

**EVALUACIÓN DE LA ABSORCIÓN DE MERCURIO (Hg) CON
DIFERENTES CONCENTRACIONES EN CUATRO VARIEDADES DE
ARROZ (*Oryza sativa* L.) SEMBRADAS EN SUELOS DE LA MOJANA**

**MARÍA JOSÉ DURANGO VARGAS
MARÍA ISABEL REINA SEPÚLVEDA**

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGRONÓMICA Y DESARROLLO RURAL
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA**

**MONTERÍA - CÓRDOBA
2020**

**EVALUACIÓN DE LA ABSORCIÓN DE MERCURIO (Hg) CON DIFERENTES
CONCENTRACIONES EN CUATRO VARIEDADES DE ARROZ (*Oryza sativa* L.)
SEMBRADAS EN SUELOS DE LA MOJANA**

**Proyecto de grado presentado como requisito parcial para obtener el título
de Ingeniero Agrónomo.**

**MARÍA JOSÉ DURANGO VARGAS
MARÍA ISABEL REINA SEPÚLVEDA**

**Director
I.A Msc. JOSÉ ANTONIO PEROZA SIERRA**

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGRONÓMICA Y DESARROLLO RURAL
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA**

**MONTERÍA - CÓRDOBA
2020**

La responsabilidad ética, legal y científica de las ideas, conceptos y resultados del proyecto serán responsabilidad del autor.

Artículo 61, acuerdo No. 093 del 26 de noviembre de 2002 del Consejo Superior de la Universidad de Córdoba.

Nota de aceptación

José Antonio Peroza Sierra I.A. M_{SC}.
Director

Rogers Enrique Charry Mercado.
Jurado

Mónica Cecilia Cantero Benítez PhD.
Jurado

Montería, Junio de 2020

DEDICATORIA

A Dios por darme sabiduría para realizar esta investigación y la pasión para cumplir mis metas propuestas en mi vida profesional.

A mi Madre Rosario Sepúlveda Morgan por ser mi motivación, apoyo en la vida; a la memoria de mi Padre Dagoberto Reina Torres (q.e.p.d), que donde quiera que estés te sientas orgulloso de mí.

A mi familia en especial a mi Hermano Christian Negrette Sepúlveda y a mi Tía Mirtha Guzmán Morgan por ayudarme a salir adelante y continuar con mi carrera; a Aldair Herazo González por ser mi apoyo incondicional para alcanzar mis logros.

María Isabel Reina Sepúlveda

A mis abuelos Nerolina Negrete Conde y Andrés José Durango Petro, por ser mi más grande motivación y apoyo siempre.

A mis padres, José Andrés Durango Negrete y Emilse Rosa Vargas Correa por estar siempre ahí impulsándome a seguir mis sueños.

A mi familia que cada día me dan aliento para no desfallecer, a mi hermana Rosa Isela Durango Vargas y Alex Ayala Llorente por todo su cariño y entrega a ayudarme a cumplir mis metas.

Y sobre todo a Dios por ser mi guía y mi escudo siempre, y por colocarme en el camino a mi compañera María Isabel Reina Sepúlveda que le agradezco su amistad y compañerismo para haber llevado a cabo esta investigación.

María José Durango Vargas

AGRADECIMIENTOS

A Director José Antonio Peroza Sierra, por la confianza y ser nuestra guía, consejero, motivación en esta investigación.

A Dairo Pérez por ser nuestro apoyo estadístico en la investigación.

A los miembros del Laboratorio de Toxicológica y Gestión Ambiental, Mejoramiento Genético, por la atención y colaboración en el experimento.

A la Universidad de Córdoba por hacer parte de nuestro proceso de formación profesional.

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN.....	15
INTRODUCCIÓN.....	17
1. MARCO TEÓRICO.....	20
1.1 GENERALIDADES DEL CULTIVO DE ARROZ.....	20
1.1.1 Origen, domesticación y dispersión del arroz.....	20
1.1.2 Producción de arroz.....	21
1.1.3 Clasificación taxonómica.....	22
1.1.4 Morfología.....	22
1.1.5 Crecimiento y desarrollo.....	26
1.1.6 Requerimientos edafoclimáticos del cultivo.....	28
1.2 MERCURIO (Hg).....	29
1.2.1 Toxicidad del mercurio.....	30
1.2.2 Usos del mercurio.....	30
1.2.3 Afecciones de la salud por mercurio (Hg).....	32
1.2.4 Enfermedades más comunes producidas por el mercurio.....	33
1.2.5 Mercurio en el suelo.....	34
1.2.6 Biodisponibilidad del mercurio (Hg) en el suelo.....	34
1.2.7 Mercurio en las plantas.....	36
1.2.8 Mercurio en el arroz.....	37

2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	39
2.1 LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO.	39
2.2 VARIABLES E INDICADORES.	39
2.3 VARIABLES INDEPENDIENTES.	40
2.4 VARIABLES DEPENDIENTES.....	42
2.4.1 Biomasa (g).	42
2.4.2 Medición de la concentración de mercurio en órganos de la planta.	43
2.4.3 Disponibilidad de mercurio en el suelo.	45
2.4.4 Factores de translocación (FT) y bio-acumulación (FB).	45
2.4.5 Prueba de germinación.....	46
2.5 DISEÑO EXPERIMENTAL.	47
2.6 PROCEDIMIENTO.	48
2.6.1 Toma de muestra de suelo.	48
2.6.2 Pre-tratamiento del suelo.	48
2.6.3 Dosificación de suelos con Hg.	48
2.6.4 Selección de la semilla.	49
2.6.5 Manejo agronómico del cultivo.....	49
2.6.6 Monitoreo del cultivo.	50
2.7 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS.	51
3. RESULTADOS.....	52
3.1 CONDICIONES AMBIENTALES Y ETAPA INICIAL DEL CULTIVO.	52
3.2 MANEJO DE PLAGAS Y ENFERMEDADES.	53
3.3 MANEJO DE MALEZAS.....	54

3.4 SEGUIMIENTO FISIOLÓGICO DEL CULTIVO.....	54
3.4.1 Altura de las plantas.	54
3.4.2 Número de macollas.	55
3.5 CONCENTRACIÓN DE Hg EN LAS CUATRO VARIEDADES DE <i>Oryza sativa</i> L.	56
3.5.1 Concentración de Hg en las raíces de las plantas (µg de Hg/kg de biomasa seca).	56
3.5.2 Concentración de Hg en el tallo de las plantas (µg de Hg/kg de biomasa seca).	60
3.5.3 Concentración de Hg en la hoja de las plantas (µg de Hg/kg de biomasa seca).	63
3.5.4 Concentración de Hg en los granos pilados de las plantas (µg de Hg/kg de biomasa seca).	65
3.5.5 Concentración de Hg en la cascara del grano (µg de Hg/kg de biomasa seca).	68
3.6 FACTOR DE BIO-ACUMULACIÓN Y TRANSLOCACIÓN DE Hg EN LAS CUATRO VARIEDADES DE <i>Oryza sativa</i> L.	70
3.7 BIODISPONIBILIDAD DE Hg EN LOS SUELOS CONTAMINADOS.	77
3.8 GERMINACIÓN E ÍNDICE DE VELOCIDAD DE GERMINACIÓN (IVG) DE LAS CUATRO VARIEDADES.	79
4. CONCLUSIONES.	83
BIBLIOGRAFÍA.	84
ANEXOS.....	96

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1: Estructura vegetativa del arroz.	24
Figura 2: Estructuras reproductivas de la planta de arroz.....	25
Figura 3: Crecimiento y desarrollo de la planta de arroz.....	28
Figura 4: Casa malla de techo corredizo donde se realizó el experimento.....	39
Figura 5: Estufa de secado de biomasa vegetal seca.....	42
Figura 6: Balanza analítica, utilizada para el peso de las muestras.....	43
Figura 7: Analizador Directo de Mercurio RA-915M del Laboratorio de Toxicología y gestión ambiental.	43
Figura 8: Extracción del sepedón del balde y la separación de raíces del suelo. .	44
Figura 9: Aplicación de las concentraciones de Hg en el suelo correspondiente a cada tratamiento del experimento.....	49
Figura 10: Fitotoxicidad causa de la absorción de Hg, provocando amarillamiento seguido de un necrozamiento en los ápices de las hojas.	53
Figura 11: Concentración de Hg en las raíces de las variedades Fedearroz 67 y Fedearroz 68 en función a las concentraciones de Hg en el suelo.....	58
Figura 12: Concentración de Hg en las raíces de las variedades Fedearroz 2000 y Fedearroz 473 en función a las concentraciones de Hg en el suelo.....	59
Figura 13: Concentración de Hg en el tallo de las variedades Fedearroz 67 y Fedearroz 68 en función a la concentración de Hg en el suelo.	61
Figura 14: Comparación de medias del factor concentración para las concentraciones de Hg en el tallo en las variedades Fedearroz 2000 y Fedearroz 473.....	62

Figura 15: Comparación de medias del factor concentración para las concentraciones de Hg en las hojas de las variedades Fedearroz 67 y Fedearroz 68.....	63
Figura 16: Concentración de Hg en las hojas de las variedades Fedearroz 2000 y Fedearroz 473 en función a las concentraciones de Hg en el suelo.....	64
Figura 17: Concentración de Hg en el grano pilado de las variedades Fedearroz 67 y Fedearroz 68 en función a las concentraciones de Hg en el suelo.	66
Figura 18: Concentración de Hg en el grano pilado de las variedades Fedearroz 2000 y Fedearroz 473 en función a las concentraciones de Hg en el suelo.	67
Figura 19: Comparación de medias del factor concentración para las concentraciones de Hg en la cascara del grano en las variedades Fedearroz 2000 y Fedearroz 473.....	69
Figura 20: Factor de bioacumulación de Hg en la hoja de las variedades Fedearroz 67 y Fedearroz 68 en función a las concentraciones de Hg en el suelo.	71
Figura 21: Factor de bioacumulación de Hg en el grano de las variedades Fedearroz 67 y Fedearroz 68 en función a las concentraciones de Hg en el suelo.	71
Figura 22: Factor de bioacumulación de Hg en la raíz de las variedades Fedearroz 2000 y Fedearroz 473 en función a las concentraciones de Hg en el suelo.	73
Figura 23: Factor de translocación de Hg de las variedades Fedearroz 2000 y Fedearroz 473 en función a las concentraciones de Hg en el suelo.....	74
Figura 24: Comparación de medias del factor concentración para el factor de translocación de Hg en las variedades Fedearroz 67 y Fedearroz 68.....	75

LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1: Consumo promedio de mercurio en el grupo de países llamados 'industrializados', expresado en porcentaje.	32
Tabla 2: Características eco-fisiológicas de las variedades de arroz certificadas por Fedearroz.	41
Tabla 3: Montaje del experimento.	47
Tabla 4: Plan de fertilización con base a los días después de la siembra.	50
Tabla 5: Valores medios de la altura y número de macollas de las variedades de arroz en los dos ensayos.	55
Tabla 6: Resultado de Biodisponibilidad de Hg en el suelo Arcillo Limoso donde se sembró las variedades Fedearroz 2000 y Fedearroz 473.	77
Tabla 7: Resultado de Biodisponibilidad de Hg en el suelo Franco Arcillo Limoso donde se sembró las variedades Fedearroz 67 y Fedearroz 68.	77

LISTA DE ANEXOS

pág.

Anexo 1: Análisis de las propiedades químicas del suelo.....	96
Anexo 2: Análisis de las propiedades físicas del suelo.....	97
Anexo 3: Cuadrados medios del análisis de varianza para las [Hg] en cada uno de los órganos de planta en las variedades Fedearroz 67 y Fedearroz 68.	99
Anexo 4: Comparación de medias del factor variedad para las [Hg] en cada uno de los órganos de planta en las variedades Fedearroz 67 y Fedearroz 68.	99
Anexo 5: Comparación de medias del factor concentración para las [Hg] en cada uno de los órganos de planta en las variedades Fedearroz 67 y Fedearroz 68. ...	99
Anexo 6: Cuadrados medios del análisis de varianza para las [Hg] en cada uno de los órganos de la planta en las variedades Fedearroz 2000 y Fedearroz 473....	100
Anexo 7: Comparación de medias del factor variedad para las [Hg] en cada uno de los órganos de la planta en las variedades Fedearroz 2000 y Fedearroz 473.....	100
Anexo 8: Comparación de medias del factor concentración para las [Hg] en cada uno de los órganos de planta en las variedades Fedearroz 2000 y Fedearroz 473.	100
Anexo 9: Cuadrados medios del análisis de varianza para el factor de bio-acumulación de Hg en cada uno de los órganos de la planta en las variedades Fedearroz 2000 y Fedearroz 473.....	101
Anexo 10: Comparación de medias del factor variedad en el factor de bio-acumulación de Hg en cada uno de los órganos de planta en las variedades Fedearroz 2000 y Fedearroz 473.....	101
Anexo 11: Comparación de medias del factor concentración para el factor de bio-acumulación de Hg en cada uno de los órganos de planta en las variedades Fedearroz 2000 y Fedearroz 473.....	102
Anexo 12: Cuadrados medios del análisis de varianza para el factor de bio-acumulación de Hg en cada uno de los órganos de la planta en las variedades Fedearroz 67 y Fedearroz 68.....	102

Anexo 13: Comparación de medias del factor variedad para el factor de bio-acumulación de Hg en cada uno de los órganos de planta en las variedades Fedearroz 67 y Fedearroz 68.....	102
Anexo 14: Comparación de medias del factor concentración para el factor de bio-acumulación de Hg en cada uno de los órganos de planta en las variedades Fedearroz 67 y Fedearroz 68.....	103
Anexo 15: Cuadrados medios del análisis de varianza para el factor de translocación de Hg en la planta, en las variedades Fedearroz 2000 y Fedearroz 473.....	103
Anexo 16: Comparación de medias del factor variedad para el factor de translocación en las variedades Fedearroz 2000 y Fedearroz 473.....	103
Anexo 17: Comparación de medias del factor concentración para el factor de translocación, en las variedades Fedearroz 2000 y Fedearroz 473.....	104
Anexo 18: Cuadrados medios del análisis de varianza para el factor de translocación de Hg en la planta, en las variedades Fedearroz 67 y Fedearroz 68.	104
Anexo 19: Comparación de medias del factor variedad para el factor de translocación en las variedades Fedearroz 67 y Fedearroz 68.....	104
Anexo 20: Comparación de medias del factor concentración para el factor de translocación, en las variedades Fedearroz 67 y Fedearroz 68.....	105
Anexo 21: Valores medios de porcentajes de germinación e índice de velocidad de germinación de las variedades Fedearroz 2000 y Fedearroz 473 en función a las concentraciones de Hg en el grano de arroz.	105
Anexo 22: Valores medios de porcentajes de germinación e índice de velocidad de germinación de las variedades Fedearroz 67 y Fedearroz 68 en función a las concentraciones de Hg en el grano de arroz.	106
Anexo 23: Requerimientos nutricionales para cada variedad de arroz para producir 6 ton/ha.....	106
Anexo 24: Valores promedios de altura de las cuatro variedades de arroz comercial en función a las concentraciones de Hg en el suelo.....	107
Anexo 25: Valores promedios de macollamiento de las cuatro variedades de arroz comercial en función a las concentraciones de Hg en el suelo.....	108

RESUMEN

El arroz (*Oryza sativa* L.), es uno de los principales alimentos en el mundo, casi la mitad de la población mundial, depende de este cereal como parte importante de su dieta alimenticia. La Sub-región de La Mojana participa con un 69% del aéreo total sembrada de la zona del Bajo Cauca, lo que indica el gran potencial agrícola que tiene el cultivo de arroz en esta Sub-región, de ahí la gran importancia socioeconómica que tienen todos los municipios que la conforman. Los metales pesados entre ellos el mercurio (Hg) se ha convertido en un problema actual tanto en el campo ambiental derivada de la contaminación de los suelos por la minería, como en la salud pública, debido a que este metal es persistente y son acumulados por las plantas ingresando a la cadena trófica causando enfermedades en el sistema nervioso de los humanos.

El objetivo de este trabajo fue evaluar la absorción de Hg con diferentes concentraciones en cuatro variedades de arroz sembradas en suelos de La Mojana. El experimento se estableció en una casa malla localizada en la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad de Córdoba en los meses de enero hasta septiembre del año 2018, en el cual se evaluó cuatro variedades comerciales de arroz y dos texturas de suelo con seis concentraciones de mercurio (Testigo, 500, 1.000, 2.500, 5.000, 10.000 $\mu\text{g Hg/kg}$), donde el suelo de textura Franco-Arcillo-Limoso se sembró (Fedearroz 67 y Fedearroz 68) y en el suelo Arcillo-Limoso (Fedearroz 2000 y Fedearroz 473), bajo un diseño completamente al azar con un arreglo factorial 2 x 6, con 3 y 4 repeticiones para un total de 36 y 48 unidades experimentales respectivamente. Para el análisis estadístico de la información se empleó un análisis de varianza (ANAVA) y prueba de comparación de medias de Tukey con un 95 % de confianza ($p < 0,05$), utilizando el programa SAS versión 9.4. Los resultados mostraron que las raíces presentaron mayor acumulación de Hg que la parte aérea de la planta, además la acumulación de Hg aumento en cada uno de los órganos en la medida que la concentración de Hg en el suelo aumentaba. En conclusión, las variedades de arroz evaluadas son resistentes a las altas concentraciones de mercurio, concentrándolo principalmente en su raíz y transportándolo en menor proporción al órgano de interés (Grano) de este cultivo.

Palabras claves: Variedad, concentración, arroz, mercurio, suelo.

ABSTRACT

Rice (*Oryza sativa* L.), is one of the main foods in the world, almost half of the world's population, depends on this cereal as an important part of their diet. The Mojana Sub-region participates with 69% of the total area sown in the area of the low Cauca, which indicates the great agricultural potential of rice cultivation in this Sub-region, hence the great socioeconomic importance of all the municipalities that make it up. Heavy metals including mercury (Hg) has become a current problem both in the environmental field derived from the contamination of soils by mining, and in public health, because this metal is persistent and is accumulated by the plants entering the trophic chain causing diseases in the nervous system of humans.

The objective of this work was to evaluate the absorption of Hg with different concentrations in four varieties of rice planted in Mojana soils. The experiment was established in a mesh house located in the Faculty of Agricultural Sciences of the University of Córdoba in the months of January to September of the year 2018, in which four commercial varieties of rice and two soil textures with six concentrations of mercury (control 500. 1,000, 2,500, 5,000, 10,000 $\mu\text{g Hg / kg}$), where the Franco-Arcillo-Limoso textured soil was sown (Fedearroz 67 and Fedearroz 68) and in the Arcillo-Limoso soil (Fedearroz 2000 and Fedearroz 473), under a completely random design with a 2 x 6 factorial arrangement, with 3 and 4 repetitions for a total of 36 and 48 experimental units respectively. For the statistical analysis of the information, an analysis of variance (ANAVA) and comparison test of Tukey means with a 95% confidence ($p < 0.05$) were used, using the SAS program version 9.4. The results showed that the roots showed greater accumulation of Hg than the aerial part of the plant, in addition the accumulation of Hg increased in each of the organs as the concentration of Hg in the soil increased. In conclusion, the rice varieties evaluated are resistant to high concentrations of mercury, concentrating it mainly at its root and transporting it to a lesser extent to the organ of interest (grain) of this crop.

Keywords: Variety, concentration, rice, mercury, soil

INTRODUCCIÓN.

El cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.) es sembrado alrededor de 167 millones de hectáreas a nivel mundial, su producción y su consumo lo convierte en cultivo alimenticio de gran importancia. Casi el 50% de la población mundial, depende del arroz como parte importante de su dieta (Chica et al., 2016). Según el DANE, (2019), la producción de arroz del primer semestre fue de 1.008.081 ton, con una participación de los diferentes departamentos en el total de la producción de arroz mecanizado; Tolima 36,1% (364.302 ton) con la mayor participación, seguido de Huila 13,3% (133.915 ton), Casanare con 10,1% (102.256 ton), Meta 7,8% (78.478 ton), y resto departamentos con 32,6% (329.130 ton).

La Sub-región de La Mojana participa con un 69% del área total de la zona del Bajo cauca, en donde para el primer semestre del 2019 se sembraron 47.276 hectáreas de arroz mecanizado, obteniendo una producción total de 111.604 ton (Fedearroz, 2019). Esta cifra refleja el gran potencial agrícola que tiene el cultivo de arroz en esta Sub-región, de ahí la gran importancia socio- económica que tiene todos los municipios que la conforman, tales como: Nechí (Antioquia); Magangué, San Jacinto del Cauca y Achí (Bolívar); Ayapel (Córdoba) y Guaranda, Majagual, Sucre, Caimito, San Marcos y San Benito Abad (Sucre); esta actividad agrícola es la principal fuente de ingreso, necesaria para satisfacer las necesidades básicas de la población (Fedearroz, 2014).

Por otra parte, en esta Sub-región también se práctica la actividad minera aurífera, específicamente en el municipio de Nechí (Antioquia), a pesar que no es una explotación masiva de oro, es una zona receptora de mercurio debido a las interconexiones que hay entre las corrientes de agua provenientes de las zonas altamente contaminadas. Su principal municipio, San Marcos, está interconectado hídricamente a través del río San Jorge y recepciona arroz para el consumo de sus habitantes de zonas aledañas a sitios de explotación aurífera (Argumedeo et al., 2013). Además, Correa (2017), demostró que para extraer 17 toneladas de oro se generan 48 millones de toneladas de residuos como gravas, arena y arcillas, y se usan 108 toneladas de mercurio arrojados en el suelo de los ríos como ya ha ocurrido en la depresión Momposina, La Mojana y el bajo Magdalena, los cuales presentan niveles leves de mercurio provenientes de los afluentes de los ríos Cauca, San Jorge.

La presencia de mercurio en los ecosistemas, depende de su especiación química; el mercurio (Hg) es posible encontrarlo en el ambiente en sus formas inorgánicas Hg^0 (0) o iónicas Hg_2^{2+} (I) y Hg^{2+} (II) y orgánicas: metilmercurio (CH_3Hg o $MeHg$), dimetilmercurio [$(CH_3)_2Hg$] y fenilmercurio (C_6H_5Hg); sin

embargo, el origen del Hg incluye diferentes fuentes de procedencia, de forma natural (menos común) y principalmente antropogénica (Díaz et al., 2001). Tanto en su forma elemental, como en especies orgánicas e inorgánicas, los compuestos mercuriales son persistentes y bioacumulativos; por tal razón, se convierte en un riesgo para la salud humana y la calidad ambiental, puesto que son acumulados en las plantas, ingresando así a la cadena trófica (Pérez et al., 2014).

