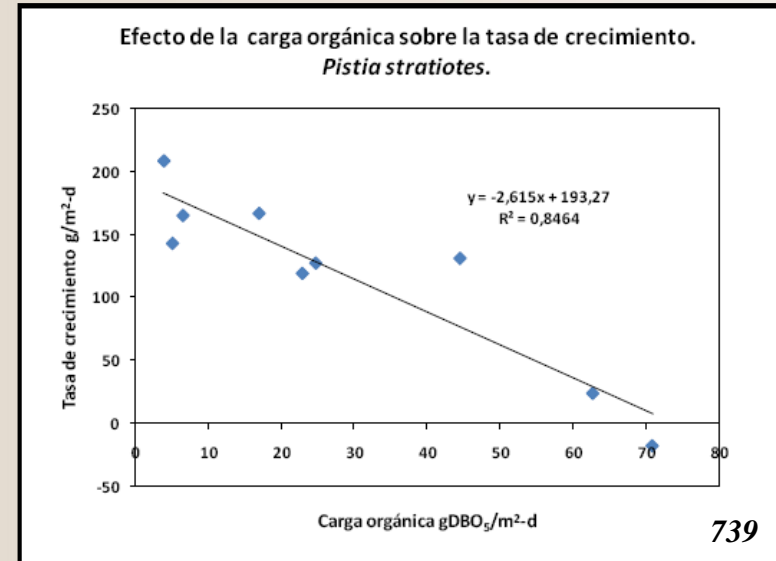
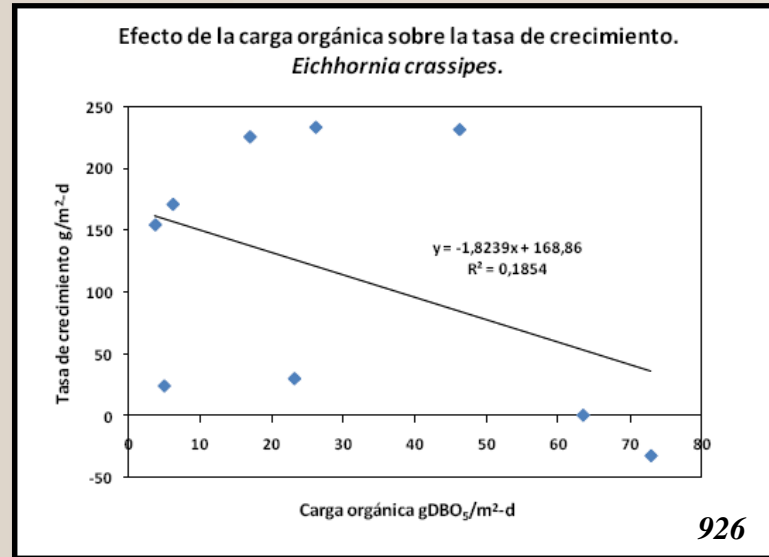


Utilización de SAT en el postratamiento de ARC

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 DBO₅/ha-d e inhibición en el incremento del número de plantas de TA a 825 kg DBO₅/ha-d.



las mejores especies fueron EC y PS, entre las que no se presentó diferencias al 5%, en los % de remoción de DBO₅, SST, N_T, P_T y K.



Tratamiento Natural (Filtro verde)

Ventajas

En este tipo de sistemas se presentan todos los mecanismos de tratamiento involucrados en los tratamientos químicos como biológicos, teniendo adicionalmente, los propios de la vegetación superior como la fotosíntesis, la fotooxidación y la asimilación. No requieren de la aplicación de compuestos químicos, por lo que sus costos de tratamiento son del orden de \$400 COP/kg de DQO. Ante eventos de sobrecarga orgánica, la recuperación de los sistemas es rápida. Permite el manejo del agua residual sin generar vertimientos y por lo tanto no se generan costos legales ambientales

Desventajas

Los tiempos de proceso para el tratamiento de las aguas residuales pueden variar entre 2 a 5 días. Las necesidades de área son superiores a las de los tratamientos químicos y biológicos.

Sistemas de Tratamiento

¿Qué tecnologías de manejo de las ARnD se pueden implementar que puedan contribuir al objetivo de generar cero descargas?

Respuesta 2

Los sistemas de tratamiento natural son una tecnología que no sólo permite la depuración del agua residual, sino también, cuando utilizan vegetación con un alto consumo de agua (como es el caso de los sauces y el pasto vetiver, por ejemplo), contribuyen al objetivo de alcanzar la cero descargas.



Pregunta 3

En el año 2017, nos hacíamos la siguiente pregunta...

¿Se pueden utilizar filtros verdes con pasto vetiver para el tratamiento de las aguas residuales del café?

Filtros verdes



Descripción



Los filtros verdes son un tipo de sistema de tratamiento natural del agua, del tipo de aplicación al suelo, de baja carga, que se basan en la aplicación controlada del agua residual pre-tratada a un cultivo forestal o herbáceo, aprovechando la capacidad autodepuradora de la zona no saturada del suelo y de la captación de nutrimentos por parte de la vegetación.



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 altos volúmenes de agua residual (Herschbach et al., 2005).

Se reportan aplicación de cargas hidráulicas entre 2 mm y 140 mm y de cargas orgánicas entre 1 t DQO/ha-d y 20 t DQO/ha-d.

Filtros verdes

Vegetación



Los cultivos adecuados son aquellos: **1.** Elevada capacidad de asimilación de nutrimentos, **2.** Alto consumo del agua, **3.** Alta tolerancia a la humedad del suelo, **4.** Baja sensibilidad a los constituyentes del agua residual, **5.** Mínimas necesidades de control.

Forrajes

- *Phalaris spp* (alpiste)
- *Festuca arundinacea* (cañuela)
- *Lolium multiflorum* (raigrás anual)
- *Cynodon dactylon* (grama común)

Cultivos arbóreos

Combinación de pinos y coníferas

- *Cercis spp*
- *Catalpa spp*
- *Populus spp* (álamos o chopos)
- *Ulmus parvifolia* (olmo chino)
- *Pinus strobus* (pino blanco)
- *Eucalyptus spp* (eucaliptos)
- *Salix spp* (sauces)

Cynodon dactylon (grama común)

Eucalyptus spp (eucaliptos)

Filtros verdes

Pasto vetiver (*Chrysopogon zizanioides* L. Roberty).



- Gramínea, Originaria de la india
- Raíces > 4 m
- Tolerancia a pH (3,30 - 12,50)
- Alto nivel de tolerancia a herbicidas y plaguicidas
- Eficiente en absorber N. P y metales pesados
- Tolerante (acidez, alcalinidad, salinidad, sodicidad)
- Tolerante a inundaciones (45 días)
- Tolerancia a T (-15 a + 55°C)
- Rango amplio de suelo con diferentes niveles de fertilidad
- Consumo de agua hasta 28 L/m²-d
- Propagación por esquejes

Truong et al., 2009

Biomasa: Producción de aceites para perfumería, control de termitas, artesanías de hogar, medicina natural (Gnansounou et al., 2017).

Investigaciones sobre tasas de evapotranspiración de la vegetación en los filtros verdes.



Sauces para evapotranspirar aguas residuales

<https://www.iagua.es/noticias/espana/instituto-imdea-agua/17/06/09/sauces-depurar-agua-residual>

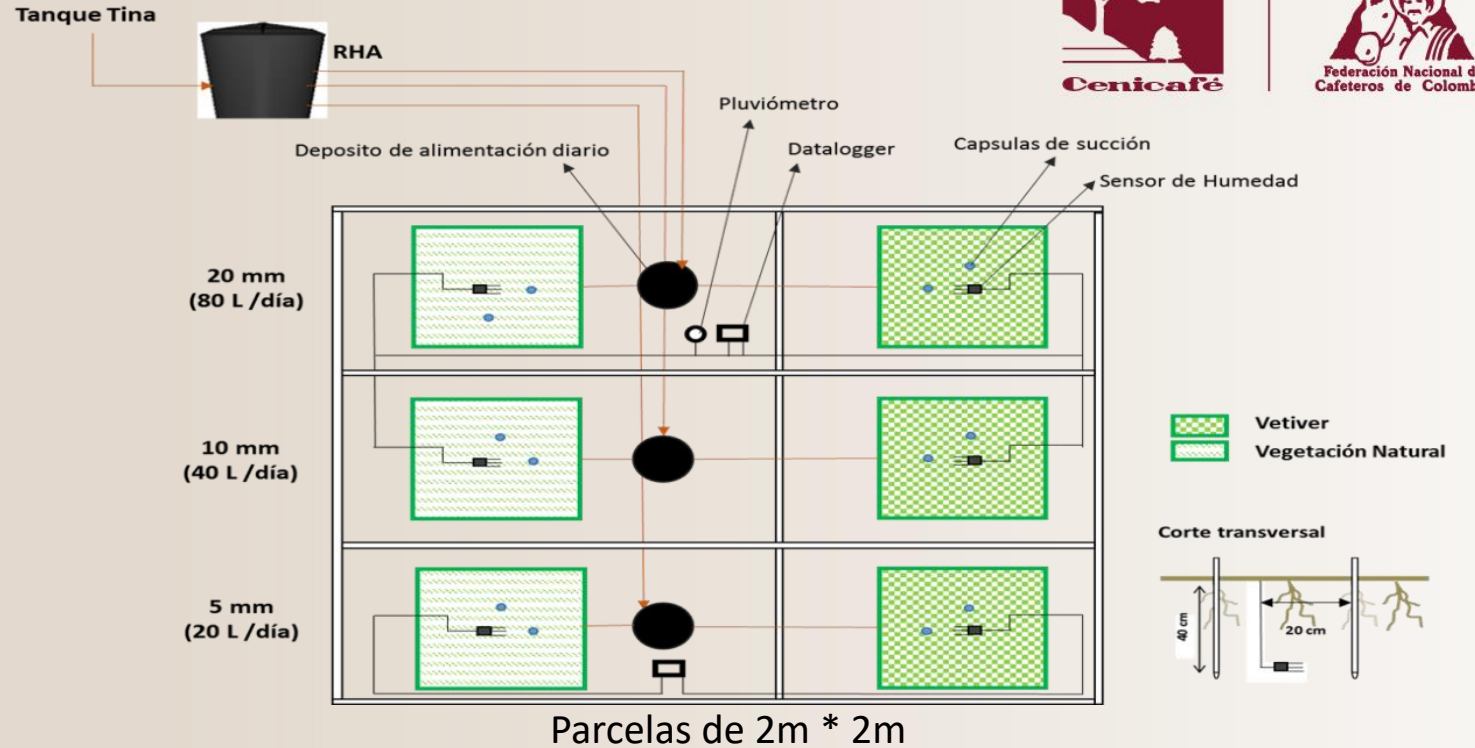
Frédette et al. (2019) realizaron una revisión de las tasas de ET proporcionadas en la literatura para el género *Salix* spp. Después de analizar 57 estudios, que cubrieron 16 países, 19 especies de sauces y docenas de cultivares, encontraron una ET media $4,6 \pm 4,2$ mm/d, con valores mínimos de 0,7 mm/d y máximos de 22,7 mm/d.

