



*Tendencias en el tratamiento  
Integral de Aguas Residuales*

# Congreso Internacional Ambiental Manizales

## “Tendencias en el tratamiento integral de aguas residuales”

**Manizales, septiembre 18 - 21 de 2017**



Centro para la  
Formación Cafetera  
SENA Regional Caldas



Instituto de Estudios Ambientales IDEA  
Sede Manizales



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
DE COLOMBIA



Universidad<sup>®</sup>  
Católica  
de Manizales





# UTILIZACIÓN DE TRES ESPECIES DE PLANTAS ACUÁTICAS EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PRODUCTO DEL LAVADO DE ARENAS PROVENIENTES DEL PROCESO DE CIANURACIÓN DE ORO

**Marco Tulio Jaramillo Salazar**

**Vicerrectoría de Investigaciones y Posgrados**

**Mina La Coqueta**





## MACROPROYECTO

2010-2017

## PLANTA DE TRATAMIENTO

1. Floculación

2. Reactor aerobio

3. Plantas acuáticas



## Cianuración

Resultados de los análisis elementales por fluorescencia de rayos X (FRX) para la mina La Coqueta

Muestra	PH-1A	PH-1B	PH-2	PH-3	PH-4	PH-7	PH-8	Baz-1	Baz-3	Baz-7	Ver-1	Ver-3
Elemento	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Na	0,044	0,074	0,05	0,05	0,039	0,039	0,056	0,033	0,058	0,054	0,069	
Mg	0,815	0,688	0,728	0,492	0,604	1,23	0,934	0,211	0,48	0,862	0,203	0,265
Al	16,509	15,464	16,936	15,831	15,59	17,561	17,677	6,724	12,257	16,324	8,227	8,639
Si	55,809	54,655	56,231	60,943	53,028	46,705	53,904	75,159	64,952	59,809	67,69	40,424
P	0,017	0,218	0,017	0,092	0,132	0,147	0,194	0,109	0,017	0,029	0,033	0,013
S	2,436	2,8	3,382	2,29	6,381	1,802	1,721	3,822	3,319	3,148	3,302	11,863
K	12,642	14,823	11,517	12,285	11,737	12,766	14,067	5,23	10,935	12,941	13,62	10,613
Ca	1,328	1,071	0,826	0,686	1,467	7,733	1,752	0,323	0,544	1,197	0,158	0,052
Ti	1,171	1,205	1,402	1,068	1,233	1,439	1,328	0,398	0,858	1,444	0,676	0,37

Alvarán Echeverry, Mauricio .2006. CONSIDERACIONES METALOGENÉTICAS DEL DEPÓSITO AURÍFERO “LA COQUETA”. DISTRITO MINERO MANIZALES VILLAMARÍA.



Serrano Gómez M. Fitorremediación: una alternativa para la recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos.

García Murillo P, Fernández Zamudio R, Cirujano Bracamonte S. Habitantes del agua. Macrófitos.

Valero Alvarado, ML. Aplicación Tecnológica de las Macrófitas a la Depuración de Aguas Residuales con la Ayuda de Microorganismos.

## Biorremediación

Rápido crecimiento

Bioacumulación de  
contaminantes

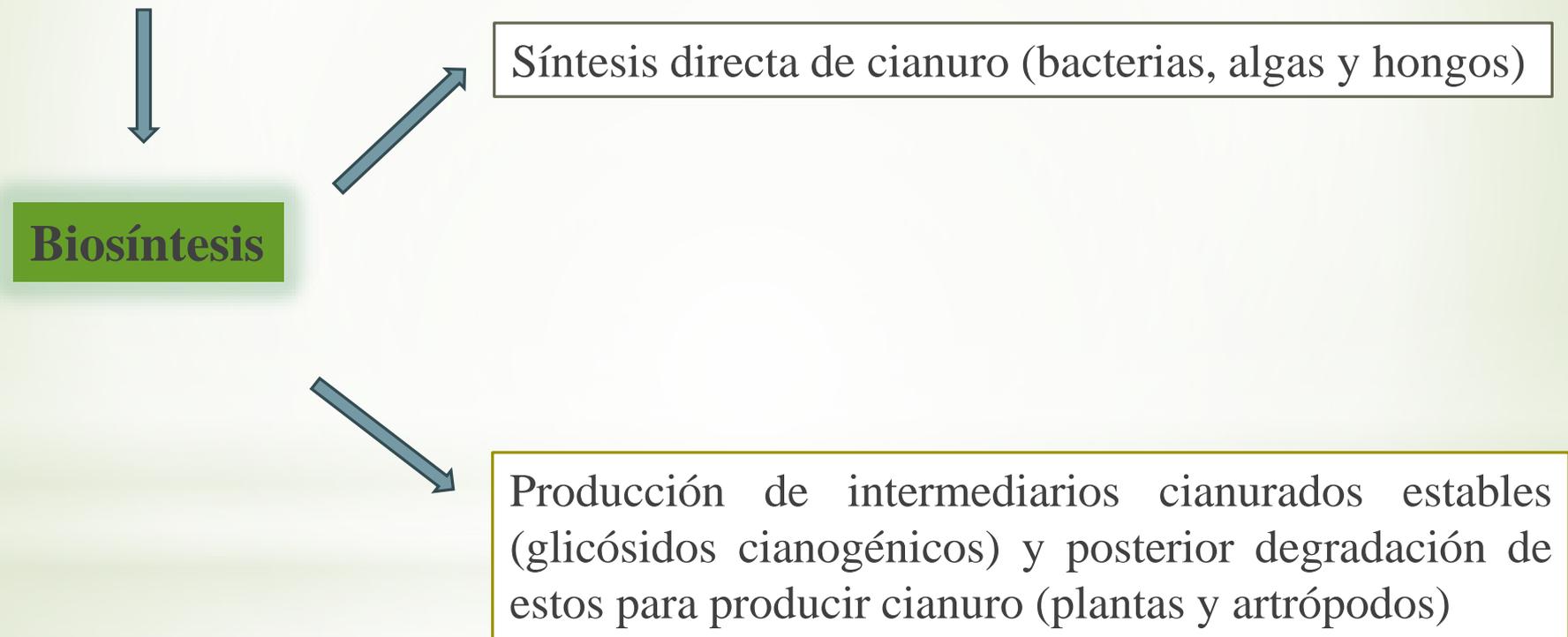
La selección de macrófitas acuáticas para la depuración de aguas residuales se realiza teniendo en cuenta algunas características de la planta

Eficiencia  
fotosintética

Adaptación a sequía

Habilidad absorción  
sustancias nocivas

## El cianuro



Evaluar la acumulación y/o transformación del cianuro presente en el agua procedente del beneficio del oro en la mina La Coqueta (Manizales, Caldas) en *Eichhornia crassipes*, *Pistia stratiotes* y *Salvinia auriculata*.