Varios trabajos de investigación han demostrado que los metales pesados son poderosos contaminantes del ecosistema, depositándose en el agua, el suelo, incluso en el aire, impactando sobre sus diferentes actores. Particularmente, el mercurio, el cual posee un carácter de presencia acumulativa en los organismos vivos, puede ingresar a distintas cadenas tróficas desde animales acuáticos unicelulares (productores primarios, plancton y algas) (Huguet et al., 2010); las macrófitas acuáticas hiperacumuladoras (Gentès et al., 2013; Rezanian et al., 2015); briófitas que actúan como bioindicadores de contaminación en el aire y el agua (Bargagli, 2016); los sedimentos y el seston, los hongos comestibles que capturan el metal en sus tejidos (Falandysz, 2017); peces que acumulan y biomagnifican el metal (Marrugo et al., 2015); y plantas vasculares que tienen la capacidad de crecer en suelos contaminados y acumular contaminantes en todos sus tejidos los cuales pueden ser fácilmente cosechadas, tales como: *Capsicum annum* L. (Pérez et al., 2014), *Thelypteris hispidula* (Decne) (Correa, 2017), *Allium cepa* L. (Durango et al., 2016), *Solanum melongena* L. (Sierra et al., 2008), *Oryza sativa* L. (Meng et al., 2014;), *Brassica oleracea* L. (Liu et al., 2013).

A causa de esto, al consumir alimentos contaminados o trabajar con este metal como: Los mineros auríferos, odontólogos, personas con amalgamas dentales, entre otros, puede generar déficit en el desarrollo neurológico y de comportamiento, lo que puede incluir daños sutiles en la memoria visual, atención y velocidad en las respuestas visuales, auditivas y psicomotoras, pérdida reversible de la capacidad para distinguir colores, además de inflamaciones severas de la piel, irritación del tracto gastrointestinal y daño hepático severo (Fujimura et al., 2009). Alrededor del 90 % de todo el MeHg presente en los alimentos es absorbido a través del tracto gastrointestinal tanto en el hombre como en los animales (Argumedo et al, 2013).

De acuerdo a lo anterior, esta investigación tuvo como objetivo evaluar que tanto Hg es absorbido por las cuatro variedades comerciales de arroz sembradas en la sub-región de La Mojana con respecto a la concentración de Hg en el suelo, debido a que en esta zona se encuentra una extensa área dedicada al cultivo de arroz expuesta al Hg proveniente de la minería que se labora en el bajo Cauca Antioqueño, además, este cultivo es consumido por las poblaciones locales y

comercializado a las poblaciones cercanas (San Marco, Montería, Sahagún y Magangue), lo que se convierte en un riesgo para la salud de los habitantes de esta Subregión.

1. MARCO TEÓRICO.

1.1 GENERALIDADES DEL CULTIVO DE ARROZ.

1.1.1 Origen, domesticación y dispersión del arroz.

El cultivo del arroz comenzó hace casi 10.000 años, en muchas regiones húmedas de Asia tropical y subtropical. En 1882 propone que el arroz es originario de la India o de Indonesia. En 1926 y 1951 sugiere la teoría de los Centros Dominantes de Genes, considerando que la domesticación del arroz ocurrió en la India. Además, esta teoría está basada sobre el reconocimiento de la gran variabilidad genética, así como la estrecha relación ecológica entre las especies silvestres y cultivadas observadas en la India (Acevedo et al., 2006).

Ho, (1969), propone la posibilidad que la domesticación pudo ocurrir en la china, las evidencias arqueológicas e históricas encontradas apoyan esta propuesta, indicando que el cultivo de arroz ocurrió en China 1.000 años antes que en la India.

Los estudios recientes sobre el origen y la domesticación del arroz, señalan a la región del Himalaya y suroeste de la China, como Centros de Diversificación y Domesticación de la especie *Oryza sativa*. Esto está apoyado por la presencia y conservación de la variación genética existente en la zona, debido a la diseminación de cruzamientos y aislamiento de dichas condiciones ambientales (Acevedo et al., 2006).

Las rutas de dispersión del arroz en el mundo son presentadas en la, iniciándose del sureste asiático (India) para la China 3000 años antes de Cristo (AC). De allí fue para Corea y posteriormente para el Japón, en el siglo I AC. También de la India fue llevado para las islas del Océano Indico, principalmente Indonesia y Sri Lanka en la misma fecha. Generalmente los cultivos domesticados en el Oriente del Asia fueron difundidos al Occidente en épocas relativamente recientes (Acevedo et al., 2006).

Los comerciantes árabes fueron los primeros en traer el arroz del este de Asia para el Medio Oriente, cerca del siglo IX AC. Simultáneamente en esta época fue llevado para Egipto y otros países del África, donde sólo se cultivaba *Oryza glaberrima*. La introducción del arroz al Occidente ocurrió aproximadamente 320

AC, mientras que en América ocurrió en época poscolombina, siendo traído por los colonizadores españoles, portugueses y holandeses (Acevedo et al., 2006). De las especies cultivadas, *Oryza sativa* es la de mayor importancia económica, ya que es cultivada ampliamente en todo el mundo, incluyendo Asia, América del Norte y Sur, Unión Europea, Oceanía y centro – este de África. La otra especie cultivada, *Oryza glaberrima*, se cultiva solamente en el oeste de los países africanos (Degovanni et al., 2010).

La especie *O. sativa*, presenta mayor diversidad genética encontrándose hasta tres subespecies, las cuales son clasificadas basadas en su ecología y morfología en: Indica, Japónicas y Javánicas; mientras que en *O. glaberrima*, tal tendencia no fue encontrada. La subespecie Indica está distribuida en los trópicos y subtrópicos, la Javánica se cultiva en Indonesia, siendo también conocida como Japónica tropical, mientras que la Japónica, se encuentra distribuida en zonas no tropicales (Templadas), sin embargo, existe sobreposición de caracteres entre esos tipos (Franquet y Borrás, 2004).

1.1.2 Producción de arroz.

Según Méndez, (2019), la FAO indicó que la producción mundial en 2018 se estableció a 774,3 millones de toneladas de arroz cáscara (514,1 millones de toneladas arroz blanco), en alza de 1,6% en comparación a 2017. Este incremento se debe a mejores condiciones climáticas en el hemisferio norte y a precios más atractivos.

Por otra parte, la producción nacional de arroz mecanizado, en el primer semestre del 2019 fue de 1.008.081 toneladas; disminuyó 1,2% con respecto al volumen reportado en el primer semestre de 2018, cuando fue de 1.020.738 toneladas. En tres de los principales departamentos arroceros la producción aumentó; Huila (13,9%), Meta (10,1%) y Casanare (9,9%). En el departamento de Tolima la producción cayó 6,9 % y también en Resto de departamentos 5,3% (DANE, 2019).

En ese mismo semestre se registró un aumento en el rendimiento en los principales departamentos arroceros del país. Los mayores rendimientos se registraron en el departamento de Huila 7,4 t/ha, Tolima 7,1 t/a, y Casanare 6,0 t/ha. El rendimiento alcanzado por Resto Departamentos fue 5,0 t/ha (DANE, 2019).

1.1.3 Clasificación taxonómica.

Según Degovanni et al, 2010, su descripción taxonómica es la siguiente:

Planta: Fanerógama
Tipo: Espermatofitas
Subtipo: Angiospermas
Clase: Monocotiledóneas
Orden: Glumifloras
Familia: Gramíneas
Subfamilia: Panicoideas
Tribu: Oryzae
Subtribu: Oryzíneas
Género: *Oryza*
Especie: *Oryza sativa* L.

1.1.4 Morfología.

El arroz es una gramínea anual, de tallos redondos y huecos compuestos por nudos y entrenudos, hojas de lámina plana unidas al tallo por la vaina y su inflorescencia es en panícula. El tamaño de la planta varía de 0.4 m (variedades enanas) hasta más de 7.0 m (variedad flotante). La planta puede ser dividida en dos tipos de órganos: a) vegetativos (raíces, tallos y hojas) y reproductivos (inflorescencia y semillas) (CIAT, 2005).

1.1.4.1 Raíces: Durante su desarrollo, la planta de arroz emite dos clases de raíces, las seminales (o temporales) y las adventicias (o permanentes). Se denominan también primarias y secundarias, respectivamente. Las raíces seminales son poco ramificadas, viven un corto tiempo después de la germinación, y son reemplazadas por las raíces adventicias.

Las raíces adventicias brotan de los nudos subterráneos de los tallos jóvenes; en el arroz flotante brotan de los nudos del tallo que está sumergido en el agua y, en algunos casos, también de los nudos aéreos. En los primeros estadios de su crecimiento, son blancas, poco ramificadas y relativamente gruesas; en la medida en que la planta crece, las raíces se alargan, se adelgazan, se vuelven flácidas y se ramifican en abundancia.

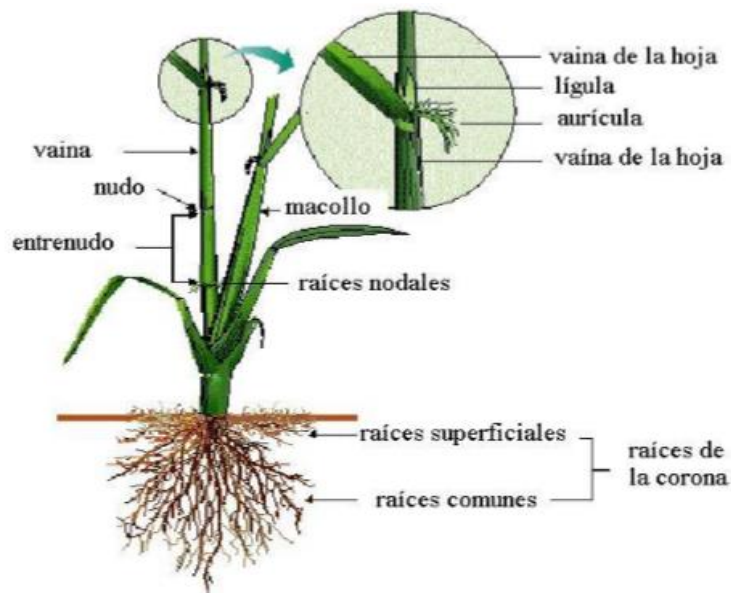
Cuando ya están maduras, las raíces adventicias son fibrosas, emiten raíces secundarias y éstas producen pelos radicales. Las puntas de las raíces están protegidas por una masa de células semejante a un dedal, llamada coleoriza; su función es facilitar la penetración de la raíz en el suelo (Degovanni et al., 2010).

1.1.4.2 Tallo: El tallo del arroz consta de una sucesión alterna de nudos y entrenudos. En cada nudo (o región nodal) se forman una hoja y una yema; esta última puede desarrollarse dando lugar a un hijo o macolla. De la yema que se encuentra en el nudo que da origen a la hoja principal, justo entre el nudo y la base de la vaina de dicha hoja, se forma la macolla característica de la especie *Oryza sativa*.

Los hijos primarios emergen sucesivamente del primero, del segundo y de los demás nudos que siguen al nudo principal del tallo antes descrito. Los hijos secundarios nacen del segundo nudo de cada hijo primario, y los hijos terciarios del segundo nudo de cada hijo secundario (Degovanni et al., 2010).

1.1.4.3 Hojas: Las hojas de la planta de arroz se distribuyen en forma alterna a un lado y a otro a lo largo del tallo. La primera hoja que aparezca en un nudo basal del tallo principal o de los hijos se denomina prófalo, el cual no tiene lámina y está constituido por dos brácteas aquilladas. Los bordes del prófalo se adhieren al dorso de los hijos jóvenes para asegurarlos al tallo. En cada nudo, con excepción del nudo de la panícula, se desarrolla una hoja. La última hoja que nace en el tallo se encuentra debajo de la panícula, y es conocida como la hoja bandera (Degovanni et al., 2010).

Figura 1: Estructura vegetativa del arroz.



Fuente: (Olmos, 2007).

1.1.4.4 Panícula: Las flores de la planta de arroz están reunidas en una inflorescencia compuesta denominada panícula. En la panícula se consideran el raquis o eje principal, las ramificaciones primaria y secundaria del raquis, las espiguillas, las flores (florechillas) y las semillas.

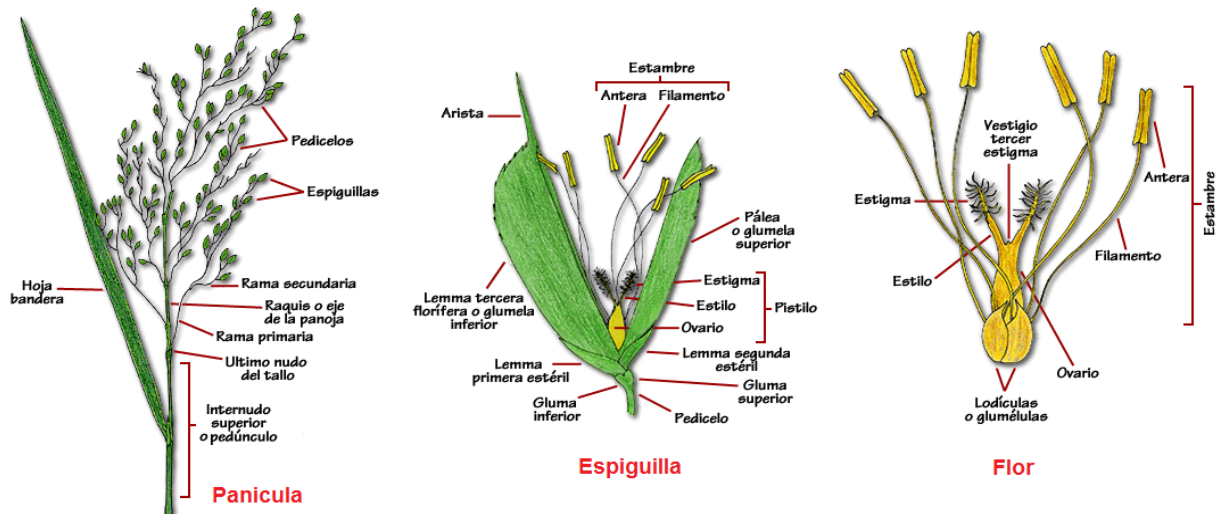
La panícula está situada sobre el nudo apical del tallo, llamado nudo ciliar o base de la panícula, y tiene generalmente la forma de un arco. En el nudo ciliar no se forma hoja ni yema de hijo, pero en él puede originarse la primera ramificación de la panícula y, según el caso, otras tres ramificaciones. Este nudo se toma como punto de referencia para medir la longitud del tallo y de la panícula. El entrenudo superior del tallo, en cuyo extremo se encuentra la panícula, se denomina pedúnculo (Degovanni et al., 2010).

1.1.4.5 Espiguilla: Es la unidad de la inflorescencia, está unida a la ramificación por el pedicelo. Las espiguillas del género *Oryza* contienen tres flores o florecillas, de las cuales una sola se desarrolla y es fértil. Una espiguilla consta de la raquilla, las florecillas y dos lemmas estériles. Las lemmas estériles, llamadas glumas rudimentarias, son dos brácteas que se alargan desde el pedicelo. La raquilla es el eje que sostiene la florecilla; las lemmas estériles rodean la raquilla por debajo.

En la espiguilla se encuentran además dos brácteas superiores, llamadas glumas florales o simplemente glumas, estas brácteas más adelante harán parte, de la cascara de la semilla. Cuando las espiguillas maduran, las glumas fértiles (o sea, la lemma y la pálea) exhiben diferentes colores, según la variedad de arroz (Degovanni et al., 2010).

1.1.4.6 Flor: Está compuesta de seis estambres y un pistilo. Los estambres son filamentos delgados que sostienen las anteras; éstas son alargadas y bífidas y contienen los granos de polen. En el pistilo se distinguen el ovario, el estilo y el estigma. El ovario es de cavidad simple y contiene un solo óvulo. El estilo es corto y termina en un doble estigma plumoso. El estigma presenta diferentes colores, según la variedad de arroz: puede ser blanco, verde pálido, amarillo, púrpura pálido o púrpura (Degovanni et al., 2010).

Figura 2: Estructuras reproductivas de la planta de arroz.



Fuente: (CIAT, 2005)

1.1.4.7 Semilla: Corresponde a un ovario maduro, seco e indehiscente, que consta de las siguientes partes:

- La cáscara, conformada por la lemma, la pálea y las partes asociadas a estas dos estructuras.

- Las lemmas estériles, la raquilla, la arista y el embrión, que está situado en el lado ventral de la semilla, cerca de la lemma.
- El endospermo, que provee alimento al embrión durante la germinación.

El grano de arroz descascarado es una cariósipide que aún conserva el pericarpio, y se conoce por ello como arroz integral. El pericarpio puede ser blanco, marrón pálido, rojo, púrpura suave o púrpura intenso. Debajo de la lemma y la pálea se encuentra el pericarpio, que está formado por tres capas de células fibrosas muy duras (endocarpio, mesocarpio y exocarpio). Inmediatamente debajo del pericarpio encontramos dos capas ricas en proteína, que son el tegumento y la aleurona (Degovanni et al., 2010).

1.1.5 Crecimiento y desarrollo.

El crecimiento de la planta de arroz es un proceso fisiológico continuo que se extiende, completando un ciclo, desde la germinación de la semilla hasta la maduración del grano. La planta comienza como una célula única, el cigoto, que crece y se desarrolla hasta llegar a ser un organismo multicelular (Jarma et al., 2010).

1.1.5.1 Fases de crecimiento.

1. Fase vegetativa. Empieza con la germinación de la semilla y termina en la iniciación de la panícula. En esta fase comprende tres etapas de desarrollo:

- **De la germinación a la emergencia:** Esta etapa va de la siembra a la aparición de la primera hoja a través del coleóptilo. El proceso demora entre 4 a 10 días, lo que depende de la temperatura del suelo, de la humedad del medio, y de la profundidad a que este la semilla (Jarma et al., 2010).
- **Estado de plántula y desarrollo de las hojas:** Esta etapa va desde la emergencia hasta justo antes de que la plántula empiece a macollar. Puede demorar 15 días. Al final de esta etapa se hace visible la quinta hoja a los 20 DDE (Jarma et al., 2010).

- **Macollamiento:** Comienza con la aparición del primer hijo o macolla y termina cuando la planta desarrolla un número máximo de hijos. En los materiales tempranos, a los 50 DDE, se observa el cuarto hijo primario y el cuarto hijo secundario. En las variedades medianamente tempranas se observan seis hijos primarios, seis hijos secundarios y tres hijos terciarios a los 60 DDE (Jarma et al., 2010).

2. Fase reproductiva: Empieza en la iniciación de la panícula y termina en el inicio de la floración, en esta fase se distingue cuatro etapas de desarrollo:

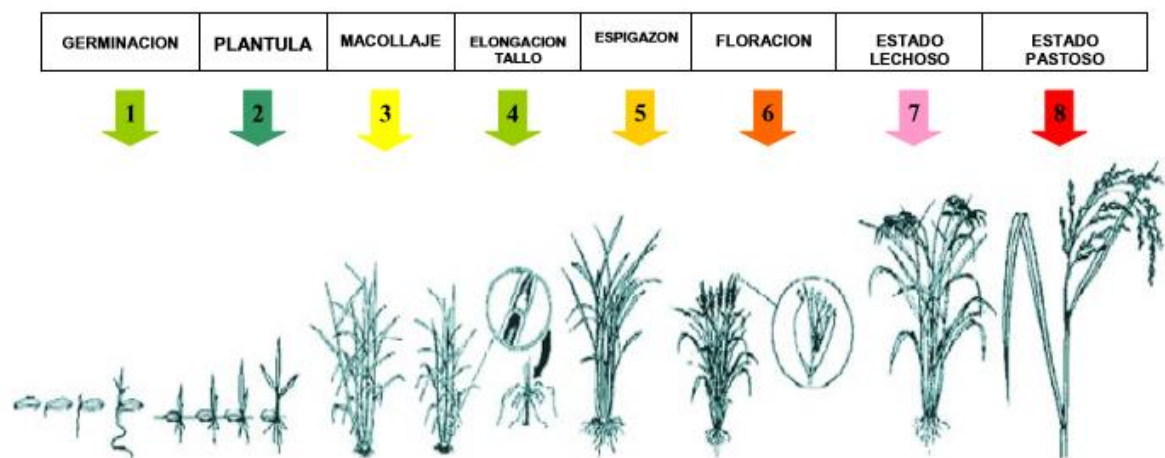
- **Elongación del tallo:** Empieza cuando el cuarto entrenudo del tallo principal, situado debajo de la panícula, comienza a hacerse notorio por su longitud, y termina cuando ese entrenudo está totalmente elongado (o cuando empieza la siguiente etapa) (Jarma et al., 2010).
- **Embuchamiento:** Esta etapa empieza cuando la panícula ya diferenciada es visible, y termina cuando el extremo de las florecillas está justamente debajo del cuello de la hoja bandera (Jarma et al., 2010).
- **Floración:** Esta etapa comienza cuando la panícula sale de la vaina de la hoja bandera. Se completa la antesis en toda la panícula, proceso que tarda de 4 a 7 días. Pero el arroz trasplantado emplea hasta 10 días para completar la floración y la fecundación de todas las florecillas, porque las plantas desarrollan un número de macollas mayor que las del arroz de siembra directa (Jarma et al., 2010).
- **Polinización y antesis:** En esta etapa, las anteras empiezan a derramar el polen y éste inicia la fecundación de las espiguillas, una vez depositado en los estigmas. Al finalizar esta etapa todas las espiguillas están polinizadas (Jarma et al., 2010).

3. Fase de madurez fisiológica: Empieza en el inicio de la floración y termina en la madurez fisiológica del grano. Esta fase comprende tres fases de desarrollo:

- **Grano lechoso:** Esta etapa va del inicio de la antesis y la fecundación del ovario hasta que el contenido de los granos sea un líquido lechoso blanco. Los granos toman un color verde. Esto tarda de 7 a 10 días (Jarma et al., 2010).

- **Grano pastoso:** En esta etapa, el contenido del grano empieza como un líquido lechoso blanco, y su consistencia se hace gradualmente pastosa suave, hasta que el grano se endurece. El color de la pasta se torna amarillo verdoso. Demora de 10 a 15 días (Jarma et al., 2010).
- **Madurez fisiológica:** Cuando el arroz se ha plantado en el trópico cálido, la planta llega a esta madurez aproximadamente 30 días después de la floración. En esta etapa los granos toman un color amarillo pajizo. (Jarma et al., 2010).

