

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE GEOQUÍMICA



**Estudio de los lixiviados del lodo rojo usando yeso
para su neutralización y la evaluación de su
toxicidad mediante la germinación de la semilla
Lycopersicon esculentum (Tomate)**

Proyecto Geoquímico II
presentado ante la ilustre
Universidad Central de
Venezuela por el Br. Johan
Justinien Barrantes Lozada
para optar por el título en
Licenciado en Geoquímica

Caracas, mayo de 2011



ACTA

Aprobado en nombre de la Universidad Central de Venezuela por los Miembros del Jurador Examinador.

Prof. Tommaso Tosiani

Tutor

Prof. Armando Ramírez

Jurado

Prof. Santiago Marrero

Jurado



RESUMEN

El proceso de obtención de alúmina genera un desecho conocido como lodo rojo, este residuo es almacenado en grandes extensiones de terreno generando un problema ambiental. Para obtener una mejora de estos remanentes y disminuir el impacto que generan en el ecosistema, se evaluó la enmienda del lodo rojo con yeso determinando el grado de modificación de las condiciones de pH, conductividad, la concentraciones de cationes, y como influyen el crecimiento de la semilla *Lycopersicon esculentum* (tomate). Para este trabajo se utilizó un 10 % de lodo rojo y yeso en proporciones variables y 90% de arena, simulando un proceso de pluviosidad para obtener los lixiviados de las distintas mezclas; seguidamente se analizaron las variaciones de las propiedades químicas de los lixiviados para determinar los factores inhibidores de la germinación de las semillas y el desarrollo de las plántulas. El lodo rojo sin modificaciones se caracteriza por tener alto pH, sodicidad y salinidad. Estas características afectaron negativamente la germinación y elongación de las semillas. En los casos que se modificó el lodo rojo con yeso se observó un cambio en las propiedades químicas, caracterizado principalmente por la disminución del pH, y sodicidad, y aumento en los niveles de calcio, lo cual favoreció el crecimiento y germinación de las semillas de tomate. En los casos donde solo se utilizó yeso se obtuvo un alto contenido de calcio, sin presencia de sodio teniendo una germinación regular; pero se determinó que el exceso de sulfato es tóxico para el crecimiento de las semillas. Las mezclas de 75% lodo rojo con 25% yeso y 50% lodo rojo y 50% yeso resultaron ser las más adecuadas para el crecimiento de las semillas de tomate.



DEDICATORIA

Les dedico esta tesis a Dios sobre todas las cosas a mi padre y madre.



AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradezco a Dios por haberme dado la oportunidad de vivir en este plano físico y en este instante tiempo, por brindarme la fuerza, el coraje y la constancia que permitió culminar la Licenciatura de Geoquímica y que me ha permitido obtener un conjunto de logros en distintos ámbitos de mi vida.

Mi padre Walter Barrantes, en primer lugar por haberme brindado los 23 cromosomas necesarios para nacer, por siempre ser el compañero que ha estado a mi lado en las buenas y en las malas, por el apoyo a lo largo de la carrera, por ser un ejemplo de constancia, lucha y dedicación y enseñándome que las cosas en la vida se logran con trabajo y esfuerzo sin importar la dificultad que se interponga, sencillamente gracias por estar en mi vida, te quiero mi carnal.

Mi mamá María Coromoto Lozada, por haberme dado la vida, por estar incondicionalmente en cada segundo de mi crecimiento, por haber formado como ser autónomo e independiente, por siempre tener una sonrisa en los momentos más difíciles indistintamente de la situación, gracias por tener a una madre como tú, te quiero mucho.

A mi hermana Tashmi Barrantes, por darme el ejemplo de responsabilidad y ser copartícipe en mi crecimiento y formación. Gracias por ser mi hermana mayor te quiero muchísimo.

A mi abuelita Rosa Argentina Montero de Barrantes, por ser la persona más consentidora, cariñosa y amorosa, por estar durante 5 años de mi carrera cuidándome y estando pendiente de mí los 365 días y de los cuales siempre me decía: “papito hay esta el almuerzo no se le olvide”, por hacerme una persona menos egoísta y más cariñosa, abuela la adoro y la quiero muchísimo siempre la tengo en mi corazón.

A mi Tía Damaris Barrantes, por estar durante todos estos años día a día en la Facultad de Ciencias y comprendiendo cual es la lucha que se lleva en esta Facultad



dándome un voto de confianza, gracias por ser una de las piedras de eje y ser un motivo de lucha y demostrándole que si puede ser otra elite de la familia y del país siendo científico.

A mi entrenador Wilfredo Jaime, por sus consejos constantes de la vida y cómo afrontarla, y que indistintamente fuéramos atletas nunca dejarnos de estudiar, porque esa es nuestra meta principal en la universidad.

A Ángelo Suarez, por estar día a día al lado no solo para el crecimiento deportivo si no personal.

A mi tutor Tommaso Tosiani, por tener la paciencia y la dedicación para ayudarme a culminar una de las etapas más importantes de la carrera y mi vida, gracias profe.

A la UCV, Facultad de Ciencias, Escuela de Química, Departamento de Geoquímica y ICT por brindar no solo los espacios académicos si no los deportivos y culturales para mi crecimiento personal como ciudadano integral de esta sociedad.

Al equipo de Rugby UCV RC y al club de atletismo de la UCV por enseñarme la disciplina del entrenamiento constante y el compartir en equipo no solo en el campo si no en la vida diaria y que con esfuerzo y tesón se alcanzan las metas.

Al Lic. Jorge Peñuela, no solo ser mi padre político si no también algo más importante, un amigo incondicional que me ha apoyado en todas las decisiones estando en las buenas y en las malas no solo académicas y políticas si no en las personales, y por siempre haber dado un consejo en el momento acertado, sencillamente gracias DD por ser la persona que eres.

A la Abogada Oneida Mendoza, por ayudarme en los distintos problemas que he tenido a lo largo de la carrera no solo a nivel académico si no a nivel personal, y además por ser una persona que me ha escuchado de manera desinteresada y siempre dándome un consejo oportuno, gracias mi Lorenza te quiero mucho.



A las distintas personas y dependencias que me ayudaron a culminar la con éxito esta etapa de mi vida: Lic. Rubén Biomon, Br. Arturo Barrios, Br. Jesús Hernández, Br. Joshimer Rodríguez, Br. Ronald Tovar y Br. José Ali Briceño y las personas que laboran en la División de Control de Estudios, la secretaria del Consejo de la Facultad de Ciencias y Decanato, sencillamente gracias.

A estas personas especiales que me gustaría agradecer su amistad, apoyo, ánimo y compañía en las diferentes etapas de mi vida. Algunas están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en el corazón. Sin importar en donde estén o si alguna vez llegan a leer estas líneas quiero darle las gracias por formar parte de mi, por todo lo que han brindado y por todos sus bendiciones.



ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	1
Objetivo General	3
Objetivos Específicos	3
MARCO TEORICO	4
La bauxita	4
Distribución de la bauxita	4
Composición de la bauxita	5
Proceso Bayer	6
Composición química del lodo rojo	9
Composición mineralógica del lodo rojo	11
Efecto del pH en el comportamiento de los elementos nutritivos en el suelo	13
Influencia del yeso en el lodo rojo	13
ANTECEDENTES	15
METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	19
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	25
Análisis de los lixiviados del lodo rojo	25
Análisis del pH en los lixiviados del lodo rojo	25
Análisis de la conductividad en los lixiviados del lodo rojo	27
Análisis del sodio en los lixiviados de las mezclas de lodo rojo	29
Análisis del calcio de los lixiviados del lodo rojo	31
Análisis de magnesio de los lixiviados del lodo rojo	33



Análisis de potasio de los lixiviados del lodo rojo	33
Análisis del proceso de germinación de la semilla <i>Lycopersicon esculentum</i> (tomate)	35
Porcentaje relativo de la germinación (%RSG)	35
Porcentaje de Elongación de la Raíz (%RRG)	38
Índice de Germinación (IG)	43
CONCLUSIONES	47
RECOMENDACIONES	48
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
APÉNDICE	53



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso Bayer	8
Figura 2. Interacción del yeso con los iones sodio	14
Figura 3. Reacción entre el yeso y el carbonato	14
Figura 4. Ubicación de las tomas de muestras en la empresa Bauxilum	19
Figura 5. Montaje de sistema de lixiviación de los lodos rojos, arenas y yeso.	20
Figura 6. Placa de vidrio con papel de filtro	21
Figura 7. Montaje de filtro de pliegue con placa de micropore y papel de filtro de milipore.	21
Figura 8. Absorción y Emisión Atómica (Perkin-elmer-AAAnalyst 2000)	22
Figura 9. pH en las distintas variaciones de lodo rojo y yeso en función del volumen de lixiviados.	25
Figura 10. pH en las distintas variaciones de lodo rojo y yeso en función del volumen de lixiviados (replica).	26
Figura 11. Conductividad de las distintas variaciones de lodo rojo y yeso en función del volumen de lixiviados	28
Figura 12. Conductividad de las distintas variaciones de lodo rojo y yeso en función del volumen de lixiviados (replica).	28
Figura 13. Concentración de sodio de las distintas variaciones de lodo rojo y yeso vs volumen.	30
Figura 14. Concentración de sodio de las distintas variaciones de lodo rojo y yeso vs volumen (replica)	30



Figura 15. Concentración de calcio de las distintas variaciones de lodo rojo y yeso en función del volumen lixiviado.	32
Figura 16. Concentración de calcio de las distintas variaciones de lodo rojo y yeso en función del volumen lixiviado (replica).	32
Figura 17. Concentraciones de potasio de las distintas variaciones de lodo rojo y yeso en función del volumen lixiviado.	34
Figura 18. Concentraciones de potasio de las distintas variaciones de lodo rojo y yeso en función del volumen lixiviado.	34
Figura 19. Semillas germinadas con muestras de 100% LR;0%Y (1era Alícuota)	37
Figura 20. Semillas germinadas con 75% LR;25%Y (1era Alícuota)	37
Figura 21. Semillas germinadas con 50% LR;50%Y (1era Alícuota)	37
Figura 22. Semillas germinadas con 25% LR;75%Y (1era Alícuota)	38
Figura 23. Uso del programa ImagenJ para la determinación de la longitud de las raíces.	38
Figura 24. Porcentaje del crecimiento relativo de la raíz de la semilla <i>Lycopersicon esculentum</i> (tomate)	41
Figura 25. Porcentaje del crecimiento relativo de la raíz de la semilla <i>Lycopersicon esculentum</i> (tomate replica).	41
Figura 26. Índice de germinación de la semilla <i>Lycopersicon esculentum</i> (tomate)	45
Figura 27. Índice de germinación de la semilla <i>Lycopersicon esculentum</i> (tomate replica)	45



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Reservas mundiales de bauxita	5
Tabla 2. Composición mineralógica de la bauxita	6
Tabla 3. Composición química de elementos mayoritarios de lodos rojos (% p/p)	10
Tabla 4. Composición mineralógica (semicuantitativa) del lodo rojo	12
Tabla 5. Concentración de sodio en las distintas alícuotas	31
Tabla 6. Concentración de sodio en las distintas alícuotas (replica)	31
Tabla 7. Porcentaje relativo de la germinación de la semilla <i>Lycopersicon esculentum</i> (tomate)	36
Tabla 8. Porcentaje del crecimiento relativo de la raíz de la semilla <i>Lycopersicon esculentum</i> (tomate)	39
Tabla 9. Blanco para la elongación de la semilla <i>Lycopersicon esculentum</i> (tomate)	42
Tabla 10. Porcentaje del índice de germinación de la semilla <i>Lycopersicon esculentum</i> (tomate)	44



ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Porcentaje relativo de la germinación de la semilla	23
Ecuación 2. Porcentaje del crecimiento relativo de la raíz	24
Ecuación 3. Porcentaje del índice de germinación	24



INTRODUCCIÓN

La obtención de aluminio a través de la extracción de la bauxita es de gran interés e importancia a nivel mundial, ya que dicho elemento es fundamental, en la construcción, la electrónica, la aeronáutica y la marina entre otros, creando un gran desarrollo industrial.

La extracción del aluminio se hace mediante el método Bayer, el cual consiste en la disolución de la bauxita con hidróxido sódico, produciendo aproximadamente 70 millones de toneladas métricas de residuos sólidos de bauxitas por año, que se disponen en grandes áreas de depósitos (The Aluminium Association, 2000). Este residuo es conocido como lodos rojos, y está constituido por óxido de hierro, aluminio, titanio y en menor concentración por sílice, óxido de calcio y álcalis. También contiene otros elementos, generalmente trazas de fósforo, vanadio, magnesio, cinc, manganeso, estroncio, circonio y galio (Rubinos, 2008). El lodo rojo genera un riesgo ecológico, inhibiendo el desarrollo eficiente de la flora y fauna circundantes a las zonas de depósito como consecuencia de sus altos valores de pH ($\text{pH} > 11$), salinidad y altas concentraciones de sodio (Courtney and Mullen, 2009; Wong and Ho, 1993; Woodard, Hossner, y Bush, 2008). En Venezuela los grandes depósitos de lodo rojo se encuentran en zonas aledañas al río Orinoco, siendo un riesgo que puede generar contaminación de las aguas y de la flora y fauna circundante.

Mediante distintos métodos se ha buscado enmendar a los lodos rojos para hacerlos menos agresivos al ambiente, entre estos podemos citar: su uso como material de construcción (diques, terraplén de carreteras, construcción de ladrillos, cubiertas de vertederos), suelos sintéticos, fertilizantes, el proceso de revegetación y en la extracción de metales del lodo rojo (Rubinos, 2008).

Uno de los principales factores que influyen en la decisión del método a utilizar en la recuperación del lodo rojo es la viabilidad económica, ya que debe permitir su masificación, en forma práctica y a bajo costo. Entre los métodos más utilizados



encontramos la neutralización, que consiste en equilibrar la concentración de protones e iones hidroxilo, y la revegetación que se utiliza cubriendo con plantas un sustrato constituido por lodo rojo enmendado.

El proceso de la revegetación es difícil debido a los altos niveles de alcalinidad, salinidad, sodicidad, alto contenido de aluminio y la pobre permeabilidad que caracterizan a los lodos rojos (Courtney and Mullen, 2009; Wong and Ho 1993; Woodard, Hossner, y Bush, 2008). En diversas investigaciones se han usado distintas relaciones de yeso (Courtney y Timpson, 2004; Woodward, Hossner, y Bush, 2008), agua de mar (Menzies et al. 2004) y arena para poder mejorar las condiciones y componentes del lodo rojo tales como la materia orgánica, agua, porosidad y material mineral, generando un mejor sustrato para ser usado con fines de revegetación (Casanova, 2005).

En la presente investigación se utilizó el yeso como factor de neutralización del lodo rojo. El yeso juega un papel fundamental, porque permite disminuir los altos niveles de alcalinidad y altas concentraciones de sodio intercambiable presentes en el medio, que en conjunción con la arena genera condiciones aptas para el desarrollo de las plantas (Casanova, 2005). Se realizó un análisis de los lixiviados de las mezclas de estos tres componentes (lodo rojo, yeso y arena) los cuales fueron evaluados determinando el grado de toxicidad sobre la semilla de tomate, siguiendo la norma de la EPA OPPTS 850.4200.

Esta investigación permitió una posible forma de aprovechar el lodo rojo; para mejorar el entorno, y reducir los riegos en ecosistemas aledaños a las áreas de depósito, contribuyendo así con el cumplimiento del derecho ambiental en la Constitución de la República Bolivariana de Venezuela consagrado en su Título III, en el Capítulo IX denominado *De los Derechos Ambientales* (Artículos 127, 129).

Artículo 127. “Es un derecho y un deber de cada generación proteger y mantener el ambiente en beneficio de sí misma y del mundo futuro. Toda persona tiene derecho individual y colectivamente a disfrutar de una vida y de un ambiente



seguro, sano y ecológicamente equilibrado. Es una obligación fundamental del Estado, con la activa participación de la sociedad, garantizar que la población se desenvuelva en un ambiente libre de contaminación, en donde el aire, el agua, los suelos, las costas, el clima, la capa de ozono, las especies vivas, sean especialmente protegidos, de conformidad con la ley.”

Artículo 129. “Todas las actividades susceptibles de generar daños a los ecosistemas deben ser previamente acompañadas de estudios de impacto ambiental y socio cultural. Una ley especial regulará el uso, manejo, transporte y almacenamiento de las sustancias tóxicas y peligrosas”. En este sentido se propone los siguientes objetivos.

Objetivo General

Evaluar en qué magnitud el yeso es capaz de modificar el pH, la conductividad y la concentración de cationes en el lodo rojo.

Objetivos Específicos

- Evaluar el proceso de lixiviación del lodo rojo luego de ser mezclado con yeso y arena, determinando cuáles son las características de las soluciones lixiviadas (pH, conductividad y concentración de cationes).
- Determinar la toxicidad de las soluciones, utilizando el protocolo de la EPA OPPTS 850.4200 sobre la semilla *Lycopersicon esculentum* (Tomate).



MARCO TEÓRICO

Producción de aluminio

La bauxita

La Bauxita es el término genérico con el que se denomina a una mezcla natural de minerales ricos en óxidos de aluminio, los depósitos se forman debido a la alteración de diferentes tipos de roca generando un conjunto de minerales que coexisten en el yacimiento. El componente principal de la bauxita es el óxido de aluminio y es la materia prima de la cual se extrae prácticamente toda la alúmina utilizada en la producción de aluminio (Paranguru, Rath y Miscra 2005).

Distribución de la bauxita

Los yacimientos de bauxita se encuentran principalmente en las regiones tropicales y subtropicales. África, India, Sudamérica y Australia. También hay algunos depósitos en Europa. La bauxita se refina para obtener óxido de aluminio trihidratado (alúmina), la cual se reduce electrolíticamente a aluminio metálico. Para producir una tonelada de alúmina se necesitan dos o tres toneladas de bauxita, y para producir una tonelada de aluminio metálico se necesitan dos toneladas de alúmina (Rubinos, 2008). Las reservas mundiales de bauxita se muestran en la tabla 1.



Tabla 1. Reservas mundiales de bauxita

Países	Reservas	Reservas Base
USA	20.000	40.000
Australia	5.800.000	7.900.000
Brasil	1.900.000	2.500.000
China	700.000	2.300.000
Grecia	600.000	650.000
Guinea	7.400.000	8.600.000
Guayana	700.000	900.000
Jamaica	2.000.000	2.500.000
Kazajkastán	350.000	360.000
Rusia	200.000	250.000
Suriname	580.000	6000.000
Venezuela	320.000	350.000
Otros países	3.200.000	3.800.000
TOTAL MUNDIAL	27.000.000	38.000.000

En millones de toneladas métrica, Fuente: USGS, Mineral Commodity Summaries 2009.

El 80% de la producción mundial de bauxita procede de minas superficiales; el resto procede de minas subterráneas, localizadas principalmente en el sur de Europa.

Composición de la bauxita

Debido a su elevada reactividad química, el aluminio nunca se encuentra en la naturaleza como aluminio metálico, sino que se encuentra en su forma oxidada como integrante de al menos 205 minerales. Dentro de estos minerales, el grupo más importante son los silicatos, y los productos de su meteorización, las arcillas. Otros



compuestos importantes incluyen los óxidos hidratados, un grupo que incluye a la bauxita, la materia prima para la producción de aluminio primario (Rubinos, 2008).