En Dinamarca están en funcionamiento más de 500 sistemas ET plantados con sauces. Los sistemas generalmente consisten en una cuenca revestida de polietileno de alta densidad de 1,5 m de profundidad llena de tierra y plantada con clones de sauce. Un solo hogar en Dinamarca normalmente requiere entre 120 y 300 m² (Brix & Arias, 2011).

Filtros verdes en la depuración de aguas residuales del café (2017-2018)



Cenicafé - Granja



Tratamiento	Carga hidráulica, mm/Carga orgánica kg DQO/ha-d del agua pretratada	Tipo de Vegetación
1	20 mm/2000 kg DQO/ha-d	Arvenses naturales
2	20 mm/2000 kg DQO ha/d	Pasto vetiver. 2 tallos/10cm
3	10 mm/1000 kg DQO/ha-d	Arvenses naturales
4	10 mm/1000 kg DQO/ha-d	Pasto vetiver. 2 tallos/10cm
5	5 mm/500 kg DQO/ha-d	Arvenses naturales
6	5 mm/500 kg DQO/ha-d	Pasto vetiver. 2 tallos/10cm

Filtros verdes en la depuración de aguas residuales del café

Fase aplicación agua residual (Julio – Spbre del 2017)



Agua residual proveniente del tanque tina, presente en el RHA.



Agua residual después del tratamiento primario.



Aspecto de las parcelas testigo.



Panorámica de los tanque de alimentación al terreno. Uno por parcela.



Aspecto de las parcelas con el pasto vetiver.

Fase de aplicación: 10 semanas (50 días laborables). En dicha fase el AR se aplicó diariamente de lunes a viernes.

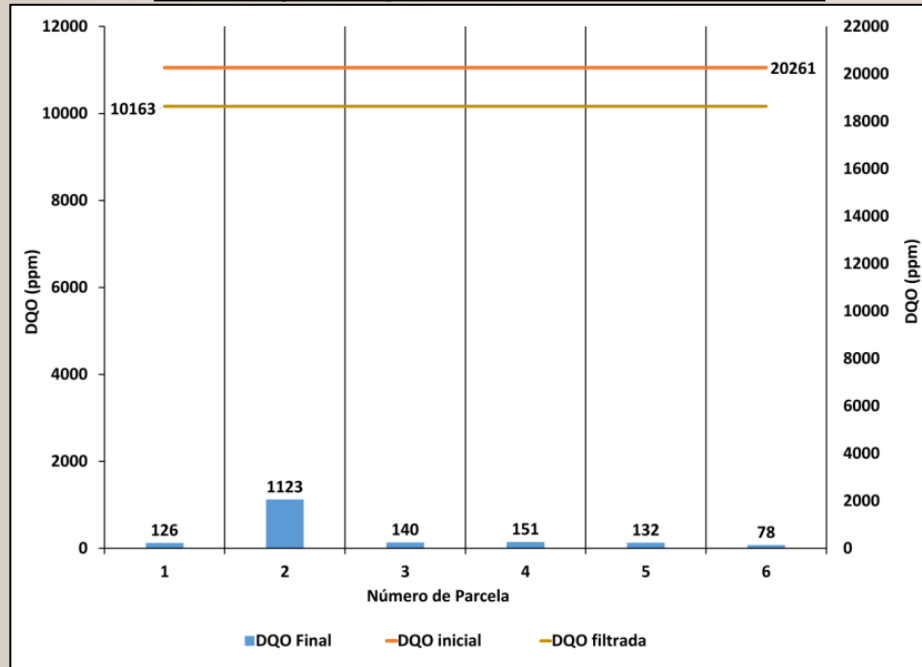
Fase de descanso: 10 semanas. En dicha fase no se aplicó AR, se siguió con el monitoreo de los lixiviados generados.

Filtros verdes en la depuración de aguas residuales del café

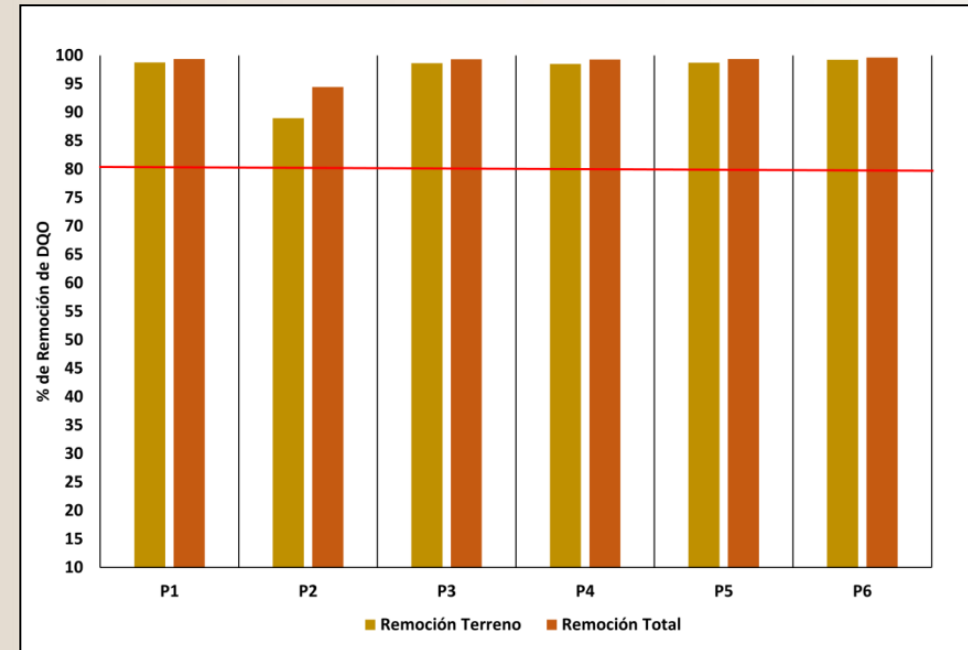
Eficiencias durante la fase de aplicación del agua residual



DQO promedio de las muestras de agua antes y después del tratamiento



Remoción de la DQO



Parámetro	Resolución 631 de 2015	Decreto 1594 de 1984	Efluente FV
DQO (mg/L)	3000	> 80%	< 1.123
SST (mg/L)	800	> 80%	< 262
pH (und)	5 a 9	5 a 9	5,88 – 6,71

Filtros verdes en la depuración de aguas residuales del café

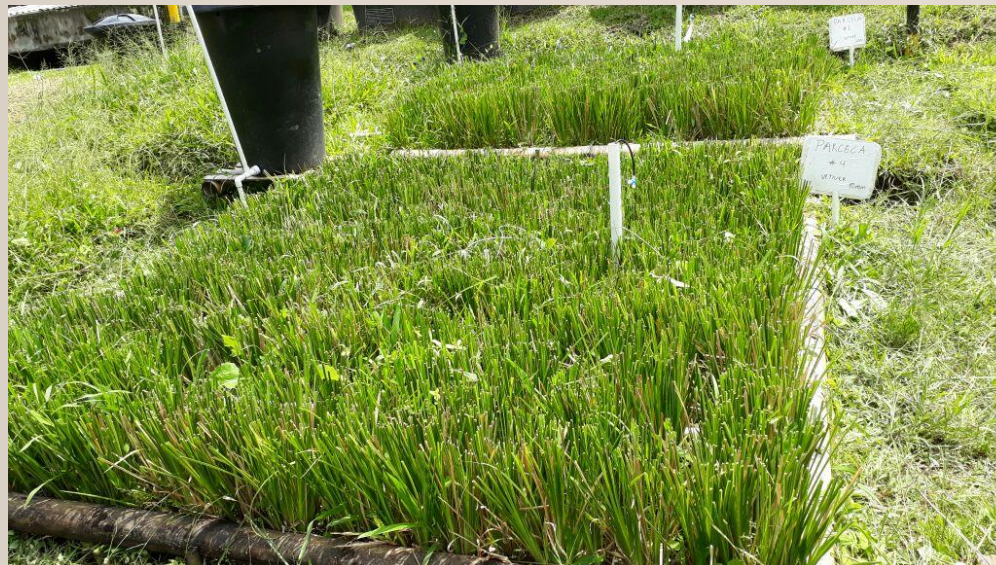
Cambios en el suelo durante la fase de aplicación del agua residual



