

**FITOTOXICIDAD DEL CADMIO (Cd) Y EL MERCURIO (Hg) EN LA ESPECIE
BRASSICA NIGRA.**

Trabajo presentado por los estudiantes:

Santiago Arenas Moya
Santiago Andrés Hernández Caro

Para optar al título de Ingeniero Ambiental

Tutora: Gladis Estela Morales Mira

UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN

2012

Contenido

| | |
|---|----|
| 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 7 |
| 1.1 Problemática de los metales pesados..... | 7 |
| 1.2 Afectaciones a la salud por contaminación con metales pesados..... | 9 |
| 2. JUSTIFICACIÓN | 11 |
| 2.1 Brassica nigra y cadmio (Cd)..... | 12 |
| 2.2 Brassica nigra y mercurio (Hg)..... | 12 |
| 3. OBJETIVOS | 13 |
| 3.1 OBJETIVO GENERAL..... | 13 |
| 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 13 |
| 4. MARCO DE REFERENCIA | 14 |
| 4.1 MARCO TEÓRICO..... | 14 |
| 4.1.1 Fitorremediación..... | 14 |
| 4.1.2 Los residuos tóxicos y peligrosos..... | 16 |
| 4.1.3 La minería Artesanal..... | 16 |
| 4.1.3.1 La minería de oro en Antioquia..... | 18 |
| 4.1.4 Fertilizantes fosfatados..... | 19 |
| 4.1.5 Metales pesados..... | 21 |
| 4.1.5.1 El Cadmio (Cd)..... | 21 |
| 4.2 MARCO CONCEPTUAL..... | 35 |
| 5. HIPÓTESIS | 38 |
| 6. METODOLOGÍA | 39 |
| 6.1 Determinación de medio de cultivo:..... | 39 |
| 6.2 Preparación de soluciones de contaminantes..... | 39 |
| 6.3 Contaminación de los medios de cultivo:..... | 40 |
| 6.4 Siembra de las plántulas:..... | 40 |
| 6.5 Seguimiento y mantenimiento a las unidades experimentales:..... | 41 |
| 6.6 Extracción de plántulas, medición de la longitud de raíz y pesaje:..... | 41 |
| 6.7 Tratamiento de muestras para el análisis de Cd y Hg..... | 42 |
| 6.8 Tratamiento de datos..... | 42 |
| 7. RESULTADOS | 43 |
| 7.1 Resultados de germinación de semillas en los medios contaminados..... | 43 |

| | |
|--|-----------|
| 7.2. Resultados para el Cadmio..... | 45 |
| 7.2.1 Análisis de Biomasa | 45 |
| 7.2.2 Análisis de Acumulación de Cd..... | 48 |
| 7.3. Resultados para el Mercurio | 52 |
| 7.3.1 Análisis de Biomasa | 52 |
| 7.3.2 Análisis de Acumulación de Hg..... | 56 |
| 8. CONCLUSIONES | 59 |
| 9. BIBLIOGRAFÍA | 60 |

Gráficas.

| | |
|---|----|
| Gráfica 1. Gráfica de medias del peso de material en presencia de Cd para Germinación. | 46 |
| Gráfica 2. Gráfica de medias del peso de material en presencia de Cd para Trasplante. | 46 |
| Gráfica 3. Gráfica de medias del crecimiento de raíz en presencia de Cd para Germinación. | 47 |
| Gráfica 4. Gráfica de medias del crecimiento de raíz en presencia de Cd para Trasplante. | 48 |
| Gráfica 5. Comparación de los sistemas en cuanto a la acumulación de Cd a diferentes dopas. | 50 |
| Gráfica 6. Comparación de las concentraciones finales de cadmio en los tres sistemas para todas las dosis evaluadas. | 50 |
| Gráfica 7. Análisis de regresión para la absorción de las plántulas trasplantadas a Dopas de Cd. | 51 |
| Gráfica 8. Análisis de regresión para la absorción de las plántulas trasplantadas a Dopas de Cd. | 52 |
| Gráfica 9. Gráfica de medias del peso de material en presencia de Hg para Germinación. | 54 |
| Gráfica 10. Gráfica de medias del peso de material en presencia de Hg para Trasplante. | 54 |
| Gráfica 11. Gráfica de medias del crecimiento de raíz en presencia de Hg para Germinación. | 55 |
| Gráfica 12. Gráfica de medias del crecimiento de raíz en presencia de Hg para Trasplante. | 56 |
| Gráfica 13. Comparación de los sistemas en cuanto a la acumulación de Cd a diferentes dopas. | 57 |
| Gráfica 14. Comparación de las concentraciones finales de mercurio en los tres sistemas para todas las dosis evaluadas. | 58 |

Ilustraciones

| | |
|---|----|
| Ilustración 1. Enfermedades originadas por problemas ambientales | 9 |
| Ilustración 2. Características de la especie Brassica nigra..... | 15 |
| Ilustración 3. Quebrada La Cianurada del municipio de Segovia, Departamento de Antioquia. Colombia..... | 19 |
| Ilustración 4. Contribución relativa de las diferentes fuentes de cadmio. | 20 |
| Ilustración 5. Productos con contenido de Cadmio. | 22 |
| Ilustración 6. Importaciones y exportaciones para América Latina y el Caribe de productos que contienen cadmio..... | 23 |
| Ilustración 7. Importaciones para América Latina y el Caribe de productos que contienen cadmio. | 23 |
| Ilustración 8. Principales países de América Latina y el Caribe importadores de abonos, químicos, fertilizantes y materiales fosfatados..... | 24 |
| Ilustración 9. Productos que contienen mercurio en su estructura. | 28 |
| Ilustración 10. Consumo y emisiones atmosféricas estimadas. | 29 |
| Ilustración 11. Consumo de mercurio en toneladas métricas por año..... | 30 |
| Ilustración 12. Macetas de siembra para medios contaminados con mercurio (Izq) y cadmio (Der) | 41 |
| Ilustración 13. Porcentaje de germinación de las semillas de Brassica nigra en medios contaminados con mercurio..... | 44 |
| Ilustración 14. Porcentaje de germinación de las semillas de Brassica nigra en medios contaminados con mercurio..... | 44 |

Tablas.

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Medias correspondientes al Peso del Material en los sistemas evaluados - Trasplante y Germinación..... | 45 |
| Tabla 2. Medias correspondientes al crecimiento de la raíz en los sistemas evaluados - Trasplante y Germinación. | 47 |
| Tabla 3. Medias correspondientes a la concentración de Cd luego de suspender el ensayo..... | 49 |
| Tabla 4. Medias correspondientes al Peso del Material en los sistemas evaluados - Trasplante y Germinación..... | 53 |
| Tabla 5. Medias correspondientes al crecimiento de la raíz en los sistemas evaluados - Trasplante y Germinación. | 55 |
| Tabla 6. Medias correspondientes a la concentración de Hg luego de suspender el ensayo..... | 56 |

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los procesos intensivos de explotación agrícola y minera generan gran cantidad de problemas socio-ambientales, que pueden afectar, en ocasiones de manera irreversible, extensiones considerables de suelo, fuentes hídricas, la calidad del aire, la biota, la fauna y en determinados casos la idiosincrasia de las comunidades, llegando inclusive más allá del lugar donde surgen, traspasando las fronteras locales, municipales y regionales.

La contaminación ambiental, es uno de los problemas fundamentales de la humanidad. En nuestro medio resulta particularmente grave que a partir del crecimiento demográfico que ocurre en los municipios auríferos y de la explotación intensiva de este recurso (oro), se han incrementado los agentes contaminantes generados por el mal uso y disposición de los productos químicos utilizados para su beneficio (mercurio y cianuro, principalmente), afectando la convivencia entre los actores y el medio ambiente, evidenciándose una fuerte alteración de las fuentes hídricas, de la calidad del aire, del suelo y de los diferentes ecosistemas de la región. (Hincapié, 2006)

1.1 Problemática de los metales pesados

Características como las condiciones bio acumuladoras tóxicas y su gran persistencia en el ambiente, hacen que los metales pesados sean de alta peligrosidad para la salud humana, siendo los más nocivos el mercurio (Hg), el cadmio (Cd) y el plomo (Pb), seguidos por el cobre (Cu), zinc (Zn), Cromo (Cr) y níquel (Ni). Uno de los problemas más graves es su acumulación dentro de la cadena trófica, ya que al no ser biodegradables se mantienen a nivel molecular dentro de cada especie, aumentando su toxicidad por cada nivel que avanzan en la cadena, siendo el humano el último nivel y el más expuesto a elevadas concentraciones de los mismos. (Besada, González, & Schultze, 2006)

En el distrito minero del departamento de Antioquia, específicamente en los municipios de Segovia y Remedios, la extracción de oro constituye la principal actividad laboral de la región. Y a pesar de ser una importante fuente de ingresos y empleo, esta actividad genera actualmente graves problemas de contaminación ambiental, ocasionados por los productos químicos y altamente tóxicos mercurio (Hg) y cianuro (CN), utilizados en los procesos de limpieza del metal precioso. (Hincapié, 2006)

Además, la contaminación ambiental por cadmio (Cd) ha aumentado como consecuencia del incremento de la actividad industrial que ha tenido lugar a finales del siglo XX y principios del siglo XXI, afectando de forma progresiva a los diferentes ecosistemas (Pinto, 2004). La aplicación de fertilizantes fosfatados, el uso de combustibles fósiles y algunas fuentes naturales contribuyen a la acumulación de cadmio (Cd) en el suelo y su posterior introducción en la cadena trófica, con posibilidades de afectar la salud humana. (Järup & Akesson, 2009)

Entre los factores antropogénicos de contaminación por cadmio (Cd), caben destacar las emisiones atmosféricas derivadas de las minas metalúrgicas, la incineración de residuos, la producción de pigmentos para cristales, anticorrosivos, baterías de Ni/Cd e insecticidas (McLaughlin & Singh, 1999), además de los depósitos directos por la utilización incontrolada de fertilizantes fosfatados (Alloway & Steinnes, 1999).

Por lo que las altas concentraciones de metales pesados en el suelo pueden causar un problema de seguridad en la producción de cultivos, calidad de los alimentos y salud del medio ambiente, además de grandes conflictos debido a la muerte de animales, enfermedades crónico-degenerativas y enfrentamientos entre la industria y la población. (Puga, Sosa, Lebgue, Quintana, & Campos, 2006)

Para el caso del presente estudio, en zonas mineras y terrenos con alta exposición a agroquímicos, las características del suelo juegan un papel muy importante para la disposición de estos metales, debido a que es posible aumentar o reducir la toxicidad de los contaminantes en los diferentes perfiles del suelo, de acuerdo a las propiedades de cada metal o características físico-químicas de cada suelo, resaltando que cuando se acumulan en la superficie presentan una mayor disponibilidad para las raíces. (Puga, Sosa, Lebgue, Quintana, & Campos, 2006)

La posibilidad de absorción de los contaminantes es directamente proporcional a la concentración de los mismos, aumentando cuando los contaminantes se presentan en solución, es decir cuando permanecen más disponibles para la planta. La manera de reducción o degradación de estos metales es mediante procesos de lixiviación, erosión o mediante la absorción de las plantas. (Puga, Sosa, Lebgue, Quintana, & Campos, 2006)

1.2 Afectaciones a la salud por contaminación con metales pesados

Se debe considerar el planteamiento de la OMS en el 2004: “el consumo de alimentos y agua contaminados con metales pesados, plantea graves enfermedades para varios cientos de millones de seres humanos en el mundo”

En la Ilustración 1, se muestran algunas enfermedades de origen ambiental que han ocurrido a lo largo de la historia. Resaltando para el presente estudio las enfermedades originadas por metales pesados como plomo, cadmio y mercurio (como metil mercurio), las cuales se generaron por interacción directa de dichos metales con el ambiente y posteriormente con los seres humanos, ocasionando afectaciones a la salud de las poblaciones.

Ilustración 1. Enfermedades originadas por problemas ambientales

| Lugar y año | Peligro ambiental | Tipo de enfermedad | Número de afectados |
|----------------------------|---|--|---|
| Londres, RU 1952 | Grave contaminación del aire por dióxido de azufre y partículas en suspensión | Más manifestaciones de enfermedades cardíacas y pulmonares | 3.000 muertos y muchos enfermos |
| Toyama, Japón dec. 1950 | Cadmio en el arroz | Renal y ósea (“enfermedad de Itai-itai”) | 200 graves, muchos más leves |
| Sudeste de Turquía 1955-61 | Hexaclorobenceno en cereales | Porfiria; neurológica | 3.000 |
| Minamata, Japón 1956 | Metilmercurio en el pescado | Neurológica (“enfermedad de Minamata”) | 200 graves, 2.000 posibles afectados |
| Ciudades EE.UU. 1960-80 | Plomo en pinturas | Anemia, efectos en la mente y en el comportamiento | Muchos miles |
| Fukuoka, Japón 1968 | Bifenilos policlorados (PCB) en aceite comestible | Cutánea, debilidad general | Varios miles |
| Irak 1972 | Metilmercurio en cereales | Neurológica | 500 muertos, 6.500 hospitalizados |
| Madrid, España 1981 | Anilina u otra toxina en aceite comestible | Síntomas varios | 340 muertos, 20.000 afectados |
| Bhopal, India 1985 | Isocianato de metilo | Pulmonar aguda | 2.000 muertos, 200.000 intoxicados |
| California, EE.UU. 1985 | Plaguicida con carbamato en sandías | Efectos sobre los sistemas gastrointestinal, óseo, muscular y nervioso autónomo y central (enfermedad del carbamato) | 1.376 casos notificados por consumo, 17 graves |
| Chernobil, URSS 1986 | Yodo-134, Cesio-134 y -137 por explosión de un reactor | Radiación (incluidos incrementos del cáncer y las enfermedades tiroideas en los niños) | 300 heridos, 28 muertos en tres meses, más de 600 casos de cáncer de tiroides |
| Goiania, Brasil 1987 | Cesio-137 de un aparato (abandonado) para radiar a enfermos de cáncer | Radiación (continúa el seguimiento de las exposiciones <i>in utero</i>) | Alrededor de 240 contaminados y dos muertos |
| Perú 1991 | Epidemia de cólera | Cólera | 139 muertos, muchos miles de afectados |

Fuente: Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo, capítulo 53 Riesgos Ambientales Para La Salud

Dado que, el mercurio (Hg) y el cadmio (Cd) se consideran contaminantes peligrosos debido a sus características tóxicas y a la alta movilidad en estado iónico (Jaramillo J., 2002), y que una planta con capacidad de fitorremediación se caracteriza por tener una alta producción de biomasa e hiper acumular metales pesados y otros contaminantes, es necesario conocer el comportamiento tóxico y la capacidad de acumulación de la especie *Brassica nigra* en medios contaminados con los metales mercurio (Hg) y cadmio (Cd), a diferentes niveles

de los contaminantes. Para ayudar a determinar si dicha especie posee potencial para emplearse en la fitorremediación.

De los anterior surge la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuáles son los efectos tóxicos y la capacidad de acumulación de mercurio (Hg) y cadmio (Cd) en la especie *Brassica nigra*?

2. JUSTIFICACIÓN

Existe clara evidencia de la problemática ambiental derivada de la contaminación de suelos, ocasionada principalmente por procesos agrícolas y mineros mal controlados. Además, se conocen especies de plantas con capacidad de absorción y retención de contaminantes del suelo, como algunos metales pesados.

Se conoce que la familia *Brassicaceae*, de la cual hace parte la especie *Brassica nigra*, posee un alto poder para acumular metales pesados y considerable producción de biomasa, además de presentar alta velocidad de crecimiento y tolerancia ante dichos contaminantes. (Angelova & Ivanov, 2009)

Las especies *Brassica juncea*, *Brassica nigra* Koch, *Brassica campestris*, *Brassica napus* y *Brassica oleracea*, son especies que tienen potencial para fitorremediar suelos con diferentes tipos de metales pesados, siendo la especie *Brassica juncea* la que cuenta con mayor potencial acumulador, esta última se ha expuesto a diferentes niveles de metales como Cd, Cu, Ni, Zn, Pb, y Se, mostrando resultados significativos de absorción y tolerancia. (Angelova & Ivanov, 2009)

Específicamente, se ha reportado recientemente que la familia *Brassicaceae* posee potencial para la acumulación de elementos trazas altamente tóxicas y que puede ser usada para la fitorremediación de metales en suelos contaminados. (Bharagava, Chandra, & Rai, 2008)

Igualmente, se ha evidenciado el óptimo desempeño en la *Brassica juncea* (mostaza) para la acumulación de mercurio (Hg) en hojas y raíces (Shiyab, Chen, Han, & Monts, 2009), además de la limpieza de suelos contaminados con Plomo (Pb), Cadmio (Cd), Zinc (Zn) y Cromo (Cr), (Han, Sridhar, Monts, & Su, 2004)

Debido a que en Colombia se encuentra adaptada la especie *Brassica nigra*, especie que comparte el mismo modelo biológico de la especie *Brassica juncea*, se considera importante evaluar los efectos tóxicos y la capacidad de acumulación del mercurio (Hg) y el cadmio (Cd) en la *Brassica nigra*, como punto de partida para determinar el potencial que dicha especie posee en la fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados.