- \* Las tres especies de macrófitas acuáticas presentan diferentes tasas de acumulación y transformación del cianuro y presentan diferentes rutas ante la presencia de este compuesto.
- \* Las macrófitas tienden a transformar el cianuro produciendo glicósidos cianogénicos.
- \* Las macrófitas tienden a aumentar su biomasa, ya que incorporan el carbono procedente del cianuro a su metabolismo.
- \* Las macrófitas pueden optar por una respiración resistente al cianuro.

## *Eichhornia crassipes* (Jacinto o lirio de agua)

- Una de las especies más estudiadas.
- Características depuradoras.
- Se establece en aguas con alto contenido de nutrientes.
- Eficiencia 10%-90% removiendo Nitrógeno.
- Hiperacumuladora de metales pesados.(cadmio, hierro, mercurio, arsénico, plomo)



*Pistia stratiotes* (Lechuga de agua, Lechuguilla, Repollo de agua, Repollito de agua)



- Crecimiento rápido.
- Hiperacumuladora de metales pesados (cobre y cadmio)

## *Salvinia auriculata* Aubl. (Oreja de agua, Oreja de elefante, Oreja de ratón, Acordeón, Helecho mariposa)

- Adapta su crecimiento a aguas con bajos nutrientes.
- Alta tasa reproductiva, entre 2 y 5 días, una planta puede duplicarse.
- Soportando temperaturas de 3°C y 43°C.
- Acumuladora de Hg.



# Materiales y métodos



## Material vegetal

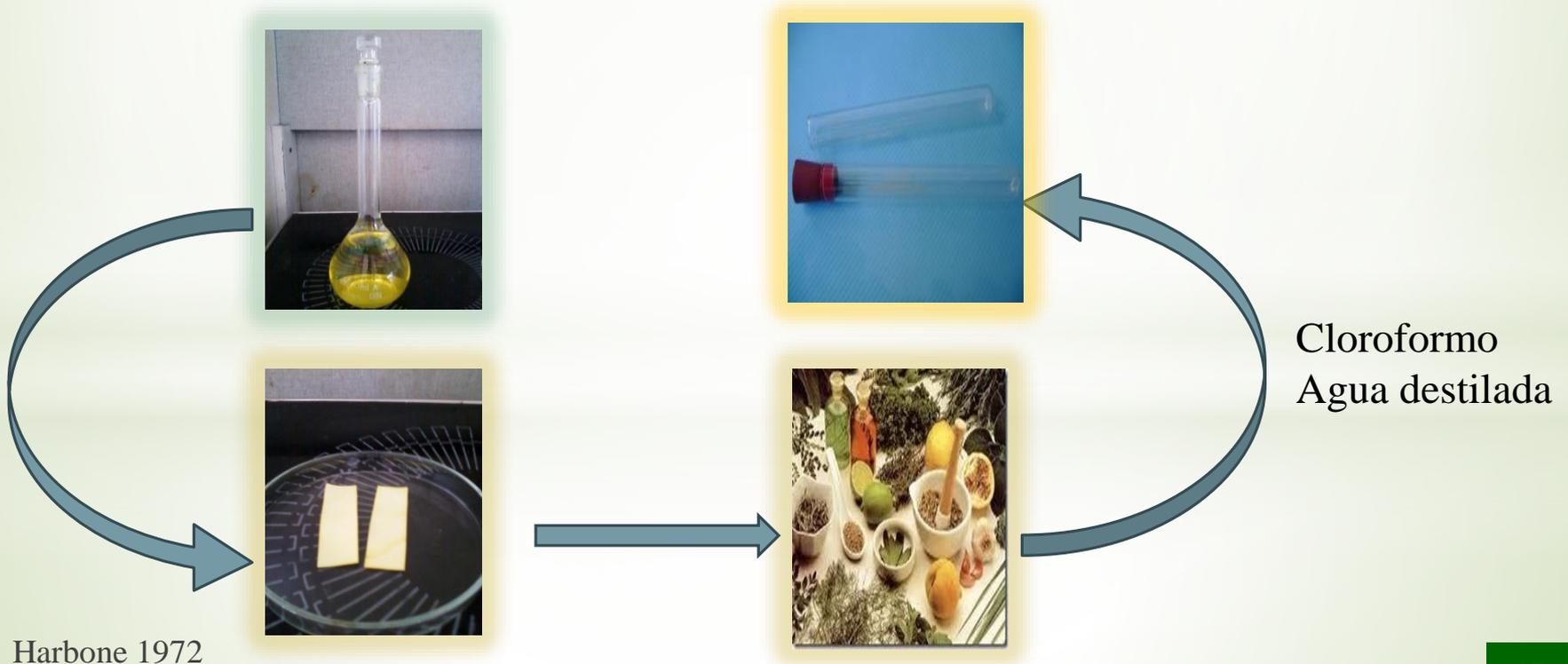


Se colectó en el Jardín botánico de la Universidad de Caldas

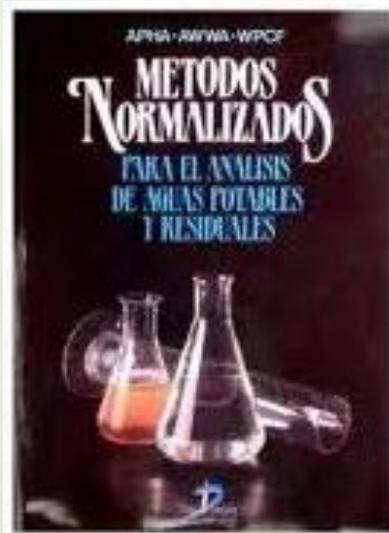
Altitud 2.160 msnm

Ubicado en Manizales, Caldas

- Parámetros fisicoquímicos: Temperatura del agua y ambiente, pH, conductividad y oxígeno disuelto.
- Determinación cualitativa de glicósidos cianogénicos.