Las bauxitas contienen formas hidratadas de óxido de aluminio, presentando tres formas principales dependiendo de: a) el número de moléculas de agua de hidratación y b) su estructura cristalina. Los tres minerales más comunes de la bauxita son gibbsita, boehmita y diáspora (tabla 2).

Dentro de las menas de bauxita explotadas normalmente, la forma dominante es la gibbsita, seguida de una mezcla de gibbsita y boehmita.

Tabla 2. Composición mineralógica de la bauxita

Elemento	Mineral	Formula
Al	Gibbsita	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{H}_2\text{O}$
	Boehmita	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\cdot \text{H}_2\text{O}$
	Diaspora	$\beta\text{-Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{H}_2\text{O}$
Fe	Goethita	$\alpha\text{-FeOOH}$
	Hematita	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$
	Magnetita	Fe_3O_4
	Ilmenita	$\text{FeO}\cdot \text{TiO}_2$
Si	Caolinita	$\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$
	Cuarzo	SiO_2
	Silimanita	$\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{SiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Ti	Anatasa	TiO_2
	Rutilo	TiO_2

Fuente: Paramguru et al., (2005)

Proceso Bayer

En este proceso la bauxita es pulverizada y luego lavada con una solución caliente de hidróxido sódico (sosa caustica) a elevada presión y temperatura. El licor



resultante contiene una disolución de aluminato de sodio y residuos de bauxita no disueltos ricos en hierro, silicio y titanio. Estos residuos son denominados como lodos rojos. La solución clara de aluminato de sodio es bombeada a un tanque de grandes dimensiones, denominado precipitador. En este tanque le añaden partículas finas de alúmina para promover la precipitación de partículas de alúmina pura a medida que el licor enfría. Las partículas sedimentadas en el fondo del tanque son extraídas y pasan a través de un calcinador rotatorio a 1100° C para eliminar el agua combinada químicamente. El resultado del proceso es un polvo blanco: alúmina pura. La sosa cáustica es recuperada y reutilizada en el proceso. Este proceso para la obtención de alúmina pura a partir de la bauxita ha sufrido pocas modificaciones desde la apertura de la primera refinería de bauxita en 1893.

El proceso Bayer comprende por tanto cuatro etapas: (1) digestión (2) clarificación del licor, (3) precipitación del hidrato de alúmina y (4) calcinación de la alúmina como muestra en la figura 1.

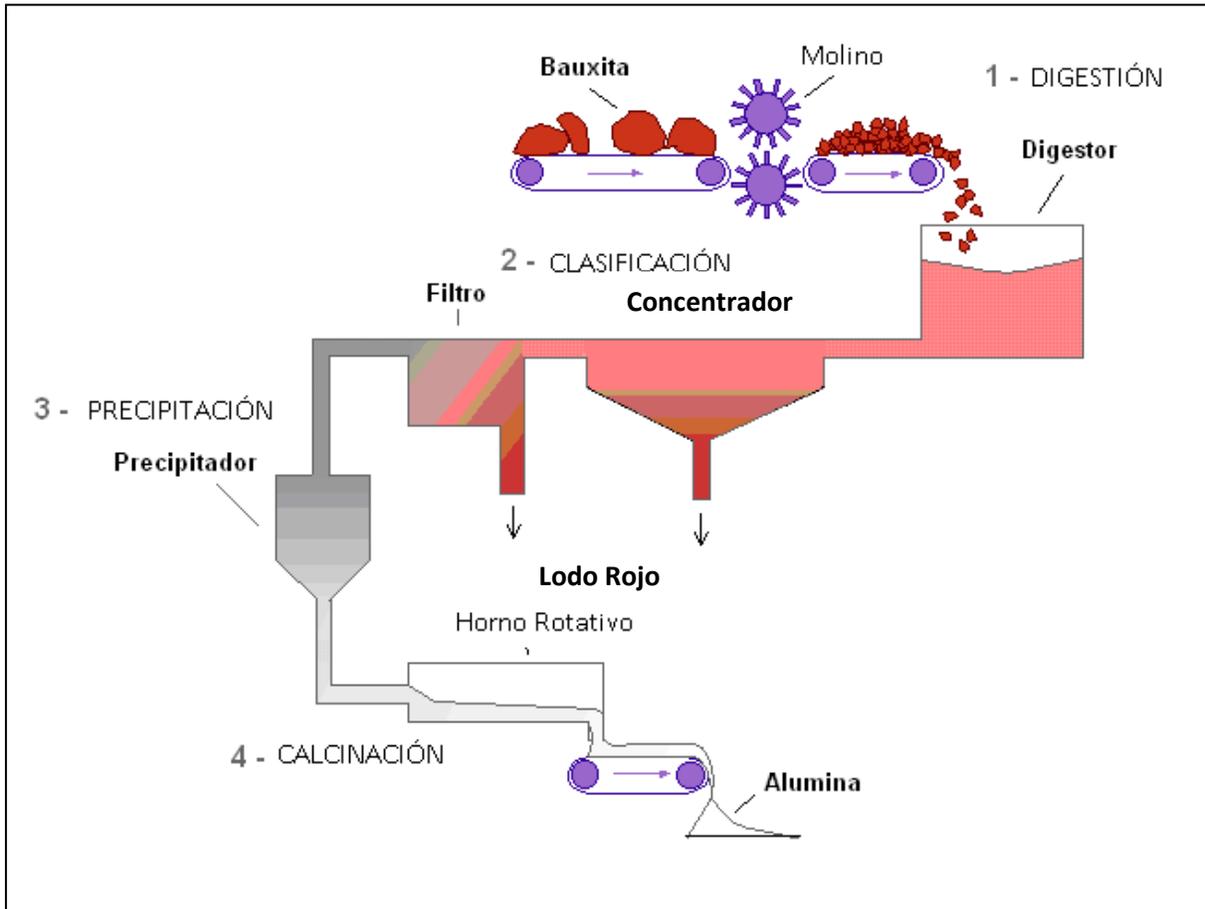


Figura 1. Proceso Bayer (http://www.aluar.com.ar/es/aluminio.asp?id_categoria=55).

Lodo rojo

Es el residuo generado en la producción de alúmina a partir de la bauxita. La producción de una tonelada de aluminio metálico requiere dos toneladas de alúmina, las cuales a su vez necesitan cuatro toneladas de bauxita para ser generadas, debido a la presencia de óxidos de hierro y otras impurezas. Esto significa que se generan aproximadamente dos toneladas de lodo rojo por cada tonelada de aluminio metálico producida. La producción mundial de lodo rojo es de aproximadamente 70 millones de toneladas (en peso seco) por año (The Aluminium Association, 2000).

El lodo rojo tiene un tamaño de partícula entre (75-11) μm mayormente y también se le puede encontrar a menor escala entre (5-3) μm ; está constituido por óxido de



hierro, aluminio, titanio y en menor concentración por óxido de silicio, óxido de calcio y álcalis. Generalmente, también contiene otros elementos traza como fósforo, vanadio, magnesio, cinc, manganeso, estroncio, circonio y galio (Rubinos, 2008).

El lodo rojo representa un problema para su adecuado almacenamiento. Este residuo presenta diversas propiedades que dificultan su vertido y almacenamiento, entre las que incluye su elevada alcalinidad (pH del orden de 12 o incluso mayor), alto contenido de agua (aproximadamente 60%), y características físicas parecidas a la arcilla mojada. El modo de enfrentarse a este problema es diverso. En los climas áridos; se realiza mediante el apilamiento en seco, un método que emplea la radiación solar para concentrar el lodo, siendo el mejor método que se propone por ahora. Este método de apilamiento en seco requiere grandes áreas de secado, lo cual aumenta la posibilidad de generación de polvo. La revegetación de las zonas de depósito del lodo rojo también ha sido propuesta, a pesar de los importantes factores limitantes (por ejemplo: elevado pH, alta salinidad, baja porosidad y ausencia de nutrientes o constituyentes orgánicos) (Rubinos, 2008).

Composición química del lodo rojo

En la tabla 3 se presenta la composición química cuantitativa para el lodo rojo. Los componentes mayoritarios del lodo rojo son óxidos de hierro, óxidos de titanio y óxidos de aluminio, conteniendo además cantidades apreciables de sílice y de compuestos de calcio y sodio. La composición química del lodo rojo depende directamente de la bauxita de origen y de las condiciones del proceso industrial aplicado para la obtención de la alúmina, lo cual conlleva una gran variabilidad en la composición del material en función de su origen. Además de los elementos mayoritarios el lodo rojo contiene pequeñas cantidades de diversos metales; al respecto cabe subrayar las bajas concentraciones encontradas de arsénico, mercurio y cadmio (Rubinos, 2008).



Tabla 3. Composición química de elementos mayoritarios de lodos rojos (% p/p)

Países		Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	Na ₂ O
India	Al. Corp	20.26	19.60	28.00	6.74	8.09
	MALCO	45.17	27.00	5.12	5.70	3.64
	HINDALCO	35.46	23.00	17.20	5.00	4.85
	BALCO	33.80	15.58	22.50	6.84	5.20
	NALCO*	52.39	14.73	3.30	8.44	4.00
Hungría		38.45	15.20	4.60	10.15	8.12
Jamaica		50.9	14.20	6.87	3.40	3.18
Surinam		24.81	19.00	12.15	11.90	9.29(EM)
USA	ALCOA Mobile	30.40	16.20	10.11	11.14	2
	Arkansas	55.6	12.15	4.5	4.50	1.5-5.0
	Sherwon	50.54	11.13	Trazas	2.56	9.00
FRG Baudart		38.75	20.00	5.5	13.00	8.16
Taiwán		41.30	20.21	2.90	17.93	3.8
Australia		40.50	27.70	3.50	19.90	1-2
Venezuela	Bauxilum	40.1	21.4	3.2	15.0	3.0

Fuente: Paramguru et al., (2005)

Un aspecto destacable de la composición química del lodo rojo es su elevado contenido en álcalis puesto de manifiesto en su elevado contenido en sodio y carbonatos. El elevado contenido en sodio provoca la dispersión de las partículas finas lo cual se traduce en una conductividad hidráulica muy baja. El sodio se presenta principalmente como sodio soluble en el licor, sodio cambiante y sodio fijado en el producto de desilicación (DSP). La liberación de sodio de estas fases provoca



la formación de NaOH y carbonato que proporciona al lodo rojo sus propiedades salinas y alcalinas. De modo general se ha estimado que el lodo rojo contiene aproximadamente un 3-4% de óxido de sodio, del cual aproximadamente el 70% se corresponde con Na fijado en DSP (Wong y Ho. 1988).

Cabe comentar que el contenido de nutrientes en el lodo rojo es muy bajo. El lodo rojo presenta cantidades muy pequeñas de carbono y nitrógeno (<0,1%). Este déficit de nutrientes en el lodo rojo representa una dificultad añadida a la alcalinidad del material para la recuperación de las áreas de almacenamiento del material como posible enmienda del material con vía a su revegetación (Rubinos, 2008).

Composición Mineralógica del lodo rojo

Debido a la complejidad mineralógica del lodo rojo, existen numerosas fases que se han identificado mediante difracción de rayos X, esta complejidad es consecuencia de la composición variable de la bauxita de la que procede y de las condiciones del proceso industrial del que se origina. El patrón de difracción de rayos X para lodo rojo presenta hematita, gohetita y cuarzo como principales componentes, y también cantidades menores de gibbsita, ilmenita, diaspora y el silicato de neoformación sodalita y bayerita. Por lo tanto predominan minerales de baja solubilidad (Tabla 4), lo cual le confiere al lodo rojo una gran estabilidad química. Esta composición mineralógica sugiere una elevada estabilidad del material en agua, disoluciones salinas, ácidos, base y disolventes orgánicos (Palmer 2009; Rubinos, 2008).



Tabla 4. Composición Mineralógica (semicuantitativa) del lodo rojo

Mineral	%		
	(1)	(2)	(3)
Hematita	25.8	34.90	25
gohetita	21.6	NR	NR
Cuarzo	14.7	Trazas	NR
Aluminato de Ca	6.8	NR	NR
Sosalita	6.7	32.30	NR
Boehmita	6.4	Trazas	5-10
Calcita	5.6	1.20	NR
Gibbsita	4.5	NR	10
Moscovita	3.6	NR	Trazas
Anatasa	3.1	Trazas	NR
Cancrinita	NR	4.60	NR
Diaspora	NR	2.50	NR
Ilmenita	NR	NR	5

(1) Glenister y Thornber 1985; (2) Altundogan et. al 2000; (3) Pérez 1999;NR: no referenciada.

El producto de la desilicatación no es un compuesto simple y ni bien identificado, sino que consta de una serie de compuestos de tipo zeolítico, donde posiblemente existen tres tipos de hidroaluminosilicatos de sodio, con una estructura similar a las zeolitas naturales sodalita, noseanita y cancrinita. Las propiedades de los lodos rojos se ven influenciadas de gran manera por la presencia de estos compuestos tipo zeolítico, los cuales aportan al material una gran porosidad y capacidad de cambio iónico (Wong y Ho, 1995).



Efecto del pH en el comportamiento de los elementos nutritivos en el suelo

Uno de los efectos más importantes del pH de los suelos está relacionado con la nutrición mineral de las plantas. La absorción de elementos nutritivos esenciales para el normal crecimiento y producción de las plantas se ve afectada por los valores extremos de pH, en suelos ácidos y en suelos alcalinos (Casanova, 2005).

En general, para un desarrollo de las plantas, la mayoría de los nutrientes se presentan en el intervalo de pH correspondiente a los suelos neutros (6.5-7.0). Elementos como nitrógeno, azufre, fósforo, potasio, calcio y magnesio son típicos ejemplos de esta situación, haciéndose menos solubles cuando los suelos son más ácidos o más alcalinos. Otros elementos nutritivos esenciales para las plantas, pero requeridos en menores cantidades que los mencionados anteriormente, son: hierro, manganeso, boro, cobre, zinc, cuya solubilidad tiende a aumentar en la solución del suelo en pH ácido y a disminuir en pH alcalinos. El molibdeno tiene un comportamiento opuesto alcanzando mayor solubilidad a pH superior a 7 (Casanova, 2005).

Influencia del yeso en el lodo rojo

El yeso es el material más usado para disminuir la concentración de sodio intercambiable en los suelos, ya que el sulfato de calcio toma el sodio en solución para formar sulfato de sodio (figura 2), siendo esta sal soluble, la misma puede ser lavada del suelo. Si los suelos poseen iones carbonatos en solución los mismos pueden reaccionar con el sodio formando carbonato de sodio, el cual produce un valor de pH en el suelo superior a 10. Para evitar esta situación, se debe agregar suficiente yeso, no sólo para disminuir el ion sodio intercambiable, sino también para neutralizar el efecto del carbonato, ya que el carbonato de calcio precipita y el sulfato de sodio puede lavarse del suelo (figura 3); en el caso de la mezcla de arenas con los lodos rojos se va a permitir aumentar la capacidad para retener agua, nutrientes y lograr un mejor soporte del sistema radical de las plantas y ayudar al suelo a ser más permeable y aireado (Casanova, 2005).

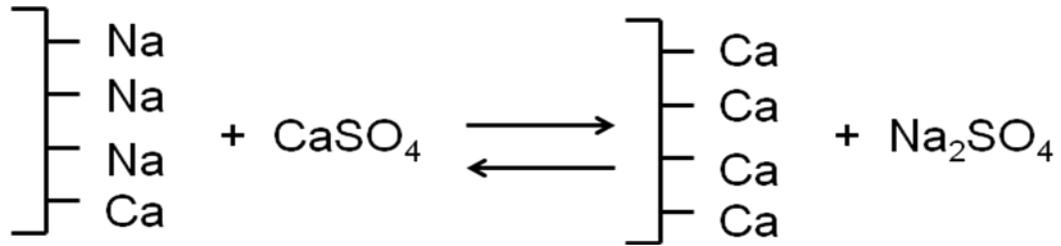


Figura 2. Interacción del yeso con los iones sodio
(Casanova, 2005)



Figura 3. Reacción entre el yeso y el carbonato
(Casanova, 2005)



ANTECEDENTES

Goen, Kuruvilla y Peter (1989) determinaron la calidad de los lixiviados mediante la mezcla de lodos rojos, fosfoyeso y suelos arenosos locales que se propusieron para ser utilizados en un programa de captación de manejo de nutrientes, usando treinta y tres columnas de policloruro de vinilo que fueron establecidas en un anexo techado que permitía la entrada de luz y a temperatura ambiente. Se realizaron por triplicado once diferentes combinaciones de lodo rojo, fosfoyeso y materiales orgánicos.

Los lixiviados fueron recogidos después de cada aplicación de agua de lluvia, y se les determinó la concentración de Na, Ca, SO₄, P y F, y el pH.

El pH de los lixiviados de arena mezclada con lodo rojo y fosfoyeso se mantuvo por debajo del 8,5, la mayoría de las sales se lixiviaron en el primer año, y después de 2 años se redujo considerablemente la lixiviación de fósforo.

Summer, Guise y Smirk (1993) estudiaron la lixiviación del fósforo en los suelos ubicados en los estuarios en Peel-Harvey en la llanura costera del Swan, en la zona occidental de Australia. Estos suelos son de tierras arenosas de textura gruesa con predominio de cuarzo, con un bajo nivel de hierro y de aluminio y no conservan el fósforo. Para investigar la reducción de la lixiviación del fósforo de los suelos enmendados con lodo rojo se realizaron dos estudios comparativos, en donde una de las zonas de estudio fue tratado en 80 toneladas por hectárea con lodo rojo (El lodo rojo se aplicó a la superficie del suelo utilizando fertilizantes convencionales) que había sido neutralizado con fosfoyeso y a la otra zona de estudio no se le aplicó ninguna modificación. Para su análisis se midió el pH, la conductividad y la concentración de iones, demostrando que el lodo rojo logró una disminución de las pérdidas de fósforo en un 70%, disminuye el pH y es potencialmente una alternativa para mejorar los nutrientes en los suelos arenosos.

Courtney y Timpson (2004) estudiaron los niveles de los nutrientes de la vegetación que crece en el residuo de la bauxita modificado con yeso, examinando las propiedades químicas y las modificaciones físicas de los residuos de la fracción fina



(lodo rojo) en la planta de Aughinish Alumina Ltd. Bayer, Irlanda, seguido por una investigación de campo de dos años. Plantearon dos procesos comparativos uno con arena, lodo rojo y otro con arena, lodo rojo y yeso; en los dos casos se agregó material orgánico por igual, la especie que fue sembrada en el sustrato modificado del lodo rojo fue con *Lolium perenne* y *Holcus lanatus*; se determinó su composición nutricional durante los dos primeros años del crecimiento, evaluando las concentraciones de los elementos nitrógeno, calcio, manganeso, magnesio, fósforo y de potasio, obteniéndose una disminución de la concentración en los dos años. Para el proceso del crecimiento de la planta se demostró que la influencia del yeso es eficiente para la neutralización de los lodos rojos, permitiendo un crecimiento adecuado para las plantas en el primer año, pero a través del tiempo genera una disminución de las concentraciones de los iones en el sustrato disminuyendo la velocidad de crecimiento de las plantas.

