



Remoción de aluminio en aguas residuales industriales usando especies macrófitas:
una aplicación para el pasto vetiver

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniera Ambiental, articulado a semillero de
investigación de
“Tecnologías avanzadas de saneamiento ambiental”

Estudiante:

Erika Juliana Aldana Arcila

Tutor:

Wilmar Osorio Viana

Ingeniero Químico

Docente facultad de ingeniería y arquitectura

Universidad Católica de Manizales
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Ingeniería Ambiental
Manizales

2014

Tabla de contenido

Resumen	3
Abstract	4
1. Capítulo 1: Enfoque de la investigación	5
2. Capítulo 2: Antecedentes	9
3. Capítulo 3: Materiales y métodos	18
3.1. Procedimiento y Montaje.....	18
3.2. Análisis químicos y técnicas instrumentales	21
3.3. Diseño experimental	21
4. Capítulo 4: Resultados y conclusiones	23
Referencias Bibliográficas	30

Resumen

Entre las actuales metodologías de remediación de aguas contaminadas, el empleo de especies macrófitas se ha convertido en una opción viable, en especial por su bajo costo y eficiencia. Éste estudio está enfocado en verificar cuantitativamente la capacidad de adsorción de metal pesado aluminio, contenidos en una muestra de agua residual industrial, usando plantas (fitorremediación). Este estudio se enfoca en evaluar el potencial de adsorción que tienen algunas especies de macrófitas (Enea, junco y Pasto Vetiver), para la remoción de Aluminio en aguas residuales industriales provenientes de una industria metalmeccánica. Se planteó un diseño experimental por bloques utilizando como variable de respuesta la concentración de Aluminio y como factores, el tipo de planta y la concentración inicial del metal, para realizar las comparaciones múltiples entre las diferentes especies e identificar cual presenta una mejor remoción del compuesto de interés. Los resultados obtenidos muestran que la concentración de Aluminio de 20% para las especies Vetiver y Junco mostraron las mejores eficiencias de remoción (99 % y 98 %). La máxima adsorción del metal durante el proceso de fitoremediación para todas las especies ocurrió en las primeras 24 horas, lo cual concuerda con los resultados descritos por algunos autores (Paris et al, 2005). Basado en el análisis estadístico se concluyó que el pH inicial del agua es un factor relevante en el desempeño del proceso. Al trabajar con concentraciones de Aluminio al 70%, la especie Vetiver presentó mejor desempeño, alcanzando remociones del 94%. Finalmente se presentan algunas recomendaciones donde se destaca que, aunque los procesos de fitorremediación no son soluciones definitivas y completas, son una alternativa económica que puede ser usada de forma sinérgica con otras tecnologías que se emplean para la disminución de los impactos ambientales negativos y el cumplimiento de la legislación Colombiana respecto a los objetivos de calidad del recurso hídrico.

Abstract

Among current methodologies remediation from contaminated water, the use of macrophyte species has become a viable option, not least because of its low cost and efficiency, therefore, this study focuses on quantitatively verify adsorption capacity of heavy metals , mainly aluminum, contained in a sample of industrial wastewater using plants (phytoremediation). This study focused on evaluating the potential of adsorption with some species of macrophytes (Enea, rush and Vetiver), for the removal of aluminum in industrial wastewater, an experimental design was raised by using blocks as a response variable concentration and like factors the plant type and initial concentration of the metal, for multiple comparisons between different species and to identify the removal of the compound of interest. Within the experimental results found, based on statistical tools, it was found that the concentration of Al of 20% for Vetiver and rush species showed the best removal efficiencies (99% and 98%). The maximum adsorption of metal during the phytoremediation process occurred for all species in 24 hours, which is consistent with the results described by some authors (Paris et al, 2005). Based on the statistical analysis we conclude that the initial pH of the water is an important factor in the performance of the process. Working with concentrations of 70% aluminum species showed better performance Vetiver removals reaching 94%, finally some recommendations which stresses that although phytoremediation processes are not definitive and complete solutions, whether they are an economical alternative to complement were performed the synergy of different technologies which seek the reduction of negative environmental impacts and compliance with Colombian law regarding the quality objectives of the water resource.

1. Capítulo 1: Enfoque de la investigación

La preocupación por la protección del ambiente es un fenómeno común en las culturas del mundo, que a partir de la década del 70 se manifestó en diversos foros internacionales. Uno de los más importantes fue la denominada Cumbre de la Tierra, celebrada en Río de Janeiro en 1992, donde quedaron establecidos los principios universales que deben regir el desarrollo armónico de los países para mantener la sostenibilidad del planeta[1]. Se proclamaron en dicha cumbre 27 principios, procurando alcanzar acuerdos internacionales en los que se respeten los intereses de todos y se proteja la integridad del sistema ambiental y de desarrollo mundial. [2].

El interés de la ciudadanía frente a ésta problemática global se ve reflejado en la formulación de políticas ambientales, que constituyen verdaderos estatutos de protección del medio ambiente, y en la búsqueda y aplicación de nuevas tecnologías de producción más limpia.

Existen diferentes tecnologías convencionales para el tratamiento de aguas residuales, entre las que se destacan: evaporación, intercambio iónico, recuperación electrolítica, precipitación química acompañada de sedimentación, filtración y flotación con aire disuelto, así como métodos basados en membranas [3]. Algunos de los procesos más usados son, la flotación de aire disuelto, que clarifica aguas residuales u otras aguas, mediante la remoción de materia suspendida, como aceites o sólidos, disolviendo aire bajo presión. La osmosis y nanofiltración, son tecnologías de membrana. La coagulación – floculación es un método que consiste en la adición de sustancias químicas al agua, la distribución uniforme en ella y la formación de un floc fácilmente sedimentable[4]. Aunque éstos son métodos disponibles para el tratamiento adecuado de aguas residuales, puede resultar costosa su implementación, por el material utilizado, mantenimiento, etc., además de generar grandes cantidades de lodos.

Los progresos en biotecnología industrial y en procesos bioquímicos han conducido a nuevos mecanismos y metodologías que permiten que los procesos tradicionales sean más eficientes, se reduzcan costos de producción, se utilicen reactivos menos peligrosos o que incluso se cambien procesos químicos por bioquímicos, con el fin de hacer uso sostenible

de los recursos naturales, darle importancia a temas claves como salud, seguridad en aspectos ambientales, etc. [5].

Dentro de éstos nuevos procesos está la fitorremediación, en la cual se aprovecha la capacidad de ciertas plantas para adsorber, acumular, metabolizar, volatilizar o estabilizar contaminantes presentes en el suelo, aire, agua o sedimentos, tales como como: metales pesados, metales radioactivos, compuestos orgánicos y compuestos derivados del petróleo. Estas fitotecnologías ofrecen numerosas ventajas en relación con los métodos fisicoquímicos que se usan en la actualidad, por ejemplo, su amplia aplicabilidad y bajo costo [6].