Figura 3: Crecimiento y desarrollo de la planta de arroz.



Fuente: (Olmos, 2007).

1.1.6 Requerimientos edafoclimáticos del cultivo.

Es un cultivo especial de las zonas tropicales y subtropicales, aunque la mayor producción a nivel mundial se concentra en los climas húmedos tropicales, pero también se puede cultivar en las regiones húmedas de los subtrópicos y en climas templados (Franquet y Borrás, 2004). Este cultivo florece en diversas condiciones ambientales entre los 45° de latitud norte a los 40° de latitud sur y se cultiva desde el nivel del mar hasta los 2.500 metros de altitud, una extensión que le permite crecer en áreas donde la temperatura, la longitud del día y la disponibilidad del agua son muy diversas (Vargas, 2010).

Esta especie necesita para germinar un mínimo de 10 a 13°C, considerándose su óptimo entre 30 y 35°C. Por encima del 40°C no se produce la germinación. El crecimiento del tallo, hojas y raíces tiene un mínimo exigible de 7°C, considerándose su óptimo en los 23°C. Con temperaturas superiores a ésta, las plantas crecen más rápidamente, pero los tejidos se hacen demasiado blandos e inconsistentes, siendo más susceptibles a los ataques de enfermedades. El espigado está influido por la temperatura y por la disminución de la duración de los días. El mínimo de temperatura para florecer se considera de 15°C. El óptimo de 30°C. Por encima del 50°C no se produce la floración (Valero, 2019).

Los suelos en que puede desarrollarse el arroz son tan variados, como el rango de climas, al cual se puede exponer el cultivo. La textura varía de arenosa a arcillosa; con extremos de pH entre 3.0 a 10.0, sin embargo, se desarrolla mejor cuando la acidez no baja de 5.0 ni sobrepasa el pH 6.5. El contenido de materia orgánica puede estar entre 1 al 50%; las concentraciones de sal de 0 y 1%. El arroz tolera bastante la salinidad, permitiendo buenas producciones en suelos salinos (Vargas, 2010; CENTA, 2018).

El arroz se cultiva no solo con sistemas de riego, sino en zonas bajas con altas precipitación, en láminas de agua profunda y en condiciones de secano (lluvia estacional y suelo bien drenado). En las tierras bajas, las plantas de arroz están expuestas a daños debidos a la sumersión en los sistemas de inundación; en las zonas altas, en cambio, pueden sufrir los efectos de la sequía, que se presenta con frecuencia (Vargas, 2010).

1.2 MERCURIO (Hg).

El mercurio (Hg) es un metal pesado que a temperatura ambiente se encuentra en fase líquida, presentando un aspecto plateado, brillante y sin olor. Además, es un metal noble, soluble únicamente en soluciones oxidantes. Posee gran capacidad de amalgamar a casi todos los metales. Se evapora a 13°C y encontramos trazas de él en cualquier producto que se analice. No es esencial para ningún proceso biológico, pero se acumula en la mayoría de seres vivos. En la naturaleza existe como sulfuros de mercurio (Cinabrio, rojo), de arsénico (Rejalgar), hierro (Piritas), mixto (Metacinabrio, negro), de antimonio (Estibina), pero también se le haya directamente unido a minerales de zinc (Zn), cobre (Cu), oro (Au) y plomo (Pb) (Ramírez, 2008).

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 nuestro medio son muy altos (López et al., 2014).

Este elemento estable y residual de difícil biodegradación; además, tiene la propiedad de penetrar en las cadenas tróficas y producir bio-acumulación y bio-magnificación. 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 (López et al., 2014).

1.2.1 Toxicidad del mercurio.

La toxicidad del mercurio depende de su forma química y, por lo tanto, su sintomatología varía según se trate de exposición al mercurio elemental, a los compuestos inorgánicos de mercurio, o a los compuestos orgánicos de mercurio (En particular sales de metilmercurio y etilmercurio, y el dimetilmercurio). En cuanto a las fuentes de exposición, los compuestos de alquilmercurio, de los cuales el metilmercurio es, con mucho, el más importante, la fuente de exposición más significativa es la dieta, particularmente a base de pescados y mariscos. En el caso del vapor de mercurio elemental, la fuente más importante para la población en general son las amalgamas dentales, pero a veces la exposición en el ambiente de trabajo puede ser más significativa. En lo que respecta a los compuestos inorgánicos de mercurio, los alimentos constituyen la fuente más importante para la mayoría de la gente. Sin embargo, para ciertos segmentos de la población, el uso de cremas y jabones a base de mercurio para aclarar la piel, y el uso de mercurio con propósitos culturales/rituales o en medicina tradicional, también puede conducir a la exposición a mercurio inorgánico o elemental (Núñez, 2017).

1.2.2 Usos del mercurio.

En cuanto a los usos industriales del mercurio, 'el metálico' se utiliza para la fabricación de termómetros, barómetros, termostatos, trompas de vacío, formación de amalgamas de plata y zinc en odontología, tubos fluorescentes, lámparas de mercurio y rectificadores de arco de mercurio, interruptores y conmutadores automáticos para los refrigeradores, medidores directos de corriente, extracción de oro y plata por formación de amalgama; como 'cátodo' en la producción electrolítica de sodio y cloro (Método Castner - Keller) y como 'materia prima' para la síntesis de sus compuestos (Químicos, 2002).

El mercurio es un buen solvente para algunos metales, y estas soluciones reciben el nombre de 'amalgamas'. La amalgama con el estaño se empleó en la antigüedad para fabricar espejos; la amalgama efectuada con el oro se utiliza todavía en los botones de latón dorado y la amalgama con plata y estaño se usa para los empastes dentarios (Químicos, 2002).

El cloruro de mercurio o sublimado corrosivo precipita proteínas y se usa como conservante de tejidos y catalizador químico. El cloruro mercurioso o calomel se usa en terapéutica dermatológica como mercurio amoniacado antiséptico y antipsoriásico. El óxido rojo de mercurio se emplea en la fabricación de las pinturas antiincrustantes que se aplican en los cascos de los barcos. Los óxidos sirven tanto para hacer baterías secas de larga duración como para producir antisépticos (Químicos, 2002).

El acetato de mercurio (Alquil) se usa en el tratamiento de granos y simientes, como plaguicida en árboles frutales y como absorbente del etileno. Los fenilmercúricos se utilizan en agricultura como antisépticos para el tratamiento de la madera y los granos. El benzoato de mercurio se utilizó como antisifilítico. El mercurrocromo, el mercurofén, el timerfonato sódico y el timerosal son fármacos antisépticos (Químicos, 2002).

Las ocupaciones en las que existe riesgo por la exposición del mercurio metálico son: La minería del mercurio; la obtención del metal a partir del mineral; la separación del oro y de la plata de sus menas por medio de una amalgama mercurial; la fabricación de termómetros y barómetros y de contadores directos de corriente eléctrica, lámparas eléctricas y válvulas de radio; la producción de hilo y varillas de tungsteno molibdeno; el dorado a fuego por medio de una amalgama de oro y mercurio; la fabricación de compuestos farmacéuticos e instrumentos quirúrgicos que contienen sales de mercurio; la tinción de cristales ópticos y grabados fotográficos; el encurtido del cuero y la manufactura de sombreros de fieltro; la identificación de huellas dactilares mediante el empleo de un polvo de mercurio y yeso y el relleno de cavidades dentarias con amalgamas (Sepúlveda et al., 2006).

En el siguiente cuadro se pueden apreciar los porcentajes de consumo promedio de mercurio en el grupo de países llamados 'industrializados', los cuales, de alguna manera, denotan la dimensión de los riesgos, de acuerdo con cada que hacer industrial:

Tabla 1: Consumo promedio de mercurio en el grupo de países llamados 'industrializados', expresado en porcentaje.

CONSUMO DE MERCURIO	%
Plantas de compuestos alcalinos de cloro	25
Equipo eléctrico	20
Usos militares	20
Pintura	15
Sistemas de medición y control	10
Agricultura	5
Odontología	3
Laboratorios	2

Fuente: (Sepúlveda et al., 2006).

1.2.3 Afecciones de la salud por 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 2.000 a 3.000 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 (Arenas y Hernández, 2015).

Según Uryu et al., (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.

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”, contando con el agravante que una gran parte de los infectados murieron (Arenas y Hernández, 2015).

1.2.4 Enfermedades más comunes producidas por el mercurio.

1.2.4.1 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, pérdidas en las funciones motoras y de la concentración y déficit en el desempeño visual-espacial” (Arenas y Hernández, 2015).

1.2.4.2 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).

1.2.4.3 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 (Arenas y Hernández, 2015).

1.2.4.4 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).

1.2.4.5. 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. 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 (Arenas y Hernández, 2015).

1.2.5 Mercurio en el suelo.

Una vez depositadas en el suelo, las especies de Hg están sujetas a un amplio abanico de reacciones químicas y biológicas. Las condiciones del suelo (pH, temperatura, contenido en ácido húmico, etc.) son normalmente favorables para la formación de compuestos inorgánicos de Hg como HgCl_2 , $\text{Hg}(\text{OH})_2$ y compuestos inorgánicos de Hg complejados con aniones orgánicos. Sin embargo, no está todavía claro si el Hg en sedimentos se encuentra en forma de HgCl_2 o $\text{Hg}(\text{OH})_2$ cuando se encuentra complejado por sustancias orgánicas, o bien en las formas menos reactivas de HgS o HgO (Con una menor tendencia a la metilación que las anteriores). Aunque algunos compuestos inorgánicos de Hg son bastante solubles (Y, en consecuencia, móviles), suelen formar complejos con la materia orgánica (Sobre todo con los ácidos fúlvicos y húmicos) y arcillas de los suelos. Este comportamiento limita en gran medida la movilidad del mercurio en los suelos, haciendo que éstos actúen como grandes reservas de mercurio antropogénico (Gaona, 2004).

Una parte del Hg puede ser adsorbido por ligandos orgánicos solubles u otras formas de carbono orgánico disuelto facilitando la partición del mercurio hacia la fase acuosa. Otra especie de mercurio presente en proporciones muy pequeñas en suelos y sedimentos, pero de gran importancia debido a su toxicidad y capacidad para la bio-acumulación, es el metilmercurio; su formación viene dada principalmente por varios procesos microbianos actuando sobre compuestos de Hg y su proporción media respecto al total de mercurio presente en suelos y sedimentos suele ser inferior al 1%. Como en el caso de las especies de Hg, el metilmercurio presenta una gran afinidad por la materia orgánica, hecho limita su movilidad en el medio ambiente (Gaona, 2004).

1.2.6 Biodisponibilidad del mercurio (Hg) en el suelo.

La biodisponibilidad se refiere a la proporción de un elemento que está disponible para los organismos vivos y define la relación entre la concentración del elemento

en el medio ambiente terrestre y el nivel "introducido en" o en el organismo (Naidu et al., 2008). La biodisponibilidad es, por lo tanto, específica para cada especie, dado que la dosis que llega a un órgano o tejido y desencadena una respuesta biológica puede variar entre los receptores (Stokes et al., 2005). Los suelos juegan un papel importante en la potencial biodisponibilidad de los contaminantes, ya que, en ellos, los metales pesados, o EPTs, además de presentarse en formas diferentes, se asocian con componentes muy heterogéneos, tales como la materia orgánica y la fracción arcilla (Cerqueira et al., 2012; Yan et al., 2017), cuyos contenidos son muy distintos entre diferentes suelos.

El término "bio-disponibilidad" se utiliza normalmente como indicador clave del riesgo potencial que los productos químicos poseen sobre el medio ambiente y la salud humana (Naidu et al., 2008). La fracción biodisponible de contaminantes del suelo es la más importante desde el punto de vista ecológico o toxicológico y aporta indicaciones para pautas regulatorias basadas en la evaluación de riesgos, así como para la mejora de la seguridad alimentaria. Es en esta fracción disponible, en la que se encuentran las concentraciones de contaminantes que causan toxicidad para los organismos vivos y está estrechamente relacionada con la concentración en la disolución del suelo y con su capacidad para realimentarse en esta fracción con metal procedente de la fase sólida (Lago, 2018).

1.2.6.1 Factores que influyen en la movilidad/biodisponibilidad del Hg en el suelo.

El Hg se acumula en mayor medida, en los primeros centímetros del suelo, las concentraciones suelen disminuir según se avanza en profundidad. Esto se debe a que la disponibilidad del Hg no solo depende de su especiación química sino también de las propiedades del suelo particularmente el pH, potencial redox y contenido en coloides del suelo (Caiza, 2018).

- **pH:** En medios ácidos, la proporción de metales pesados en la solución del suelo es más alta, generalmente en forma de cationes, que son biodisponibles. A un pH bajo, hay menos grupos hidroxilos con los que coordinarse, quedando reducida la posibilidad de formar precipitados. Hasta $\text{pH} < 2$ predomina la forma Hg^{2+} , con valores de pH entre 2 y 4,5 la especie dominante es HgOH^+ y a partir de 4,5 la especie $\text{Hg}(\text{OH})_2$ se vuelve dominante (Caiza, 2018).
- **El potencial redox:** En condiciones naturales de potencial redox y pH, la solubilidad del mercurio esta principalmente determinada por las especies Hg

(OH)₂, Hg⁰ y HgS. En condiciones moderadas de oxidación por encima de pH 5, la especie dominante del mercurio es el Hg⁰. Si nos encontramos ante condiciones reductoras el Hg puede precipitar como HgS, que presenta una solubilidad muy baja, sin embargo, en condiciones de reducción fuertes, su solubilidad aumenta por conversión del Hg²⁺ a Hg⁰ o a HgS⁻² si el pH es elevado. Condiciones reductoras son óptimas para la formación de metilmercurio, y condiciones aeróbicas para la pérdida de metilmercurio del suelo (López et al., 2014).

- **Coloides del suelo (arcilla - materia orgánica):** El tipo de suelo va a ser un factor fundamental a la hora de determinar el comportamiento del mercurio. Por lo general, el mercurio se acumula en los horizontes superficiales del suelo. De manera que su concentración disminuye poco a poco en los primeros 20 cm del suelo, para luego estabilizarse en la profundidad. La concentración de mercurio en solución presente en un suelo está controlada por las reacciones de adsorción-desorción con la materia orgánica y los minerales de éste, reduciendo las pérdidas de mercurio del suelo por volatilización. Sin embargo, las precipitaciones ocasionan una disminución de la concentración de mercurio en la capa orgánica superficial y un aumento en las capas más profundas, como resultado de procesos de lixiviación (López et al., 2010). Sin embargo, la formación de complejos entre el mercurio y la materia orgánica, reduce la movilidad del metal (Dunham et al., 2015). A pH < 4 el mayor adsorbente para el Hg es la materia orgánica, mientras que a pH > 5.5 los mejores adsorbentes son los óxidos de hierro y los minerales de arcilla ya que la materia orgánica se satura con Ca²⁺ (Caiza, 2018).

1.2.7 Mercurio en las plantas.

Las plantas vasculares como las hortalizas de hoja pueden acumular mercurio mediante las raíces, estomas y adsorción foliar. La acumulación y toxicidad del mercurio es mucho más baja en los ecosistemas terrestres que en los acuáticos. Esto es debido a que en el suelo hay diversos agentes que pueden contribuir a su inmovilización. Por una parte, el mercurio puede ser secuestrado por los componentes del propio suelo, pero por otra también puede ser inmovilizado por los microorganismos edáficos o extraído por los sistemas radicales de las plantas y transferidos al interior de las mismas. La transferencia del mercurio a la planta a través de las raíces es muy lenta y no depende de la concentración del mercurio total presente, si no de cantidad de mercurio fácilmente disponible (López et al., 2014).

Cada especie vegetal presenta unas características propias que van a determinar su interacción con el suelo y su capacidad de supervivencia en unas determinadas condiciones ambientales. Para que tenga lugar la transferencia de los metales pesados presentes en el suelo, es necesario que la planta sea capaz de absorber el metal. Exceptuando aquellos elementos que participan en intercambios gaseosos (CO_2 , H_2O), el resto se absorbe principalmente por la raíz, junto con el agua, en forma de cationes o aniones (López et al., 2014).

El potencial fitoextractor de un vegetal no sólo depende de su capacidad fijadora del metal pesado relativo a su masa, sino también a la cantidad de biomasa que es capaz de producir durante su vida, así como al ritmo al que lo hace. En general, las plantas hortícolas o herbáceas son de crecimiento más rápido que las especies arbustivas o arbóreas, aunque éstas últimas pueden alcanzar valores elevados de biomasa. Otro factor importante es la resistencia de las distintas especies a la presencia del elemento tóxico en el medio de crecimiento. De modo que, aquellas plantas que sufran menores reducciones de biomasa en respuesta a dosis crecientes de elemento tóxico serán más adecuadas para utilizarse en fitorrecuperación (Esteban, 2008).

Otro concepto importante a tener en cuenta es el denominado factor de bioacumulación (BAF), que expresa la relación entre la concentración de elemento en planta y la concentración de elemento fácilmente disponible en suelo. La existencia de niveles altos de mercurio fácilmente disponible en suelo, pueden resultar fitotóxicos, provocando efectos que pueden ir desde la muerte del ejemplar hasta efectos de carácter subletal (Disminución del crecimiento, senescencia, disminución del contenido de clorofila), de este modo, tanto la fotosíntesis, la transpiración foliar, y la toma de agua se ve reducida ante exposiciones altas de mercurio (López et al., 2014).

1.2.8 Mercurio en el arroz.

El cultivo del arroz constituye el más importante cereal en la dieta alimenticia de la humanidad. En Colombia es el segundo cultivo en importancia después del café, es de alto significado para la economía agrícola del país, y uno de los alimentos básicos de la dieta en muchas partes del mundo por su alto valor calorífico y proteico. El desarrollo de una planta de arroz es notoriamente sensible a la temperatura. Uno de los factores que puede afectar el crecimiento de la planta de arroz es la temperatura, puede soportar temperaturas mínimas por debajo de 20°C y altas por encima de 30°C . Otro factor importante es la radiación solar, cuyas necesidades para el cultivo del arroz varían con los diferentes estados de desarrollo de la planta. Una baja radiación durante la fase vegetativa afecta muy

ligeramente los rendimientos y sus componentes, mientras que en la fase reproductiva existe una marcada disminución en el número de granos y se reducen drásticamente los rendimientos (Urango et al., 2016).

Recientemente algunos informes han encontrado que las concentraciones de Hg total (THg) en granos de arroz producidos en áreas contaminadas de China han superado el nivel máximo recomendado (20 ng/g) por la Agencia Nacional de Normalización de China. Comparaciones de las concentraciones de MeHg en muestras de arroz 120 ng/g THg y 174 ng/g MeHg en granos de arroz con otros cultivos (Por ejemplo, Maíz, Hortalizas y Tabaco) obtenidas en la misma zona minera, demuestra claramente que sólo el arroz puede asimilar y acumular un alto nivel de metilmercurio en las partes comestibles, debido a esto se puede decir que el consumo de arroz es una vía importante de exposición al metilmercurio para los residentes de zonas contaminadas con este metal (Urango et al., 2016).

El arroz (*Oryza sativa* L.) se ha destacado en la literatura recientemente como una especie de planta bio-acumuladora de metilmercurio (MeHg), la razón de esta bio-acumulación puede estar relacionada con el hecho de que el arroz, a diferencia de otros cultivos de cereales, se cultiva en humedales. Las condiciones biogeoquímicas anaeróbicas asociados proporcionan un ambiente adecuado para la metilación bacteriana de Hg en el suelo donde existe una fuente para el contaminante aumentando la movilización de Hg en la solución del suelo, lo que lleva a una mayor biodisponibilidad de Hg y MeHg a las plantas de arroz. La biodisponibilidad de Hg y MeHg está estrechamente relacionada con el potencial redox del suelo (Eh) y con otros factores (Li et al., 2013).

2. MATERIALES Y MÉTODOS.

2.1 LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO.

El experimento se realizó en una casa malla localizada en la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad de Córdoba en el municipio de Montería ubicada exactamente a 8°47'16" de la latitud Norte y 75°51'28" de longitud Oeste con respecto al meridiano de Greenwich. El experimento se llevó acabo en los meses de Enero hasta Septiembre del 2018. La temperatura media anual de 28°C, precipitación media anual de 1380 mm y humedad relativa de 81% (Palencia et al., 2006).

Figura 4: Casa malla de techo corredizo donde se realizó el experimento.



Todos los análisis y el procesamiento de las muestras, se realizaron en el Laboratorio de Toxicología y Gestión Ambiental, adscrito a la facultad de Ciencias Básicas, y en el Laboratorio de Suelos adscrito a la facultad de Ciencias Agrícolas ambos de la Universidad de Córdoba, Colombia.

2.2 VARIABLES E INDICADORES.

Para el seguimiento del experimento se cuantificó las siguientes variables:

1. Biomasa de raíces, tallos, hojas, granos llenos y cascara de grano.

2. El contenido de mercurio total en las raíces, tallos, hojas, granos pilado y cascara.
3. La disponibilidad de mercurio en el suelo.
4. La tasa de translocación del mercurio desde el suelo hasta la planta.
5. El efecto de las concentraciones de mercurio sobre el porcentaje de germinación e índice de velocidad de germinación de las semillas de las variedades.

2.3 VARIABLES INDEPENDIENTES.

Se emplearon las siguientes variables independientes:

1. Seis concentraciones de Hg en el suelo (Testigo, 500; 1.000; 2.500; 5.000; y 10.000 $\mu\text{g}/\text{kg}^{-1}$ de suelo).
2. Dos texturas de suelo; Arcillo Limoso y Franco Arcillo Limoso.
3. Cuatro variedades comerciales de arroz; Fedearroz 2000 y Fedearroz 473 en un suelo de textura Arcillo Limoso, y Fedearroz 68 y Fedearroz 67 en el Franco Arcillo Limoso; ambos suelos de la Sub-región de La Mojana.

Estas variedades se eligieron por ser las más sembradas comercialmente en la Sub-región de La Mojana, con el fin de que los resultados obtenidos fueran significativos para dicha Sub-región. Sus características se pueden apreciar en la tabla 2.

Tabla 2: Características eco-fisiológicas de las variedades de arroz certificadas por Fedearroz.

