

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES**



“BIOACUMULACIÓN DE CADMIO EN RYE GRASS (*Lolium perenne* L. var. Nui) SEMBRADO EN TRES SUSTRATOS EN CONDICIONES DE INVERNADERO”

Presentada por:

MAGDA VIOLETA HERNÁNDEZ TERRONES

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE
MAGISTER SCIENTIAE EN CIENCIAS AMBIENTALES**

Lima-Perú

2016

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES**

**“BIOACUMULACIÓN DE CADMIO EN RYE GRASS (*Lolium perenne*
L. var. Nui) SEMBRADO EN TRES SUSTRATOS EN CONDICIONES
DE INVERNADERO”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE
MAGISTER SCIENTIAE**

Presentada por:

MAGDA VIOLETA HERNÁNDEZ TERRONES

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Mg.Sc. Víctor Hidalgo Lozano
PRESIDENTE

Dr. Néstor Montalvo Arquíñigo
PATROCINADOR

Mg.Sc. Sebastián Santayana Vela
MIEMBRO

Ph.D. Javier Ñaupari Vásquez
MIEMBRO

DEDICATORIA

*A la Memoria de mis Padres,
quienes en guardia permanente
son la luz que desde el cielo
motivan mi desarrollo profesional*

*A la memoria de mi hermano Manuel Gonzalo,
que con su constante orientación pudo transmitirme la mística del investigador y el
compromiso de continuar con este trabajo*

*Con todo mi cariño a mis hermanos y sobrinos,
quienes me acompañan en
la perseverancia y constancia
hacia el logro de mis objetivos*

AGRADECIMIENTO

Mi especial agradecimiento al Dr. Néstor Montalvo, por su invaluable apoyo y compromiso para la realización del presente trabajo;

Mi reconocimiento y gratitud al Comité Consejero, integrado por el Dr. Víctor Hidalgo, el Dr. Sebastián Santayana y el Dr. Javier Ñaupari, quienes con su orientación profesional y valiosos conocimientos, contribuyeron en la calidad del presente estudio;

Una dedicación especial a la Memoria del Dr. Carlos Ponce Del Prado, quien fue miembro del comité asesor y con su reconocida experiencia contribuyó expresamente al avance de mi tesis;

Con gran admiración y respeto, agradezco a todos mis profesores de la Maestría en Ciencias Ambientales por la calidad de su cátedra y sus valiosas enseñanzas humana y científica.

A todos mis colegas, amigas y amigos de la Universidad Nacional Agraria La Molina y de la Escuela de Post Grado, con quienes compartí esta maravillosa etapa, un profundo agradecimiento porque me motivaron siempre a seguir en la línea de la zootecnia y las ciencias ambientales y terminar satisfactoriamente el presente trabajo.

Al personal administrativo de la Escuela de Post Grado de la Universidad Nacional Agraria, por sus constantes atenciones y facilidades brindadas en un marco de impecable consideración para el éxito de mi trabajo;

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivo Principal	2
1.2. Objetivos específicos	2
I. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. Conceptos de suelo, suelos ácido, encalado y orgánico	3
2.1.1. Suelo	3
2.1.2. Suelo ácido	4
2.1.3. Suelo encalado	4
2.1.4. Suelo orgánico	5
2.2. Metales Pesados	5
2.2.1. Los metales pesados en las plantas	6
2.3. Rye grass	7
2.4. Bioacumulación	7
2.5. Contaminación de los suelos	8
2.5.1. Principales metales pesados en los suelos altos andinos	8
2.5.2. Contaminación de los suelos metales pesados	9
2.5.3. Dinámica de los metales pesados en el suelo	10
2.5.4. Estándares de calidad ambiental de suelo ECA suelo	11
2.6. El Cadmio	13
2.6.1. Fuentes naturales de cadmio en la contaminación de suelos	14
2.6.2. Fuentes antropogénicas de cadmio en la contaminación de suelos	16
2.7. Efectos del Cadmio sobre los recursos naturales	18
2.7.1. Agua	18
2.7.2. Suelos	18
2.7.3. Flora	19
2.7.4. Fauna	21
2.7.5. Aire	22

II. MATERIALES Y MÉTODOS	23
3.1. Ubicación	23
3.2. Materiales y Equipos	23
3.2.1. Materiales	23
3.2.2. Equipos	24
3.3. Metodología	24
3.3.1. Instalación del experimento	24
3.3.2. Primer corte	25
3.3.3. Segundo corte	25
3.4. Tratamientos	26
3.5. Evaluaciones	26
3.6. Diseño estadístico	27
III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
4.1. Altura de rye grass	29
4.1.1. Altura al primer corte	29
4.1.2. Altura al segundo corte	32
4.2. Producción de materia seca foliar	33
4.2.1. Materia seca foliar al primer corte	33
4.2.2. Materia seca foliar al segundo corte	36
4.3. Bioacumulación de cadmio foliar	37
4.3.1. Bioacumulación de cadmio al primer corte	37
4.3.1. Bioacumulación de cadmio al segundo corte	40
4.4. Producción de macollos	42
4.5. Materia seca radicular	44
CONCLUSIONES	46
IV. RECOMENDACIONES	47
V. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
VI. ANEXOS	56

INDICE DE CUADROS

	Pág.
Cuadro1: Valores ECA suelo	12
Cuadro 2: Normas técnicas y LMP para Cadmio en Sudamérica	14
Cuadro 3: Denominaciones de compuestos de cadmio	15
Cuadro 4: Producción Nacional de cadmio	17
Cuadro 5: Características de los sustratos utilizados	24
Cuadro 6: Tratamientos experimentales	26
Cuadro 7: Variables Evaluadas	26
Cuadro 8: Altura de planta al primer corte	30
Cuadro 9: Altura de planta al segundo corte	32
Cuadro 10: Materia seca foliar al primer corte	34
Cuadro 11: Materia seca foliar al segundo corte	36
Cuadro 12: Bioacumulación de cadmio al primer corte	38
Cuadro 13: Bioacumulación de cadmio al segundo corte	40
Cuadro 14: Producción de Macollos	43
Cuadro 15: Materia seca radicular	44

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Dinámica de metales en el suelo	11
Figura 2: Procesos bioquímicos relacionados con metales pesados	21
Figura 3: Distribución del experimento	28
Figura 4: Altura de planta al primer corte	30
Figura 5: Altura de planta al segundo corte	33
Figura 6: Materia seca foliar al primer corte	35
Figura 7: Materia seca foliar al segundo corte	36
Figura 8: Bioacumulación de cadmio al primer corte	39
Figura 9: Bioacumulación de cadmio al segundo corte	41
Figura 10: Producción de Macollos	43
Figura 11: Materia seca radicular	45

INDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1: Resultados del experimento	56
Anexo 2: Panel fotográfico	57
Anexo 3: Análisis Estadístico	59

RESUMEN

En el Perú, la actividad minera en zonas alto andinas tiene como práctica frecuente revegetar áreas intervenidas, con pasto rye grass (*Lolium perenne* L. Var. Nui) en remplazo de pasto nativo. El objetivo de esta investigación es conocer la bioacumulación de cadmio en rye grass sembrado en tres sustratos (Ácido, encalado y humus) con adición de 0ppm, 100ppm y 200ppm de cadmio ($\text{Cl}_2\text{Cd} \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$). El experimento se realizó en la Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima-Perú. Fueron nueve tratamientos en tres sustratos y tres niveles de cadmio. Se utilizó un diseño completamente al azar con un arreglo factorial de tres por tres. Los resultados obtenidos en altura de rye grass, muestran diferencias altamente significativos ($p > 0.01$) para efecto sustrato (humus). La producción de biomasa, al primer y segundo corte, estuvo altamente influenciada por factor sustrato ($p > 0.01$), mientras que el factor cadmio fue significativo en el segundo corte ($p > 0.01$). En la bioacumulación de cadmio, tanto en el primero como en el segundo corte resultó con diferencias altamente significativas ($p > 0.01$) para los factores sustrato y cadmio. Respecto a la producción de macollos los efectos del sustrato y cadmio, resultaron altamente significativos ($p > 0.01$), mientras que la interacción, resultó significativa ($p > 0.05$). El humus limita significativamente la bioacumulación de cadmio en las hojas de rye grass, por tanto podemos inferir que protege de la contaminación a la cadena alimentaria, suelo-planta-hombre y, permite recomendar su aplicación en suelos contaminados con cadmio.

ABSTRACT

In Peru, mining in high Andean zones common practice is to revegetate disturbed areas with grass rye grass in replacement of native grass (*Lolium perenne* L. Var. Nui). The objective of this research is to understand the bioaccumulation of cadmium in rye grass planted on three substrates, acidic soil, and humus soil liming; with addition of 0ppm, 100ppm and 200ppm cadmium ($\text{Cl}_2\text{Cd} \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$). The experiment was conducted at the University National Agrarian La Molina, Lima, Peru. Nine treatments were three substrates and three levels of cadmium. The design was completely randomized with a factorial arrangement of three by three. The results obtained in rye grass height, showing highly significant differences ($p > 0.01$) for substrate effect (humus). Biomass production, the first and second cut, was highly influenced by substrate factor ($p < 0.0001$), while cadmium factor was not significant in the first cut and the second cut significant ($p > 0.01$). Cadmium bioaccumulation in both the first and second cutting resulted highly significant differences ($p > 0.01$) for the substrate and cadmium factors. Regarding the production of tillers the effects of the substrate and cadmium were highly significant ($p < 0.01$) whereas the interaction resulted significant ($p > 0.05$). Humus significantly limits the bioaccumulation of cadmium in rye grass leaves, so we can infer that protects against contamination of the food chain soil-plant-man and allows to recommend its use in cadmium contaminated soils.

I. INTRODUCCIÓN

En el Perú una de las principales formas de revegetar, en regiones con actividad minera, es la utilización de rye grass perenne (*Lolium perenne* L. Var. Nui). Éste es un pasto de fácil adaptación a las condiciones de suelo y clima de la sierra peruana. La actividad minera comparte espacios geográficos con las comunidades campesinas y granaderas, cuyo sistema de explotación es básicamente extensivo y donde predomina la crianza de camélidos, ovinos y vacunos, los que se alimentan de la pasturas andinas, por lo que los pastos cultivados en suelos contaminados podrían poner en riesgo la salud de los animales y consecuentemente de las personas, por formar parte de la cadena alimentaria. En ese sentido, se sabe que en las plantas, la absorción por medio de las raíces es la ruta más importante para el ingreso de los elementos como metales pesados. Conociendo la toxicidad de dichos elementos y sus riesgos a la salud, es importante conocer los niveles de acumulación de cadmio en el rye grass perenne, por tratarse de los elementos más tóxicos a lado del plomo y mercurio y, sobre el cual en el Perú, no se han realizado investigaciones. Se espera que los resultados de este trabajo contribuyan en la gestión ambiental de las zonas donde esta gramínea es ampliamente utilizada.

Los suelos, conjuntamente con las pasturas, sufren el impacto directo de las actividades mineras y sus conexas, en ese sentido, es de gran importancia conocer los factores que pueden reducir o aumentar la disponibilidad de metales pesados como el cadmio en la planta, teniendo en cuenta que el Límite Máximo Permisible (LMP) para este uso de suelo es 1,4mg/kg; tales como: pH, materia orgánica, textura del suelo, la actividad biológica, régimen hídrico y drenaje, condiciones de óxido – reducción, la interacción con otros nutrientes, las condiciones meteorológicas, entre otros.

1.1. Objetivo Principal

Evaluar la bioacumulación de cadmio en rye grass, sembrados en suelos contaminados con cloruro de cadmio.

1.2. Objetivos Específicos

- Determinar los efectos del sustrato con tres niveles de cadmio sobre la altura del rye grass perenne (*Lolium perenne* L. var. Nui), producción de materia seca foliar y radicular y, producción de macollos, en condiciones de invernadero.
- Determinar la concentración de cadmio en la materia seca foliar al primer y segundo corte de rye grass perenne (*Lolium perenne* L. var. Nui), sembrados en tres tipos de sustratos con tres niveles de cadmio.

II. REVISION DE LITERATURA

2.1. Conceptos de suelo, suelo ácido, encalado y orgánico

2.1.1. Suelo

Constituye un conjunto complejo de elementos físicos, químicos y biológicos que compone el sustrato natural en el cual se desarrolla la vida en la superficie de los continentes. El suelo es el hábitat de una biota específica de microorganismos y pequeños animales que constituyen el edafón. El suelo es propio de las tierras emergidas, no existiendo apenas contrapartida equivalente en los ecosistemas acuáticos. Es importante subrayar que el suelo así entendido no se extiende sobre todos los terrenos, sino que en muchos espacios, sobre los que caminamos es roca fresca, o una roca alterada sólo por meteorización.

Desde el punto de vista físico-químico, las características del suelo más importantes son su permeabilidad, relacionada con la porosidad, su estructura y su composición química. Los suelos retienen las sustancias minerales que las plantas necesitan para su nutrición y que se liberan por la degradación de los restos orgánicos. Un buen suelo es condición para la productividad agrícola.

En el medio natural los suelos más complejos y potentes (gruesos) acompañan a los ecosistemas de mayor biomasa y diversidad, de los que son a la vez producto y condición. En este sentido, desde el punto de vista de la organización jerárquica de los ecosistemas, el suelo es un ecosistema en sí y un subsistema del sistema ecológico. Seoáñez (1999) publicó el concepto de suelo como, la superficie emergida de la tierra o la parte de la litosfera que de alguna forma está sometida a la acción de los agentes climáticos y biológicos y, por supuesto a una intervención masiva permanente de las actividades humanas. El suelo es un medio multifásico de composición variable en el espacio y en el tiempo, estas fases están en continua

evolución y el hombre interviene en esta evolución alterando el equilibrio, bien por acciones agroforestales, bien por contaminación o bien por ocupación.

2.1.2. Suelo ácido

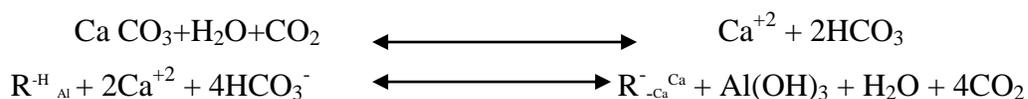
Es aquel suelo cuya característica principal es su alto contenido de Aluminio y Manganeso, sustancias que generalmente definen un pH 5. En el Perú los suelos ácidos se localizan en la sierra alto andina y la amazonia. Las causas de la acidez de estos suelos pueden ser naturales o ambientales y en la mayoría de los casos actividades antropogénicas.

2.1.3. Suelo encalado

Es aquel suelo ácido que ha recibido tratamiento químico para subir el pH. Campillo (2004), señala que el encalado consiste en agregar cualquier compuesto de calcio o de calcio y magnesio, que sea capaz de reducir la acidez e incrementar el pH.

Químicamente, la cal es el óxido de calcio; sin embargo, el término cal también se aplica a otros materiales encalantes como hidróxidos, carbonatos y silicatos de calcio y magnesio. Una reacción típica de la enmienda del suelo, considerando carbonato de calcio, es dado por Brady y Weil (2002), citado por Campillo (2004).

Reacciones químicas en un proceso de encalado de suelos:



Según Cerón (2015), la cal reduce la acidez del suelo (incrementa el pH) al convertir parte del H+ en agua. Cuando el pH es mayor a 5.5, el Al se precipita como Al(OH)3 eliminando la acción toxica de este metal y la principal fuente de H+. El valor neutralizante de un material de encalado se determina por comparación con el valor neutralizante del carbonato de calcio puro (CaCO3). Se ha establecido que el valor neutralizante del CaCO3 puro es 100 y de esta forma se puede determinar por comparación el valor de neutralización de cualquier material

de encalado. Este valor se denomina “*valor de neutralización relativa*” o “*equivalente de carbonato de calcio*”.

Calcita (CaCO_3) y dolomita ($\text{CaMg}[\text{CO}_3]_2$) son los materiales de encalado de uso más común. La calidad depende del contenido de impurezas del material tales como arcilla o residuos de materia orgánica. Sus valores de neutralización (CaCO_3 equivalente) fluctúan desde 65- 70 % hasta un poco más del 100% (Cerón, 2015).