En los últimos años diversos países han implementado procesos de biotecnología, entre ellos la fitorremediación, demostrando su utilidad en la recuperación de suelos y cuerpos de agua contaminados. En la literatura se encuentran artículos científicos sobre las diferentes plantas, microorganismos y las diferentes estrategias de fitorremediación existentes para remoción de metales y otros contaminantes. México ha desarrollado investigaciones significativas en fitorremediación de hidrocarburos [7]. En la India se realizó una investigación para la eliminación de metales pesados presentes en aguas residuales, mediante la fitorremediación [8]. Estos y muchos otros casos son un ejemplo de la aplicabilidad y viabilidad de éste tipo de tecnología verde.

En Colombia el sector metalmecánico es uno de los sectores industriales de mayor dinamismo en la historia. La cadena metalmecánica se compone de tres eslabones: Proveedores de Insumo que incluye la extracción, transformación y comercialización de materias primas e insumos; Transformación asociado directamente a la industria metalmecánica e incluye la transformación de los bienes intermedios obtenidos como materias primas en bienes de consumo final, con una subdivisión según el uso al cual se destina el producto (automotor, industrial o doméstico) y; comercialización, eslabón final en el encadenamiento productivo que pretende acceder a clientes como hogares, comercio, agricultura, construcción y otras industrias[9], siendo una de las bases del actual desarrollo industrial colombiano [10]. Sin embargo son una de las fuentes de mayor contaminación para los cuerpos de agua y aire. Los problemas ambientales que generan éstas industrias

necesitan una solución, por lo que la fitorremediación se convierte en una alternativa que puede ayudar a minimizar los impactos.

Establecimientos	Micros		Pymes		Grandes		Total
	NO.	%	NO.	%	NO.	%	NO.
Industria nacional	138	1,8	3.866	51,4	3.520	46,8	7.524
Industria metalmecánica	17	4,4	303	79,1	63	16,4	383
Participación industrial del sector	12.30%		7,80%		1,80%		

Tabla1. Establecimientos industriales y de metalmecánica

Fuente. Gerardo A. Buchelli Lozano, Jhon Jairo Marín Restrepo. *Estimación de la Eficiencia del sector Metalmecánico en Colombia*. Octubre 2011. DANE 2007.

Entre los residuos de una industria metalmecánica se encuentran principalmente el aluminio, el zinc, cadmio y plomo, los cuales son producidos en cantidades apreciables durante los procesos productivos. Estos metales se caracterizan por poseer efectos bioacumulativos causando impactos negativos sobre la salud y el ambiente, han sido responsabilizados de ocasionar daños en el sistema nervioso central y periférico, renal, esquelético y en algunos casos producen efectos carcinogénicos [11].

La contaminación ambiental con metales pesados, es un serio problema tanto para la salud humana como para el ecosistema, por lo que la necesidad de disminuir el impacto ambiental de los subproductos industriales debe ocupar un lugar creciente en la agenda pública. La fitorremediación es una de las tecnologías emergentes que podrá solucionar dicho problema, y de ésta forma contribuir con las buenas prácticas ambientales mediante la implementación de tecnologías más limpias.

Existen diversas alternativas tecnológicas para el tratamiento de suelos y aguas contaminadas, pero su alto costo hace que muchas de éstas resulten poco factibles desde el punto de vista económico. Recientemente, se ha generado un gran interés en utilizar

especies vegetales, capaces de crecer en medios altamente contaminados bajo técnicas de biorremediación, Muchas de estas especies acumulan las sustancias contaminantes en su parte aérea y esto permite utilizarlas como extractores de bajo costo de una variada categoría de sustancias tóxicas[12].

En muchos casos, la fitorremediación se utiliza como paso final para la descontaminación de algún sitio que fue previamente tratado mediante el uso de otras tecnologías, son técnicas con las que se puede trabajar conjuntamente. Aunque son muchas las ventajas de la implementación de un proceso de fitorremediación, deben considerarse también las limitaciones de este enfoque, como el efecto potencial sobre la cadena alimentaria, el punto de saturación de la planta, la tolerancia de las plantas para extraer los metales, la adaptación de las plantas a un medio si no son endémicas [13]. Son métodos en los que se debe establecer de un manejo adecuado para su buena funcionalidad.

La fitorremediación se prevee como una técnica alternativa y complementaria de los procesos convencionales, lo cual mejorará la calidad del agua, reduciendo la concentración de metales disueltos, así como la viabilidad económica de su implementación.

Objetivos

Objetivo general

Evaluar el potencial de adsorción que tienen algunas especies de macrófitas como la Enea, el Junco y el pasto Vetiver para la remoción de Aluminio en aguas residuales provenientes de una Industria metalmecánica.

Objetivo específico

Realizar comparaciones entre las diferentes especies, basados en metodologías estadísticas con un diseño experimental por bloques utilizando como variable de respuesta la concentración de Aluminio y como factores, el tipo de planta y la concentración inicial del metal, con el fin de identificar los factores relevantes de proceso, así como el porcentaje de remoción específico de la sustancia contaminante.

A continuación se presentan algunas generalidades, procedimiento experimental y análisis estadístico.

2. Capítulo 2: Antecedentes

Metales pesados

Los metales pesados son un grupo de elementos de alta prioridad, ya que pueden bioacumular a través de las cadenas tróficas en ecosistemas acuáticos y terrestres, por su alta toxicidad generan efectos negativos sobre la mayoría de los organismos.

Los metales pesados tienen una densidad superior a $4,5 \text{ g/cm}^3$ y aunque algunos son esenciales en el metabolismo de los seres vivos, como el cobalto, cobre, hierro, magnesio, vanadio, estroncio y zinc, en concentraciones muy elevadas estos son demasiado tóxicos ocasionando daños irreversibles. Algunos otros como el cadmio y el mercurio son muy tóxicos incluso a concentraciones muy bajas. Los metales pesados además tienden a persistir en el ambiente dada su resistencia a la degradación química y biológica [14].

Tabla2. Límites máximos permisibles para metales pesados y cianuros.

PARÁMETROS (¹)	RÍOS						EMBALSES NATURALES Y ARTIFICIALES				AGUAS COSTERAS				SUELO					
	Uso en riego agrícola (A)		Uso público urbano (B)		Protección de vida acuática (C)		Uso en riego agrícola (B)		Uso público urbano (C)		Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)		Recreación (B)		ESTUARIOS (B)		Uso en riego agrícola (A)		HUMEDALES NATURALES (B)	
	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.
Arsénico	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2
Cadmio	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.05	0.1	0.1	0.2
Cianuros	1.0	3.0	1.0	2.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0
Cobre	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4	6.0	4	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4	6.0	4.0	6.0
Cromo	1	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	1	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	1	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0
Mercurio	0.01	0.02	0.005	0.01	0.005	0.01	0.01	0.02	0.005	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.005	0.01	0.005	0.01
Níquel	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4
Plomo	0.5	1	0.2	0.4	0.2	0.4	0.5	1	0.2	0.4	0.2	0.4	0.5	1	0.2	0.4	5	10	0.2	0.4
Zinc	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20

Fuente: Vidal Álvarez, M. *Evaluación de los mecanismos de adsorción y acumulación intracelular de plomo (Pb^{2+}), en sistemas continuos de fitorremediación con *Salvinia Minima*. Instituto de Ecología A.C. Xalapa, Veracruz, Mexico 2009.*

Tabla 3. Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce.