Características	Fedearroz 473	Fedearroz 2000	Fedearroz 67	Fedearroz 68
Ciclo de vida (Días)	105	107	112	100
Germinación (%)	90 – 95	90 - 95	90 – 95	90 - 95
Densidad siembra (Kg/ha)	150 – 170	120 - 180	100 – 130	100 - 150
Vigor	Buen vigor inicial	Buen vigor inicial	Buen vigor inicial	Buen vigor inicial
Macollamiento	Alto	Alto	Alto	Intermedio
Volcamiento	Tendencia al vuelco	Tolerante	--	--
Humedad de cosecha (%)	23	23 – 24	22 – 24	22 – 24
Requerimientos Nutricionales	N - P – K	N - P - K	N - P - K Ca - Mg - S	N - P - K Ca - Mg - S
Vaneamiento	Medio o bajo	--	--	--
Sanidad	Respuesta a insectos y enfermedades puede cambiar	Resistente a virus de la hoja blanca; susceptible a <i>Pyricularia grisea</i> , <i>Burkholderia glumae</i> , <i>Rhizoctonia solani</i>	Resistente a virus de la hoja blanca y <i>Pyricularia grisea</i> ; susceptible a <i>Rhizoctonia solani</i>	Resistente a virus de la hoja blanca y <i>Pyricularia grisea</i> ; susceptible a <i>Rhizoctonia solani</i>

Fuente: (Fedearroz, 2020).

Por otra parte, el ensayo se planeó para determinar que tanto Hg podían absorber las variedades de arroz, Fedearroz 2000, Fedearroz 473, Fedearroz 68 y Fedearroz 67 de acuerdo a las seis concentraciones de éste en el suelo (5

obtenidas en el laboratorio dopando el suelo y el testigo de la Sub-región de La Mojana) con el fin de cuantificar como se distribuía el Hg absorbido por la plantas en sus diferentes órganos, raíces, tallos, hojas, grano pilado, cascara del grano. Así como observar el crecimiento y desarrollo de dichas variedades en cada caso.

El uso de las dos texturas de suelo se dio con el ánimo de evitar el efecto de borde del sistema radical de las plantas dentro del balde lo cual hace que el mayor porcentaje de estas se ubiquen en la periferia del sepedón de suelo, ósea entre el sepedón, las paredes y fondo del balde o materia, y con ello poca exploración de las raíces dentro del suelo; condición no deseable para el ensayo y totalmente diferente a la condición del cultivo en el campo.

2.4 VARIABLES DEPENDIENTES.

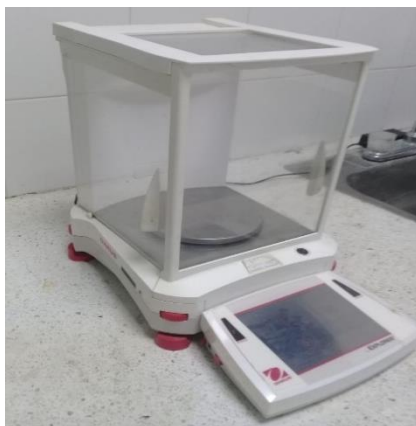
2.4.1 Biomasa (g).

La biomasa de masa seca se determinó al final del ciclo de cosecha, separando raíces, tallos, hojas y granos llenos; cada parte fue pesada empacada en bolsas de papel debidamente marcadas, y metidas inicialmente en un horno de secado por convección a 40°C para evitar que se evaporara el Hg absorbido (Marrugo et al., 2016).

Figura 5: Estufa de secado de biomasa vegetal seca.



Figura 6: Balanza analítica, utilizada para el peso de las muestras.



Paralelamente se tomó una muestra de cada órgano y se sometió a 70°C durante 72 horas (Figura 5), hasta peso constante, al retirarlas se pesaron nuevamente con la misma balanza analítica (Figura 6) y se hicieron los cálculos respectivos para realizar el ajuste de humedad correspondientes al resto de muestras.

2.4.2 Medición de la concentración de mercurio en órganos de la planta.

La determinación de la concentración de Hg en cada órgano se realizó en el laboratorio de Toxicología y gestión ambiental con el Analizador Directo de Mercurio RA-915M (Figura 7) y expresando su resultado en $\mu\text{g}/\text{kg}^{-1}$ de biomasa seca.

Figura 7: Analizador Directo de Mercurio RA-915M del Laboratorio de Toxicología y gestión ambiental.



2.4.2.1 Concentración de mercurio en las raíces. Para extraer las raíces se suspendió el riego 10 días antes de la cosecha para que el suelo se contrajera y sacar fácilmente todo el sepedón de suelo de cada balde, jalando la planta por la base del tallo (Figura 8). Posteriormente con agua a presión regulada con una hidrolavadora se lavó el suelo con el cuidado de no romper las raíces, esto se realizó sobre un tamiz para retener las raíces que se partieran, después se secaron con papel absorbente y se colocaron dentro de bolsas plásticas abiertas para que terminaran de secarse y posteriormente se colocaron en sobres de papel previamente marcados y se llevaron al horno de secado para obtener la biomasa seca. Después de haber obtenido la biomasa se molieron y se tomó 5 gr de la raíz molida por planta para la cuantificación de Hg.

Figura 8: Extracción del sepedón del balde y la separación de raíces del suelo.



2.4.2.2 Concentración de mercurio en los tallos. Después de obtener la biomasa de los tallos para cada planta y repetición, se procedió a moler y se tomó 5 gr de tallos molidos y se llevaron al laboratorio de toxicología para la cuantificación de Hg.

2.4.2.3 Concentración de mercurio en las hojas. Después de obtener la biomasa de las hojas para cada planta y repetición, se procedió a moler y se tomó 5 gr de hojas molidas y se llevaron al laboratorio de toxicología para la cuantificación de Hg.

2.4.2.4 Concentración de mercurio en el grano pilado. Se separó manualmente el grano de la cascara y se macero con la ayuda de un mortero de porcelana, después se tomó 5 gr de grano molido para la cuantificación de Hg.

2.4.3.5 Concentración de mercurio en las cascarras de los granos. Teniendo las cascarras ya separadas se pulverizaron con la ayuda de un mortero de porcelana, luego se tomó 5 gr para la cuantificación de Hg.

2.4.2.6 Concentración de mercurio en el suelo. Después de extraer las raíces del suelo, se dividió el sepedón de suelo contenido en los baldes en mitad superior y mitad inferior; posteriormente se tomó una muestra de cada mitad y se dejó secar al ambiente. Luego se tamizó con tamiz malla # 4 y se tomó muestras para la cuantificación de Hg en todas las unidades experimentales.

2.4.3 Disponibilidad de mercurio en el suelo.

Para determinar la disponibilidad de Hg en el suelo, se realizó en el laboratorio de toxicología y gestión ambiental el siguiente procedimiento: Se pesaron 5 gramos de muestra seca de suelo, luego se adicionaron 40 ml de ácido acético en 0,11 M en agitación durante 16 horas se aforó y se almacenó en frasco de polipropileno a 4°C (Acosta et al., 2002).

2.4.4 Factores de translocación (FT) y bio-acumulación (FB).

Este factor se determinó mediante el cociente entre la concentración del metal en los diferentes órganos de la planta y la concentración del metal en el suelo, es un índice que evalúa la transferencia potencial de un metal del suelo a la planta (Wuana et al., 2011, Kamari et al., 2014, Zhang et al., 2010, Adamo et al., 2014), tal como se establece a continuación en la ecuación 1:

$$FB = \frac{\text{concentración del metal en la planta}}{\text{concentración del metal en el suelo}} \quad (1)$$

El factor de translocación se define como la capacidad de traslocar metales de la raíz a los brotes, tal como se indica a continuación en la ecuación 2 (Kamari et al., 2014):

$$FT = \frac{\text{concentración del metal en la planta}}{\text{concentración del metal en la raíz}} \quad (2)$$

El factor de translocación (FT) cuantifica los mecanismos de defensa de las plantas, las cuales tienden a restringir los contaminantes inorgánicos a las raíces, en un intento de la planta para evitar la translocación de elementos traza a órganos aéreos vitales, especialmente semillas. Normalmente las plantas exhiben un $FT < 1$ cuando están estresadas por los elementos traza. Un $FT > 1$ indica que las plantas toleran el contaminante estudiado, esta es una importante característica de las plantas hiperacumuladoras (Antoniadis et al., 2017).

2.4.5 Prueba de germinación.

2.4.5.1 Porcentaje de germinación.

Para el ensayo de germinación se aplicó el método de Brasil, (2009) con algunas modificaciones ligeras sobre 84 submuestras tomadas al azar de 100 semillas cada una; las variedades Fedearroz 68 y Fedearroz 67 tuvieron tres repeticiones, y las variedades Fedearroz 2000 y Fedearroz 473 cuatros repeticiones de 100 semillas cada una; las cuales fueron colocadas en bandejas que contenían una capa de algodón y se humedecieron con agua destilada sin sobresaturación, en el invernadero donde se tomó la temperatura y la humedad relativa dos veces al día.

Para la evaluación se consideró como semillas germinadas aquellas que presentaban radículas de al menos 2 mm; el conteo de semillas germinadas se llevó acabo por diez días (Brasil, 2009).

2.4.5.2 Índice de velocidad de germinación.

En la determinación del índice de velocidad de germinación se utilizó la fórmula recomendada por Maguire (1962).

$$IVG = \frac{P_1}{T_1} + \frac{P_2}{T_2} + \frac{P_3}{T_3} + + \frac{P_N}{T_N}$$

Dónde:

$P_1, P_2, P_3, \dots, P_N$ = Número de semillas germinadas en el primer, segundo, tercer y último día de conteo de las evaluaciones.

$T_1, T_2, T_3, \dots, T_N$ = Tiempo para cada germinación.

2.5 DISEÑO EXPERIMENTAL.

El experimento se llevó a cabo con cuatro variedades de arroz y dos texturas de suelo con seis concentraciones de mercurio, donde el suelo Franco Arcillo Limoso se trabajó con Fedearroz 67 - Fedearroz 68 y en el suelo Arcillo Limoso Fedearroz 2000 - Fedearroz 473, bajo un diseño completamente al azar con un arreglo factorial 2×6 , con 3 y 4 repeticiones para un total de 36 y 48 unidades experimentales respectivamente; como se muestra en la tabla 2. Para cada ensayo el primer factor corresponde a las variedades de arroz antes mencionadas y el segundo factor son las concentraciones de Hg (Testigo, 500; 1.000; 2.500; 5.000 y 10.000 $\mu\text{g/kg}$ de suelo).

Tabla 3: Montaje del experimento.

ENSAYO 1	ENSAYO 2
Suelo Franco Arcillo Limoso	Suelo Arcillo Limoso
Fedearroz 67; Fedearroz 68	Fedearroz 473; Fedearroz 2000
N° repeticiones 3	N° repeticiones 4
[Hg] en el suelo ($\mu\text{g Hg/kg}$)	
T0 = 86 : T1 = 500 : T2 = 1000 : T3 = 2500 : T4 = 5000 : T6 = 10000	

Cada unidad experimental estuvo constituida por una planta por balde con 18 kg de suelo de La Mojana. Se manejaron 6 tratamientos, un testigo y los cinco restantes se les adiciono mercurio hasta obtener la concentración establecida para cada tratamiento (Tabla 3). Cabe resaltar que el suelo testigo trajo de campo una concentración 86 $\mu\text{g Hg/kg}$.

2.6 PROCEDIMIENTO.

2.6.1 Toma de muestra de suelo.

Para este ensayo, fue necesario recolectar unos 1.700 kg de suelo superficial (0 – 30 cm de profundidad), en la vereda Miraflores finca productora de arroz (Luisa Lora), N 08° 30' 42,6 " y W 074° 48' 32,8" en zona arrocera de San Marcos Subregión de La Mojana; se tomaron submuestras en tres puntos del sitio en mención, y se trasladaron hasta las instalaciones de la Universidad de Córdoba. Para la selección del sitio se tuvo en cuenta la influencia por contaminación de mercurio debido a los aportes que hacen los ríos por la hidrodinámica de la zona. El suelo fue transportado en costales de fibra previamente lavados, mediante un protocolo recomendado por el Laboratorio de Toxicología y Gestión Ambiental.

2.6.2 Pre-tratamiento del suelo.

El suelo proveniente de La Mojana fue secado, pasado por un tamiz No 4, homogenizado para determinar su contenido total de Hg y caracterizar sus propiedades fisicoquímicas. Una fracción del suelo (252 kg) fue humedecido hasta saturarlo (Suelo testigo) para el trasplante de las plantas correspondiente a dicho tratamiento. El valor de la concentración de Hg en el suelo se cuantificó por medición directa empleando el equipo Analizador Directo de Mercurio RA-915M, el valor promedio fue de 86 $\mu\text{g kg}^{-1}$ de Hg.

2.6.3 Dosificación de suelos con Hg.

El resto del suelo se dividió en 5 porciones de 252 kg, a partir de una solución madre de 100.000 mg L⁻¹ de nitrato de mercurio ($\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$), se calculó la cantidad de solución para cada 252 kg de suelo correspondiente a cada tratamiento, la cual se aplicó al suelo previamente extendido sobre un plástico con la ayuda de una bomba de espalda, al tiempo se iba mezclando con una pala para lograr su homogenización (Figura 9). Seguido, se empaco en bolsas plásticas de color negro, usadas en el transporte de silo; luego se guardaron bajo techo a temperatura ambiente 25 - 30°C, por un tiempo de 10 días con el objetivo de incubar y lograr la fijación del Hg en el suelo; posteriormente se tomó una muestra de cada bolsa (Tratamiento) y se determinó la concentración real de Hg a la cual quedó el suelo. Y se ajustó la concentración de Hg donde no era la planeada inicialmente para cada tratamiento.

Al final de este procedimiento, cada tratamiento quedo con las siguientes concentraciones: T0 = 86; T1 = 500; T2 = 1.000; T3 = 2.500; T4 = 5.000; T6 = 10.000 $\mu\text{g Hg/kg}^{-1}$ de suelo

Figura 9: Aplicación de las concentraciones de Hg en el suelo correspondiente a cada tratamiento del experimento.



2.6.4 Selección de la semilla.

Las semillas certificadas de las cuatro variedades de arroz fueron adquiridas en Fedearroz, se hicieron 4 semilleros en bandejas de germinación, a los 5 días después de haber emergido (DDE), se seleccionaron las plantas más vigorosas y se procedió a trasplantar una plántula por balde.

2.6.5 Manejo agronómico del cultivo.

Se interpretó el análisis físico-químico del suelo (Anexo 1) y con los requerimientos de cada variedad, para obtener una producción de 6 ton/ha (Promedio de la zona de La Mojana). Con esto, se realizó un plan de fertilización; las cantidades de cada elemento se calcularon promocionalmente para los 18 kg de suelo contenidos en cada balde; su aplicación se hizo en las etapas 15, 30, 48 y 65 DDE de la forma que se hacen en el cultivo comercial (Tabla 4).

Se usaron los productos comerciales Difosfato de Amonio (DAP), 10 – 30 - 10 (NPK), UREA, Cloruro de Potasio (KCl) y Agrimins, los 4 primeros son fuente de elementos mayores primario (Nitrógeno, Fosforo y Potasio) y el ultimo como fuente

de elementos mayores secundarios (Azufre, Calcio, Magnesio, Sodio); y menores (Cobre, Hierro, zinc, Molibdeno, Boro).

Tabla 4: Plan de fertilización con base a los días después de la siembra.

TIEMPO (DÍAS)	ACTIVIDAD REALIZADA
0	Siembra de las plantas
6-9	Emergencia – trasplante
15	Primera fertilización
30	Segunda fertilización
48	Tercera fertilización
65	Cuarta fertilización
130	Cosecha de la planta

Para el riego del cultivo, dado que las unidades experimentales fueron baldes plásticos sin drenaje, no hubo pérdida por infiltración solo por evapotranspiración. Con el riego se buscaba mantener el suelo entre capacidad de campo y una lámina de 5 cm de altura a fin de evitar estrés hídrico y que las plantas pudieran crecer sin ningún problema, se aplicó riego cada vez que se requirió. El control de malezas se realizó de forma manual, de tal manera que estas no representaran una competencia para el cultivo y no afectaran su desarrollo, las malezas removidas eran regresadas dentro de cada balde colocadas de tal forma que las raíces no se anclaran nuevamente en el suelo; esto con el ánimo de retornar el Hg que hubiesen podido extraer y no incluir un gradiente de variación en el ensayo al extraer más malezas en uno u otro tratamiento.

2.6.6 Monitoreo del cultivo.

El monitoreo del cultivo se realizó cada 2 días, verificando las condiciones fitosanitarias, malezas, humedad etc. También se registró cada 15 días la altura de las plantas y cada 8 días el número de macollas.

2.7 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS.

Los datos fueron tabulados y organizados utilizando los programas Microsoft Excel (Última Versión) y el Software SAS 9.4 (Español). Posteriormente fueron sometidos a una evaluación estadística empleando un análisis de varianza (ANAVA) y prueba de comparación de medias de Tukey con un 95% de confianza ($p < 0,05$).

3. RESULTADOS.

3.1 CONDICIONES AMBIENTALES Y ETAPA INICIAL DEL CULTIVO.

El ensayo se localizó en la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad de Córdoba ubicada exactamente a 8°47'16" de la latitud Norte y 75°51'28" de longitud Oeste con una temperatura media anual de 28°C, precipitación media anual de 1.380 mm y humedad relativa de 81% (Palencia et al., 2006).

El cual se llevó acabo entre 17 de Mayo y el 14 de Septiembre del 2018. Este periodo no coincide con las fechas de siembra establecidas para La Mojana por Fedearroz, las cuales son octubre y febrero donde se obtienen los mejores rendimientos (Saavedra, 2010). El experimento se realizó en un invernadero de techo removible con el fin de evitar de que las fuertes lluvias llenaran los baldes y ocasionaran un lavado del mercurio.

El suelo de textura Arcillo Limosa se le agrego un 10% de arena limpia de rio y se obtuvo el suelo 2 Franco Arcillo Limosa, ver (Anexo 2), lo cual es la única diferencia entre ellos el resto es igual: pH 6,24; materia orgánica 2,42%; azufre 11,2 y fosforo 1,0 mg/kg; calcio 13,2; magnesio 6,9; potasio y sodio 0,12 cemol/kg, CIC 20,3 cemol/kg; cobre 2,5; hierro 16,1; manganeso 49,0 y Boro 0,06 mg/kg: Análisis de suelo (Anexo 1). El valor de pH 6,24 está próximo a la neutralidad, este parámetro influye en la mayor o menor disponibilidad para la planta de cada uno de los nutrientes del suelo, los cuales se presentan en forma de cationes y aniones; esto también influye en la disponibilidad del Hg, los pH ácidos aumentan la posibilidad que el Hg sea más absorbido por la planta (Marrugo et al., 2016). Aunque el suelo en el cultivo de arroz por permanecer inundado el pH tiende a la neutralidad.

El plan de fertilización se hizo de acuerdo a los requerimientos de cada variedad para producir 6 ton/ha (Anexo 23). Sin embargo, a pesar de haber hecho la fertilización completa y basada en los requerimientos exigidos por cada variedad, se observó a los 49 DDE en Fedearroz 67 y Fedearroz 68, y 52 DDE en Fedearroz 2000 y Fedearroz 473, necrosamiento del ápice que se extendió hacia la base de la hoja en todas las plantas de los diferentes tratamientos ([Hg] en el suelo) (Figura 10), lo cual tenía la apariencia de una deficiencia de potasio, pero que fue una leve intoxicación por la absorción de Hg.

Figura 10: Fitotoxicidad causada por la absorción de Hg, provocando amarillamiento seguido de un necrosamiento en los ápices de las hojas.



El efecto fitotóxico de los compuestos mercuriales ha sido reportado en algunas plantas como el trigo, el arroz y otros cereales donde se ha observado necrosis en la punta de las hojas, germinación anormal, disminución del porcentaje de germinación, y reducción de la longitud de tallos y raíces. Cabe destacar que los efectos fitotóxicos afectan también el suelo, dejándolo no apto para el desarrollo de las plantas y destruyendo su biodiversidad (Cavallini et al., 2008).

3.2 MANEJO DE PLAGAS Y ENFERMEDADES.

Se observó ataque de insectos en el cultivo a los 3 DDE provocados por el Gusano Cogollero (*Spodoptera frugiperda*), para el cual se aplicó Rafaga 4 EC (Clorpirifos); también a los 28 DDE se notaron daños causados por Minador del tallo (*Hydrellia spinicornis*), controlados con Requiem 25 EC (Lambda cihalotrina y Tiamethoxam) con una dosis de 1,5 l/ha, la segunda aplicación de Fiprofed 200 SC (Fipronil) 200 g/l en dosis de 0,3 l/ha y mezclado con Amistar top (Azoxystrobin y Difenconazol) 1,5 l/ha este último fue usado para el control a los 35 DDE de *Rizoctonia solani*, para su aplicación se quitó la lámina de agua.

A los 10 DDE hubo afectaciones en una planta de la variedad Fedearroz 68 por el virus que produce el entorchamiento, debido a esto se eliminó la planta y se reemplazó por otra de la misma edad que había sobrado del semillero. Por último, a los 86 DDE se presentaron chinches *Oebalus insularis*, *Tibraca limbativenstris* y *Blissus leucopterus*, fueron manejados con Requiem 25 EC con una dosis 300 ml/ha.

Se encontraron pocos depredadores naturales como *Coleomegilla maculata*; al inicio de la fase de maduración del grano se presentó el ave, palomita tierrera (*Columbina bulgari*) para su control se colocó el techo plástico del invernadero.

3.3 MANEJO DE MALEZAS.

Las malezas presentes como era de esperarse fueron las habituales del cultivo, pues el suelo procedía de un lote arrocero con su banco propio de estas semillas de malezas, entre ellas: Barba de Indio (*Fimbristylis annua* All.); Bledo (*Amaranthus viridis* L.); Coquito (*Cyperus rotundus* L.); Guarda Roció (*Digitaria sanguinalis* L.); Arroz Rojo (*Oryza sativa* L.), Colchón de Pobre (*Lycopodium clavatum* L.) y Liendre de Puerco (*Echinochloa colonum* L.). El control fue manual y después de desarraigarlas se regresaban dentro de su balde colocadas de tal forma que no se volvieran a pegar en el suelo.