Menzies, Fulton y Morrel (2004) trabajaron con la neutralización de los lodos rojos usando el agua de mar, a través del uso en el laboratorio de columnas de lixiviación en donde mezclaron el lodo rojo, con arena y agua de mar, simulando un ambiente comparable a la realidad en el campo. En los estudios, la reacción de neutralización del pH inicial fue rápida (<5 min), la reacción continuó durante varias semanas reduciendo el pH del residuo a un pH 8 a 8,5. Además de reducir el pH y el contenido de Na de los residuos, la adición de cantidades sustanciales de agua de mar permite una mayor disponibilidad de los iones Ca, Mg, y K para las plantas. Posteriormente se aplicó en el campo obteniendo resultados similares. Sin embargo, la acumulación de un precipitado, que consiste en hidrotalcita, aragonita y pyroaurite, en el sistema de drenaje puede impedir el uso de agua de mar en la neutralización in situ como práctica de rehabilitación de rutina. Tras la neutralización con agua de mar, el lodo rojo es demasiado salino para apoyar el crecimiento de plantas y requeriría lixiviación con agua dulce antes de la revegetación.

Courtney y Timpson (2005) trabajaron en función de la recuperación de la fracción gruesa y fina en residuos de bauxita, mejorándola con yeso para establecer una



mejora y un beneficio en la gestión ambiental mediante el uso de la vegetación. En el estudio investigaron el uso de la mezcla de la fracción gruesa y de la fracción fina de residuos de bauxita, con y sin el uso de yeso, usando el *Trifolium pratense* para la revegetación de dichos residuos. El experimento fue diseñado para evaluar el efecto de arena y el yeso en el proceso de enmienda. Los ensayos se realizaron en la zona de vertido de residuos en la refinería de alúmina Aughinish Limited, Irlanda. El proceso de siembra se realizó en cuadrados por triplicado, donde las plantas fueron colocadas al azar en parcelas de tratamiento.

Mediante el uso de yeso para la enmienda de lodos rojos se obtuvo una disminución del pH, y una disminución de las concentraciones de los iones Na, Al y Fe, logrando un aumento de la disponibilidad de iones Ca y Mg.

Courtney, Mullen y Harrington (2008) evaluaron el éxito del proceso de la revegetación mediante el uso del residuo de la bauxita, tratando tres sitios para la revegetación en donde comparó el uso del yeso con arena y fertilizante. En uno de estos casos se le agregó arena, yeso y fertilizante, y en el resto se les agregó solamente arena y fertilizante, la zona de la siembra fue de 60 m² aproximadamente, en los tres casos trabajaron con las plantas *Agrostis stolonifera*, *Festuca longifolia*, *Holcus lanatus*, *Lolium perenne*, *Trifolium repens* y *Trifolium pratense*, posteriormente determinaron las condiciones químicas y físicas del suelo y las plantas, obteniendo una disminución significativa del pH en los 4 años de lixiviación, en el caso de la concentración de iones sodio, aluminio, magnesio y manganeso hubo una mayor disminución de la concentración de estos iones en la muestra de suelo que se le agregó yeso, además de la mejora de la biodisponibilidad de nutrientes en los tres casos permitiendo el desarrollo exitoso de las especies en el replantado.

Courtney y Mullen (2009) usaron la germinación de distintas semillas para determinar su rendimiento usando el lodo rojo como sustrato para la revegetación, tomando en cuenta los parámetros que influyen en su desarrollo, tales como la inhibición del crecimiento de las semillas usando las especies de *Lolium perenne*, *Lattuca sativa*,



Trifolium pratense y *Lepidium sativum*. El rendimiento del crecimiento de las semillas se evaluó en 7 diferentes enmiendas de los residuos de bauxita con yeso mediante la germinación y la prueba de la elongación de la raíz, y también evaluaron la concentración de los iones Al, Mg, Na y Ca, demostrando que al aumentar la concentración de yeso existe una mejora en las condiciones de crecimiento y de la biodisponibilidad de los elementos para el desarrollo vegetativo. El crecimiento de las semillas en función a los parámetros químicos y las especies utilizadas demostró que *Lepidium sativum* y *Lattuca sativa* son las más sensibles a las propiedades inhibitorias que presentan los residuos y la *Lolium Perenne* es la más tolerante de las especies estudiadas.

Suresh y Chandra (2010) realizaron un estudio piloto en el sur de la India, con el objeto de poner en marcha un proceso de rehabilitación mediante la creación y el mantenimiento de espacios vegetativos, mediante la mejora de las propiedades fisicoquímicas de los residuos de bauxita a través del uso de viveros, en donde trabajaron con árboles y hierbas. Las enmiendas que se realizaron fueron con yeso, estiércol, y fertilizante vegetal, trabajando con 3 proporciones diferentes, donde determinaron que la combinación de 55% de lodo rojo, el 25% de estiércol, el 15% de yeso, y el 5% de fertilizante vegetal logra disminuir de manera eficiente los niveles de pH y aumentaron los micronutrientes para el desarrollo sustentable de las plantas.



METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En la realización de este estudio se utilizaron muestras provenientes de la empresa Bauxilum, tomadas directamente de la laguna de lodos rojos, ubicada en la zona industrial de matanzas al oeste de Ciudad Guayana, Edo Bolívar (figura 4).

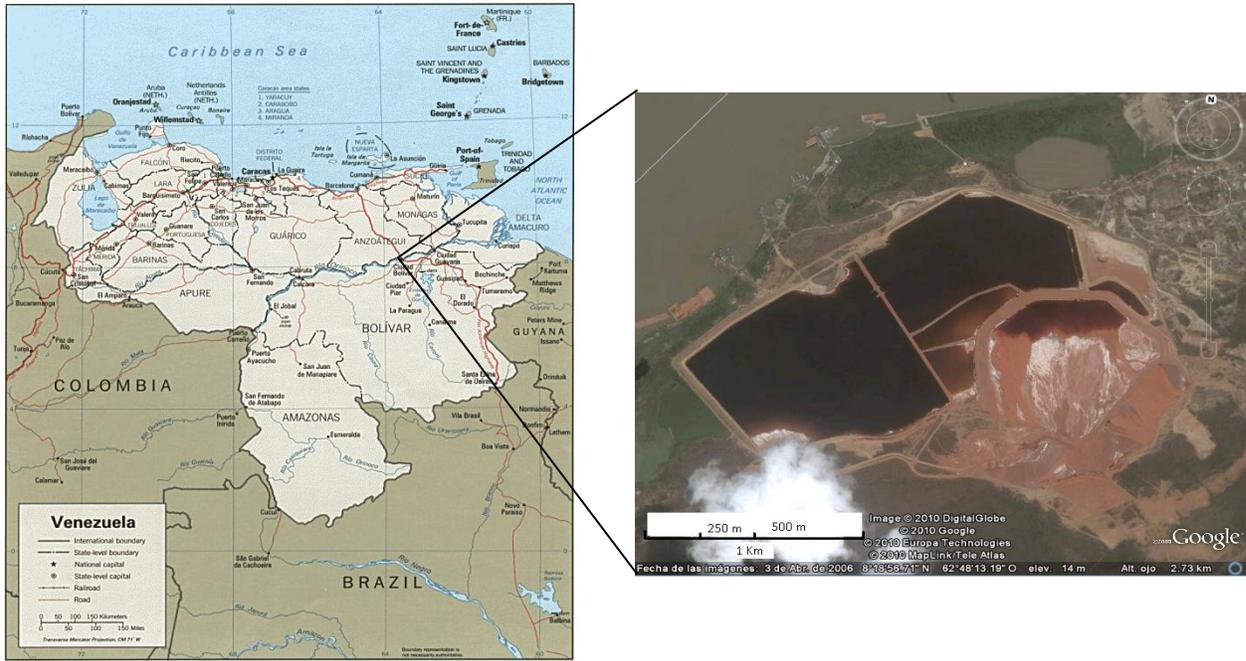


Figura 4. Ubicación de las tomas de muestras en la empresa Bauxilum

La siguiente investigación utilizó mezclas de lodo rojo, yeso (10%) y arena (90%) para lixiviar con agua desionizada. Al agua que percola a través de estos tres medios, se le determinó el grado de toxicidad mediante el proceso de germinación de la semilla de tomate, y se le midió el pH, conductividad y concentración de cationes.

En una columna de vidrio de 25 cm de largo y 2cm de diámetro se colocó una mezcla homogénea de arena, yeso y lodo rojo, esta mezcla fue en proporciones de arena de 90 % y 10 % de la mezcla de lodo rojo (LR) y yeso (Y) donde estas dos últimas tienen 5 variaciones (100%LR, 0% Y; 75%LR, 25% Y; 50%LR, 50%Y; 25%LR, 75%Y; 0%LR, 100%Y) (Goen, Kuruvilla, y Peter, 1989).



El montaje realizado permitió simular la pluviosidad anual de la zona muestreada para así poder lixiviar la mezcla de lodo rojo, yeso y arena, mediante un goteo de agua de manera constante e ininterrumpida, que percoló por la mezcla, permitiendo recolectar el agua lixiviada como muestra la figura 5.

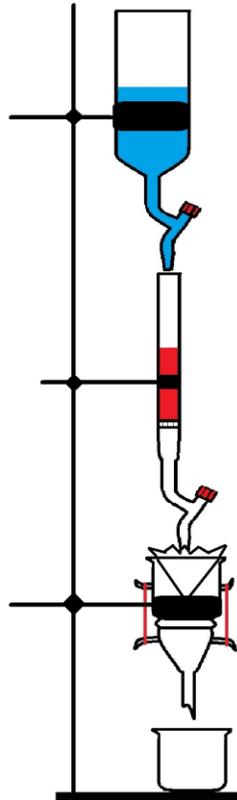


Figura 5. Montaje de sistema de lixiviación de los lodos rojos, arenas y yeso.



Este montaje contó con un sistema de filtración como muestra la figura 6 y 7 para evitar que pasaran los sólidos en la solución final, de donde se recolectaron alícuotas cada 40 mL.



Figura 6. Placa de vidrio con papel de filtro



Figura 7. Montaje de filtro de pliegue con placa de micropore y papel de filtro de milipore.



Posteriormente se analizó cada una de las distintas alícuotas para determinar la concentración de iones (Na, Ca, Mg, K) por EAA (Espectrometría de Absorción Atómica) y EEM (Espectrometría de Emisión Atómica), nivel de pH y conductividad, determinando cómo varían, estos ensayos fueron por duplicado para evaluar su reproducibilidad.

El equipo Absorción y Emisión Atómica (Perkin-elmer-AAAnalyst 2000) fue utilizado para determinar los cationes presentes en los lixiviados de las distintas relaciones de lodo rojo y yeso (figura 8), con un patrón multielemental para disminuir el efecto matriz usando patrones Merck de 1000 ppm de Ca, Na, Mg y K, y diluidos en función del límite de detección.



Figura 8. Absorción y Emisión Atómica (Perkin-elmer-AAAnalyst 2000)

Seguidamente fueron graficados los niveles de pH, conductividad y concentración de cationes vs los volúmenes descargados de los lixiviados.

Después de haber obtenido los resultados de los análisis químicos, fueron usados estos lixiviados para el proceso de germinación de las semillas de tomate



(*Lycopersicon esculentum*) en una capsula de petri, teniendo cuatro muestras consideradas como blanco con agua desionizada y el resto con las fracciones de las aguas lixiviadas de las distintas alícuotas que provenían de las mezclas de arenas, yeso y lodo rojo, colocando 25 semillas por cada cápsula de petri que estuvieron rellenas con algodón, permitiendo que las semillas tengan el suficiente espacio para el crecimiento previsto (EPA, 1996).

Las cápsulas de petri estuvieron colocadas con una ligera inclinación para facilitar el crecimiento lineal de la raíz, en el proceso de germinación de las semillas, ellas fueron incubadas en la oscuridad hasta que al menos el 65 por ciento haya germinado, teniendo un ambiente controlado capaz de mantener una temperatura uniforme de 25 ± 1 ° C (EPA, 1996).

Posteriormente a los 7 días fueron contadas las semillas germinadas y la longitud de las raíces mediante el escaneo de las semillas usando el programa ImageJ. (Courtney y Mullen, 2009).

Seguidamente se procedió a determinar el porcentaje relativo de la germinación de la semilla (RSG “Relative Seed Germination”), porcentaje del crecimiento relativo de la raíz (RRG “Relative Root Growth”), y el porcentaje del índice de germinación (GI “Germination Index”) como se muestra en las, ecuaciones 1, 2 y 3 (Courtney y Mullen G,2009):

$$\%RSG = \frac{\text{número de semillas germinadas en los residuos de extracción}}{\text{número de semillas germinadas en el control}} \times 100$$

Ecuación 1. Porcentaje relativo de la germinación de la semilla



$$\%RRG = \frac{\text{longitud de la raíz media de residuos de extracción}}{\text{longitud de la raíz media en el control}} \times 100$$

Ecuación 2. Porcentaje del crecimiento relativo de la raíz

$$\%GI = \frac{RSG \times RRG}{100}$$

Ecuación 3. Porcentaje del índice de germinación

Los gráficos de las %RSG, %RRG y %GI vs las alícuotas lixiviadas permitieron determinar el grado de toxicidad de las distintas relaciones de yeso, arena y lodo rojo en comparación con la muestra con agua desionizada, y determinar cuál de las distintas relaciones de yeso, lodo rojo y arena es la más adecuada para el proceso de vegetación.



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de los lixiviados del lodo rojo

Las propiedades químicas de las soluciones en contacto con el lodo rojo cambian cuando lo mezclan con yeso, y las variaciones que presentan son significativas en cuanto al pH, conductividad, concentración de cationes y el efecto en la germinación de las semillas de tomate.

Fueron realizados un conjunto de análisis para determinar las diferentes características de los lixiviados, procedentes de las distintas mezclas entre lodo rojo y yeso que representan el 10% y la arena un 90% de la mezcla, estos análisis se realizaron por duplicado para garantizar su reproducibilidad.

A continuación se presentan las variaciones del pH de las distintas mezclas de lodo rojo con yeso en función a los parámetros.

Análisis del pH en los lixiviados del lodo rojo

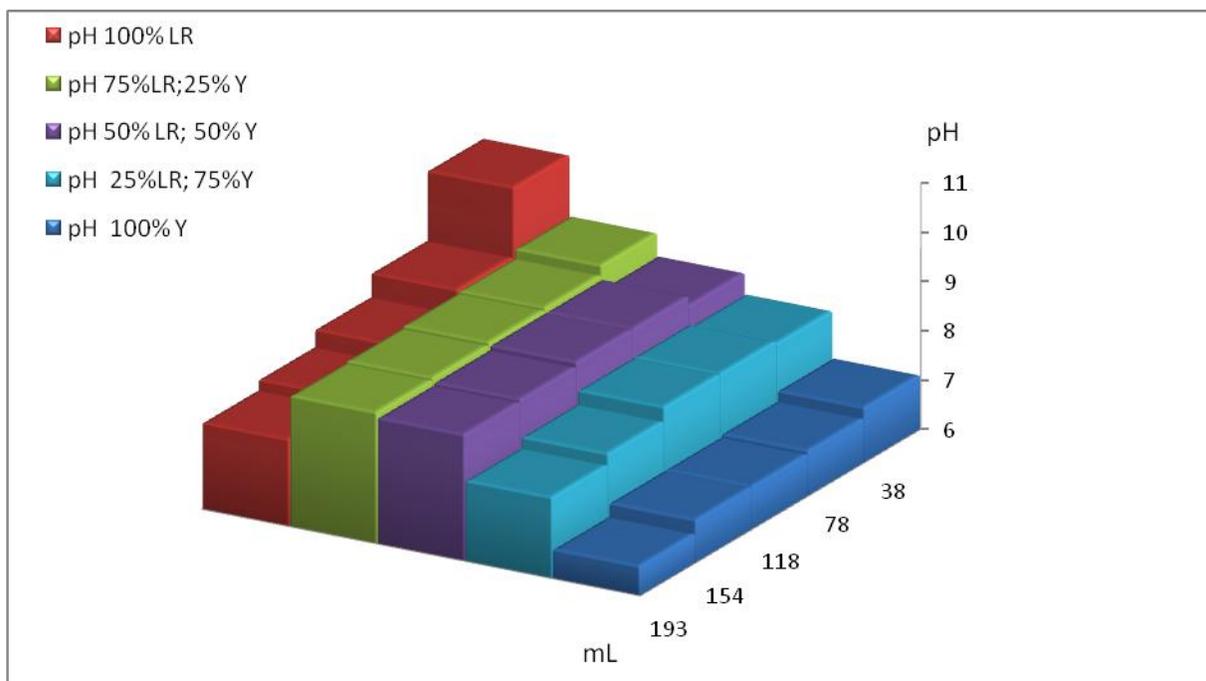


Figura 9. pH en las distintas variaciones de lodo rojo y yeso en función del volumen de lixiviados.

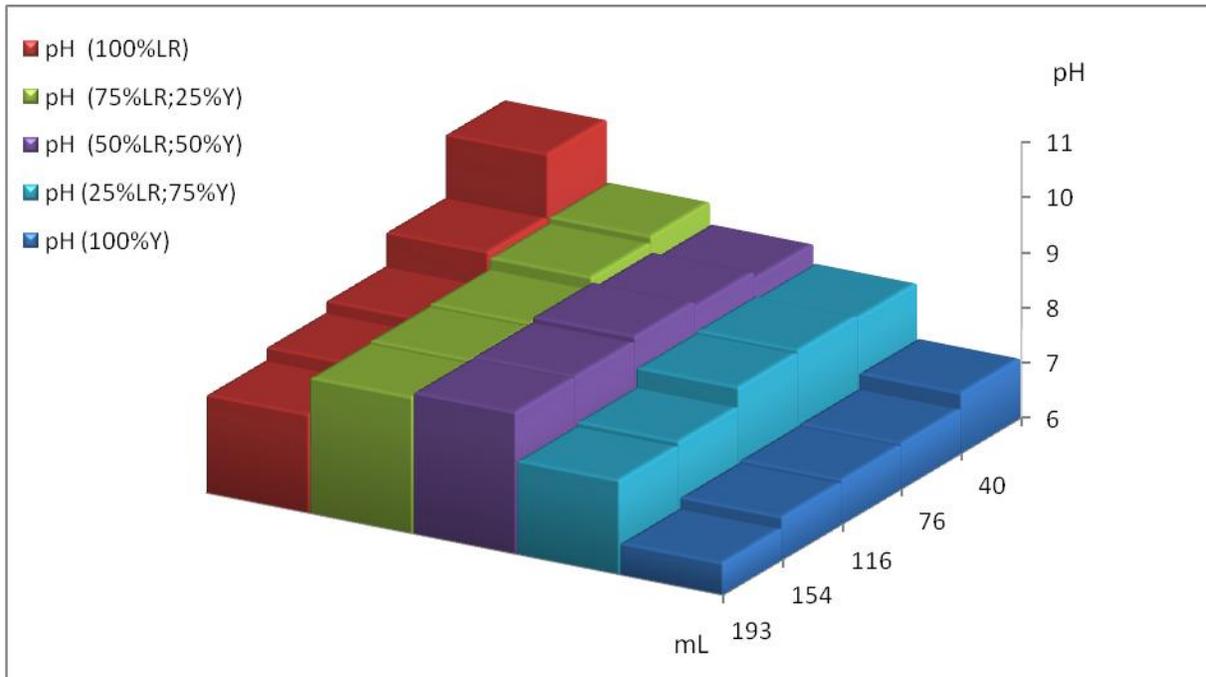


Figura 10. pH en las distintas variaciones de lodo rojo y yeso en función del volumen de lixiviados (réplica).