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Aceites y Grasas.	Sustancias solubles en hexano	mg/l	0,3
Alkil mercurio		mg/l	NO DETECTABLE
Aldehídos		mg/l	2,0
Aluminio	Al	mg/l	5,0
Arsénico total	As	mg/l	0,1
Bario	Ba	mg/l	2,0
Boro total	B	mg/l	2,0
Cadmio	Cd	mg/l	0,02
Cianuro total	CN ⁻	mg/l	0,1
Cloro Activo	Cl	mg/l	0,5
Cloroformo	Extracto carbón cloroformo ECC	mg/l	0,1
Cloruros	Cl ⁻	mg/l	1 000
Cobre	Cu	mg/l	1,0
Cobalto	Co	mg/l	0,5
Coliformes Fecales	Nmp/100 ml		¹ Remoción > al 99,9 %
Color real	Color real	unidades de color	* Inapreciable en dilución: 1/20
Compuestos fenólicos	Fenol	mg/l	0,2
Cromo hexavalente	Cr ⁺⁶	mg/l	0,5
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	D.B.O ₅ .	mg/l	100
Demanda Química de Oxígeno	D.Q.O.	mg/l	250
Dicloroetileno	Dicloroetileno	mg/l	1,0
Estaño	Sn	mg/l	5,0

¹Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: recurso agua. Libro VI anexo 1. Presidencia de la Republica de Ecuador.

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Fluoruros ²	F	mg/l	5,0
Fósforo Total	P	mg/l	10
Hierro total	Fe	mg/l	10,0
Hidrocarburos Totales de Petróleo	TPH	mg/l	20,0
Manganeso total	Mn	mg/l	2,0
Materia flotante	Visibles		Ausencia
Mercurio total	Hg	mg/l	0,005
Níquel	Ni	mg/l	2,0
Nitratos + Nitritos	Expresado como Nitrógeno (N)	mg/l	10,0

Fuente. Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: recurso agua. Libro VI anexo 1.

Toxicidad de metales pesados en plantas

La toxicidad puede resultar de la unión de metales a grupos sulfhídricos en proteínas, conduciendo una inhibición de actividades o defectos en la formación de la estructura de las células o desplazando un elemento esencial dando como resultado deficiencias en el metabolismo de las planta. Además el exceso de metales pesados puede estimular la formación de especies reactivas de oxígeno, resultando en estrés oxidativo. Las plantas tienen diversos mecanismos potenciales a nivel celular que pueden estar involucrados en la detoxificación y de ésta manera en la tolerancia a metales pesados.³

Toxicidad del Aluminio

El **aluminio** es un elemento que aunque en la tabla periódica su peso específico no es superior a 5 g/cm³ o que no tienen un número atómico por encima de 20 (no tiene la densidad para ser llamado “pesado”), por su toxicidad, es incluido como metal pesado en algunas listas de dichos tóxicos.

³ Vidal Álvarez, M. *Evaluación de los mecanismos de adsorción y acumulación intracelular de plomo (Pb²⁺), en sistemas continuos de fitorremediación con Salvinia Minima*. Instituto de Ecología A.C. Xalapa, Veracruz, Mexico 2009.

Fitorremediación

En las últimas décadas del siglo XX surgieron tecnologías basadas en el empleo de organismos vivos para descontaminar suelos o emplazamientos contaminados y recuperar los ecosistemas afectados. Cuando estas tecnologías se basan en el uso de plantas, globalmente reciben el nombre de fitorremediación (en español se usan indistintamente también: fitorrecuperación, fitocorrección, fitorrestauración o fitorrehabilitación). Se define como el uso de plantas verdes para eliminar los contaminantes del entorno o para reducir su peligrosidad [15].

La fitorremediación se basa en el uso de plantas para eliminar, retener, o disminuir la toxicidad de los contaminantes del agua [16]. Este grupo de fitotecnologías reúne un gran número de ventajas, especialmente la limpieza y la economía; no utilizan reactivos químicos peligrosos, el proceso se realiza 'in situ' evitando costosos transportes [17].

Estas fitotecnologías se pueden aplicar tanto a contaminantes orgánicos como inorgánicos, presentes en sustratos sólidos y líquidos. Se distinguen:

- Fitoextracción o fitoacumulación:** En ésta estrategia se explota la capacidad de algunas plantas para acumular contaminantes en sus raíces, tallos o follaje, las cuales pueden ser fácilmente cosechadas. Los contaminantes extraídos son principalmente metales pesados, contaminantes orgánicos y elementos isótopos radiactivos.

- Fitoestabilización:** Éste tipo de estrategias utiliza plantas que desarrollan un denso sistema de raíz, para reducir la biodisponibilidad de metales y otros contaminantes en el ambiente por medio de mecanismos de secuestro, lignificación o humidificación. Las plantas ejercen un control hidráulico en el área contaminada, es decir actúan como una bomba solar que succiona humedad de los suelos debido a sus altas tasas de evapotranspiración. Puesto que éste proceso mantiene también una humedad constante en la zona de la rizósfera, se presentan las condiciones adecuadas para la inmovilización de los metales. Esto ocurre a través de reacciones químicas como la precipitación o formación de complejos insolubles o por mecanismos físicos, como la adsorción. En esta zona, los metales se fijan fuertemente en las raíces de las plantas o en la materia orgánica de los

suelos, limitando así su biodisponibilidad y su migración vertical hacia los mantos freáticos.

•**Fitoimmobilización:** uso de las raíces de las plantas para la fijación o inmovilización de los contaminantes en el suelo. Junto con la anterior son técnicas de contención.

•**Fitovolatilización:** algunas plantas son capaces de volatilizar ciertos contaminantes, como mercurio y selenio, contenidos en suelos, sedimentos o agua. Tales contaminantes son absorbidos, metabolizados, transportados desde su raíz a sus partes superiores y liberados a la atmósfera en formas volátiles, menos tóxicas o relativamente menos peligrosas en comparación con sus formas oxidadas. La transformación de dichos elementos se efectúa básicamente en la raíz, y su liberación se lleva a cabo durante la transpiración.

•**Fitodegradación:** uso de plantas y microorganismos asociados para degradar contaminantes orgánicos.

•**Rizofiltración:** se basa exclusivamente en hacer crecer, en cultivos hidropónicos, raíces de plantas terrestres con alta tasa de crecimiento y área superficial para absorber, concentrar y precipitar metales pesados de aguas residuales contaminadas.

Como puede apreciarse, las estrategias de fitorremediación hacen referencia a los mecanismos predominantes realizados por las propias plantas, pero también, en algunos casos, indican el papel que tienen las comunidades microbianas durante el proceso de remediación. Así, se hace evidente que la fitorremediación es un proceso complejo que involucra la participación de la comunidad microbiana asociada a su sistema de raíz. Cada una de las estrategias tiene condiciones particulares, determinadas principalmente por el tipo de contaminante y el sustrato a tratar: suelos, sedimentos o agua. En forma general, las plantas tienen cualidades absorbentes y adsorbentes, de crecimiento y resistencia para descontaminar aguas, teniendo en cuenta el tipo de fitotecnología que se quiera utilizar y el tipo de contaminante que se va a tratar. Las medidas correctivas para contaminantes orgánicos incluyen la fitodegradación (o fitotransformación) y la fitoestimulación, mientras que para los metales pesados, incluidos los metaloides, radionúclidos y ciertos tipos de

contaminantes orgánicos, se aplican la fitovolatilización, la fitoestabilización, la fitoextracción y la rizofiltración. [18].