2.1.4. Suelo orgánico

Se define como suelo orgánico, aquel que tiene en su composición un alto contenido de materia orgánica y pH neutro. Los suelos orgánicos provienen de materia orgánica, se forman mediante la bioacumulación y la descomposición graduales de materias vegetales y animales. Por regla general, se dice que un suelo es orgánico cuando más de la mitad de los 80cm superiores del suelo son orgánicos, o se encuentra materia orgánica de cualquier espesor directamente sobre la roca madre (FAO, 2014).

2.2. Metales pesados

Los metales pesados son un grupo de elementos químicos que presentan una densidad relativamente alta y cierta toxicidad para el ser humano. El término "metal pesado" no está bien definido. A veces se emplea el criterio de densidad. Por ejemplo, metales de densidad mayor que $4,5 \text{ g/cm}^3$, pero los valores en la bibliografía pueden ir desde 4 g/cm^3 hasta 7 g/cm^3 . Otros criterios empleados son el número atómico y el peso atómico. Muchos de los metales que tienen una densidad alta no son especialmente tóxicos y algunos son elementos esenciales en el ser humano, independientemente de que a determinadas concentraciones puedan ser tóxicos en alguna de sus formas. Sin embargo, hay una serie de elementos que en alguna de sus formas pueden representar un serio problema medioambiental y es común referirse a ellos con el término genérico de "metales pesados".

2.2.1. Los metales pesados en las plantas

Un estudio de Navarro (2007) sobre aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y bioacumulación de metales pesados en plantas, explica que la causa primaria del elevado nivel de toxicidad a nivel químico es que los metales pesados poseen una gran capacidad para unirse con moléculas orgánicas. En efecto, estos efectos tóxicos en sistemas biológicos dependen de reacciones con ligandos que son esenciales para su asimilación, y estos ligandos están, a su vez, presentes en gran abundancia en la célula, ya sea formando parte de moléculas de mayores dimensiones, ya sea como moléculas aisladas. En este sentido, cabe destacar la gran afinidad que muestran los metales pesados, como principales ligandos, por grupos sulfhidrilo, radicales amino, fosfato, carboxilo e hidroxilo. El resultado de estas uniones ligando-metal puede ser muy perjudicial para la célula, destacando en este aspecto sobre otros fenómenos:

- La acción genérica sobre proteínas por inhibición de su actividad o por disrupción en la estructura de las mismas,
- El desplazamiento de elementos esenciales de su metabolismo estándar, produciendo efectos de deficiencia, y
- La catálisis de reacciones de generación de moléculas ROS (Reactive Oxygen Species) o radicales libres que provocan fenómenos de estrés oxidativo.

El estrés oxidativo es un fenómeno que merece ser estudiado aisladamente, dada su complejidad e importancia en el desarrollo de los mecanismos básicos de la célula. Como resumen de dicho fenómeno baste decir que provoca daño a distintos niveles, destacando los siguientes aspectos:

- Inactivación de proteínas y enzimas, fundamentalmente por la oxidación de los grupos sulfhidrilo, dando lugar a puentes disulfuro que causan la interrupción del funcionamiento normal de la proteína o enzima.
- Peroxidación lipídica de membranas, causando rupturas y subproductos de las cadenas hidrocarbonadas.

- Efectos de daño sobre el ADN. Estos pueden ser desperfectos genotóxicos: mutaciones, aberraciones cromosómicas, alteraciones en la síntesis y reparación de ácidos nucleicos y transformaciones celulares.

2.3. Rye grass (*Lolium Perenne* L. var. Nui)

Rye grass (*Lolium Perenne* L. var. Nui) es una gramínea forrajera de muy buena calidad, se desarrolla con mucha rusticidad en las regiones alto andinas. Con sistema radical fibroso poco profundo, formando matas tiernas cespitosas muy macolladoras y foliosas, bajas, que cubren muy bien el suelo con hojas de envés muy brillante. Inflorescencia espiga de 10 a 20cm. Exigente en fertilidad, adaptándose a suelos tanto francos como franco arcillosos y de pH cercano a la neutralidad. Es intolerante a salinidad, alcalinidad, sequías e inundaciones. Las variedades más utilizadas son rye grass perenne de la variedad Nui y Rye grass Perenne de la variedad Aries ([web:crop.scijournals.org/cgi/content/abstract/41/5/1565](http://web.crop.scijournals.org/cgi/content/abstract/41/5/1565)).

Es una gramínea que se adapta muy bien a una gran variedad de suelos, prefiriendo los pesados y fértiles. Es cultivado en altitudes con prendidas entre 2200 y 3000 msnm, aun cuando en investigaciones realizadas en la Estación Experimental del FONAIAP, ha demostrado gran desarrollo y vigor en alturas entre 3100 y 3500 msnm. Su crecimiento en macollas, de tallos firmes y erectos, con nudos largos y oscuros, hojas basales numerosas de 28 a 50 cm de longitud (Dugarte, 1991).

2.4. Bioacumulación

La bioacumulación es un concepto usado para explicar la retención o acumulación de sustancias químicas en la estructura de un ser vivo. Durante los últimos años se ha producido un considerable avance en la biotecnología del campo de la ciencia que se dedica a remediar lugares o medios contaminados mediante el uso de plantas y organismos relacionados, denominada fitorremediación. Es especialmente significativo el desarrollo que se ha conseguido en la descontaminación de metales pesados. Se trata de identificar cuáles son los elementos clave que la genética molecular de plantas hace participar en la tolerancia y

acumulación de metales pesados. Se describe, además, el funcionamiento del interior de la célula vegetal cuando una planta se somete a concentraciones elevadas de metales pesados. Es razonable pensar que si se comprende dicho funcionamiento es sólo una cuestión temporal diseñar y obtener soluciones adecuadas a todos los problemas derivados de la contaminación por metales pesados (Navarro, 2007).

2.5. Contaminación de los suelos

2.5.1. Principales metales pesados en los suelos altos andinos

Los suelos andinos, considerados desde los 2600 a 4200msnm, contienen una gama de minerales y metales pesados en condiciones naturales y, producto de la explotación minera, presentan estos metales que constituyen un riesgo a la salud de la población. En el Perú, se ha encontrado plomo, arsénico, cadmio y mercurio en el suelo, agua y en los relaves de la minería.

El estudio de Vizcarra (2000) sobre ciudad metalúrgica, reporta que la ciudad de la Oroya, registra altos niveles de contaminación ambiental por plomo, proveniente de la actividad minera y de la fundición. Como ejemplo, se puede mencionar que los niveles de plomo en sangre en trabajadoras embarazadas y en niños, llegan hasta los 40ug/dl, esta situación ha movilizado a las comunidades rurales y a las organizaciones campesinas en todos los países andinos. Por otro lado, el riesgo de contaminación del suelo con metales pesados, está también en los vertidos industriales y urbanos, los lodos procedentes de estaciones depuradoras y los depósitos de residuos industriales, al ser vertidos directamente sobre suelos, pueden llegar hasta profundidades de 35 a 40cm (zinc, plomo, cobre y cadmio, especialmente) y la bioacumulación máxima de estos metales se concentra en la superficie, en los cinco primeros centímetros.

Los metales pesados descritos por sus características físico – químicas son los que tienen densidad superior a cinco y están conformados por: bario, cadmio, cobre, plomo, manganeso, zinc, vanadio y estaño. Se hace excepción en la lista precedente al incluir al berilio (Be), entre los pesados por sus características tóxicas (EPA – USA, 1994); a pesar de ser un metal traza

más liviano que el aluminio y más duro que el acero, afirma que otro parámetro bien estudiado para evidenciar el potencial tóxico de los metales pesados es su ordenamiento en función de la electro – positividad en progresión (en aumento):



El origen de los metales pesados en el país está vinculado a la industria minero – metalúrgica, los automotores, la petroquímica, incineración de residuos, hábitos de la población (Vizcarra, 2000).

2.5.2. Contaminación de los suelos por metales pesados

La contaminación de los suelos constituye uno de los aspectos más importantes en los procesos de degradación. La calidad de un suelo, su capacidad para desarrollar una serie de funciones, puede verse afectada negativamente por la contaminación, la cual se asocia con la entrada de sustancias que a partir de una cierta concentración deben considerarse como no deseables. Las sustancias que se consideran causantes de problemas de contaminación según Genon (1992), citado por Titto (2003) son:

- Metales: cromo, cobalto, níquel, cobre, zinc, arsénico, molibdeno, cadmio, estaño, bario, mercurio y plomo
- Compuestos inorgánicos: NH_4^+ , F^- , CN^- , S^{-2} , Br^- , PO_4^{-2}
- Compuestos aromáticos y poliaromáticos
- Hidrocarburos clorados
- Agroquímicos

Los efectos desfavorables que acarrearán los contaminantes en el suelo, como sistema, son los siguientes (Porta, 1994):

- Desnutrición y pérdida de la capacidad de autodepuración mediante procesos de regeneración biológica normales, al haberse superado la capacidad de aceptación del suelo de un compuesto dado.
- Se ven afectados los ciclos biogeoquímicos y la función de biofiltro del suelo.

- Disminución cualitativa y cuantitativa del crecimiento normal de los microorganismos del suelo, alterando su diversidad, y aumentando la fragilidad del sistema.
- Disminución del rendimiento de los cultivos con posibles cambios en la composición de los productos, ocasionando un riesgo en la salud de los consumidores al estar contaminada la cadena trófica.
- Contaminación de las aguas superficiales y freáticas por procesos de transferencia, donde se alcanzan concentraciones superiores a las consideradas aceptables.
- Disminución de las funciones de soporte de actividades, debido a que los espacios contaminados ocasionan problemas de salubridad para los usuarios.

2.5.3. Dinámica de los metales pesados en el suelo

La expresión “metales pesados” se aplica a elementos que tienen un peso específico mayor que 5 g/cm^3 y que poseen un número atómico mayor que 20. Entre los micronutrientes aparecen metales pesados que son clasificados como esenciales (cobre, hierro, manganeso, molibdeno y zinc), siendo indispensables para el desenvolvimiento de las plantas; otro grupo es considerado como benéficos (cobalto, níquel, y vanadio), que colaboran con el desenvolvimiento de las plantas, pero su falta no es considerada como factor limitante; y como no esenciales y tóxicos (cadmio, cromo, mercurio y plomo), siendo perjudiciales a las plantas (Diez, 2008). Un aumento de la concentración de estos metales pesados en suelos agrícolas con alta tecnología da como resultado la deposición atmosférica y la aplicación de agrotóxicos, residuos orgánicos e inorgánicos, urbanos e industriales, así como fertilizantes. La dinámica de los elementos en el sistema suelo – planta – atmósfera debe ser acompañada y medida por las siguientes variables: disminución del crecimiento de la raíz, síntomas visibles de la cosecha y la concentración de los tejidos. Los metales pesados incorporados al suelo pueden seguir cuatro diferentes vías (García, 2002):

- Pueden quedar retenidos en el suelo, ya sea disueltos en la solución del suelo o bien fijados por procesos de adsorción, complejación y precipitación.
- Pueden ser absorbidos por las plantas y así incorporarse a las cadenas tróficas.
- Pueden pasar a la atmósfera por volatilización.

- Pueden movilizarse a las aguas superficiales o subterráneas como se esquematiza en la Figura 1.

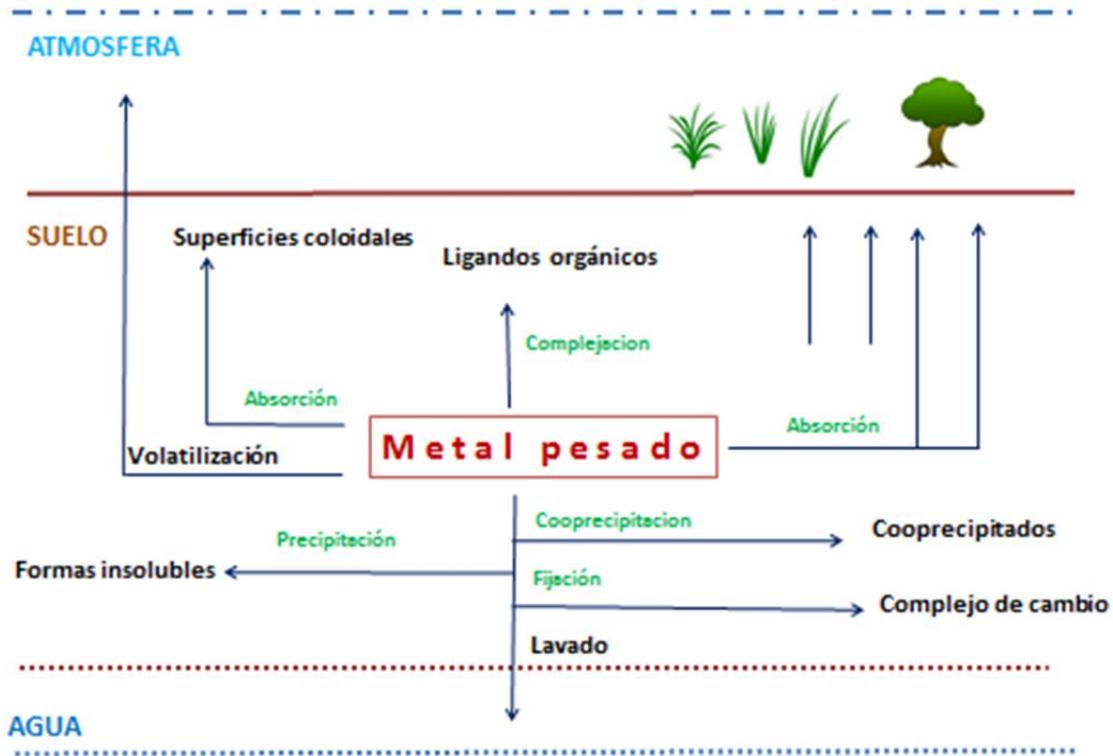


Figura 1: Dinámica de metales en el suelo

FUENTE: García y Dorronsoro (2002)

2.5.4. Estándares de calidad ambiental de suelo ECA suelo

Los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelo, vigentes en el Perú (RM N° 307-2012-MINAM) son de cumplimiento obligatorio para la gestión ambiental de suelos, incluye la determinación de la concentración de contaminantes con fines de remediación de sitios contaminados y la implementación de planes de descontaminación o similares. En el Cuadro 1 se presenta los valores de ECA Suelo:

Cuadro 1: Valores ECA suelo para Perú

N°	Parámetros	Usos de Suelo			Método de ensayo
		Suelo Agrícola	Suelo Residencial/ Parques	Suelo Comercial/ Industria/ Extractivos	
I	Orgánicos				
1	Benceno (mg/kg MS)	0,03	0,03	0,03	EPA 8260-BEPA 8021-B
2	Tolueno (mg/kg MS)	0,37	0,37	0,37	EPA 8260-BEPA 8021-B
3	Etilbenceno (mg/kg MS)	0,082	0,082	0,082	EPA 8260-BEPA 8021-B
4	Xileno (mg/kg MS)	11	11	11	EPA 8260-BEPA 8021-B
5	Naftaleno (mg/kg MS)	0,1	0,6	22	EPA 8260-B
6	Fracción de hidrocarburos F1 (C5-C10) (mg/kg MS)	200	200	500	EPA 8015-B
7	Fracción de hidrocarburos F2 (C10-C28) (mg/kg MS)	1 200	1 200	5 000	EPA 8015-M
8	Fracción de hidrocarburos F3 (C28-C40) (mg/kg MS)	3 000	3 000	6 000	EPA 8015-D
9	Benzo(a) pireno (mg/kg MS)	0,1	0,7	0,7	EPA 8270-D
10	Bifenilos policlorados - PCB(mgk/g MS)	0,5	1,3	33	EPA 8270-D
11	Aldrin (mg/kg MS) (1)	2	4	10	EPA 8270-D
12	Endrín (mg/kg MS) (1)	0,01	0,01	0,01	EPA 8270-D
13	DDT (mg/kg MS) (1)	0,7	0,7	12	EPA 8270-D
14	Heptacloro (mg/kg MS) (1)	0,01	0,01	0,01	EPA 8270-D
II	Inorgánicos				
15	Cianuro libre (mg/kg MS)	0,9	0,9	8	EPA 9013- A/APHAAWWAWEF 4500 CN F
16	Arsénico total (mg/kg MS)(2)	50	50	140	EPA 3050-B EPA 3051
17	Bario total (mg/kg MS) (2)	750	500	2 000	EPA 3050-B EPA 3051
18	Cádmio total (mg/kg MS) (2)	1,4	10	22	EPA 3050-B EPA 3051
19	Cromo VI (mg/kg MS)	0,4	0,4	1,4	DIN 19734
20	Mercurio total (mg/kg MS) (2)	6,6	6,6	24	EPA 7471-B
21	Plomo total (mg/kg MS) (2)	70	140	1 200	EPA 3050-B EPA 3051

EPA: Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos).