2.1 *Brassica nigra* y cadmio (Cd)

Se han llevado a cabo estudios (en medios naturales y artificiales) sobre la exposición de la *Brassica nigra* al cadmio (Cd), plomo (Pb), cobre (Cu), zinc (Zn), entre otros metales pesados, para determinar en qué cantidades y lugares de la planta se da la acumulación de dichos elementos. También se ha evaluado el crecimiento de la *Brassica nigra* en suelos contaminados con metales pesados y su posible uso para la fitorremediación. (Angelova & Ivanov, 2009)

En los estudios mencionados, se ha encontrado a la *Brassica nigra* como una especie tolerante a los metales pesados y apta para ser cultivada en zonas con concentraciones moderadas de dichos contaminantes en el suelo, además de su conveniente uso para la fitorremediación, producto de su capacidad en acumulación de metales en su estructura. (Angelova & Ivanov, 2009)

2.2 *Brassica juncea* y mercurio (Hg)

Como se ha mencionado, el género *Brassicaceae* tiene un alto potencial para la fitorremediación, y además, el mercurio (Hg) tiene una significativa toxicidad sobre *Brassica juncea* (Shiyab, Chen, Han, & Monts, 2009)

Se han realizado estudios referentes a la acumulación de mercurio (Hg) en diferentes especies de plantas, y dadas las altas tasa de crecimiento y desarrollo de biomasa de la especie *Brassica juncea*, lo que le otorga potencial para la fitorremediación de metales pesados, se estudió la absorción de mercurio (Hg) en dos diferentes cultivos de *Brassica juncea*, para la utilización de dicha planta en la fitorremediación de suelos contaminados con mercurio (Hg). (Shiyab, Chen, Han, & Monts, 2009)

En dicho estudio se concluyó que la *Brassica juncea* es significativamente afectada por la toxicidad del mercurio (Hg), se reportaron las mayores concentraciones de mercurio (Hg) en hojas y raíces de las plantas, y además de una reducción considerable de la biomasa, se evidenciaron cambios a nivel estructural en las hojas. (Shiyab, Chen, Han, & Monts, 2009)

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar los efectos tóxicos y la capacidad de acumulación de mercurio (Hg) y cadmio (Cd) en la especie *Brassica nigra*.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Determinar los efectos tóxicos en germinación de semillas de la especie *Brassica nigra*, en suelo contaminado con mercurio (Hg) y cadmio (Cd) a diferentes niveles.

Determinar los efectos tóxicos en el crecimiento de raíz y desarrollo de biomasa de plántulas sembradas y trasplantadas de la especie *Brassica nigra*, en suelo contaminado con mercurio (Hg) y cadmio (Cd) a diferentes niveles.

Determinar la capacidad de acumulación de mercurio (Hg) y cadmio (Cd) en la especie *Brassica nigra*, para plántulas sembradas y trasplantadas.

Fitotoxicidad del cadmio (Cd) y el mercurio (Hg) en la especie *Brassica nigra*

Autores: Santiago Arenas Moya – Santiago Andrés Hernández Caro
Título otorgado: Ingeniero Ambiental

Asesora: Gladis Estela Morales Mira

Programa de Ingeniería Ambiental
Medellín
2012

Resumen

Los procesos intensivos de explotación agrícola y minera generan gran cantidad de problemas socio-ambientales, que pueden afectar, en ocasiones de manera irreversible, extensiones considerables de suelo, fuentes hídricas, la calidad del aire, la biota, la fauna y en determinados casos la idiosincrasia de las comunidades, llegando inclusive más allá del lugar donde surgen, traspasando las fronteras locales, municipales y regionales.

La fitorremediación es una alternativa económica y eficiente de descontaminación de suelos, estudiada para diferentes metales pesados en varios países del mundo.

En el presente estudio, se evaluó la toxicidad del cadmio (Cd) y el mercurio (Hg) a la *Brassica nigra*, analizando los efectos tóxicos en germinación, crecimiento de raíz, desarrollo de biomasa, además de la capacidad de acumulación que la planta tiene sobre los contaminantes.

Se comprobó la eficiente acumulación de cadmio (Cd) y mercurio (Hg), tanto para plántulas trasplantadas como germinadas en los medios contaminados, en concentraciones máximas de 15 ppm Cd y 111 ppm Hg en plántulas de germinación, y 20 ppm Cd y 77 ppm Hg en plántulas de trasplante. Sin encontrarse efectos tóxicos significativos el desarrollo de la raíz y biomasa.

4. MARCO DE REFERENCIA

4.1 MARCO TEÓRICO

4.1.1 Fitorremediación

“La fitorremediación (phyto = planta y remediación= mal por corregir), es uno de los procesos que utilizan plantas para remover, transferir, estabilizar, concentrar y/o destruir contaminantes (orgánicos e inorgánicos) en el suelo, lodos y sedimentos, y puede aplicarse tanto in situ como ex situ. Los mecanismos de fitorremediación incluyen la rizo degradación, la fito-extracción, la fito-degradación y la fito-estabilización.” (Agúdelo, Macías, & Suárez, 2005)

“La rizo degradación se lleva a cabo en el suelo que rodea las raíces. La sustancia excretada naturalmente por estas, suministra nutrientes para los microorganismos, mejorando así su actividad biológica. Durante la fitoextracción, los contaminantes son captados por las raíces (fito-acumulación), y posteriormente estos son traslocados y/o acumulados hacia los tallos y hojas (fitoextracción). En la fito-estabilización, las plantas limitan la movilidad y disponibilidad de los contaminantes en el suelo, debido a la producción de compuestos químicos en las raíces, que pueden absorber y/o formar complejos con los contaminantes, inmovilizándolos así en la interface raíces – suelo.” (Agúdelo, Macías, & Suárez, 2005)

“La fito-degradación consiste en el metabolismo de contaminantes dentro de los tejidos de la planta, a través de enzimas que catalizan su degradación. La fito-degradación puede aplicarse eficientemente para tratar suelos contaminados con compuestos orgánicos como benceno, tolueno, etil-benceno y xilenos (BTEX); solventes clorados; HAPs; desechos de nitrotolueno; agroquímicos clorados y organofosforados; además de compuestos inorgánicos como Cd, Cr, Co, Cu, Pb, Ni, Se, Zn y Hg . Se ha demostrado también su eficiencia en la remoción de materiales radioactivos y tóxicos de suelo y agua.” (Agúdelo, Macías, & Suárez, 2005).

“Existen varias limitaciones que deben considerarse para su aplicación: El tipo de plantas utilizado determina la profundidad a tratar. Altas concentraciones de contaminantes pueden resultar tóxicas. La toxicidad y disponibilidad de los

productos de la degradación no siempre se conocen y pueden mobilizarse o bioacumularse en organismos vivos.” (Agúdelo, Macías, & Suárez, 2005).

“Cuando las plantas han absorbido los contaminantes acumulados, pueden ser cosechadas y desechadas. Si los contaminantes químicos orgánicos se degradan en las moléculas como el dióxido de carbono, las plantas pueden no requerir ningún método especial de disposición. La incineración controlada es el método más común para disponer las plantas que han absorbido grandes de cantidades de contaminantes. Este proceso produce cenizas, que se deben desechar en los sitios destinados para tal fin. Para las plantas que han absorbido los metales, la incineración controlada produce las cenizas con altos contenidos de metales.” (Bernal, Clemente, Vázquez, & Walker, 2007).

Brassica nigra

La mostaza negra o ajenabe (*Brassica nigra*) es una planta herbácea anual, crece por dispersión de semillas, que se emplean como especia. Hoy es menos frecuente que la mostaza parda (*Brassica juncea*) y que la blanca (*Sinapis spp.*), pero se cultiva aún, en especial en la India, como fuente de aceite e ingrediente en aderezos. Se consume también como vegetal de hoja.

Descripción técnica:

Basada en Rollins, 1993, citado por Francisco Perdomo Roldán y Juana Mondragón Pichardo en la caracterización de la *Brassica nigra*. (Perdomo & Mondragón, 2004)

Ilustración 2. Características de la especie *Brassica nigra*



Fuente: (Perdomo & Mondragón, 2004)

“Hábito y forma de vida: Hierba anual o bianual, hispida por lo menos en la base, color verde intenso.

Tamaño: Hasta 1.50 m.

Tallo: Erecto, ramificado.

Hojas: Inferiores pecioladas, lobadas a lirado-pinnatífidas, con el margen dentado, hojas superiores parecidas, pero más sencillas y pequeñas, sésiles a casi sésiles, pero no auriculadas.

Inflorescencia: Un racimo.

Flores: Pétalos amarillos, 7-9 mm, a veces hasta 11 mm, con una uña delgada.

Frutos y semillas: Pedicelos erectos, 2-5 mm de largo; silícuas ascendentes y adpresas al eje, algo tetrángulares, 1-2 cm de largo. Semillas 2 mm en diámetro, con pequeños orificios (alveolado).”

Es cultivada en muchas zonas como condimento de mostaza, además es una maleza que crece al lado de muchos caminos de forma esporádica, siendo favorecida por terrenos arcillosos y arenosos que sean algo secos. (Hickman, 1993).

4.1.2 Los residuos tóxicos y peligrosos

“Se denomina residuo peligroso aquél que por sus características infecciosas, combustibles, inflamables, explosivos, radiactivas, volátiles, corrosivas, reactiva, o tóxicas puedan causar daño a la salud humana o al medio ambiente. Así mismo, se consideran residuos peligrosos los envases, empaques y embalajes que hayan estado en contacto con ellos”. (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 1994).

“Se entiende por residuo tóxico aquél que en virtud de su capacidad de provocar efectos biológicos indeseables o adversos puede causar daño a la salud humana, animal o vegetal y al medio ambiente”. (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 1994).

4.1.3 La minería Artesanal

Este tipo de minería es la más peligrosa, debido a que no se cuenta con normas de seguridad para proteger la vida de los trabajadores y del ambiente. La minería artesanal abunda en Colombia, como su forma de sostenimiento de muchas familias y poblaciones.

Para el proceso de amalgamación de oro, los mineros concentran el triturado de las rocas que contienen mineral de oro en piscinas o estanques, agregan mercurio elemental para crear una masa llamada amalgama, la cual separa el oro y el mercurio de otros minerales e impurezas (como arena y tierra), depositando todo el residuo al cuerpo de agua que se está haciendo el lavado. (Weinberg, 2007)

El problema se evidencia en dos focos, en el contacto del mercurio con los mineros y en el proceso en el cual el oro se separa del mercurio, este último foco se lleva a cabo evaporando el mercurio mediante la quema de la amalgama. Una vez el vapor de mercurio este en el aire queda disponible a depositarse o ser captado por cualquier parte del ecosistema. Finalmente, los pobladores logran obtener el oro puro, libre de residuos para su posterior comercialización. (Weinberg, 2007)

Si el mercurio, resultante del proceso de extracción de oro no es bien controlado, este aparte de ir al aire por su mala disposición que vertido libremente al ambiente, lo cual genera una contaminación por mercurio trasladada y en un sin fin de ecosistema, contando que el mercurio es un compuesto persistente este se aloja en los ecosistema causando daños por muchos años. (Weinberg, 2007)

Para la población de nuestro país, como lo dice Weinberg (2007), son las poblaciones pobres y marginales a las que este negocio más afecta, dada la rentabilidad, el buen precio en el mercado del oro y el bajo costo de producirlo que genera una fuente de ingreso llamativa y además, se necesita un conocimiento mínimo para estas prácticas.

Este mismo estudio arroja cifras que el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) a sometido a estudio: *“se calcula que entre 10 y 15 millones de personas de todo el mundo están involucradas activamente en la minería de oro a pequeña escala, y otros 85 y 90 millones de personas dependen indirectamente de ella. Los mineros a pequeña escala producen entre 20 y 30 % de todo el oro que se extrae en la minería, estos es aproximadamente 500 a 800 toneladas métricas de oro al año, aproximadamente 55 países del mundo realizan esta practicas y en Filipinas 75% del oro extraído se hace de una forma artesanal”*, además de un serio agravante, en la gran mayoría de los casos son extracciones ilegales y no están reguladas por la ley.

Diversas formas de controlar el mercurio se han tratado en diferentes convenios. Aumentar el precio del mercurio elemental, impulsar nuevas y mejores tecnologías para captar el oro sin usar mercurio o promover la apertura de mercados verdes, son algunas de las opciones que se analizan para adoptar técnicas menos

contaminantes y más sostenibles, además de subsidios o programas para que los pobladores encuentren otras fuentes de sostenimiento diferente a esta. (Weinberg, 2007)

Según el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), se han adelantado varios programas en países de Sur América, con el propósito incentivar la reducción del uso del mercurio. En alianza de varias cooperativas y partes interesadas en el asunto, se promueven el uso de prácticas responsables para el uso de mercurio y la mitigación de los impactos al medio ambiente y a la salud humana, para el caso de Colombia se trabaja en dos departamentos, Chocó y Nariño, contando activamente con algunos concejos comunitarios del Chocó y dos cooperativas de Nariño, además del apoyo de la Asociación por la Minería Responsable (ARM). (PNUMA, 2010)

4.1.3.1 La minería de oro en Antioquia.

En el Distrito Minero, el nacimiento del municipio de Segovia está ligado a la creciente actividad minera del oro y a la llegada de la empresa inglesa Frontino Gold Mines, con un campamento de doscientas viviendas. Actualmente posee una población de 60.000 habitantes.

“La producción de oro alcanzada por el Distrito Minero Segovia-Remedios en el año 2004 fue de 3,858.362 Kg. La pequeña minería en su mayoría artesanal, tiene aproximadamente 135 minas inscritas y no inscritas 225 en el Secretaría de Minas y Medio Ambiente, las cuales tuvieron una producción de 2,398.682 Kg/año, lo cual equivale a un 62% de la producción de la región. Según Ingeominas y Frontino Gold Mine.” (Hincapié, 2006).

“El 92.3% de la producción de oro en Antioquia, es aportada por los primeros 7 municipios pertenecientes a las regiones del Nordeste y Bajo Cauca, con este gran aporte Antioquia es el primer productor de oro del país contribuyendo con un 62.53% a la producción nacional. Paralelo a la explotación de las minas, existen dentro el casco urbano del municipio de Segovia y sus alrededores múltiples plantas de beneficio conocidas como entables (105) y compraventas de oro (40), la mayoría de estas utilizan el método de amalgamación del oro, realizado a través del mercurio, el cual es una de las mayores fuentes de contaminación existente en estos municipios, situación corroborada por un estudio del CTB de la Universidad de Antioquia 2003, citado por el SIGAM 2004 textualmente dice así: “a partir de monitoreos ambientales, mostraron que la concentración de mercurio, en las cabeceras urbanas de los municipios de Segovia y Remedios está 14 veces por

encima de la norma. Lo anterior nos permite asegurar que en estos municipios se respira un aire “metálico” no apto para los seres vivos.” (Hincapié, 2006).

Ilustración 3. Quebrada La Cianurada del municipio de Segovia, Departamento de Antioquia. Colombia



Foto: Juan Fernando Saldarriaga

En la Ilustración 3, se puede observar como la utilización incontrolada de cianuro y mercurio en los procesos de extracción de oro, ha afectado de manera definitiva la calidad del recurso hídrico, además de los efectos en la biodiversidad de la zona.

4.1.4 Fertilizantes fosfatados

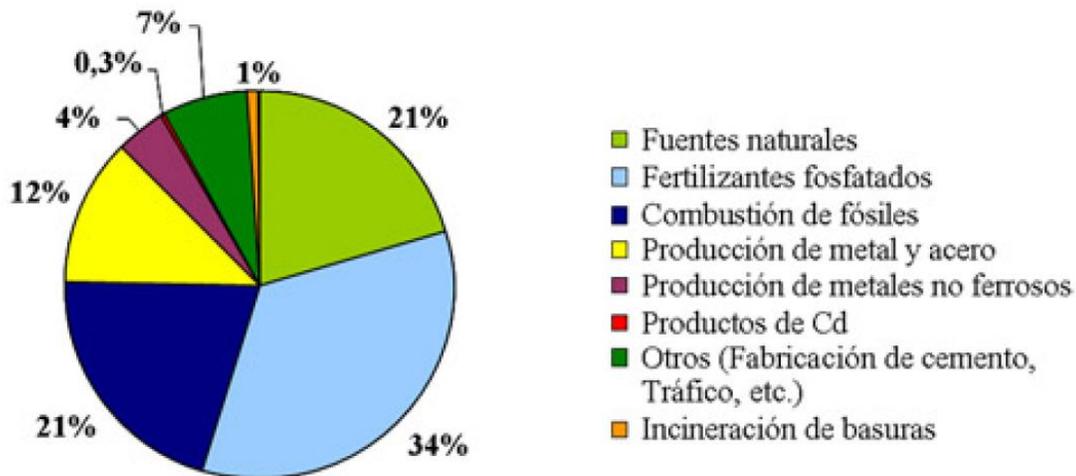
La mayor cantidad de cadmio que entra al suelo por parte de las actividades agrícolas es debido a los fertilizantes producidos de la roca fosfórica, entrando a una tasa aproximada de 50% de cadmio al suelo. (Nilo, 2003).

Debido a la pérdida de fertilidad de los suelos en el territorio colombiano, los agricultores se han visto obligados a hacer mas intensivo el uso de fertilizantes

(los cuales contienen cadmio en sus componentes), aumentando los niveles de cadmio en el suelo y la disponibilidad del mismo en la cadena trófica.

Tal es el caso que se presenta en los cultivos de papa en el departamento de Nariño, Colombia, donde han incrementado las dosis de fertilizantes fosfóricos, los cuales aportan metales pesados como el cadmio (Cd), este es absorbido fácilmente por las plantas, generando efectos tóxicos sobre todo el ciclo natural. (Insuasty, Burbano, & Menjivar, 2008)

Ilustración 4. Contribución relativa de las diferentes fuentes de cadmio.



Fuente: (Rodríguez, Martínez, Romero, del Río, & Sandalio, 2008)

En la Ilustración 4, puede observarse que la contribución antropogénica de cadmio al ambiente es principalmente ocasionada por procesos de fertilización de suelos (34%), seguida por el uso de combustibles fósiles (21%) y la producción de metal y acero (12%). El aporte de fuentes naturales, aunque inevitable no deja de ser importante con un 21%.

El contenido de cadmio en los fertilizantes fosfatados depende de la roca de la cual se extrae el material, como es el caso de los fertilizantes provenientes de África que contienen entre 160 y 225 gramos de cadmio por tonelada de pentóxido de fósforo y los provenientes de EE.UU que contienen 36 gramos de cadmio por tonelada de pentóxido de fósforo, siendo los que provienen de África los que cuentan con mayor cantidad del metal. (PNUMA, 2010)

4.1.5 Metales pesados

Es todo elemento químico metálico de alta densidad que presente algún tipo de peligrosidad, así sea en concentraciones bajas. Algunos de estos metales pesados son el mercurio (Hg), el cadmio (Cd), el plomo (Pb) y el arsénico (As). (Prieto, González, Román, & Prieto, 2009).

Estos metales son derivados de la naturaleza y están disponibles en innumerables ecosistemas en forma de compuestos, minerales o sales, son resistentes a los cambios del entorno por lo que presentan alta persistencia, llevando a que en muchos casos se bio-acumulen en cultivos, animales y personas, aumentando así su toxicidad y peligrosidad. (Prieto, González, Román, & Prieto, 2009).