Fitorremediación acuática

Éste tipo de tratamiento consiste en que los compuestos presentes en el agua son adsorbidos e incorporados dentro de la estructura de las plantas, logrando eliminar la contaminación del agua y favoreciendo la restauración de la calidad de la misma.

Macrófitas acuáticas

Anteriormente las macrófitas acuáticas se consideraban como una plaga, ya que tienen un rápido crecimiento generando invasión de lagunas, lo que podría ocasionar problemas al ecosistema acuático por la falta de luz. Sin embargo se pueden convertir en una herramienta útil para el tratamiento de aguas residuales por su capacidad de absorción de nutrientes y bioacumulación de otros compuestos del agua.

Las macrófitas acuáticas se utilizan con frecuencia para vigilar la contaminación de agua dulce por metales pesados y plaguicidas en las zonas tropicales y subtropicales, debido a su abundancia y la biomasa producida.

Las macrófitas acuáticas usadas para el tratamiento de aguas residuales deben contar con las siguientes características: alta productividad, alta eficiencia de remoción de nutrientes y contaminantes, alta predominancia bajo condiciones naturales adversas, adaptabilidad al clima de la región, capacidad de transporte de oxígeno de la superficie a la rizosfera y fácil cosecha. [14]. Así mismo las macrófitas flotantes han sido utilizadas en la fitorremediación gracias a sus características de acumular o hiper-acumular metales y metaloides.

Mecanismos de respuesta de las plantas a la presencia de metales pesados

Las plantas tienen diferentes mecanismos de respuesta ante la presencia de compuestos tóxicos como los metales pesados. Entre éstos están los procesos de detoxificación que usualmente son la adsorción y bioacumulación. Se han encontrado algunas especies con la capacidad de acumular altas concentraciones de metales pesados en su biomasa las cuales son llamadas hiperacumuladoras, que combina los aspectos de adsorción, transporte y translocación de metales. [14].

Marco Legal

Ley 99/1993: Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones. (MMA).

Decreto 3930 de 2010: Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones.

- **Disposiciones Generales del decreto 3930 de 2010**

Artículo 1º. Objeto. Establece las disposiciones relacionadas con los usos del recurso hídrico, el Ordenamiento del Recurso Hídrico y los vertimientos al recurso hídrico, al suelo y a los alcantarillados.

Artículo 2º. Ámbito de aplicación. Aplica a las autoridades ambientales competentes definidas en el artículo 3º del decreto 3930 de 2010, a los generadores de vertimientos y a los prestadores del servicio público domiciliario de alcantarillado.

Decreto 3100 de 2003, por medio del cual se reglamentan las tasas retributivas por la utilización directa del agua como receptor de los vertimientos puntuales y se toman otras determinaciones.

Artículo 1o. OBJETO. Tiene por objeto reglamentar las tasas retributivas por la utilización directa del agua como receptor de vertimientos.

Artículo 2o. CONTENIDO. Contempla lo relacionado con el establecimiento de la tarifa mínima y su ajuste regional; define los sujetos pasivos de la tasa, los mecanismos de recaudo, fiscalización y control, y el procedimiento de reclamación.

Resolución 1433 de 2004: por la cual se reglamenta el artículo _del Decreto 3100 de 2003, sobre Planes de Saneamiento y Manejo de Vertimientos, PSMV, y se adoptan otras determinaciones.

Artículo 1°. *Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos, PSMV.* Es el conjunto de programas, proyectos y actividades, con sus respectivos cronogramas e inversiones necesarias para avanzar en el saneamiento y tratamiento de los vertimientos, incluyendo la recolección, transporte, tratamiento y disposición final de las aguas residuales descargadas al sistema público de alcantarillado, tanto sanitario como pluvial, los cuales deberán estar articulados con los objetivos y las metas de calidad y uso que defina la autoridad ambiental competente para la corriente, tramo o cuerpo de agua. El PSMV será aprobado por la autoridad ambiental competente.

El Plan deberá formularse teniendo en cuenta la información disponible sobre calidad y uso de las corrientes, tramos o cuerpos de agua receptores. los criterios de priorización de proyectos definidos en el Reglamento Técnico del sector RAS 2000 o la norma que lo modifique o sustituya y lo dispuesto en el Plan de Ordenamiento y Territorial, POT. Plan Básico de Ordenamiento Territorial o Esquema de Ordenamiento Territorial. El Plan será ejecutado por las personas prestadoras del servicio de alcantarillado y sus actividades complementarias.

Decreto 1541 de 1978: Modificado por el Decreto Nacional 2858 de 1981, por el cual se reglamenta la Parte III del Libro II del Decreto-Ley 2811 de 1974: "De las aguas no marítimas" y parcialmente la Ley 23 de 1973.

Vertimiento por uso industrial.

Artículo 226°. Los concesionarios de aguas para uso industrial tienen la obligación de reciclarlas, esto es recuperarlas para nuevo uso, siempre que ello sea técnica y económicamente factible.

Artículo 227°. Si como consecuencia del uso industrial las aguas adquieren temperatura diferente a la de la corriente o depósito receptor, los concesionarios tienen la obligación de tratarlas para que recuperen su temperatura natural antes de verterlas al cauce de origen, a las redes de alcantarillado o a los acueductos de desagüe.

Artículo 228°. Los desagües y efluentes provenientes de las plantas industriales deberán evacuarse mediante redes especiales construidas para este fin, en forma que facilite el tratamiento del agua residual, de acuerdo con las características y la clasificación de la fuente receptora.

Artículo 229°. Las industrias que no puedan garantizar la calidad de las aguas dentro de límites permisibles que se establezcan, sólo podrán instalarse en los lugares que indique el Instituto Nacional de los Recursos Naturales Renovables y del Ambiente, Inderena, en coordinación con la Oficina de Planeación Municipal y el Ministerio de Salud.

Para autorizar su ubicación en zonas industriales se tendrán en cuenta el volumen y composición de los efluentes y la calidad de la fuente receptora, conforme al artículo 141 del Decreto-ley número 2811 de 1974.

Artículo 230°. Las industrias sólo podrán ser autorizadas a descargar sus efluentes en el sistema de alcantarillado público, si cumplen con las exigencias que establezcan el Ministerio de Salud, el Instituto Nacional de Fomento Municipal, el Instituto Nacional de Salud o las Empresas Públicas Municipales.