DIN: German Institute for Standardization.

MS: materia seca a 105 °C, excepto para compuestos orgánicos y mercurio no debe exceder 40 °C, para cianuro libre se debe realizar el secado de muestra fresca en una estufa a menos de 10 °C por 4 días. Luego de secada la muestra debe ser tamizada con malla de 2 mm. Para el análisis se emplea la muestra tamizada < 2mm.

Fuente: Ministerio del Ambiente. 2013.Lima. Perú.

2.6. El Cadmio

De nombre original Kadmia o tierra (en sueco), el cadmio, es un metal conocido desde 1817 (descubierto por Friedrich Strohmeyer) de número atómico 48, masa atómica 112.10, valencia 2 y se le simboliza con Cd, pertenece al Grupo II b de la tabla periódica. De color blanco azulado que recuerda a la plata, es blando, dúctil y maleable. A causa de su naturaleza sólo se le encuentra en asociaciones con las minas de Zinc (Vizcarra, 2000). En la corteza terrestre se le encuentra de 0.1 a 0.2 ppm, tiene una estructura hexagonal, es insoluble en agua, se disuelve lentamente en ácido clorhídrico y sulfúrico, diluido con desprendimiento de hidrógeno, su mejor disolvente es el ácido nítrico y la solubilidad de las sales de cadmio en agua es muy variable, ya que los halogenuros, el sulfato y el nitrato son relativamente solubles mientras que el óxido, el hidróxido y el carbonato son prácticamente insolubles en agua (Martínez, 2004).

Rivero (1995), citado por Briceño (2007) afirma que contenido de metales pesados en suelos, debería ser únicamente función estructural, es decir de la composición del material original y de los procesos edafogénicos que dan lugar al suelo, ya que las concentraciones suelen ser muy bajas, pero como el resto de compuestos que se encuentran en bajas proporciones, en cualquier ecosistema, las reservas suelen ser muy bajas, y se ha demostrado que en estos casos, pequeñas variaciones pueden alterar el equilibrio de los ciclos biogeoquímicos de estos compuestos. A lo largo de diversos estudios se ha comprobado que la acción del hombre, a través de la actividad industrial, ha colapsado estos ciclos, y ello ha producido que parte del exceso de cadmio haya llegado a los alimentos, a la cadena alimentaria y, por ende, al hombre.

En el Perú, los Estándares de Calidad Ambiental para agua, ECA agua, establece que el LMP para agua de riego es de 0.01 mg/l y para aguas destinadas a bebida de animales es 0.005 mg/l (<http://www.digesa.gob.pe>). Algunos países han establecidos sus propias Normas Técnicas como se indica en el Cuadro 2. Asimismo, existen Normas Técnicas Internacionales como la Guía de calidad ambiental Canadiense, FAO y CEPIS, que

establecen LMP 0.01 mg/l de cadmio para agua destinada a riego (Canadian Environmental Quality Guidelines, September , 2007).

Cuadro 2: Normas técnicas y LMP para cadmio en algunos países de Sudamérica

Normas Técnicas	LMP	País
Norma de Calidad Ambiental de agua para uso agrícola.	0.01 mg/l	Ecuador
Norma para el Control de la Calidad de agua para riego legumbres, cereales y cultivos arbóreos.	0.003 mg/l	Venezuela
Norma de Calidad para Aguas Continentales Superficiales.	0.001 mg/l	Chile
Norma Técnica Nacional para Agua de uso agrícola.	0.005 mg/l	Honduras
Norma para Prevenir la Contaminación de aguas para riego de hortalizas, frutales u otros cultivos de consumo humano.	0.001 mg/l	Paraguay

FUENTE: Elaboración propia adaptado de www.digesa.gob.pe 2015.

2.6.1. Fuentes naturales de cadmio en la contaminación de suelos

El cadmio está presente como un constituyente menor e inevitable en casi todos los concentrados de zinc, los que contienen por lo general de 0.1 – 0.3 por ciento de cadmio. En los concentrados de plomo y cobre se pueden encontrar concentraciones mucho más bajas de este metal. Este elemento proviene generalmente del desgaste y la erosión de las rocas. Sus depósitos están asociados geoquímicamente a los de zinc, sobre todo en los minerales esfalerita, blenda de zinc y otros más. En algunos concentrados de blenda de zinc llegan a contener hasta 1 por ciento de cadmio. Dentro de los minerales que lo contienen está la geenockita o sulfuro de cadmio, y la otavita, óxido de cadmio y carbonato básico (Martínez, 2004).

La contaminación de cadmio, en sus diversos compuestos (Cuadro 3), proveniente de las fuentes naturales es insignificante si se compara con aquella de origen antropogenica. Una de

las principales fuentes es producto de los desechos sólidos y líquidos de la actividad minera, que vierten sus desechos directamente sobre los suelos y aguas de ríos y/o lagos. En este sentido varios autores, indican que la actividad minera en el país se constituye como una de las principales fuentes de contaminación de los recursos naturales. Los desechos de minería en el Altiplano y franja Oriental, contienen importantes cantidades de metales pesados, como zinc, cobre, níquel, cadmio, antimonio, cromo, plata, cobalto, molibdeno, etc. y otros como el arsénico, los que se caracterizan por su alto poder nocivo sobre la salud humana y animal debido a su elevada capacidad de bioacumulación en los tejidos (Orsag, 2001).

Cuadro 3: Denominaciones de los principales compuestos de Cadmio

	Cadmio Metálico	Oxido de Cadmio	Cloruro de Cadmio	Sulfito de Cadmio	Carbonato de Cadmio	Sulfato de Cadmio
Formula Molecular	Cd	CdO	Cd Cl ₂ H ₂ O	CdS	CdCO ₃	CdSO ₄
Formula Química	Metal	Oxido metálico	Sal metálico	Sal metálico	Sal metálico	Sal metálico
Masa Molecular	112.41	128.41	183.32	144.47	172.42	208.47
N° ONU	2570	2570	2570	2570	2570	2570
Guía N° ERG2000	154	154	154	154	154	154
Propiedades químicas	Toxica Corrosiva No combustible Insoluble	Toxica Corrosiva No combustible Insoluble	Toxica Corrosiva No combustible Soluble	Toxica corrosiva No combustible Insoluble	Toxica Corrosiva No combustib le Insoluble	Toxica Corrosiva No combusti ble Soluble
N° Residuo Peligroso EPA	D006	D006	D006	D006	D006	D006

FUENTE: Cardoso (2001)

2.6.2. Fuentes antropogénicas de cadmio en la contaminación de suelos

Este metal pesado se encuentra en el aire viciado, en algunos vertidos industriales incluidos las aguas residuales, también se origina en la producción de plomo y zinc; y en el empleo de fertilizantes fosfatados y plaguicidas, muy comunes en la agricultura.

Las principales fuentes antropogénicas por las cuales se libera cadmio al ambiente son:

La fuente más importante de descarga de cadmio al medio ambiente es la quema de combustible fósiles (carbón, petróleo, entre otros) o la incineración de la basura doméstica común. El cadmio también contamina el aire cuando se funden rocas para extraer zinc, cobre o plomo. Trabajar o vivir cerca de una de estas fuentes contaminantes puede resultar en una peligrosa sobre exposición al cadmio.

- Otra de las fuentes es la proveniente de la roca fosfórica, que es utilizada en la producción de fertilizantes fosfatados. La roca fosfórica contiene mínimas cantidades de cadmio que son expuestas en el suelo a través de estos fertilizantes.
- En los pigmentos y pinturas, el cadmio es usado ampliamente como un material de cubierta el cual provee un gado de duración y de protección para plásticos venciendo la degradación por luz ultravioleta, que no es igualada por otros sistemas de estabilización.
- Las baterías de níquel – cadmio son ampliamente usadas como fuentes de poder en radio transistores, calculadoras, etc., y son esenciales como fuente de poder STAND BY para uso en emergencias en hospitales y otros servicios públicos vitales.
- Las aleaciones como el cobre – cadmio que son excelentes en términos de conductividad y resistencia a la abrasión. A causa de su bajo punto de fundición es utilizado en aleaciones especiales de aluminio para soldar (0.04 cadmio, 0.05 aluminio y 0.01 estaño); madera metal (0.05 bismuto, 0.025 madera, 0.15cadmio y 0.01 estaño), que tiene un punto de fundición de 70 °C; y el uso de estas aleaciones están relacionadas a instalaciones de rociadores y otros sistemas de protección contra incendios.
- El cadmio se usa para absorber neutrones en las varas del mando y escudo de reactores nucleares, y en la fabricación de pigmentos artísticos, en el esmalte de automóvil, estabilizador de los plásticos a base de policloruro de vinilo (PVC), y fósforos para tubos de televisores de color.

- Las fuentes de cadmio para el suelo incluyen los desechos de la fabricación de cemento, la disposición de residuos sólidos y las aguas residuales municipales. La minería de metales no ferrosos, en especial, el zinc, es la principal fuente de liberación de cadmio al medio acuático.
- El fumar es vía directa de contaminación por cadmio en el ser humano. Como muchas plantas, el tabaco contiene cadmio, algo del cual es inhalado en el humo.

Según los estudios realizados por Martínez (2004), en el Perú la contaminación por cadmio se debe principalmente a la actividad minera, uso de pesticidas, fertilizantes y a los residuos industriales, éste último con mayor incidencia debido a la expansión industrial que genera grandes volúmenes de desechos industriales que en su mayoría no reciben tratamiento alguno; con el auge de las exportaciones, de igual manera el consumo de fertilizantes y pesticidas ha ido en aumento, provocando la deposición de residuos tanto en el suelo como en los ríos, pero cuyos efectos aún no han sido evaluados. Como se puede deducir el consumo de cadmio ha ido en aumento en los últimos años (Cuadro 4), principalmente debido a la mayor utilización de fertilizantes, pesticidas y al desarrollo de la industria del galvanizado y la elaboración de baterías.

Cuadro 4: Producción Nacional de cadmio

PERU: Producción minero metalúrgica (Tn)						
MINERAL/ AÑO	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Bismuto	952	1081	1114	1061	423	0
Arsénico	3,150	4399	4321	4822	301	0
Cadmio	481	416	347	371	289	357
Antimonio	807	691	590	531	145	0
Selenio	70	75	60	60	61	59
Telurio	33	37	35	28	7	0
Indio	7	6	5	6	2	0

FUENTE: Ministerio de Energía y Minas (2010).

En estudios realizados en el litoral peruano (Martínez, 1991) los años 1988 y 1989 con la especie *Perumytilus purpuratus* o “choritos de la roca” se determinaron altas concentraciones de cadmio (mayores a 25 µg/g) principalmente en las zonas mineras y metalúrgicas.

Ramírez (1986), publicó un estudio realizado en La Oroya en un grupo de trabajadores del Centro Minero Metalúrgico, cuya fundición es una fuente de contaminación ambiental de plomo, arsénico, zinc y cadmio. Dicho estudio reportó cifras altas de contaminación por cadmio a una distancia de 10 km de la fundición y de trabajadores no expuestos ocupacionalmente al cadmio, pero que residen en La Oroya. Los resultados indican que la contaminación media del cadmio en La Oroya era de 4 mg/k con valores extremos de 2 y 8 mg/k.

2.7. Efectos del cadmio sobre los recursos naturales

2.7.1 Agua

Los recursos hídricos (ríos, lagos, océanos) son los más vulnerables a la contaminación y por procesos naturales y antrópicas pueden ser impactados por la presencia de cadmio. Las industrias ubicadas en cabeceras de cuencas contaminan ríos y lagos y éstos se convierten en medios de transporte de contaminantes como metales pesados en sus diversas formas y consecuentemente entran a la cadena alimentaria de personas, animales y plantas.

2.7.2. Suelos

Las principales variaciones del contenido de cadmio en el suelo se deben a la composición de la roca madre y al suministro de metales que provienen de fertilizantes químicos, industria, pesticidas y la contaminación atmosférica.

Gay et al. (1998), en su trabajo sobre el efecto del pH en la adsorción y desorción de suelos con cadmio, señala que pH 4.9 aumenta su fijación, mientras que a pH 6.2 presenta baja concentración. Por otro lado, Alfaro (2004) en su estudio suelo y rye grass perenne, concluye que la concentración de plomo en la materia seca radicular depende del nivel de plomo aplicado al suelo y el tipo de suelo utilizado.

2.7.3. Flora

Las plantas no tienen mecanismos para excretar cadmio por lo que lo absorben y retienen en sus tejidos acumulándose generalmente, en mayor cantidad, en las raíces y en menor cantidad, en los frutos (Rohleder, 1982).

Algunas especies son más sensibles al cadmio como la espinaca, soya, lechuga, mientras que otras, como el tomate y la col, son completamente resistentes. Los efectos perceptibles más comunes son la clorosis (incluso con reducción de clorofila) marchitez y necrosis dado el hecho de que el cadmio a altas concentraciones inhibe la fotosíntesis y la fijación de bióxido de carbono (Bodilla, 1989).

En las plantas, el cadmio disminuye la tasa de fotosíntesis y transpiración, y aumenta la frecuencia respiratoria. Aún pequeñas concentraciones de cadmio en el suelo conducen a cuadros de lesiones muy extendidas, como por ejemplo el acortamiento del eje caulinar y un rayado de color amarillo intenso en las hojas más viejas. La absorción se produce no sólo por la raíz sino también por los brotes y las hojas (Wagner, 1993; Baker, 1994; Chaney, 1997; citados por Titto, 2003). Asimismo, González *et al.* (1995) afirman respecto del cadmio y los cultivos, que este metal es absorbido por las plantas y acumulado en cantidades que pueden entrañar serios riesgos para la salud humana. Su similitud con el zinc, le permite reemplazarlo y ser absorbido por la planta en su lugar y desempeñar sus funciones. Por su alta toxicidad ocasiona serios trastornos en la actividad enzimática de la planta. Se le atribuye un marcado efecto en la reducción del crecimiento, la extensibilidad de la pared celular, el contenido de clorofila, la tasa de fotosíntesis, la asimilación de CO₂, y la apertura estomacal. Todos los efectos negativos varían de una especie a otra.

En su estudio sobre biomarcadores de contaminación por cadmio en plantas, Pernía (2005), considera que las plantas responden a la contaminación por cadmio activando la síntesis de glutatión, fitoquelatinas y nicotianamina como respuestas específicas a contaminación por cadmio. La misma investigación señala como efectos de la contaminación por cadmio a la reducción de crecimiento de raíces, inhibe apertura de estomas, síntesis de clorofila y

fotosíntesis, clorosis, disminución de carotenoides, baja tasa de transpiración, inhibe la fosforilación oxidativa mitocondrial, disturbio en el control Redox y el metabolismo, entre otras.

Harrington (2000) estudió el efecto del cadmio, zinc, y cobre en el desarrollo e índice de tolerancia en el consumo, y producción de ácido málico en los nutrientes de la *Festuca rubra*. El efecto del zinc sobre el cobre, con el método utilizado, indica que se puede mantener dos veces más zinc que cobre y doce veces más cadmio que cobre en los tejidos de las plantas jóvenes.