En las figura 9 y 10 muestran las variación del pH en los lixiviados provenientes de las distintas combinaciones de lodo rojo y yeso, las cuales presentan cuando la mezcla es 100% lodo rojo tienen un alto pH en los primeros eluatos, siendo esto una característica inherente de los residuos de bauxita.

A medida que fue simulado el sistema de pluviosidad en la mezcla de lodo rojo y arena va ocurriendo una disminución de los niveles de pH observándose en los primeros 80mL un descenso del pH de manera más pronunciada de 10,2 a 8,2 y después de 150 mL mantiene un comportamiento constante del pH entre 8,3 y 7,9, siendo esto indicativo de la dilución de la muestra, a consecuencia del lavado con el agua desionizada que pasa por el medio.

Cuando fueron realizadas las enmiendas con yeso se observó que los valores de pH disminuyen desde el inicio del proceso de lixiviación a medida que la proporción de este aumenta, esto es debido a que disminuye la influencia que genera el lodo rojo en la mezcla.



La disminución del pH en el sistema ocurre por el intercambio catiónico, entre el calcio del yeso y el sodio intercambiable del lodo rojo, formándose sulfato de sodio, esta nueva sal es más soluble y fácil de extraer del medio (Courtney y Mullen, 2009).

En las mezclas analizadas el alto valor de pH es relacionado directamente con la proporción de lodos rojos. Al aumentar el volumen de lixiviados el valor de pH tiende a ser constante indiferentemente del porcentaje de lodo rojo presente, esta tendencia se mantiene como puede verse en las figura 9 y 10.

En aquellos casos en los que es trabajado con yeso exclusivamente, observamos un pH casi constante entre 6,5 y 7.

Análisis de la conductividad en los lixiviados del lodo rojo

En las mezclas de 100% lodo rojo se obtuvieron valores de 4,3 mS/cm y con mezclas de 100% yeso valores de 2,8 mS/cm. En los casos de las distintas mezclas de lodo rojo con yeso a los 40 mL de lixiviado se obtuvo un incremento en la conductividad por encima de 4,3 mS/cm como es apreciado en la figura 11 y 12.

Este incremento de la conductividad a los 40 mL es consecuencia de la reacción de sustitución entre el calcio del yeso y el sodio intercambiable del lodo rojo. Las conductividades obtenidas fueron entre 6,5 y 7,6 mS/cm lo que nos indica una mayor interacción iónica, producto de la reacción de sustitución. A diferencia de las que poseen solamente lodo rojo o yeso donde no se genera ningún tipo de interacción o intercambio, prevaleciendo el efecto del lavado de las mezclas.

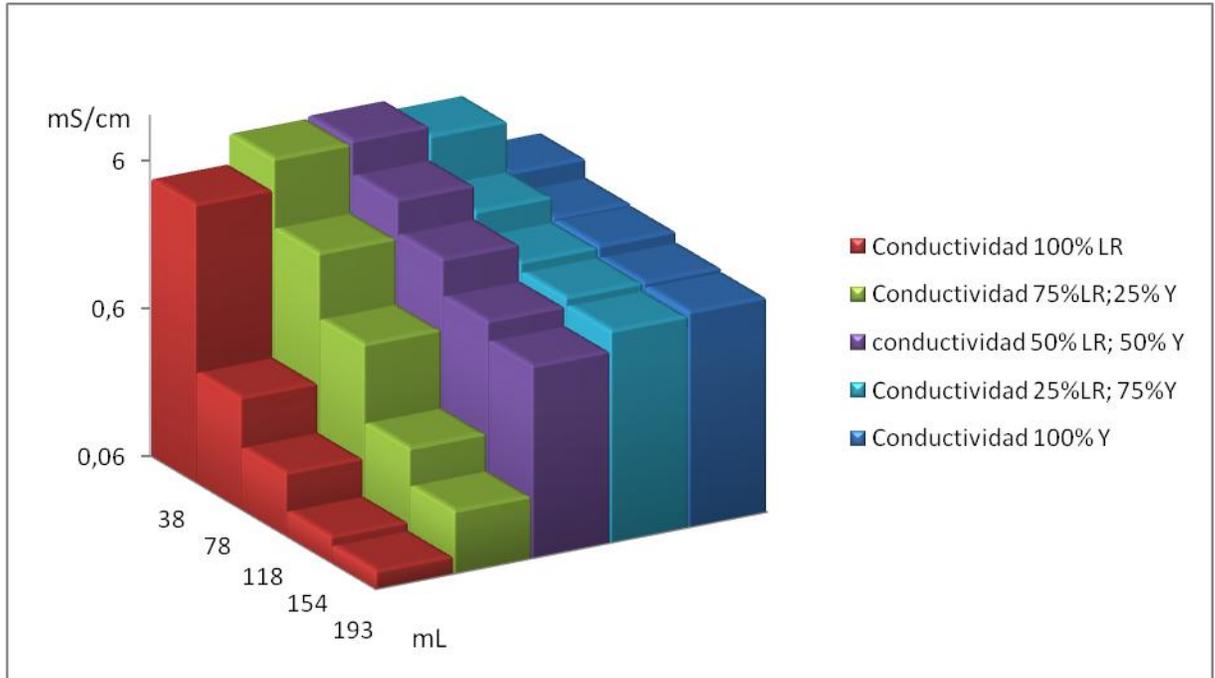


Figura 11. Conductividad de las distintas variaciones de lodo rojo y yeso en función del volumen de lixiviados

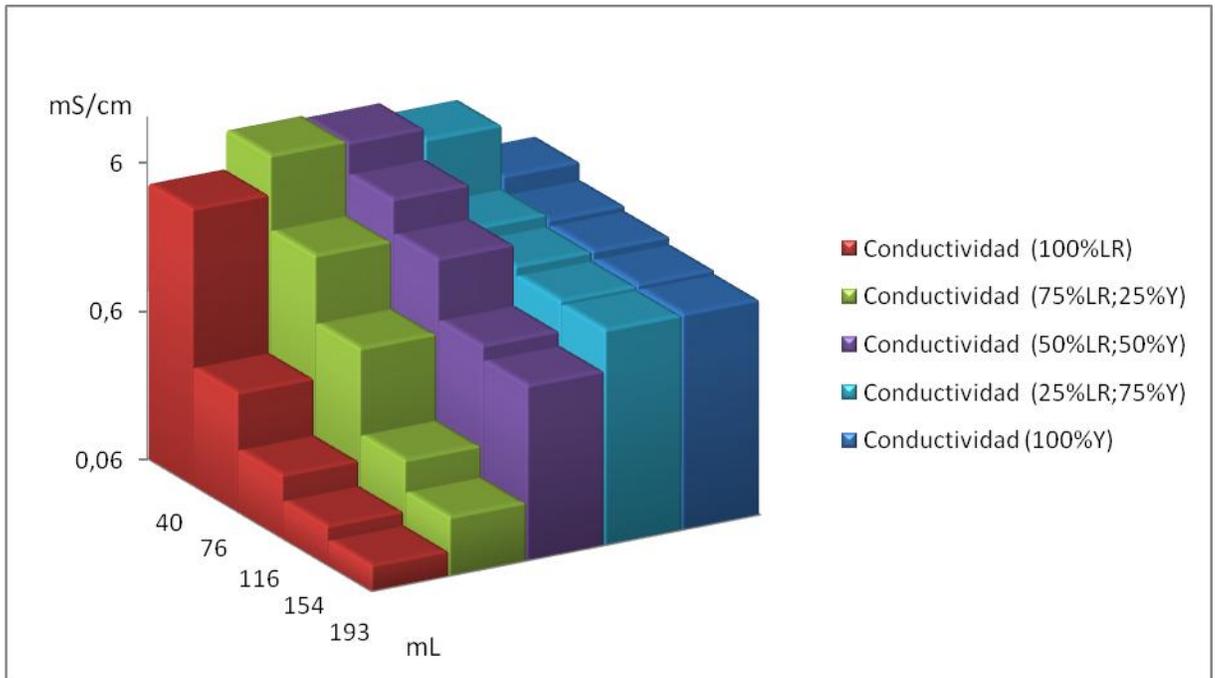


Figura 12. Conductividad de las distintas variaciones de lodo rojo y yeso en función del volumen de lixiviados (réplica).



En las figuras 11 y 12 es apreciado que el comportamiento de la conductividad tiene dos tendencias, y ambas están relacionadas con el contenido de lodo rojo. En las mezclas de 100% y 75% en lodo rojo se observó una tendencia al descenso del valor de la conductividad mostrando variaciones mucho menores a partir de valores de elusión superiores a 120 mL, esto ocurre a consecuencia del proceso de lavado en las mezclas. A partir de este volumen se mantiene la conductividad en un comportamiento constante que es acotado entre 0,2 a 0,4 mS/cm.

La conductividad en las mezclas que tienen 50 % y 25% en lodo rojo poseen, un descenso con menor pendiente a consecuencia del intercambio cationico entre sodio y calcio. Desde los 120 mL de lixiviados, la conductividad está dominada principalmente por la disolución del sulfato de calcio, tendiendo a un comportamiento constante entre 1,2 a 1,6 mS/cm.

Por otra parte cuando hay solo yeso la conductividad se mantiene aproximadamente constante a lo largo de los 200 mL lixiviados, con un leve descenso debido a la disolución.

El comportamiento de la conductividad en las distintas mezclas de lodo rojo y yeso se resume de la siguiente manera: Cuando la mezcla es 100% lodo rojo o 100% yeso la conductividad depende de los lavados. En las mezclas que contienen lodo rojo con yeso, la conductividad en los primeros 80mL de lixiviado es regida por el intercambio cationico entre el sodio y el calcio. Después de ese volumen la conductividad es controlada por el lavado de las mezclas separándose en dos grupos, de 100% a 75% en lodo rojo donde predomina el lavado del mismo y la otra de 50% a 0% de lodo rojo en la que predomina la interacción con él.

Análisis del Sodio en los lixiviados de las mezclas de lodo rojo

Las altas concentraciones de sodio obtenidas son una característica inherente al lodo rojo, en la tablas 5 y 6 se observa que la disminución de sodio es proporcional al porcentaje de lodo rojo, tomando en cuenta que a medida que disminuye el porcentaje del lodo rojo en las mezclas disminuye la concentración de sodio.

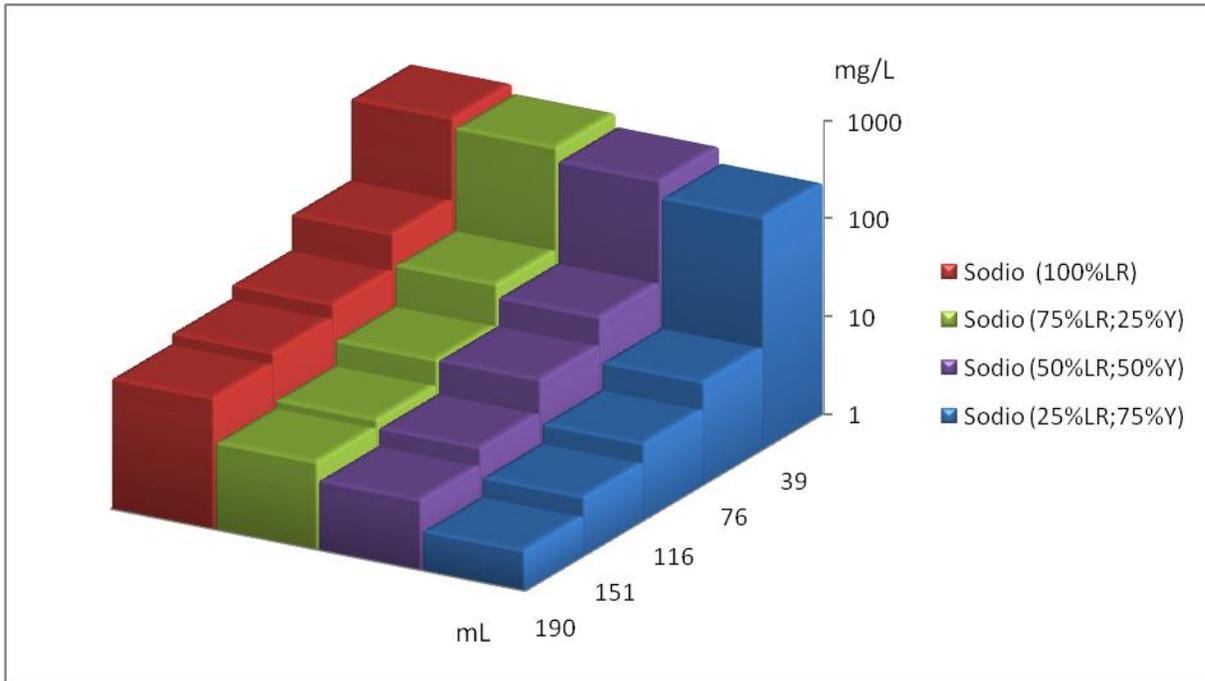


Figura 13. Concentración de sodio de las distintas variaciones de lodo rojo y yeso vs volumen.

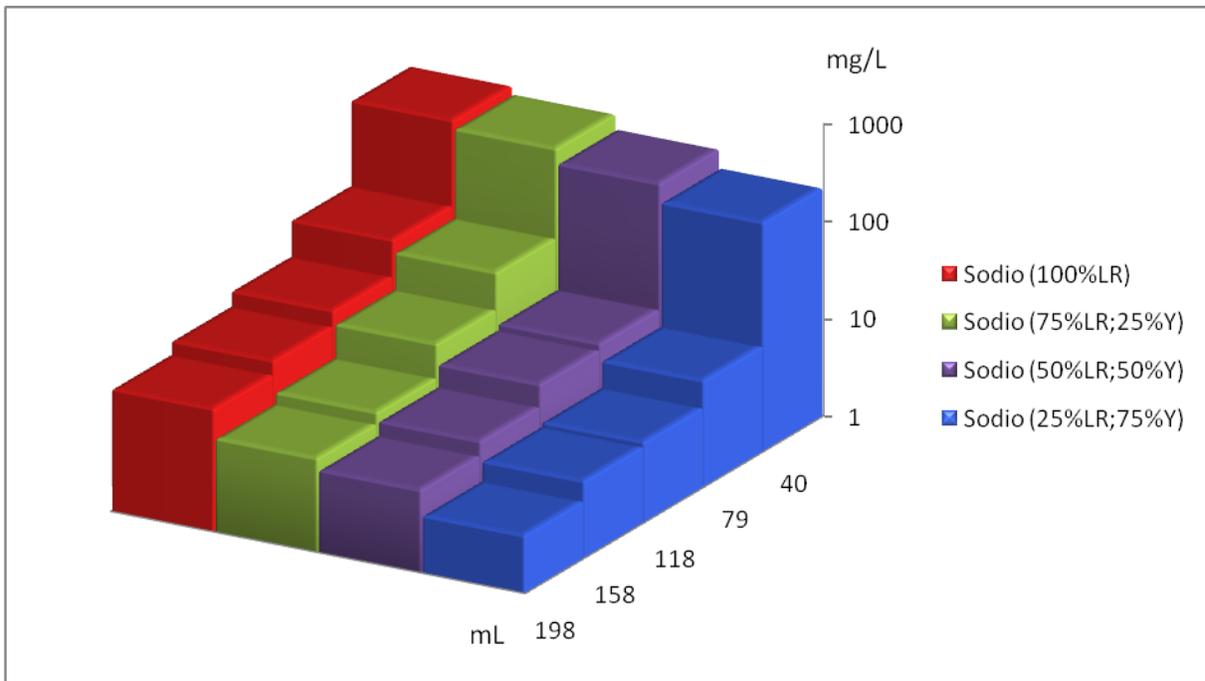


Figura 14. Concentración de sodio de las distintas variaciones de lodo rojo y yeso vs volumen (réplica).



Tabla 5. Concentración de Sodio en las distintas alícuotas

Alícuotas	Sodio(mg/L) (100%LR)	Sodio(mg/L) (75%LR;25%Y)	Sodio(mg/L) (50%LR;50%Y)	Sodio(mg/L) (25%LR;75%Y)
1	586,60	488,70	346,30	224,60
2	80,24	60,38	18,22	12,34
3	34,83	25,79	16,09	6,68
4	24,74	11,85	9,72	6,16
5	18,32	9,26	7,10	3,95

Tabla 6. Concentración de Sodio en las distintas alícuotas (replica)

Alícuotas	Sodio(mg/L) (100%LR)	Sodio(mg/L) (75%LR;25%Y)	Sodio(mg/L) (50%LR;50%Y)	Sodio(mg/L) (25%LR;75%Y)
1	586,60	473,90	349,30	239,50
2	87,70	43,18	32,32	11,34
3	38,48	16,71	17,02	6,10
4	28,30	9,49	7,91	4,00
5	22,38	8,06	5,32	2,62

Es de esperar que la muestra que tienen 100% de lodo rojo y 0% de yeso es la que tiene mayor concentración de sodio llegando a 586,60 mg/L en los primeros 40 mL, y a medida en que aumentan los niveles de pluviosidad simulada en el medio ocurre una disminución progresiva de las concentraciones de sodio, asociada principalmente a que ocurre un lavado de la muestra llegando a concentraciones de 23 mg/L en aproximadamente 200mL.

En la medida que se realizaron las variaciones entre lodo rojo y yeso, ocurre una disminución de los niveles de sodio intercambiable presente en las primeras alícuotas como se observa en la figura 13 y 14. Esto es interpretado como un simple proceso de dilución. Para el caso de 100% yeso, las soluciones no presenta sodio.

Análisis del calcio de los lixiviados del lodo rojo

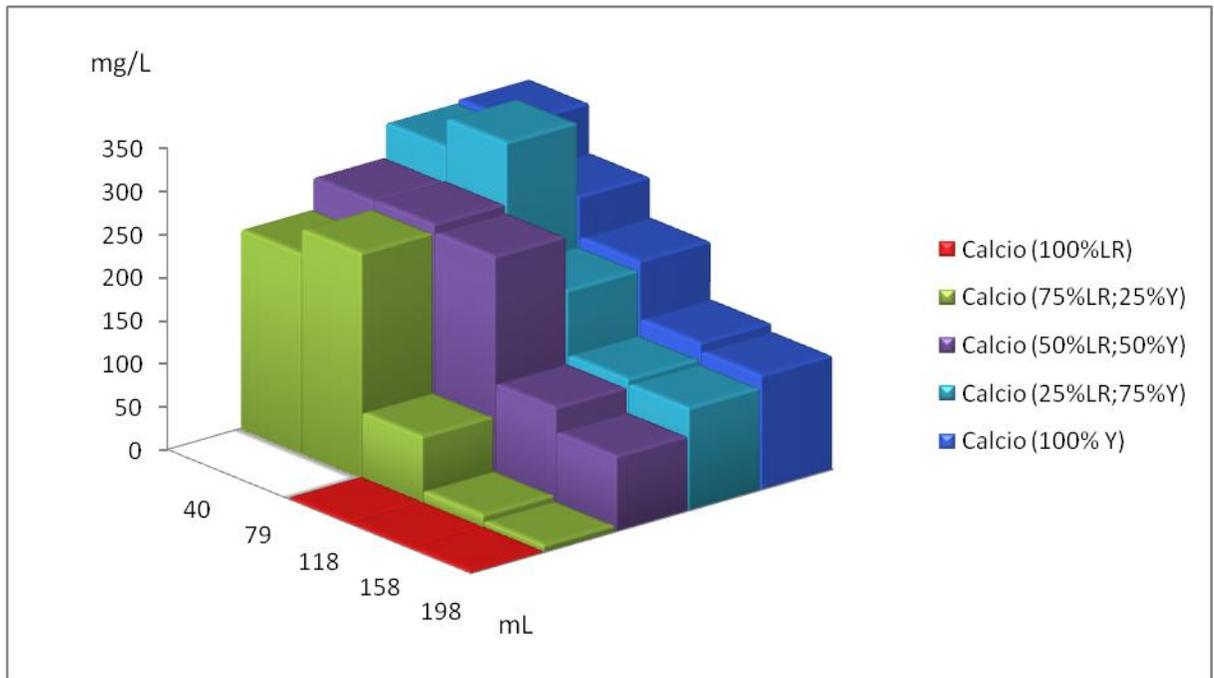


Figura 15. Concentración de calcio de las distintas variaciones de lodo rojo y yeso en función del volumen lixiviado.