4.1.5.1 El Cadmio (Cd)

Numero atómico: 48

Masa atómica: 112,40 g/mol

Punto de fusión: 320.9°C

Punto de ebullición: 765°C

Densidad: 8.65 Kg/litro

El cadmio se encuentra en la solución del suelo en Cd^{+2} , pero este puede formar complejos iónicos: $CdCl^+$, $CdOH^+$, $CdHCO_3^+$, $CdCl_3^-$, $CdCl_4^{2-}$, $Cd(OH)_3^-$ y $Cd(OH)_4^{2-}$, además de complejos orgánicos. (Nilo Villanueva, 2003)

La actividad volcánica es la mayor fuente natural de este metal pesado, el cual se aloja en la superficie terrestre y rocas sedimentarias, siendo liberado por la erosión natural del ambiente. El cadmio cuenta con dos fuentes antrópicas específicas: la fundición de zinc y el reciclaje de baterías de níquel-cadmio y de aleaciones que contienen cadmio, además de la reutilización de polvos que contienen cadmio. (PNUMA, 2010)

El cadmio es un elemento tóxico para los organismos vivos, afectando su crecimiento y desarrollo, se encuentra en el ambiente debido a sistemas de calentamiento, a industrias que utilizan metales y al tráfico urbano. Es usado en procesos de electro enchapado, baterías de níquel - cadmio y estabilizadores de plástico, además es considerado un contaminante debido a su alto nivel tóxico y alta solubilidad en el agua. (Tomaro, 2005)

Los efectos tóxicos de Cadmio en las plantas se presentan en daños en su estructura, como la clorosis, el enrollamiento de hojas, la necrosis, disminución del crecimiento vegetal y daño oxidativo, entre otros. (Tomaro, 2005)

El cadmio es un compuesto que requiere más investigación, dada su alta toxicidad y facilidad para ser absorbido por los organismos, en especial la fauna acuática, ya que en solución se presenta en forma iónica libre (mayor bio disponibilidad y facilidad de absorción). Aunque, por medio del pH se puede controlar su disponibilidad, siendo a valores bajos de pH que presenta mayor disponibilidad, y viceversa. (PNUMA, 2010)

En la Ilustración 5 se pueden observar los productos que contienen cadmio en su estructura.

Ilustración 5. Productos con contenido de Cadmio.

| PRODUCTOS QUE CONTIENEN CADMIO |
|--|
| DESCRIPCIÓN |
| Sulfuro de cadmio (galvanoplastia) |
| Pigmentos y preparaciones a base de compuestos de cadmio |
| Acumuladores eléctricos de níquel-cadmio |
| Cadmio en bruto, desperdicios y desechos de cadmio, polvo de cadmio |
| Antioxidantes preparados, y otros compuestos estabilizados para caucho o plástico |
| Abonos minerales o químicos y materiales fosfatados |
| Ceniza y residuos (excepto los de la fabricación de hierro y acero) que contienen antimonio / berilio / cadmio / cromo / y sus mezclas |

Fuente: (PNUMA, 2010)

En estudios realizados por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, PNUMA (2010), se analizaron los abonos fosfatados fabricados a base de cadmio, y se encontró que debido a la similitud estructural con el zinc, las plantas absorben fácilmente el metal pesado. Generando, por el uso indiscriminado de estos abonos, la contaminación del suelo, los cuerpos de agua y los pobladores con cantidades significativas de cadmio.

Es preocupante la cantidad de productos con contenido de cadmio que son utilizados en la agricultura. En la Ilustración 6, se describen las importaciones y exportaciones para América Latina y el Caribe de productos que contienen cadmio, en toneladas (periodo de 2001 – 2009). Es de notarse las cifras de los materiales fosfatados (dentro del recuadro rojo), al ser tan elevadas.

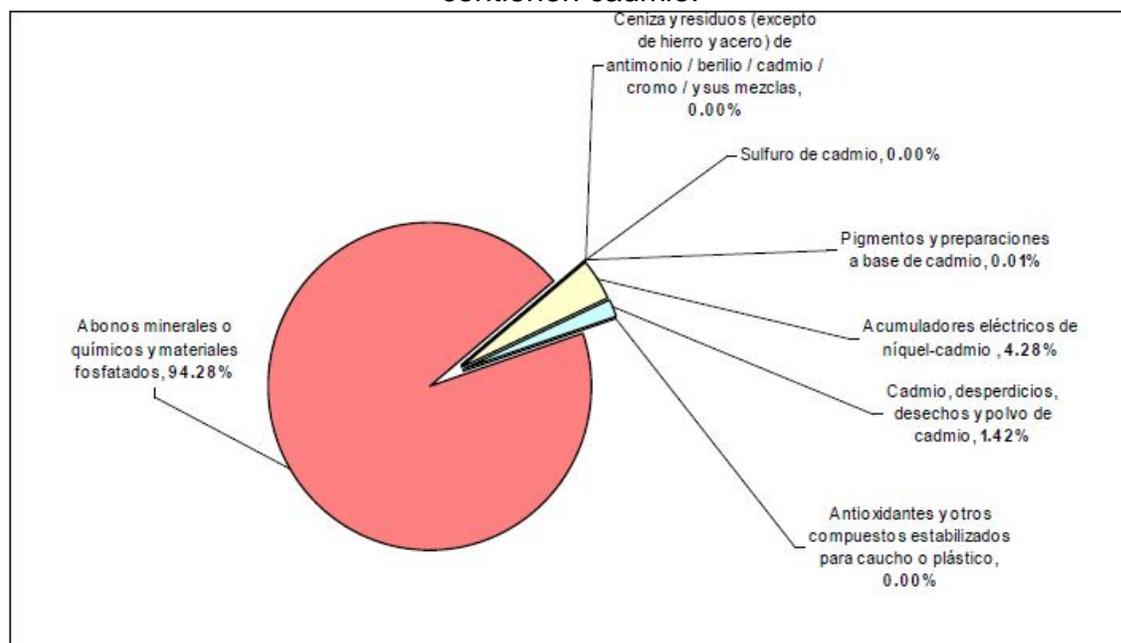
Ilustración 6. Importaciones y exportaciones para América Latina y el Caribe de productos que contienen cadmio.

| DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO | Importación - TM | Valor de Importación en (Miles de US \$) | Exportación - TM | Valor de Importación en (Miles de US \$) |
|--|---------------------|--|--------------------|--|
| Sulfuro de cadmio (galvanoplastia) | 6.0 | 33.3 | 61.9 | 15.6 |
| Pigmentos y preparaciones a base de compuestos de cadmio | 1,855.5 | 20,603.2 | 1,168.7 | 11,594.4 |
| Acumuladores eléctricos de níquel-cadmio | 743,780.5 | 1,865,790.8 | 153,601.3 | 1,571,036.7 |
| Cadmio en bruto, desperdicios y desechos de cadmio, polvo de cadmio | 835.3 | 2,666.4 | 15,894.5 | 42,965.5 |
| Antioxidantes preparados, y otros compuestos estabilizados para caucho o plástico | 246,487.3 | 990,114.7 | 102,664.1 | 407,868.4 |
| Abonos minerales o químicos y materiales fosfatados | 16,379,060.0 | 4,117,366.6 | 2,123,879.3 | 513,904.1 |
| Ceniza y residuos (excepto los de la fabricación de hierro y acero) que contengan antimonio / berilio / cadmio / cromo / y sus mezclas | 129.6 | 5.5 | 18.0 | 54.0 |
| TOTAL: | 17,372,154.2 | 6,996,580.5 | 2,397,287.7 | 2,547,438.6 |

Fuente: (PNUMA, 2010)

Además, en la Ilustración 7, se aprecian los datos de las importaciones para América Latina y el Caribe de productos que contienen cadmio, donde los mayores porcentajes son los de abonos fosfatados.

Ilustración 7. Importaciones para América Latina y el Caribe de productos que contienen cadmio.



Fuente: (PNUMA, 2010)

Según la Ilustración 8, Colombia importa aproximadamente el 5% de los abonos, químicos, fertilizantes y materiales fosfatados utilizados en América Latina y el Caribe, materiales con contenido de cadmio que son perjudiciales para la salud de las personas.

Siendo Colombia el cuarto país de mayor importación de materiales con contenido de cadmio, como se observa en la Ilustración 8, además se reporta como principal proveedor a Marruecos con un 60 %, seguido de Sudáfrica con un 20 % y otros con un 9%.

Ilustración 8. Principales países de América Latina y el Caribe importadores de abonos, químicos, fertilizantes y materiales fosfatados

| NOMBRE DEL PRODUCTO | CANTIDAD TONELADAS | % | PRINCIPALES IMPORTADORES | | PRINCIPALES PROVEEDORES | |
|---|--------------------|--|--------------------------|-------|--|-----|
| | | | País | % | País | % |
| Abonos, químicos, fertilizantes y materiales fosfatados | 16,379,060 | 94.280% | Brasil | 63.5% | Israel | 30% |
| | | | | | Túnez | 19% |
| | | | | | Marruecos | 15% |
| | | | | | EEUU, Puerto Rico y USA Islas Vírgenes | 8% |
| | | | | | Egipto | 20% |
| | | | Argentina | 12.4% | Israel | 16% |
| | | | | | Brasil | 14% |
| | | | | | México | 11% |
| | | | Chile | 8.9% | México | 77% |
| | | | | | EEUU, Puerto Rico y USA Islas Vírgenes | 15% |
| Colombia | 4.8% | Marruecos | 60% | | | |
| | | Sudáfrica | 20% | | | |
| | | EEUU, Puerto Rico y USA Islas Vírgenes | 9% | | | |
| Resto de Países | 10.4% | | | | | |

Fuente: (PNUMA, 2010)

Afectación a la salud por el Cadmio (Cd)

La contaminación atmosférica, las actividades mineras, la aplicación de fertilizantes con contenido de cadmio y la disposición de lodos de plantas de tratamiento en terrenos agrícolas son las principales fuentes de contaminación del suelo y la disponibilidad de este contaminante en cultivos de alimentos destinados al consumo humano. Järup & Akesson (2009) sustentaron que una de las fuentes más contaminantes es el uso de fertilizantes, concluyendo que es de vital importancia y de suma prioridad el control de la contaminación por cadmio.

Durante la década de 1950, el cadmio fue objeto de análisis, debido a las afectaciones que produce a la salud humana, convirtiéndose en un tema prioritario después de comprobarse que la enfermedad conocida como “Itai – itai” (que traduce “¡ay – ay!” en japonés) surgió debido al consumo de arroz contaminado con cadmio, ocasionando una alerta humanitaria e innumerables informes sobre la

salud de la población al ser expuesta a concentraciones del contaminante, concluyendo que las principales fuentes de contaminación por cadmio son los alimentos y el humo del tabaco. (Järup & Akesson, 2009)

En la década de los 70's, se comenzó a emitir el cadmio y productos que lo contengan con advertencias para la salud. La Organización mundial para la salud OMS (1993) y la Agencia para la Protección Ambiental EPA (2000) impusieron un límite máximo de consumo diario de 1 mg Cd / Kg peso corporal*d. Sin embargo, Satarug et al. (2003) declaro que *“0.6 mg Cd / Kg peso corporal*d pueden aumentar el riesgo de fractura ósea, cáncer, difusión renal e hipertensión”* por lo que el valor establecido por la EPA y la OMG no es seguro para las personas. (Zhai, y otros, 2008)

Existen suelos contaminados con cadmio, de los cuales el 80% de los alimentos producidos (cereales, verduras y papa) ocasionan una ingesta de 8 a 25 mg Cd / Kg peso corporal*d, llagando a ser más alta en países como Japón (Järup & Akesson, 2009). Estudios realizados en china reflejan que el 20% de la superficie de los cultivos están contaminados con metales pesados, un millón setecientas mil hectáreas de tierras agrícolas (el 7,3% de las zonas cultivables) están contaminadas con cadmio proveniente de actividades mineras en la región. (Yang, Lan, Wang, Zhuang, & Shu, 2006).

Actualmente, se tiene gran preocupación por las actividades mineras que se realizan en la parte superior de la cuenca del rio Notwell (China), generando contaminación por cadmio en las fuentes hídricas y el suelo. (Yang, Lan, Wang, Zhuang, & Shu, 2006)

Pero, son los cultivos de arroz chinos los que presentan la mayor urgencia de contaminación por cadmio, los agricultores locales, los niños y el ganado se ven afectados por la ingesta de cadmio y el contacto directo por el arado de las zonas a cultivar. Los índices de cadmio en el ganado y en las personas son mucho más altos que los permitidos. (Yang, Lan, Wang, Zhuang, & Shu, 2006)

Considerando lo anterior, además del hecho de que Colombia es un país que depende en gran medida de su producción agropecuaria y conociendo el uso intensivo de fertilizantes, es muy probable encontrar en nuestra población altos contenidos de cadmio.

Los más recientes estudios generan una alerta aun mayor, se ha reportado la presencia de efectos muy nocivos para la salud aun a concentraciones muy bajas de cadmio, como lo muestra Järup (2009).

Es urgente comenzar a fitorremediar los suelos contaminados, debido al costo que toma para la seguridad alimentaria, mantener los niveles económicos y vitales a nivel mundial. (Yang, Lan, Wang, Zhuang, & Shu, 2006)

A continuación se citarán algunas enfermedades que pueden ser generadas debido al consumo de cadmio, se sometieron a estudio los efectos renales, los efectos sobre el sistema óseo o la generación de cáncer, por Järup (2009).

Los efectos renales: Según algunos estudios, las bajas concentraciones de cadmio afectan directamente los riñones, siendo este uno de los órganos más afectado. Además la exposición a largo plazo puede generar daños tubular y renal, debido a la excreción de proteínas de bajo peso molecular. Varios estudios hacen énfasis en que la exposición a bajos niveles de cadmio solo puede causar disfunción renal. (Zhai, y otros, 2008)

Los efectos sobre el sistema óseo: Desde 1950 se conoce que la exposición a altas concentraciones de cadmio genera la enfermedad de “Itai – itai” (que traduce “¡ay – ay!” en japonés), una enfermedad en los huesos capas de alterar al sistema óseo. En Japón, dicha enfermedad se caracterizó por generar múltiples fracturas y distorsión de los huesos a lo largo del esqueleto. La osteoporosis es otra enfermedad sometida a estudio, llegando a la conclusión de que la exposición a bajos niveles de cadmio, a largo plazo, tiene una alta relación con dicha enfermedad.

Cáncer: La Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer, IARC (1993), clasifica al cadmio como un cancerígeno para el humano (grupo I) *“sobre la base de suficiente evidencia de cancerígeno en humanos y animales”*, también la Comisión Europea clasificó algunos compuestos de cadmio como cancerígenos.

Recuperación de cadmio

En la actualidad se conocen tres empresas encargadas de la recuperación de cadmio, ligadas totalmente a productos como baterías pero no a la recuperación del cadmio depositado en el medio ambiente, estas empresas son: Corporación de Reciclaje de Batería Recargables (RBRC) en Norte América, la Asociación de la Batería del Japón (BAJ) y la empresa llamada RECARGA en Europa. En el 2004 se presentó una gran recuperación de este metal donde se recicló *“3.500 toneladas de cadmio equivalentes al 17.5 por ciento del suministro mundial, aproximadamente 20.000 toneladas”*. (PNUMA, 2010)

4.1.4.2 El Mercurio (Hg)

El mercurio ingresa al medio ambiente por medio de procesos volcánicos, quedando disponible como sales de mercurio alrededor de la superficie de la tierra, el mercurio es liberado para el medio ambiente por medio de acciones humanas para su posterior uso. Otra de las fuentes de mercurio es la erosión de las rocas y de los suelos, pero es debido a los procesos industriales que los niveles de mercurio en nuestra medio son muy altos. (Weinberg, 2007)

“El mercurio es un elemento estable y residual de difícil biodegradación; además, tiene la propiedad de penetrar en las cadenas tróficas y producir bio-acumulación y bio-magnificación” (Hincapié, 2006).

“La presencia de mercurio en organismos vivientes es síntoma de contaminación y pasadas determinadas concentraciones conduce a serios trastornos de salud y efectos negativos ambientales” (Hincapié, 2006).