Algunos factores que pueden reducir o aumentar la disponibilidad de los metales para la planta son: pH, reacciones de óxido – reducción, materia orgánica, interacción de micro elementos y actividad microbiana (Losue, 1988, citado por Titto, 2003). Alfaro (2004), al evaluar la bioacumulación de plomo en Rye grass anual y perenne, encontró que tanto en el primer como en el segundo corte, las plantas que crecieron en el suelo encalado son las que presentaron mayor bioacumulación de plomo.

En un estudio en bosques de España, Madejón (2004) encontró una correlación positiva y significativa entre las concentraciones de cadmio y zinc en las hojas de los álamos, respecto a su disponibilidad potencial (concentración extraída con EDTA) en el suelo. La concentración de cadmio en hojas es más del doble que su disponibilidad en suelo, alcanzando valores puntuales cercanos a 20mg/kg que están comprendidos en el intervalo fitotóxico (5 – 700 mg/kg). Estos procesos son parte de la bioquímica al interior de la planta, que se esquematiza en la Figura 2.

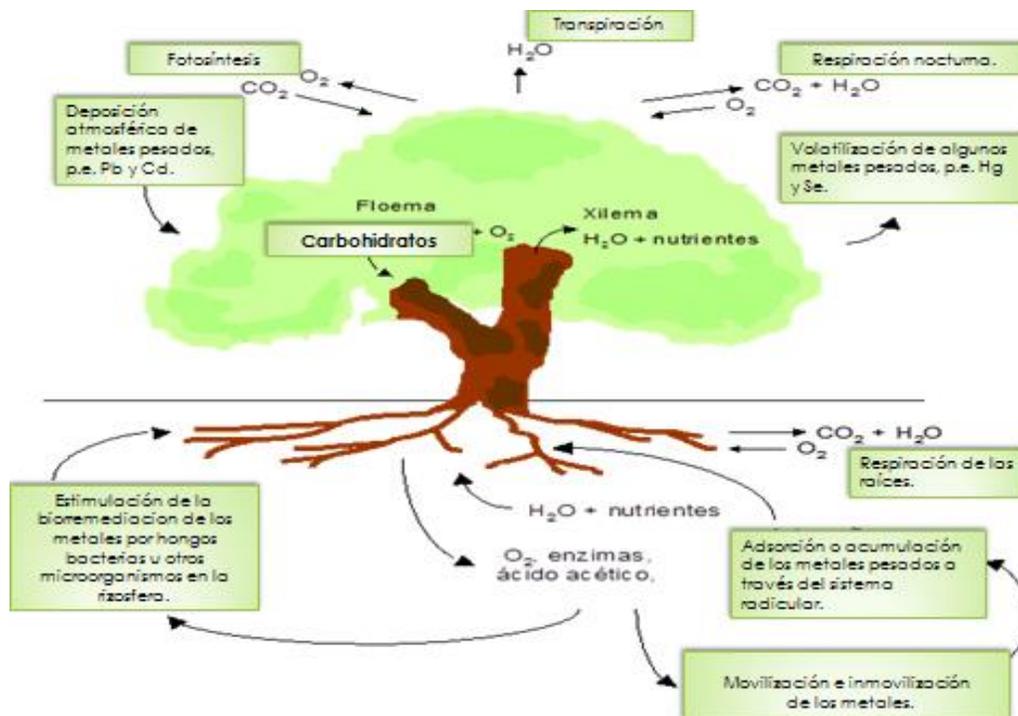


Figura 2: Procesos bioquímicos relacionados con metales pesados

FUENTE: Pires (1998)

2.7.4. Fauna

Lee (1996), al estudiar la bioacumulación de cadmio en ovejas de raza Romney, que pastorean en Rye grass, observó los efectos de cadmio sobre el suelo y las pasturas de consumo; encontró que las ovejas más jóvenes tenían altos niveles de bioacumulación, especialmente en hígado y riñones, y a medida que las ovejas tenían más edad los niveles de bioacumulación disminuían.

Rodríguez *et al.* (2005) evaluaron la presencia de metales pesados (plomo, cadmio, zinc y cobre) en leche cruda de vaca, colectadas en cinco establos del municipio de Nuevo León en México. Los resultados de dicha investigación indican la presencia de dichos metales en todas las muestras de leche, resaltando los resultados de cadmio y plomo que superan los estándares internacionales establecidos para leche cruda de vaca. Por otro lado, se hallaron los niveles de zinc y cobre dentro de los parámetros tolerables permitidos.

2.7.5. Aire

Debido a que el cadmio es un metal relativamente volátil es inevitable su liberación en altas concentraciones a la atmósfera durante los procesos de soldadura. El valor promedio de este metal en el aire es aproximadamente de 0.002 mg/m³.

Los fenómenos físicos como el viento, la erosión y procesos biológicos, movilizan el cadmio de un lugar a otro que sumado a actividades antropogénicas este metal puede entrar en su ciclo biogeoquímico y actuar según el estado en el que se encuentre, es decir con diferentes grados de toxicidad.

Los compuestos comunes de cadmio son bastantes volátiles y tienen puntos de ebullición del orden de 900 a 1000°C. Es por eso que las ricas fuentes de fosfato de origen volcánico tienen un bajo contenido de cadmio; el cadmio es emitido al aire por los volcanes y por el calentamiento industrial de los minerales de hierro u otros materiales, como la fabricación de acero e incineración de la basura. Sánchez *et al.* (1993), al analizar suelos sin cultivar (naturales), encontraron que la materia orgánica disminuye la bioacumulación de cadmio en plantas.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación

El experimento se realizó en el Invernadero del Taller de Conservación de Suelos y Agricultura Sostenible (CONSAS) y el Laboratorio de Manejo y Conservación de Suelos, de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria la Molina. Lima. Perú.

3.2. Materiales y Equipos

3.2.1. Materiales

Se utilizó semillas de Rye grass perenne (*Lolium perenne* L. var. Nui).

El compuesto utilizado para contaminar los suelos con cadmio, de acuerdo a los tratamientos establecidos fue el cloruro de cadmio hidratado ($\text{Cl}_2\text{Cd} \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$).

El experimento requirió tres sustratos: suelo ácido, suelo encalado y humus, los cuales fueron distribuidos en macetas de tres kilogramos de capacidad, haciendo un total de 18 macetas.

El suelo ácido es procedente zona próxima a explotación minera (no relave) en la cordillera negra, distrito de Jangas, provincia de Huaraz, departamento de Ancash;

El suelo encalado se obtuvo adicionando cal agrícola [$\text{Ca}(\text{CO}_3)_3$], a razón de 3Tn/ha, consiguiéndose subir el pH de 5.0 a 6.45 y,

El humus de utilizado procede del Taller de Conservación de Suelos de la Universidad Nacional Agraria La Molina. Las características edáficas de los sustratos utilizados en los ensayos se presentan en el Cuadro 5.

Cuadro 5: Características fisicoquímicas de los sustratos del experimento

Característica	Humus (UNA La Molina)	Suelo ácido (Huaraz)
Conductividad eléctrica (dS/m)	3.0	2.69
pH	7.15	5.0
Materia orgánica (%)	67.94	1.4
Textura (%)	--	62 arena 24 limo 14 arcilla
Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	18.81	10.06
Saturación de bases (%)	100	88
Contenido de fósforo (ppm)	145.55	5.8
Contenido de K ₂ O (Kg/ha)	1444.8	61

FUENTE: Laboratorio de análisis de suelo de la Facultad de Agronomía de la UNALM (2004).

3.2.2. Equipos

- Equipo de absorción atómica, Espectrofotómetro Perkin Elmer 3100 (1993)
- Estufa, Balanza analítica y Potenciometro
- Maceteros de arcilla (3kg)
- Papel filtro, guantes, máscaras, regla, hoz, bolsas de papel, otros.

3.3. Metodología

3.3.1. Instalación del experimento

Se procedió a la preparación de suelo y macetas, para la posterior siembra del de rye grass. Se pesaron 54kg de suelo y se colocaron en 18 macetas de arcilla, a razón de 03kg, en cada maceta.

Se inició con el riego y la aplicación de 100 y 200ppm de cadmio por maceta, en los respectivos tratamientos; luego se realizó la siembra a razón de 12 semillas por maceta. 21

días después se procedió a eliminar el exceso de plantas, dejando cinco por maceta y se realizó el encalado de seis macetas utilizando $\text{Ca}(\text{CO})_3$ aplicado en solución. La frecuencia de riego fue interdiario y por inundación.

3.3.2. Primer corte (75 días)

Durante esta etapa, se iniciaron las mediciones de la altura de la planta. Se vigiló en todo momento el riego de las macetas mediante el método gravimétrico, de modo que el contenido de humedad siempre estuvo entre los límites de capacidad de campo.

Se realizó el primer corte a los 75 días, dejando las plantas a una altura de 5cm medidos desde la base de las hojas. Se recolectó el material foliar de cada maceta en bolsas de papel debidamente identificadas. Estas permanecieron en la estufa a una temperatura de 60 °C por un periodo de siete días, luego de los cuales se procedió a consignar el peso de la materia seca foliar del primer corte.

3.3.3. Segundo corte (100 días)

Durante esta etapa se continuó con las evaluaciones, realizándose el corte final a los 100 días, dejando al igual que en el primer corte, 5cm de longitud de tallo medido desde el nivel del suelo. Seguidamente se procedió a recolectar todo el material foliar en bolsas de papel, las cuales se colocaron en la estufa por siete días, para tomar luego el peso de la materia seca foliar.

Después de este segundo corte, el riego fue suspendido totalmente para permitir que las raíces secaran y proceder a su extracción. Luego, se procedió a colectar las raíces, las cuales fueron sometidas a un lavado para eliminar los residuos de suelo. Finalmente fueron secadas en la estufa a una temperatura de 60°C por un periodo de siete días y se midió el peso de la materia seca radicular de cada uno de los tratamientos.

3.4. Tratamientos

Se instalaron nueve tratamientos donde se evaluó la respuesta en tres sustratos (suelo ácido, suelo encalado y humus) con tres niveles de cadmio (0,100 y 200 ppm).

La descripción se detalla en el siguiente Cuadro 6:

Cuadro 6: Tratamientos experimentales

CLAVE	DESCRIPCION
T1	Suelo ácido sin adición de cadmio
T2	Suelo ácido con 100 ppm cadmio
T3	Suelo ácido con 200 ppm cadmio
T4	Suelo ácido encalado sin adición de cadmio
T5	Suelo ácido encalado con 100 ppm cadmio
T6	Suelo ácido encalado con 200 ppm cadmio
T7	Humus sin adición de cadmio
T8	Humus con 100 ppm cadmio
T9	Humus con 200 ppm cadmio

3.5. Evaluaciones

Se definieron ocho variables experimentales las mismas que se evaluaron por etapas: Al primer corte (75 días), Al segundo corte (100 días) y Evaluación final.

Cuadro 7: Variables y periodos de evaluación

Variable	Primer corte	Segundo corte	Evaluación final
Altura (cm)	*	*	
Producción de Materia seca foliar (g)	*	*	
Bioacumulación de cadmio foliar (ppm)	*	*	
Producción de macollos (U)			*
Materia seca de raíz (g)			*

Se midió Altura de planta, producción de materia seca foliar y bioacumulación de cadmio en hojas al primer y segundo corte y, como mediciones finales, la producción de macollos y materia seca radicular (Cuadro 6).

Las evaluaciones de altura y número macollos, se hicieron con mediciones directas. Para las mediciones de peso de materia seca y concentraciones de cadmio, se utilizó toda la biomasa foliar y radicular contenida en cada maceta.

La determinación de contenido de cadmio en la materia seca foliar, se utilizó el método de espectrofotometría de absorción atómica. Este método es especialmente apto para el análisis cuantitativo de trazas de más de 40 elementos metálicos con una precisión de por lo menos 0.002 y el límite de detección varía entre 0.1 y 1 ppm.

3.6. Diseño estadístico

Se utilizó el diseño completamente al azar con un arreglo factorial de 3x3.

Factor A: tipo de sustrato: suelo ácido, encalado y humus.

Factor B: niveles de cadmio: 0, 100, 200 ppm

Total: nueve tratamientos

Total de unidades experimentales: $3 \times 3 \times 2 = 18$ macetas (Figura 3).

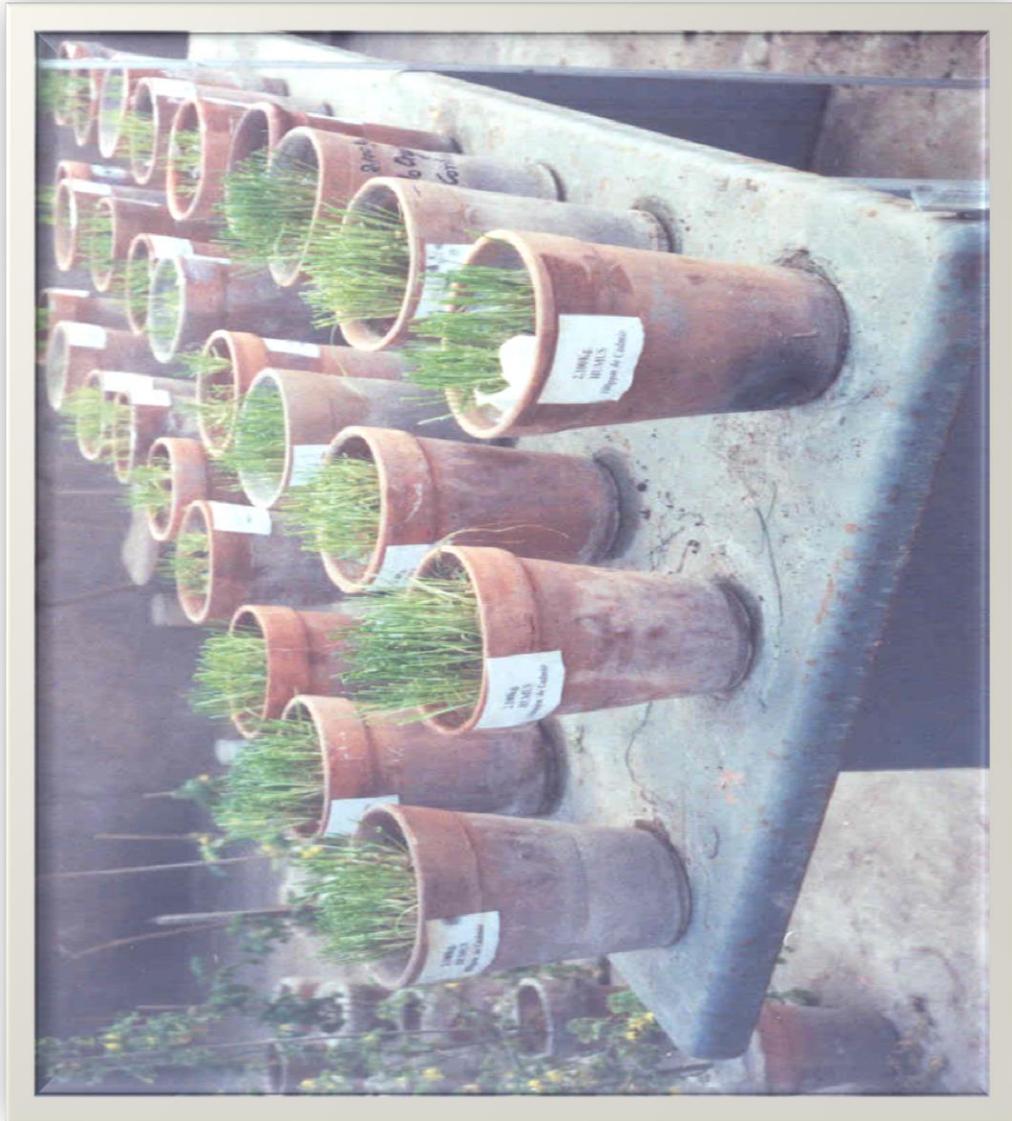


Figura 3: Distribución del experimento

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Altura de rye grass (*Lolium perenne* L. var. Nui)

El crecimiento de rye grass expresados en altura de planta, presentó resultados altamente significativos ($P < 0.01$) por efectos del sustrato (Cuadro 8).