- Determinación de compuestos nitrogenados (Maldoni 1991).
- Determinación de concentración de cianuro en el agua (4500-CN C) (APHA 2005)



% Remoción de cianuro

$$[\text{inicial CN}^-] - [\text{final CN}^-] / [\text{inicial CN}^-] \times 100$$

Tipo de prueba	Estática (sin renovación de la solución de prueba – Aguda). No-Estática (Renovación del medio de cultivo y de alimento – Crónica)
Duración	Aguda : 24 horas (mortalidad) Crónica : 96 horas (reproducción)
Intensidad luminosa	600 - 1.000 luxes (ambiental de laboratorio)
Fotoperiodo	16 hora luz : 8 horas oscuridad
Temperatura	20 ± 1°C
Aireación	No
Suministro de alimento	Aguda: No Crónica: Si
Volumen de los recipientes de prueba	100 mL
Volumen de la prueba	80 mL
Edad de los organismos	Neonatos (edad < 24 horas)
Concentraciones o diluciones ensayadas	Mínimo 5, más testigo
Replicas por concentración	Mínimo 3
Organismos por réplica	10
Agua de dilución	Reconstituida semidura (80 - 100 mg/L como CaCO <sub>3</sub> )
Efecto medido	Mortalidad o inmovilidad a 96 horas (Aguda) y 15 días (Crónica), con observaciones a 24 horas
Criterio de aceptación de la prueba	Inmovilidad o mortalidad en los testigos menor o máximo al 10% al término de la prueba
Control positivo	Cr <sup>6+</sup> , a partir de una solución de K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> (Solución estándar = 0,004167 M; 50 mL)



## MÉTODOS ESTANDARIZADOS PARA EL ANÁLISIS DE AGUAS POTABLES Y RESIDUALES

## 5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Diseño estadístico en bloques

Agua

Plantas

Pruebas ANOVA

Pruebas *poshoc de Tukey*

Análisis → Programa estadístico Statgraphics (5.1)

# Resultados y discusión



## Parámetros fisicoquímicos

**pH:** Para todos los tratamientos se encontraron diferencias significativas en la variación de pH con respecto al control.

$P < 0,05$

**Conductividad:** Para *Eichhornia*, *Pistia* y el policultivo en las tres fases del tratamiento para el día y la noche, se encontraron diferencias significativas en la variación de conductividad entre los tratamientos y el control.  $P < 0,05$ , para *Salvinia* no.

**% Saturación de oxígeno:** Hubo diferencias significativas para los 4 tratamientos, menos para *Eichhornia* en la primera fase del tratamiento.

$P < 0,05$

## Agua cianurada procedente de la Mina la Coqueta

### AGUA RESIDUAL LAVADO ARENAS TRATADAS CON CIANURO

PARÁMETRO	VALOR (mg/L)				
	EXPERIMENTAL	DECRETO 1594 DE 1984			
		ART 37	ART 39	ART 40	ART 41
Arsénico	0,7	0,1	0,1	0,1	0,2
Hierro	39,2			5,0	
Plomo	0,3	0,1	0,1	5,0	0,1
Zinc	73,5	15,0	15,0		25,0
Sulfuro	2,0				
Cianuro	220,0	0,2	0,2	2,0	
SST	7300,0				

## Presencia de glicósidos cianogénicos



ACUARIO	ESPECIE	19/12/2012
		Concentración 0,05M
1	A	Negativo
		Negativo
2	B	Negativo
		Negativo
3	C	Negativo
		Negativo
6	A	Positivo (Raíz)
		Positivo (Raíz y Hojas)
7	B	Negativo
		Positivo (Hoja)
8	C	Positivo (Raíz y Hojas)
		Negativo
11	A	Positivo (Raíz)
		Negativo
12	B	Positivo (Raíz)
		Negativo
13	C	Positivo (Raíz)
		Positivo (Raíz)
Blanco	A	Negativo
		Negativo
	B	Negativo
		Negativo
	C	Negativo
		Negativo

**A:** *Eichornnia crassipes*; **B:** *Salvinia auriculata*; **C:** *Pistia stratiotes*



- No hubo aumento de biomasa ya que no se evidencio crecimiento ni reproducción de la planta.

## Alcaloides determinados por cromatografía de capa fina (CCD)

Fase móvil/ Muestra	Tratamiento			Blanco		
	<i>Eichhornia</i>	<i>Salvinia</i>	<i>Pistia</i>	<i>Eichhornia</i>	<i>Salvinia</i>	<i>Pistia</i>
C:M	-	-	-	-	-	+
H:A	+	+	+	-	-	-