Numero atómico: 8

Masa atómica: 200,59 g/mol

Punto de fusión: -38.4 °C

Punto de ebullición: 357.72 °C

Punto de solidificación: 39 °C

Densidad: 13.546 Kg/litro

Calor específico: 0,033 k-calorías

Forma fácilmente aleaciones con muchos metales excepto con el hierro. A temperatura ambiente (20 grados centígrados) se está evaporando. Límite máximo permisible para el mercurio inorgánico: 1 µg/m³, tiempo de exposición 1 año. (Hincapié, 2006)

Fuentes de mercurio

El proceso que más aporta mercurio al ambiente es la minería de oro, conocemos que la extracción de oro ha sido base para el desarrollo de la economía mundial y muchos países a lo largo de la historia que extrajeron oro con el uso de mercurio, en la actualidad todavía presentan problemas de contaminación por mercurio en muchas zonas como es el caso de China y California, Estados Unidos. (Weinberg, 2007)

En países que aun realizan actividades de explotación de oro en pequeña y gran escala como en nuestro país es donde se presenta la mayor fuente de mercurio al

ambiente debido a su uso indiscriminado poniendo en riesgo a los mineros sus familias y trayendo graves afecciones al medio ambiente. (Weinberg, 2007)

Otras formas en que el mercurio entra al medio ambiente es el uso de productos que contenga este metal en su estructura como los son las: *“Lámparas fluorescentes, pilas, baterías e interruptores y termómetros”*, pero según estudios las fuentes antrópicas que más contaminación por mercurio genera son la minería artesanal y la fabricación de productos químicos que usan el mercurio como catalizador en *“La producción del monómero de cloruro de vinilo y algunas plantas de cloro-álcali que usan piscinas de mercurio elemental como cátodo para electrolisis”* (Weinberg, 2007)

Por otro lado, existe otro tipo de fuentes que generan mercurio, estas son *“Actividades que queman o procesan combustibles fósiles, menas o minerales que contiene mercurio como una impureza no deseada, ya sea carboeléctricas, hornos de cemento, extracción y refinación de minerales metálicos y la extracción de combustibles fósiles, como carbón, petróleo, esquistos bituminosos y arenas bituminosas”* (Weinberg, 2007)

En la Ilustración 9 se puede ver los productos que usan mercurio en su estructura

Ilustración 9. Productos que contienen mercurio en su estructura.

| PRODUCTOS QUE CONTIENEN MERCURIO |
|---|
| DESCRIPCIÓN |
| Lámparas fluorescentes de cátodo caliente |
| Hidrómetros, termómetros, barómetros, etc. |
| Lámparas eléctricas de descarga (excepto lámparas ultravioleta), Lámparas de mercurio o de vapor de sodio |
| Pilas y baterías, óxido de mercurio |
| Relés, circuitos e interruptores eléctricos y electrónicos |
| Unidades de entrada / salida (de máquinas procesadoras de datos), contienen o no unidades de envoltura o carcasa |
| La radio y TV transmisores, cámaras de televisión |
| Tubos de rayos catódicos de televisión, incluido monitor de video de tubos de rayos catódicos, en blanco y negro/otros, monocromo |
| Lámparas y válvulas de cátodo frío y tubos |
| Compuestos orgánicos de mercurio |
| Lámparas de cátodo frío o válvulas de fotocátodos y tubos (por ejemplo, de vacío, de vapor o las válvulas de gas y tubos, válvulas de arco de mercurio y tubos rectificadores, tubos de rayos catódicos, tubos de cámara de televisión); diodos, transistores y dispositivos semiconductores similares. |
| Ceniza y residuos (excepto los de fabricación de hierro y acero) conteniendo principalmente arsénico / mercurio / talio / y sus mezclas. |

Fuente: (PNUMA, 2010)

En la Ilustración 10, se observa el consumo a nivel mundial de los productos que contienen este metal en su estructura, como los mencionados en la Ilustración 9. Además, se pueden apreciar las emisiones atmosféricas estimadas de mercurio.

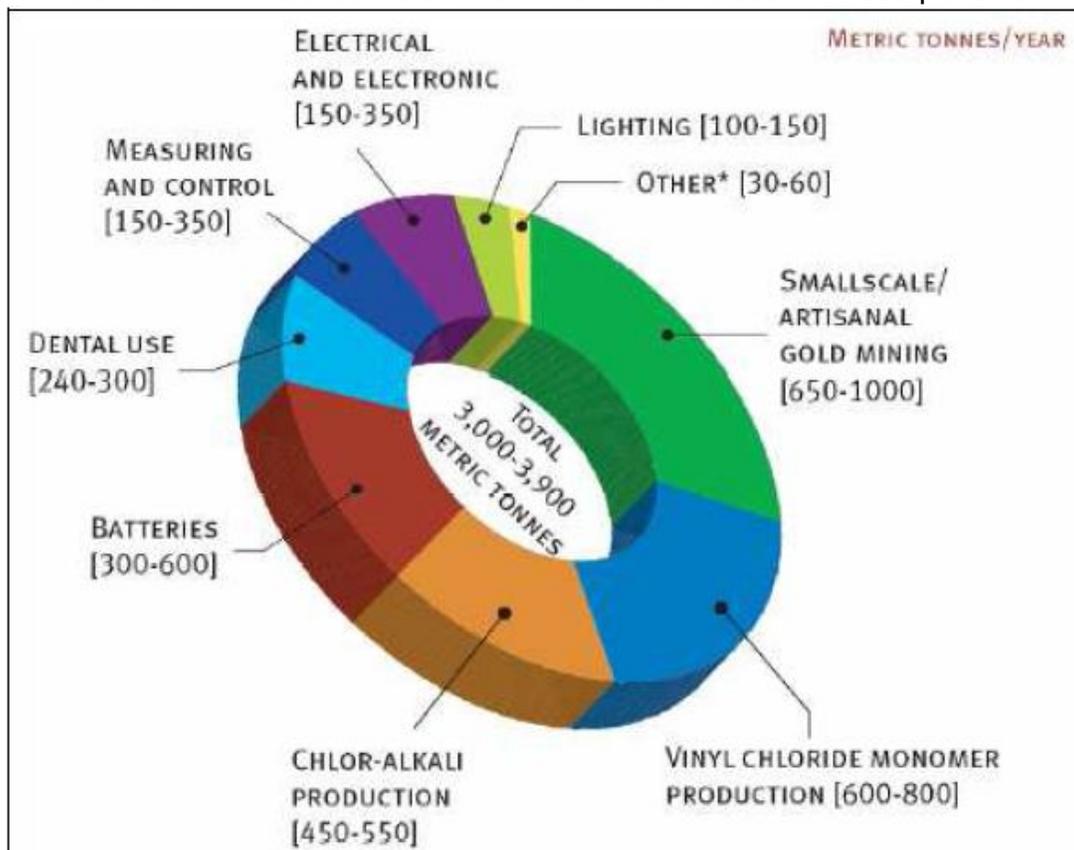
Ilustración 10. Consumo y emisiones atmosféricas estimadas.

| Categoría de fuente | Consumo estimado de mercurio a nivel mundial, en toneladas métricas | Emisiones atmosféricas estimadas de mercurio a nivel mundial, en toneladas métricas |
|--|--|--|
| MAPE de oro | 806 | 350 |
| Fabricación de monómero de cloruro de vinilo | 770 | 00 |
| Plantas de cloro-álcali | 492 | 60 |
| Baterías | 370 | 20 |
| Amalgama dental | 362 | 26 |
| Instrumentos de medición y control | 350 | 33 |
| Alumbrado | 135 | 13 |
| Instrumentos eléctricos | 200 | 26 |
| Otros | 313 | 29 |
| Total | 3,798 | 557 |

Fuente: (Weinberg, 2007)

En la Ilustración 11, se aprecia el consumo mundial de productos con contenido de mercurio, es de señalar que el consumo de mercurio para la minería artesanal es el más elevado de todos, con un total de 650 a 1000 toneladas métricas por año, seguido por el consumo de mercurio para monómeros de cloruro de vinilo para la elaboración de polivinilo, y finalmente las plantas de cloro-álcali con rangos de 600 a 800 y 450 a 550 toneladas métricas por año, respectivamente.

Ilustración 11. Consumo de mercurio en toneladas métricas por año.



Fuente: (PNUMA, 2010)

Afectación a la salud por el Mercurio (Hg)

En Colombia uno de los problemas más grandes es la minería de oro debido a las grandes extensiones de tierra removidas y el uso indiscriminado de mercurio, sin ningún control, ni restricción, generando grandes problemas a niveles locales y globales. Es de notar que la llamada “*fiebre de oro*” en la Amazonia brasileña desde 1979, ha provocado una alta tasa destructiva para el medio ambiente y la salud humana de la zona, reportando un total de emisiones a la atmosfera de 2000 a 3000 toneladas de mercurio (Hg), siendo liberadas por vapor producto de la quema de amalgama y por mal manejo de los lixiviados que contaminan las fuentes hídricas. (Uryu, Malm, Thornton, Payne, & Cleary, 2001)

Según Uryu (2001), es de vital importancia que se empiece a proponer la limpieza de los diferentes medios contaminados con mercurio (Hg), debido a que muchos estudios muestran la gran preocupación por este metal en las fuentes hídricas, su asociación al ambiente y su posterior introducción a la cadena trófica.

Como lo muestra Uryu (2001), el consumo de pescado con concentraciones de mercurio (Hg) trae un riesgo para la salud humana debido a su afección en niveles tróficos superiores, siendo aún hoy muy ignorados los efectos de este metal sobre los peces, la vida silvestre y los ecosistemas naturales, además este estudio muestra un caso más alarmante, donde la mayoría de los afluentes del río que se analiza en el estudio, presentan un alto potencial para la metilación y la exposición de los organismos a esta transformación.

Uno de los problemas más grandes para el tratamiento del mercurio (Hg) es la falta de educación de la población y el limitado conocimiento del contaminante en el medio donde se presenta, en el estudio de Uryu (2001) se ve que la falta de conocimiento genera un problema, debido a que no se puede predecir el comportamiento del contaminante en el ecosistema y se tiene una información incompleta sobre el mercurio (Hg) su metilación y la interacción con el medio físico con el que interactúa y la generación de bio concentración y bio magnificación.

Se está a tiempo de empezar depurar y darle un control a las emisiones de mercurio y sus cantidades en el medio, debido a que si este metal sigue aumentando en el tiempo como lo dice el estudio de Uryu (2001) traerá consecuencias significativas en la Amazonia brasileña y en otros países tropicales como el nuestro, donde *“la minería de oro es un tema importante para la conservación de la vida silvestre”*

Una de las afectaciones más grandes generadas por la manipulación del mercurio es la ocurrida en Japón, cuando en 1956 se reportaron los primeros brotes de la enfermedad de Minamata, esta se presentó por el uso de mercurio y metilmercurio para catalizar acetaldehído y cloruro de vinilo por la empresa química Chisso, la descarga de estos residuos a las fuentes de agua produjo que se acumulara los contaminantes en las especies acuáticas y por el posterior consumo de estos por la población se dio un envenenamiento generalizado en toda el lugar (Weinberg, 2007).

La enfermedad fue clasificada como neurológica y sus síntomas fueron *“pérdida de sensibilidad y entumecimiento en manos y pies. No podían correr ni caminar sin trastabillar y tenían dificultades para ver, oír y tragar”* (Weinberg, 2007), contando con el agravante que una gran parte de los infectados murieron.

Otros brotes de la enfermedad se presentaron en Japón en 1965, en la cuenca del río Agano, una empresa de productos químicos que realizaban el mismo proceso de la empresa Chisso descargó al río sus aguas residuales, contaminando aproximadamente a 690 personas. Otro caso se presentó en Irak en la década de

1970 donde murieron 10.000 personas y otras 100.000 sufrieron graves daños como secuelas de dicha enfermedad, estos contrajeron la enfermedad después de consumir trigo que había sido tratado con metil-mercurio. Otro caso registrado se evidencio en Canadá en 1962 y 1970 por la descarga de mercurio por la fabricación de Cloro álcali, celulosa y papel a las fuentes agua. (Weinberg, 2007)

El caso por envenenamiento por mercurio mas reciente se dio en el 2010 en Lampung, Indonesia donde una empresa de minería de oro, que mientras hacia el desmantelamiento para pasar sus procesos del uso del mercurio al uso del cianuro, se vio afectada por una gran lluvia, la cual reboso los estanques de almacenamiento y el residuo con mercurio fue vertido a el cuerpo de agua más cercano lo que genero la muerte de mucho peces, viendo estos peces flotar en las superficies los pobladores los tomaron para su consumo lo que genero 200 personas hospitalizadas por envenenamiento por mercurio. (Weinberg, 2007)

Los grandes expertos sobre esta enfermedad aseguran que “los ríos de la Amazonía, Canadá y China tienen algún porcentaje de envenenamiento con mercurio” (Weinberg, 2007), por lo que en nuestro medio es de vital importancia empezar a darle medidas de control al mercurio, debido al uso intensivo del metal en los diferentes procesos industriales a lo largo del país, con un uso indiscriminado de este contaminante sin tener ninguna prevención del peligro del residuo.

En varios estudios se afirma que en gran parte del mundo los océanos, ríos, lagos, estanques y arroyos están contaminados con mercurio por medio del depósito de material particulado y por las descargas de aguas residuales, llevándose a cabo en el medio acuático los procesos de metilación del mercurio hecho por microorganismos presentes en estos ecosistemas, siendo estos microorganismo el inicio de la cadena trófica que finaliza en el ser humano el cual recibe la mayor concentración de mercurio en su organismo. (Weinberg, 2007)

Otra de los potenciales focos de contaminación con mercurio es el que se ha dado en china donde poblaciones que el consumo de pescado es mínimo presentan un contacto alto con este, debido a que viven en zonas de grandes cultivos de arroz, los cuales son un medio propicio para que se dé la metilación, ya que en estudios el 95 % de las personas expuestas al mercurio proviene de los arrozales. (Weinberg, 2007)

Colombia es un país que cuenta de dos ríos como sus arterias principales, el río Cauca que fluye en medio de la cordillera occidental y la cordillera central y el río Magdalena que corre por el medio de la cordillera central y la cordillera oriental,

estas cordilleras de gran riqueza natural es donde se dan los procesos mineros, agrícolas e industriales a mayor escala, además donde se han concentrado las grandes ciudades del país y su mayor población, siendo estos ríos los que reciben todos los residuos y también proveen a la población para su alimentación. Por lo que el pescado usado para alimentar a los pobladores de muchas zonas del país tiene un considerable riesgo de presentar contaminación con muchos residuos, pudiendo ser uno de estos el tan dañino mercurio o metil-mercurio, que como se ha visto anteriormente puede desencadenar enfermedades graves sobre la población.

Este problema de salud pública puede que tome tiempo para presentarse debido a que la exposiciones al contaminante no son prolongadas pero siendo el mercurio un elemento que se bio acumula y bio magnifica este traerá efectos en algún momentos si no se empieza a controlar, como se puede ver en el libro *Introducción a la contaminación por Mercurio para las ONG* por Jack Weinberg donde afirman que *“al igual que con la enfermedad de Minamata, hay pocos pacientes que se ven enfermos de gravedad a primera vista: la gente puede estar afectada por el mercurio, pero el mercurio se encuentra en cantidades pequeñas en el cuerpo de los pacientes, o bien ellos están aún en las etapas iniciales de la enfermedad”*

A continuación se presentara alguna de las enfermedades y más comunes afecciones producidas por el mercurio.

Efectos neurológicos: la exposición al mercurio puede causar daños irreversibles al sistema nervioso de una persona, aunque los más afectados son siempre los humanos que están en sus primeras edades debido a que la afectación es directamente al desarrollo, sin restarle importancia a que las personas ya desarrolladas también se ven de alguna forma afectados. El efecto del mercurio se demora algún tiempo en aparecer pero este trae *“déficit en el coeficiente intelectual, déficit neurológico, perdidas en las funciones motoras y de la concentración y déficit en el desempeño visual-espacial”*. (Weinberg, 2007)

Enfermedad cardíaca y presión arterial alta: En base a varios estudios hechos con personas que han sido expuestas al mercurio o han consumido pescado contaminado con metil-mercurio, se llega a la conclusión de que se puede duplicar o triplicar el riesgo de un paro cardíaco o afecciones ligadas al funcionamiento del corazón, además en personas que usan el mercurio en su trabajo se evidencio alzas en su presión sanguínea. (Weinberg, 2007)

Efectos sobre el sistema inmunológico: La salud ocupacional genera una alerta sobre la afectación al sistema inmune por la exposición al mercurio, evidenciando problemas a largo plazo en este sistema cuando se está desarrollando, además hacen que el ser humano quede más susceptible a contraer enfermedades infecciosas y resistentes al tratamiento. (Weinberg, 2007)

Cáncer: La Agencia Internacional de Investigación del Cáncer (IARC) y la Agencia para la Protección del Ambiente (EPA) clasificaron al metil-mercurio como un posible carcinógeno humano (EPA Clase C), mostrando en varios estudios la relación de la exposición al mercurio con leucemia, tumores renales en ratones y daños a los cromosomas. (Weinberg, 2007)

Efectos reproductivos: Estos efectos no se les ha dado la importancia que merecen, pero en varias evaluaciones hechas a personas que se vieron afectadas en el caso iraquí en 1970, se encontró un descenso en la tasa de embarazos de aproximadamente un 78 %, por lo que se evidencia que si existe un efecto sobre la reproducción humana. (Weinberg, 2007)

Efectos en los riñones: Se conoce que el mercurio metálico y metilado tienen efectos sobre los riñones, debido a que la ingesta de este genera un daño renal severo. (Weinberg, 2007)

Recuperación del mercurio

Es en los procesos industriales donde se da la mayor recuperación del mercurio, la industria que más recupera son las plantas de cloro-álcali las cuales *“en el 2005 a nivel mundial recuperaron entre 90 y 140 toneladas métricas de mercurio de estas plantas con celdas de mercurio que aun funcionan”*, por otro lado otro proceso en el que se recupera gran cantidad de mercurio *“es en la producción de monómero de cloruro de vinilo para la elaboración de polivinilo, en la cual el cloruro mercúrico se usa como catalizador”* (Weinberg, 2007)

En los procesos mineros es de gran dificultad recuperar, reutilizar o eliminar el mercurio, debido a que esto depende de la zona de ubicación de la mina, características del sector, tecnologías existentes y grado de desarrollo de la zona. El buen uso y disposición de este metal depende de la conciencia de las personas o industria encargada de la explotación del oro, ya que no existe una normativa firme que regule esta práctica y si se prohíbe los pobladores buscaran formas de evadir esa prohibición. Esta práctica es una forma de subsistencia muy rentable y si se prohíbe, se podría generar un caso similar al ocurrido en el 2007 en Kalimatán, Indonesia donde los pobladores al ver que se les prohibía quemar la

amalgama al aire libremente, estos empezaron a realizar este proceso en sus hogares generando problemas de salud pública por inhalación de mercurio. (Weinberg, 2007)

Mercurio a Metil-Mercurio

Cuando este elemento queda en el ambiente, es tomado por bacterias que habitan en aguas con bajos niveles de oxígeno realizando un proceso de metilación generando un compuesto llamado metil-mercurio ($\text{CH}_3 \text{Hg}^+$), el cual es mucho más peligroso debido a que se convierte en un compuesto orgánico por lo que la asimilación de un organismo es mucho más fácil. El metil-mercurio es el responsable de la contaminación de los ecosistemas acuáticos y su posterior ingreso a la cadena trófica. (Weinberg, 2007)

Este compuesto ha sido sometido a una variedad de estudios para analizar su toxicidad en humanos, obteniendo resultados muy alarmantes debido a que este compuesto ataca principalmente organismos en desarrollo, y al presentar propiedades para bio magnificarse y bio acumularse, el ser humano es el organismo que mayor dosis de este recibe, debido a todo el recorrido que hace por la cadena trófica. Por lo que todo el medio ambiente es el que se ve afectado (Weinberg, 2007)