Parámetro	Tratamientos testigo						
	Inicial	T1_20 mm	Δ(%)	T3_10 mm	Δ(%)	T5_05 mm	Δ(%)
pH(unidades)	3,80	5,60	47,37	5,90	55,26	5,50	44,74
N (%)	0,18	0,12	-33,33	0,19	5,56	0,20	11,11
MO (%)	3,90	2,40	-38,46	4,10	5,13	4,20	7,69
K (cmol/kg)	0,25	0,58	132,00	1,11	344,00	0,47	88,00
Ca (cmol/kg)	1,38	2,71	96,38	3,69	167,39	2,29	65,94
Mg (cmol/kg)	0,51	1,01	98,04	1,32	158,82	0,81	58,82
Al (cmol/kg)	2,20	0,50	-77,27	0,20	-90,91	0,60	-72,73
CIC	12	11	-8,33	11	-8,33	10	-16,67
P (mg/kg)	710	456	-35,77	169	-76,20	371	-47,75
Fe (mg/kg)	528	542	2,65	637	20,64	504	-4,55
Mn (mg/kg)	25	84	236,00	70	180,00	55	120,00
Zn (mg/kg)	5,70	15,00	163,16	11,80	107,02	6,90	21,05
Cu (mg/kg)	14,70	13,70	-6,80	16,80	14,29	13,40	-8,84
B (mg/kg)	0,18	0,46	155,56	0,53	194,44	0,40	122,22
S (mg/kg)	6,80	1,40	-79,41	2,50	-63,24	1,20	-82,35



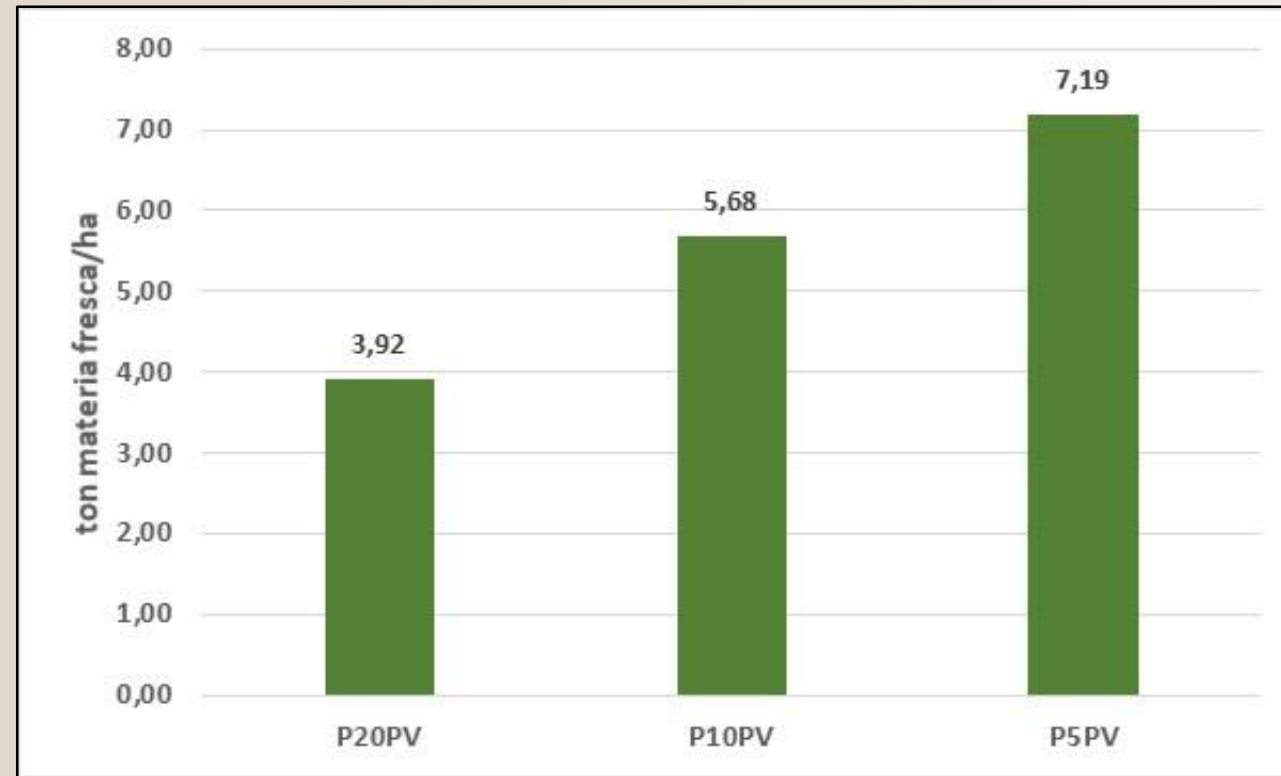
Pasto horqueta (*Paspalum notatum*) – Pasto arrocillo (*Echinochloa colona*)



Parámetro	Tratamientos con pasto vetiver						
	Inicial	T2_20 mm	Δ(%)	T4_10 mm	Δ(%)	T6_05 mm	Δ(%)
pH(unidades)	3,80	5,60	47,37	5,00	31,58	4,90	28,95
N (%)	0,18	0,26	44,44	0,26	44,44	0,23	27,78
MO (%)	3,90	5,80	48,72	5,80	48,72	5,10	30,77
K (cmol/kg)	0,25	0,82	228,00	0,52	108,00	0,30	20,00
Ca (cmol/kg)	1,38	3,16	128,99	2,03	47,10	1,30	-5,80
Mg (cmol/kg)	0,51	1,29	152,94	0,89	74,51	0,74	45,10
Al (cmol/kg)	2,20	0,40	-81,82	1,40	-36,36	1,80	-18,18
CIC	12	15	25,00	17	41,67	14	16,67
P (mg/kg)	710	512	-27,89	670	-5,63	960	35,21
Fe (mg/kg)	528	740	40,15	602	14,02	576	9,09
Mn (mg/kg)	25	81	224,00	58	132,00	59	136,00
Zn (mg/kg)	5,70	10,60	85,96	5,00	-12,28	6,60	15,79
Cu (mg/kg)	14,70	13,20	-10,20	10,70	-27,21	11,40	-22,45
B (mg/kg)	0,18	0,43	138,89	0,54	200,00	0,36	100,00
S (mg/kg)	6,80	2,20	-67,65	2,80	-58,82	2,90	-57,35

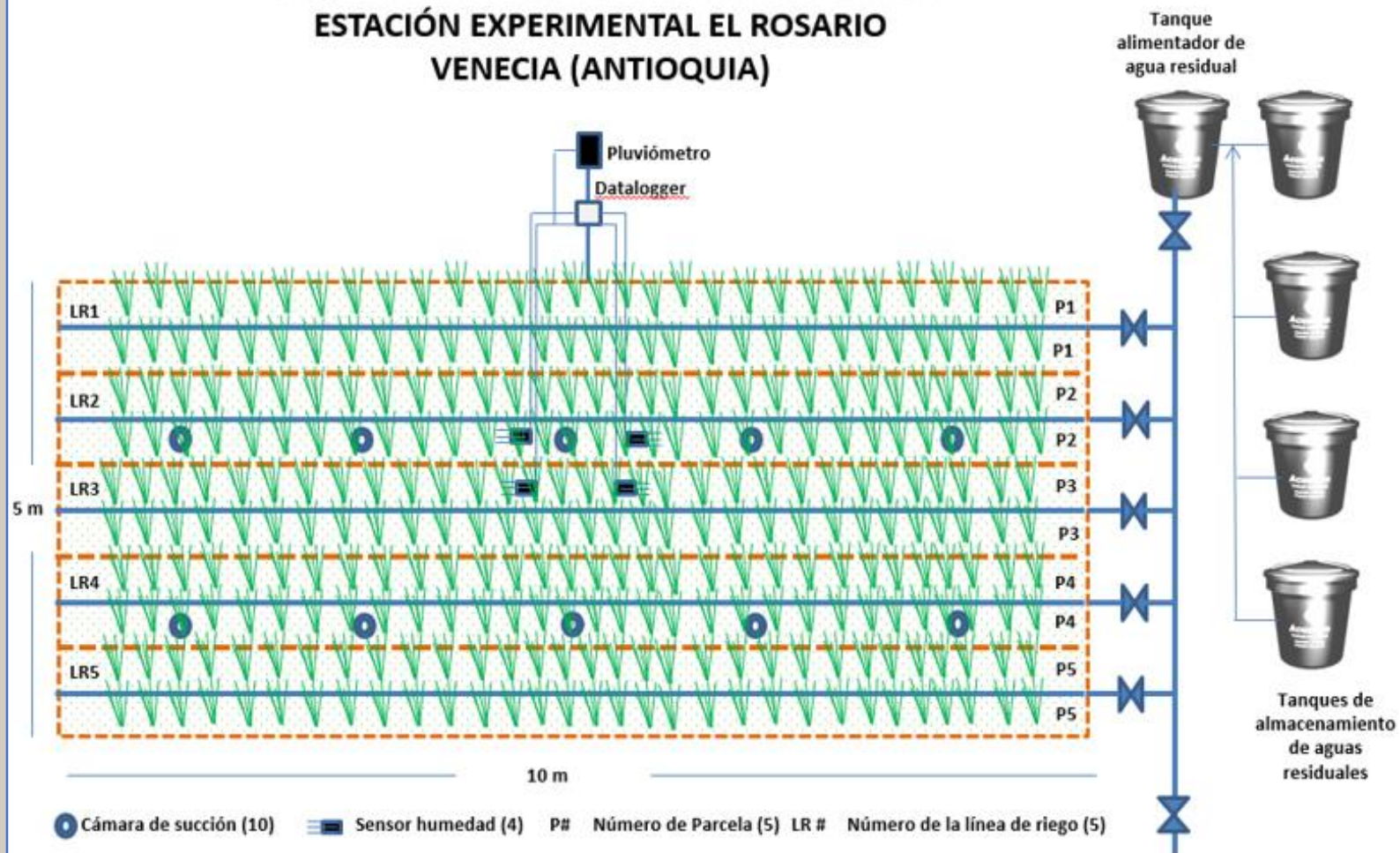
Filtros verdes en la depuración de aguas residuales del café