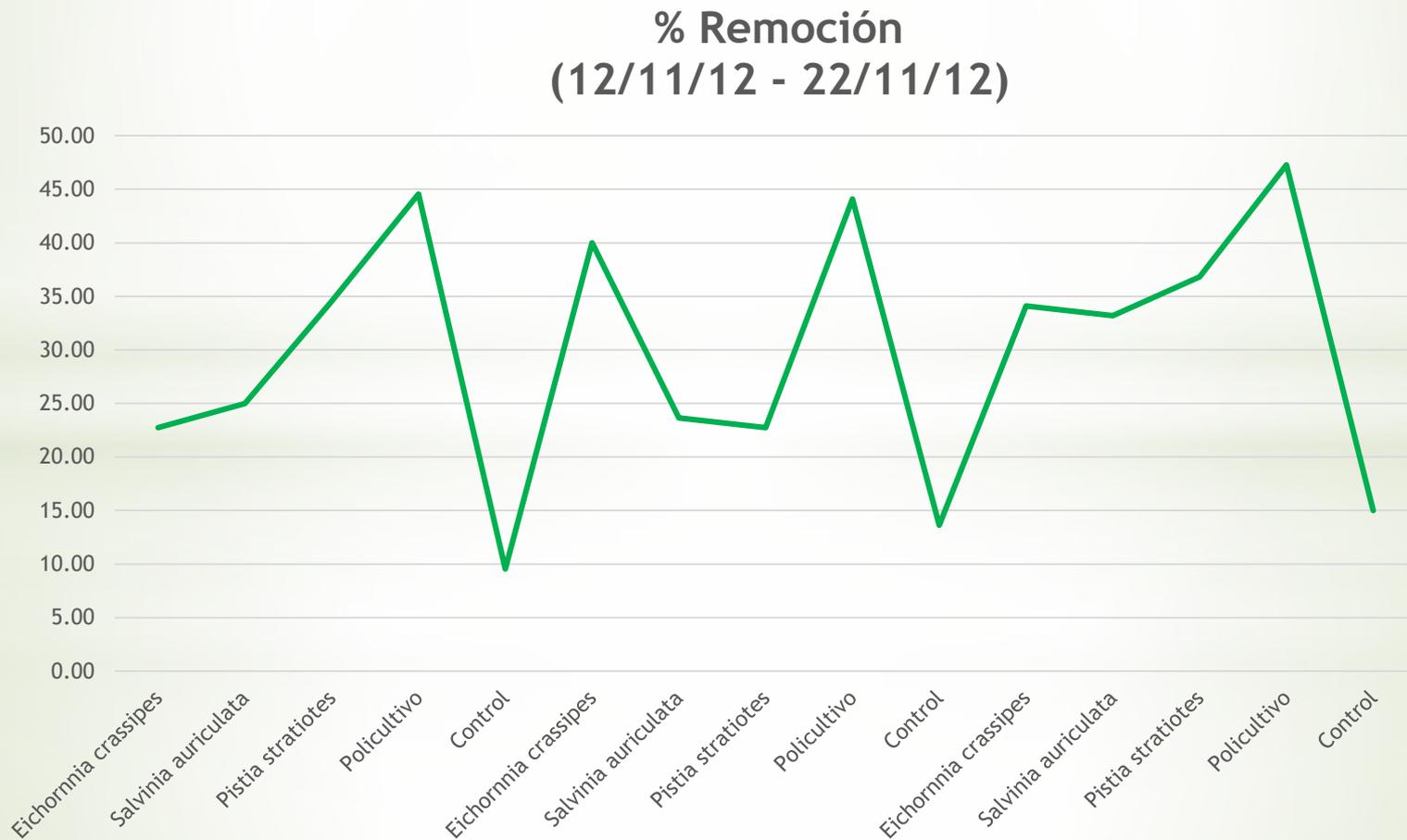
C:M Cloroformo: metanol . 7:3

H:A Hexano: Acetona 7:3

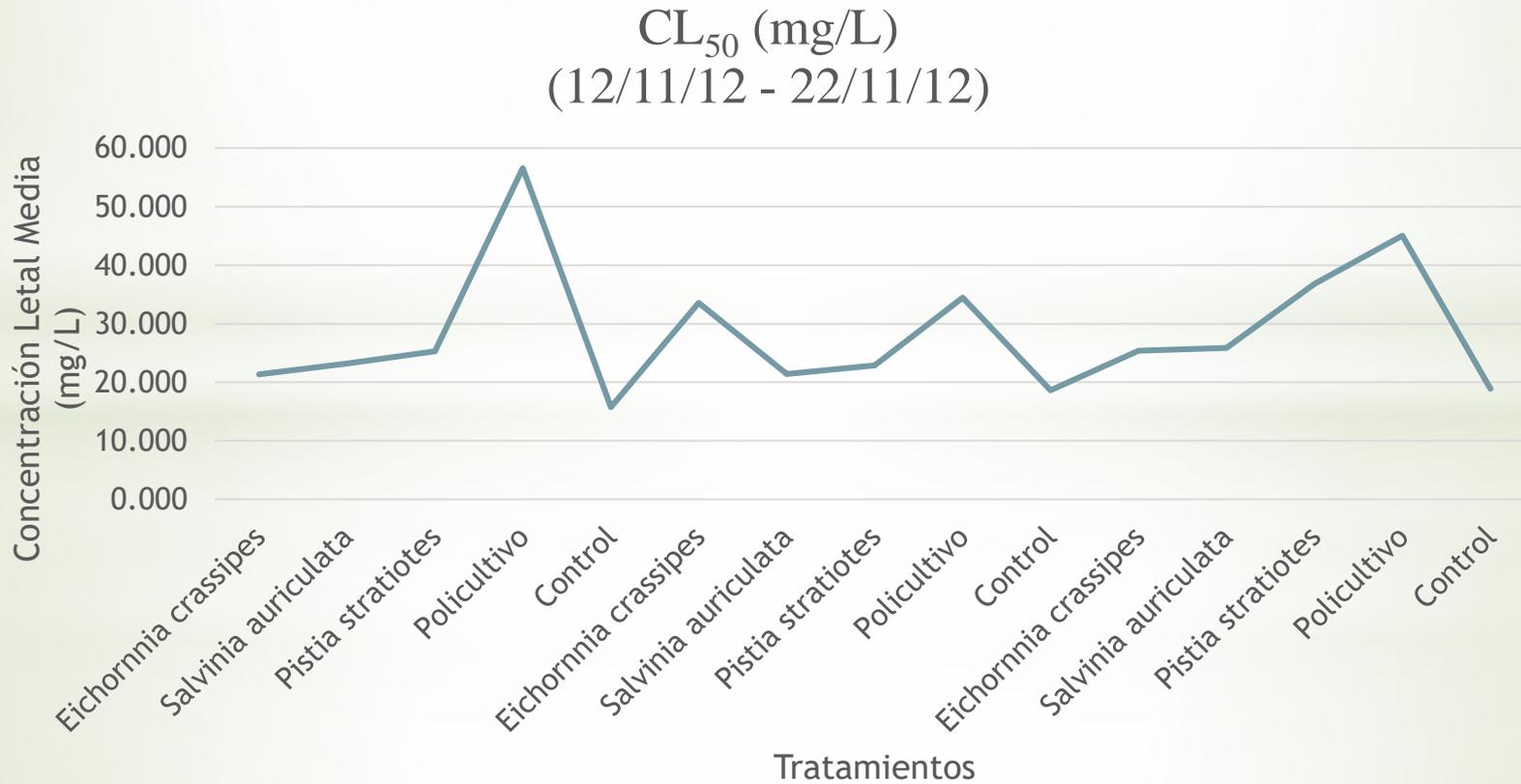
## % de remoción de CN<sup>-</sup> primer grupo de macrófitas

	Acuario	12/11/2012	22/11/2012	% Remoción	CL <sub>50-24</sub>
<i>Eichornnia crassipes</i>	1	220	170	22,73	21,340
<i>Salvinia auriculata</i>	2	220	165	25,00	23,180
<i>Pistia stratiotes</i>	3	220	144	34,55	25,270
Policultivo	4	220	122	44,55	56,540
Control	5	220	199	9,55	15,760
<i>Eichornnia crassipes</i>	6	220	132	40,00	33,580
<i>Salvinia auriculata</i>	7	220	168	23,64	21,410
<i>Pistia stratiotes</i>	8	220	170	22,73	22,860
Policultivo	9	220	123	44,09	34,460
Control	10	220	190	13,64	18,630
<i>Eichornnia crassipes</i>	11	220	145	34,09	25,390
<i>Salvinia auriculata</i>	12	220	147	33,18	25,860
<i>Pistia stratiotes</i>	13	220	139	36,82	36,830
Policultivo	14	220	116	47,27	45,040
Control	15	220	187	15,00	18,870