Según la Agencia para la Protección del Ambiente (EPA) se han encontrado concentraciones de este compuesto en animales como águilas, nutrias y panteras, por lo que la fauna silvestre está siendo expuesta a altas concentraciones de este contaminante. Las afectaciones que pueden presentar estos animales son: *“La muerte, reducción de la fertilidad, crecimiento mas lento, además de desarrollo y pautas de conducta anormales que pueden afectar la supervivencia”*. (Weinberg, 2007)

4.2 MARCO CONCEPTUAL

Bio acumulación: Proceso por el cual los organismos vivos, especialmente los acuáticos, pueden coleccionar y concentrar productos químicos (ejemplo. Xenobióticos o contaminantes) ya sea directamente del ambiente que les rodea o indirectamente a través del alimento. (Greenfacts, 2012)

Bio concentración: Proceso por el cual los organismos vivos, especialmente los acuáticos, a través de la superficie respiratoria y de la piel, pueden coleccionar y concentrar productos químicos directamente del ambiente que les rodea (únicamente a partir de la exposición al agua). BCF (Bio Concentration Factor) es

la cifra que expresa la relación entre la concentración de un producto químico en un organismo y la concentración del mismo en el ambiente. Se calcula dividiendo la concentración tisular por la concentración de exposición; así, un BCF de 1000 significa que el organismo concentra el producto hasta un valor de mil veces superior al ambiente. (Greenfacts, 2012)

Bio magnificación: Tendencia de algunos productos químicos a acumularse a lo largo de la cadena trófica, exhibiendo concentraciones sucesivamente mayores al ascender el *nivel trófico*. La concentración del producto en el organismo consumidor es mayor que la concentración del mismo producto en el organismo consumido. (Greenfacts, 2012)

Cadena trófica o alimentaria: Sucesión de seres vivos en los que siempre el precedente es comido por el posterior. El primer eslabón suele ser un vegetal que sirve de alimento a un herbívoro o consumidor primario carnívoro (u omnívoro que tuviere carne en su dieta). Los siguientes son el consumidor secundario, terciario y muy raramente, cuaternario. (Meraz, 2008)

Compuesto orgánico: Compuesto que contiene carbono, salvo el dióxido de carbono y algunos carbonatos. (Calvo, 1996)

Enfermedad Itai – itai: Enfermedad se caracteriza por múltiples fracturas y la distorsión de los huesos largos en el esqueleto, causando un dolor severo en las personas afectadas. (Järup & Akesson, 2009). Su epicentro fue la *cuenca del río Jinzuen la prefectura de Toyamade Japón en la década de 1930*. (Zhai, y otros, 2008)

Enfermedad de Minamata: La enfermedad de Minamata es un padecimiento grave y a menudo mortal, causado por la exposición a altos niveles de metil mercurio. Fue clasificada como neurológica y sus síntomas fueron “pérdida de sensibilidad y entumecimiento en sus manos y pies. Los afectados no podían correr ni caminar sin trastabillar y tenían dificultades para ver, oír y tragar”. Se produjo en la Bahía de Minamata Japón en 1956. (Weinberg, 2007)

Fertilizante fosfatado: “Son compuestos de origen natural o artificial que se agregan al suelo para aumentar su productividad. Son fuentes de fósforo fácilmente aprovechables por las plantas cuyo objetivo es proporcionar este nutriente para su crecimiento y desarrollo. Presentan distintos porcentajes de fósforo y diversas denominaciones.” (Nilo, 2003)

Fitotoxicidad: “Se refiere al deterioro que sufren las plantas frente a un elemento tóxico que es absorbido y metabolizado.” (Nilo, 2003)

Fitorremediación: “La fitorremediación (phyto = planta y remediación= mal por corregir), es uno de los procesos que utiliza plantas para remover, transferir, estabilizar, concentrar y/o destruir contaminantes (orgánicos e inorgánicos) en el suelo, lodos y sedimentos, y puede aplicarse tanto in situ como ex situ.” (Agúdelo, Macías, & Suárez, 2005)

Metales pesados: “*Es todo elemento químico metálico de alta densidad, que presenta algún tipo de peligrosidad.*” (Prieto, González, Román, & Prieto, 2009)

Metil-mercurio: CH_3Hg^+ . Compuesto orgánico que se forma por la metilación del mercurio, altamente venenoso para los vertebrados. Se descompone muy difícilmente, y al acumularse a lo largo de las cadenas tróficas, constituye un peligro grave para la biocenosis presentes. (Calvo, 1996)

Osteoporosis: Se caracteriza por *una masa ósea baja y deterioro de la micro arquitectura del tejido óseo con el consiguiente aumento de la fragilidad ósea y un mayor riesgo de fractura es un problema de salud pública importante y creciente.* (Järup & Akesson, 2009)

Toxicidad: “Grado de efectividad de una sustancia toxica” (RAE). “*Capacidad o propiedad de una sustancia de causar efectos adversos sobre algún organismo.*” (RAE).

5. HIPÓTESIS

La especie *Brassica nigra* posee potencial para la fitorremediación de suelos contaminados con mercurio (Hg) y cadmio (Cd), dado que dichos contaminantes son acumulados por la planta y no ejercen efectos tóxicos considerables para el normal desarrollo de la misma.

6. METODOLOGÍA

La presente investigación tiene un enfoque cuantitativo y es de tipo experimental. Se desarrolló pretendiendo determinar cuáles son los efectos tóxicos, en crecimiento de raíz y desarrollo de biomasa, de los metales pesados cadmio (Cd) y mercurio (Hg) en la especie *Brassica nigra*, analizando la respuesta para diferentes niveles de los contaminantes, en plántulas sembradas y trasplantadas con cuatro semanas de desarrollo.

Inicialmente, se investigó y definió que protocolos que se deben seguir durante todos los ensayos, teniendo en cuenta las normas técnicas colombianas (NTC) y bibliografía correspondientes.

6.1 Determinación de medio de cultivo:

Teniendo en cuenta las características físicas, biológicas y los requerimientos nutricionales de la especie *Brassica nigra*, se desarrolló un ensayo preliminar enfocado a determinar en cual medio de cultivo se desarrolla y crece mejor la planta (arena estéril, hidropónico de solución Hoagland modificada (Shiyab, 2009) o suelo de vivero). Obteniéndose el mejor crecimiento y desarrollo de las plántulas de *Brassica nigra* sembradas en el suelo de vivero.

Preparación de las plantas de trasplante: en turba, fueron sembradas aproximadamente 1000 semillas de *Brassica nigra*, las cuales luego de la germinación se dejaron crecer durante dos semanas. Las semillas se dejaron caer en zanjas de aproximadamente 1 cm de profundidad se cubrieron con el material previamente humedecido y se regaron con agua destilada todos los días.

6.2 Preparación de soluciones de contaminantes

Preparación de soluciones: para el ensayo se requirió la preparación de 1 L de solución de nitrato de mercurio $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$ (1000 ppm) y 1 L de solución de nitrato de cadmio $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ (500 ppm). Las soluciones se prepararon a partir de cloruro de mercurio HgCl_2 y cloruro de cadmio hidratado $\text{CdCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, respectivamente.

$\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$ (1000 ppm): para la preparación de la solución de nitrato de mercurio se requirieron 836,6 mg de la sal cloruro de mercurio (HgCl_2) y 12,33 mL de solución de ácido nítrico (HNO_3 : 0,5 N). Los cuales se disolvieron en agua destilada y se completó a un litro de solución.

Cd(NO₃)₂ (500 ppm): en la preparación de la solución de nitrato de cadmio se requirieron 425,8 mg de la sal cloruro de cadmio hidratado (CdCl₂.H₂O) y 8,46 mL de solución de ácido nítrico (HNO₃ : 0,5 N). Los cuales se disolvieron en agua destilada y se completó a un litro de solución.

6.3 Contaminación de los medios de cultivo:

Medios de cultivo para la evaluación de fitotoxicidad y absorción de mercurio (Hg): se evaluaron siete niveles del contaminante a 0, 5, 10, 25, 50, 75 y 100 ppm (w/w) de Hg, se utilizaron 21 cajas germinadoras limpias con aproximadamente 300 g de suelo de vivero seco (300 g SS), cada nivel se replicó tres veces. Para cada caja se extrajo un volumen específico de la solución de Hg(NO₃)₂ (1000 ppm), se adicionó a la respectiva caja y se completo con un volumen determinado de agua que garantizó la humedad del suelo alrededor del 60% de la CRA (Capacidad de Retención de Agua (Jaramillo, 2002))

Medios de cultivo para la evaluación de fitotoxicidad y absorción de cadmio (Cd): se evaluaron siete niveles del contaminante a 0, 2, 5, 10, 20, 35 y 50 ppm (w/w) de Cd, se utilizaron 21 cajas germinadoras limpias con aproximadamente 450 g de suelo de vivero seco (450 g SS), cada nivel se replicó tres veces. Para cada caja se extrajo un volumen específico de la solución de Cd(NO₃)₂ (500 ppm), se adicionó a la respectiva caja y se completo con un volumen determinado de agua que garantizó la humedad del suelo alrededor del 60% de la CRA (Capacidad de Retención de Agua (Jaramillo, 2002)).

6.4 Siembra de las plántulas:

Se sembraron alrededor de 20 semillas y 5 plántulas de cuatro semanas de desarrollo en cada caja, en total se requirieron la suma de 840 semillas y 210 plántulas de cuatro semanas de desarrollo.

En la Ilustración 12, se puede apreciar las macetas en las que se desarrollo el ensayo, la foto de la izquierda corresponde a la siembra en suelo de vivero contaminado con mercurio y la de la mano derecha pertenece a la siembra en suelo de vivero contaminado con cadmio.

Ilustración 12. Macetas de siembra para medios contaminados con mercurio (Izq) y cadmio (Der)



6.5 Seguimiento y mantenimiento a las unidades experimentales:

Todos los días a partir de la siembra se adicionó agua destilada y se realizó el conteo de plántulas germinadas (en el caso de las semillas sembradas) y se reportaron cambios en la coloración de las hojas o muerte de las plántulas trasplantadas.

6.6 Extracción de plántulas, medición de la longitud de raíz y pesaje:

Luego de cuatro semanas de tratamiento se realizó la extracción manual de todas las plántulas, germinadas y trasplantadas, se lavó cuidadosamente cada plántula hasta extraer todo el material ajeno a la misma. Inmediatamente después se midió la longitud de la raíz más larga y se pesó (peso húmeda de la plántula). Todas las plántulas, cuidadosamente separadas, se dejaron secar al aire durante cinco días y se pesaron nuevamente una a una (peso seco de la plántula).

Preparación de muestras de las plántulas:

Separadamente, las plántulas secas de germinación y trasplante de cada unidad experimental fueron picadas y guardadas en recipientes herméticos plásticos.

Preparación de muestras del suelo residual:

De cada caja se tomaron tres muestras del suelo residual (posterior al tratamiento), se secaron en horno a 40° Celsius durante 48 horas.

6.7 Tratamiento de muestras para el análisis de Cd y Hg

Digestión ácida de las muestras de plántulas y suelo residual:

En campana de extracción, con todas las medidas de seguridad, se realizó la digestión ácida a las muestras de plántulas y suelo, se hizo por triplicado tomando sub muestras de una tercera parte de las muestras de plántulas (germinación y trasplante por separado) y de alrededor de 2 g de las muestras de suelo residual, para cada unidad experimental.

Digestión ácida de las muestras de Hg: En Erlenmeyers de 125 mL se adicionaron las sub muestras y 20 mL de solución de ácido clorhídrico HCl al 20%. Los recipientes se sometieron a calentamiento hasta que la mezcla alcanzó aproximadamente cinco mililitros, se dejó enfriar y se llevó a 15 mL en tubos Falcon de igual volumen. Las soluciones finales se conservaron refrigeradas.

Digestión ácida de las muestras de Cd: En Erlenmeyers de 125 mL se adicionaron las sub muestras y 20 mL de solución de ácido clorhídrico HCl al 10%. Los recipientes se sometieron a calentamiento hasta que la mezcla alcanzó aproximadamente cinco mililitros, se dejó enfriar y se llevó a tubos Falcon de 15 mL, sin dilución. Las soluciones finales se conservaron refrigeradas.

Preparación de las muestras para equipo de Absorción Atómica (AA):

Las muestras de Hg diluidas se centrifugaron durante 5 minutos a 3500 rpm (revoluciones por minuto) y se separó el sobrenadante en recipientes limpios. De allí se realizaron diluciones para las lecturas respectivas.

6.8 Tratamiento de datos

Para el tratamiento de datos se aplicaron ANOVA, Análisis de regresión lineal y Análisis Multivariado, empleando el Programa estadístico STATGRAPHIC Plus 4.1

7. RESULTADOS

Como se indicó en la metodología, las semillas de *Brassica nigra* se pusieron a germinar en dos sistemas, uno de ellos en **suelo** dopado a diferentes concentraciones del metal pesado y se denominó **Germinación**.

El otro sistema fue en Turba, exenta de contaminantes, luego de la germinación de las semillas aproximadamente a los 28 días. Fueron trasplantados a los suelos dopados a diferentes concentraciones y se denominó **Trasplante**.

De ahí que para los dos metales pesados evaluados surgen tres sistemas a analizar:

Germinación: Que pasa con las semillas que germinan en medio contaminado comparado con un blanco

Trasplante: que pasa con las semillas que germinan en medio óptimo, luego de ser trasplantadas a medio contaminado

Suelo: Que cantidad de tóxico no es absorbido por la plántula.

Así que para los tres sistemas se realizó un seguimiento de las plántulas en función de la biomasa (longitud de la raíz y peso de material) y de la absorción de los dos metales evaluados.

7.1 Resultados de germinación de semillas en los medios contaminados.

Durante los quince días siguientes a la siembra de semillas en los medios contaminados con mercurio y cadmio, se desarrolló el conteo de las plántulas germinadas. Los datos registrados el último día de conteo, se procesaron y compararon entre sí, para determinar la posible afectación de los contaminantes a la germinación de las semillas.

Para las semillas sembradas en medios contaminados con mercurio, se aprecia en la Ilustración 13, el nivel 5 ppm como la menor concentración ensayada que muestra reducción importante en la germinación de las semillas de *Brassica nigra* (LOEC, en inglés: Lowest Observed Effect Concentration). Y el nivel de 0 ppm

como la concentración ensayada que no muestra reducción en la germinación de la Brassica nigra (NOEC en ingles: No Observed Effect Concentration).

Ilustración 13. Porcentaje de germinación de las semillas de Brassica nigra en medios contaminados con mercurio.

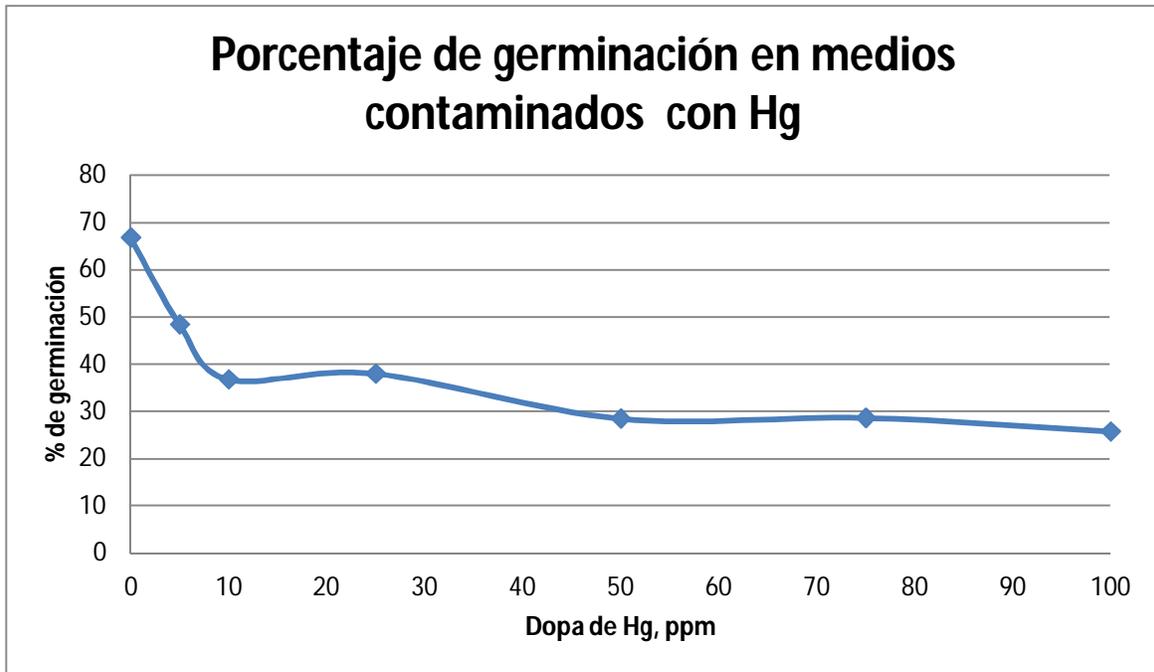
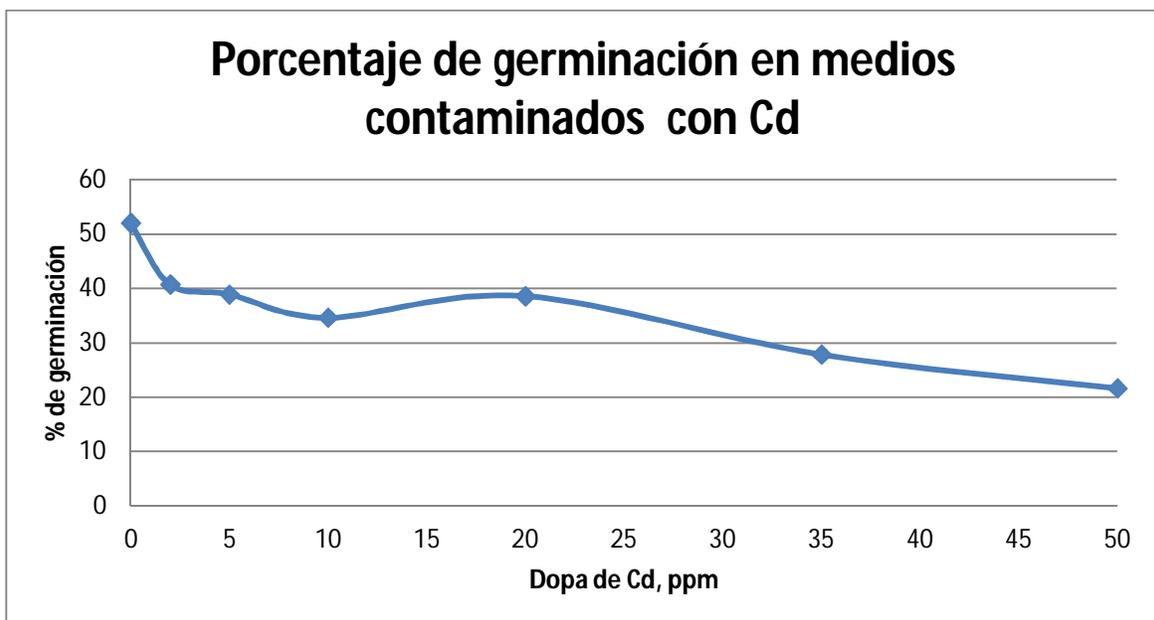


Ilustración 14. Porcentaje de germinación de las semillas de Brassica nigra en medios contaminados con mercurio.