Crecimiento de la biomasa durante la fase de aplicación del agua residual



Filtros verdes en la depuración de aguas residuales del café

ESQUEMA INSTALACIÓN DE FILTROS VERDES ESTACIÓN EXPERIMENTAL EL ROSARIO VENEZIA (ANTIOQUIA)



Diciembre del 2017 a Junio del 2018

Filtros verdes en la depuración de aguas residuales del café

Eficiencias durante la fase de aplicación del agua residual



Muestra compuesta	Número de muestras simples	Periodo de tiempo	Redox (mV)	pH (Un)	Conductividad (μS/cm)	DQO (mg/L)	ST (mg/L)	SST (mg/L)	N _T (mg/L)	N-NH ₃ (mg/L)	N-NO ₃ (mg/L)
1	8	Feb 6 – Feb 14	173,50	6,55	230,58	754	227	18	53	6,2	2,9
2	18	Feb 16 – Mar 6	152,02	7,32	91,49	294	62	34	276	4,2	3,1
3	4	Mar 9 - Mar 13	185,08	6,84	79,03	115	80	18	161	5,9	2,6
4	12	Mar 16 – Mar 23	182,45	6,83	108,92	105	77	16	108	3,4	2,5
5	9	Mar 27 - Abr 3	167,19	7,07	124,10	138	33	16	207	5,3	2,4
6	6	Abr 4 - Abr 9	173,87	7,32	99,18	87	70	24	84	5,6	2,1
7	7	Abr 10 – Abr 17	178,01	7,07	92,76	68	64	36	119	4,2	1,7
8	4	Abr 19 - May 3	177,83	6,91	77,00	315	178	52	165	5,0	2,0
9	9	May 8 - May 15	181,23	6,93	109,31	262	69	44	158	5,0	1,8
10	8	May 18 - May 29	188,64	6,95	75,68	151	117	40	113	5,6	1,0
11	10	Jun 1 - Jun 8	180,01	7,28	90,15	172	48	34	134	6,4	1,3
Promedio	95		173,68	7,04	109,43	229	93	30	143	5,2	2,1



Parámetro	Resolución 631 de 2015	Decreto 1594 de 1984	Efluente FV
DQO (mg/L)	3000	> 80%	< 754
SST (mg/L)	800	> 80%	< 52
pH (und)	5 a 9	5 a 9	6,55 – 7,32

En el año 2017, nos hacíamos la siguiente pregunta...



¿Se pueden utilizar filtros verdes con pasto vetiver para el tratamiento de las aguas residuales del café?

Respuesta 3

Sí. La implementación de filtros verdes utilizando pasto vetiver como vegetación permite realizar el tratamiento de las aguas residuales del café y generar un agua tratada que cumple con los requerimientos de calidad exigidos por la normativa colombiana para vertimientos a cuerpos de agua superficiales y al suelo.

Sin embargo, dado que para el año 2018 el MADS, a través del decreto 50 del 2018, exige la caracterización del suelo que recibe el vertimiento y este costo de caracterización se estima superior a los 10 millones COP y se tiene caracterizado que cerca del 78% de los caficultores realizan la descarga del agua residual al suelo, es necesario investigar en sistemas de tratamiento con cero descargas.



Pregunta 4

En el año 2019, nos hacíamos la siguiente pregunta...

¿Se pueden utilizar filtros verdes con pasto vetiver para el tratamiento y manejo de las aguas residuales del café con cero descargas?

Filtros verdes para ARC con cero descargas



Modelo investigado



Filtros verdes tipo invernadero, impermeabilizados con geomembrana y sembrados con pasto vetiver para el manejo y tratamiento de las ARC.

Recirculando el agua que percola, hasta agotamiento, no se generan descargas y no se requiere, por lo tanto, permiso de vertimientos (el cual está ligado a caracterizaciones periódicas del agua y suelo que se constituye en un gasto representativo para el caficultor), contribuyendo con ello a la sostenibilidad ambiental y económica de la caficultura.

Filtros verdes para ARC con cero descargas

Resultados de la investigación



Condición	Tipo de agua	Carga Hidráulica (mm)	Vegetación
1	Usada en el beneficio	20	Vetiver
2	Usada en el beneficio	40	Vetiver
3	Usada en el beneficio	60	Vetiver
4	Tanque tina	20	Vetiver
5	Tanque tina	40	Vetiver
6	Tanque tina	60	Vetiver
7	Lixiviados Pulpa-Mucílago	20	Vetiver
8	Lixiviados Pulpa-Mucílago	40	Vetiver
9	Lixiviados Pulpa-Mucílago	60	Vetiver
10	Mieles Ecomill	20	Vetiver
11	Mieles Ecomill	40	Vetiver
12	Mieles Ecomill	60	Vetiver
12	Usada en el beneficio	20	Natural
14	Usada en el beneficio	40	Natural
15	Usada en el beneficio	60	Natural

Seguimiento a las unidades de trabajo: 2 años (3 ciclos).

Alimentación 1: Spbre - Diciembre del 2019. 12 semanas.

Descanso 1: Diciembre del 2019- Junio del 2020.

Alimentación 2: Junio - Spbre del 2020. 12 semanas.

Descanso 2: Spbre - Diciembre del 2020.

Alimentación 3: Diciembre del 2020 – Marzo 2021. 12 semanas.

Descanso 3: Marzo - Junio del 2021.



Unidad de trabajo: FV de 1 m²

Resultados

Capacidad de retención y evapotranspiración de los FV.

Lisimetría de drenaje



Filtro verde	Agua semanal (L)	Agua retenida y evapotranspirada (L m ² -d ⁻¹)				
		Promedio Aplicación 1	Promedio Aplicación 2	Promedio Aplicación 3	Promedio Tres aplicaciones	Promedio agrupado
FV1	100	9,93	8,26	8,86	9,02	22,27
FV2	200	23,44	21,93	22,32	22,56	
FV3	300	35,38	35,62	34,73	35,24	
FV4	100	13,11	12,64	12,50	12,75	24,48
FV5	200	25,37	23,53	24,29	24,40	
FV6	300	37,25	35,36	36,27	36,29	
FV7	100	11,06	10,96	11,02	11,01	23,78
FV8	200	26,16	22,88	24,24	24,43	
FV9	300	37,39	34,08	36,21	35,89	
FV10	100	12,66	8,75	12,11	11,17	22,40
FV11	200	22,94	20,52	21,98	21,81	
FV12	300	34,81	33,54	34,28	34,21	
FV13	100	8,95	8,34	8,71	8,67	20,65
FV14	200	24,25	18,42	19,12	20,60	
FV15	300	34,72	31,53	31,83	32,69	
Promedio general					22,72	

De acuerdo con los resultados obtenidos en la presente investigación, se encontró, para filtros verdes tipo invernadero, impermeabilizados con geomembrana, sembrados con pasto vetiver y con aplicación de aguas residuales provenientes del proceso de beneficio del café, un valor de retención - evapotranspiración (RET) de 23,55 L m²-d⁻¹.