## % remoción de $\text{CN}^-$ Primer grupo de macrófitas



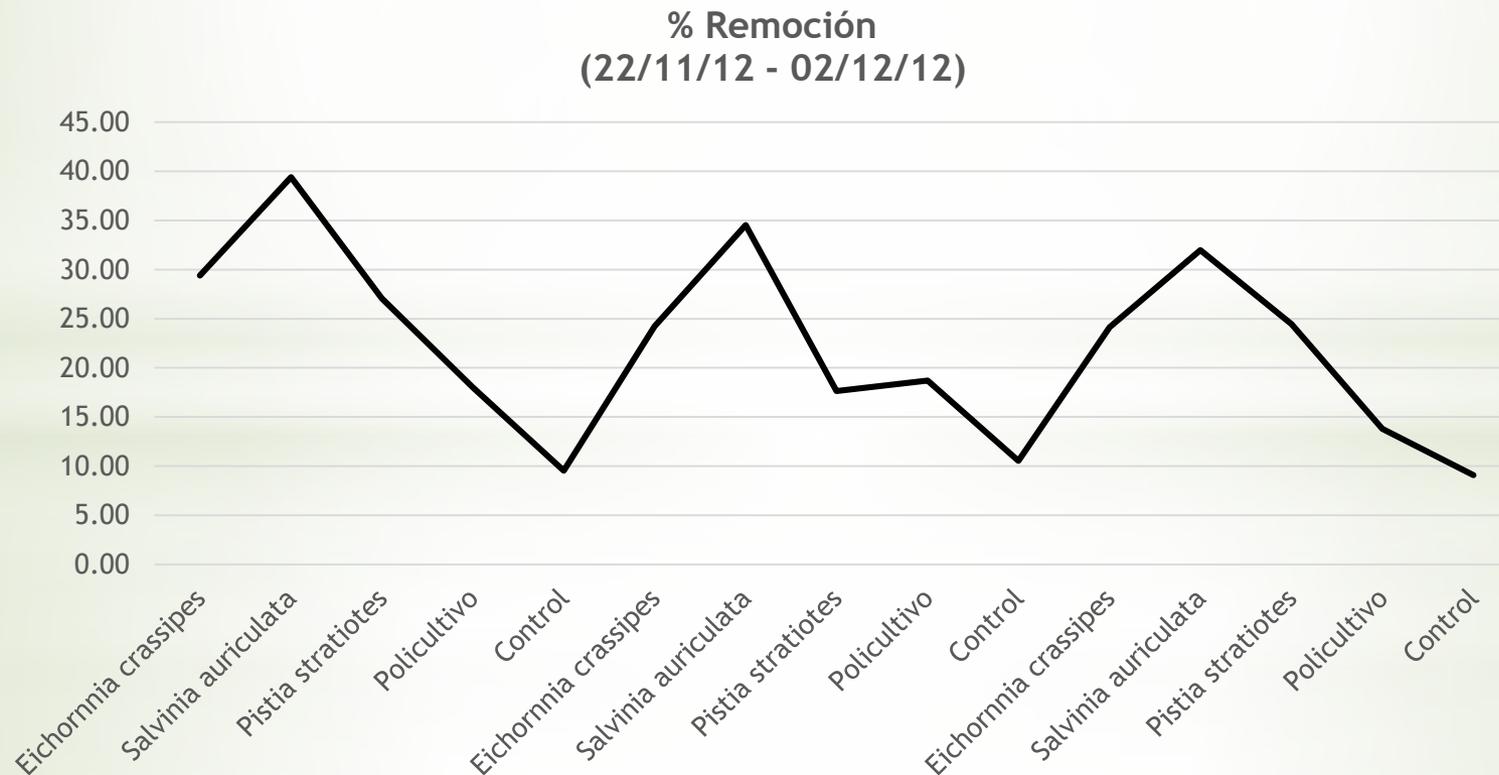
## Bioensayo con *Daphnia pulex*. primer grupo de macrófitas



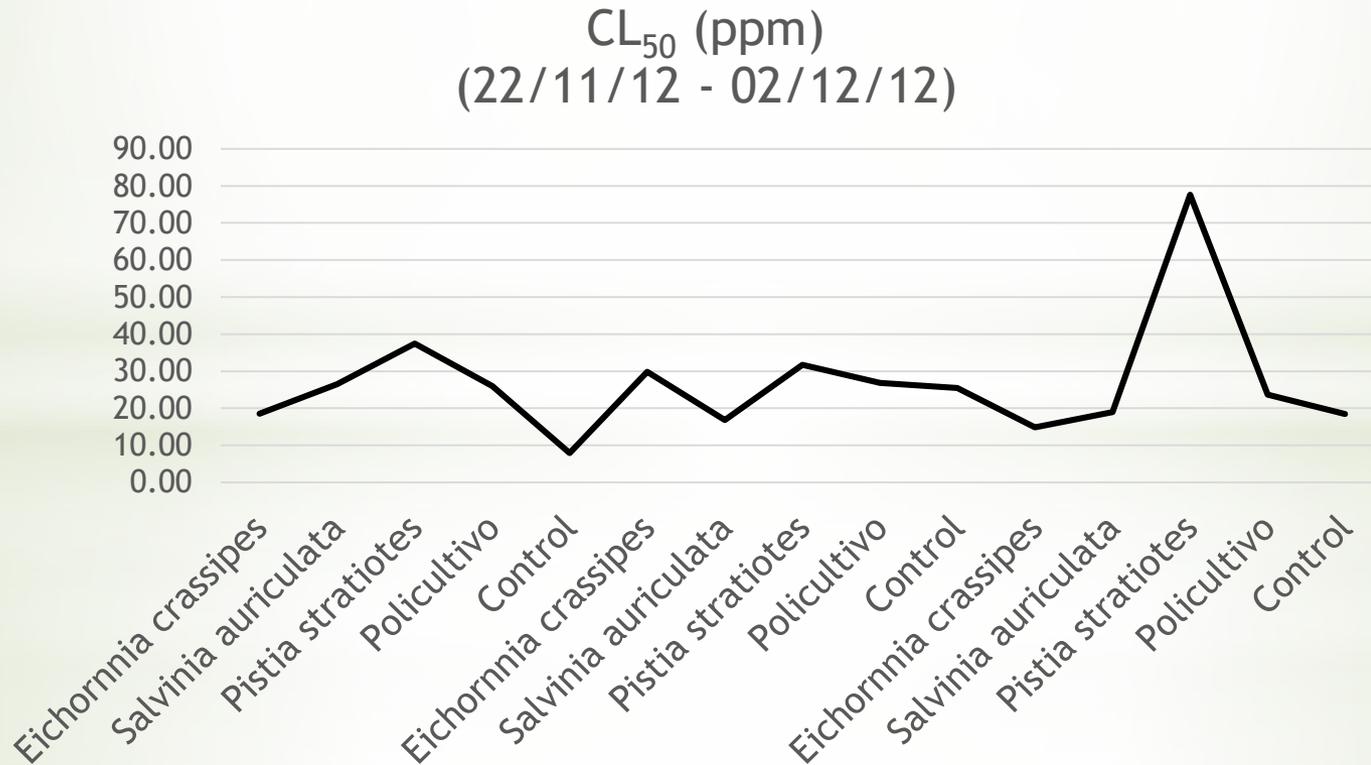
## % de remoción de $\text{CN}^-$ segundo grupo de macrófitas