3. Capítulo 3: Materiales y métodos

La investigación es de tipo cuantitativa ya que permite examinar los datos de una forma numérica y bajo el método científico, en el cual se establece una hipótesis: Las especies Enea, Junco y Vetiver, absorberán el metal pesado Aluminio de las aguas residuales de una industria metalmecánica con altas concentraciones de éste, provocando una disminución de su concentración. Dicha hipótesis será verificada por medio de la realización de pruebas empíricas y siguiendo unos objetivos antes establecidos; estas pruebas empíricas se harán empezando por una recopilación de datos y de materiales, que en nuestro caso fue de 18 recipientes para una muestra de agua residual proveniente de una industria metalmecánica con presencia de metales pesados, específicamente aluminio. Se distribuye el agua en los recipientes establecidos para cada planta de Enea, Junco y Vetiver que se encuentra en una concentración al 20% y 70 %.

3.1. Procedimiento y Montaje

Paso 1: Identificación de la problemática ambiental.

Paso 2: Se investigó bibliográficamente, de una gran variedad de plantas, las más idóneas por sus cualidades absorbentes y adsorbentes, de crecimiento y de resistencia, para descontaminar aguas residuales de una industria metalmecánica. Llegando a escoger la Enea, el Junco y el pasto Vetiver.

Paso 3. Una vez se tenían las plantas, se sometieron a un periodo de aclimatación durante un mes, con el fin de observar su comportamiento y capacidad de adaptación, ya que dos de las especies no son endémicas.



Figura 1. Periodo de aclimatación de las plantas.

Paso 3. Habiendo terminado el proceso de aclimatación, en el cual se observó un buen comportamiento de las tres especies, se enumeraron los recipientes y se ubicaron las plantas en los mismos, distribuidas de la siguiente manera:

Tabla 3. Montaje experimental

CONCENTRACIÓN ALUMINIO	NÚMERO DE RECIPIENTE PARA CADA PLANTA		
	ENEA	JUNCO	VETIVER
70%	4- 5- 7	1 -2 -9	3 – 6 -8
20%	15 – 16 - 17	10 – 11 -12	13 – 14 -18

Se tomaron dos concentraciones del 20% y 70% en volumen, por cada concentración se evaluaron tres réplicas de cada especie y cada recipiente contenía un total de 5 L de agua contaminada con metales pesados.



Figura 2. Montaje experimental

Paso 4. Se definen las variables a medir durante el ensayo, formulando un protocolo de muestreo de la siguiente forma:

Tabla 4. Protocolo de muestreo.

Aluminio	1 hr	DQO PH Temperatura turbiedad	1 hr
	2 hr		24hr
	4 hr		3 días
	8 hr		6 días
	24 hr		9 días
	48 hr		12 días
	7 días		
	15 días		

3.2. Análisis químicos y técnicas instrumentales

Para el análisis variables como Temperatura, pH, turbiedad y concentración de aluminio se toman técnicas analíticas, dentro de las cuales están los métodos normalizados para análisis de aguas potables y residuales:

-Para Aluminio se utilizó el método **3500-AL.D** (colorimetría). Para la elaboración de la curva patrón o método espectrofotométrico se prepararon soluciones usando agua destilada y concentraciones de 0.25 hasta 1 ml de la muestra problema. Posteriormente se le aplican los reactivos del kit de aluminio y se determina los valores de absorbancia y concentración. El blanco se preparó con la misma mezcla de los reactivos pero sin añadir muestra con aluminio. La técnica colorimétrica indica presencia o ausencia de metales pesados y nivel de concentración.

- Para Temperatura se utilizó el método 2550 A (termocupla)

- pH, se utiliza el método 4500-H.B (electrodo). Antes de la realización de la medida, el equipo debe ser calibrado. Para ello, se utiliza disoluciones tampón de pH 7.00, 9.00 y 4.0. Se tienen PH entre 2, 5 y 6.

- Turbiedad, se usa el método 2130-B (nefelometría)

3.3. Diseño experimental

- Se trabajó con un diseño experimental por ANOVAS de 2 factores y bloques, además de trabajar con residuales para así observar la normalidad y la homocedasticidad. Se realiza un analisis de contraste de los factores mediante pruebas LSD, Tukey, usando el software estadístico SPSS.
- Se calculó el porcentaje (%) de remoción por especie, comparando concentración inicial menos la concentración final y se mide la adsorción de la planta mediante una curva,

teniendo en cuenta la concentración (concentración inicial de aluminio/ concentración final de aluminio) y el tiempo.

- Para el diseño se tomaron tres tipos de plantas: Enea, Junco y Pasto Vetiver a dos concentraciones, 20% y 70%, con tres réplicas por cada especie, para tener un total de 18 muestras experimentales.

4. Capítulo 4: Resultados y conclusiones

A continuación se presentan los resultados obtenidos mediante los análisis estadísticos y datos procesados.

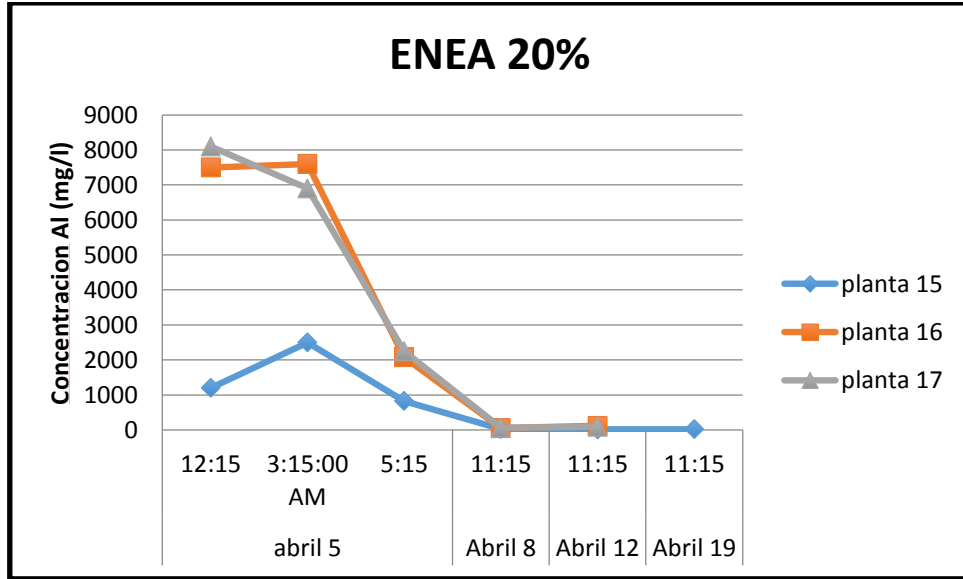


Grafico 1. Comportamiento de la Enea en la remoción de aluminio para una concentración al 20%.