Como se aprecia en la Ilustración 14, para las semillas sembradas en medios contaminados con cadmio, el nivel 5 ppm como la menor concentración ensayada que muestra reducción importante en la germinación de las semillas de Brassica nigra (LOEC, en ingles: Lowest Observed Effect Concentration). Y el nivel de 2 ppm como la concentración ensayada que no muestra reducción en la germinación de la Brassica nigra (NOEC en ingles: No Observed Effect Concentration).

7.2. Resultados para el Cadmio

7.2.1 Análisis de Biomasa

El Análisis de Biomasa de desarrolló utilizando los datos de Peso de Material Seco y Longitud de Raíz recolectados. Se muestrearon el total de las plántulas germinadas y trasplantadas.

Se determinó la longitud de la raíz inmediatamente después de haber sido extraídas las plántulas de los medios contaminados y el peso del material seco luego de secarse al aire por cinco días.

Peso de material

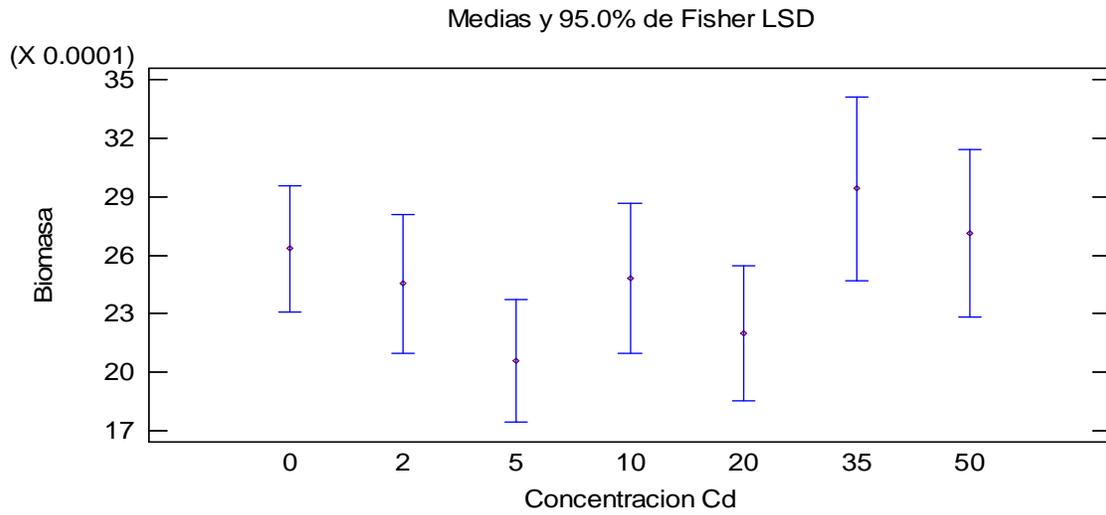
Los datos de peso de material para Germinación y Trasplante se analizaron mediante un Anova simple a las medias.

En la Tabla 1, se presentan las medias del Peso de Material, obtenidos en los medios de trasplante y germinación en suelo dopado con diferentes concentraciones de cadmio.

Tabla 1. Medias correspondientes al Peso del Material en los sistemas evaluados - Trasplante y Germinación.

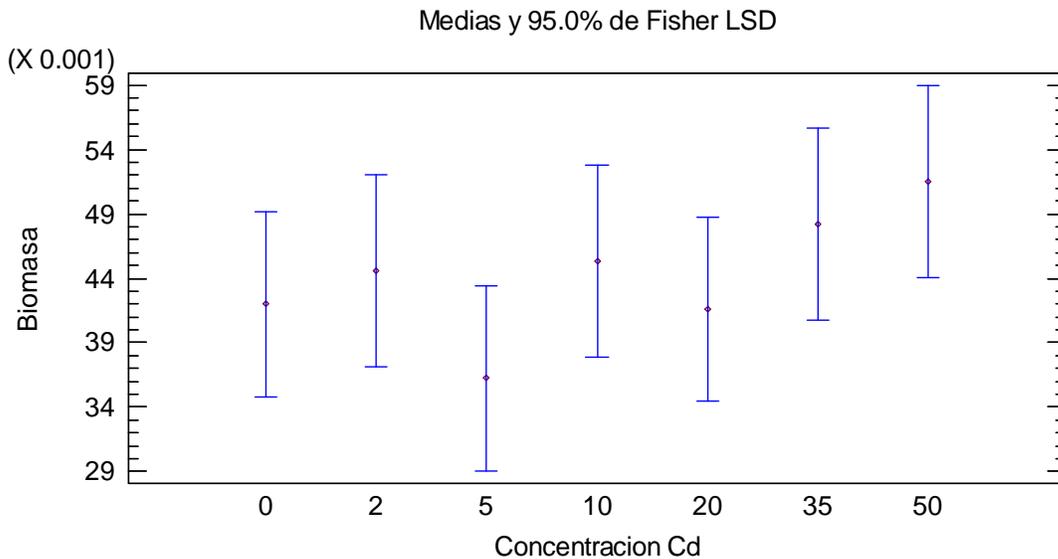
| Concentración Dopa del Suelo | Germinación | | Trasplante | |
|------------------------------|-------------|-------------------------|------------|-----------------------|
| | # de datos | Media | # de datos | Media |
| 0 | 31 | 0.00263226 ± 0.00139676 | 15 | 0.0419933 ± 0.0211153 |
| 2 | 26 | 0.00245385 ± 0.00122645 | 14 | 0.0445929 ± 0.0192408 |
| 5 | 33 | 0.00206061 ± 0.00145365 | 15 | 0.0362267 ± 0.0228664 |
| 10 | 22 | 0.00248182 ± 0.00117215 | 14 | 0.0453357 ± 0.0141517 |
| 20 | 28 | 0.0022 ± 0.00125845 | 15 | 0.0416067 ± 0.0223245 |
| 35 | 15 | 0.00294 ± 0.00100698 | 14 | 0.0482286 ± 0.016539 |
| 50 | 18 | 0.00271111 ± 0.00133368 | 14 | 0.0514929 ± 0.0202973 |

La Gráfica 1 presenta el Anova simple realizado a las medias para las plántulas de Germinación, en medios dopados con cadmio.



Gráfica 1. Gráfica de medias del peso de material en presencia de Cd para Germinación.

La siguiente gráfica muestra el Anova simple realizado a las medias de peso del material para las plántulas de trasplante a medio dopado.



Gráfica 2. Gráfica de medias del peso de material en presencia de Cd para Trasplante.

Según los resultados de las Gráficas 1 y 2, no existe diferencia significativa al comparar los pesos de material que adquieren las plántulas estando expuestas a

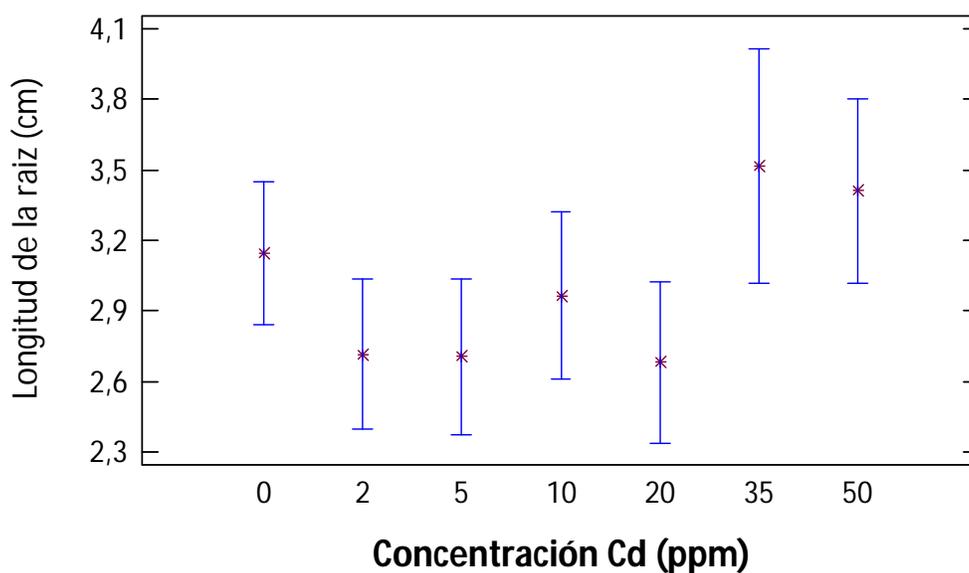
suelos dopados a diferentes concentraciones de cadmio, para ambos sistemas, tanto Germinación como Trasplante.

Longitud de la raíz

En la Tabla 2, se presentan los resultados de longitud de la raíz para los sistemas descritos.

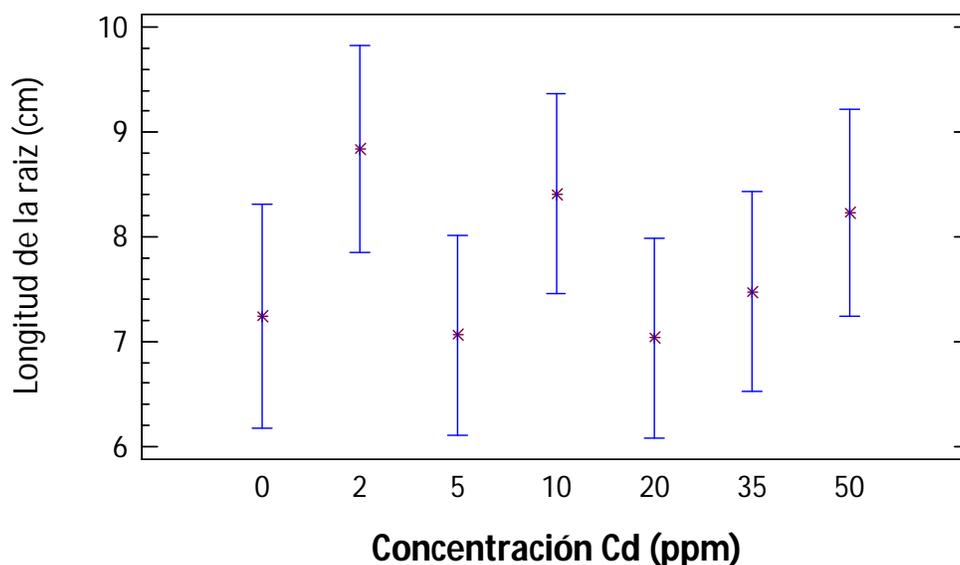
Tabla 2. Medias correspondientes al crecimiento de la raíz en los sistemas evaluados - Trasplante y Germinación.

| Concentración Dopa del Suelo | Germinación | | Trasplante | |
|------------------------------|-------------|-------------------|------------|------------------|
| | # de datos | Media | # de datos | Media |
| 0 | 32 | 3,14688 ± 1,45713 | 12 | 7,24167± 2,00384 |
| 2 | 29 | 2,71379 ± 1,20378 | 15 | 9,46± 3,98601 |
| 5 | 27 | 2,7037 ± 0,762829 | 15 | 7,06± 2,85352 |
| 10 | 23 | 2,96522 ± 1,06199 | 15 | 8,40667± 3,37416 |
| 20 | 25 | 2,68 ± 1,16046 | 15 | 7,03333± 2,10803 |
| 35 | 13 | 3,5167 ± 0,9233 | 15 | 7,47333± 2,53475 |
| 50 | 19 | 3,41053 ± 1,74225 | 14 | 8,23571± 1,57656 |



Gráfica 3. Gráfica de medias del crecimiento de raíz en presencia de Cd para Germinación.

Se realizó un análisis Anova con el fin de determinar cuál de las dopas afectó el crecimiento de la raíz, en la Gráfica 3, se presenta la gráfica de medias a un 95% de confianza para las semillas que germinaron en el medio dopado, y en la Gráfica 4 para las plántulas trasplantadas.



Gráfica 4. Gráfica de medias del crecimiento de raíz en presencia de Cd para Trasplante.

De acuerdo a los Gráficos 3 y 4, el análisis Anova, se indica que no hay diferencia significativa al evaluar la longitud de la raíz en presencia de diferentes de concentraciones de Cadmio.

7.2.2 Análisis de Acumulación de Cd

En la Tabla 3, se ilustran los resultados de acumulación de Cd en la planta, luego de suspender el ensayo. Es de resaltar que también se cuantificó el Cd que quedaba en el suelo. Dicho análisis se realizó por espectroscopia de absorción atómica empleando solución estándar de Cd para elaborar la curva de calibración y a partir de ella se realizó la cuantificación de este elemento en las muestras.

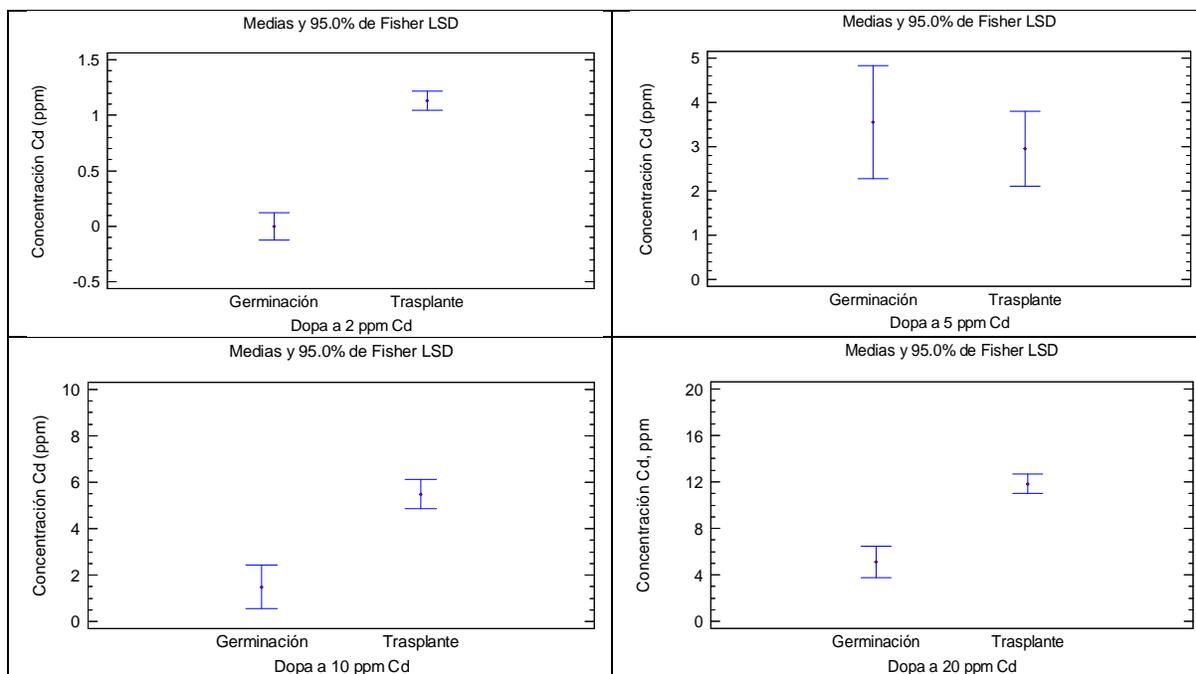
A bajas concentraciones de Dopa del suelo las semillas trasplantadas muestran mayor absorción. Muestran un comportamiento similar las semillas que germinaron en el suelo contaminado, comparadas con aquellas que fueron trasplantadas a 5 ppm. En todos los casos las plántulas que fueron trasplantadas de medio limpio a medio contaminado luego de la germinación, muestran una mayor acumulación de cadmio.

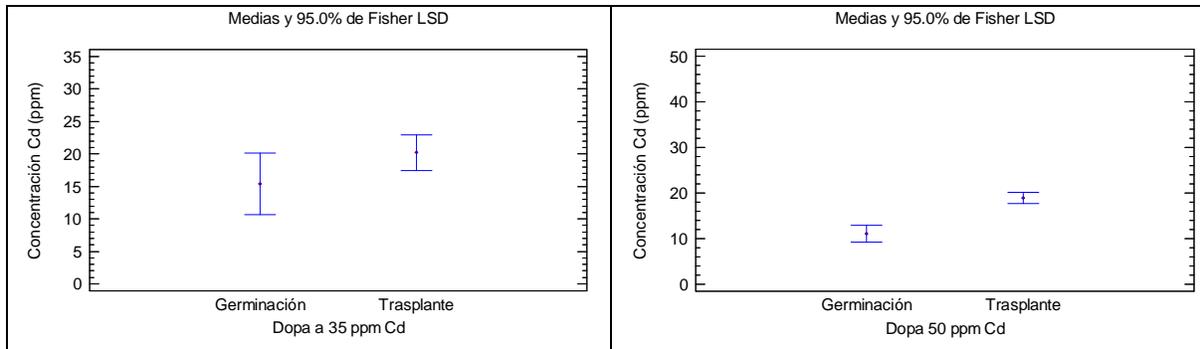
Tabla 3. Medias correspondientes a la concentración de Cd luego de suspender el ensayo.

| Concentración de Cd en el Suelo, ppm | Trasplante | Germinación |
|--------------------------------------|----------------|----------------|
| 2 | 1.1303±0.1858 | 0 |
| 5 | 2.9568±1.6068 | 3,5539± 1,6952 |
| 10 | 5.4787±1.4091 | 1,4892±0,3560 |
| 20 | 11.8263±0.9263 | 5,0951±2,6260 |
| 35 | 20,2053±4,8320 | 15,3859±6,4280 |
| 50 | 18,9711±2,5472 | 11,1168±1,6323 |

Es de resaltar que cuando el suelo se dopa a 35 ppm no se presenta diferencia significativa en los sistemas de análisis y se da la máxima acumulación, corroborándose con los resultados de la dopa a 50 ppm, donde el suelo registra la mayor concentración de cadmio, en cambio, las concentraciones de los sistemas Trasplante y Germinación bajan.