4.1.1. Altura al primer corte

Los resultados (Cuadro 7) indican alta vigorosidad y altura del rye grass sembrado en humus, alcanzando altura promedio 38cm, mientras que para los tratamientos con suelo ácido y encalado, todas con adición de cadmio, las alturas promedio fueron 22,33 y 22,67cm respectivamente (Figura 5). Esta diferencia de altura de planta alcanzada en humus puede deberse principalmente a la acción de los ácidos orgánicos que tienen la propiedad de captar metales pesados formando quelatos y evitar toxicidad en la planta, como lo explica Rodríguez *et al* (2008) en su estudio de toxicidad de cadmio en plantas y materia orgánica.

Existen muchos trabajos de investigación demostrando la eficiencia nutritiva de la materia orgánica del humus dado la concentración de nutrientes necesario para la planta con la actividad microbiana que contribuye enormemente en la fertilidad del suelo y su aporte en procesos de descontaminación. Alfaro (2004) en su estudio de bioacumulación de plomo en rye grass perenne, sembrado en humus (con 250 y 500 ppm de Pb) encontró que la altura de las plantas no fue afectada, infiriendo que puede ser efecto de la materia orgánica. Efectos similares, encontró Titto (2003) cuando estudió crecimiento (altura) de alfalfa en condiciones edáficas contaminadas con cadmio (0, 50, 100 y 200ppm) donde la mayor altura la presenta en humus.

Respecto al tratamiento en sustrato encalado, los resultados del primer corte para 0ppm y 100ppm de cadmio, muestran que el efecto del encalado favorece altura de planta, mientras que para 200ppm de cadmio, ocurre una drástica caída (Figura 4) en tamaño de planta (12.5cm) que podría deberse a que el aporte del encalado y pH 6.45 no funcionó; por tanto, la alta toxicidad (200ppm) impidió el crecimiento. Mueña *et al.* (2011), en su estudio de los efectos del encalado y la fertilización nitrogenada en suelos mineros, concluye que los suelos mineros, mejoran la producción biomasa, cuando son encalados y se alcanza un pH cercano a neutro y, además se adiciona fertilización nitrogenada.

Cuadro 8: Altura de planta al primer corte (cm)

Cadmio	Sustrato			Promedio
	Acido	Encalado	Humus	
0ppm	29,50	31,00	37,00	32,50 ^b
100ppm	20,00	24,5	37,00	27,17 ^{b a}
200ppm	17,50	12,50	39,00	23,00 ^b
Promedio	22,33 ^b	22,67 ^b	38,00 ^a	27,56

Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.01$)

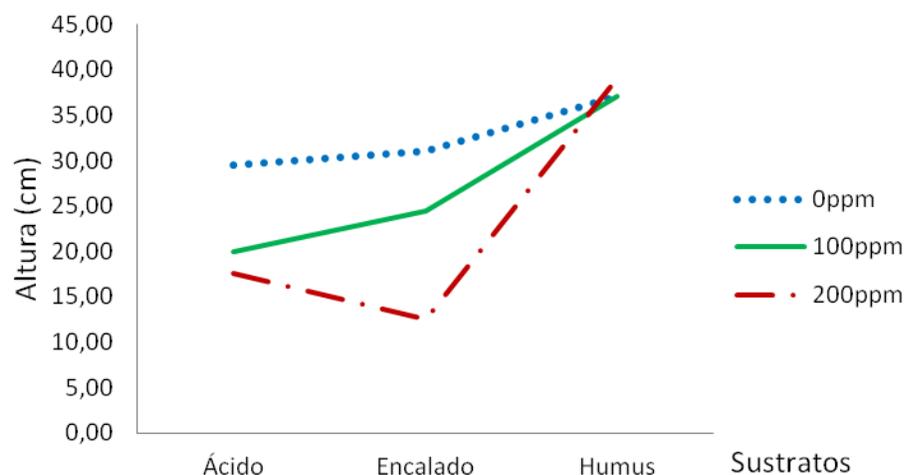


Figura 4: Altura de planta al primer corte

En general, la altura al primer corte, muestra los resultados son altamente significativos para los efectos sustrato ($p < 0.01$) y cadmio y, significativo $p < 0.05$) para la interacción suelo y cadmio, lo que lleva a inferir que el suelo tiene una importante influencia sobre el desarrollo de la planta y, en este caso el suelo orgánico favorece ampliamente la altura de la planta, aun en presencia de cadmio, observándose altura de planta similares en los tres tratamientos (0, 100 y 200ppm).

El análisis de los efectos simples confirma la influencia de los tipos de suelo sobre la altura de planta (primer corte) con resultado significativo para suelo ácido y altamente significativo para humus y suelo encalado. La alta significancia para estos tipos de sustratos se podría explicar por el efecto del pH (6.45) que estaría disminuyendo la toxicidad del cadmio; situación similar halló Alfaro (2004) cuando estudio el efecto del plomo en rye gas perenne en suelo encalado y humus. Respuestas similares, de efecto del pH y materia orgánica sobre rye grass en suelos con metales pesados, encontró Alvarenga *et al.* (2011), en un estudio donde concluye que, hay evidencias significativas que la materia orgánica es el sustrato correctivo con mayor capacidad para corregir la acidez de suelo y para mejorar las características nutricionales del mismo consiguiendo inmovilizar los metales pesados, como: cobre, plomo y zinc, del suelo estudiado.

Respecto a los efectos del encalado, sobre altura de planta, se observa que no hay diferencias significativas (Anexo 3) entre el suelo ácido y el encalado, lo que nos lleva a inferir que el pH(6.45) en los tratamientos encalado no favoreció altura de planta con respecto al suelo ácido. Este resultado podría explicarse, según Cerón (2015), cuando señala que, un factor importante que determina la efectividad de la cal, en el encalado de suelos ácidos, es la forma de aplicación, el autor recomienda que, es esencial incorporar la cal de modo que se logre un contacto máximo con el suelo en la capa arable; es así que, en los pastos perennes, la incorporación de la cal debe ser realizarse antes de la siembra. Dado que una vez establecido el pasto, la cal aplicada en la superficie reacciona más lentamente y en forma incompleta, en comparación con la cal incorporada completamente al suelo. Por lo tanto, estos suelos deben ser reencalados frecuentemente para evitar acidez excesiva en la zona radicular.

4.1.2. Altura segundo corte

En la evaluación de la variable altura del rye grass al segundo corte, se encontró efecto altamente significativo ($p < 0.01$) para suelo (Cuadro 9), los resultados muestran similares tendencias (Figuras 4 y 5) a lo observado en el primer corte, es decir sólo el humus favorece el crecimiento de la planta. Asimismo, durante el desarrollo de las plantas (post primer corte) se observa el rebrote y crecimiento típico de un sistema de adaptación. Y la interacción suelo cadmio es solo significativa ($p < 0.05$) sobre altura de planta a este corte.

Es importante resaltar las respuestas del suelo encalado, tratamientos de 100ppm y 200ppm, donde la altura de planta mejoró respecto al primer corte (24.5 y 12.5cm), esta mayor altura (27.50 y 21.50cm) pudo verse favorecida por el lavado del suelo por tipo riego diario (inundación), siendo además que el rye grass tiene raíces superficiales y el cadmio haya bajado percolación, e inclusive pudo haber ocurrido un efecto demorado del encalado.

Cuadro 9: Altura de planta al segundo corte (cm)

Cadmio	Sustrato			Promedio
	Acido	Encalado	Humus	
0ppm	21,50	24,50	38,00	28,00 ^a
100ppm	14,00	27,50	38,50	26,67 ^a
200ppm	16,00	21,50	43,50	27,00 ^a
Promedio	17,17 ^c	24,50 ^b	40,00 ^a	27,22

Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.01$)

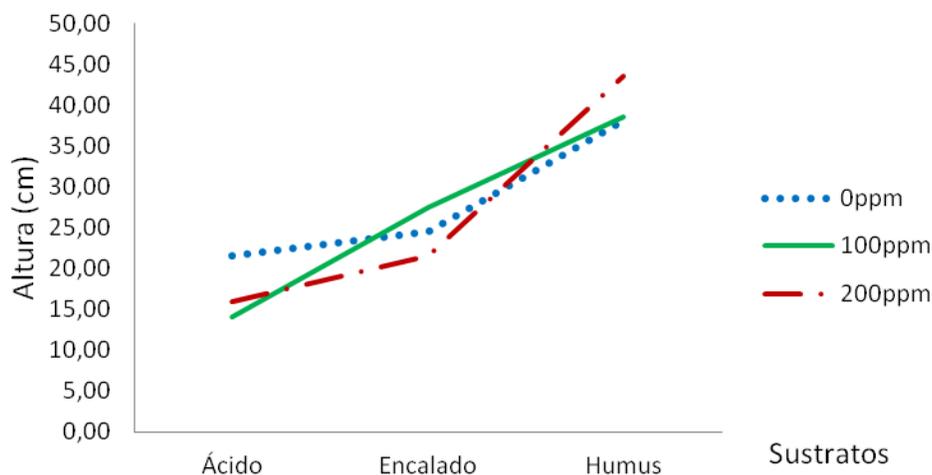


Figura 5: Altura de planta al segundo corte (cm)

4.2. Producción de Materia seca foliar

4.2.1. Materia seca foliar al primer corte

La producción de materia seca foliar del rye grass al primer corte (Cuadro 10) depende principalmente del tipo de suelo, mientras que el cadmio y la interacción suelo cadmio no son estadísticamente significativos. Los resultados obtenidos en los tratamientos con humus alcanzan el mayor peso de materia foliar y aquellos en suelos ácido y encalado, resultaron con pesos muy inferiores (Figura 6), pero diferentes entre sí, siendo la materia seca foliar producida en suelo ácido menor a la del suelo encalado. Dichas diferencias podrían deberse al efecto de la materia orgánica y el pH de cada sustrato, condiciones edáficas que han permitido el crecimiento de masa foliar y macollamiento diferenciado.

Respecto a los resultados obtenidos en los tratamientos con humus, esta respuesta puede deberse a que el humus cumple una función inhibidora sobre el contaminante y no permite que se produzcan efectos de clorosis e inhibición del proceso fotosintético, por tanto los procesos fisiológicos de la planta, como los nutricionales se llevan a cabo eficientemente y son las que mayor peso alcanzan.

Según el análisis del efecto de la interacción suelo y cadmio, los resultados muestran tendencias similares a lo obtenido en la variable altura de planta (primer y segundo corte), donde los valores más altos los genera el humus.

En el presente estudio, la materia orgánica está representada por el humus y éste como sustrato favorece el desarrollo del rye grass, que es una planta exigente en nutrientes. La toxicidad de los metales pesados (p.e. el cadmio) interfieren en el metabolismo de las plantas y la materia orgánica cumple una función buffer en suelos contaminados, ello permite la asimilación de los nutrientes requeridos por el rye grass. Los macro y micronutrientes son indispensables en la calidad y cantidad de la producción de biomasa, lo demuestra Nogueira de Paiva (2003) cuando estudió la toxicidad de níquel, aplicando crecientes niveles de níquel y observando sus efectos en el contenido y bioacumulación de nutrientes en plantones de IPE-roxo (*Tabebuiaim petiginosa*). Los resultados muestran que, en general, hubo una reducción en la concentración de potasio, calcio, magnesio, mangraneso y zinc, y un aumento en el contenido de fosforo, cobre y hierro, independientemente de la parte analizada de la planta (hojas, tallos, etc.), mientras que los contenidos de macro y micronutrientes, generalmente disminuyeron.

Cuadro 10: Producción de materia seca foliar al primer corte (g)

Cadmio	Sustrato			Promedio
	Acido	Encalado	Humus	
0ppm	1,10	1,70	13,37	5,39 ^a
100ppm	1,50	1,00	12,35	4,95 ^a
200ppm	0,60	0,90	10,69	4,06 ^a
Promedio	1,07 ^a	1,20 ^b	12,14 ^b	4,80

Letras diferentes indican diferencias significativas (p <0.01)

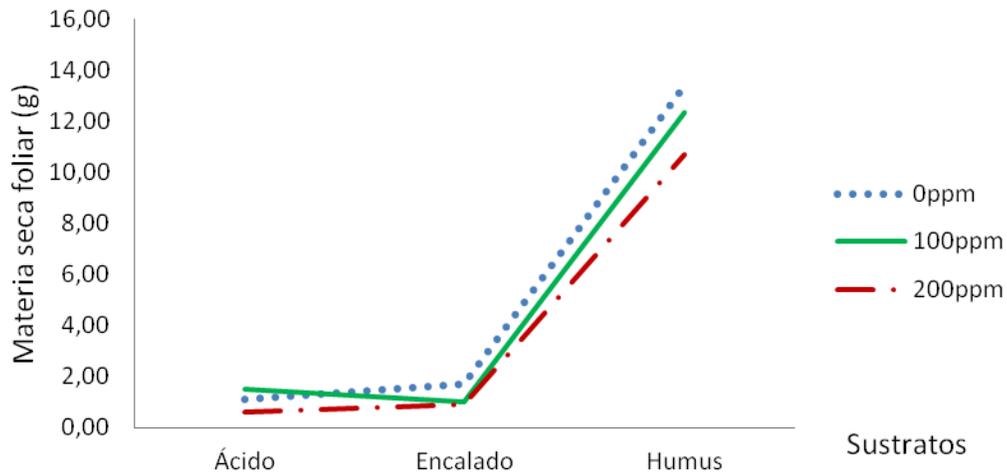


Figura 6: Producción de materia seca foliar al primer corte (g)

Armienta (2012), en su estudio de acumulación de metales pesados en maíz, encontró que el desarrollo del maíz es afectado por algunos elementos metálicos que se refleja en los diferentes órganos y tejidos que pueden presentar algunos cambios estructurales lo que altera también su rendimiento. Así, los metales pesados causan estrés oxidante en las plantas (Fayiga *et al.* 2004, citado por Armienta, 2012). Además se ha reportado que el estrés por metales afecta a la fotosíntesis, a la fluorescencia de la clorofila y a la resistencia estomatal (Monni *et al.* 2001, citado por Armienta, 2012). Por ejemplo, el cobre inhibe la fotosíntesis y los procesos reproductores, el plomo reduce la producción de clorofila mientras que el arsénico interfiere con el proceso metabólico y disminuye la germinación de las semillas (Franco–Hernández *et al.* 2010, Smith *et al.* 2010 citado por Armienta, 2012). Consecuentemente, el crecimiento de las plantas se reduce o es total (Gardea–Torresdey *et al.* 2005 citado por Armienta, 2012). Todas las plantas absorben metales del suelo donde se encuentran, pero en distinto grado dependiendo de la especie vegetal y de las características y contenido de metales en el suelo. Las plantas pueden adoptar diversas estrategias frente a la presencia de metales en su entorno (Baker 1981, Barceló *et al.* 2003, citado por Armienta, 2012).

4.2.2. Materia seca foliar al segundo corte

La producción de la materia seca foliar del segundo corte, tiene alta significancia estadística ($p < 0.01$) para el tipo de suelo y solo significativa para el cadmio, mientras que la interacción suelo y cadmio, no encontró niveles de significancia (Cuadro 11). El experimento mostró que las plantas desarrolladas en humus fueron las que mayor peso alcanzaron. Esta tendencia coincide con lo encontrado por Alfaro (2004), en su estudio de plomo en rye grass sembrado en humus.