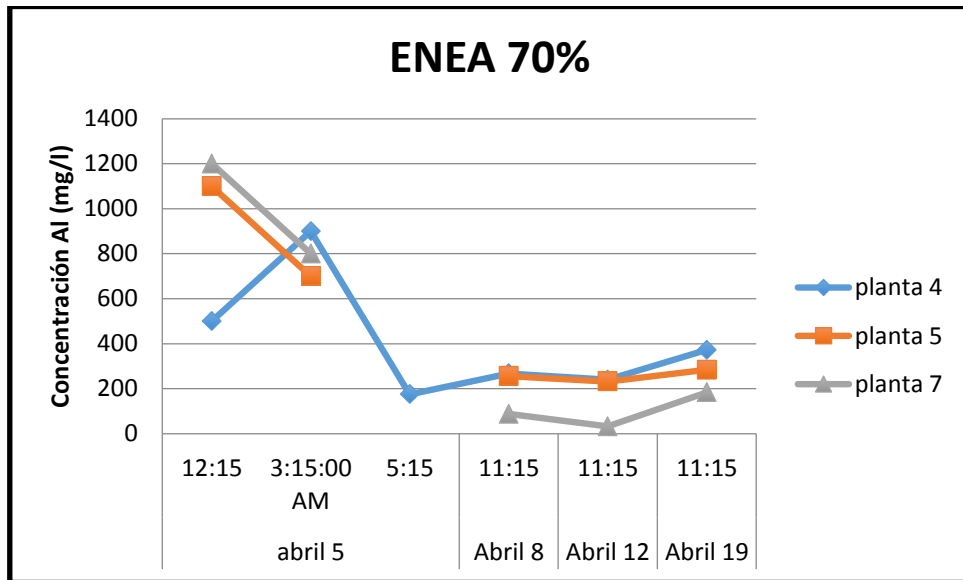


Grafico 2. Comportamiento de la Enea en la remoción de aluminio para una concentración al 70%.

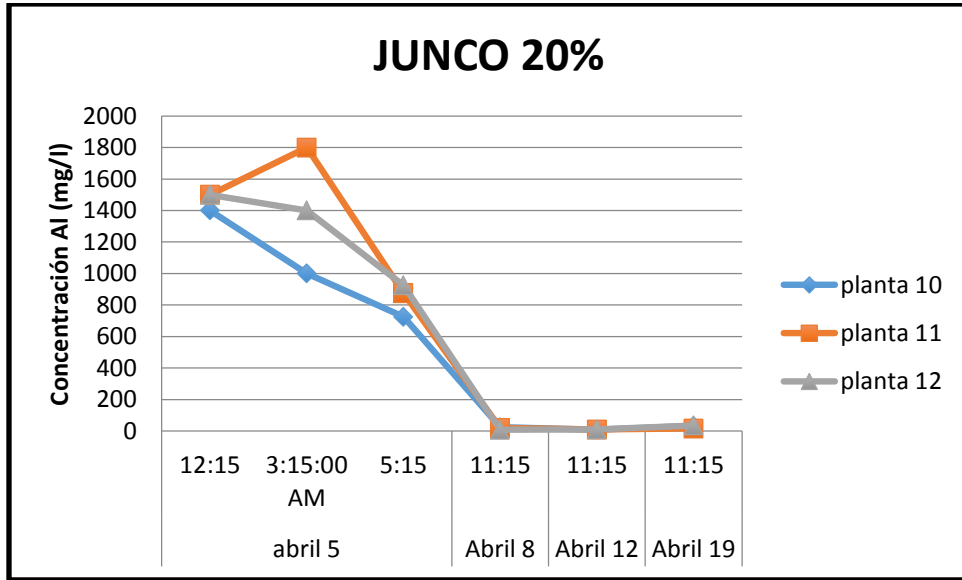


Grafico 3. Comportamiento del Junco en la remoción de aluminio para una concentración al 20%.

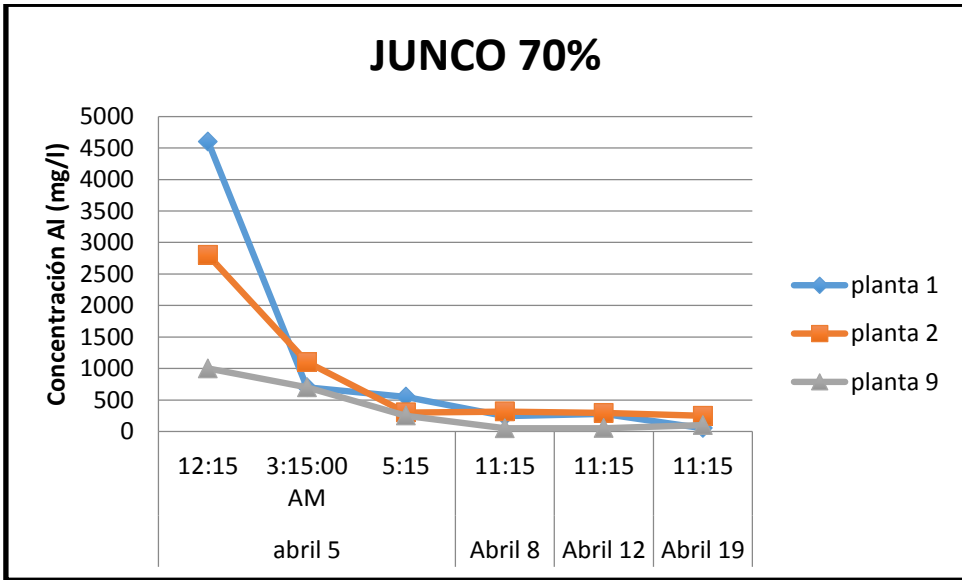


Grafico 4. Comportamiento del Junco en la remoción de aluminio para una concentración al 70%.

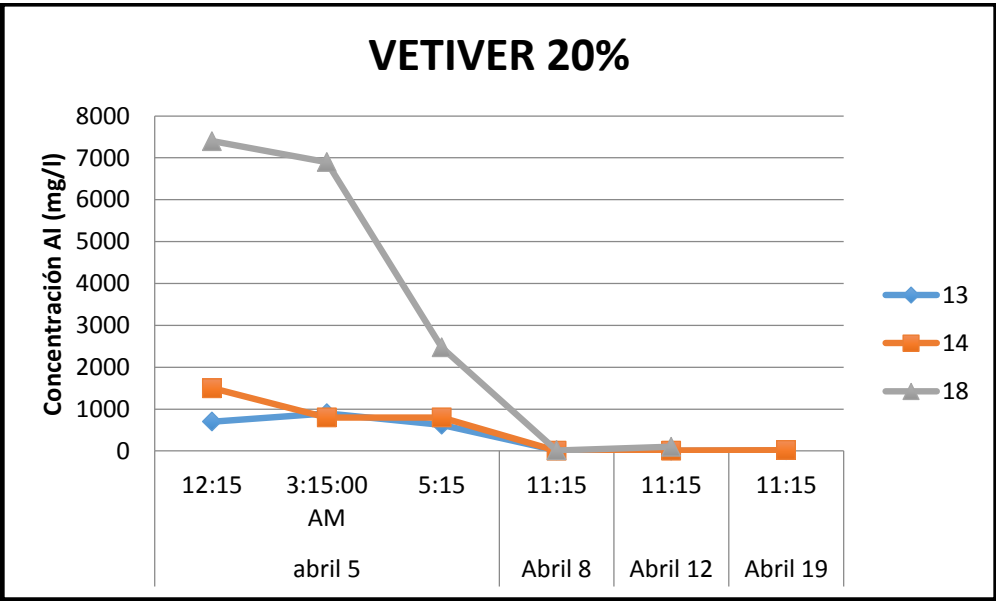


Grafico 5. Comportamiento del Vetiver en la remoción de aluminio para una concentración al 20%.