Resultados

Capacidad de eliminación de contaminación de los FV



Filtro verde	pH (unidades)		Turbidez (FTU)		Conductividad eléctrica (mS cm ⁻¹)		DQO (mg L ⁻¹)		ST (mg L ⁻¹)		SST (mg L ⁻¹)		Remoción DQO (%) Promedio		Remoción ST (%) Promedio		Remoción SST (%) Promedio	
	Ent.	Sal.	Ent.	Sal.	Ent.	Sal.	Ent.	Sal.	Ent.	Sal.	Ent.	Sal.	Por FV	Agrupado	Por FV	Agrupado	Por FV	Agrupado
FV1	6,66	5,63	12	27	0,174	0,072	96	145	208	442	20	30	-	-	-	-	-	-
FV2		5,62		38		0,109		136		250		43	-	-	-	-	-	-
FV3		5,44		12		0,123		183		479		21	-	-	-	-	-	-
FV4	4,09	5,14	>500	209	4,946	3,446	27.832	7159	8.646	4320	1.947	460	73,41	77,90	50,81	54,55	76,08	76,30
FV5		5,70		186		3,314		4747		3528		432	82,53		57,49		77,07	
FV6		5,57		199		3,777		5860		3626		455	77,78		55,34		75,76	
FV7	4,41	5,74	>500	>500	10,64	8,262	66.090	20881	23.483	11764	3.206	555	69,71	63,17	48,08	40,20	80,75	80,05
FV8		5,61		>500		9,156		25431		14562		552	62,26		36,41		80,01	
FV9		5,32		>500		9,560		28614		14880		534	57,55		36,10		79,38	
FV10	3,94	5,33	>500	>500	6,428	5,770	68.774	15264	18.735	7038	4.528	552	77,88	67,28	59,08	48,00	85,08	85,42
FV11		4,89		>500		6,883		24136		9696		534	64,94		45,29		84,67	
FV12		4,91		>500		6,793		28393		10678		450	59,02		39,63		86,51	
FV13	6,66	5,55	12	69	0,174	0,153	96	278	208	482	20	52	-	-	-	-	-	-
FV14		5,60		53		0,145		266		330		46	-	-	-	-		
FV15		5,62		25		0,112		153		376		27	-	-	-	-		
Promedio general													69,45		47,58		80,59	



De acuerdo con los resultados obtenidos en la presente investigación, se obtuvieron unas eficiencias de remoción del orden del 69,45% para la Demanda Química de Oxígeno, del 47,58% para los Sólidos Totales y del 80,59% para los Sólidos Suspendidos Totales, en filtros verdes tipo invernadero, impermeabilizados con geomembrana y sembrados con pasto vetiver, cuando se aplicaron aguas residuales del beneficio del café con una carga contaminante mayor a 27,000 mg L⁻¹, expresada como DQO.

Resultados

Capacidad de retención de agua en el suelo de los FV



Filtro	Humedad de campo al inicio de las aplicaciones (%)			Volumen de agua retenido por el filtro verde al final de la aplicación (L)			Volumen promedio retenido (L)	
	Aplicación 1	Aplicación 2	Aplicación 3	Aplicación 1	Aplicación 2	Aplicación 3	Tres aplicaciones	
FV1	47,93	25,00	24,70	14,35	25,32	25,62	21,76	21,76
FV2	29,24	35,20	31,90	89,17	8,90	12,20	36,76	36,76
FV3	41,20	40,80	12,70	52,28	9,11	37,21	32,87	32,87
FV4	30,80	19,90	30,30	80,45	24,31	13,91	39,55	39,55
FV5	32,91	24,80	33,00	69,59	19,71	11,51	33,60	33,60
FV6	33,51	13,80	37,90	68,44	31,12	7,02	35,53	35,53
FV7	43,89	23,40	37,80	36,14	26,51	12,11	24,92	24,92
FV8	40,99	29,90	44,60	33,98	16,75	2,05	17,59	17,59
FV9	28,47	12,90	41,90	85,85	29,88	0,88	38,87	38,87
FV10	34,26	12,50	36,40	61,50	32,01	8,11	33,87	33,87
FV11	34,11	42,30	41,40	69,76	3,43	4,33	25,84	25,84
FV12	40,25	34,80	39,10	43,92	12,77	8,47	21,72	21,72
FV13	43,76	26,70	23,80	31,40	22,29	25,19	26,30	
FV14	34,33	24,10	25,90	59,89	20,21	18,41	32,84	
FV15	41,24	14,20	27,70	40,41	33,78	20,28	31,49	
Promedio	37,13	25,35	32,61	55,81	21,07	13,82	30,23	30,24
Máximo	47,93	42,30	44,60	89,17	33,78	37,21	39,55	39,55
Mínimo	28,47	12,50	12,70	14,35	3,43	0,88	17,59	17,59

De acuerdo con los resultados obtenidos en la presente investigación, se encontró para filtros verdes tipo invernadero, impermeabilizados con geomembrana, sembrados con pasto vetiver y con aplicación de aguas residuales provenientes del proceso de beneficio del café un valor de retención de agua por parte del suelo de los filtros verdes de $0,36 \text{ L m}^{-2}\text{-d}^{-1}$.

Resultados

Tasas de evapotranspiración de los FV



Variable	Parámetro	Filtros verdes con vetiver y aplicación de diferentes tipos de agua (limpia y de café)	Filtros verdes con vetiver y aplicación de aguas residuales del café
EVT (mm d ⁻¹)	Promedio	23,02	23,69
	Máximo	192,45	192,45
	Mínimo	17,28	17,28
	Datos	2142	1538
	DE	17,26	18,97
	CV	74,98	80,09
	IC	0,73	0,95
T (°C)	Promedio	24,52	25,02
	Máximo	28,20	28,20
	Mínimo	22,13	22,90
	Datos	2142	1538
	DE	1,09	0,82
	CV	4,46	3,28
	IC	0,05	0,04

De acuerdo con los resultados obtenidos, se encontró para filtros verdes tipo invernadero, impermeabilizados con geomembrana, sembrados con pasto vetiver y con aplicación de aguas residuales provenientes del proceso de beneficio del café, una tasa de evapotranspiración (ET) de 23,69 L m²-d⁻¹.



Resultados

Tasas de evapotranspiración de los FV

Condiciones de inundación. Carga hidráulica de 52 mm/d



Filtro verde	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Promedio
	8 días	7 días	8 días	7 días	7 días	
	Drenados (L)					
FV1	43	45	39	44	45	43,20
FV2	38	43	34	39	38	38,40
FV3	45	47	46	66	46	50,00
FV4	2	2	3	2	3	2,40
FV5	44	45	28	50	50	43,40
FV6	45	45	48	52	48	47,60
FV7	31	30	28	30	27	29,20
FV8	2	2	2	2	2	2,00
FV9	15	15	17	17	16	16,00
FV10	3	3	35	2	50	18,60
FV11	19	21	22	22	21	21,00
FV12	15	12	14	15	15	14,20
Promedio	25,17	25,83	26,33	28,42	30,08	27,17
Máximo	45,00	47,00	48,00	66,00	50,00	51,20
Mínimo	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Tasa de evapotranspiración (L/m²-d)						
Promedio	29,35	33,45	29,21	33,08	32,85	31,59
Mínimo	26,88	30,43	26,50	27,71	30,00	28,30
Máximo	32,25	36,86	32,25	36,86	36,86	35,01



Resultados

Cambios en las características químicas del suelo



Parámetro	FV (1, 2, 3)	FV (4, 5, 6)	FV (7, 8, 9)	FV (10, 11, 12)	FV (13, 14, 15)
pH	5,87 (+22,22%)	6,60 (+23,75%)	8,77 (+56,55%)	6,17 (+12,12%)	6,13 (+23,49%)
CE (mS cm ⁻¹)	0,073 (+46,67%)	8,263 (+8754%)	5,420 (+20225%)	8,230 (+82200%)	0,107 (+146,15%)
N (%)	0,26 (+10,00%)	0,23 (+9,52%)	0,19 (+7,55%)	0,25 (+35,71%)	0,23 (-2,78%)
MO (%)	5,80 (+12,26%)	5,10 (+13,33%)	4,10 (+9,82%)	5,63 (+40,83%)	5,17 (-3,73%)
K (cmol kg ⁻¹)	0,41 (-30,51%)	12,39 (+308,01%)	26,43 (+1399%)	10,50 (+606,50%)	0,46 (+120,63%)
Ca (cmol kg ⁻¹)	5,53 (-3,43%)	3,88 (-24,53%)	1,93 (-62,09%)	2,21 (-50,11%)	4,24 (-25,18%)
Mg (cmol kg ⁻¹)	1,92 (+73,49%)	1,26 (-11,48%)	0,96 (-32,63%)	0,95 (-35,45%)	1,59 (+0,63%)
Al (cmol kg ⁻¹)	0,10 (-50,00%)	0,10 (-40,00%)	0,10 (-25,00%)	0,10 (0,00%)	0,10 (-40,00%)
CIC	15 (-2,13%)	13 (-4,76%)	13 (0,00%)	13 (+8,53%)	13 (-20,83%)
P (mg kg ⁻¹)	80 (-31,73%)	195 (+71,26%)	429 (+218,81%)	364 (+131,85%)	118 (-26,80%)
Fe (mg kg ⁻¹)	175 (-17,17%)	924 (+156,05%)	751 (+133,13%)	1016 (+126,11%)	238 (-9,51%)
Mn (mg kg ⁻¹)	15 (-15,09%)	65 (+129,41%)	64 (+131,33%)	49 (+57,45%)	24 (+10,94%)
Zn (mg kg ⁻¹)	5,50 (-27,63%)	3,20 (-28,89%)	4,13 (-28,45%)	5,07 (+9,35%)	4,60 (-54,30%)
Cu (mg kg ⁻¹)	15,73 (+2,16%)	21,10 (+17,44%)	20,67 (+16,68%)	21,70 (+9,05%)	16,70 (+7,74%)
B (mg kg ⁻¹)	0,18 (-39,77%)	1,50 (+229,20%)	17,16 (+1152,80%)	1,65 (+115,22%)	0,25 (+1,35%)
S (mg kg ⁻¹)	14,47 (-27,06%)	65,37 (+67,18%)	60,57 (+103,24%)	60,83 (+110,50%)	17,37 (-37,75%)
Arcilla (%)	13 (-35,48%)	12 (-40,00%)	8 (-52,00%)	9 (-48,00%)	11 (-33,33%)
Limo (%)	30 (+12,50%)	29 (+18,92%)	26 (0,00%)	27 (+15,71%)	28 (+23,19%)
Arena (%)	57 (+7,59%)	59 (+6,02%)	66 (+15,12%)	65 (+7,78%)	61 (0,00%)

* Entre paréntesis la variación presentada en cada parámetro del suelo respecto a su valor inicial (antes de la primera aplicación de agua).