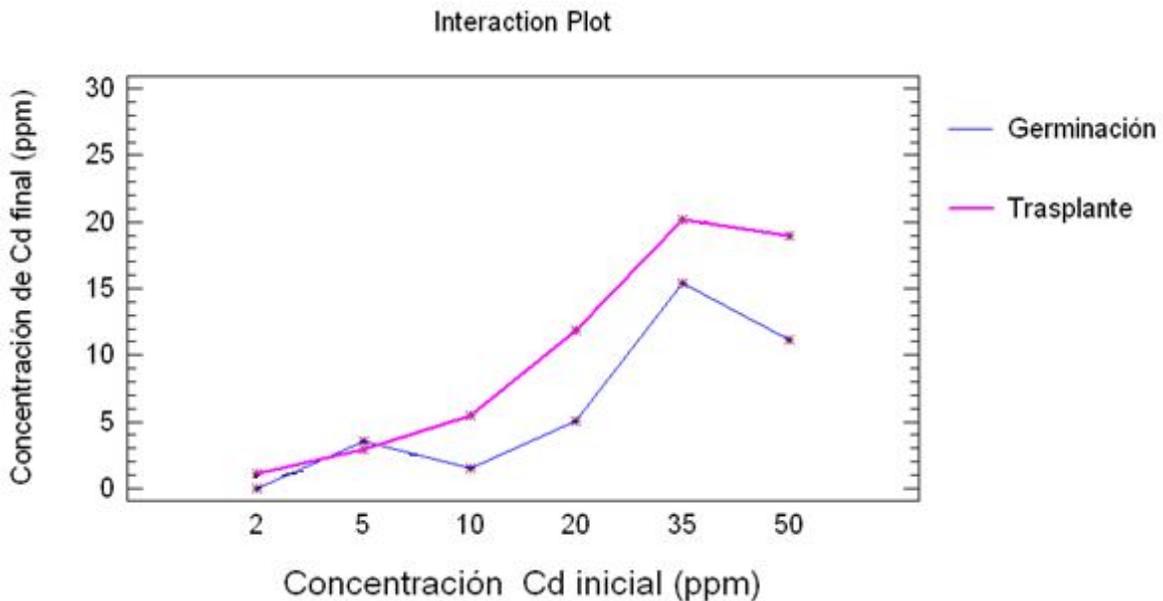
En la siguiente gráfica se recogen los análisis correspondientes, al realizar un ANOVA en una sola vía para cada concentración dopa, y comparando el comportamiento de los tres sistemas.





Gráfica 5. Comparación de los sistemas en cuanto a la acumulación de Cd a diferentes dopas.

Al aplicar un análisis Multifactor Anova (Gráfica 6), se puede observar que tanto las plántulas de Germinación como de Trasplante acumulan cadmio del suelo, presentando mayores niveles de absorción y respuesta aquellas plántulas que fueron trasplantadas.



Gráfica 6. Comparación de las concentraciones finales de cadmio en los tres sistemas para todas las dosis evaluadas.

Aplicando un análisis de regresión al sistema denominado Trasplante, se encontró que el mejor modelo que se ajusta es un análisis polinomial (Gráfica 7), de orden 3. Ajustándose a la siguiente ecuación.

Ecuación 1: $[Cd]_{ppm}$ que absorbe la planta = $0,650907 + 0,309665*[Cd]_{ppm} + 0,0207822*[Cd]_{ppm}^2 - 0,000392772*[Cd]_{ppm}^3$, con un $R^2 = 99.50$

De acuerdo a la Ecuación 1, la acumulación máxima de cadmio por medio de la planta trasplantada al sistema dopado sería de **27,0 ppm**.

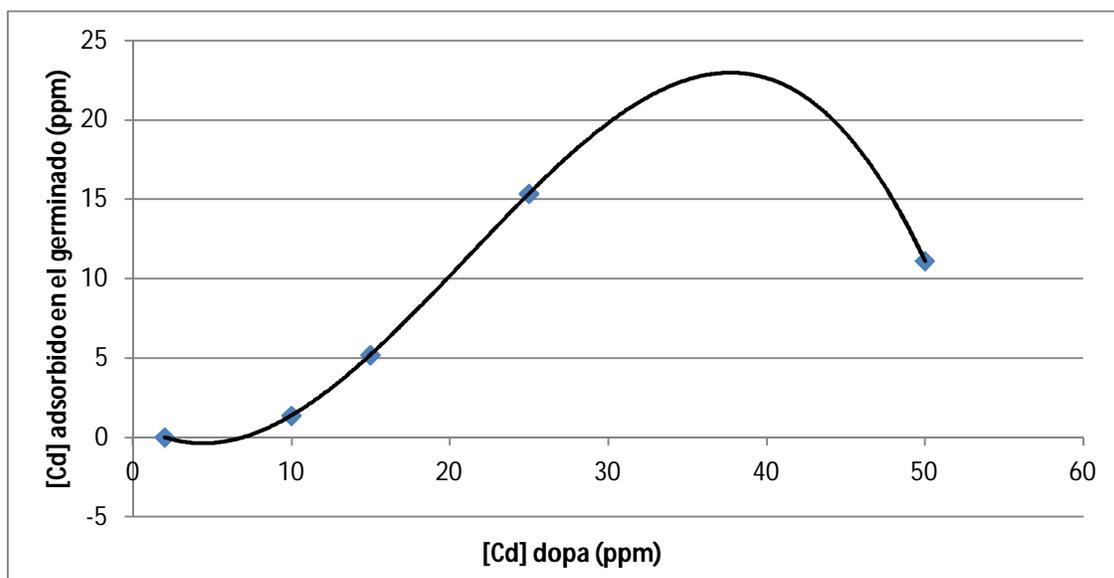


Gráfica 7. Análisis de regresión para la absorción de las plántulas trasplantadas a Dopas de Cd.

El mismo análisis de regresión se aplicó al sistema denominado Germinación, (Gráfica 8), encontrando que los datos también se ajustan a un modelo Polinomial de orden 3. Ajustándose a la siguiente ecuación.

Ecuación 2: $[Cd]_{ppm}$ que absorbe la planta = $0,975523 - 0,63132*[Cd]_{ppm} + 0,079841*[Cd]_{ppm}^2 - 0,00126315*[Cd]_{ppm}^3$, con un $R^2 = 99.98$.

De acuerdo a la Ecuación 2, la mayor concentración de cadmio que absorben la *Brassica nigra* cuando las semillas germinan en medios contaminados con cadmio es de **23 ppm**.



Gráfica 8. Análisis de regresión para la absorción de las plántulas trasplantadas a Dopas de Cd.

7.3. Resultados para el Mercurio

7.3.1 Análisis de Biomasa

Igualmente, el Análisis de Biomasa de desarrolló utilizando los datos de Peso de Material Seco y Longitud de Raíz recolectados. Se muestrearon el total de las plántulas germinadas y trasplantadas.

Se determinó la longitud de la raíz inmediatamente después de haber sido extraídas las plántulas de los medios contaminados y el peso del material seco luego de secarse al aire por cinco días.

Peso de material

Los datos de peso de material para Germinación y Trasplante se analizaron mediante un Anova simple a las medias.

En la Tabla 4, se presentan las medias del Peso de Material, obtenidos en los medios de trasplante y germinación en suelo dopado con diferentes concentraciones de cadmio.

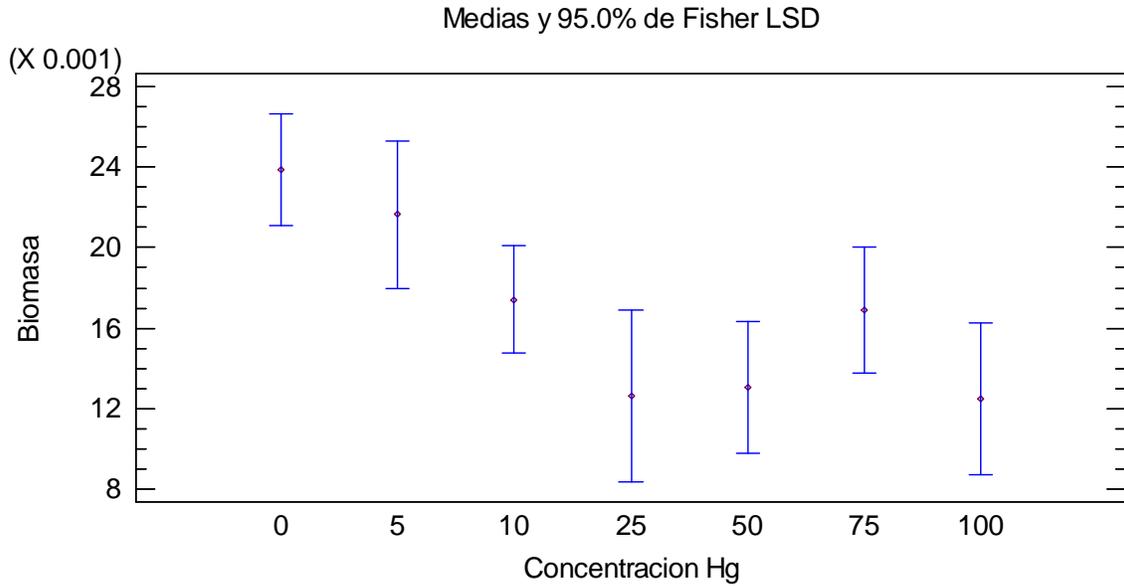
Tabla 4. Medias correspondientes al Peso del Material en los sistemas evaluados - Trasplante y Germinación.

| Concentración Dopa del Suelo | Germinación | | Trasplante | |
|------------------------------|-------------|------------------------|------------|----------------------|
| | # de datos | Media | # de datos | Media |
| 0 | 33 | 0.0238758 ± 0.0166804 | 15 | 0.21268 ± 0.131342 |
| 5 | 19 | 0.0216263 ± 0.0115919 | 12 | 0.244675 ± 0.159892 |
| 10 | 35 | 0.0174314 ± 0.0114411 | 14 | 0.178029 ± 0.0540562 |
| 25 | 14 | 0.0126643 ± 0.00847817 | 10 | 0.20918 ± 0.110586 |
| 50 | 24 | 0.0130792 ± 0.00886895 | 15 | 0.164533 ± 0.0978847 |
| 75 | 26 | 0.0169115 ± 0.00919949 | 15 | 0.201067 ± 0.0804545 |
| 100 | 18 | 0.0124944 ± 0.00482706 | 15 | 0.18236 ± 0.083324 |

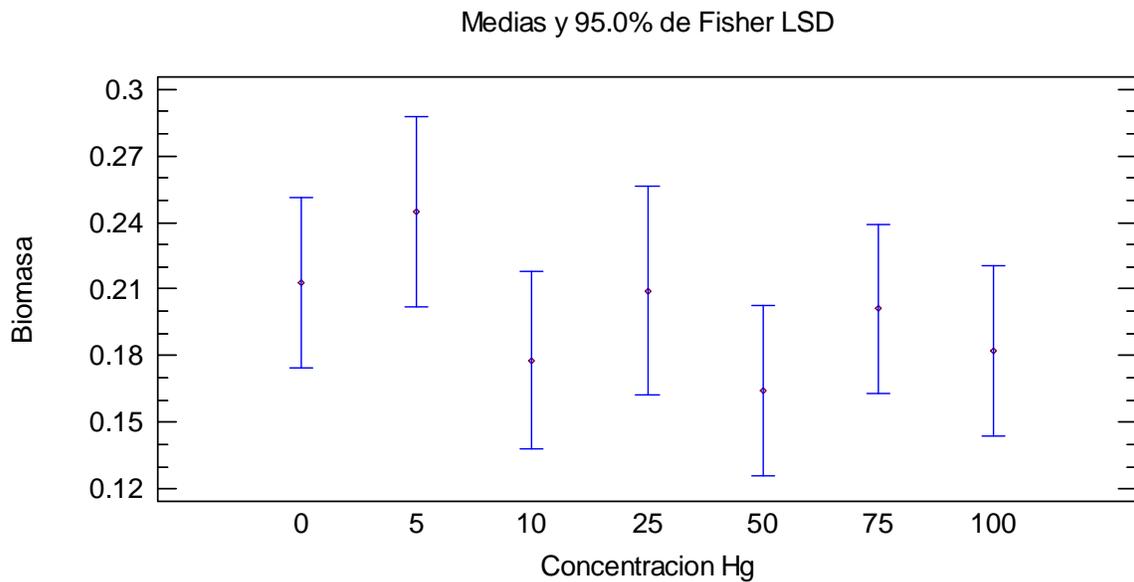
En las Gráficas 9 y 10, se pueden observar los resultados del Anova Simple aplicado a los pesos de las plántulas que germinaron en los medios dopados con mercurio (Gráfica 9) y las de las plántulas trasplantadas a los mismos (Gráfica 10).

En la Gráfica 9, se puede apreciar que existe diferencia significativa entre el blanco (0 ppm) y las dopas de 10 hasta 100 ppm. Desarrollándose mayor biomasa en el medio sin contaminante.

Por el contrario, en la Gráfica 10 se observa que no existe diferencia significativa entre los pesos de las plántulas trasplantadas a las diferentes dopas de mercurio. Desarrollándose plántulas con pesos similares en los medios a diferentes concentraciones del contaminante.



Gráfica 9. Gráfica de medias del peso de material en presencia de Hg para Germinación.



Gráfica 10. Gráfica de medias del peso de material en presencia de Hg para Trasplante.

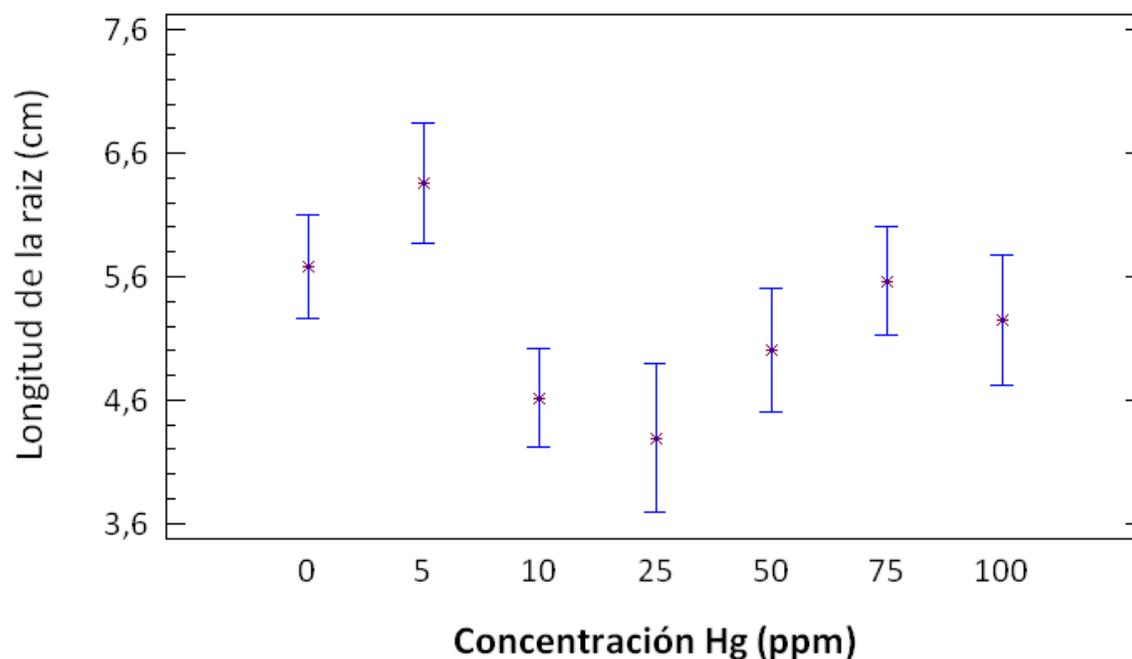
Longitud de la raíz

En la Tabla 5, se presentan los resultados de longitud de la raíz para los sistemas, luego de aplicar un análisis de medias.