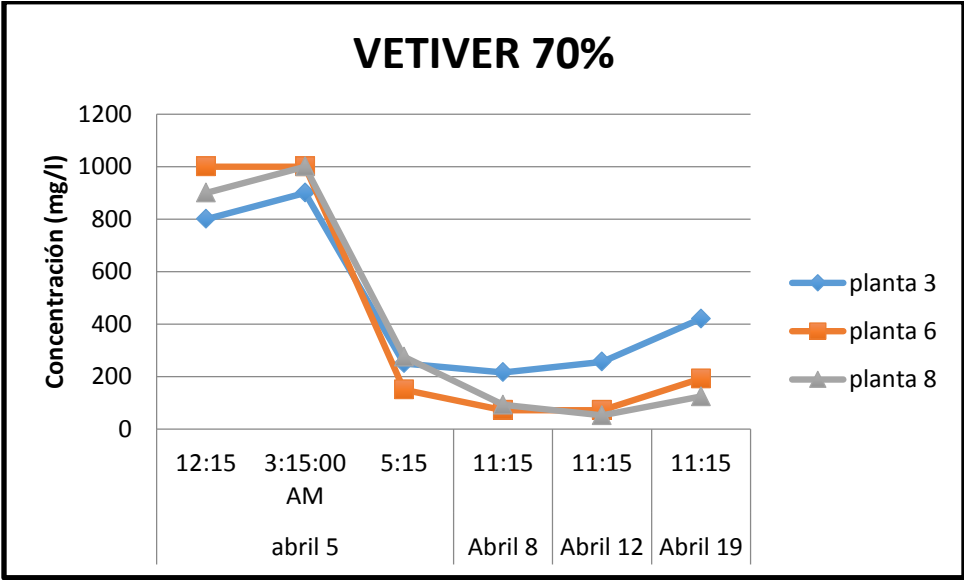


Grafico 6. Comportamiento del Vetiver en la remoción de aluminio para una concentración al 70%.

Tabla 5: % de remoción por planta y dilucion.

% REMOCION	
JUNCO	
70%	
1	93,9
2	89,6
9	94,8
20%	
10	99,4
11	99,3
12	99,3
Enea	
70%	
4	52,0
5	78,9
7	97,3
20%	
15	98,6
16	98,4
17	98,9
VETIVER	
70%	
3	68,0
6	92,8
8	94,2
20%	
13	99,0
14	99,4
18	98,6

En la tabla 1 se observa el porcentaje (%) de remoción de las plantas evaluadas durante el ensayo, donde se puede evidenciar que las especies que indican una mejor remoción del metal pesado aluminio, son el pasto Vetiver y el junco, con un porcentaje de 99% y 98%. Para el caso de la Enea se muestra un mejor comportamiento en la muestra diluida al 20%, sin embargo los resultados en porcentaje son más bajos comparando con las otras especies

en diluciones del 70%, con remociones del 52% y 78%. Esto se confirma por medio del diseño experimental.

Tabla 6. ANOVA de dos factores.

ANOVA	SC	GL	MC	Fo	F tablas	
trata A	14.71076028	2	7.35538014	0.393648257	4.10	
Trata B	213.0431781	1	213.0431781	11.40173236	4.96	RELEVANTE
Interacción	21.52562445	2	10.76281222	0.576008608	4.10	
Error	186.8515865	10	18.68515865			
Total	436.1311493	15				

Tratamiento A. Tipo de plantas

Tratamiento B. porcentaje de dilución

En el análisis de varianza, ANOVA de dos factores, se tomó como el tratamiento A las especies evaluadas: Junco, Enea y Vetiver; el tratamiento B indica el porcentaje de dilución con concentraciones al 70% y 20% evaluado con el porcentaje de remoción. Observando que el porcentaje de dilución es relevante, lo que indica que la remoción del aluminio en la experimentación se ve influenciado por la concentración del mismo en el agua.

Tabla 7: Evaluacion por spss de Tukey y LSD.

Comparaciones múltiples

Variable dependiente: Datos_Normal_Completo

	(I)Plantas Macrofitas	(J)Plantas Macrofitas	Diferencia de medias (I-J)	Error típ.	Sig.	Intervalo de confianza 95%	
						Límite inferior	Límite superior
DHS de Tukey	Junco	Enea	1,5967	2,61708	,818	-5,5775	8,7708
		Vetiver	-,7833	2,61708	,952	-7,9575	6,3908
	Enea	Junco	-1,5967	2,61708	,818	-8,7708	5,5775
		Vetiver	-2,3800	2,73345	,670	-9,8732	5,1132
	Vetiver	Junco	,7833	2,61708	,952	-6,3908	7,9575
		Enea	2,3800	2,73345	,670	-5,1132	9,8732
DMS	Junco	Enea	1,5967	2,61708	,555	-4,2345	7,4279
		Vetiver	-,7833	2,61708	,771	-6,6145	5,0479
	Enea	Junco	-1,5967	2,61708	,555	-7,4279	4,2345
		Vetiver	-2,3800	2,73345	,404	-8,4705	3,7105
	Vetiver	Junco	,7833	2,61708	,771	-5,0479	6,6145
		Enea	2,3800	2,73345	,404	-3,7105	8,4705

Basadas en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática(Error) = 18,679.

En la tabla 7, se evaluarón las diferencias entre las especies evaluadas, por medio de la pueba estadística de tukey y del LSD, ésta última se puede evaluar con un valor de significancia de 0.05 indicando que no hay diferencias de media significativas entre las especies utilizadas en el experimeto en las dos pruebas implementadas (Tukey y LSD).

Tabla 4: Prueba no paramétrica Levenne.

Contraste de Levene sobre la igualdad de las varianzas error^a

Variable dependiente:
Datos_Normal_Completo

F	gl1	gl2	Sig.
119,774	5	10	,000

Contrasta la hipótesis nula de que la varianza error de la variable dependiente es igual a lo largo de todos los grupos.

a. Diseño: Intersección + Dilucion + Plantas + Dilucion * Plantas

Por medio de la prueba no paramétrica de Levene y con ayuda del software SPSS se puede observar que el valor de significancia es de cero, encontrando que la significancia que se necesita obtener es de 0.05 o mayor a esta lo cual no estamos obteniendo como se ve en la tabla 7. Así que se concluye que los datos obtenidos por medio de la experimentación no son homocásticos, pero la violación de este supuesto no es relevante en la experimentación ya que el F_0 es muy grande.