3.4 SEGUIMIENTO FISIOLÓGICO DEL CULTIVO.

3.4.1 Altura de las plantas.

Este parámetro se midió a partir de los 15 DDE hasta los 105 DDE en cada una de las variedades de arroz. La altura de las plantas para las variedades en estudios, mostró un crecimiento progresivo, el cual fue rápido hasta floración y lento hasta los 105 DDE, fecha donde alcanzaron su máxima altura (Anexo 24). En el ensayo 1 las variedades Fedearroz 67 y Fedearroz 68, registraron su máxima altura con valores promedios de 110,5 cm y 109,4 cm, respectivamente; para el caso del ensayo 2 las variedades Fedearroz 2000 y Fedearroz 473, mostraron valores medios de 117,3 cm y 100,9 cm, respectivamente (Tabla 5). Estas variaciones de altura se deben a las características genéticas de cada variedad y a las condiciones ambientales del sitio.

Estos resultados concuerdan con lo reportado por Degiovanni et al., (2004), en un estudio llevado a cabo en tres variedades de *Oryza sativa*, en el cual afirma que las variedades presentan un crecimiento lento durante el estado de plántula, y la altura de la planta aumenta rápidamente y casi linealmente hasta la floración cuando el crecimiento vertical cesa.

Por otra parte, no se observó afectaciones en el desarrollo y crecimiento de las plantas en las cuatro variedades arroz sometidas a las diferentes concentraciones de Hg en el suelo.

3.4.2 Número de macollas.

Se realizó el conteo a partir de los 12 DDE hasta los 60 DDE en ambos ensayos, el máximo macollamiento en las cuatro variedades se presentó entre los 44 DDE y los 52 DDE (Anexo 25). En el primer ensayo las variedades Fedearroz 67 y Fedearroz 68 obtuvieron valores medios de 17,2 y 11,9, respectivamente. Por el contrario, en el segundo ensayo las variedades Fedearroz 2000 y Fedearroz 473 alcanzaron un máximo macollamiento con valores medios de 17,1 y 22,9, respectivamente (Tabla 5).

Estas diferencias de macollamiento entre variedades son causadas por factores genéticos y la disponibilidad de los nutrientes en el suelo. Según la ficha técnica de Fedearroz, las variedades Fedearroz 2000, Fedearroz 473, Fedearroz 67 se caracterizan por un alto macollamiento, excepto la variedad Fedearroz 68 que presenta un macollamiento intermedio. Además, la producción de macollas es una característica genética, pero está influenciada por radiaciones solares; temperatura y prácticas culturales tales como la densidad de siembra, suplemento de agua y nutrientes (Jarma et al., 2010).

Tabla 5: Valores medios de la altura y número de macollas de las variedades de arroz en los dos ensayos.

Ensayo	Textura	Variedades	Altura (cm)	Nº macollas
1	Franco Arcillo	Fedearroz 67	110,5	17,2
	Limoso	Fedearroz 68	109,4	11,9
2	Arcillo Limoso	Fedearroz 2000	117,3	17,1
		Fedearroz 473	100,9	22,9

3.5 CONCENTRACIÓN DE Hg EN LAS CUATRO VARIEDADES DE *Oryza sativa* L.

Al analizar las cuatro variedades de arroz en las diferentes concentraciones de mercurio suministradas al medio del cultivo, se obtuvo una distribución de Hg no homogénea en los distintos órganos de la planta, evaluadas a los 120 días. De acuerdo con el análisis de varianza del ensayo 1 (Fedearroz 67 - Fedearroz 68) y ensayo 2 (Fedearroz 2000 - Fedearroz 473), arrojo diferencias significativas ($p < 0,0001 - 0,05$) entre los factores individuales y la interacción variedad*concentración (Anexo 3 y 6). Estos resultados nos permiten ver cómo fue la transferencia de Hg presente en el suelo hacia la planta de arroz y que tanto se concentró en cada uno de sus órganos, asimismo la capacidad de la planta para absorber el Hg disponible en el suelo. Además, nos da una perspectiva de la cantidad de Hg que puede llegar al organismo humano y animal a través del consumo de este alimento.

En general, las plantas contienen bajas cantidades de mercurio en sus células entre 1 a $300 \mu\text{g/Kg}^{-1}$ peso seco planta, dado que este metal es tóxico y no tienen ninguna función biológica conocida (Adriano, 2001). Aun así, ciertas plantas son capaces de absorber mercurio que esté presente en forma fácilmente disponible en el suelo. En el caso de las gramíneas y las leguminosas la acumulación depende del mercurio disponible y no del total, expone la ineficacia de la determinación de mercurio total como índice del potencial contaminante en lo que respecta a su absorción por las plantas (Sierra, 2008). Según Horvart et al., (2003), reporta que las plantas de arroz reflejan una combinación de absorción de Hg desde el suelo y desde la atmósfera a través de las hojas. Además, el autor habla de que la absorción y retención de Hg en la planta de arroz está influenciada por numerosos factores siendo solo uno de ellos la concentración de Hg disponible en el suelo.

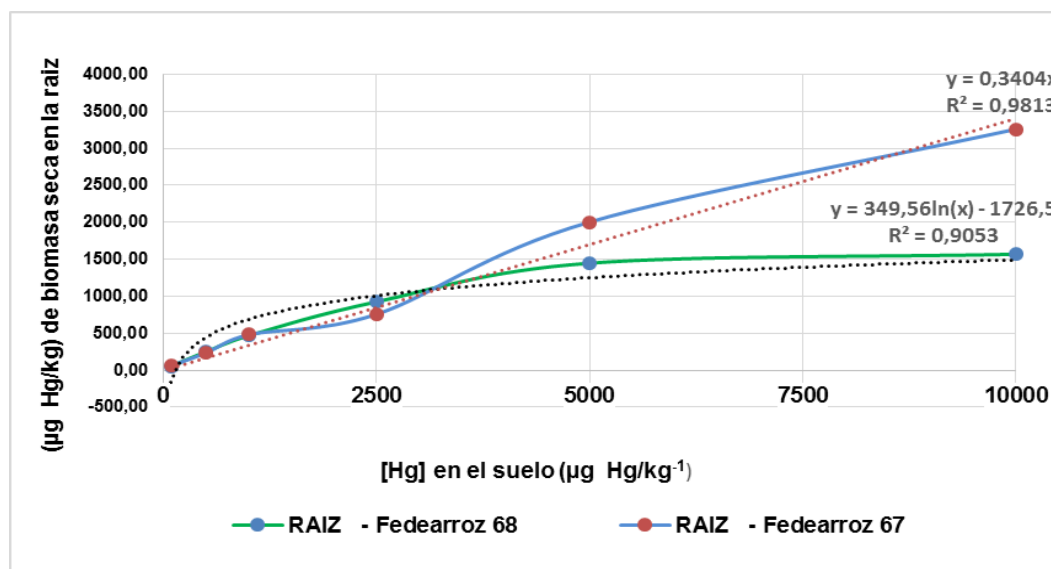
3.5.1 Concentración de Hg en las raíces de las plantas (μg de Hg/kg de biomasa seca).

Con referencia al análisis de varianza del ensayo 1, se encontraron diferencias altamente significativas ($p < 0,0001$) entre los factores estudiados (Anexo 3). En la variable raíz la máxima concentración de Hg se obtuvo la concentración $10.000 \mu\text{g Hg/kg}^{-1}$ con $2413,9 \pm 405 \mu\text{g Hg/kg}$ de biomasa seca (Anexo 5). De igual forma entre las variedades quien mostró mayor acumulación de Hg en este órgano fue la variedad Fedearroz 67 con un valor medio $1132,0 \mu\text{g Hg/kg}$ de biomasa seca en comparación de la variedad Fedearroz 68 con $768,0 \mu\text{g Hg/kg}$ de biomasa seca (Anexo 4).

En la interacción de variedad*concentración se mostró diferencias altamente significativas, haciendo una descomposición de la interacción de los contrastes ortogonales (Sentido horizontal) en función de la variedad y la concentración de Hg; donde se marcó la diferencia fue en la concentración $10.000 \mu\text{g Hg/kg}^{-1}$ con la variedad Fedearroz 67 con un valor promedio $3259,10 \pm 807,1 \mu\text{g Hg/kg}$ de biomasa seca, superando la variedad Fedearroz 68 que obtuvo $1568,60 \pm 2,9 \mu\text{g Hg/kg}$ de biomasa seca (Figura 11).

En la tabla 2, se puede observar que las características eco-fisiológicas de las dos variedades de arroz comercial son muy similares, la única diferencia es la producción de macollas; como se muestra en la Tabla 5, la variedad Fedearroz 67 presenta un promedio de macollas de 17,2 y la variedad Fedearroz 68 un promedio de 11,9. Por esta razón, la planta de arroz al emitir una macolla está emite raíces adventicias, haciendo que exista una relación directa entre el número de macollas y el volumen de raíces. Según Barrios et al., (2014), existe una interdependencia entre el sistema radical y la parte aérea de la planta y, resaltan la importancia del equilibrio funcional entre las dos partes; debido a que las raíces requieren de los carbohidratos producidos en la parte aérea por la fotosíntesis, mientras que la parte aérea requiere los nutrientes y el agua absorbidos por las raíces. Partiendo de esto, las diferencias de acumulación de mercurio entre las variedades en las raíces de la planta, se puede deber a la producción de macollas, es decir, a mayor número de macollas, mayor será el volumen de raíces; entonces mayor será el área de exposición y de interacción con el metal, reflejándose en una mayor retención de Hg por las raíces.

Figura 11: Concentración de Hg en las raíces de las variedades Fedearroz 67 y Fedearroz 68 en función a las concentraciones de Hg en el suelo.



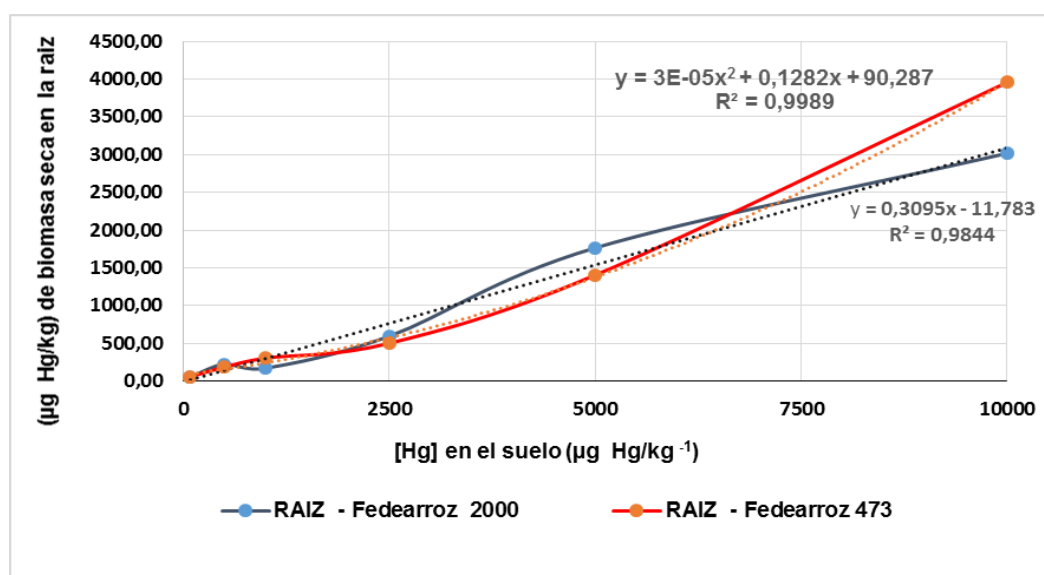
Con respecto al ensayo 2, el análisis estadístico indica diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las concentraciones. Se obtuvo valor máximo de concentración de Hg $3487,6 \pm 491,99 \mu\text{g Hg/kg}$ de biomasa seca con la concentración $10.000 \mu\text{g Hg/kg}^{-1}$; adicionalmente en esta concentración la raíz obtuvo el valor máximo con respecto a los otros órganos de la planta (Anexo 8). Por otro lado, los resultados no mostraron diferencias significativas en el factor variedad, lo cual indica que la absorción de Hg de las dos variedades evaluadas presentaron un comportamiento muy similar a medida que la concentración de Hg en el suelo aumentaba la acumulación de Hg en el órgano se hacía mayor (Anexo 7).

En esta variable, hubo una significancia en la interacción variedad*concentración, se hizo una descomposición de la interacción. Los , ortogonales (sentido horizontal) en función a las variedades (Fedearroz 2000 y Fedearroz 473) y concentraciones de Hg (86, 500, 1.000, 2.500, 5.000, 10.000 $\mu\text{g Hg/kg}^{-1}$) mostraron diferencias significativas, donde la mayor concentración de Hg se presentó en la concentración $10.000 \mu\text{g Hg/kg}^{-1}$ y la variedad Fedearroz 473 con $3957,33 \pm 651,96 \mu\text{g Hg/kg}$ de biomasa seca superando la variedad Fedearroz 2000 donde se obtuvo $3017,90 \pm 332,02 \mu\text{g Hg/kg}$ de biomasa seca (Figura 12).

Como se mencionó anteriormente en la tabla 5, la variedad Fedearroz 473 presentó un promedio de macollas de 22,9, a diferencia de la variedad Fedearroz

2000 alcanza un promedio de 17,1. Comportamiento similar al primer ensayo, donde a mayor macollamiento, mayor será el volumen de raíces en contacto con el contaminante; por tal razón, mayor es la acumulación de mercurio en las raíces de la variedad Fedearroz 473.

Figura 12: Concentración de Hg en las raíces de las variedades Fedearroz 2000 y Fedearroz 473 en función a las concentraciones de Hg en el suelo.



En ambos ensayos las concentraciones de mercurio encontradas en las raíces fueron más altas que el resto de los tejidos de la planta, concentrando gran parte del mercurio en su sistema radicular; sin embargo, las variedades Fedearroz 2000 y Fedearroz 473 sembradas en un suelo Arcillo Limoso, retuvieron mayor cantidad de Hg en sus raíces con respecto a las variedades Fedearroz 67 y Fedearroz 68 sembradas en un suelo Franco Arcillo Limoso. A pesar, de que los dos suelos contienen una fracción de arcilla similar, el suelo Franco Arcillo Limoso posee mayor contenido de arenas, las cuales tienen una menor fijación y permiten que el metal sea absorbido por la planta. Según Galán y Romero, (2008) los suelos arcillosos retienen más metal por adsorción o en el complejo de cambio de mineralización de la arcilla; por lo contrario, los arenosos carecen capacidad de fijación y puede contaminarse el nivel freático.

La acumulación de mercurio en las plantas ha sido estudiada en diversas especies, entre las que encontramos el Ají (*Capsicum annum* L.); Caña Flecha (*Gynerium sagittatum* Aubl.) y Arroz (*Oryza sativa* L.), reportándose en las raíces

una mayor acumulación de mercurio que en tallos y hojas (Pérez et al., 2014; Ortega, 2011; Meng et al., 2012).

Este comportamiento puede deberse a una alta afinidad de las raíces por capturar la mayor parte del mercurio biodisponible debido a su contacto directo con el suelo contaminado, lo que algunos autores indican como un mecanismo de defensa tóxica, destacándose que cerca del 80 % del metal se adhiere a las paredes celulares, haciendo de la raíz una barrera que limita el paso del metal hacia las partes aéreas de la planta (Wang y Greger, 2004; Millán et al., 2006). Este proceso, posiblemente, se realiza a través de la secreción de fitosideróforos tales como las fitoquelatinas, a las cuales se une fácilmente el mercurio por su contenido de aminoácidos azufrados como cisteína, haciéndolo no disponible para su translocación al tallo (Cobbett, 2000; Meagher y Heaton, 2005; Sobrino et al., 2009).

3.5.2 Concentración de Hg en el tallo de las plantas (μg de Hg/kg de biomasa seca).

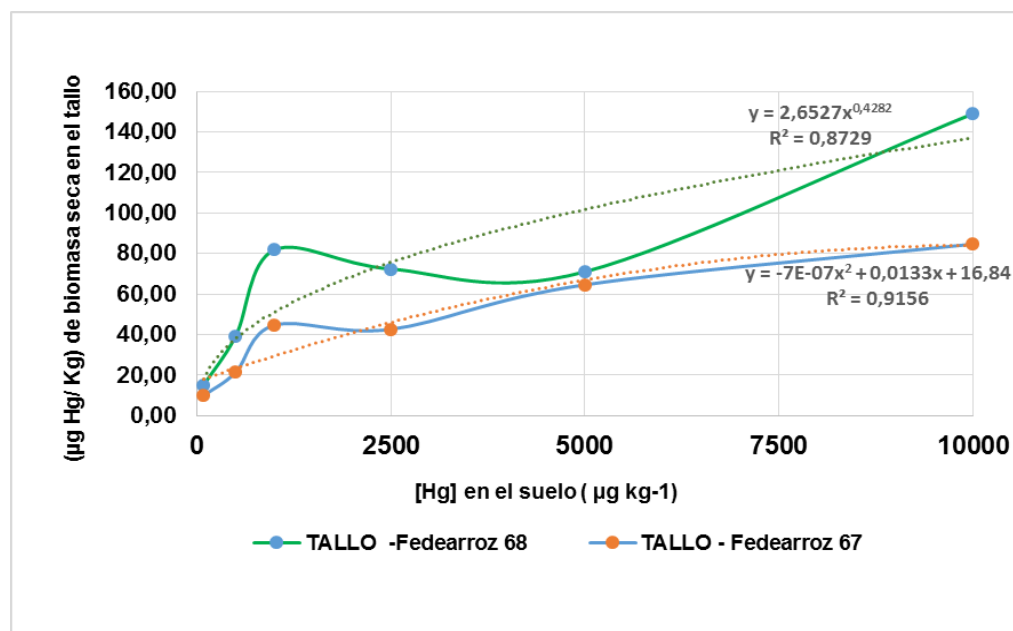
El análisis estadístico del ensayo 1, presentó diferencias altamente significativas ($p < 0,0001$) en el factor concentración (Anexo 3). En los resultados de la comparación de medias de esta variable (Anexo 5); podemos percibir que no hay un crecimiento paulatino en la acumulación de Hg a medida que la concentración de este elemento aumenta en el suelo, pero si se presenta una acumulación el mercurio alto comparada con los demás órganos aéreos de la planta. Por ejemplo, en la concentración $10.000 \mu\text{g Hg/kg}^{-1}$, el tallo obtuvo un valor medio $116,9 \pm 12,7 \mu\text{g Hg/kg}$ de biomasa seca, en esta misma concentración en las variables hoja y grano obtuvieron valores medios por debajo de este.

Igualmente, en el análisis se refleja diferencias altamente significativas entre las variedades evaluadas. La comparación de medias muestra que la variedad Fedearroz 68 absorbió más Hg con un valor promedio $71,39 \mu\text{g Hg/kg}$ de biomasa seca con respecto a la variedad Fedearroz 67 la cual solo obtuvo un valor medio $44,6 \mu\text{g Hg/kg}$ de biomasa seca (Anexo 4).

En cuanto a la interacción evaluada, la ANAVA presenta diferencias estadísticamente significativas a nivel de $p < 0.05$. De igual forma al descomponer la interacción, los contrastes ortogonales (Sentido horizontal) en función a las variedades y las concentraciones evaluadas reflejaron diferencias significantes, las cuales se presentaron en la variedad Fedearroz 68 en la concentración $1.000 \mu\text{g Hg/kg}^{-1}$ con $81,80 \pm 16,20 \mu\text{g Hg/kg}$ de biomasa seca y en la concentración 10.000

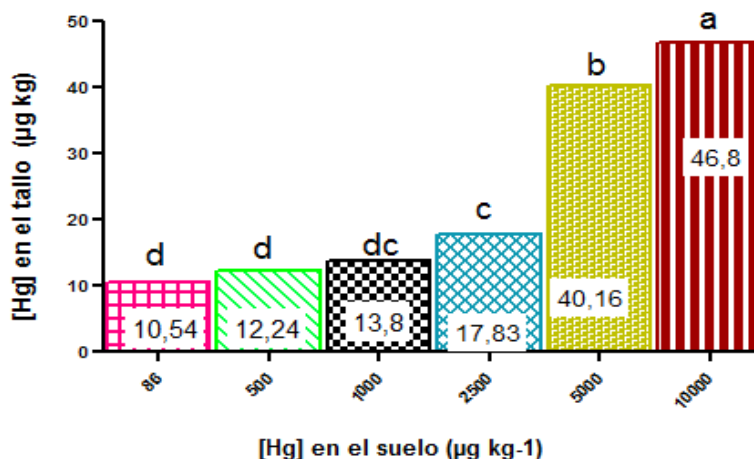
$\mu\text{g Hg/kg}^{-1}$ con $149,10 \pm 16,60 \mu\text{g Hg/kg}$ de biomasa seca, en cada una de estas concentraciones esta variedad supero la variedad Fedearroz 67 (Figura 13).

Figura 13: Concentración de Hg en el tallo de las variedades Fedearroz 67 y Fedearroz 68 en función a la concentración de Hg en el suelo.



De acuerdo al análisis de varianza del ensayo 2 existen diferencias significativas ($p < 0,05$) en el factor concentración (Anexo 6), demostrando un comportamiento similar a la raíz en cuanto la acumulación de Hg, es decir, que había un incremento de la cantidad de Hg en el órgano en la medida que aumentaba la concentración de Hg en el suelo. Cabe resaltar que la absorción de Hg por este órgano fue menor que en la raíz, además los incrementos de acumulación Hg en las diferentes concentraciones fueron muy mínimos, presentando el valor máximo $46,8 \pm 4,06 \mu\text{g Hg/kg}$ de biomasa seca con la concentración $10.000 \mu\text{g Hg/kg}^{-1}$ (Figura 14), si comparamos en esta concentración la hoja presenta valores más altos con respecto al tallo (Anexo 8).

Figura 14: Comparación de medias del factor concentración para las concentraciones de Hg en el tallo en las variedades Fedearroz 2000 y Fedearroz 473.



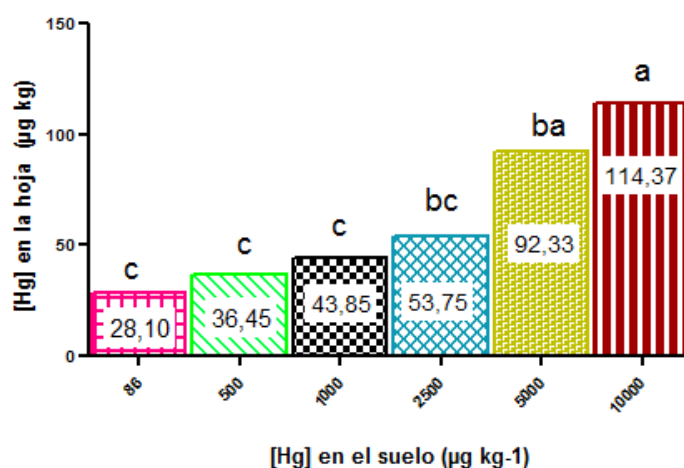
Para el factor variedad, el análisis estadístico no reflejó diferencias significativas, debido a que las variedades evaluadas no tuvieron una influencia sobre la acumulación de Hg en el tallo (Anexo 7). Asimismo, en la interacción variedad*concentraciones, los contrastes ortogonales en función a las variedades Fedearroz 2000 y Fedearroz 473 y las concentraciones Hg en el suelo indicaron que no existen diferencias significativas, es decir, que las variedades presentaron valores medios casi iguales con respecto a la acumulación de Hg en el tallo.