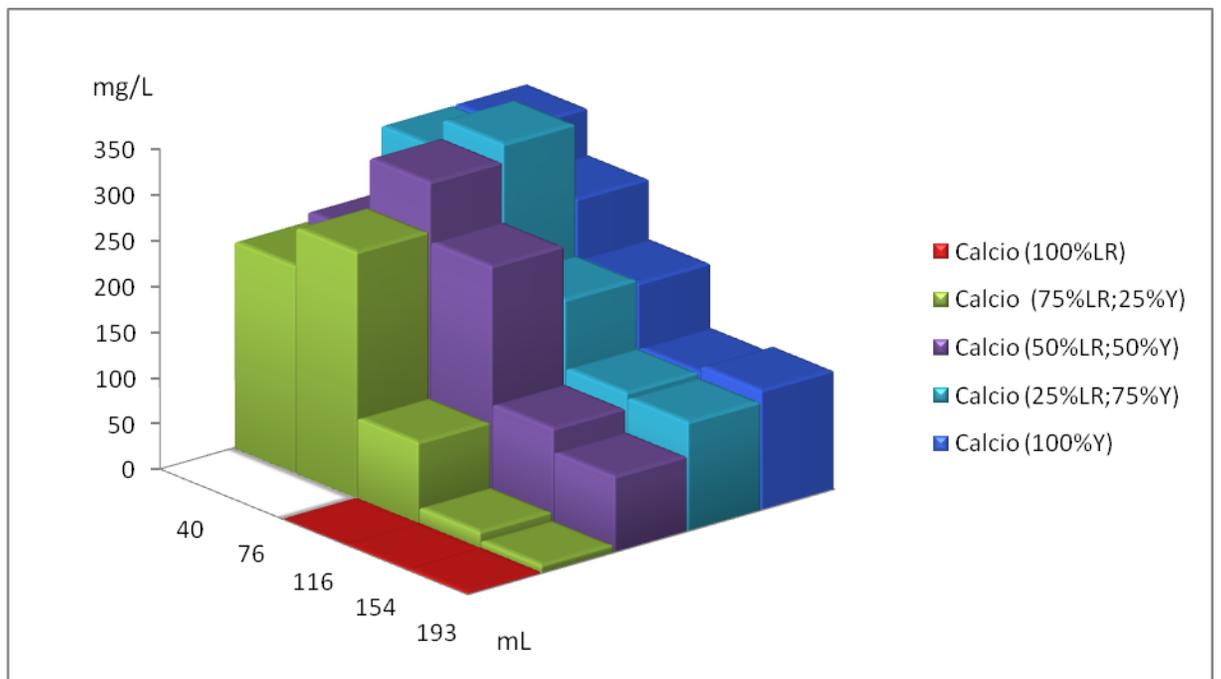


Figura 16. Concentración de calcio de las distintas variaciones de lodo rojo y yeso en función del volumen lixiviado (replica).



En cuanto al análisis de calcio puede observarse tres tendencias diferentes, que están representadas por las mezclas que contienen lodo rojo, yeso y lodo rojo, y yeso; como se observa en las figura 15 y 16.

Las mezclas de 100% lodo rojo presentan bajas concentraciones de calcio alrededor de 2 mg/L a 3 mg/L, esta presencia de calcio aparece a los 120 mL de volumen lixiviado como se aprecia en las figura 15 y 16.

En el caso de las mezclas que contienen yeso y lodo rojo tuvieron un incremento de las concentraciones de calcio (260 mg/L a 312 mg/L) a los 40 mL y 80 mL de lixiviados. Esto se asocia directamente a la sustitución del ion sodio por el ion calcio en el yeso, este proceso de aumento de la concentración de calcio se mantiene hasta que los niveles de sodio intercambiable disminuyen, posteriormente la concentración del Ca disminuye por la disolución del yeso y el lavado de las muestras.

El aumento de la concentración de calcio no ocurrió en las mezclas que contienen únicamente yeso, ya que no sucede el intercambio iónico entre el sodio y el calcio, el único proceso que podemos apreciar en esta parte de las gráficas es el descenso de la concentración de calcio debido a la dilución por lavados.

Análisis de magnesio de los lixiviados del lodo rojo

El análisis de este elemento en los lixiviados estuvo limitado por el límite de detección de la técnica, que no permitió registrar la presencia de magnesio en dichos lixiviados.

Análisis de potasio de los lixiviados del lodo rojo

El comportamiento del potasio, en las mezclas de lodo rojo y yeso, no presenta una tendencia clara que permita asociarlo con alguno de los compuestos estudiados. La distribución del potasio no es uniforme en las muestras, sin embargo se observa un incremento a medida que aumenta el volumen de los lixiviados en los casos donde



existe un mayor contenido de yeso (mayor o igual al 75% de yeso) como se muestra en la gráfica 17 y 18.

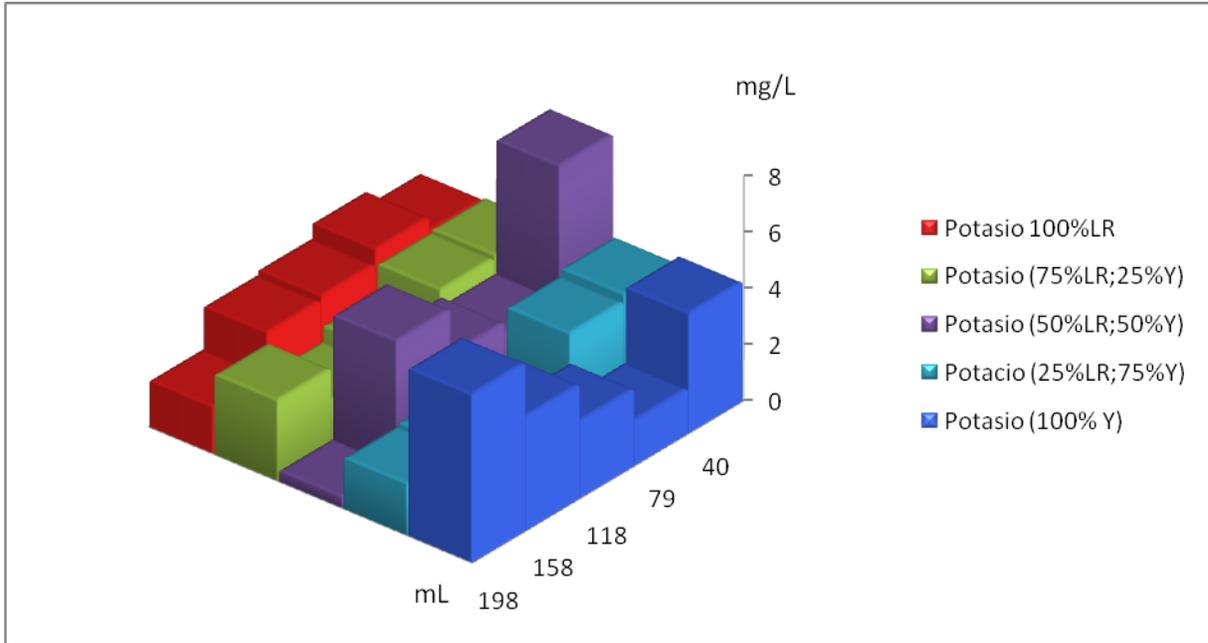


Figura 17. Concentraciones de potasio de las distintas variaciones de lodo rojo y yeso en función del volumen lixiviado.

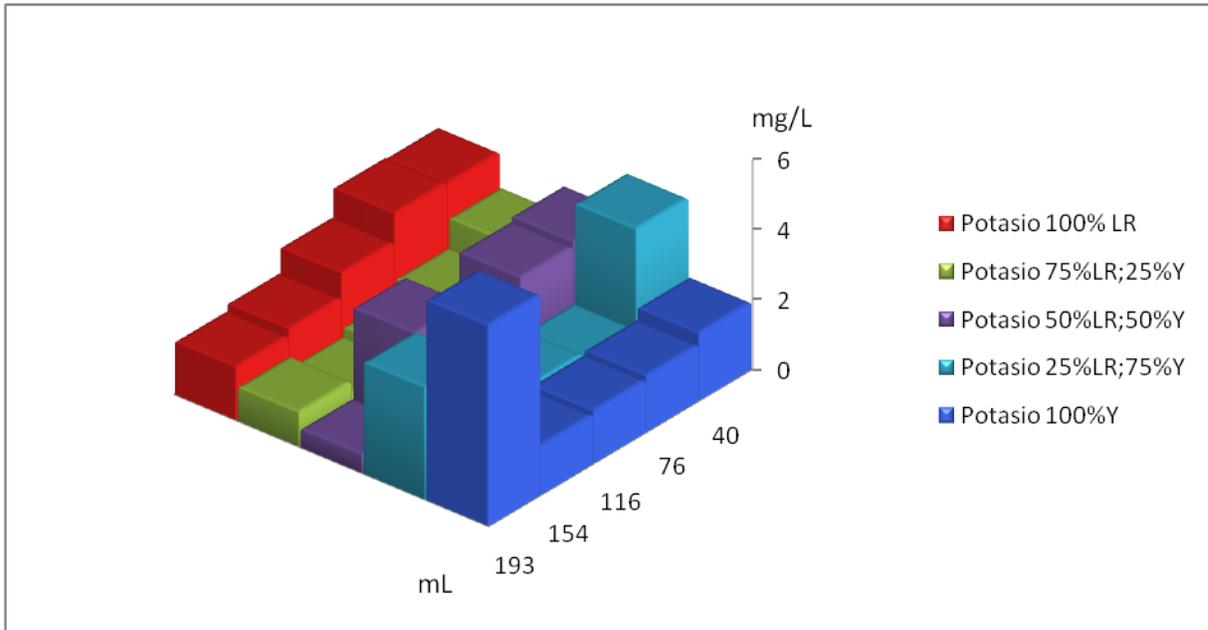


Figura 18. Concentraciones de potasio de las distintas variaciones de lodo rojo y yeso en función del volumen lixiviado (réplica).



Análisis del proceso de germinación de la semilla *Lycopersicon esculentum* (tomate)

En esta parte de la investigación se procedió a realizar la germinación de las semillas *Lycopersicon esculentum* (tomate) con las distintas mezclas de lixiviados de lodo rojo y yeso, este ensayo fue por duplicado trabajando con un total de 1250 semillas, realizando el análisis del porcentaje de germinación de la raíz (% RSG), porcentaje de elongación de la raíz (% RRG) y el índice de germinación (IG) como se presenta a continuación.

Porcentaje relativo de la germinación (%RSG)

Se realizó el análisis del porcentaje relativo de la germinación de la semilla en el cual fue considerado como germinado, la presencia de un brote en la semilla sin tomar en cuenta el tamaño de la raíz.

Para determinar el porcentaje de germinación de la semilla de tomate se utilizó una capsula de petri empleando algodón como sustrato para soportar las semillas. Este montaje de semillas fue realizado por cada una de las alícuotas de los lixiviados de las mezclas realizadas.

Para determinar el %RSG se aplicó la ecuación 1 en un conjunto de semillas sobre una germinación de control, usando el mismo soporte, semilla y regando con agua desionizada en lugar de los lixiviados provenientes del lodo rojo enmendado con yeso como elemento para la germinación (apéndice 2).

$$\%RSG = \frac{\text{número de semillas germinadas en los residuos de extracción}}{\text{número de semillas germinadas en el control}} \times 100$$

Ecuación1. Porcentaje relativo de la germinación de la semilla

Con estos dos resultados se procedió a determinar el %RSG que es una comparación entre los valores de las muestras de control y las rociadas con los



lixiviados del lodo rojo enmendados con yeso, permitiendo obtener los resultados de la tabla 7.

Tabla 7. Porcentaje relativo de la germinación de la semilla *Lycopersicon esculentum* (tomate)

% RSG	Alícuota 1	Alícuota 2	Alícuota 3	Alícuota 4	Alícuota 5
100% LR(1)	33%	100%	88%	100%	100%
100% LR(2)	75%	100%	100%	100%	100%
75%LR;25%Y(1)	46%	100%	100%	100%	100%
75%LR;25%Y(2)	38%	100%	100%	100%	100%
50%LR;50%Y(1)	96%	100%	96%	100%	79%
50%LR;50%Y(2)	96%	100%	100%	96%	88%
25%LR;75%Y(1)	88%	96%	96%	100%	100%
25%LR;75%Y(2)	75%	100%	92%	92%	100%
100%Y(1)	100%	100%	96%	100%	88%
100%Y(2)	92%	92%	96%	100%	92%

En los casos en los cuales se trabajó exclusivamente con lodo rojo se aprecia que el porcentaje de germinación de la semilla fue bajo (figura 19), a diferencia de las otras muestras, esto ocurre a consecuencia del elevado pH obtenido para los lixiviados de lodo rojo el cual llega a tener valores de 11.

En las mezclas enmendadas de lodo rojo con yeso en donde se lograron valores mas bajos de pH, concentraciones menores de sodio intercambiable y presencia de calcio, se obtuvieron mejores condiciones de germinación en las semillas.

Hay que tomar en cuenta que a medida que disminuyen las concentraciones de lodo rojo y aumentan las de yeso, incrementan el porcentaje de germinación como se observa en la tabla 7 y en las figuras 20, 21 y 22.

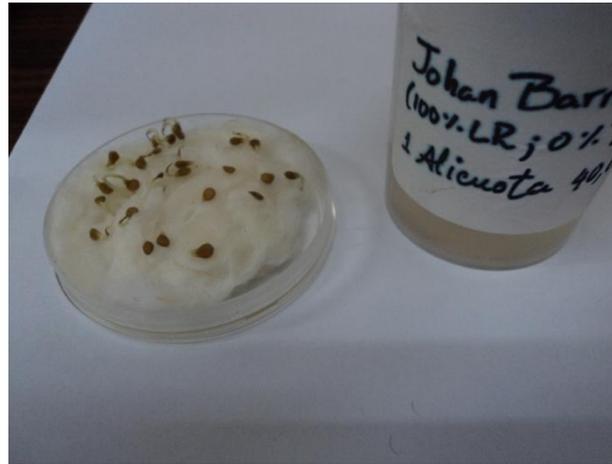


Figura 19. Semillas germinadas con muestras de 100% LR;0%Y (1era Alícuota)

En todas las mezclas de lodo rojo enmendadas con yeso después de eluir 40 mL se generan condiciones aptas para la germinación, obteniendo valores superiores al 85% de germinación, esto ocurre a medida que va aumentando la pluviosidad simulada del medio, logrando una mejora de las condiciones para la germinación. Por ejemplo, los valores el pH disminuyen de manera importante para valores de volúmenes de lixiviados a partir de 80 mL, se obtiene un pH entre 9 y 7, y donde adicionalmente disminuyen las concentraciones de sodio intercambiable generando mejores condiciones para la germinación.



Figura 20. Semillas germinadas con 75% LR;25%Y (1era Alícuota)



Figura 21. Semillas germinadas con 50% LR;50%Y (1era Alícuota)



Figura 22. Semillas germinadas con 25% LR;75%Y (1era Alícuota)

Porcentaje de Elongación de la Raíz (%RRG)

El Porcentaje de Elongación de la Raíz se obtuvo mediante el uso del programa ImagenJ, para esto fueron escaneadas las raíces de las semillas, determinando su longitud de manera digital, garantizando así una mejor medida de la raíz como lo muestra la figura 23.

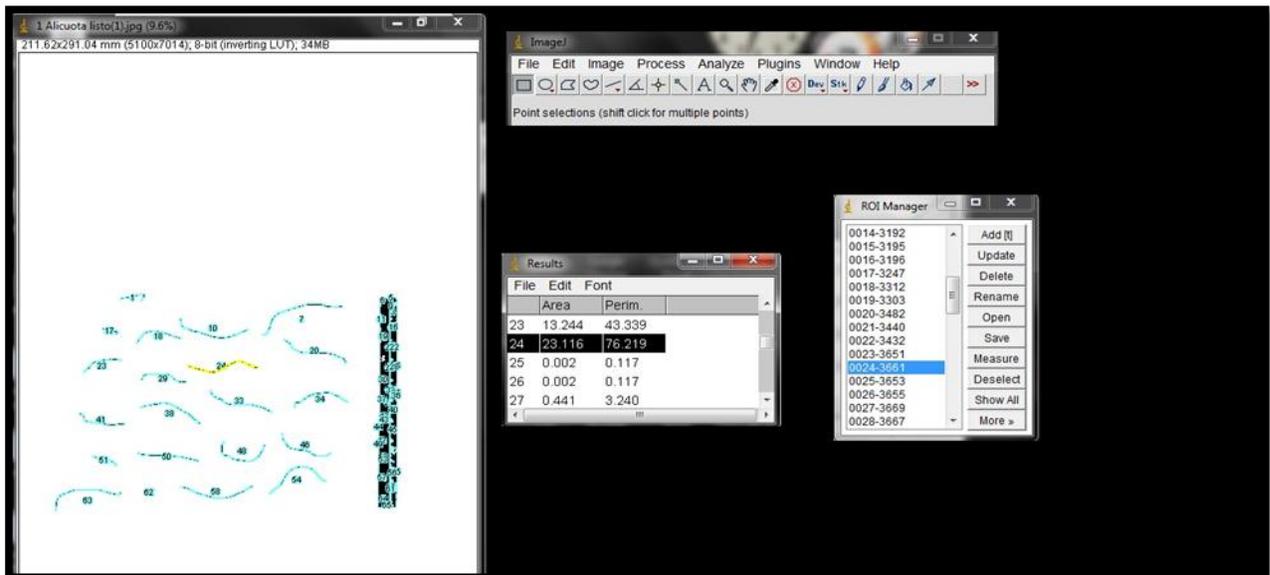


Figura 23. Uso del programa ImagenJ para la determinación de la longitud de las raíces.



Para poder obtener el porcentaje %RRG se aplicó la ecuación 2.

$$\%RRG = \frac{\text{longitud de la raíz media de residuos de extracción}}{\text{longitud de la raíz media en el control}} \times 100$$

Ecuación 2. Porcentaje del crecimiento relativo de la raíz

Para utilizar la ecuación 2 fue realizada una germinación de control usando el mismo soporte, semilla y regando con agua desionizada en lugar de los lixiviados provenientes del lodo rojo enmendado con yeso como elemento para la germinación (apéndice 6).