Cuadro 11: Producción de la materia seca foliar al segundo corte (g)

Cadmio	Sustrato			Promedio
	Acido	Encalado	Humus	
0ppm	1,20	3,30	9,76	4,75 ^a
100ppm	1,30	1,40	9,95	4,22 ^{b a}
200ppm	0,56	0,53	8,52	3,20 ^b
Promedio	1,02 ^b	1,74 ^b	9,41 ^a	4,06

Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 001$)

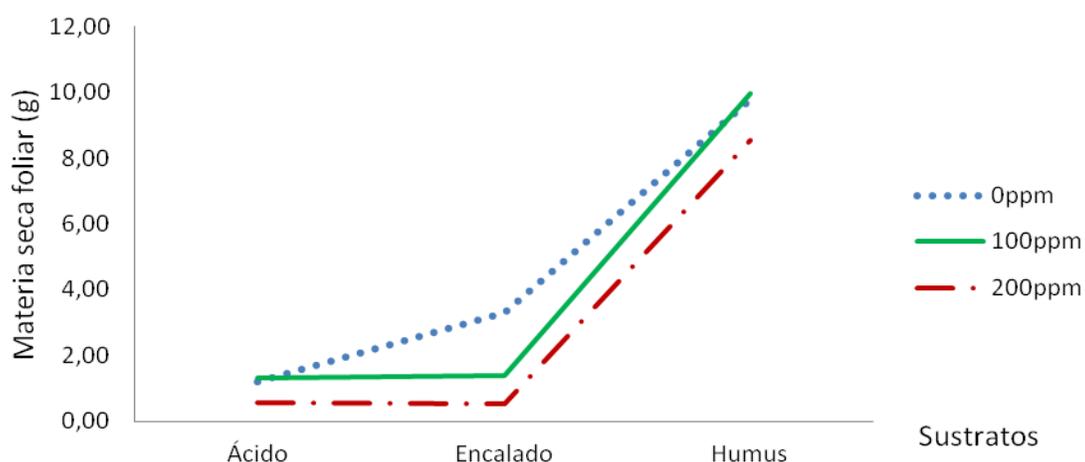


Figura 7: Producción de materia seca foliar al segundo corte (g)

4.3. Bioacumulación de cadmio foliar

Una serie de factores bioquímicos, genéticos, índices tolerancia, característica de suelo, bioacumulación, entre otros, explican la acumulación de metales pesados en las plantas. El presente trabajo midió la bioacumulación de cadmio de rye grass perenne, obteniéndose resultados experimentales alta significativos ($p < 0.01$) para los efectos suelo y cadmio y efecto significativo ($p < 0.05$) para la interacción suelo y cadmio (Cuadro 11). Se observa que la tendencia es, a mayor nivel de cadmio y menor calidad de suelo, mayor bioacumulación (ppm).

En relación, a suelo, cadmio y planta, en su estudio Bizarro (2008) afirma que el cadmio no tiene funciones biogeoquímicas esenciales, es decir, no es requerido por los organismos vivos ni micro concentraciones, pertenece al grupo de elementos no esenciales y elementos tóxicos; es riesgo aparece cuando el incremento de la cantidad de cadmio en el suelo, por cualquiera de sus fuentes, puede ser fácilmente absorbido y traslocado al interior de la planta. Bizarro (2008) estudio los suelos de la región sur de Brasil con el objetivo de cuantificar la capacidad de adsorber o retener el cadmio, de cinco tipos de suelos (pH alrededor de 5 y MO 0.19 a 0.26) y encontró que las cantidades adsorbidas varían entre 5.270 y 6.021mg de cadmio por kilogramo, resultando el latosol rojo aluminoferrico típico (pH5.1, MO 0.26, CIC 9.2, arcilla predominante caulinita), el suelo con mayor capacidad de retención de cadmio adsorbido en la porción sólida y, por tanto, es el que mantiene un menor nivel de este metal en solución del suelo.

4.3.1. Bioacumulación de cadmio foliar al primer

Las concentraciones de cadmio en hojas al primer corte (Cuadro 12) sigue una curva ascendente (Figura 9), donde la mayor bioacumulación ocurre en suelo ácido, le sigue el encalado y finalmente, el humus con una bioacumulación promedio de 4.33ppm. En la prueba Tukey (anexo 3), resultan deferencias significativas para los sustratos acido y encalado y nivel de cadmio 200ppm.

Los efectos positivos que manifiesta el rye grass en suelos orgánicos, son explicados en parte, por Navarro (2007), cuando señala que la planta utiliza un mecanismo de complejación en el interior de la célula para detoxificar (amortiguar) los metales pesados, uniendo a ellos ligandos (sustancias enlazantes, p.e. agua) para formar complejos. De esta manera, el metal queda inmerso en una interacción química que le mantiene en equilibrio electrónico (acomplejado), pero que no lo deja fuera del metabolismo, no se ha eliminado del citoplasma de la célula y, por ello, sigue siendo potencialmente tóxico.

Alfaro (2004), respecto a los efectos de Pb sobre la producción de materia seca de rye grass, señala que el plomo se trasloca en mayor proporción en el rye grass perenne que en el rye grass anual. Luego, Navarro (2007), al analizar la toxicidad de los metales pesados, enfatiza que hay un denominador común en la toxicidad de ciertos metales y que en efecto, aunque las proteínas específicas que se ven principalmente afectadas por mercurio, plomo, cadmio y arsénico pueden diferir de un metal a otro, es porque se produce una interacción bioquímica similar que es la responsable de la toxicidad de estos cuatro metales.

Cuadro 12: Bioacumulación de cadmio foliar al primer corte (ppm)

Cadmio	Sustrato			Promedio
	Acido	Encalado	Humus	
0ppm	3,50	5,00	2,00	3,50 ^b
100ppm	30,25	17,25	5,50	17,66 ^b
200ppm	70,50	47,25	5,50	41,08 ^a
Promedio	34,75 ^a	23,17 ^a	4,33 ^b	20,74

Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.01$)

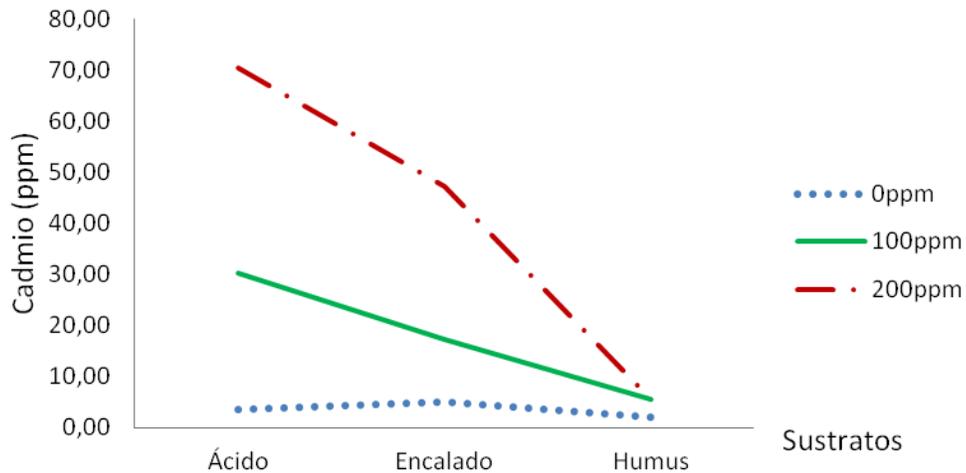


Figura 8: Bioacumulación de cadmio foliar al primer corte (ppm)

El efecto de los niveles de cadmio en la materia seca foliar al primer corte, resultó altamente significativo ($p < 0.01$) para niveles de 0 y 100ppm y significativo para 200ppm. Los valores más altos de bioacumulación de cadmio corresponde a suelos ácidos lo cual se explica por el bajo pH caracteriza estos suelos, concordando con lo que señala Allen (2000), cuando explica que el destino de los metales pesados en el suelo está controlado por factores importantes, incluyendo el pH de la solución del suelo, la presencia de ligantes complejos y una serie de propiedades del suelo, tales como textura y contenido de materia orgánica.

En el análisis del efecto sustrato sobre la bioacumulación, es el suelo ácido y encalado son los que tienen efectos altamente significativos ($p < 0.01$) así como el humus, por lo que podemos inferir que el efecto del suelo ácido se debe a su toxicidad y bajo contenido de materia orgánica, que conlleva a que la planta absorba el cadmio disponible para su bioacumulación. Y por otro lado, los efectos del suelo encalado no fueron suficientes para alcanzar una menor bioacumulación, aun cuando el pH pasó de 5 a 6.45. Estos efectos podrían deberse a varios factores, como: el uso de CaCO_3 en lugar del CaOH_2 , tiempo de encalado y la siembra, pH menor a 8.0 y porcentaje de materia orgánica en el sustrato (Espinosa et al. 1999).

4.3.2. Bioacumulación de cadmio foliar al segundo corte

En el segundo corte los resultados muestran que los efectos del sustrato, cadmio y su respectiva interacción, son altamente significativos ($p < 0.01$), en la bioacumulación de cadmio (Cuadro 13). Los tratamientos en sustrato ácido presentaron mayor bioacumulación (42.33ppm) respecto al encalado (14.58ppm) y, se destaca la respuesta en humus que tuvo valores muy bajos (7.25ppm) en relación a los anteriores; esta respuesta coincide con lo encontrado por Alfaro (2004), al analizar bioacumulación de Pb en rye grass perenne y encontró que las plantas desarrolladas en humus presentaron el nivel más bajo de bioacumulación plomo (5.53ppm) en el segundo corte. Sin embargo estos resultados difieren lo encontrado por Titto (2003) en su estudio de cadmio en alfalfa, donde la bioacumulación fue de, 61.58ppm y 115.42ppm en tratamientos de 100 y 200ppm respectivamente, ambos en humus.

Estos efectos podrían ser debido a la dinámica del cadmio en el suelo, donde el pH tuvo un rol inhibitorio, los nutrientes favorecieron el sistema de defensa de la planta que permitió su crecimiento. El efecto del cadmio se manifiesta de manera gradual y ascendente, es decir a mayores niveles de cadmio en el suelo, mayor bioacumulación en la planta, a excepción de los resultados obtenidos en humus, donde los tratamientos con 200ppm acumularon menos que los de 0ppm y 100ppm (Gráfico 9).

Cuadro 13: Bioacumulación de cadmio al segundo corte (ppm)

Cadmio	Sustrato			Promedio
	Acido	Encalado	Humus	
0ppm	4,00	4,00	12,00	6,67 ^b
100ppm	29,50	12,00	7,25	16,25 ^b
200ppm	93,50	27,75	2,50	41,25 ^a
Promedio	42,33 ^a	14,58 ^b	7,25 ^b	21,39

Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.01$)

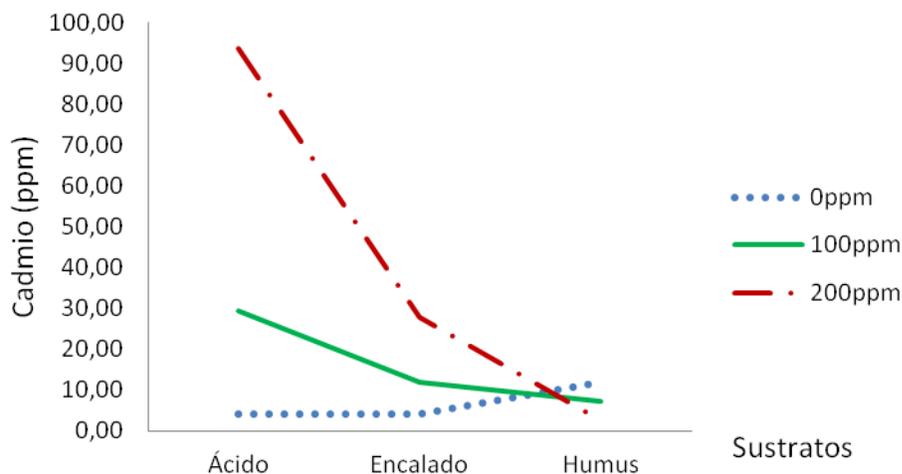


Figura 9: Bioacumulación de cadmio al segundo corte (ppm)

Estos estudios de acumulación de metales pesados en pastos y particularmente del cadmio en rye grass, centran su importancia en las consecuencias sobre la salud humana. Moreno *et al.* citado por Rodríguez *et al.* 2005, han reportado que el contenido de metales pesados en la leche de bovino puede estar influido por factores tan variados como el agua de bebida del animal, los forrajes y/o el alimento balanceado. La Norma de referencia de Rumania establece un máximo de 0.01 mg/kg de cadmio en leche cruda y niveles superiores a 0.05mg/l podrían causar daños a la salud (Rodríguez et al. 2005). Altas concentraciones de plomo, superiores a 0.5mg/kg⁻¹, representa un problema potencial para la salud (Hernández-Vazquez et al. 2012).

De los niveles de cadmio en la ingesta, la Agencia Española de seguridad Alimentaria y Nutrición (2008) establece como LMP de 0.05 mg/kg, para la carne de bovino, ovino, porcino y aves de corral (libre de vísceras); para carne de caballo, excluidas vísceras, 0.2 mg/kg. Asimismo, los LMP para hígado de bovino, ovino, porcino, aves de corral y caballos 0.5 mg/kg y para riñones de bovino, ovino, porcino, aves de corral y caballos, 1.0 mg/kg, dichos niveles de cadmio medidos en peso fresco.

La absorción de cadmio por los animales es baja, particularmente en rumiantes (Underwood y Suttle, 1999, citados por Méndez, 2001), donde los porcentajes de absorción no sobrepasan el 1%, pero la retención en el organismo es muy elevada, particularmente en los riñones, donde la vida media puede ser de varios años en rumiantes. En animales de abasto donde el tiempo de crianza es muy reducido, particularmente en monogástricos, las acumulaciones de cadmio serán muy reducidas con prácticas normales de manejo (Méndez, 2001).

4.4. Producción de macollos

El número final de macollos fue altamente influenciado ($p < 0.01$) por el tipo de sustrato y los niveles de cadmio, mientras que la interacción de estos dos factores solo tuvo influencia significativa ($p < 0.05$). Así, en todos los tratamientos con rye grass perenne sembrado en humus presenta mayor producción de macollos, alcanzando promedio de 20,67; mientras que en suelo ácido el promedio fue 2.83 y en encalado, 3.17 macollos. (Cuadro 13); por tanto, sólo se observó una alta significancia ($p < 0.01$) en el suelo orgánico, mientras que en suelo ácido y encalado mostraron significancias ($p < 0.05$). Referente al desarrollo de macollos y las respuestas en humus, Alfaro (2004) analizó las interacciones específicas entre el rye grass perenne, humus y plomo (0, 250 y 500ppm) y encontró que el número macollos es influenciado significativamente ($p < 0.05$) y observó la mejor respuesta en humus con promedio de 12.11 macollos por maceta.

Los efectos de los sustratos ácido y encalado son similares (Figura 11), lo que nos lleva a inferir que el pH del sustrato encalado no favoreció el ingreso de nutrientes necesarios para la producción de macollos, efectos similares a los obtenidos por Alfaro (2004) en su estudio de bioacumulación de plomo en rye grass perenne, donde el encalado no favorece significativamente el crecimiento del rye grass respecto al suelo ácido.

En humus, se observa gran producción de biomasa, dado por el macollamiento de la planta el mismo que se atribuye a los nutrientes que aporta la materia orgánica, aun cuando se detecto presencia de cadmio en hojas. Esta concentración de cadmio en hojas, fue baja que no afectó

el macollamiento del rye grass. Al respecto, Cueva (2004) citado por Cartaya *et al.* (2011) refiere que la alta disponibilidad de metales pesados induce en las plantas a un estrés iónico, claramente distinguible del estrés salino; por tanto los metales pesados no afectan el crecimiento de las plantas por una disminución significativa del potencial osmótico del sustrato, sino por su propia toxicidad; concluye que, un exceso de metales pesados o de sus quelatos solubles puede provocar una serie de alteraciones bioquímicas y fisiológicas entre las que se encuentran la inhibición del crecimiento de la raíz y del macollamiento.