Si comparamos los resultados obtenidos, las variedades del ensayo 1 concentraron más Hg en el tallo, como se expresó anteriormente, esto se debe a la textura Franco Arcillo Limosa, la cual, al contener mayor proporción de arenas, las arcillas no retienen el Hg en el suelo de igual manera que el suelo arcillo limoso; esto permite un mayor transporte de Hg hacia el tallo. Caso contrario al ensayo 2 donde las concentraciones de Hg en este órgano fueron menores que en el resto de la planta; este efecto se debe a la retención del metal que ocasiona las raíces y las arcillas del suelo limitando el ascenso del Hg hacia el tallo y por tal razón la concentración de Hg que se encuentra en este órgano es menor (Yap et al., 2007; Válega et al., 2009).

3.5.3 Concentración de Hg en la hoja de las plantas (μg de Hg/kg de biomasa seca).

Para el ensayo 1, el análisis estadístico indico diferencias altamente significativas ($p < 0,0001$) en el factor concentración, excepto en el factor variedad y la interacción de variedad*concentraciones. (Anexo 3) Al comparar las medias en el factor concentración, se observa en la concentración $10.000 \mu\text{g Hg/kg}^{-1}$ una concentración mayor de Hg en comparación de las demás concentraciones con un valor de $114,37 \pm 405 \mu\text{g Hg/kg}$ de biomasa seca (Figura 15).

Figura 15: Comparación de medias del factor concentración para las concentraciones de Hg en las hojas de las variedades Fedearroz 67 y Fedearroz 68.



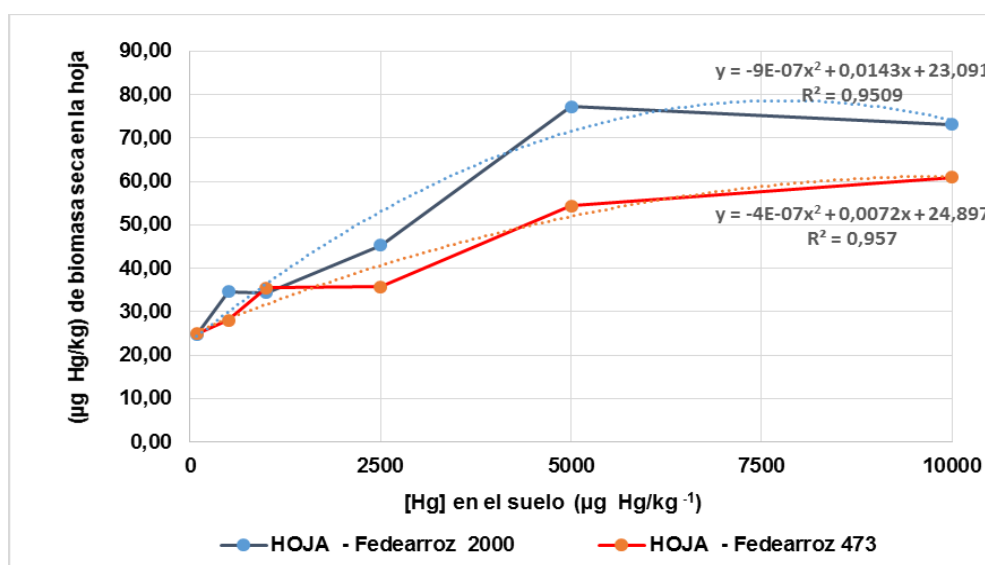
En cuanto al factor variedad y la interacción variedad*concentración no presentaron significancia, reflejando un comportamiento de acumulación de Hg similar en ambas variedades con respecto a las concentraciones de Hg en el suelo, resultado que coincide al descomponer la interacción en función a las variedades y las concentraciones de Hg en el suelo.

Según el análisis estadístico del ensayo 2 hubo diferencias significativas ($p < 0,05$) en el factor concentración. El contenido de Hg de las hojas presenta una tendencia creciente con el aumento del Hg en el suelo, comportamiento que coincide con el de la raíz y el tallo. Se observa en los resultados que hay un aumento mínimo de acumulación de Hg por el órgano, pero en la concentración $5.000 \mu\text{g Hg/kg}^{-1}$ se

presentó un incremento significativo de la absorción de Hg con un valor de $65,4 \pm 12,45 \mu\text{g Hg/kg}$ de biomasa seca (Anexo 8).

Por otro lado, la comparación de medias entre las variedades reflejó diferencias significativas ($p < 0,05$), en donde la variedad Fedearroz 2000 presentó un valor superior ($48,267 \mu\text{g Hg/kg}$ de biomasa seca) en la acumulación de Hg por las hojas con respecto a la Fedearroz 473 (Anexo 7).

Figura 16: Concentración de Hg en las hojas de las variedades Fedearroz 2000 y Fedearroz 473 en función a las concentraciones de Hg en el suelo.



De acuerdo, al análisis de varianza no hay un efecto significativo en la interacción variedad*concentración, pero al descomponer la interacción los contrastes ortogonales (Sentido horizontal) con respecto a las variedades (Fedearroz 2000 y Fedearroz 473) y concentraciones de Hg evaluadas, se observa una diferencia significativa en la concentración $5.000 \mu\text{g Hg/kg}^{-1}$ con una concentración de Hg de $77,23 \pm 10,04 \mu\text{g Hg/kg}$ de biomasa seca en la variedad Fedearroz 2000 comparado con la variedad Fedearroz 473 que presentó una concentración de Hg de $54,45 \pm 14,86 \mu\text{g Hg/kg}$ de biomasa seca (Figura 16).

Las concentraciones de mercurio halladas en las hojas de las variedades Fedearroz 2000 y Fedearroz 473 fueron más altas comparadas con las encontradas en el tallo; esto concuerda con lo reportado por Marrugo et al.,

(2015), en un estudio realizado en la especie *Jatropha curcas*, sometida a diferentes concentraciones de Hg en el suelo, en el cual demostró la capacidad de las plantas para acumular Hg en las hojas con mayor eficiencia que los tallos.

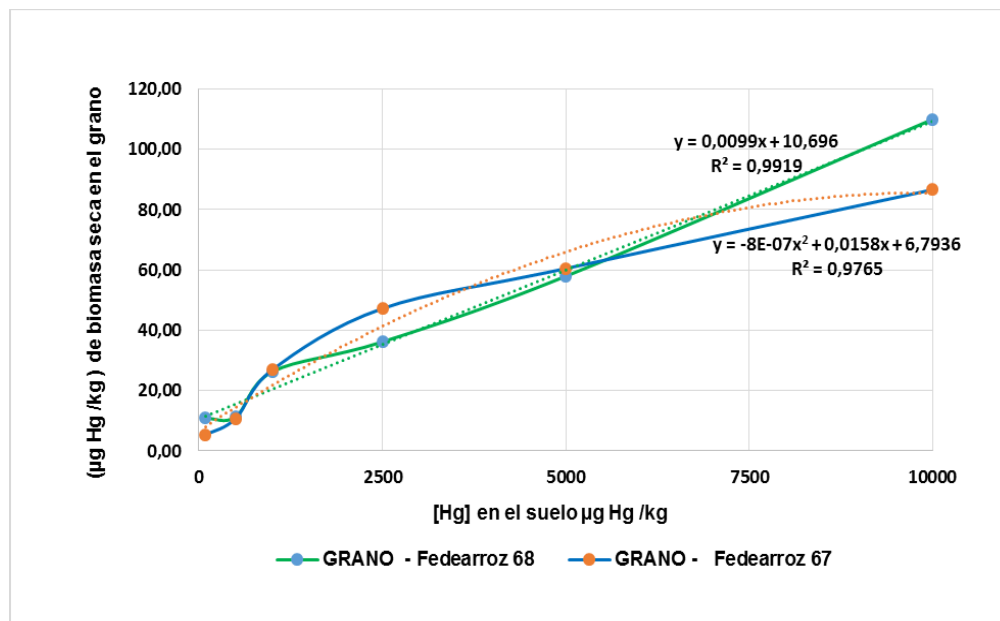
Según Moreno et al., (2005), la mayor concentración Hg en las hojas se debe a que son el receptor final del metal en la planta donde cambia su estado de oxidación de Hg^{2+} a Hg^0 , es fitoquelado y acumulado en las vacuolas como mecanismo de resistencia tóxica que conduce a un aumento de la concentración de Hg en el tejido. Por otra parte, la función del tallo es transportar fluidos y nutrientes de las raíces hacia las hojas, y no acumular; además, la acumulación de Hg en los tallos es limitada en comparación con los demás tejidos de la planta, debido a la retención de Hg ocasionada por las raíces y por ende la concentración de Hg en el tallo es menor (Válega et al., 2009).

3.5.4 Concentración de Hg en los granos pilados de las plantas (μg de Hg/kg de biomasa seca).

En el ensayo 1, la ANAVA nos indica que existen diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,0001 - 0,05$) en el factor concentración y en la interacción variedad* concentración, a excepción del factor variedad (Anexo 3). La comparación de medias del factor concentración nos muestra que el comportamiento de la acumulación de Hg en el grano fue creciente vs la concentración de Hg en el suelo. El valor medio más alto se presentó en la concentración $10.000 \mu\text{g Hg/kg}^{-1}$ con un $98,30 \pm 15,75 \mu\text{g Hg/kg}$ de biomasa seca (Anexo 5).

Por otra parte, al descomponer la interacción los ortogonales (Sentido horizontal) en función de las variedades y las concentraciones evaluadas, da como resultado diferencias significativas, el cual coincide con el de la ANAVA. El punto donde se marcó la diferencia fue en la concentración $10.000 \mu\text{g Hg/kg}^{-1}$ en la variedad Fedearroz 68 con un valor promedio $109,95 \pm 16,25 \mu\text{g Hg/kg}$ de biomasa seca, a diferencia de la variedad Fedearroz 67 que obtuvo $86,63 \pm 15,17 \mu\text{g Hg/kg}$ de biomasa seca (Figura 17).

Figura 17: Concentración de Hg en el grano pilado de las variedades Fedearroz 67 y Fedearroz 68 en función a las concentraciones de Hg en el suelo.

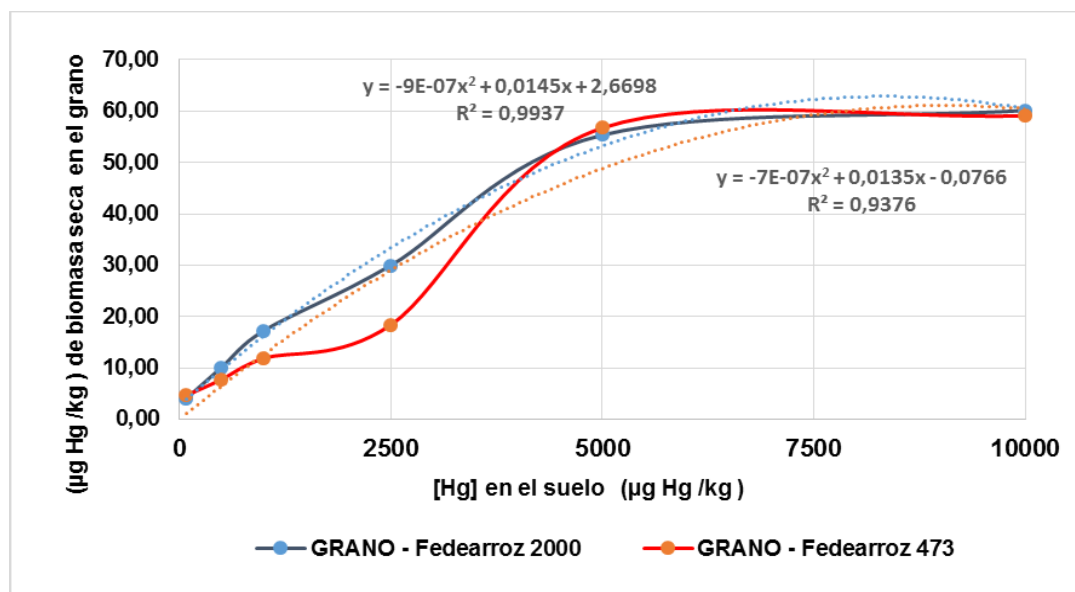


Por el contrario, el factor variedad no fue significativo según el análisis de varianza, lo que nos permite decir que las variedades no interfirieron sobre la acumulación de Hg en el órgano en función a las concentraciones de Hg en el suelo, indicando q el comportamiento en ambas fue similar.

A diferencia del ensayo 2 en el análisis estadístico se encontró diferencias significativas en el factor concentración ($p < 0,05$). La comparación de medias de este factor mostró que la mayor concentración de Hg se obtuvo en la concentración $5.000 \mu\text{g Hg/kg}^{-1}$ con un valor medio $56,04 \pm 12,95 \mu\text{g Hg/kg}$ de biomasa seca, en las demás concentraciones evaluadas la acumulación del metal fue leve (Anexo 8).

Con respecto a la comparación de medias del factor variedad, se presentó diferencias significativas ($p < 0,05$), es decir, que las variedades influyeron en la acumulación de Hg en el grano de arroz, específicamente la variedad Fedearroz 2000 fue la que obtuvo la concentración más alta de mercurio en el grano ($29,49 \mu\text{g Hg/kg}$ de biomasa seca) comparado con Fedearroz 473 (Anexo 7).

Figura 18: Concentración de Hg en el grano pilado de las variedades Fedearroz 2000 y Fedearroz 473 en función a las concentraciones de Hg en el suelo.



De acuerdo con los resultados del análisis estadístico no hubo diferencias significativas en el factor de variedad*concentración, pero al descomponer la interacción los contrastes ortogonales (Sentido horizontal) en función a las variedades Fedearroz 2000 y Fedearroz 473 y las concentraciones de Hg (86, 500, 1.000, 2.500, 5.000, 10.000 $\mu\text{g Hg/kg}^{-1}$), se presentó un efecto significativo en la concentración 2.500 $\mu\text{g Hg/kg}^{-1}$ con la variedad Fedearroz 2000 con un valor $29,97 \pm 7,50 \mu\text{g Hg/kg}$ de biomasa seca, siendo superior a la variedad Fedearroz 473 (Figura 18).

Los resultados muestran que las concentraciones medias de Hg en el grano pilado en la concentración testigo ($86 \mu\text{g Hg/kg}^{-1}$) fue en el ensayo 1 ($8,10 \mu\text{g Hg/kg}$ de biomasa seca) y en el ensayo 2 ($4,39 \mu\text{g Hg/kg}$ de biomasa seca), las cuales no superan los límites establecidos por la Agencia Nacional de Normalización de China de $20 \mu\text{g/Kg}$ para los cultivos (Li et al., 2013). Asimismo, un reciente estudio realizado en cinco municipios pertenecientes a la Sub-región de La Mojana han reportado concentraciones de Hg en el grano que no superan este límite; el contenido de este metal más alto se presentó para el municipio de Guaranda, seguido del municipio San marcos, Sucre, San Benito y Majagual ($15,3 \pm 11,3$; $11,6 \pm 9,8$; $10,5 \pm 5,2$; $12,0 \pm 9,4$; $8,7 \pm 4,7 \mu\text{g/Kg}$ respectivamente), sin embargo no se especifica qué tipo de variedad se empleó en dicho estudio (Marrugo et al., 2018). Esto nos indica la cantidad de Hg que se acumula en los arroces que se

produce en la Sub-región de La Mojana por estar expuesta a la contaminación minera.

Varios estudios han reportado altas concentraciones de mercurio total en arroz (Barrett, 2010), demostrando que la exposición humana al Hg a través del consumo de alimentos no se limita a los peces y mamíferos marinos sino también al consumo de este producto, tal es el caso de la población de Wuchuan de una zona minera de mercurio, Guizhou, China, donde los niveles del metal fueron de 6,0 hasta 113 ng/g para HgT. Además, el arroz cultivado en áreas de minería de Hg abandonadas contenía niveles de MeHg $> 100 \mu\text{g}/\text{kg}^{-1}$ en la porción comestible, que es 10 - 100 veces más que otras plantas cultivadas localmente, como Maíz (*Zea mays* L.), Colza (*Brassica campestris*), Tabaco (*Nicotiana tabacum*) y Repollo (*Brassica oleracea*). Esto reportes demuestran que el arroz es una planta bioacumuladora de Hg y MeHg, convirtiéndose en una fuente de exposición humana (Qui et al., 2008).

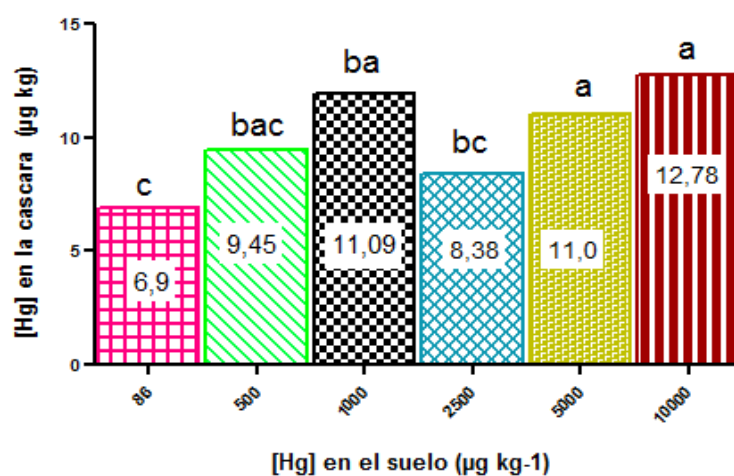
Cabe resaltar que el arroz es uno de los principales cultivos alimentarios estables del mundo, con una ingesta diaria de hasta 0,5 kg (Peso seco) en muchos países asiáticos (Meng et al., 2014). En Colombia existen reportes, específicamente en el municipio de San Marcos, donde se determinó que los hombres consumen cantidades promedio de 1218,0 gramos de arroz semanalmente, mientras que las mujeres ingieren cantidades promedio de 925,24 gramos de arroz cada semana, demostrando que existe un alto consumo de este cereal en los municipios de la Sub-región de La Mojana (Argumedo et al., 2013); por tal razón las concentraciones de mercurio en el grano deben ser iguales a cero, debido a que este elemento se acumula en el organismo causando daños neurotóxicos en el ser humano.

3.5.5 Concentración de Hg en la cascara del grano (μg de Hg/kg de biomasa seca).

A cerca del ensayo 1, el análisis de varianza mostró que no existen diferencias significativas ($p < 0,05$) en los factores individuales y la interacción variedad*concentración (Anexo 3). Esto nos indica que el comportamiento de las variedades Fedearroz 67 y Fedearroz 68 fue similar con respecto a las concentraciones de Hg en el suelo. Si analizamos la comparación de medias del factor concentración se observa un incremento mínimo de Hg, obteniéndose el valor más alto en la concentración $10.000 \mu\text{g Hg}/\text{kg}^{-1}$ se obtuvo $21,38 \pm 8,01 \mu\text{g Hg}/\text{kg}$ de biomasa seca.

En cuanto al ensayo 2, la ANAVA mostró diferencias significativas ($p < 0,05$) en el factor concentración. Además, se observa un comportamiento diferente en la acumulación de Hg comparado con los órganos antes mencionados, puesto que no se presenta un comportamiento creciente en la acumulación de Hg en la cascara en la medida que la concentración Hg en el suelo aumenta. Por otro lado, el valor medio máximo se obtuvo en la concentración $10.000 \mu\text{g Hg/kg}^{-1}$ con $12,78 \pm 2,9 \mu\text{g Hg/kg}$ de biomasa seca y el valor mínimo en la concentración testigo $86 \mu\text{g Hg/kg}^{-1}$ con $6,9 \pm 1,8 \mu\text{g Hg/kg}$ de biomasa seca, marcándose una diferencia significativa en las concentraciones evaluadas (Figura 19).

Figura 19: Comparación de medias del factor concentración para las concentraciones de Hg en la cascara del grano en las variedades Fedearroz 2000 y Fedearroz 473.



Sin embargo, el análisis estadístico reflejó que no existe significancia en el factor variedad y en la interacción variedad* concentración (Anexo 6), indicando que se presentó un comportamiento similar en la acumulación de Hg en la cascara por las variedades Fedearroz 2000 y Fedearroz 473.

Con respecto a lo anterior, la acumulación de mercurio en la cascara del grano de las variedades evaluadas fue relativamente baja comparada con la del grano pilado. Además, se han reportado un análisis químico que muestran que las concentraciones de Hg en el salvado de arroz son mucho más altas que en el grano blanco y la cascara, debido al enriquecimiento de proteínas en el salvado (Meng et al., 2014). Por lo tanto, una explicación para el alto contenido de Hg en

el salvado puede ser la alta afinidad de los iones de los metales pesados a los ligandos de la cadena lateral de las proteínas que son dominante en el salvado (Meng et al., 2010).

Aunque la cascara de arroz no es comestible, es aprovechada en varias actividades agropecuarias como la preparación de concentrados para animales (aves, cerdos, ganado) (Vega, 2012); también es utilizada en semilleros hortícolas y jardinería. Esto nos genera un interrogante, ¿Qué efectos podría tener el uso de la cascara de arroz contaminada por mercurio en estas actividades? Según Argumedo et al., (2015), el Hg es bioacumulado por los organismos y biomagnificado a lo largo de la cadena alimenticia, colocando en riesgo la salud humana, a través del consumo de estos alimentos contaminados.