Con estos dos resultados se procedió a determinar el %RRG que es una comparación entre los valores de las muestras de control y las rociadas con los lixiviados del lodo rojo enmendados con yeso, permitiendo obtener los resultados de la tabla 8.

Tabla 8. Porcentaje del crecimiento relativo de la raíz de la semilla *Lycopersicon esculentum* (tomate)

% RRG	Alícuota 1	Alícuota 2	Alícuota 3	Alícuota 4	Alícuota 5
100% LR(1)	6,84%	82,94%	92,05%	86,38%	93,21%
100% LR(2)	10,90%	82,94%	92,05%	86,38%	93,21%
75%LR;25%Y(1)	18,31%	76,83%	85,89%	86,66%	96,45%
75%LR;25%Y(2)	20,38%	67,13%	81,32%	78,23%	78,21%
50%LR;50%Y(1)	32,46%	82,11%	43,37%	66,55%	43,68%
50%LR;50%Y(2)	64,31%	86,52%	75,98%	59,44%	30,99%
25%LR;75%Y(1)	61,31%	75,87%	33,25%	62,96%	52,96%
25%LR;75%Y(2)	51,85%	73,97%	85,38%	54,97%	54,53%
100%Y(1)	66,03%	64,21%	63,03%	56,34%	44,87%
100%Y(2)	47,94%	60,55%	68,59%	65,99%	34,79%



En los casos del porcentaje de elongación de la raíz se observó claramente la influencia inhibidora que tiene los lixiviados del lodo rojo sobre las semillas de tomate, obteniendo apenas un crecimiento cercano al 11 % (Figura 24 y 25; Tabla 8) aproximadamente a los 40 mL como se aprecia en la figura 8. En los casos de los lixiviados de lodo rojo enmendados con yeso, se observó una mejora progresiva, obteniendo intervalos de elongación del 19% al 65%, esto es asociado al incremento de las concentración que tiene los iones de calcio, la disminución del pH y la conductividad en el medio como se aprecia las figuras 20, 21 y 22.

Al analizar las enmiendas con lodo rojo y yeso en las últimas alícuotas, al igual que la que tiene exclusivamente yeso, se aprecia la clara disminución en el porcentaje de elongación de las raíces. Si hubiese un exceso de sulfato se genera inhibición en el crecimiento (Casanova, 2005), pero este no parece ser la causa, pues los valores de calcio que provienen del yeso son bajos.

El valor que tiene la longitud de la raíz para determinar la toxicidad del medio tiende a generar un error alto, ya que inciden diferentes variables asociadas como lo son: condiciones de humedad, iluminación, fluctuación de temperatura, flujo de aire y la germinación natural que garantiza la casa productora de la semilla.

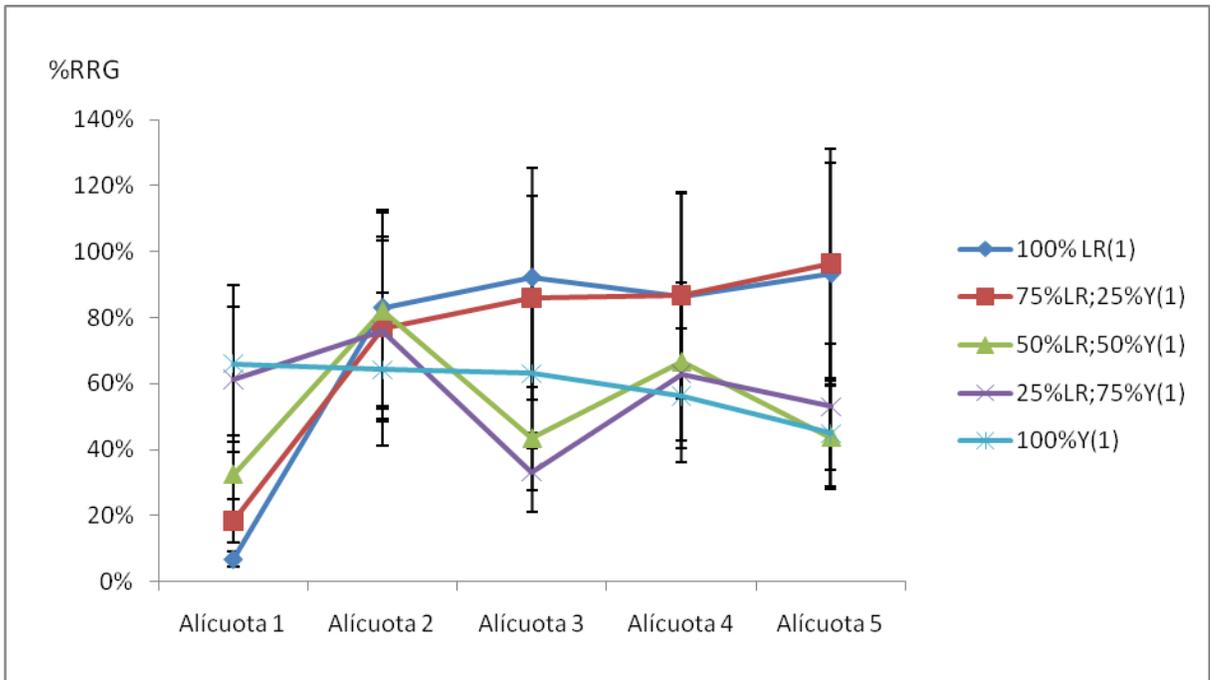


Figura 24. Porcentaje del crecimiento relativo de la raíz de la semilla *Lycopersicon esculentum* (tomate)

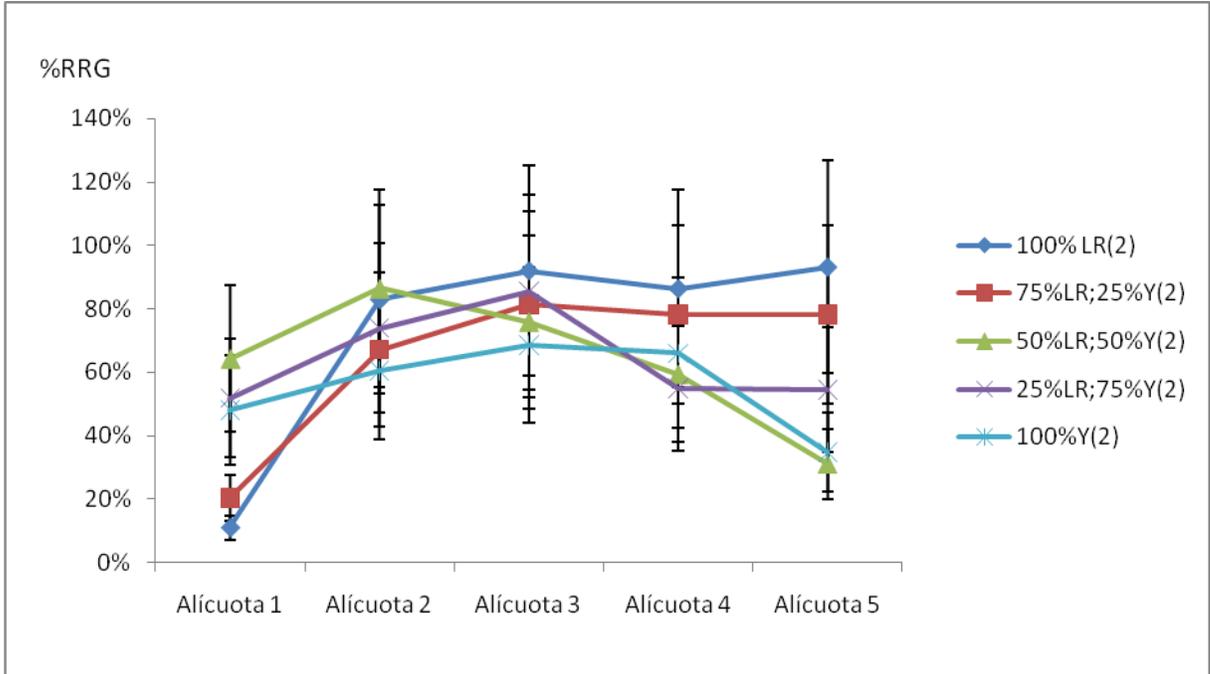


Figura 25. Porcentaje del crecimiento relativo de la raíz de la semilla *Lycopersicon esculentum* (tomate réplica).



En los diferentes blancos realizados se obtuvo una desviación estándar del 36% en la medición de la elongación de la raíz, como es apreciado en la tabla 9, esto es un indicativo claro de la variación que tiene el crecimiento de plantas, en la cual no existe un control que garantice que todas las plántulas crecerán igual.

Tabla 9. Blanco para la elongación de la semilla *Lycopersicon esculentum* (tomate)

Semillas	Blanco 1 (mm)	Blanco 2 (mm)	Blanco 3 (mm)	Blanco 4 (mm)
1	41,17	66,68	74,69	36,42
2	76,20	56,88	52,80	46,47
3	75,63	40,01	27,51	78,95
4	61,08	41,44	45,99	72,33
5	72,28	46,65	72,90	59,85
6	47,58	54,00	58,28	50,93
7	74,01	41,67	44,88	39,64
8	96,73	28,27	38,89	42,80
9	81,71	42,38	39,43	19,93
10	42,21	32,52	89,85	15,59
11	51,32	15,61	59,09	82,54
12	86,36	72,41	41,42	40,33
13	48,71	53,12	46,61	63,22
14	42,47	57,58	100,65	44,68
15	38,40	41,96	44,69	35,73
16	73,49	31,24	49,34	58,61
17	46,46	45,58	42,12	36,50
18	33,52	36,06	79,12	68,26
19	58,42	57,93	60,42	52,27
20	38,83	64,73	49,18	40,45
21	29,06	43,27	54,07	39,08
22	40,02	34,37	41,53	44,83
23	68,32	36,13	43,94	65,03
24		47,96	33,03	61,31
25		23,09		
Promedio	57,56	44,46	53,77	49,82
Desv. Est	18,62	13,47	17,60	16,61
Promedio G.	46,77±16,58		ERROR	36,34%



El calcio es absorbido por las plantas en forma de catión divalente y es un componente estructural de la pared celular y por lo tanto es muy importante en la formación de nuevas células, por lo que su deficiencia se refleja en poco crecimiento de las plantas y tallos débiles, debido a que la pared celular tendría poco espesor. El calcio además permite el crecimiento de la función metabólica y división de las células y de manera simultánea promueve la síntesis de proteínas (Casanova, 2006).

El potasio tiene un comportamiento catalítico que colabora con el metabolismo de los carbohidratos y formación de almidón, síntesis proteicas, activación de varias enzimas y promoción del tejido meristemático (Casanova, 2005).

Los casos extremos, que solo poseen lodo rojo o yeso, muestran concentraciones de calcio, potasio o sodio adecuadas para el crecimiento de la raíz, para volúmenes de lixiviados superiores a 80 mL, de igual manera para las condiciones de pH, humedad y salinidad. Es importante tomar en consideración que indistintamente que ocurra el crecimiento de las raíces en estos casos, solo demuestra que se tienen las condiciones mínimas para que las semillas germinen, mas no se está realizando ningún tipo de enmienda o modificación para el beneficio o recuperación del lodo rojo.

Índice de Germinación (IG)

El índice de germinación es el producto (%RSG) y (%RRG), obteniendo un resultado que toma en cuenta estos dos parámetros sobre la semilla de tomate, para los distintos lixiviados (tabla 10).



Tabla 10. Porcentaje del índice de germinación de la semilla *Lycopersicon esculentum* (tomate)

% IG	Alícuota 1	Alícuota 2	Alícuota 3	Alícuota 4	Alícuota 5
100% LR(1)	4%	83%	81%	86%	93%
100% LR(2)	5%	100%	100%	97%	85%
75%LR;25%Y(1)	9%	70%	81%	78%	78%
75%LR;25%Y(2)	7%	77%	86%	87%	96%
50%LR;50%Y(1)	62%	87%	73%	59%	25%
50%LR;50%Y(2)	31%	85%	43%	64%	38%
25%LR;75%Y(1)	45%	71%	82%	55%	55%
25%LR;75%Y(2)	46%	76%	30%	58%	53%
100%Y(1)	48%	61%	66%	66%	30%
100%Y(2)	61%	59%	60%	56%	41%

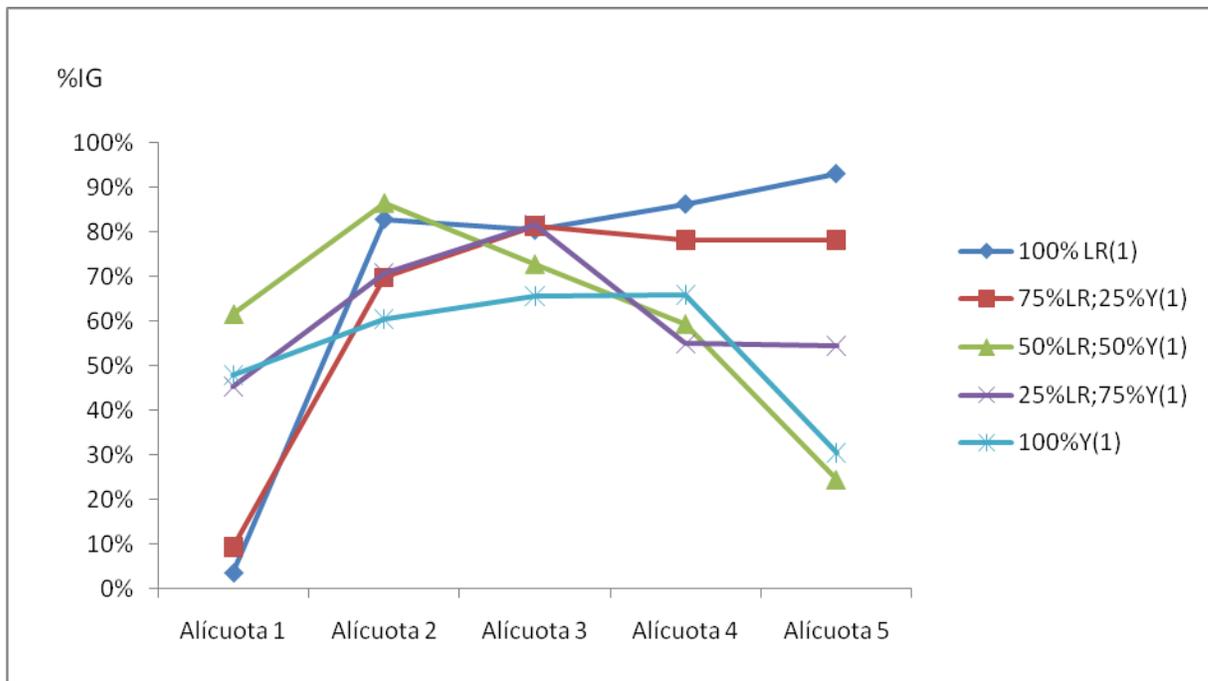




Figura 26. Índice de germinación de la semilla *Lycopersicon esculentum* (tomate)

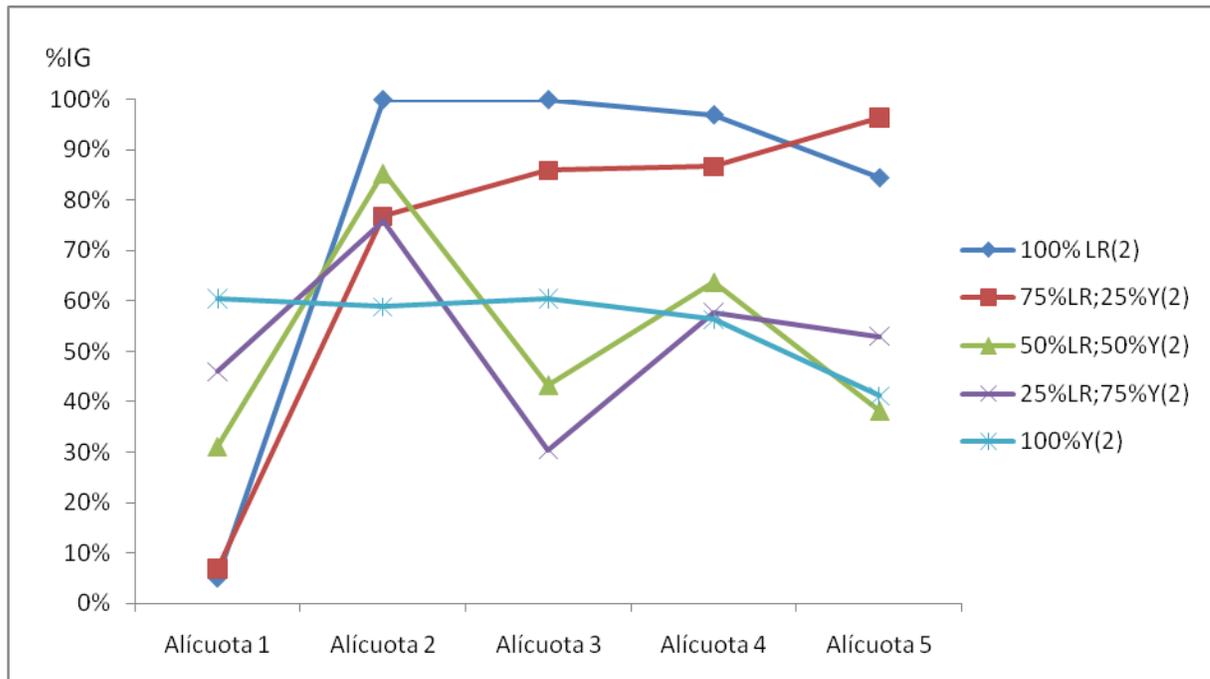


Figura 27. Índice de germinación de la semilla *Lycopersicon esculentum* (tomate replica)

El índice de germinación (%IG) fue más pobre (<10%) en los tratamientos de igual y superiores al 75% lodo rojo (figura 26 y 27), a diferencia de las otras las mezclas menores al 75% de lodo rojo que obtuvieron valores superiores al 31%, indicando la influencia favorable que tiene el uso del yeso para la mejora de las condiciones de germinación en los primeros 40 mL.

A medida que aumenta la cantidad de lixiviados en todos los casos se aprecia un aumento del %IG, específicamente a partir de los 80 mL, debido a que disminuye la influencia de la toxicidad en las semillas de tomate; pero a medida que se mantiene el goteo constante de agua desionizada va disminuyendo la concentración de calcio que favorece a la elongación y la germinación de la raíz, por ende se produce una



disminución del % IG aunado a la influencia toxica que genera cuando solo queda yeso predominantemente en el medio, lo que nos indica que a medida que va transcurriendo el tiempo tiene que haber un ente externo (materia orgánica, fertilizante, suelo, etc.) que aumente las concentraciones de iones favorables y que permita controlar la influencia del yeso para la germinación y el crecimiento de semillas.

Aunque él %IG aumente en los casos de solo hay lodo rojo, específicamente a partir de la segunda alícuota, no se toma en cuenta como enmienda para la vegetación aunque de manera indistinta genere las condiciones de germinación y los nutrientes mínimos para su crecimiento, hay que tomar en cuenta que lo que esta es ocurriendo es un lavado progresivo de los distintos factores tóxicos que en ella encontramos.