	Acuarios	22/11/2012	02/12/2012	% Remoción	CL <sub>50-24</sub>
<i>Eichornnia crassipes</i>	1	170	120	29,41	18,56
<i>Salvinia auriculata</i>	2	165	100	39,39	26,45
<i>Pistia stratiotes</i>	3	144	105	27,08	37,45
Policultivo	4	122	100	18,03	25,96
Control	5	199	180	9,55	7,91
<i>Eichornnia crassipes</i>	6	132	100	24,24	29,79
<i>Salvinia auriculata</i>	7	168	110	34,52	16,85
<i>Pistia stratiotes</i>	8	188	140	17,65	31,74
Policultivo	9	123	100	18,70	26,84
Control	10	190	170	10,53	8,50
<i>Eichornnia crassipes</i>	11	145	110	24,14	14,85
<i>Salvinia auriculata</i>	12	147	100	31,97	18,93
<i>Pistia stratiotes</i>	13	139	105	24,46	77,62
Policultivo	14	116	100	13,79	23,69
Control	15	187	170	9,09	8,46

## % de remoción de $\text{CN}^-$ segundo grupo de macrófitas



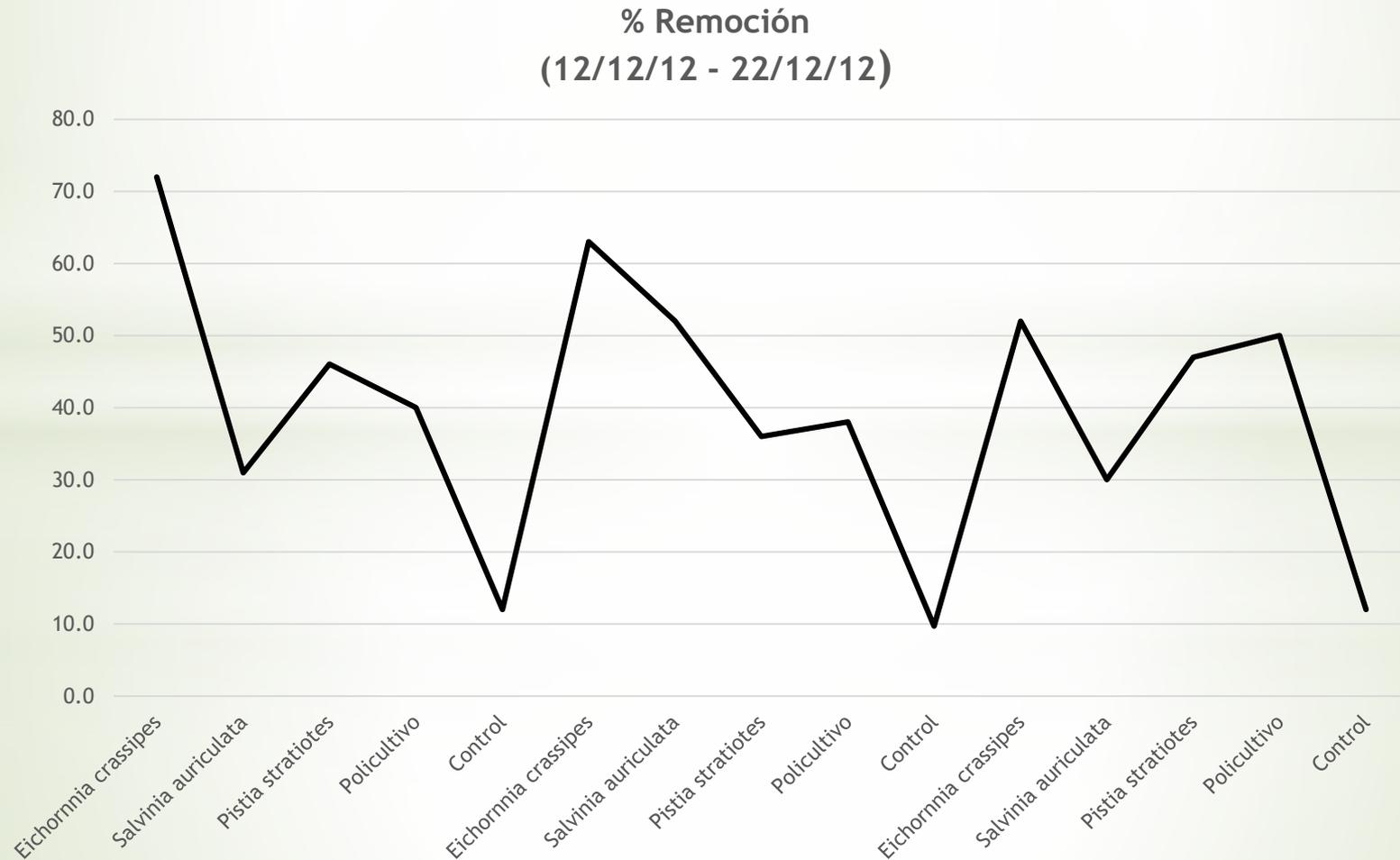
## Bioensayo con *Daphnia pulex*. segundo grupo de macrófitas