Cuadro 14: Producción de macollos (U)

Cadmio	Sustrato			Promedio
	Acido	Encalado	Humus	
0ppm	3,50	4,50	24,00	10,67 ^a
100ppm	3,00	3,00	19,00	8,33 ^b
200ppm	2,00	2,00	19,00	7,67 ^b
Promedio	2,83 ^b	3,17 ^b	20,67 ^a	8,89

Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.01$)

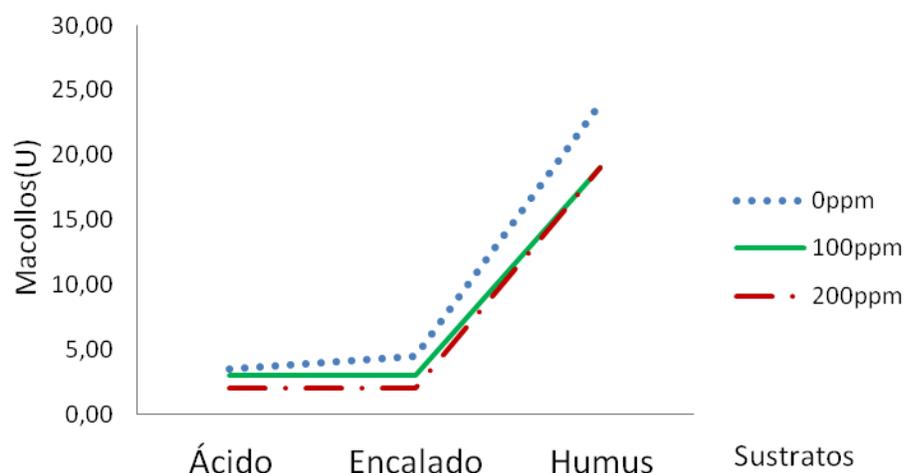


Figura 10: Producción de macollos (U)

4.5. Materia seca radicular (MSR)

El análisis estadístico (Anexo 3) muestra que el peso de la materia seca radicular depende significativamente ($p < 0.01$) del sustrato, por tanto las raíces de rye grass sembrado en humus alcanzaron un mayor peso radicular. Los tratamientos presentaron diferencias significativas ($p < 0.01$) para los tipos de sustratos y niveles de cadmio en la producción de materia seca de raíz.

Los tratamientos en suelo ácido y encalado, manifestaron efectos altamente significativos ($p < 0.01$) y la materia seca radicular producida fue mínima con características externas de daño evidentes, como: alto fragilidad del sistema radicular, muerte celular, mínimo crecimiento longitudinal y ramificaciones extremadamente delgadas y sin raíces absorbentes. La absorción de cadmio por la raíz depende de su biodisponibilidad y concentración en el suelo, la presencia de materia orgánica, el pH, el potencial redox, la temperatura y la concentración de otros elementos; el cadmio es un metal que se acumula principalmente en las raíces de las plantas y disminuye hacia la parte superior (García *et al.* 2012).

Cuadro 15: Materia seca radicular (g)

Cadmio	Sustrato			
	Acido	Encalado	Humus	Promedio
0ppm	2,00	3,10	8,40	4,50 ^c
100ppm	1,50	2,4	5,30	5,30 ^b
200ppm	0,50	0,70	3,40	3,40 ^a
Promedio	1,33 ^a	2,07 ^b	5,70 ^c	4,40

Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.01$)

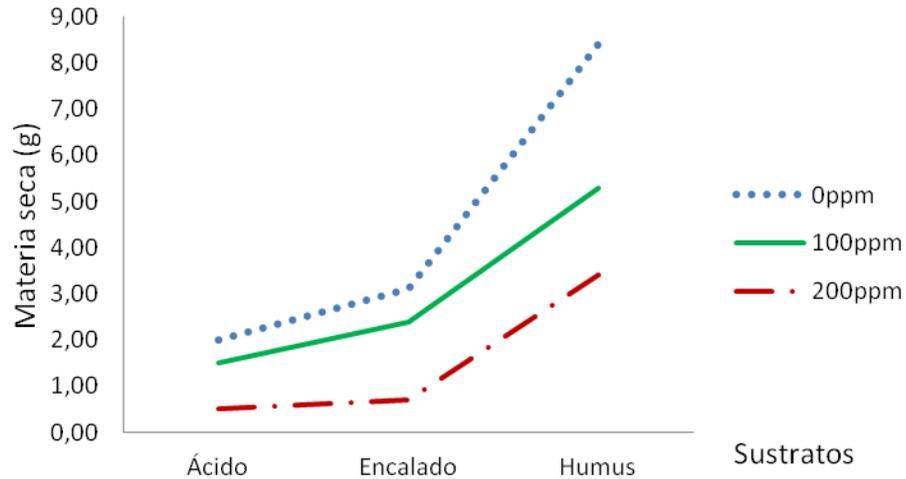


Figura 11: Materia seca radicular (g)

Dado que la raíz es un órgano vital para la planta, el efecto tóxico de los metales pesados del suelo es directo y condiciona la nutrición de la planta. Analizando el efecto del manganeso y zinc sobre el crecimiento de plantas de espinaca (*Spinacia oleracea* L.), Casierra-Posada *et al.* (2012) encontró que las raíces fueron las más afectadas por el exceso de estos metales; observó que la adición de 40 y 80 mg/l de manganeso redujo la longitud total de las raíces en 45.06 y 0.81.64%, respectivamente. La misma tendencia se observó para el zinc, donde los tratamientos con zinc (40 y 80 mg/l) disminuyeron la longitud total de raíces en 88.78 y 98.07%. Oliveira (2001) en su estudio de efectos de cadmio sobre el crecimiento de plantas acuáticas (aguape y salvinia), encontró que las concentraciones de cadmio necesarias para una reducción de 0.25% en el crecimiento relativo fueron de 3,1 μM para las raíces y de 7,1 μM para la parte aérea del aguapé.

Nogueira (2001), en su estudio de efectos del cadmio en plantones de cedro, verificó su efecto sobre las concentraciones de nutrientes (macro y micro) y encontró un aumento en los niveles de fósforo, azufre y calcio y prácticamente no hubo efecto sobre el nivel de potasio y de magnesio (macro nutrientes), estas respuestas se dieron en raíz, tallo y hoja. Y, para los micronutrientes, en la raíz hubo un aumento en el nivel de cobre y hierro y disminución en los niveles de manganeso y zinc.

V. CONCLUSIONES

1. En el primer corte, la altura de rye grass estuvo altamente influenciada por el factor sustrato y, fue en el humus donde las plantas alcanzaron el mayor promedio (39cm), mientras que en el suelo encalado se registró la menor altura, con promedio de 12.5cm; estos resultados se observaron en tratamientos con 200ppm de cadmio.
2. Respecto a la producción de materia seca foliar en el primer, esta fue altamente influenciada por los efectos del sustrato; se observó mayor producción de materia seca en humus con promedio de 12.13g y; la producción mínima se obtuvo en el tratamiento con el suelo ácido, con promedio de 0.96g.
3. La bioacumulación de cadmio en rye grass fue altamente influenciada por los sustratos, al primer y segundo corte, encontrándose la mayor bioacumulación en el sustrato ácido, con 42.33ppm y la menor en el humus con 7.2ppm.
4. La evaluación producción de macollos concluye que el número de macollos tiene una curva ascendente donde a menores niveles de cadmio y mejor calidad de sustrato, el número de macollos aumenta 2 a 24unid.
5. Los efectos del sustrato y cadmio y su interacción son altamente significativos, en la producción de materia de la raíz, observándose mayor producción en tratamientos con humus, 5.7gr.
6. El nivel de encalado (pH5,0 a pH6,45) no fue suficiente para limitar la bioacumulación de cadmio y mejorar la producción de materia seca del rye grass.

VI. RECOMENDACIONES

Se recomienda incorporar materia orgánica en los suelos que presentan contaminación por cadmio, con la finalidad de reducir la bioacumulación en la planta.

Medir el nivel inicial y final de metales pesados en los sustratos a evaluar.

Evaluar los efectos del estiércol de ganado como fuente de materia orgánica, en suelos contaminados y sembrados con rye grass.

Evaluar los efectos del encalado, en tiempo y tipo de material encalante, sobre la producción de biomasa de rye grass.

Realizar experimentos en campo a fin de confirmar las tendencias de los resultados del presente experimento, obtenidos en invernadero.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGENCIA ESPAÑOLA DE SEGURIDAD ALIMENTARIA Y NUTRICIÓN. 2008. Informe Resumen de Datos de Cadmio 2000-2007. Ministerio de Sanidad y Consumo. España. 23 pág.

ARMIENTA, M.; RUIZ, E. 2012. Acumulación de arsénico y metales pesados en maíz en suelos cercanos a jales o residuos mineros. Instituto de Geofísica y Recursos Naturales, Laboratorio de Química Analítica. Universidad Nacional Autónoma de México.

ALFARO, P. 2004. Evaluación de factores edáficos que determinan la bioacumulación de plomo (Pb) en rye grass anual (*Lolium multiflorum*) y Rye grass perenne (*Lolium perenne L.*) Escuela de Post-grado. Univ. Nac. Agr. La Molina. Lima. Perú. Tesis para optar el grado de Magister Scientiae.

ALVARENGA, P., FERNANDES, R., DE VARENNES, A., VALLINI, G., DUARTE, E., CUNHA-QUEDA, A. 2011. Utilização de *Lolium Perenne L.* na fitoestabilização controlada de solos degradados por actividades mineiras. Portugal. Rev. de Ciências Agárias vol.34 no.2 Lisboa jul. 2011.

ALONSO, C. 2002. Fitodisponibilidade de Cadmio, Chumbo e Cromio, em soja cultivada em argissolo vermelho eutrófico a partir de adubos comerciais. Scientiae Agaria Vol. 3 N° 1-2 año 2002.

ALLEN, P. 2000. Aspectos químicos y de ingeniería de suelos contaminados por metales pesados. Rev. Inter. de Contaminación Ambiental. Vol. 16, N° 4 (2000). México.

ANUARIO MINERO. 2010. Ministerio de Energia y Minas. Lima . Perú.

BIZARRO, V., GONÇALVES, T., PEREIRA, F., CARVALHO, S., MEURER, J., 2008. Adsorção de Cádmiio em Solos da Região Sul do Brasil. Departamento de Solos, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS.

BODILLA, J. 1989. Curso de Toxicología Ambiental. Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud.

BRICEÑO, D. 2007. Atenuación natural de la contaminación de los suelos producida por metales pesados. Universidad Simon Bolivar. Tesis para optar el título de Ingeniero. 90 pág. Sartenejas. Baruta. Miranda. Venezuela.

CAMPILLO, R. 2004. Encalado de suelos caracterizasen y manejo de enmiendas calcáreas. Centro Regional de Investigación INIA Carillanca. Chile.

CANADIAN ENVIRONMENTAL QUALITY GUIDELINES, SEPTEMBER. 2007.

CARDOSO, A.; NUNES, L.2001. Ecotoxicología do cadmio y seus compostos. Cadernos de referencia ambiental; V6. 122p., Salvador. Brasil.

CARTAYA, O. 2011. Empleo de polímeros naturales como alternativa para la remediación de suelos contaminados por metales pesados. Rev.Int. contam. Ambie. 27 (1) 41-46, 2011. Universidad de la Habana. Cuba.

CASIERRA-POSADA, F., ULRICHS, C., PÉREZ, C., 2012. Crecimiento de plantas de espinaca (*Spinacia oleracea* L.) expuestas a exceso de zinc y manganeso. Plant Ecophysiology Research Goup, Faculty of Agricultural Sciences, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC). Tunja (Colombia). Division Urban Plant Ecophysiology, Faculty for Agriculture and Horticulture, Universität zu Berlin. (Germany). Faculty of Veterinary Science, Universidad de Buenos Aires (Argentina). Agron. colomb. vol.30 no.3 Bogotá Sept./Dec 2012.

CERÓN, A. 2015. Manual Internacional de Fertilidad de Suelos. Instituto de la Potasa y el Fósforo. AC INPOFOS. 164pág. México.

DIEZ, F. 2008. Fitocorrección de suelos contaminados con metales pesados: Evaluación de plantas tolerantes y optimización del proceso mediante prácticas agronómicas. Universidad de Santiago de Compostela. Tesis Doctoral. España.

DIRECCIÓN GENERAL DE SALUD AMBIENTAL- DIGESA. Estándares de Calidad Ambiental de Agua. Informe Técnico. 134 p. Lima. Perú.

Disponible http://www.digesa.minsa.gob.pe/DEPA/informes_tecnicos/GRUPO%20DE%20USO%203.pdf

DUGARTE, M. 1991. La Producción de Pastos de Altura, Kikuyo y Rye grass Perenne en el estado Mérida. Estación Experimental Mérida. Programa Pastizal. FONAIAP –DIVULGA No. 36 Abril-Junio Año1991.

ECHEGARAY, M., GUERIN, C., HINOJOSA, I., ZAMBRANO, W., & TAYPE, L. 1988. Vigilancia de la contaminación marina por metales pesados en áreas críticas (moluscos bivalvos como indicadores). Simposio Internacional de los Recursos Vivos y las Pesquerías en el Pacífico Sudeste. Viña del Mar. Chile.

ESPINOSA, J.; MOLINA, E. 1999. Acidez y encalado de suelos. International Plant Nutrition Institute. IPNI. Primera Edición. 42p.

FAO.2014. Consultado en abril del 2015. Disponible en: <http://www.fao.org/soils-portal/manejo-del-suelo/manejo-de-suelos-problematicos/suelos-altamente-orgánicos/es/>.

FONSÊCA-SOUSA, C.; SIQUEIRA, J.; GUEDES DE CARVALHO, J.; SOUZA, F. 2005. Fototoxicidade de Cadmio para *Eucalyptos maculata* e *E. Yrophylla* em solução nutritiva.- Revista Arvore ISSN 0100 – 6762 Vol. 29 N° 2 Pág. 175-185. Mar – Abr 2005. Mina Gerais Brasil Sociedad de Investigacoes florestais Universidad Federal de Vicosa. Brasil.

GALLEGO, M., PÉREZ M., HERNÁNDEZ, D., SOLER, ROY. 2007. Evaluación de plomo y cadmio en pelo como indicadores de los niveles tisulares en especies cinegéticas mayores. Facultad de Veterinaria, Universidad Extremadura. Revista de Toxicología, año/ Vol.24, número 2-3. Asociación Española de Toxicología. Pamplona, España. Pág. 80-81.

GARCÍA, I., DORRONSORO, C. 2002. Contaminación por metales pesados. Tecnología de Suelos. Tema 15. Universidad de Granada. España. García, E.; García, E.; Juárez, J.; Juárez, L.; Montiel, J.; Gómez, M. 2012. La respuesta de haba (*Vicia faba*, L.) cultivada en un suelo contaminado con diferentes concentraciones de cadmio. Rev. Int. Contam. Ambiente vol.28 no.2 México. may. 2012.

GRAY, C.; MCLAREN R.; ROBERTS, A.; CENDRON, L. 1998. Effect of pH on the adsorption and desorption of soil contaminated with cadmium. Department of Soil Science, Lincoln University, PO Box 84, Canterbury. New Zealand.

GONZALES, S.; MEJIA, L.1995. Contaminación de Suelos por Cadmio Revista e Suelos Ecuatorianos, N° 4. Año 1995. Quito Ecuador.

HARRINGTON, 2000. Efecto del cadmio, zinc y cobre en el desarrollo e índice de tolerancia en el consumo y producción de ácido málico en los nutrientes de la *festuca rubra*. España.

HERNÁNDEZ-VÁZQUEZ1, MA.; TREJO-TÉLLEZ, LI.; ANAYA-ROSALES, S.; RAMÍREZ-BRIBIES, J.; 2012. Universidad y Ciencia vol.28 no.2 Villa Hermosa, Ago. 2012. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo Km. 36.5 Carretera México-Texcoco, Montecillo Edo. De México C.P. 56230.

LANNACONE, J., ALVARIÑO, L., 2005. Efecto toxicológico de 3 metales pesados sobre el crecimiento radicular de 4 plantas vasculares. Chile. Revista Agricultura Técnica ISSN 0365-2807 - Vol. 65 N° 2 Abril - Junio 2005. Instituto de Investigación Agropecuarias. Ministerio de Agricultura de Chile.

LEE, J.; JOUNCE, J.; MACKAY, A.; GRACE, N. 1996. Study of bioaccumulation of cadmium in Romney ewes. Agricultural Research Private Bag 11-008, Palmerston North, New Zealand.