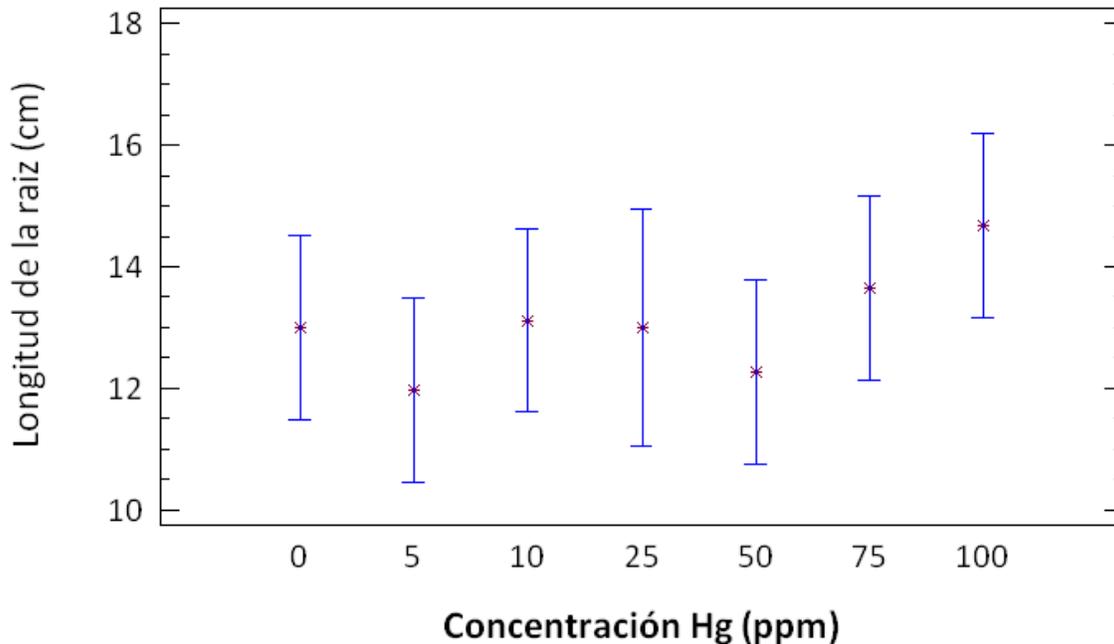
Tabla 5. Medias correspondientes al crecimiento de la raíz en los sistemas evaluados - Trasplante y Germinación.

| Concentración Dopa del Suelo | Germinación | | Trasplante | |
|------------------------------|-------------|-------------|------------|-------------|
| | # de datos | Media | # de datos | Media |
| 0 | 29 | 5,98 ± 2,0 | 15 | 13,01± 4,96 |
| 5 | 21 | 6,36 ± 1,98 | 15 | 11,96± 4,53 |
| 10 | 32 | 4,62 ± 1,50 | 15 | 13,12± 3,93 |
| 25 | 14 | 4,29 ± 1,79 | 15 | 13,0± 34,23 |
| 50 | 20 | 5,00 ± 1,19 | 15 | 12,27± 3,71 |
| 75 | 26 | 5,56 ± 1,39 | 15 | 13,64± 4,24 |
| 100 | 18 | 5,25 ± 1,50 | 15 | 14,67± 3,46 |

De acuerdo a la Gráfica 11, el análisis Anova indica que hay diferencia significativa al evaluar la longitud de la raíz de plántulas germinadas a diferentes dopas de mercurio. Se observa que la principal diferencia de presenta entre las dopas de 0 y 5 ppm con las de 10 y 25 ppm.



Gráfica 11. Gráfica de medias del crecimiento de raíz en presencia de Hg para Germinación.



Gráfica 12. Gráfica de medias del crecimiento de raíz en presencia de Hg para Trasplante.

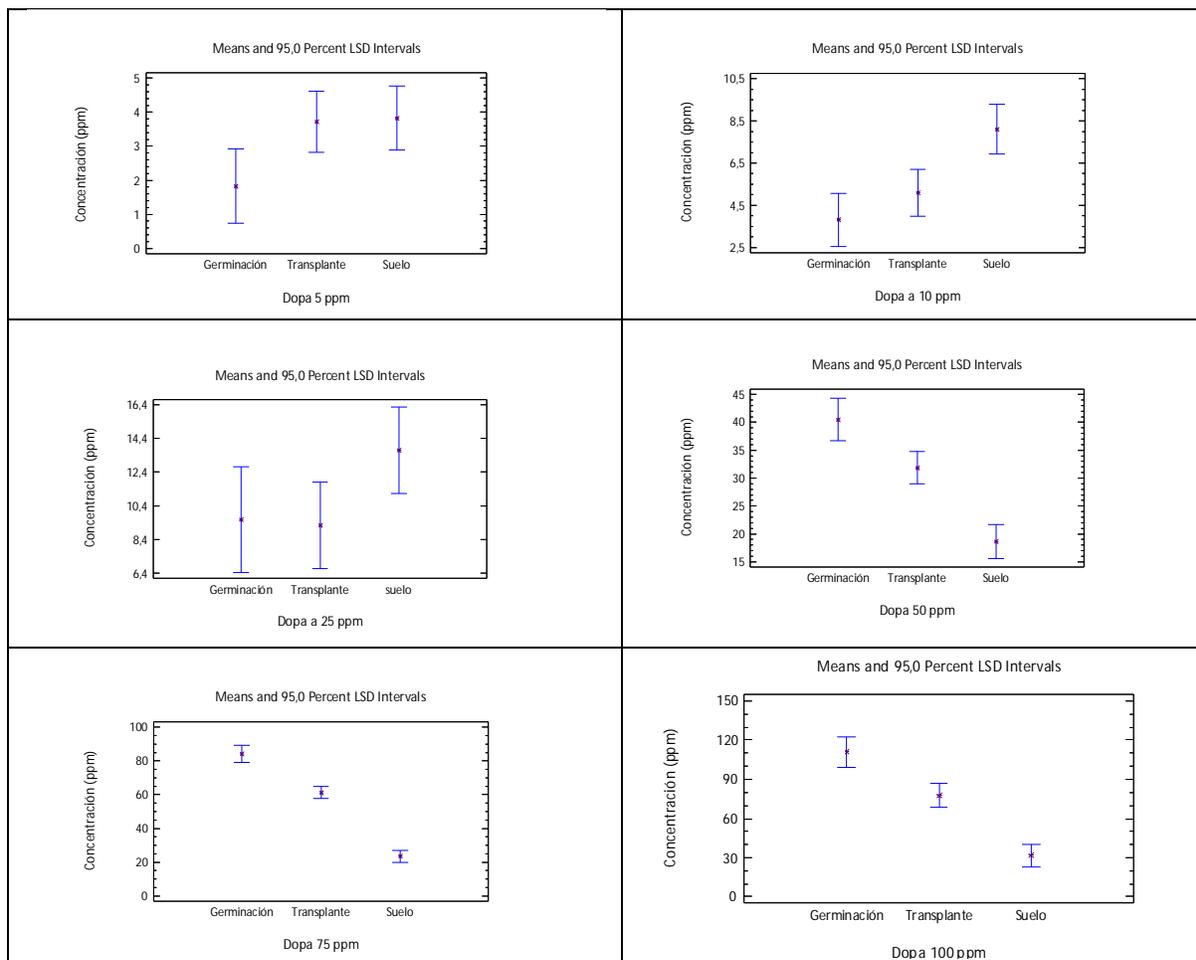
7.3.2 Análisis de Acumulación de Hg

En la Tabla 6, se ilustran los resultados de la acumulación de Hg en la planta, luego de suspender el ensayo. Al igual que para el Cd, se cuantificó el Hg que quedaba en el suelo. Dicho análisis se realizó por espectroscopia de absorción atómica empleando la técnica de vapor en frío, con Boro hidruro de sodio como agente acomplejante. Empleando solución estándar de Hg para elaborar la curva de calibración y a partir de ella se realizar la cuantificación de este elemento en las muestras.

Tabla 6. Medias correspondientes a la concentración de Hg luego de suspender el ensayo.

| [Hg] (ppm) | Germinación | Trasplante |
|------------|------------------------|------------------------|
| 0 | 3,30991 ± 0,394799 (9) | 1,99292 ± 0,418748 (8) |
| 5 | 1,83062 ± 0,740411 (6) | 3,72098 ± 0,604543 (9) |
| 10 | 3,81413 ± 0,857177 (7) | 5,08298 ± 0,755959 (9) |
| 25 | 9,5688 ± 2,06166 (4) | 9,23548 ± 1,68333 (6) |
| 50 | 40,5027 ± 2,59658 (5) | 31,8748 ± 1,93537 (9) |
| 75 | 84,1427 ± 3,45701 | 61,3041 ± 6,29319 (9) |
| 100 | 111,037 ± 7,7704 (5) | 77,4742 ± 6,14304 (8) |

En las siguientes gráficas (Gráfica 13) se ilustra el comportamiento de cada sistema a las diferentes dopas.

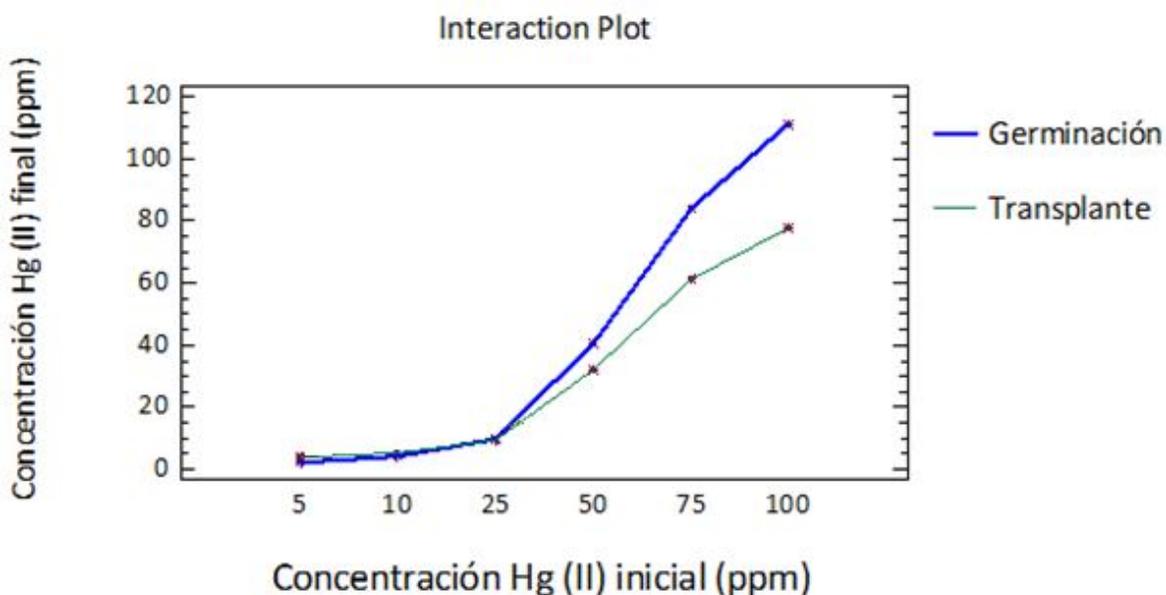


Gráfica 13. Comparación de los sistemas en cuanto a la acumulación de Cd a diferentes dopas.

En la anterior gráfica, se observa que las concentraciones bajas (5, 10 y 25 ppm) no presentan diferencia significativa en la acumulación de mercurio de las plántulas de germinación y trasplante. Además, las concentraciones de mercurio en el suelo no varían mucho respecto a las iniciales. Igualmente, la concentración del contaminante en el suelo se encontró mayor o igual que las reportadas para germinación y trasplante.

Se observa que a partir de la concentración media (50 ppm) las plántulas mejoran el proceso de acumulación del metal, siendo las de germinación las que más contaminante lograron extraer. Es de notar que las concentraciones finales en el suelo para los niveles altos (50, 75 y 100 ppm) son relativamente bajas, entre 15 y 40 ppm, siempre menores a las reportadas para germinación y trasplante.

Las plántulas de germinación registraron la mayor extracción del contaminante a altas concentraciones.



Gráfica 14. Comparación de las concentraciones finales de mercurio en los tres sistemas para todas las dosis evaluadas.

En la Grafica de Interacción (Gráfica 14), se observa que hay acumulación del contaminante para todos los niveles de exposición, tanto en germinación como trasplante, aunque las concentraciones registradas permanecieron menores a las del suelo hasta 25 ppm.

En el intervalo entre 25 y 100 ppm, tanto para germinación y trasplante, la concentración en las plántulas aumentó gradualmente hasta máximos tres y cuatro veces los valores registrados en el suelo.

La pendiente de la curva de la concentración final en el suelo presenta una variación constante, con valores entre 4 y 30 ppm, registrándose reducciones del 10, 15, 40, 60, 67 y 70% del contaminante en suelo para los niveles 5, 10, 25, 50, 75 y 100 ppm, respectivamente.

8. CONCLUSIONES

- Las concentraciones de mercurio y cadmio evaluadas en la presente investigación, afectan notoriamente la **germinación** de las semillas de *Brassica nigra*, hasta porcentajes de reducción en la germinación de aproximadamente el 50%, para ambos contaminantes.
- El **peso de material**, que desarrollan las plántulas de *Brassica nigra*, no es afectado por las dosis de cadmio utilizadas, tanto en Germinación como Trasplante. Paralelamente, las dosis altas de mercurio afectan hasta en un 50% el desarrollo de peso en las plántulas de Germinación, sin embargo, ninguna dosis evaluada afecta el desarrollo de peso de las plántulas de Trasplante.
- Las concentraciones de cadmio utilizadas no afectan la **longitud de la raíz** de las plántulas de *Brassica nigra*, tanto en Germinación como en Trasplante. Análogamente, las plántulas de Trasplante en mercurio no sufren afectación alguna en su longitud de raíz. En cambio, las plántulas de Germinación, expuestas a diferentes dosis de mercurio, son afectadas en la inhibición del crecimiento de la raíz, hasta de 1,6 cm.
- Se comprobó la **acumulación de mercurio y cadmio**, por parte de la *Brassica nigra*, en plántulas tanto de germinación como de trasplante. En el caso del mercurio se determinaron concentraciones máximas de 111 y 77 ppm de Hg en plántulas de germinación y trasplante, respectivamente. Para el cadmio las concentraciones máximas reportadas son de 15 y 20 ppm de Cd en plántulas de germinación y trasplante, respectivamente.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Agúdelo, L., Macías, K., & Suárez, A. (2005). Fitorremediación: la alternativa para absorber metales pesados de los biosólidos. *Lasallista de Investigación* , 2 (001), 57-60.
- Alloway, B., & Steinnes, E. (1999). Anthropogenic additions of cadmium to soils. *Kluwer Academic Publishers* , 97-123.
- Angelova, V., & Ivanov, K. (2009). Bio-accumulation and distribution of heavy metals in black mustard (*Brassica nigra* Koch). *Environ Monit Assess* , 449-450.
- Bernal, M., Clemente, R., Vázquez, S., & Walker, D. (2007). Aplicación de fitorremediación a los suelos contaminados por metales pesados en Aznalcóllar. *Ecosistemas* , 67-76.
- Besada, V., González, J., & Schultze, F. (2006). Mercury, cadmium, lead, arsenic, copper and zinc concentrations in albacore, yellowfin tuna and bigeye tuna from Atlantic Ocean. *Ciencias Marinas* , 439 - 445.
- Bharagava, R., Chandra, R., & Rai, V. (2008). Phytoextraction of trace elements and physiological changes in Indian Mustard plants (*Brassica nigra* L.) grown in post methanated distillery effluent (PMDE) irrigated soil. *Bioresource Technology* , 8316-8324.
- Calvo, M. S. (1996). *El Gran Diccionario del Medio Ambiente y la Contaminación*. Madrid: Mundi-Prensa.
- Greenfacts. (2012). *Greenfacts*. Recuperado el 01 de Enero de 2012, de www.greenfacts.org/es/glosario/abc
- Han, F., Sridhar, B., Monts, D., & Su, Y. (2004). Phytoavailability and toxicity of trivalent and hexavalent chromium to *Brassica juncea* L. *New Phytologist* , 162, 489-499.
- Hickman, J. (1993). *TREATMENT FROM THE JEPSON MANUAL*. California: Regents of the University of California.
- Hincapié, U. (2006). *Diagnóstico para la implementación de sistemas de gestión ambiental en el distrito minero Segovia - Remedios*. Medellín: Gobernación de Antioquia.
- Insuasty, L., Burbano, H., & Menjivar, J. (2008). Dinámica del cadmio en suelos cultivados con papa en Nariño, Colombia. *Acta Agronómica* , 51 - 54.
- Jaramillo J., D. F. (2002). *Introducción a la ciencia del suelo*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- Järup, L., & Akesson, A. (2009). Current status of cadmium as an environmental health problem. *Toxicology and Applied Pharmacology* , 201 -208.
- McLaughlin, M., & Singh, B. (1999). Cadmium in Soils and Plants. *Kluwer Academic Publishers* .
- Meraz, F. J. (2008). *Diccionario ambiental y asignaturas afines*. Mexico D.F.: Mundi-Prensa.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (15 de Julio de 1994). Resolución 189 de 1994. Bogotá, Cundinamarca, Colombia.

- Nilo, L. R. (2003). Evaluación del impacto de los fertilizantes fosfatados en la acumulación de cadmio en suelos cultivados con maíz. *Gestión y planificación ambiental*.
- Perdomo, F., & Mondragón, J. (2004). *Conabio*. Recuperado el 15 de Mayo de 2011, de Conabio: <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/brassicaceae/brassica-nigra/fichas/ficha.htm>
- Pinto, A. P. (2004). Influence of organic matter on the uptake of cadmium, zinc, copper and iron by sorghum plants. *Science of the Total Environment*, 239-274.
- PNUMA. (2010). *Análisis del flujo del comercio y revisión de prácticas de manejo ambientalmente racionales de productos conteniendo cadmio, plomo y mercurio en América Latina y el Caribe*. UNEP.
- Prieto, J., González, C. A., Román, A. D., & Prieto, F. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelo y agua. *Tropical and subtropical agroecosystem*, 29 - 44.
- Puga, S., Sosa, M., Lebgue, T., Quintana, C., & Campos, A. (2006). Contaminación por metales pesados en suelo provocada por la industria minera. *Ecología Aplicada*, 149 - 155.
- Rodríguez, M., Martínez, N., Romero, M., del Río, L., & Sandalio, L. (2008). Toxicidad del cadmio en plantas. *Ecosistemas*, 3 (17), 139-146.
- Shiyab, S., Chen, J., Han, F. X., & Monts, D. L. (2009). Phytotoxicity of mercury in Indian mustard (*Brassica juncea* L.). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 619 - 625.
- Tomaro, M. L. (2005). El intrigante cadmio. *Facultad de Farmacia y bioquímica*.
- Uryu, Y., Malm, O., Thornton, I., Payne, I., & Cleary, D. (2001). Mercury contamination of fish and its implications for other wildlife of the Tapajós Basin, Brazilian Amazon. *Conservation Biology*, 438 - 446.
- Weinberg, J. (2007). *Introducción a la contaminación por Mercurio para las ONG*. New York.
- Yang, Q., Lan, C., Wang, H., Zhuang, P., & Shu, W. (2006). Cadmium in soil-rice system and health risk associated with the use of untreated mining wastewater for irrigation in Lechang, China. *Agricultural water management*, 147 - 152.
- Zhai, L., Liao, X., Chen, T., Yan, X., Xie, H., Wu, B., y otros. (2008). Regional assessment of cadmium pollution in agricultural lands and the potencial health risk related to intensive mining activities: A case study in Chenzhou City, China. *Journal of Environmental Sciences*, 696 - 703.