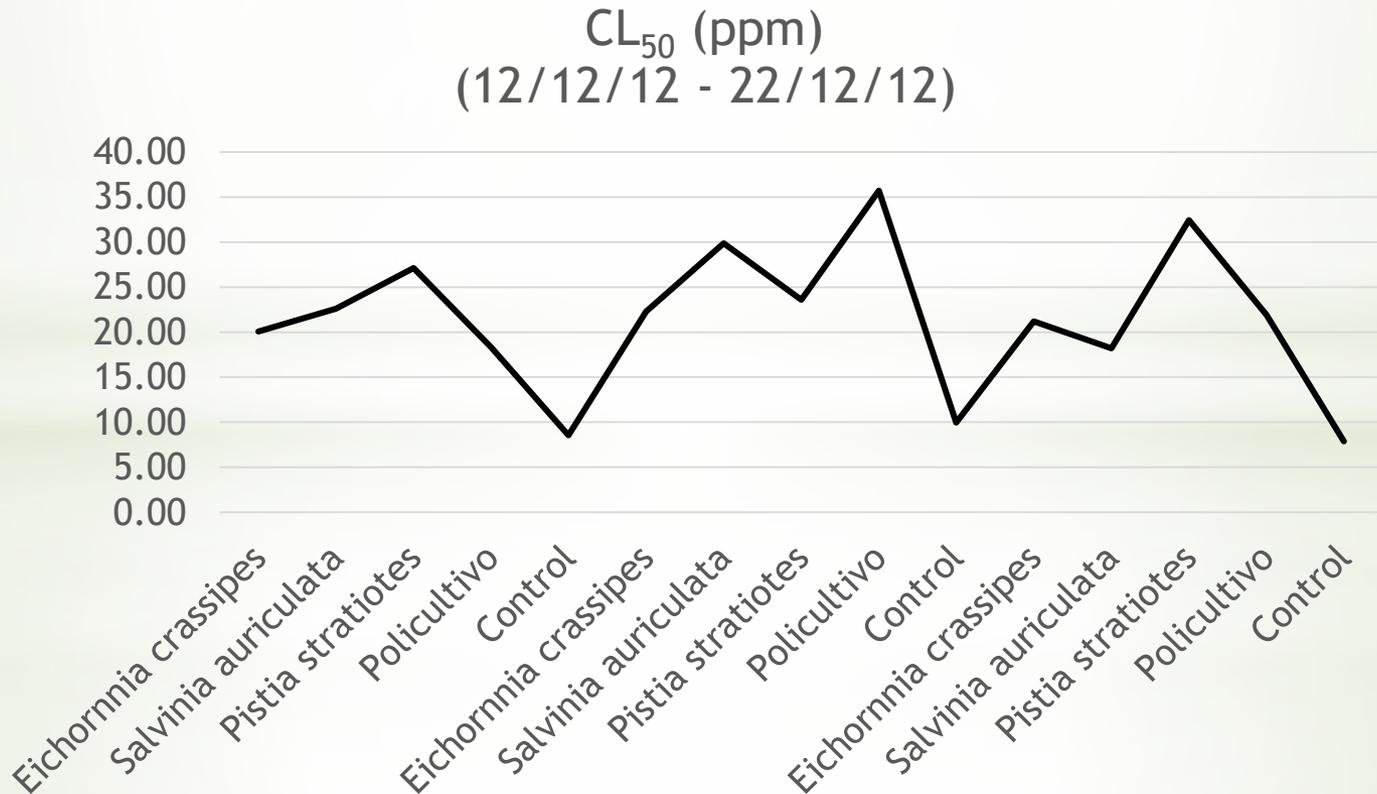
## % de remoción de $\text{CN}^-$ tercer grupo de macrófitas

Acuarios	12/12/2012	22/12/2012	% Remoción	CL <sub>50-24</sub>
<i>Eichornnia crassipes</i>	1	110	30,8	20,06
<i>Salvinia auriculata</i>	2	95	65,6	22,61
<i>Pistia stratiotes</i>	3	98	52,9	27,12
Policultivo	4	93	55,8	18,30
Control	5	167	147,0	8,56
<i>Eichornnia crassipes</i>	6	93	34,4	22,30
<i>Salvinia auriculata</i>	7	100	48,0	29,85
<i>Pistia stratiotes</i>	8	128	81,9	23,60
Policultivo	9	91	56,4	35,72
Control	10	162	146,3	9,98
<i>Eichornnia crassipes</i>	11	101	48,5	21,21
<i>Salvinia auriculata</i>	12	91	63,7	18,21
<i>Pistia stratiotes</i>	13	96	50,9	32,42
Policultivo	14	93	46,5	21,89
Control	15	160	140,8	7,87