MADEJON, P; MURILLO, J.M, 2002. Bioaccumulation of As, Cd, Cu, Fe and Pb in wild grasses affected by the aznalcóllar mine spill (SW Spain). Instituto de Recursos Naturales y Agobiología de Sevilla. España

MARTÍ, L., BURBA, J., CAVAGNARO, M. 2002. Metales Pesados en Fertilizantes Fosfatados, Nitrogenados y Mixtos. Rev. Fac. Cienc. Agrar., Univ. Nac. Cuyo. Vol 34 N° 2 2002 - Mendoza. Argentina.

MARTÍNEZ, L., GUZMÁN, X. 2004. “Efectos Istopatológicos producidos por Cadmio en la Fase de desintoxicación del ostión *Crassostrea virginica*”. Dpto. de Hidrobiología- Unidad Ixtapalapa Universidad Autónoma Metropolitana. Mexico.

MÉNDEZ, J. 2001. XVII Metales Pesados en Alimentación Animal. Curso de Especialización FEDNA. COREN S.C.L., 32003 Orense. Argentina.

NAVARRO, J., AGUILAR, I., LÓPEZ, J. 2007. Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y bioacumulación de metales pesados en plantas. Ecosistemas. Vol. 16, n. 2 (mayo-ag. 2007). ISSN 1697-2473, pp. 10-25.

NOGUEIRA DE PAIVA, H., GUEDES DE CARVALHO, J., SIQUEIRA. 2001. Efeito da aplicacao de cádmio sobre o teor de nutrientes em mudas de cedro (*cedrella fissilis* VELL.) Ciencia Forestal, Santa Maria, v. 11, n.2, P. 153-162.

NOGUEIRA DE PAIVA, H., GUEDES DE CARVALHO, J., SIQUEIRA, O., RODRIGUES., A., FERNANDES, J., PAES DE MIRANDA, R. 2003. Efeito da aplicação de doses crescentes de níquel sobre o teor e o conteúdo de nutrientes em mudas de ipê-roxo

(*Tabebuia impetiginosa* (Mart.) Standley). *Scientia Forestalis* n. 63, p. 158-166, jun. 2003. Brasil.

OLIVEIRA, J.; CAMBRAIA, J.; OLIVA, M; PEREIRA, J. 2001. Absorção e acúmulo de cádmio e seus efeitos sobre o crescimento relativo de plantas de aguapé e de *Salvília*. Departamento de Biologia Geral, Universidade Federal de Viçosa, 36.501-000.2001 - Viçosa, MG.

ORSAG, V. 2001. Evaluación comparativa del contenido de metales pesados en algunos suelos del altiplano central (Oruro). *Rev. JILTANANI*. Fac. de Agr. de la Univ. Mayor de San Andrés. La Paz. Bolivia.

PERNIA, B., DE SOUSA, A., REYES, R., CASTRILLO, M. 2008. Biomarcadores de Contaminación por Cadmio en las Plantas. *Revista INTERCIENCIA* Vol.33 Nº 2.

PIRES, F.; SOUZA, C.; SILVA, A.; PROCÓPIO, S.; FERREIRA, L. 2003. Fitorremediação de solos contaminados com metais pesados. *Universidade Federal de Vicosa. Brasil. Planta daninha* vol.21 no.2 Viçosa May/Aug.

PORTA, J.1994. *Edafología: Uso y protección de suelos*. Madrid. Ediciones Mundi-Prensa.

RAMÍREZ, A. 1986. Contaminación por Cadmio en una ciudad metalúrgica. *Boletín de la Oficina Sanitaria Panamericana*. Washington D.C. Unites States.

REVISTA DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS. ISSN 0370 – 4661. Tomo XXXIV Nº2 – Año 2002. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza – Argentina.

RODRÍGUEZ, M.; MUÑIZ, O.; BERNARDO, M., MONTERO, A.; MARTÍNEZ, F.; LIMERES, T.; ORPHEE, M.; DEL AGUILA, A. 2012. Contenido de metales pesados en abonos orgánicos, sustratos y plantas cultivadas en organopónicos. *Rev. Cultivos Tropicales*,

2012, vol. 33, no. 2, p. 5-12 abril-junio. Ministerio de Educación Superior. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas. Cuba.

RODRÍGUEZ H, SÁNCHEZ E, RODRÍGUEZ M, VIDALES J A., ACUÑA K A., MARTÍNEZ GAVO Y RODRÍGUEZ J. 2005. Metales pesados en leche cruda de bovino. México. [Revista electrónica] Salud Pública y Nutrición. 2005; 6(4). Oct.-Dic. 2005 Disponible en: <http://www.respyn.uanl.mx/vi/4/articulos/metales>.

RODRÍGUEZ-SERRANO, M.; MARTÍNEZ-DE LA CASA, N.; ROMERO-PUERTAS, MC.; DEL RÍO, L.; SANDALIO, S. 2008. Toxicidad del Cadmio en Plantas. Revista científica y técnica de ecología y medio ambiente – Ecosistemas 17(3):139-146. Dpto. de Bioquímica, Biología Celular y Molecular de Plantas, Estación Experimental del Zaidín, CSIC, Apdo. 419, 18080. Granada, España.

ROHLEDER, H.; KORTE, F. 1982. Exotoxicological Aspects of Cadmium. INDEN Vol 5 N°1.

SÁNCHEZ, M.; SÁNCHEZ, M. 1993. La adsorción y movilidad de cadmio en las tierras naturales, sin cultivar. Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología, CSIC. Apdo. 257, 37071, Salamanca, España.

SEOÁNEZ, M. 1999. Contaminación del suelo, estudios, tratamiento y gestión. Ediciones Mundi – Prensa. Madrid – España.

TITTO, D. 2003. Estudio de factores edáficos que afectan la biodisponibilidad de cadmio en el cultivo de alfalfa. Univ. Nac. Agr. La Molina. Lima (Perú). Facultad de Ciencias. Esp. Ingeniería Ambiental. Tesis para optar el Título de Ingeniero Ambiental. 108p.

VIZCARRA, A. 2005. Ecósfera. La ciencia ambiental y los desastres ecológicos. Lima – Perú.

Web: www.crop.scijournals.org/cgi/content/abstract/41/5/1565)

Web: www.digesa.gob.pe

VIII. ANEXOS

ANEXO1. Resultados del experimento

Nº	Sustrato	Tratamientos Cadmio (ppm)	MS 1er corte	MS 2do Corte	MS de raíz	Cadmio foliar1er corte (ppm)	Cadmio foliar (ppm) 2do corte	Altura 1er Corte	Altura 2do Corte	Macollos
1	Ácido	0	0.98	1.5	2.0	4.5	3.0	29	18	3
2	Ácido	0	1.22	0.88	1.9	2.5	5.0	30	25	4
3	Ácido	1	1.31	0.93	1.4	39.5	23.0	25	13	3
4	Ácido	1	1.07	1.72	1.5	21.0	36.0	15	15	3
5	Ácido	2	0.76	0.73	0.5	65.0	72.0	17	15	2
6	Ácido	2	0.43	0.40	0.5	76.0	115.0	18	17	2
7	Encalado	0	2.08	2.46	3.1	6.5	4.5	32	25	5
8	Encalado	0	1.29	4.14	3.0	3.5	3.5	30	24	4
9	Encalado	1	1.02	1.55	2.4	16.5	11.5	20	25	3
10	Encalado	1	1.06	1.26	2.4	18.0	12.5	29	30	3
11	Encalado	2	0.5	0.85	0.7	66.0	20.5	13	18	2
12	Encalado	2	1.30	0.20	0.6	28.5	35.0	12	25	2
13	Humus	0	13.60	8.60	8.4	2.0	15.0	37	38	25
14	Humus	0	13.14	10.92	8.4	2.0	9.0	38	38	23
15	Humus	1	10.06	10.27	5.3	5.5	5.0	37	39	18
16	Humus	1	14.64	9.64	5.3	5.5	9.5	38	38	20
17	Humus	2	12.20	8.52	3.3	5.0	2.0	37	42	20
18	Humus	2	9.19	8.52	3.4	6.0	3.0	41	45	18

ANEXO 2. Panel fotográfico del experimento



Foto 1: Rye grass en suelo ácido (A) , encalado (B) y humus(C)



Foto 2: Rye grass en suelo ácido luego del 1er corte



Foto 3. Rye grass en suelo encalado, luego del 1er corte.



Foto 4. Rye grass en humus 75 días

ANEXO 3: Análisis estadístico de los resultados

Efecto de la interacción sustrato y cadmio sobre la altura al primer corte

Ácido	Promedio		Encalado	Promedio		Humus	Promedio	
Ácido(0)	29.5	A	Encalado(0)	31	A	Humus(0)	37.5	A
Ácido(100)	20	B	Encalado(100)	24.5	B	Humus(100)	37.5	A
Acido(200)	17.5	B	Encalado(200)	12.5	C	Humus(200)	39.0	A

Efecto de la interacción sustrato y cadmio sobre la altura al segundo corte

Ácido	Promedios		Encalado	Promedios		Humus	Promedios	
Ácido(o)	21.5	A	Encalado(0)	24.5	A	Humus(0)	38	A
Ácido(100)	14	B	Encalado(100)	27.5	A	Humus(100)	38.5	A
Ácido(200)	16	B	Encalado(200)	21.5	B	Humus(200)	5.5	B

Efecto de la interacción sustrato cadmio sobre la bioacumulacion al primer corte

Acido	Promedios		Encalado	Promedios		Humus	Promedios	
Acido(o)	3.5	A	Encalado(0)	5	A	Humus(0)	2	A
Acido(100)	30.25	B	Encalado(100)	17.25	A	Humus(100)	5.5	A
Acido(200)	70.5	C	Encalado(200)	47.25	B	Humus(200)	5.5	A

Efecto de la interacción sustrato y cadmio sobre la bioacumulacion al segundo corte

Acido	Promedios	tukey	Encalado	Promedios	tukey	Humus	Promedios	Tukey
Acido(o)	4	C	Encalado(0)	4	A	Humus(0)	12.00	A
Acido(100)	29.5	B	Encalado(100)	12.00	A	Humus(100)	7.25	B
Acido(200)	93.5	A	Encalado(200)	27.75	B	Humus(200)	2.5	C

Altura de rye grass al primer corte

Fuente de Variación	GL	SC	CM	Fcal	Pr < F	Sign
Sustrato	2	961.33	480.66	42.00	<.0001	**
Cadmio	2	281.33	140.66	12.29	0.0027	**
Sustrato x cadmio	4	234.33	58.58	5.12	0.0198	**
Error	9	103.00	11.44			
Total	17	1580.00				

Prueba de Tukey para sustrato

Tukey Grouping	Mean	N	Sustrato
A	38.000	6	Humus
B	22.667	6	Encalado
B	22.333	6	Acido

Prueba de Tukey para cadmio

Tukey Grouping	Mean	N	Cadmio
A	32.667	6	0
B A	27.333	6	100
B	23.000	6	200

Altura al segundo corte

Fuente de Variación	GL	SC	CM	Fcal	Pr < F	Sign
Sustrato	2	1630.77	815.38	103.36	<.0001	**
Cadmio	2	5.77	2.88	0.37	0.7032	ns
Sustrato x cadmio	4	127.55	31.88	4.04	0.0380	*
Error	9	71.00	7.88			
Total	17	1835.11				

Prueba de Tukey para sustrato

Tukey Grouping	Mean	N	Sustrato
A	40.00	6	Humus
B	24.50	6	Encalado
C	17.16	6	Acido

Prueba de Tukey para cadmio

Tukey Grouping	Mean	N	Cadmio
A	28.000	6	0
A	27.000	6	2
A	26.667	6	1

Materia seca al primer corte

Fuente de Variación	GL	SC	CM	Fcal	Pr < F	Sign
Sustrato	2	488.88	244.44	138.64	<.0001	**
Cadmio	2	5.314	2.65	1.51	0.2726	ns
Sustrato x cadmio	4	3.08	0.77	0.44	0.7786	ns
Error	9	15.86	1.76			
Total	17	513.15				

Prueba de Tukey para sustrato

Tukey Grouping	Mean	N	Sustrato
A	12.1383	6	Humus
B	1.2083	6	Encalado
B	0.9617	6	Acido

Prueba de Tukey para cadmio

Tukey Grouping	Mean	N	Cadmio
A	5.3850	6	0
A	4.8600	6	1
A	4.0633	6	2

Materia seca al segundo corte

Fuente de Variación	GL	SC	CM	Fcal	Pr < F	Sign
Sustrato	2	259.25	129.62	228.18	<.0001	**
Cadmio	2	7.42	3.71	6.54	0.0176	**
Sustrato x cadmio	4	3.69	0.92	1.63	0.2498	ns
Error	9	5.11	0.56			
Total	17	275.48				

Prueba de Tukey para sustrato

Tukey Grouping	Mean	N	Sustrato
A	9.4117	6	Humus
B	1.7433	6	Encalado
B	1.0267	6	Acido

Prueba de Tukey para cadmio

Tukey Grouping	Mean	N	Cadmio
A	4.75	6	0
B A	4.22	6	1
B	3.20	6	2

Bioacumulación de cadmio al primer corte

Fuente de Variación	GL	SC	CM	Fcal	Pr < F	Sign
Sustrato	2	2828.08	1414.04	13.50	0.0020	**
Cadmio	2	4323.08	2161.54	20.63	0.0004	**
sustratocadmio	4	2133.08	533.27	5.09	0.0201	**
Error	9	942.87	104.76			
Total	17	10227.12				

Prueba de Tukey para sustrato

Tukey Grouping	Mean	N	Sustrato
A	34.750	6	Acido
A	23.167	6	Encalado
B	4.333	6	Humus

Prueba de Tukey para cadmio

Tukey Grouping	Mean	N	cadmio
A	41.083	6	2
B	17.667	6	1
B	3.500	6	0

Bioacumulación de cadmio foliar al segundo corte

Fuente de Variación	GL	SC	CM	Fcal	Pr < F	Sign
Sustrato	2	4130.02	2065.01	16.52	0.0010	**
Cadmio	2	3766.36	1883.18	15.06	0.0013	**
sustrato*cadmio	4	5373.55	1343.38	10.75	0.0018	**
Error	9	1125.12	125.01			
Total	17	14395.06				

Prueba de Tukey para sustrato

Tukey Grouping	Mean	N	sustrato
A	42.333	6	Acido
B	14.333	6	Encalado
B	7.250	6	Humus

Prueba de Tukey para cadmio

Tukey Grouping	Mean	N	cadmio
A	41.000	6	200
B	16.250	6	100
B	6.667	6	0

Producción de macollos

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fcal	Pr < F	Sign
Sustrato	2	1248.77	624.38	802.79	<.0001	**
Cadmio	2	29.77	14.88	19.14	0.0006	**
sustrato*cadmio	4	12.22	3.05	3.93	0.0410	*
Error	9	7.00	0.77			
Total	17	1297.77				

Prueba de Tukey para cadmio

Tukey Grouping	Mean	N	Cadmio
A	10.66	6	0
B	8.33	6	100
B	7.66	6	200

Prueba de Tukey para sustrato

Tukey Grouping	Mean	N	Sustrato
A	20.6667	6	Humus
B	3.1667	6	Encalado
B	2.8333	6	Acido

Materia seca de la raíz

Fuente de Variación	GL	SC	CM	Fcal	Pr < F	Sign
Sustrato	2	65.61	32.80	Infty	<.0001	**
Cadmio	2	26.41	13.20	Infty	<.0001	**
Sustrato x cadmio	4	7.49	1.87	Infty	<.0001	**
Error	9	0.00	0.00			
Total	17	99.52				

Prueba de Tukey para sustrato

Tukey Grouping	Mean	N	Sustrato
A	5.700	6	Humus
B	2.067	6	Encalado
C	1.333	6	Acido

Prueba de Tukey para cadmio

Tukey Grouping	Mean	N	Cadmio
A	4.500	6	0
B	3.067	6	100
C	1.533	6	200