3.6 FACTOR DE BIO-ACUMULACIÓN Y TRANSLOCACIÓN DE Hg EN LAS CUATRO VARIEDADES DE *Oryza sativa* L.

1. Factor de bio-acumulación (FB).

De acuerdo con el análisis de varianza el factor de bio-acumulación (FB) de Hg en las variedades Fedearroz 67 y Fedearroz 68, los factores individuales y la interacción evaluada presentaron diferencias significativas ($p < 0,0001 - 0,05$) en los diferentes tejidos de la planta (Anexo 12). Si observamos la comparación de medias del factor concentración (Anexo 14), el FB en cada órgano fue mayor en la concentración testigo ($86 \mu\text{g Hg/kg}^{-1}$), pero la raíz obtuvo la mayor bio-acumulación de Hg con un valor de 0,67 y el resto de los órganos presentaron valores inferiores a este. Por lo contrario, el menor factor se obtuvo en la concentración más alta de Hg ($10.000 \mu\text{g Hg/kg}^{-1}$), mostrando el mismo comportamiento de bio-acumulación del metal en los órganos evaluados. Demostrando que el FB va aumentando a medida que la concentración de Hg en el suelo disminuye, es decir, que a bajas concentraciones de Hg las variedades realizan la bio-acumulación del metal con mayor eficiencia.

Por otro lado, en el factor variedad las diferencias significativas se mostraron en los órganos tallo y hojas; indicado que entre las variedades hubo valores medios diferentes de bio-acumulación. En el anexo 13, se observa que la variedad Fedearroz 68 en el tallo obtuvo FB medio de 0,07, siendo superior al obtenido por Fedearroz 67; caso contrario en la hoja donde Fedearroz 67 sobresalió con una media de 0,09.

Figura 20: Factor de bio-acumulación de Hg en la hoja de las variedades Fedearroz 67 y Fedearroz 68 en función a las concentraciones de Hg en el suelo.

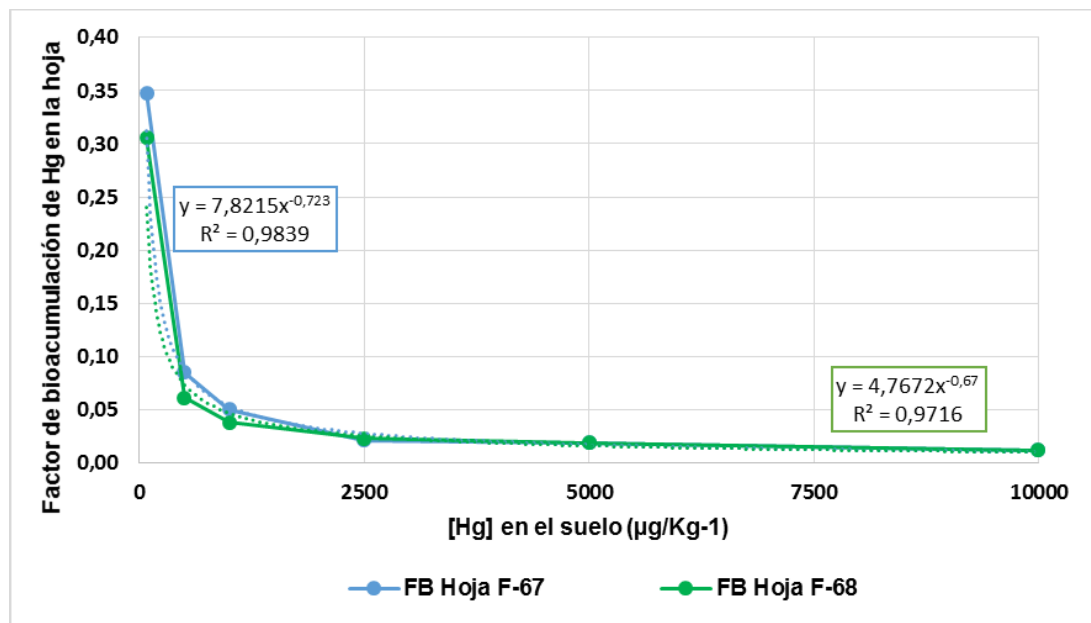
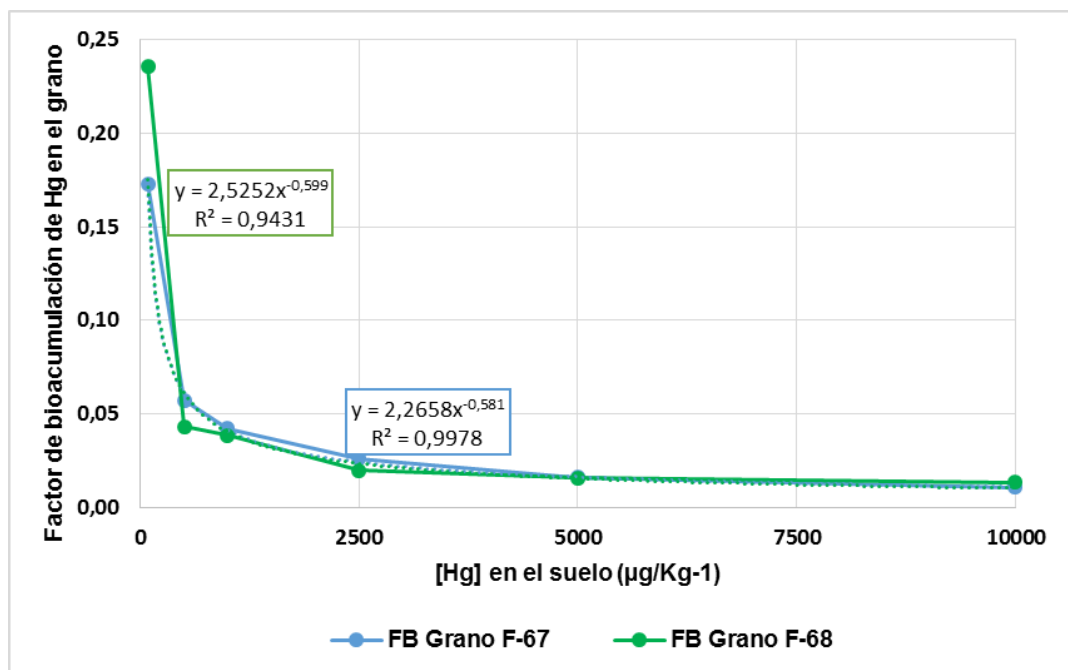


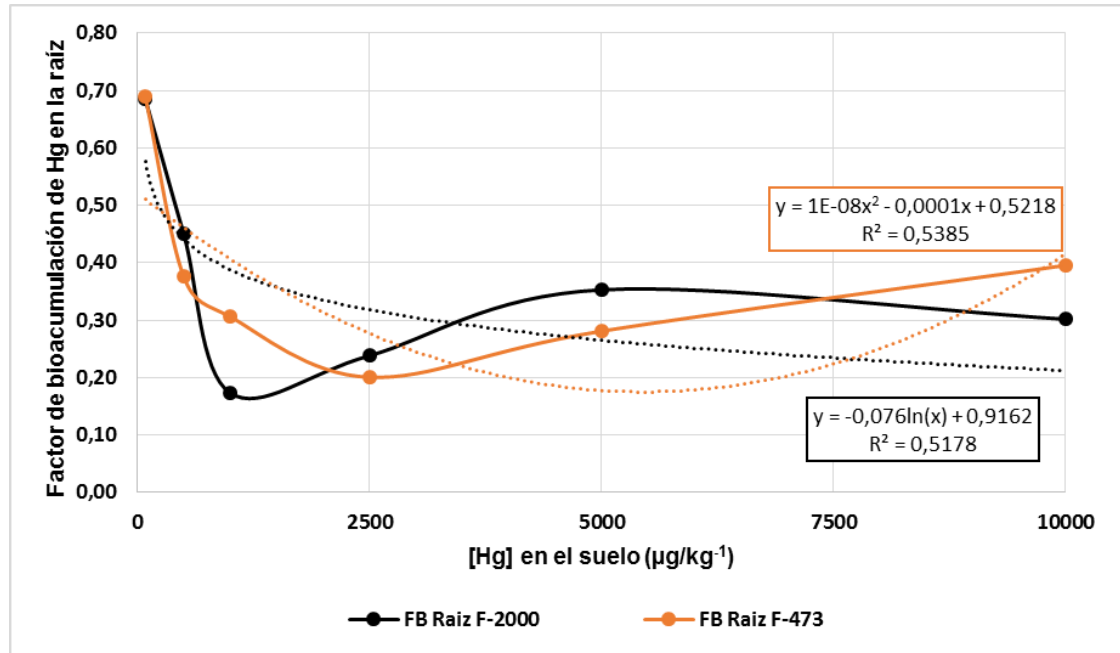
Figura 21: Factor de bio-acumulación de Hg en el grano de las variedades Fedearroz 67 y Fedearroz 68 en función a las concentraciones de Hg en el suelo.



Con respecto a la interacción variedad*concentración, la ANAVA reflejó valores significantes ($p < 0,05$) en los órganos hoja y grano. Al realizar la descomposición de la interacción, en función a las variedades y las concentraciones de Hg en el suelo, señalo diferencias en la hoja específicamente en la concentración $86 \mu\text{g Hg/kg}^{-1}$ en la variedad Fedearroz 67 con un FB 0,35 superando a la variedad Fedearroz 68. Y en el grano el punto de diferencia se marcó en la concentración $86 \mu\text{g Hg/kg}^{-1}$ en la variedad Fedearroz 68 con valor de 0,24 sobrepasando a Fedearroz 67 (Figuras 20 y 21).

En cuanto a las variedades Fedearroz 2000 y Fedearroz 473, en el análisis estadístico se encontró diferencias significativas ($p < 0,0001 - 0,05$) en el factor concentración y en la interacción evaluada, excepto en el factor variedad donde no hubo diferencias significativas (Anexo 9). El factor concentración fue altamente significativo en todos los órganos de la planta y al realizar la prueba de Tukey, sucedió el mismo efecto del FB de Hg del primer ensayo, donde los valores máximos se presentaron en la concentración testigo y los valores mínimos en la concentración más alta ($10.000 \mu\text{g Hg/kg}^{-1}$). De igual manera la distribución de Hg en la planta no fue homogénea ya que la raíz obtuvo un FB mayor que el resto de la planta (Anexo 11). Mientras que el comportamiento de las variedades fue similar, por tal razón el análisis no mostró diferencias significativas en el factor variedad. En cambio, la interacción variedad* concentración fue significativa ($p < 0,05$) en el órgano raíz, al descomponer la interacción en función a las variedades y las concentraciones de Hg la diferencia se observa en la concentración $1.000 \mu\text{g Hg/kg}^{-1}$ en la variedad 473 con un FB 0,31, siendo este mayor al obtenido por Fedearroz 2000 (Figura 22).

Figura 22: Factor de bio-acumulación de Hg en la raíz de las variedades Fedearroz 2000 y Fedearroz 473 en función a las concentraciones de Hg en el suelo.



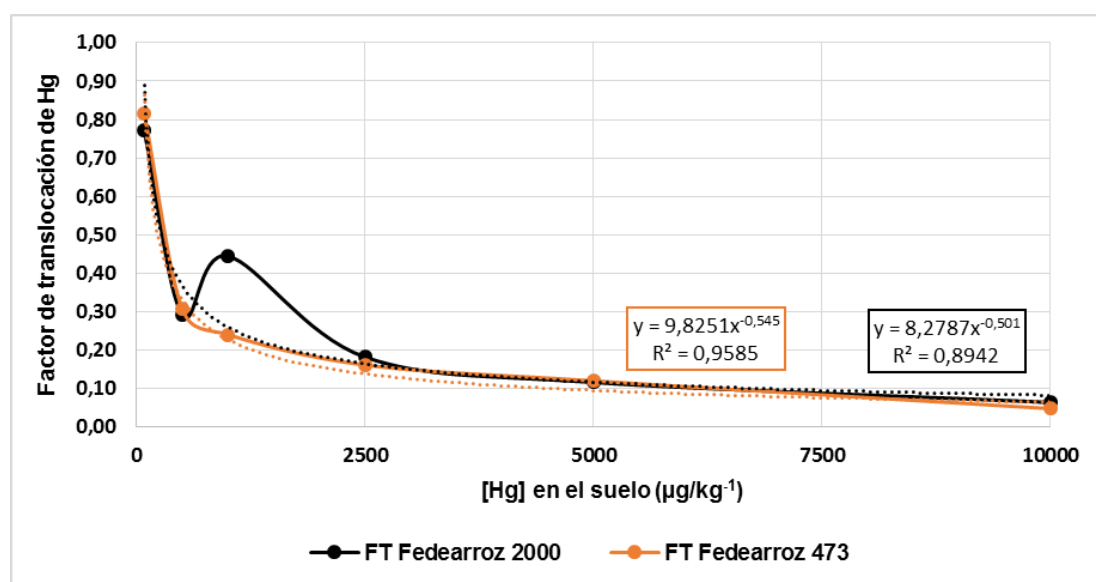
2. Factor de translocación (FT).

El análisis de varianza ($p < 0,0001 - 0,05$) indicó que las medias de las variedades Fedearroz 2000 y Fedearroz 473 fueron diferentes en los factores individuales y en la interacción variedad*concentración (Anexo 15). Al realizar la prueba de Tukey ($p < 0,05$) del factor variedad se observó diferencias significativas entre ellas; demostrando que la variedad Fedearroz 2000 translocó más Hg desde la raíz hacia la parte aérea de la planta con factor de translocación (FT) de 0,31 (Anexo 16). Por otra parte, la comparación de medias del factor concentración muestra que las variedades en la concentración testigo ($86 \mu\text{g Hg/kg}^{-1}$) presentan un FT de 0,80 y en la concentración más alta ($10.000 \mu\text{g Hg/kg}^{-1}$) un FT de 0,06 (Anexo 17); ocurriendo el mismo comportamiento del factor de bio-acumulación, es decir, al disminuir la concentración de Hg en el suelo más eficiente son las raíces para traslocar el metal a la parte aérea de la planta.

Si descomponemos la interacción, los contrastes ortogonales (Sentido horizontal) en función a las variedades y las concentraciones de Hg en el suelo se demuestra

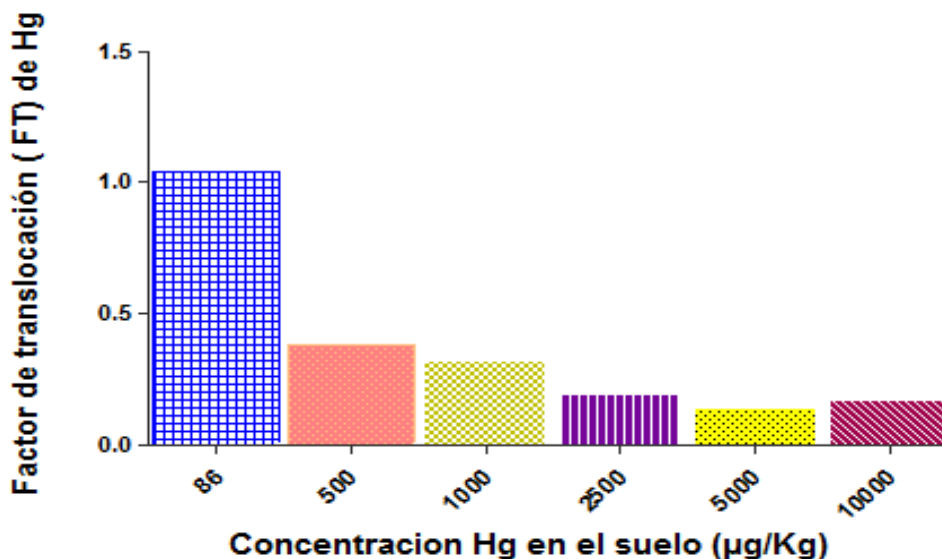
que existen diferencias significativas, exactamente en la concentración 1.000 $\mu\text{g Hg/kg}^{-1}$ en la variedad Fedearroz 2000 con un FT de 0,44, siendo superior al valor obtenido por Fedearroz 473 en esta concentración, como se muestra en la figura 23.

Figura 23: Factor de translocación de Hg de las variedades Fedearroz 2000 y Fedearroz 473 en función a las concentraciones de Hg en el suelo.



Para las variedades Fedearroz 67 y Fedearroz 68, el análisis estadístico reflejó diferencias altamente significativas ($p < 0,0001$) en el factor concentración a diferencia del factor variedad y la interacción evaluada que no presentaron diferencias significativas (Anexo 18). Sin embargo, al realizar la prueba de Tukey ($p < 0,05$) del factor variedad mostró que Fedearroz 68 obtuvo un FT de 0,41 y Fedearroz 67 un FT de 0,35, es decir, que Fedearroz 68 translocó un poco más de mercurio hacia la parte aérea de la planta (Anexo 19). Acerca de la comparación de medias del factor concentración, el resultado más alto se presentó en la concentración 86 ($\mu\text{g Hg/kg}^{-1}$) con un FT de 1,04 y en la concentración 10.000 $\mu\text{g Hg/kg}^{-1}$ un FT de 0,18 (Figura 24); siendo valores superiores a los obtenidos por las variedades del ensayo 2, corroborando lo antes mencionado donde la mayor proporción de arenas del suelo Franco Arcillo Limoso provocó una menor retención de Hg en el suelo, es decir, una mayor disponibilidad del metal para ser absorbido y traslocado por la planta.

Figura 24: Comparación de medias del factor concentración para el factor de translocación de Hg en las variedades Fedearroz 67 y Fedearroz 68.



Comparando el FB y FT, se pudo observar la capacidad de las cuatro variedades de *Oryza sativa* (Fedearroz 67, Fedearroz 68, Fedearroz 2000, Fedearroz 473) en tomar el mercurio del suelo y transportarlo desde las raíces hacia la zona aérea. Las plantas tolerantes tienden a restringir la absorción y la translocación hacia la parte aérea de la planta, mientras que las hiperacumuladoras participan activamente y traslocan los metales en su biomasa aérea (Ruiz et al., 2012; Torres, 2018). En la investigación ninguna de las variedades se puede categorizar como una planta hiperacumuladora de Hg. Pero no se descarta la capacidad de las variedades para tolerar y concentrar el metal pesado en cada uno de sus órganos.

Esto se apoya en los análisis de los FT y FB, cuantificados con las concentraciones de Hg mostradas por la planta. Cuando el FT y FB es mayor a 1, la especie puede ser considerada como fitoextractora de metales pesados en sitios contaminados, mientras que, si dichos valores son menores a 1, la especie pueden ser utilizada para fitoestabilizar sitios contaminados (Méndez y Raina, 2008; Medina y Montano, 2013). Los resultados muestran un FT menor a 1 en la concentración más alta de Hg en el suelo ($10.000 \mu\text{g Hg/kg}^{-1}$), esto nos indica que hay una baja movilidad del mercurio a la parte aérea de la planta, por ende, la mayor concentración de Hg se presenta en la raíces, coincidiendo con lo reportado por Millán et al., (2014) en un estudio llevado a cabo con la especie *Typha domingensis*, realizado en altas concentraciones de Hg, en el cual mostró una

tendencia similar donde la planta fitoestabiliza el metal en la parte subterránea. Este comportamiento permite suponer que la planta, acumula el metal en sus raíces actuando como una barrera que impide que este llegue a las partes superiores de la planta, evitando efectos tóxicos de Hg, como, por ejemplo; necrosis, clorosis, inhibición de sus procesos fotosintéticos (Ortega, 2011).

Sin embargo, algunos valores de FT fueron mayores a 1, indicando una capacidad de la planta para transportar el Hg a su zona aérea. Este comportamiento de fitoextracción, es mostrado en las variedades Fedearroz 67 y Fedearroz 68 donde la concentración de mercurio era baja en el suelo ($86 \mu\text{g Hg/kg}^{-1}$), demostrando que estas variedades de arroz realizan procesos de extracción de mercurio dependiendo de la textura de suelo y la concentración de Hg en el suelo.

Por otro lado, el FB fue menor a 1 en cada uno de los órganos evaluados, indicando que la planta cuando se encuentra sometida a altas concentraciones de Hg en el suelo es menos eficiente para bioacumular el metal pesado en sus tejidos. Asimismo, Ortega, (2011) reporto en Caña Flecha (*Gynerium sagittatum*) un coeficiente de bio-acumulación de HgT de 0,75 para las raíces y de 0,2 en los tallos y hojas, cuando estuvo bajo una concentración de $75 \mu\text{g Hg/g}^{-1}$ durante un tiempo de 60 días, pero este factor en las raíces aumentaba cuando la concentración de Hg disminuía en el suelo. Cabe resaltar que en la investigación los valores máximos de bio-acumulación se obtuvieron en la raíz, demostrando que las raíces de las plantas juegan un papel importante para la fitorremediación, ya que son las principales partes de la planta en contacto con el contaminante; además la planta captura y estabiliza el contaminante en sus raíces (Torres, 2018).

De lo anterior, se puede concluir que las variedades de arroz evaluadas son resistentes a las altas concentraciones de mercurio, concentrándolo principalmente en su raíz. Pero a pesar de esta condición estas variedades no pueden ser usadas como agentes fitorremediadores de Hg, puesto que este cultivo es de ciclo corto y el metal retornaría nuevamente al suelo; sin contar la cantidad de Hg que se queda acumulado en el grano cosechado causando daños a salud humana.

3.7 BIODISPONIBILIDAD DE Hg EN LOS SUELOS CONTAMINADOS.

La biodisponibilidad es el contenido de mercurio en el suelo disponible para la planta, partiendo de esto, en la investigación se utilizaron dos suelos que diferían entre sí solo por la textura; para la evaluación de la biodisponibilidad de metal en el suelo se realizó después de cosechadas las plantas de arroz. En el ensayo 1 (Textura Franco Arcillo Limosa) la fracción de Hg disponible alcanzó valores de < 0,1 hasta 0,29 $\mu\text{g Hg/kg-1}$, teniendo un 0,0029 % de la concentración de Hg más alta (10.000 $\mu\text{g Hg/kg-1}$) (Tabla 5). Para el ensayo 2 (Textura Arcillo Limosa) el mercurio disponible presentó valores desde < 0,1 hasta 0,26 $\mu\text{g Hg/kg-1}$, con un porcentaje de 0,0026 de la concentración de Hg máxima (10.000 $\mu\text{g Hg/kg-1}$) (Tabla 4).

Tabla 6: Resultado de Biodisponibilidad de Hg en el suelo Arcillo Limoso donde se sembró las variedades Fedearroz 2000 y Fedearroz 473.

Suelo	Concentración ($\mu\text{g/kg}^{-1}$)	Variedad	Biodisponibilidad ($\mu\text{g Hg/kg}^{-1}$)
Arcillo Limoso	86	Fedearroz 2000 Fedearroz 473	<0,10
	500		<0,10
	1.000		0,17
	2.500		<0,10
	5.000		<0,10
	10.000		0,26

Tabla 7: Resultado de Biodisponibilidad de Hg en el suelo Franco Arcillo Limoso donde se sembró las variedades Fedearroz 67 y Fedearroz 68.