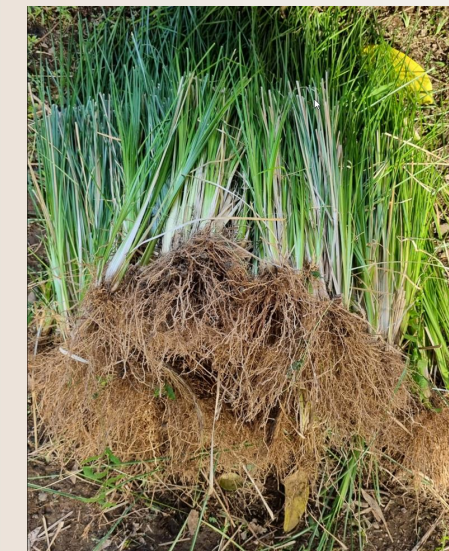
De acuerdo con los resultados obtenidos, se logró determinar que la aplicación periódica de las aguas residuales del café sobre filtros verdes tipo invernadero, impermeabilizados con geomembrana y sembrados con pasto vetiver, permite incrementar el valor de los parámetros del suelo: pH, conductividad eléctrica, N, materia orgánica, K, P, Fe, Mn, Cu, B y S.

Resultados

Tasa de crecimiento de la biomasa



Filtro verde	Peso fresco			Peso seco		
	Peso inicial (kg)	Peso final (kg)	Producción (t/ha-año)	Peso inicial (kg)	Peso final (kg)	Producción (t/ha-año)
FV1	1,22	21,35	47,36	0,31	10,13	23,10
FV2	1,22	35,10	79,72	0,31	17,19	39,72
FV3	1,22	22,30	49,60	0,31	11,83	27,10
Promedio	Cosecha planta		58,89	Cosecha planta		29,97
	Cosecha hojas		102,98	Cosecha hojas		33,84
	Producción total		161,87	Producción total		63,81
FV4	1,22	11,00	23,01	0,31	5,02	11,08
FV5	1,22	18,50	40,66	0,31	7,78	17,58
FV6	1,22	10,60	22,07	0,31	5,60	12,44
Promedio	Cosecha planta		28,58	Cosecha planta		13,70
	Cosecha hojas		51,90	Cosecha hojas		19,24
	Producción total		80,48	Producción total		32,94
FV7	1,22	3,75	5,95	0,31	2,00	3,97
FV8	1,22	4,75	8,31	0,31	2,15	4,33
FV9	1,22	4,50	7,72	0,31	1,69	3,24
Promedio	Cosecha planta		7,33	Cosecha planta		3,85
	Cosecha hojas		43,78	Cosecha hojas		32,62
	Producción total		51,11	Producción total		36,47
FV10	1,22	4,80	8,42	0,31	2,06	4,12
FV11	1,22	7,85	15,60	0,31	3,42	7,33
FV12	1,22	5,25	9,48	0,31	2,15	4,34
Promedio	Cosecha planta		11,17	Cosecha planta		5,26
	Cosecha hojas		72,50	Cosecha hojas		51,26
	Producción total		83,67	Producción total		56,52



La producción total promedio de biomasa de pasto vetiver para los filtros verdes con aplicaciones de agua limpia (AL) y aguas residuales del café (ARC) fue de 71,75 t/ha-año (peso fresco) y 41,98 t/ha-año (peso seco).

Resultados

Tasa de crecimiento de la biomasa (raíces)

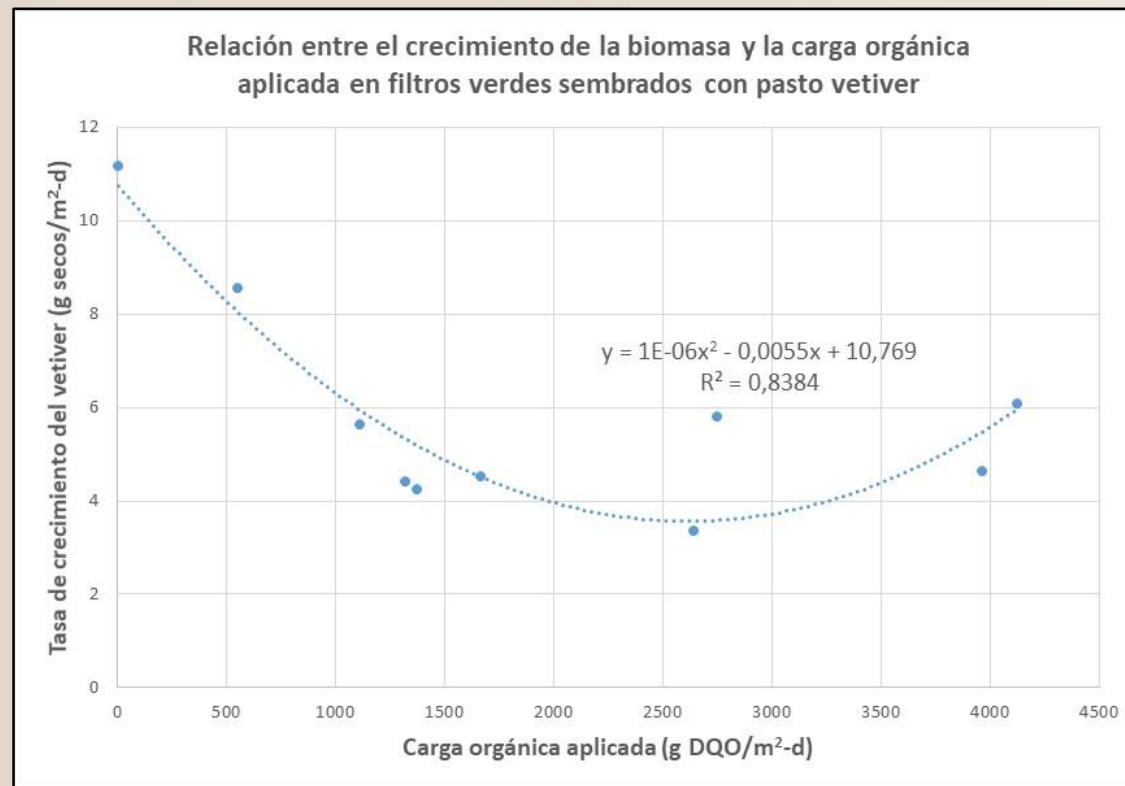


Filtro verde	Longitud inicial raíz (cm)	Longitud final raíz (cm)	Tasa de crecimiento raíz (cm/año)
Aplicaciones de agua limpia			
FV1	5,00	42,00	8,71
FV2	5,00	33,00	6,59
FV3	5,00	31,40	6,21
Promedio	5,00	35,47	7,17
Aplicaciones de agua limpia + aguas residuales de la tecnología del tanque tina			
FV4	5,00	23,00	4,24
FV5	5,00	30,00	5,88
FV6	5,00	35,00	7,06
Promedio	5,00	29,33	5,73
Aplicaciones de agua limpia + lixiviados de la tecnología Becolsub			
7	5,00	33,00	6,59
8	5,00	30,00	5,88
9	5,00	38,00	7,76
Promedio	5,00	33,67	6,74
Aplicaciones de agua limpia + Mieles de la tecnología Ecomill®			
10	5,00	27,00	5,18
11	5,00	38,00	7,76
12	5,00	39,00	8,00
Promedio	5,00	34,67	6,98
Promedio AL + ARC	5,00	32,56	6,48
Promedio total			0,18 mm/d



Resultados

Cargas hidráulicas y orgánicas aplicadas en los FV



Se aplicó una carga orgánica máxima de 4,10 kg DQO/m²-d

Se aplicó una carga hidráulica máxima de 60 mm/d

Se determinó que puede aplicarse una carga orgánica máxima de aguas residuales del café, expresada como DQO, de hasta 1,20 kg m²-d⁻¹ en filtros verdes tipo invernadero, impermeabilizados con geomembrana y sembrados con pasto vetiver, permitiendo el crecimiento de la vegetación en al menos el 50% respecto a la tasa de crecimiento encontrada utilizando agua limpia.

Se determinó que pueden aplicarse cargas hidráulicas de hasta 60 mm d⁻¹ de aguas residuales del café, en filtros verdes tipo invernadero, impermeabilizados con geomembrana y sembrados con pasto vetiver.

En el año 2019, nos hacíamos la siguiente pregunta...