## % de remoción de $\text{CN}^-$ tercer grupo de macrófitas

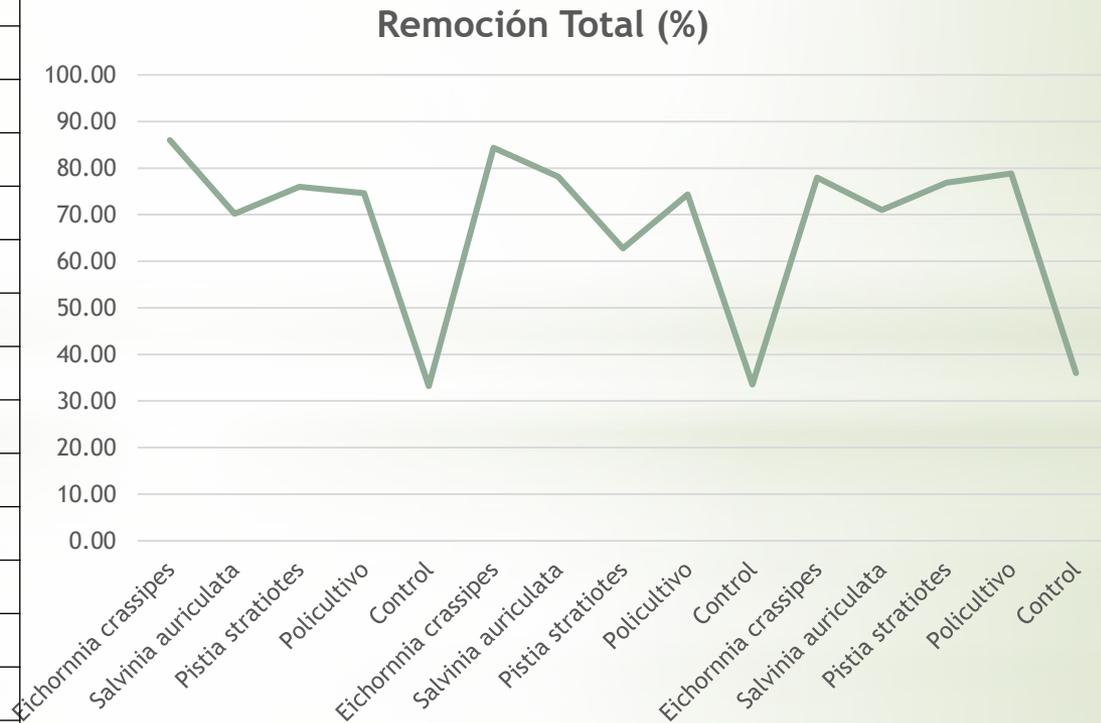


## Bioensayo con *Daphnia pulex*. tercer grupo de macrófitas



## Remoción total de cianuro por parte de las macrófitas

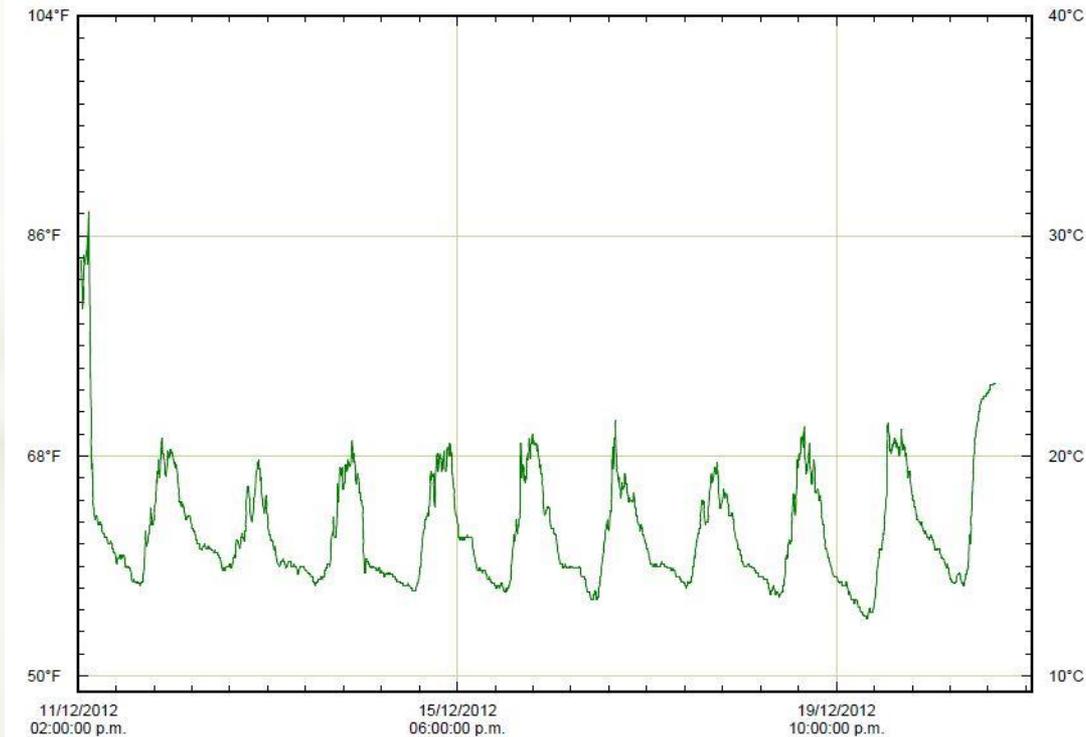
Acuarios	Remoción Total
<i>Eichornnia crassipes</i>	86,00
<i>Salvinia auriculata</i>	70,18
<i>Pistia stratiotes</i>	75,95
Policultivo	74,64
Control	33,18
<i>Eichornnia crassipes</i>	84,36
<i>Salvinia auriculata</i>	78,18
<i>Pistia stratiotes</i>	62,77
Policultivo	74,36
Control	33,50
<i>Eichornnia crassipes</i>	77,95
<i>Salvinia auriculata</i>	71,05
<i>Pistia stratiotes</i>	76,86
Policultivo	78,86
Control	36,00



<b>CL50 de los extractos de las plantas</b>			
<b>Planta</b>	<b>Blanco</b>	<b>22/11/2012</b>	<b>21/12/2012</b>
<b><i>Eichhornia</i></b>	6963,363	229,28	617,46
		207,96	
		1658,08	
<b><i>Salvinia</i></b>	82095,7688	3193,94	342,94
		220,76	
		350,40	
<b><i>Pistia</i></b>	18577,7476	12381,46	641,68
		2380,79	
		2650,39	

## Respiración resistente al Cianuro

No se presentó en ninguna de las tres macrófitas, debido a que ni el agua ni el medio ambiente presentaron incrementos considerables ( $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), como se muestra en la gráfica reportada para temperatura ambiente durante el tercer periodo de tratamiento.



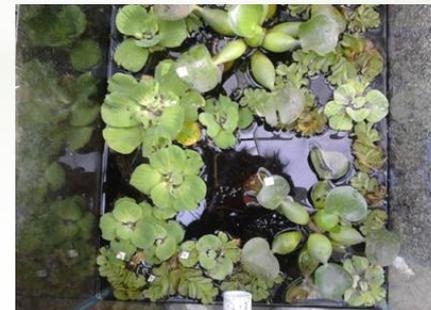
- Las macrófitas acuáticas después de haber sido expuestas a agua cianurada, presentaron una posible transformación del cianuro, por dos vías metabólicas como es la síntesis de glicósidos cianogénicos y la producción de alcaloides.
- Los alcaloides afines a fases polares (Cloroformo: Metanol) están presentes de forma natural solo en *Pistia stratiotes*, mientras que en las demás macrófitas acuáticas sometidas al tratamiento no se evidenciaron estos alcaloides polares.
- Se evidencian alcaloides de tipo no polar (Acetato de etilo: Hexano) en las macrófitas acuáticas sometidas al tratamiento con agua cianurada mas no en su estado natural.

- En síntesis los metabolitos secundarios de tipo alcaloidal presentan modificaciones respecto a los encontrados naturalmente, debido a su cambio de polaridad.
- Se descarta la vía metabólica de respiración resistente al cianuro, debido al no incremento de temperatura en el agua o en el entorno de alrededor de 14° C.
- En el primer período del tratamiento donde el agua presenta mayor concentración de cianuro, metales pesados y toxicidad, el policultivo presentó mayor eficiencia en la remoción de contaminantes y disminución en la toxicidad.

- Se descarta la vía metabólica de respiración resistente al cianuro, debido al no incremento de temperatura en el agua o en el entorno de alrededor de 14° C.
- En el primer período del tratamiento donde el agua presenta mayor concentración de cianuro, metales pesados y toxicidad, el policultivo presentó mayor eficiencia en la remoción de contaminantes y disminución en la toxicidad.
- En el segundo período del tratamiento *S. auriculata* presentó el mayor porcentaje de remoción y el agua residual tratada con *P. stratiotes* la menor toxicidad.

- En el tercer período de tratamiento la *E. crassipes* presentó mayor eficiencia en la remoción de compuestos tóxicos y el policultivo la menor toxicidad.
- Con base en los resultados se evidencia que las macrófitas acuáticas cumplen el papel de fitorremediadoras para el agua residual originada en el lavado de arenas producto de la cianuración.
- Se evidenció un aumento en la toxicidad de las macrófitas acuáticas al final del tratamiento con agua residual cianurada, implicando esto la necesidad de realizar seguimiento a las macrófitas para su disposición final.

- Los ensayos de toxicidad *in vivo* realizados con *Daphnia pulex*, demostraron que las macrófitas acuáticas presentaron una detoxificación del agua cianurada después de 30 días de tratamiento, ya que algunos organismos sobrevivieron hasta las 96 horas que se terminó el bioensayo tipo crónico.
- Las macrófitas acuáticas después de haber sido expuestas a agua cianurada, presentaron una posible transformación del cianuro, por dos vías metabólicas como es la síntesis de glicósidos cianogénicos y la producción de alcaloides



# *¡GRACIAS!*