Si extrapolamos este proceso de índice de germinación en función a una escala real tomando en cuenta los niveles de pluviosidad de la zona de Guayana (apéndice 5) obtenemos que los 200 mL equivalen aproximadamente a 82 días (3 meses aproximadamente), las mezclas más eficientes para una germinación más estable son entre 75% lodo rojo y 25% yeso y la de 50% lodo rojo y 50% yeso, preferiblemente a partir de los 17 días a 33 días de lavado previo.



CONCLUSIONES

- Los residuos de bauxita poseen altos niveles de pH, sodicidad y salinidad, siendo estas propiedades inhibidoras de la germinación de las semillas y / o emergente de las plántulas, la mezcla entre arena, lodo rojo y el yeso disminuye los niveles pH y las concentraciones de sodio intercambiable generando mejores condiciones para la germinación.
- La mezcla del lodo rojo con yeso mejora las condiciones de los lixiviados, aumentando la germinación de semillas y elongación de las plántulas. Las concentraciones de calcio contenidos en los lixiviados por la presencia de yeso genera un mayor porcentaje de elongación de la raíz a los alcanzados en el tratamiento de control.
- Se demostró que al aumentar el volumen de lixiviación de las enmiendas de lodo rojo con yeso, se van perdiendo cationes esenciales para la germinación y cuando el porcentaje de yeso es mayor desmejoran las condiciones para la elongación de las raíces de las semillas de tomate.
- La relación optima para la germinación de las semillas de tomate se encuentra en las mezclas de 75%LR;25%Y y 50%LR;50%Y ya que a partir de los 40 mL de lixiviación son las que presentan un mayor grado de germinación (%RSG) y elongación (%RRG) , indicando un mayor índice de germinación.



RECOMENDACIONES

- Realizar el estudio a nivel de campo para evaluar su eficiencia en el desarrollo de plantas en medios reales, usando un suelo arenoso, incluyendo el aporte de materia orgánica para mejorar las condiciones de germinación y crecimiento de las semillas y plantas.
- Realizar pruebas con otros materiales para la neutralización y determinar el comportamiento del lodo rojo a nivel de pH; conductividad, e iones para el crecimiento vegetativo.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Altundogan S., Altundogan S., Tümen, F. and Bildik, M. (2000), "Arsenic removal from aqueous solutions by adsorption on red mud", *Waste Management* 20: 761-767 pp

Constitución de la República Bolivariana de Venezuela, publicada en Gaceta Oficial. (N° 36.860). (1999, Diciembre 30), [transcripción en línea]. Disponible: <http://www.tsj.gov.ve/legislación/constitución1999.htm> [consulta: 2010, Abril 13]

Courtney R. y Mullen G. (2009), Use of Germination and seedling Performance Bioassays for Assessing Revegetation Strategies on Bauxite residue. *Water Air soil pollt* 197: 15-22 pp.

Courtney R., Mullen G. y Harrington T. (2008), An evaluation of revegetation success on Bauxite Residue. *The journal of the society for ecological restoration international*, 1-6 pp.

Courtney R., y Timpson J. (2005), Nutrient status of vegetation grown in alkaline bauxite processing residue amended with gypsum and thermally dried sewage sludge- a two year *Field study*. *Plant and soil* 266: 187-194 pp.

Casanova, E. 2005. Introducción a la ciencia del suelo. Segunda Edición. Universidad Central de Venezuela- Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico. 482 pp.



Environmental Protection Agency (EPA) (1996), Ecological Effects Test Guidelines OPPTS 850.4200 Seed Germination/Root Elongation Toxicity Test, United States, revention, Pesticides and Toxic Substances (7101).

Glenister D. and Thornber M. (1985). Alkalinity of red mud and its application for the management of acid wastes. *Chemical* 85: 100–113pp.

Goen E., Kuruvilla M., y Peter W. (1989) leachate quality from gypsum neutralized red mud applied to sandy soils, *Water, Air, and Soil Pollution* 47: 1-18 pp.

Gupta V. y Ali I.(2002) Adsorbents for water treatment: lowcost alternatives to carbon, in: T. Hubbard (Ed.), *Encyclopedia of Surface and Colloid Science*, Marcel Dekker, 136–166 pp.

Menzies, N. W., Fulton, I. M., & Morrel, W. J. (2004). Seawater neutralization of alkaline bauxite residue and implications for revegetation. *Journal of Environmental Quality*, 33: 1877–1884 pp.

Palmer S. y Frost R. (2009) Characterisation of bauxite and seawater neutralised bauxite residue using XRD and vibrational spectroscopic techniques. Inorganic Materials Research Program, School of Physical and Chemical Sciences, Queensland University of Technology, Brisbane, QLD, Australia 44: 55-63pp.

Paramguru R., Rath P. y Misra V. (2005). Trends In red mud utilization - a review. *Mineral Processing & Extractive Metall* 26: 1-29pp

Pérez R., Guitián R., De Aza Pendás S., (1999). Obtención industrial de materiales cerámicos a partir de lodos rojos del proceso Bayer. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica. Vidrio*, 38 [3] 220-226 pp.



Proceso Bayer para la obtención de alumina, [copia en línea]. Disponible: http://www.aluar.com.ar/es/aluminio.asp?id_categoria=55 [consulta: 2010, Mayo

7]

Rubinos, D. (2008), Utilización de lodos rojos de bauxita en la contención e inactivación de residuos tóxicos y peligroso. Universidad Santiago de Compostela, La Coruña-España. 789 pp.

Summer R., Guise N. y Smirk D. (1993), Bauxite residue (Red Mud) increases phosphorus retention in sandy soil catchments in Western Australia *Fertilizer Research* 34: 85-94 pp.

Suresh C. y Chandra S. (2010), Rehabilitation of Red Mud Bauxite Wasteland in India, *Ecological Retoration*, 28: 12-14 pp.

TAA (The Aluminum Association). (2000). Technology roadmap for bauxiteresidue treatment and utilization. The Aluminum Association, Washington, D.C.

Salazar K. Secretary U.S. Department of the Interior, and Kimball S. Acting Director U.S. Geological Survey (2009), Mineral Commodity Summaries, United States Government Printing Office, Washington

Wong, J. W. C., & Ho, G. E. (1993). Use of waste gypsum in the revegetation on red mud deposits, *A greenhouse study. Waste Management & Research*, 11: 249–256 pp.

Wong, J. W.; Ho, G. E. (1988). Neutralization and cation dissolution characteristics of buxite refining residue. En: M. M. Varna and J. H. Johnson , Jr(eds.) Hazardous



and Industrial Waste Proc. Of the 20th Mid-Atlantic Industrial Waste Conf.
Howard Univ Washintong, D. C., 19-21 pp.

Wong, J. W.; Ho, G. E. (1995). Cation exchange behavior of bauxite refining residues from Western Australia. *J. Environ. Qual.* 24: 461-466pp

Woodard HJ, Hossner L, y Bush J. (2008) Ameliorating caustic properties of aluminum extraction residue to establish a vegetative cover, *Journal of Environmental Science and Health*, 43(10):1157-1166.



APÉNDICE

En los apéndices 1 y 2 se muestran los volúmenes obtenidos en las distintas mezclas de lodo rojo y yeso con su respectiva replica.

Apéndice 1. Volumen (Vol.) en las distintas variaciones de lodo rojo y yeso en función de los lixiviados.

Alícuotas	Vol. (mL) 100%LR	Vol. (mL) 75%LR;25% Y	Vol. (mL) (50%LR;50%Y)	Vol. (mL) 25%LR; 75%Y	Vol. (mL) 100%Y
1	40,05	39,87	40,77	35,94	37,85
2	79,38	78,72	77,65	75,17	78,33
3	118,29	123,12	115,93	112,58	118,30
4	157,93	161,28	155,08	150,08	154,23
5	197,63	201,27	192,60	187,98	193,24

Apéndice 2. Volumen (Vol.) en las distintas variaciones de lodo rojo y yeso en función de los lixiviados (replica).

Alícuotas	Vol. (mL) 100%LR	Vol. (mL) 75%LR;25% Y	Vol. (mL) 50%LR;50%Y	Vol. (mL) 25%LR; 75%Y	Vol. (mL) 100%Y
1	40,55	38,69	39,03	39,38	39,67
2	79,55	77,30	78,25	76,16	75,54
3	120,54	116,12	117,59	116,48	115,55
4	160,37	154,37	157,74	151,00	154,46
5	200,89	193,21	195,97	190,06	193,24

De los apéndices del 3 al 6 se muestran los resultados de las variaciones de pH y conductividad que provienen de los lixiviados de las distintas mezclas de lodo rojo y yeso con su respectiva replica.



Apéndice 3. pH en las distintas variaciones de lodo rojo y yeso en función del volumen de lixiviados.

Alícuotas	pH (100%LR)	pH (75%LR;25%Y)	pH (50%LR;50%Y)	pH (25%LR;75%Y)	pH (100%Y)
1	10,17	8,94	8,48	8,06	7,11
2	8,77	8,76	8,68	8,12	6,91
3	8,3	8,73	8,68	8,12	6,86
4	7,96	8,69	8,6	7,85	6,86
5	7,76	8,66	8,56	7,64	6,6

Apéndice 4. pH en las distintas variaciones de lodo rojo y yeso en función del volumen de lixiviados (réplica).

Alícuotas	pH (100%LR)	pH (75%LR;25%Y)	pH (50%LR;50%Y)	pH (25%LR;75%Y)	pH (100%Y)
1	9,93	8,81	8,42	8,08	7,09
2	8,8	8,71	8,55	8,13	6,82
3	8,2	8,52	8,65	8,1	6,8
4	8	8,49	8,57	7,76	6,77
5	7,78	8,46	8,56	7,7	6,58

Apéndice 5. Conductividad (Cond.) de las distintas variaciones de lodo rojo y yeso en función del volumen de lixiviados.

Alícuotas	Cond. (mS/cm) 100% LR	Cond. (mS/cm) 75%LR;25%Y	Cond. (mS/cm) 50%LR;50%Y	Cond. (mS/cm) 25%LR;75%Y	Cond. (mS/cm) 100% Y
1	4,55	7,26	7,57	6,44	2,84
2	0,34	2,54	4,57	3	2,15
3	0,16	0,93	2,75	2,07	2,1
4	0,09	0,28	1,59	1,81	1,8
5	0,08	0,16	1,2	1,63	1,72



Apéndice 6. Conductividad de las distintas variaciones de lodo rojo y yeso en función del volumen de lixiviados (réplica).

Alícuotas	Cond. (mS/cm) 100% LR	Cond. (mS/cm) 75%LR;25%Y	Cond. (mS/cm) 50%LR;50%Y	Cond. (mS/cm) 25%LR;75%Y	Cond. (mS/cm) 100% Y
1	4,35	7,86	7,55	6,27	2,8
2	0,38	2,52	4,75	2,37	2,15
3	0,16	0,9	2,84	2	2
4	0,11	0,24	1,12	1,77	1,8
5	0,09	0,15	0,91	1,7	1,71

De los apéndices del 7 al 10 se muestran los resultados de los cationes de calcio y potasio que provienen de los lixiviados de las distintas mezclas de lodo rojo y yeso con su respectiva replica, y fueron analizadas con el equipo de absorción y emisión atómica.

Apéndice 7. Concentración de calcio de las distintas variaciones de lodo rojo y yeso en función del volumen lixiviado.

Alícuotas	Calcio(mg/L) (100%LR)	Calcio(mg/L) (75%LR;25%Y)	Calcio(mg/L) (50%LR;50%Y)	Calcio(mg/L) (25%LR;75%Y)	Calcio(mg/L) (100%Y)
1		231,64	268,06	224,60	310,88
2		260,72	269,92	12,34	254,00
3	2,65	76,83	261,32	6,68	207,97
4	2,38	14,83	115,04	6,16	141,81
5	2,76	8,79	87,51	3,95	132,99

Apéndice 8. Concentración de calcio de las distintas variaciones de lodo rojo y yeso en función del volumen lixiviado (replica).

Alícuotas	Calcio(mg/L) (100%LR)	Calcio(mg/L) (75%LR;25%Y)	Calcio(mg/L) (50%LR;50%Y)	Calcio(mg/L) (25%LR;75%Y)	Calcio(mg/L) (100%Y)
1		226,16	235,86	280,54	307,86
2		268,70	321,86	259,40	257,66
3	1,02	88,01	257,46	188,20	193,01
4	1,92	17,83	107,53	135,56	123,51
5	2,60	9,20	82,75	114,57	130,66



Apéndice 9. Concentración de potasio de las distintas variaciones de lodo rojo y yeso en función del volumen lixiviado.

Alícuotas	potasio(mg/L) (100%LR)	potasio(mg/L) (75%LR;25%Y)	potasio(mg/L) (50%LR;50%Y)	potasio(mg/L) (25%LR;75%Y)	potasio(mg/L) (100%Y)
1	3,31	3,41	7,55	3,95	4,24
2	3,82	3,33	2,84	3,72	1,60
3	3,30	2,28	3,16	1,60	2,74
4	3,16	1,75	4,78	1,93	4,05
5	1,67	2,86	0,40	1,83	5,97

Apéndice 10. Concentración de Calcio de las distintas variaciones de lodo rojo y yeso en función del volumen lixiviado (replica).

Alícuotas	potasio(mg/L) (100%LR)	potasio(mg/L) (75%LR;25%Y)	potasio(mg/L) (50%LR;50%Y)	potasio(mg/L) (25%LR;75%Y)	potasio(mg/L) (100%Y)
1	3,19	2,22	3,02	4,14	1,92
2	3,23	1,39	2,89	1,31	1,60
3	2,42	0,90	1,84	1,48	1,50
4	1,72	0,66	3,10	2,52	1,41
5	1,53	0,99	0,54	3,21	5,73

Apéndice 11. Porcentaje de germinación de la semilla.

Se muestran la germinación de las semillas de tomate de las distintas mezclas de lodo rojo y yeso en las diferentes alícuotas, en concordancia con las de control para determinar el porcentaje de germinación de la semilla.



100%LR (1)

1 alícuota	Germinado	No germinado	%RSG
	8	17	33%
2 alícuota	Germinado	No germinado	%RSG
	25	0	100%
3 alícuota	Germinado	No germinado	%RSG
	21	4	88%
4 alícuota	Germinado	No germinado	%RSG
	24	1	100%
5 alícuota	Germinado	No germinado	%RSG
	24	1	100%

100% LR (2)

1 alícuota	Germinado	No germinado	%RSG
	18	7	75%
2 alícuota	Germinado	No germinado	%RSG
	25	0	100%
3 alícuota	Germinado	No germinado	%RSG
	25	0	100%
4 alícuota	Germinado	No germinado	%RSG
	25	0	100%
5 alícuota	Germinado	No germinado	%RSG
	24	1	100%

75%LR;25%Y(1)

1 alícuota	Germinado	No germinado	%RSG
	11	14	46%
2 alícuota	Germinado	No germinado	%RSG
	25	0	104%
3 alícuota	Germinado	No germinado	%RSG
	24	1	100%
4 alícuota	Germinado	No germinado	%RSG
	24	1	100%
5 alícuota	Germinado	No germinado	%RSG
	25	0	104%

75%LR;25%Y(2)

1 alícuota	Germinado	No germinado	%RSG
	9	16	38%
2 alícuota	Germinado	No germinado	%RSG
	24	1	100%
3 alícuota	Germinado	No germinado	%RSG
	24	1	100%
4 alícuota	Germinado	No germinado	%RSG
	25	0	100%
5 alícuota	Germinado	No germinado	%RSG
	25	0	104%



50%LR;50%Y(1)

1 alícuota	Germinado	No germinado	
	23	2	96%
2 alícuota	Germinado	No germinado	
	25	0	100%
3 alícuota	Germinado	No germinado	
	23	2	96%
4 alícuota	Germinado	No germinado	
	25	0	100%
5 alícuota	Germinado	No germinado	
	19	6	79%

50%LR;50%Y(2)

1 alícuota	Germinado	No germinado	
	23	2	96%
2 alícuota	Germinado	No germinado	
	25	0	100%
3 alícuota	Germinado	No germinado	
	25	0	100%
4 alícuota	Germinado	No germinado	
	23	2	96%
5 alícuota	Germinado	No germinado	
	21	4	88%

25%LR;75%Y(1)

1 alícuota	Germinado	No germinado	
	21	4	88%
2 alícuota	Germinado	No germinado	
	23	2	96%
3 alícuota	Germinado	No germinado	
	23	2	96%
4 alícuota	Germinado	No germinado	
	24	1	100%
5 alícuota	Germinado	No germinado	
	24	1	100%

25%LR;75%Y(2)

1 alícuota	Germinado	No germinado	
	18	7	75%
2 alícuota	Germinado	No germinado	
	24	1	100%
3 alícuota	Germinado	No germinado	
	22	3	92%
4 alícuota	Germinado	No germinado	
	22	3	92%
5 alícuota	Germinado	No germinado	
	25	0	100%



100%Y(1)			100%Y(2)		
1 alícuota	Germinado	No germinado		Germinado	No germinado
	25	0	100%	22	3
2 alícuota	Germinado	No germinado		Germinado	No germinado
	25	0	104%	22	3
3 alícuota	Germinado	No germinado		Germinado	No germinado
	23	2	96%	23	2
4 alícuota	Germinado	No germinado		Germinado	No germinado
	24	1	100%	25	0
5 alícuota	Germinado	No germinado		Germinado	No germinado
	21	4	88%	22	3
					92%
					92%
					96%
					100%
					100%
					92%

Apéndice 12. Blanco de Germinación

Es una germinación de control usando un soporte de algodón, semilla y regando con agua desionizada en lugar de los lixiviados provenientes del lodo rojo enmendado con yeso como elemento para la germinación.

Blanco	germinados	No germinados
1	23	2
2	25	0
3	24	1
4	24	1
MEDIA	24	



Apéndice13. Tablas de elongación de las semillas de tomate en las distintas mezclas.

En este apéndice se muestra el resultado de las distintas mezclas de lodo rojo y yeso en función a su elongación, determinado con el programa imagenJ, donde la unidad de longitud es en milímetros.