¿Se pueden utilizar filtros verdes con pasto vetiver para el tratamiento y manejo de las aguas residuales del café con cero descargas?

Respuesta 4

Sí. Los estudios piloto y de campo han demostrado que es posible la cero descargas de las aguas residuales del café utilizando filtros verdes impermeabilizados con geomembrana con profundidades de hasta 1 m, sembrados con pasto vetiver y bajo invernadero, utilizando cargas orgánicas que no superen las 10 ton DQO/ha-d

Agua del beneficio



Cobertura plástica



Esquejes de pasto vetiver



5 Sistema de aplicación de agua residual

3 Área de aplicación

Soporte de nivelación de tubería de riego



Base de PVC-S que contiene la guadua



Capa superficial

Capa profunda

Tubería de aireación

Gravilla

Polisombra

Geomembrana

6 Unidad de drenados



Tubería de aireación y drenaje

Sistema de control de inundación



Componentes de la Tecnología de Filtros verdes



Primer aspecto para tener en cuenta

El objetivo

Eliminar los costos legales ambientales asociados con la generación de vertimientos:

1. Solicitud de permiso de vertimientos
2. Pago por la visita de la autoridad ambiental
3. Pago por la realización del muestreo del vertimiento
4. Pago por la caracterización del vertimiento
5. Pago de la tasa retributiva

En el mejor de los casos representa 2 millones/año

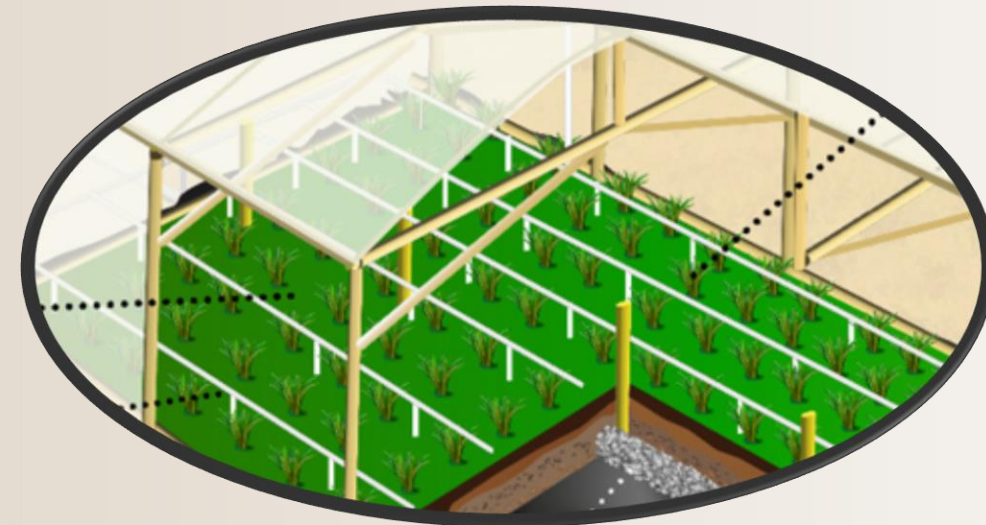
La nueva normativa colombiana del recurso hídrico para ARnD (Resolución 631 del 2015, Decreto 50 del 2018, Resolución 1256 del 2021), establece los parámetros de calidad que deben cumplir las aguas tratadas antes de su descarga o reúso, implicando unos costos legales ambientales anuales significativos para el productor, representados en la solicitud de un permiso de vertimientos, el muestreo y caracterización del vertimiento, el pago de la visita por parte del funcionario de la CAR y el pago de la tasa retributiva (superiores a 2 millones/año).

Segundo aspecto para tener en cuenta

Los componentes



Unidades de tratamiento y aplicación



Área de aplicación y siembra del material



Unidad de recolección de drenados

Componentes de un filtro verde

La trampa de pulpa



Objetivo: Evitar el ingreso de pulpa y de material sólido a la unidad de tratamiento primario, que ocasionen taponamiento en la tubería de conducción.

Dimensionamiento: Tanque plástico de 100 L.

Componentes de un filtro verde

Unidad para el tratamiento primario



Objetivo: Eliminar una parte del material particulado presente en las aguas residuales, con el fin de disminuir el valor de la carga orgánica aplicada al área con vegetación y favorecer el manejo del agua residual para la aplicación como riego.

Dimensionamiento: Su capacidad debe ser el doble del volumen de agua generada en el día pico.

Cota de desnivel mínima: 70 cm (desde la salida de la trampa de pulpa hasta el nivel superior del tanque).

Componentes de un filtro verde

Unidad de aplicación del agua pre-tratada



Objetivo: Recibir el agua pre-tratada y las aguas no retenidas o no evaporadas en el área de cultivo, con el fin de eliminar material en suspensión aún presente que puedan taponar la tubería de riego y realizar la dosificación a caudal constante.

Dimensionamiento: Su capacidad debe ser igual al volumen de agua generada en el día pico.

Componentes de un filtro verde

Área de cultivo



Objetivo: Retener y evapotranspirar el agua residual a través de procesos físicos y biológicos.

Dimensionamiento: El valor del área en m^2 se encuentra dividiendo el volumen (L) de agua generada en el día pico entre 24.

Componentes de un filtro verde

Área de cultivo



Delimitación del área



Excavación de 0,70 m



Para optimizar la compra de la geomembrana comercial (que viene de 7 m de ancho), se recomienda fijar el ancho del filtro verde en 5 m y su profundidad en 0,7 m

Impermeabilización con geomembrana de 20 mils y tubería de aireación y recolección de drenados

Componentes de un filtro verde

Área de cultivo



Llenado de la excavación



Siembra de pasto vetiver al cuadro cada 30 cm



Tubería de aireación

Para facilitar los procesos de evapotranspiración se recomienda incorporar, en el área de siembra, tubos de aireación en tubería PVC-S de 1½", enterrados 60 cm, con perforaciones de 5/16", cubiertos con polisombra, el área enterrada, a una distancia de 1,25 m de cada orilla y separados entre sí, a lo largo del filtro verde, cada 3 m y que sobresalgan del suelo 90 cm (altura total del aireador 1,50 m).

Componentes de un filtro verde

Cobertura plástica tipo invernadero



Objetivo: impedir el ingreso del agua lluvia al filtro verde y facilitar el incremento de la temperatura al interior del mismo para favorecer los procesos de evapotranspiración del agua residual.

Dimensionamiento: Altura de 2m, pestaña para salida del vapor de agua. Agrolene calibre 7 o superior.

Componentes de un filtro verde

Sistema de aplicación del agua residual



Objetivo: Distribuir uniformemente el agua residual sobre el área cultivada del filtro verde.

Dimensionamiento: Deben instalarse cuatro líneas de riego, levantadas a 25 cm del suelo y con agujeros de 3/32 pulg separados cada 10 cm.

Cota de desnivel: 35 cm

Componentes de un filtro verde

Unidad para recolección de drenados



Objetivo: Recibir los drenados que puedan generarse en el área cultivada

Dimensionamiento: Su capacidad debe ser igual al volumen de agua generada en el día pico.

Tercer aspecto para tener en cuenta

Actividades de mantenimiento

- A. Corte periódico al pasto vetiver (bimensual o trimestral) a 50 cm del nivel del suelo.
- B. Eliminación del material seco.
- C. Mantenimiento periódico (bimensual o trimestral) de la tubería de riego o cuando se presenten obstrucciones.
- D. Lavado de la tubería de riego
- E. Eliminación periódica de lodos de los tanques de tratamiento.
- F. Tanto por higiene, como por la apariencia del filtro verde y con el propósito de mantener el proceso fotosintético de la vegetación y su productividad (el crecimiento del pasto vetiver se afecta con la sombra), es necesario mantener limpia la cubierta plástica del filtro verde.
- G. Construir y mantener en funcionamiento canales que permitan la desviación de las aguas lluvias que puedan ingresar al interior del filtro verde.



Implementación de la solución Cenicafé. Sede La Granja



**Filtro verde beneficiadero experimental Cenicafé. 200 m²
10.000@ cps/año. Operando desde 2019**

Caso Práctico. Implementación de la solución. ARBC Granja (10000 @/ cps –año. 1,2 L/kg cps).