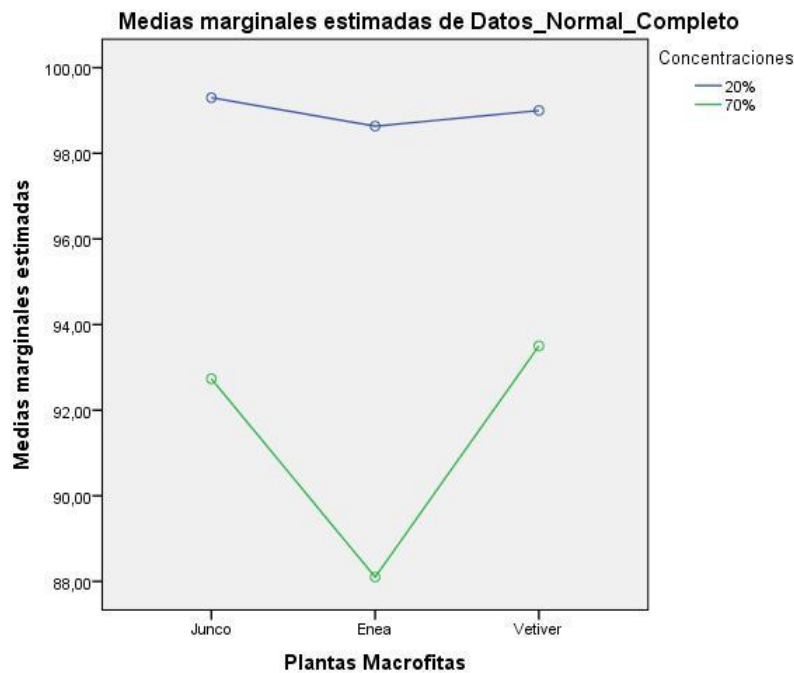


Grafico 7: modelo de porcentaje de remoción vs. Planta diferenciando concentraciones.

En la gráfica 7 se observa las medidas marginales estimadas de remoción de aluminio, teniendo en cuenta la concentración, indicando que las plantas a una concentración más baja arrojan mejores resultados de remoción del metal. Sin embargo a mayor concentración se puede deducir que el Vetiver es la especie que presenta mayor porcentaje de remoción.

Conclusiones

La concentración de Al de 20% para las especies Vetiver y Junco mostraron las mejores eficiencias de remoción (99 % y 98 %), indicando que las plantas pueden trabajar en mejores condiciones de adsorción. Para trabajar con concentraciones de Aluminio al 70% se recomienda usar la especie Vetiver, que presentó mejor desempeño alcanzando remociones del 94%.

Al comparar las tres especies evaluadas no se evidencia una diferencia significativa en la remoción de aluminio, sin embargo al comparar por concentración, se puede concluir que la remoción del aluminio en la experimentación se ve influenciado por la concentración del mismo en el agua, trabajando mejor a concentraciones bajas.

La máxima adsorción del metal durante el proceso de fitoremediación para todas las especies ocurrió en las primeras 24 horas, lo cual concuerda con los resultados descritos por Paris et al, 2005 en la remoción de plomo.

Agradecimientos Especiales

Se agradece a todos los participantes del semillero de investigación en “Tecnologías Avanzadas de Saneamiento Ambiental”, profesores, tutores y estudiantes, que a lo largo de la investigación hicieron grandes aportes al proyecto, para que hoy sea posible presentar el informe final del trabajo investigativo en “remoción de aluminio en aguas residuales industriales usando especies macrofitas” y al *Centro Institucional de Investigación, Proyección y Desarrollo de la Universidad Católica de Manizales* por el apoyo brindado.

Tutores:

Docente Juan Sebastián Arcila Henao

Docente Oscar Fernando Herrera Adarme

Docente María Fernanda Ortiz Revelo

Estudiantes participantes del proyecto

Cristian Leonardo Rocha Osorio

Erika Juliana Aldana Arcila

Irene Saffon Mejía

Victoria Eugenia Ramírez

Colaboradores

Docente Alejandro Rincón Santamaría

Docente María Nancy Marín Olaya

Julio Estrada

Tutor del trabajo de grado

Docente Wilmar Osorio Viana.

Referencias Bibliográficas

1. *Guía técnica general de producción más limpia*, Capítulo 2, legislación ambiental, Centro de promoción de tecnologías sostenibles, Agosto 2005.
2. *Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo*, Departamento de asunto económicos y sociales, División de desarrollo Sostenible, Organización de las Naciones Unidas (ONU).
3. Romero-Rojas, J.A. *Tratamiento de Aguas Residuales. Teoría y Principios de Diseño*. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. 2013.
4. Wang ,L.K.,Hung ,Y.T.,Lo, H. and Yapijakis, C.,*Handbook of Industrial and Hazardous Wastes Treatment* CRC Press 2004.
5. Vicenta de la Fuente García, Lourdes Rufo Nieto. *Biotecnología y medioambiente*, 2005, ISBN 84-609-7344-1 , págs. 151-162.
6. Delgadillo-López, A.E. *Fitorremediación: una Alternativa para Eliminar la Contaminación*. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Centro de Investigaciones Químicas. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14 (2011): 597- 612.
7. Peña Castro J.M, Barrera Figueroa B.E, Ruiz Medrano L, Xoconostle Cázares B. *Bases Biológicas de la Fitorremediación de Hidrocarburos Totales del Petróleo*. Peña Et Al.
8. Sarabjeet Singh Ahluwalia, Dinesh Goyal, *Microbial and plant derived biomass for removal of heavy metals from wastewater*, Department of Biotechnology & Environmental Sciences, Thapar Institute of Engineering & Technology, Patiala 147 004, Punjab, India December 200.
9. *Estudio de perfiles ocupaciones del sector de Metalmecánica en la ciudad de Manizales*. Programa de la Naciones Unidas para el Desarrollo. Primera Edición.
10. Buchelli Lozano G.A., Marín Restrepo J.J. *Estimación de la Eficiencia del sector Metalmecánico en Colombia*. Octubre 2011.

11. Augusto V. Ramírez. *Biomarcadores en monitoreo de exposición a metales pesados en metalurgia*. Lima ene. /mar. 2006.
12. Hehe Sun, Zhiying Wang, Peipei Gao, Peng Liu. *Selection of aquatic plants for phytoremediation of heavy metal in electroplate wastewater*. *Acta Physiologiae Plantarum* February 2013, Volume 35, Issue 2, pp 355-364.
13. Prabha K. Padmavathiamma, Loretta Y. Li. *Phytoremediation Technology: Hyper-accumulation Metals in Plants. Water, Air and Soil Pollution*. September 2007, Volume 184, Issue 1-4, pp 105-126.
14. Vidal Álvarez, M. *Evaluación de los mecanismos de adsorción y acumulación intracelular de plomo (Pb^{2+}), en sistemas continuos de fitorremediación con *Salvinia Minima**. Instituto de Ecología A.C. Xalapa, Veracruz, Mexico 2009.
15. Chaney, R.L., Malik, M., Li, Y.M., Brown, S.L., Brewer, E.P., Angle, J.S., Baker, A.J.M. 1997. Phytoremediation of soil metals. *Curr. Opin. Biotechnol.* 8: 279-284.
16. Mohammad Iqbal Lone. *Phytoremediation of heavy metal polluted soils and water: Progresses and perspectives*. *J Zhejiang Univ Sci B*. Mar 2008; 9(3): 210–220.
17. Cunningham, S.D., Berti, W.R., Huang, J.W. 1995. Phytoremediation of contaminated soils and sediments. En: *Bio-remediation: Science and Applications* (eds. Skipper, H.D. y Turco, R.F.), pp. 145-56, Soil Sci. Soc. Am., Madison, USA.
18. Núñez López R.A. *Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones*. México. julio-septiembre 2004.