- (1) Primer análisis de las mezclas
- (2) Analisis de un duplicado con las mismas condiciones

LR 100%(1)

Muestras	Alícuota 1	Alícuota 2	Alícuota 3	Alícuota 4	Alícuota 5
1	5,601	48,331	50,843	49,3865	40,744
2	4,0605	62,9645	51,7075	55,5785	47,397
3	3,1685	55,454	56,5625	49,4145	42,2905
4	3,341	50,966	42,8085	45,935	32,555
5	3,516	49,274	50,518	57,732	50,077
6	6,0425	50,705	62,6255	44,554	39,8005
7	3,1245	61,183	41,0325	53,0385	40,437
8	4,1405	48,9365	51,499	52,744	48,4625
9		54,502	61,227	41,746	54,6695
10		50,666	51,6645	46,075	42,374
11		42,6495	65,1185	54,512	45,5035
12		67,649	49,0855	51,6205	42,8915
13		51,642	50,362	43,4245	48,8015
14		66,7455	18,9495	49,1835	27,796
15		53,8875	48,769	53,3125	43,992
16		65,8855	51,137	70,293	50,0825
17		70,8675	56,2525	54,3615	54,1525
18		45,728	64,829	37,32	35,614
19		50,2475	53,7865	51,5315	36,3515
20		48,898	57,7255	38,708	41,346
21		63,15	33,123	57,9125	52,178
22		54,927		36,68	44,732
23		5,3045		50,305	36,6485
24		49,788		48,946	49,5715
25		63,2385			
Promedio	4,12	53,34	50,93	49,76	43,69
%RRG	8,02395428	103,781323	99,0944969	96,8153778	84,9925422
Media	3,52	51,64	51,50	49,86	43,44



LR 100%(2)

Muestras	Alícuota 1	Alícuota 2	Alícuota 3	Alícuota 4	Alícuota 5
1	6,66	46,37	54,33	52,54	48,86
2	4,76	31,05	46,97	33,46	47,97
3	6,05	44,10	49,81	59,58	34,82
4	10,20	39,00	51,28	47,79	47,07
5	13,03	43,71	33,00	40,82	74,83
6	6,76	33,16	44,58	11,84	47,94
7	6,79	54,87	37,52	39,88	48,94
8	5,28	48,42	49,73	53,25	33,81
9	5,63	16,56	35,85	50,26	42,64
10	4,04	49,68	41,34	48,78	36,62
11	5,57	49,93	49,16	30,94	56,85
12	6,07	32,95	46,73	35,90	47,27
13	2,90	46,13	48,13	32,68	40,34
14	3,90	43,12	51,70	45,02	53,12
15	5,45	43,51	51,56	40,76	45,84
16	4,08	35,61	40,82	41,51	63,62
17	4,50	34,06	45,79	49,84	32,89
18	7,50	47,99	45,67	47,97	69,19
19		35,47	44,67	52,43	47,91
20		27,92	54,95	52,92	48,60
21		42,63	45,12	52,43	57,03
22		47,48	50,50	43,22	38,37
23		34,67	59,44	33,07	44,20
24		32,66	48,97	35,30	53,50
25		38,78	47,31	44,40	32,13
Promedio	6,06	39,99	47,00	43,06	47,77
%RRG	11,7980977	77,8065759	91,4340467	83,7796887	92,9445914
Media	5,60	42,63	47,31	44,40	47,91



75%LR;25%Y(1)

Muestras	Alícuota 1	Alícuota 2	Alícuota 3	Alícuota 4	Alícuota 5
1	8,06	43,49	51,01	23,42	54,81
2	6,78	39,69	41,77	59,84	49,64
3	7,19	48,64	28,90	51,25	50,10
4	6,95	28,40	39,08	48,58	53,75
5	4,67	33,55	46,86	33,95	44,29
6	11,90	37,34	34,64	44,96	25,87
7	16,90	39,49	48,79	39,92	30,49
8	9,41	33,11	44,82	28,97	40,15
9	26,81	55,37	43,97	36,77	46,73
10	12,49	30,13	44,33	41,30	50,82
11	15,73	45,06	42,74	52,21	49,58
12		44,78	40,57	36,53	50,11
13		36,69	53,20	56,17	49,38
14		31,86	43,96	52,60	56,12
15		40,58	49,11	50,74	42,63
16		39,52	46,47	45,19	39,91
17		39,64	52,76	47,81	48,74
18		32,49	36,92	56,40	54,82
19		45,08	47,88	52,17	51,95
20		39,11	55,56	37,38	47,01
21		45,27	54,98	41,69	47,09
22		37,01	28,69	44,13	53,06
23		48,46	30,03	39,65	45,19
24		35,74	25,99	34,53	49,73
25		30,50			63,32
Promedio	11,53	39,24	43,04	44,01	47,81
%RRG	22,44128051	76,3427237	83,7411641	85,615394	93,0189883
Media	9,41	39,49	44,15	44,54	49,58



75%LR;25%Y(2)

Muestras	Alícuota 1	Alícuota 2	Alícuota 3	Alícuota 4	Alícuota 5
1	20,00	29,56	46,06	31,72	39,40
2	10,21	34,78	41,17	43,62	31,92
3	4,11	43,05	44,38	36,05	43,47
4	12,40	22,86	33,99	30,88	39,88
5	8,59	31,83	34,09	37,50	42,96
6	8,58	39,87	35,02	43,28	35,33
7	12,76	51,55	50,12	37,94	47,02
8	10,48	54,06	46,95	36,29	45,38
9	13,44	40,67	33,68	40,69	44,70
10		33,52	29,71	50,06	40,20
11		40,23	35,72	32,62	39,77
12		51,92	45,46	34,60	49,54
13		48,94	33,91	43,06	49,41
14		39,63	39,04	43,64	27,00
15		23,58	41,33	32,19	45,45
16		29,06	45,86	41,54	40,21
17		9,38	45,60	45,11	32,67
18		31,54	30,38	51,88	35,50
19		43,67	40,64	41,52	42,62
20		50,11	47,58	39,73	37,47
21		17,56	56,48	39,13	32,60
22		27,84	44,75	43,49	37,06
23		34,24	42,29	35,04	40,00
24		28,35	42,27	41,41	48,25
25					45,24
Promedio	11,17	35,74	41,10	39,71	40,52
%RRG	21,7360571	69,53506	79,9672909	77,2515402	78,8365759
Media	10,48	34,51	41,80	40,21	40,20



50%LR;50%Y(1)

Muestras	Alícuota 1	Alícuota 2	Alícuota 3	Alícuota 4	Alícuota 5
1	27,11	47,33	40,30	30,99	13,91
2	10,38	41,13	22,29	38,64	22,22
3	21,87	38,71	3,97	42,98	27,20
4	17,64	39,44	19,80	36,67	24,87
5	10,72	42,21	38,48	34,21	23,32
6	22,95	30,24	23,91	40,09	26,91
7	18,75	42,05	17,65	40,80	5,89
8	18,28	35,32	26,28	38,80	16,85
9	10,50	40,60	10,54	32,18	23,74
10	16,29	43,67	29,56	34,39	15,22
11	12,84	42,79	16,03	45,05	8,32
12	15,72	56,36	16,14	31,34	22,45
13	16,68	49,80	9,63	34,07	24,76
14	16,35	44,15	9,74	43,90	38,34
15	10,41	39,49	13,75	25,73	20,43
16	25,69	52,10	58,03	26,02	7,83
17	20,46	45,39	39,75	34,16	33,34
18	16,44	38,59	22,52	33,11	21,99
19	15,41	42,11	35,79	32,91	32,49
20	33,81	44,36	13,00	33,62	
21	11,72	10,32	33,80	41,37	
22	34,07	39,20	38,85	43,23	
23	20,44	46,89	16,44	40,40	
24		45,97		15,29	
25		48,90		33,16	
Promedio	18,46	41,88	24,18	35,32	21,58
%RRG	35,91029437	81,4870428	47,0500338	68,7231128	41,9907332
Media	16,68	42,21	22,29	34,21	22,45



50%LR;50%Y(2)

Muestras	Alícuota 1	Alícuota 2	Alícuota 3	Alícuota 4	Alícuota 5
1	43,33	45,34	44,45	25,98	11,08
2	21,67	57,25	41,30	19,63	18,74
3	25,03	49,06	48,32	24,06	18,32
4	48,20	41,25	40,31	31,29	19,20
5	20,28	30,13	48,43	33,41	11,73
6	33,06	59,73	38,56	27,67	13,66
7	50,02	45,52	22,32	24,44	12,80
8	43,88	30,03	24,68	12,98	7,14
9	31,94	56,58	41,31	43,41	12,04
10	47,91	35,10	36,49	35,81	16,10
11	57,14	42,88	40,09	39,35	17,21
12	27,10	37,65	33,05	28,06	6,94
13	49,25	31,00	39,05	40,70	20,95
14	35,64	36,31	33,14	29,95	14,39
15	51,40	32,76	32,75	25,42	19,31
16	61,60	45,16	35,88	35,22	17,01
17	18,26	59,66	31,99	49,88	16,21
18	41,97	41,12	39,97	38,52	15,46
19	17,45	45,89	42,34	29,63	17,07
20	5,71	48,83	45,08	40,61	15,35
21	9,84	50,71	43,44	30,55	15,93
22	12,56	44,47	36,67	37,21	
23	11,32	60,33	43,68	18,39	
24		31,61	26,20		
25		36,96	32,19		
Promedio	33,24	43,81	37,67	31,40	15,08
%RRG	64,6719252	85,2402724	73,282607	61,0853916	29,3350936
Media	33,06	44,47	39,05	30,55	15,93



25%LR;75%Y(1)

Muestras	Alícuota 1	Alícuota 2	Alícuota 3	Alícuota 4	Alícuota 5
1	15,91	36,64	19,94	18,20	32,91
2	46,72	33,08	14,46	27,22	30,14
3	39,04	33,63	4,78	29,33	14,61
4	9,94	39,30	3,84	29,17	5,35
5	25,69	16,93	28,93	32,75	24,33
6	35,45	14,47	24,45	34,94	30,23
7	21,67	50,77	14,72	31,86	32,46
8	38,11	31,71	25,75	37,84	21,61
9	24,98	43,87	11,11	32,43	45,39
10	34,05	48,21	6,24	33,08	28,15
11	31,51	36,97	17,09	32,04	25,82
12	33,72	41,99	12,66	23,59	22,04
13	25,52	36,15	39,96	48,90	31,21
14	30,71	43,45	10,85	29,40	11,81
15	32,86	40,75	18,18	26,42	38,94
16	30,61	37,64	23,43	33,15	24,94
17	14,65	39,00	15,79	35,72	30,26
18	37,04	62,61	21,73	32,30	39,04
19	38,63	36,66	29,96	39,04	26,30
20	9,97	57,83	16,19	37,95	25,82
21	39,55	35,21	34,36	42,45	4,76
22		41,73	29,94	27,71	33,21
23		40,61	15,74	25,71	33,28
24				40,88	21,58
25					
Promedio	29,35	39,10	19,13	32,59	26,42
%RRG	57,10084306	76,0603959	37,2272458	63,3981031	51,4077497
Media	31,51	39,00	17,09	32,36	27,22



25%LR;75%Y(2)

Muestras	Alícuota 1	Alícuota 2	Alícuota 3	Alícuota 4	Alícuota 5
1	28,96	39,18	32,06	28,81	27,42
2	37,33	48,07	40,69	33,66	30,12
3	13,00	33,84	57,82	23,06	21,11
4	10,76	41,96	45,49	30,48	28,03
5	25,45	29,56	10,31	36,92	37,12
6	24,49	43,26	37,16	27,70	27,52
7	29,54	44,49	49,52	41,18	21,49
8	37,67	33,68	65,35	30,25	29,59
9	39,42	37,25	50,42	34,97	17,59
10	7,99	23,80	46,51	24,15	33,73
11	12,22	38,03	49,09	42,11	29,80
12	20,77	38,01	45,44	23,37	20,32
13	36,42	42,84	49,99	22,39	24,76
14	27,86	51,65	52,30	44,90	29,45
15	9,78	35,21	42,18	9,20	25,78
16	30,68	48,60	41,42	25,08	31,36
17	15,34	35,09	35,13	20,41	27,52
18	33,10	36,65	40,19	26,20	27,83
19		36,48	42,33	30,64	25,77
20		37,12	38,67	26,44	29,22
21		39,24	35,53	11,05	30,03
22		23,27	45,72	36,67	31,55
23		39,30			26,78
24		38,97			34,73
25					30,27
Promedio	24,49	38,15	43,33	28,62	27,96
%RRG	47,6424016	74,2174935	84,3022639	55,6804917	54,3874319
Media	26,65	38,02	43,88	28,25	28,03



100%Y(1)

Muestras	Alícuota 1	Alícuota 2	Alícuota 3	Alícuota 4	Alícuota 5
1	35,96	44,63	24,59	24,54	15,55
2	25,06	20,38	43,23	30,66	27,40
3	35,45	22,68	32,42	19,61	31,03
4	30,27	62,66	36,17	30,63	30,22
5	35,67	32,48	29,27	27,40	7,59
6	23,97	37,85	26,17	35,69	25,48
7	36,14	36,26	54,20	15,57	21,27
8	22,74	33,18	31,10	28,25	30,05
9	19,50	33,71	39,45	23,93	23,06
10	29,45	25,87	22,49	33,41	24,12
11	43,64	36,55	28,50	30,49	27,35
12	31,08	29,67	34,89	31,13	21,84
13	25,73	41,97	30,77	4,74	27,40
14	32,51	16,46	31,01	33,67	20,14
15	42,20	33,58	27,53	26,83	24,60
16	34,35	29,72	23,63	38,99	29,09
17	20,73	24,89	35,92	34,64	19,82
18	28,27	19,38	30,28	41,29	21,97
19	36,47	40,28	36,29	26,34	17,39
20	38,39	38,05	32,40	25,27	5,72
21	38,02	37,36	34,71	30,96	6,30
22	33,94	12,42	61,66	28,01	
23	40,51	19,21	32,89	19,53	
24	27,65	33,01		29,66	
25	34,34	13,03			
Promedio	32,08	31,01	33,89	27,97	21,78
%RRG	62,42	60,33	65,94	54,41	42,38
Media	33,94	33,01	32,40	28,96	23,06



100%Y(2)

Muestras	Alícuota 1	Alícuota 2	Alícuota 3	Alícuota 4	Alícuota 5
1	19,69	16,22	31,58	12,32	25,08
2	25,76	40,05	42,86	45,14	16,62
3	24,74	30,18	38,50	26,26	9,17
4	19,44	29,71	39,99	38,72	18,31
5	50,63	23,60	25,47	50,52	39,27
6	21,13	39,85	34,37	33,92	12,94
7	29,24	40,60	35,26	33,07	17,45
8	29,49	35,71	40,30	25,55	19,32
9	22,45	27,31	28,57	29,63	9,49
10	37,47	20,78	29,58	40,14	13,96
11	23,04	27,47	41,53	36,56	26,58
12	33,78	30,05	43,76	34,84	19,83
13	23,96	34,69	36,53	49,21	18,38
14	29,40	27,87	16,66	39,66	15,73
15	21,30	41,73	40,94	61,19	2,42
16	28,92	43,36	22,51	35,71	16,76
17	24,71	39,81	33,83	27,12	19,46
18	14,43	25,13	35,28	36,96	21,39
19	24,57	40,39	20,20	18,66	8,36
20	16,09	32,07	29,57	26,92	17,02
21	23,00	37,46	44,78	29,96	20,36
22	26,02	19,75	19,75	17,60	24,33
23			35,97	30,38	
24				44,13	
25				14,39	
Promedio	25,88	31,99	33,38	33,54	17,83
%RRG	50,34	62,24	64,95	65,26	34,69
Media	24,64	31,12	35,26	33,92	17,88



Apéndice 14. Tabla de elongación de las semillas de tomate en el control.

Es una elongación de control usando un soporte de algodón, semilla y regando con agua desionizada en lugar de los lixiviados provenientes del lodo rojo enmendado con yeso como elemento para la germinación.

Blanco

muestra	Blanco 1	Blanco 2	Blanco 3	Blanco 4
1	41,17	66,68	74,69	36,42
2	76,20	56,88	52,80	46,47
3	75,63	40,01	27,51	78,95
4	61,08	41,44	45,99	72,33
5	72,28	46,65	72,90	59,85
6	47,58	54,00	58,28	50,93
7	74,01	41,67	44,88	39,64
8	96,73	28,27	38,89	42,80
9	81,71	42,38	39,43	19,93
10	42,21	32,52	89,85	15,59
11	51,32	15,61	59,09	82,54
12	86,36	72,41	41,42	40,33
13	48,71	53,12	46,61	63,22
14	42,47	57,58	100,65	44,68
15	38,40	41,96	44,69	35,73
16	73,49	31,24	49,34	58,61
17	46,46	45,58	42,12	36,50
18	33,52	36,06	79,12	68,26
19	58,42	57,93	60,42	52,27
20	38,83	64,73	49,18	40,45
21	29,06	43,27	54,07	39,08
22	40,02	34,37	41,53	44,83
23	68,32	36,13	43,94	65,03
24		47,96	33,03	61,31
25		23,09		
Promedio	57,56	44,46	53,77	49,82
MEDIA PRO.	51,32	42,38	47,90	45,65
Desviación	18,62	13,47	17,60	16,61
ERROR	36,29	31,79	36,75	36,39
MEDIA PRO.	46,77	DES.PRO	16,58	
ERROR	36,34	DES.MED	17,11	



Apéndice 15. Tablas de pluviosidad en Ciudad Bolívar, Edo. Bolivar



Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología

AÑO	DATOS MENSUALES DE PRECIPITACION (mm)												ANUAL
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
1986	4.6	1.2	0	12	192.4	151.4	138	53.8	68.2	144	77.6	46.4	906
1987	1.8	16.4	0.2	29.4	130.4	154.6	140.6	96	79.4	161	17	47.2	1129.9
1989	61.4	14	3.6	0	43	72.4	125.6	105.2	98	15.2	34.2	14.4	587
1990	12.4	14.6	12.8	38	85.2	87.2	154.6	188.6	100.2	25.8	71.4	25.6	816.4
1991	16.8	5	53.8	13.6	31.2	122.6	74.2	277.6	44.2	65.4	26.2	29.4	760
1992	16.6	3	1.6	9.4	48.6	98.4	67.8	101.8	59.8	96.2	69.8	5.6	578.6
1993	7.6	0	45.2	44.2	48.8	63.4	106.2	152.8	93.1	24	70.3	21.4	677
1994	8.4	0.4	8.2	2.2	46.2	140.6	171	181.8	74.2	77.8	164.4	22.8	898
1995	0.6	0	26.6	4	77.3	145.6	213.2	203.4	87.6	91.2	184	9.8	1043.3
1996	5.6	50.2	3.4	0.4	88	246.4	166.4	120	38.8	35.8	64.4	17.4	838.8
1997	11.6	90.2	5.8	15	86.8	112	164.7	123.6	60.4	101.4	37.2	12.2	820.9
1998	0	0.2	69.1	61.5	184.4	233.7	235.8	61.2	72.4	79.8	31.4	38.5	1377.2
1999	57	19.2	0.8	110.4	76.2	302.4	180.3	278.8	144.1	81.7	87.8	62.4	1073.5
2000	21.3	14.7	72.4	9.4	121.1	201.9	136.8	141.4	113.5	72.4	106.2	23.4	699.6
2001	3.4	1.2	0	14	18.6	119.6	103.8	92.4	156.9	65.4	78	25.2	699.6
2002	18.2	5	20.4	21	95.4	145.2	75	120	50.8	44.4	78	25.2	699.6
PROM:	15.5	14.7	20.2	22.2	79.5	148.7	144.3	157.6	84.4	77.9	72.9	31	868.9
PORC:	1.8	1.7	2.3	2.6	9.2	17.1	16.6	18.1	9.7	9	8.4	3.6	
D.STD	18.3	23.8	25.6	29.3	50.9	64.2	48.8	66.9	32.7	42.8	46.7	22.4	
CV:	118.4	162.1	126.3	132	63.9	43.2	33.8	55.1	38.7	55	64	72.3	

ESTACION: CIUDAD BOLIVAR OFICINA
 ESTADO: BO
 ORG.: MA
 LATITUD: 080135
 INSTALADA: 05/1986
 TIPO: PR
 LONGITUD: 633753
 ELIMINADA:
 SERIAL: 3886
 ALTITUD: M.S.N.M
 6000