1. Excavaciones



2. Impermeabilización



3. Techado



4. Preparación del terreno para la siembra



5. Siembra del material vegetal



6. Canalización del agua del SMTA al FV



7. Instalación del sistema de riego



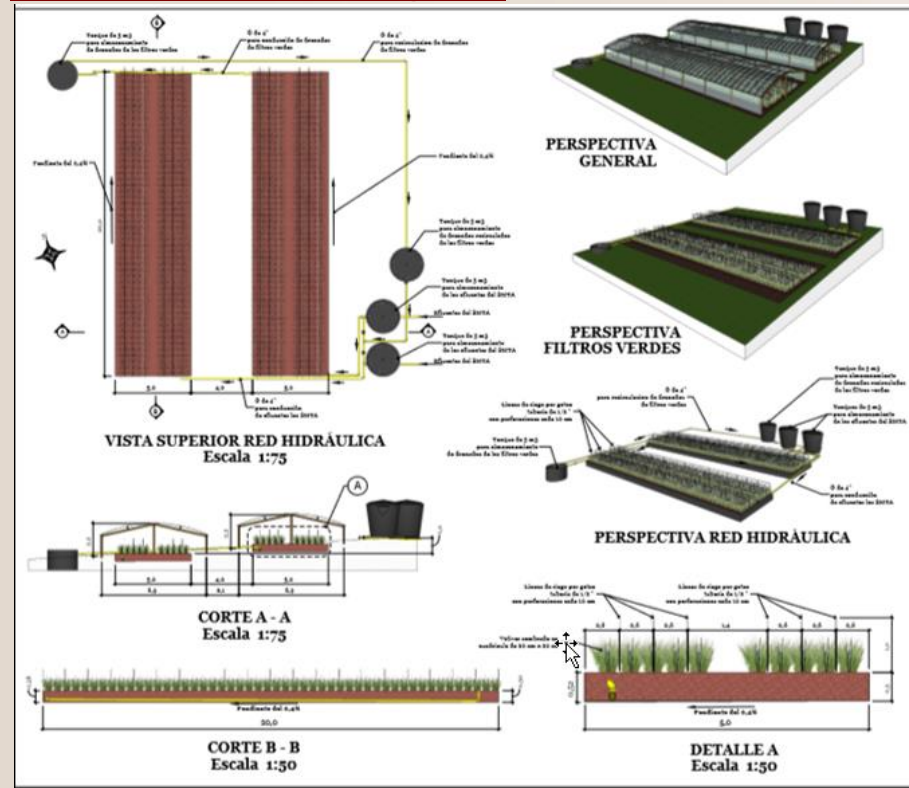
8. Instalación del tanque de drenados

Caso Práctico. Implementación de la solución.



9. Vista panorámica del FV

ARBC Granja.



FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA	
CLIENTE	
CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES	
Ubicación:	POSCOCECHA
Diseño:	Ing. Carlos Tibabuzza
Realizó:	PIE: Yuliana Rodríguez
Revisó:	MAC: Laura Quiñonez
PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS	
LA GRANJA	
CONTIENE	
FILTROS VERDES TIPO	



10. Recirculación de los drenados

especificar esta salida como sería infiltrada en el suelo o si habría recirculación de dicho efluente. Lo anterior, teniendo en cuenta que el caudal a tratar (28.5m³/día), es mucho más alto que el de las ARD de la Granja, por lo que falta tener en cuenta consideraciones técnicas de evapotranspiración, como lo establece el artículo 180 de la Resolución No. 330 de 2017 "Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS y se derogan las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009".

3. Finalmente se informa que la propuesta de postratamiento con filtros verdes con recirculación total, para las aguas residuales no domésticas del beneficio de café, se considera acorde.

Cualquier inquietud con gusto será atendida.

Atentamente,

ADRIANA MERCEDES MARTINEZ GOMEZ
Subdirectora de Evaluación y Seguimiento Ambiental

Elaboró: María Carolina Rincón C. - SEySA



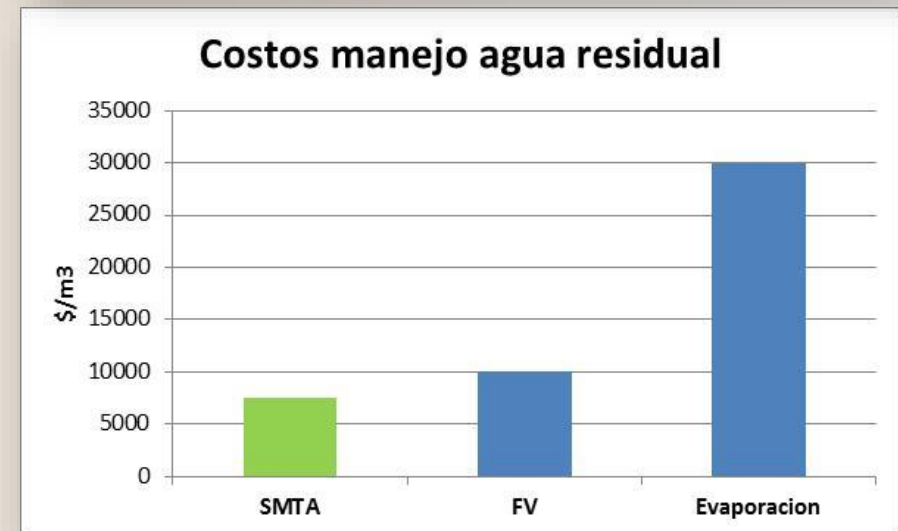
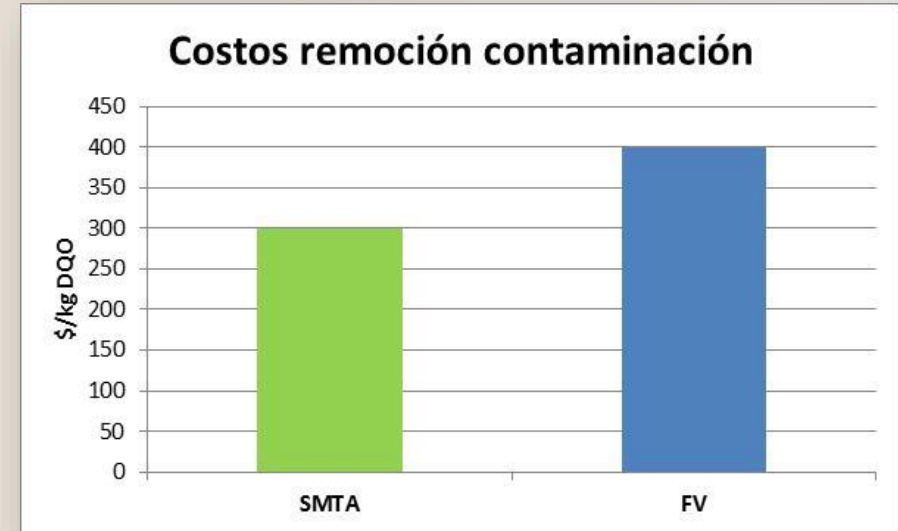
DQOi: 82190 ppm DQOf: 1491 ppm. Remoción 98,19%

Costos estimados del manejo del ARC con filtros verdes (ZLD)



Considerando un volumen promedio de agua residual de 2,5 L/kg cps:

- Se requieren 10 m² de Filtro verde/ha
- El costo del Filtro verde se estima en \$ 100.000/m².
- El costo del Filtro verde/ha es aproximadamente \$ 1,000,000
- Se estima la vida útil del plástico en 5 años, de los tanques plásticos en 30 años y del sistema de riego en 15 años.
- Se estima que evaporar 1 m³ de agua en el filtro verde cuesta, en promedio, \$ 20.000 (considerando los tanques para el tratamiento primario y la recirculación de los drenados). Sin considerar tanques (tal como se estimó en la evaporación solar del agua residual) el valor sería de \$ 10.000/m³ vs 30.000/m³ en la evaporación solar.



Impacto en la caficultura al solucionar el problema



Eliminación

Costos legales mínimos estimados/año

Permiso vertimientos: \$ 100,000

Visita funcionario CAR: \$ 300,000

Muestreo, Caracterización: \$ 1,500,000

Pago Tasa retributiva: \$ 100,000

Total: \$ 2.000.000

Impacto en la caficultura al solucionar el problema



Si se implementara este tipo de tecnología en todas las fincas cafeteras de Colombia, se requiere disponer de alrededor de 882 ha (el 0,1% del área cafetera) y se evitaría el vertido de 158.760 toneladas anuales de carga orgánica contaminante a los cuerpos de agua, permitiendo el reciclaje de los nutrimentos a un suelo impermeabilizado, que sería del orden de 1.304 t de N, 91 t de P y 1.291 t de K.

Como resultado de la tecnología se cosechan anualmente alrededor de 34 t de biomasa seca de hojas de vetiver/ha, lo que representaría, para toda la caficultura, una disponibilidad adicional de 431, 42 y 749 t anuales de N, P, K, respectivamente, para su reincorporación al suelo como abono orgánico.





Tecnología de filtros verdes para el manejo, tratamiento y cero descargas de las aguas residuales de la finca cafetera

▪ Nelson Rodríguez V. ▪ Laura Vanessa Quintero Y. ▪ Samuel A. Castañeda



548

Febrero de 2022
Gerencia Técnica /
Programa de Investigación Científica
Fondo Nacional del Café



Filtro verde para el manejo y tratamiento de las aguas residuales del café con cero descargas

Los filtros verdes son un sistema de tratamiento natural del agua, de baja carga, que se basan en la aplicación controlada del agua residual pretratada a un cultivo forestal o herbáceo, y que aprovecha la capacidad autodepuradora de la zona no saturada del suelo y la captación de nutrimentos por parte de la vegetación. El uso de especies arbóreas o pastos de rápido crecimiento, con grandes requerimientos hídricos y cuyas raíces son tolerantes a condiciones parcialmente saturadas y anaerobias permiten la aplicación de altos volúmenes de agua residual, logrando su evapotranspiración total, alcanzando el objetivo de cero descargas (Rodríguez et al., 2022).

A continuación, se describen y dimensionan cada uno de los componentes de un filtro verde con cero descargas para las aguas residuales del café.

Avances Técnicos
Cenicafé





**XVIII
REUNIÓN TÉCNICA
NACIONAL
DE PALMA DE ACEITE**

2023

GRACIAS