Suelo	Concentración ($\mu\text{g/kg}^{-1}$)	Variedad	Biodisponibilidad ($\mu\text{g Hg/kg}^{-1}$)
Franco Arcillo Limoso	86	Fedearroz 67 Fedearroz 68	<0,10
	500		<0,10
	1.000		0,13
	2.500		0,12
	5.000		0,13
	10.000		0,29

En ambos ensayos las cantidades de Hg disponible fueron bajas frente a las concentraciones de Hg en el suelo, esto se debe al mecanismo de fitoestabilización que realizan las variedades de *Oryza sativa* L. (Fedearroz 2000, Fedearroz 473, Fedearroz 67 y Fedearroz 68), el cual consiste en desarrollar el sistema denso de raíces que le permite reducir la biodisponibilidad y la movilidad de los contaminantes evitando el transporte a las capas subterráneas o a la atmosfera (Ortega, 2011). Asimismo, demostró Dec y Bollang, (1994) que la especie *Raphanus sativus*, desarrolla su sistema radicular en un año y durante ese mismo tiempo absorben compuestos fenólicos, removiendo hasta el 90 % de la concentración inicial del metal. Según Rengel, (2015), las plantas exudan una variedad de compuestos orgánicos (Aniones carboxilato, fenólicos, carbohidratos, aminoácidos, enzimas, etc.) e iones inorgánicos (Protones, fosfato, etc.) para cambiar la química y la biología de la rizosfera y aumentar la disponibilidad de los metales en el suelo.

Por otra parte, la disponibilidad y movilidad de los metales en el suelo está determinada por diferentes propiedades fisicoquímicas del suelo, entre ellas: el pH, el contenido y tipo de materia orgánica y arcillas, los óxidos, los carbonatos y el potencial redox (Lago, 2018). En este orden de ideas, los suelos se caracterizaron por pH neutro o ligeramente ácido; un contenido de materia orgánica de 2,42%; sin embargo, el suelo Arcillo Limoso presentó una fracción de arcilla y arena de 41% y 7,5%, respectivamente y el suelo Franco Arcillo Limoso una fracción de arcilla del 40,3% y arena de 18,9% (Anexo 1, 2). De acuerdo con Gaona, (2004), el mercurio es bastante soluble y móvil, suele formar complejos con la materia orgánica (Sobre todo ácido fúlvicos y húmicos) y arcillas de los suelos; este comportamiento limita en gran medida la movilidad de Hg en los suelos, haciendo que éstos actúen como grandes reservas de Hg antropogénicos.

Los resultados nos muestran que el Hg en los dos suelos contaminados fue disponible para las plantas. No obstante, el suelo Franco Arcillo Limoso la disponibilidad fue mayor comparado con el suelo Arcillo Limoso. Esta diferencia de disponibilidad Hg, está relacionada a las proporciones de arenas y no a las proporciones de arcillas, debido a la mayor cantidad de arenas del suelo Franco Arcilloso Limoso, hace que la condición eléctrica del suelo cambie, influyendo en la capacidad de intercambio catiónico (CIC), disponibilidad de los nutrientes y la capacidad de fijación del suelo; atenuando un poco la expresión de las arcillas. Según Pérez, (2005), las arcillas poseen un CIC elevada, por lo que tienden a retener los cationes de los metales pesados. Por otra parte, la textura es determinante en la fijación de los metales, ya que una textura fina implica una disminución del tamaño de partícula, un aumento de la superficie reactiva, por lo tanto, un aumento de la CIC, al aumentar la carga de la superficie.

3.8 GERMINACIÓN E INDICE DE VELOCIDAD DE GERMINACIÓN (IVG) DE LAS CUATRO VARIEDADES.

El ensayo se llevó acabo en un invernadero con una temperatura promedio de 34°C y una humedad relativa promedio de 56%. A partir del tercer día de sembradas las semillas de arroz en el medio limpio, se empezó a realizar el conteo de semillas germinadas hasta el onceavo día. Los datos registrados en el último día del conteo se procesaron y se compararon para determinar la posible afectación del mercurio en la germinación de la semilla de arroz.

Figura 25: Porcentaje de germinación e índice de velocidad de germinación de las semillas de la variedad Fedearroz 2000.

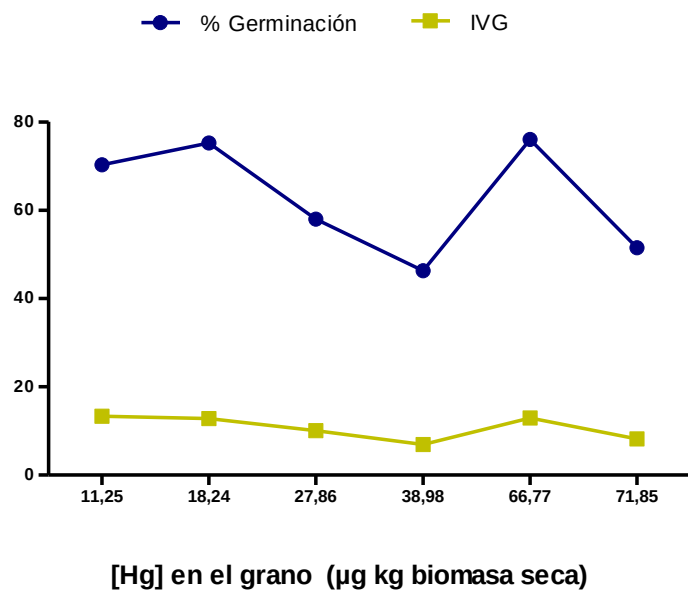


Figura 26: Porcentaje de germinación e índice de velocidad de germinación de las semillas de la variedad Fedearroz 473.

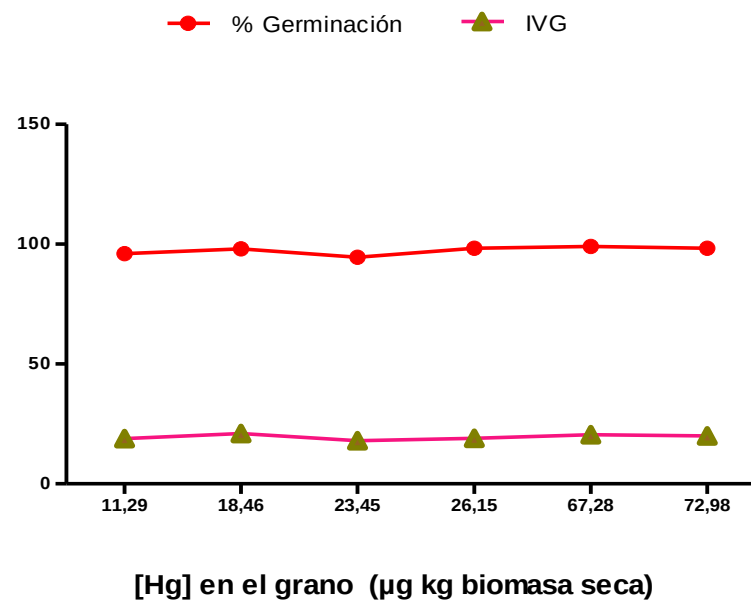


Figura 27: Porcentaje de germinación e índice de velocidad de germinación de las semillas de la variedad Fedearroz 67.

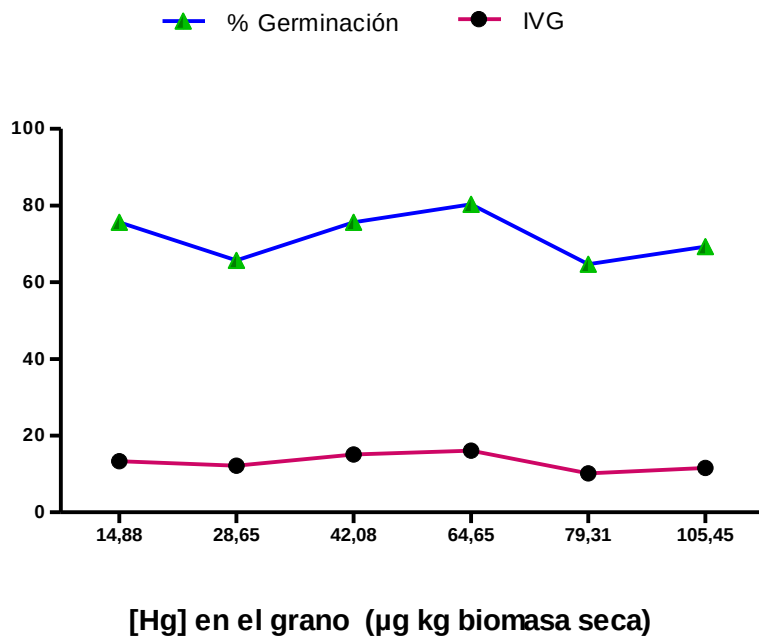
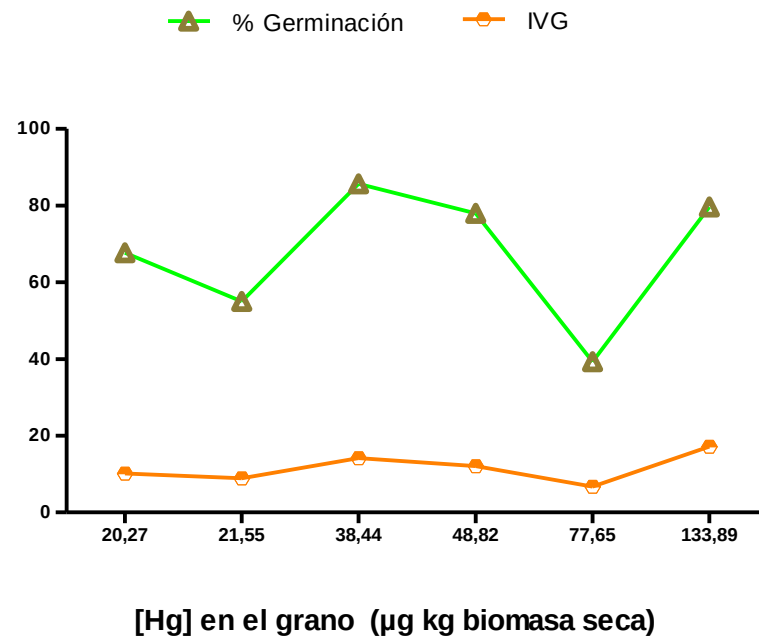


Figura 28: Porcentaje de germinación e índice de velocidad de germinación de las semillas de la variedad Fedearroz 68.



Al analizar el porcentaje de germinación de las cuatro variedades comerciales de arroz, se puede observar que la variedad Fedearroz 473 mostró el porcentaje de germinación más alto de 99% en una concentración de 67,28 $\mu\text{g Hg/kg}$ biomasa seca de grano; también se evidenció en las demás concentraciones de Hg, valores medios superiores al 90% (Figura 26). En cambio, las variedades Fedearroz 2000, Fedearroz 67, Fedearroz 68 alcanzaron porcentajes de germinación de 76%, 80%, 85% en concentraciones de 66,77; 64,65; 38,44 $\mu\text{g Hg/kg}$ biomasa seca de grano, respectivamente (Figuras 25, 27, 28). Por otra parte, las variedades presentaron un comportamiento desuniforme, es decir, que en la medida que la concentración de Hg en la semilla aumenta, no hay un aumento o disminución del porcentaje de germinación, lo que indica que de las concentraciones de Hg no influyeron en la germinación de la semilla. Cabe resaltar que las semillas utilizadas fueron obtenidas de la cosecha del experimento, por ende, éstas contenían Hg acumulado por la planta en su proceso de extracción.

En el caso de las diferencias de porcentaje de germinación entre las variedades, se puede deber a la composición genética de cada variedad y a la viabilidad de la semilla. La viabilidad de un lote de semillas es el resultado de interacciones de varias características de las semillas: constitución genética; condiciones ambientales y nutricionales a que ha estado sometida la planta madre; el grado de madurez; tamaño, peso y densidad de la semilla; contaminación de patógenos; entre otras (Pérez y Pita, 2001). Lo que indica que las semillas no germinadas de las variedades Fedearroz 2000, Fedearroz 67 y Fedearroz 68, no presentaron un tamaño, peso y reservas nutricionales necesarias para la germinación; en cuanto, a patógenos no observamos afectaciones por hongos e insectos.

Considerando que la emergencia empezó tres días después de la siembra, los valores máximos de IVG se presentaron en Fedearroz 473, los cuales estuvieron entre 17,97 y 20,98; comportamiento similar a la dinámica de germinación en el tiempo y al porcentaje de germinación final. En el caso de Fedearroz 2000, Fedearroz 67 y Fedearroz 68 mostraron valores bajos de IVG con respecto a los obtenidos por Fedearroz 473, esto se puede deber a que las semillas presentaron diferencias en la permeabilidad de las cubiertas que retrasó la imbibición de las semillas (Anexo 21, 22). De acuerdo con Martínez et al., (2010), la imbibición como primera etapa de la germinación influye en este parámetro, ya que la velocidad de imbibición depende de la composición química de la semilla, permeabilidad de cubierta de la semilla, la diferencia de potencial hídrico y el espesor de los tejidos de almacenamiento.

4. CONCLUSIONES.

Las cuatro variedades comerciales de *Oryza sativa* L. tienen la capacidad de acumular Hg en sus tejidos, siendo las raíces la parte que presenta mayor concentración; pero, las variedades Fedearroz 2000 y Fedearroz 473 sembradas en el suelo Arcillo Limoso retuvieron más Hg en sus raíces que las variedades Fedearroz 67 y Fedearroz 68 sembradas en el suelo Franco Arcillo Limoso.

Las concentraciones medias de Hg en el grano pilado en el testigo ($86 \mu\text{g Hg/kg}^{-1}$), para Fedearroz 67 y Fedearroz 68 fue $8,10 \mu\text{g Hg/kg}$ de biomasa seca y para Fedearroz 2000 y Fedearroz 473 fue $4,39 \mu\text{g Hg/kg}$ de biomasa seca, las cuales no superan los límites establecidos por la Agencia Nacional de Normalización de China; sin embargo, en la concentración de Hg más alta ($10.000 \mu\text{g Hg/kg}^{-1}$) se sobrepasa este límite, indicando que si hay un aumento en la contaminación de Hg en los suelos de la Sub-región de La Mojana, el arroz que se produzca en esta zona provocara daños a la salud de los consumidores de este cereal.

Se estableció que las plantas de arroz presentaron a los 49 DDE (Fedearroz 67 y Fedearroz 68), y 52 DDE (Fedearroz 2000 y Fedearroz 473), un necrosamiento del ápice de las hojas considerándose como una leve intoxicación por Hg, demostrando que estas variedades son tolerantes altas concentraciones de Hg.

El FB y FT fue menor a 1 en la concentración $10.000 \mu\text{g Hg/kg}^{-1}$ en las cuatro variedades de arroz, indicando que la planta cuando se encuentra sometida altas concentraciones de Hg en el suelo es menos eficiente para transportar el Hg a las partes aéreas. En cambio, las variedades Fedearroz 67 y Fedearroz 68, el FT fue mayor a 1 en la concentración testigo, presentando una mayor translocación de Hg.

Mientras que la bio-acumulación de Hg en las raíces de las variedades de arroz está relacionada con la concentración de Hg presente en el suelo, la capacidad de bio-acumulación de tallos, hojas y granos está relacionada con la capacidad de translocación de Hg a través de las raíces.

Las concentraciones de Hg en el grano, no afectaron la germinación de las semillas de las variedades comerciales de *Oryza sativa* L., obteniendo porcentajes de germinación hasta del 99% en la variedad Fedearroz 473 con una concentración de $67,28 \mu\text{g Hg/kg}$ de biomasa seca de grano.

BIBLIOGRAFÍA.

- Acevedo, M. A., Castrillo, W. A., y Belmonte, U. C. (2006).** Origen, evolución y diversidad del arroz. *Agronomía Tropical*, 56(2), 151-170. Recuperado de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0002-192X2006000200001&lng=es&tlng=es
- Acosta, V., Lodeiro, C., Senior, W., y Martínez, G. (2002).** Niveles de metales pesados en sedimentos superficiales en tres zonas litorales de Venezuela. *Interciencia*, 27(12). Recuperado de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442002001200007
- Adamo, P., Iavazzo, P., Albanese, S., Agrelli, D., De Vivo, B., y Lima, A. (2014).** Bioavailability and soil-to-plant transfer factors as indicators of potentially toxic element contamination in agricultural soils. *Science of the Total Environment*, 500, 11-22.
- Adriano, D. C. (2001).** Mercury. En: Trace elements in the Terrestrial Environments. 2nd Edition, Springer, New York. EE. UU, pp 411-458.
- Antoniadis, V., Levizou, E., Shaheen, S. M., Ok, Y. S., Sebastian, A., Baum, C., y Rinklebe, J. (2017).** Trace elements in the soil-plant interface: Phytoavailability, translocation, and phytoremediation—A review. *Earth-Science Reviews*, 171, 621-645.
- Arenas Moya, S., y Hernández, S. A. (2015).** Fitotoxicidad del Cadmio (Cd) y el Mercurio (Hg) en la especie *Brassica nigra* (tesis de pregrado). Universidad del Sur de Medellín.
- Argumedo, M., Consuegra, A., Vidal, J. V., y Marrugo, J. L. (2013).** Exposición a mercurio en habitantes del municipio de San Marcos (departamento de Sucre) debida a la ingesta de arroz (*Oryza sativa* L.) contaminado. *Rev. Salud Pública.*; 15(6): 903-915
- Argumedo, M., Vergara, C., Vidal, J. V y Marrugo, J. L. (2015).** Evaluación de la concentración de mercurio en arroz (*Oryza sativa* L.) crudo y cocido

procedente del municipio de San Marcos – Sucre y zona aurífera del municipio de Ayapel – Córdoba. *Revista de la Universidad Industrial de Santander. Salud* Vol. 47 No. 2.

Bargagli, R. (2016). Moss and lichen biomonitoring of atmospheric mercury: A review. *Science of the Total Environment*, 572, 216–231. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.202>

Barrett, J. R. (2010). Rice is a significant source of methylmercury: research in china assesses exposures. *Environ Health Perspect*, 118(9): A398.

Barrios, M. B., Buján, A., Debelis, S. P., Sokolowski, A. C., Blasón, Á. D., Rodríguez, H. A.,... Gagey, M. C. (2014). Relación de raíz/biomasa total de Soja (*Glycine max*) en dos sistemas de labranza. *Terra Latinoamericana*, 32 (3), 221-230.

Basta N. T., Ryan J. A. y Chaney R. L. (2005). Trace element chemistry in residual-treated soil: Key concepts and metal bioavailability. *J. Environ. Qual.* 34, 49-63

Brasil. (2009). Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Regras para análises de sementes. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília, DF: Mapa/ACS, 395p.

Caiza, G. F. (2018). Mercurio en el suelo. Contaminación y remediación. (Tesis de Doctorado). Universidad Complutense.

Cavallini, A., Natali, L., Durante M., y Masert, B. (2008). Mercury uptake, distribution and DNA affinity in durum wheat (*Triticum durum* Desf.) plants. *Sci. of The Total Environ.* 243:119-127.

CENTA, Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal. (2018). Cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.). Programa de granos básicos. Recuperado de http://centa.gob.sv/docs/guias/granos%20basicos/Guia%20Centa_Arroz%202019.pdf

- Cerqueira, B., Vega, F.A., Silva, L.F.O., y Andrade, L. (2012).** Effects of vegetation on chemical and mineralogical characteristics of soils developed on a decantation bank from a copper mine. *Science of the Total Environment*. 421-442: 220-229.
- Chica, J., Tirado, Y. C., y Barreto, J. M. (2016).** Indicadores de competitividad del cultivo del arroz en Colombia y Estados Unidos. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 33(2), 16-31.
- CIAT, Centro Internacional de Agricultura Tropical. (2005).** Morfología de la Planta de Arroz. Recuperado de https://www.betuco.be/rijst/Morfologia_planta_arroz.pdf
- Cobbett, C. (2000).** Phytochelatins and their roles in heavy metal detoxification. *Plant Physiology*. 123:825-832.
- Correa, A. R. (2017).** Desarrollo socio-económico regional: Impactos de la minería artesanal en el Bajo Cauca antioqueño, *Revista Internacional de Cooperación y Desarrollo*, Vol. 4 (1), 46-61 pp.
- Correa, W. A. (2017).** Variación espacial y estacional de acumulación de mercurio en el helecho *Thelypteris hispidula* en la cuenca alta río Felidia, Parque Nacional Natural Farallones de Cali. Universidad Nacional de Colombia (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia.
- DANE, Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2019).** Encuesta Nacional de Arroz Mecanizado (ENAM). Primer semestre 2019. Boletín técnico. Recuperado de <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario/encuesta-de-arroz-mecanizado>
- Dec, J., y Bollang, J. (1994).** Use of plant material for the decontamination of water polluted with phenols. *Biotechnol. Bioeng.* 44:1132-1139.
- Degiovanni, V. M., Berrío, L. E., y Charry, R. E. (2010).** Origen, taxonomía, anatomía y morfología de la planta de arroz (*Oryza sativa* L.) .In: Degiovanni, V. M.; Martínez, C. P.; Motta O., Francisco (eds.). Producción

eco-eficiente del arroz en América Latina. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, CO. p. 35-59.

Degiovanni, V. M., Gómez, J. A., Sierra, J. M., (2004). Análisis de crecimiento y etapas de desarrollo de tres variedades de arroz (*Oryza sativa* L.) en Montería, Córdoba. *Temas agrarios vol. 9* (1).

Díaz, O., Encina, F., Chuecas, L., Becerra, J., Cabello, J., Figueroa, A., y Muñoz, F. (2001). Influencia de variables estacionales, espaciales biológicas y ambientales en la bioacumulación de mercurio total y metilmercurio en *Tagelus dombeii*. *Revista de Biología Marina Y Oceanografía*. Recuperado de <https://doi.org/10.4067/S0718-19572001000100003>

Dunham, S., Mishra, B., Myneni, S., y Fei, J. (2015). The effect of natural organic matter on the adsorption of mercury to bacterial cells. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 150: 1–10.

Durango, J. H., Díaz, L. F., Marrugo, N. J., Cruz E.A., y Enamorado M. G. (2016). Evaluación de la capacidad fitoestabilizadora de mercurio por parte de la Cebolla (*Allium Cepa* L), en cultivos hidropónicos. *Revista de la Asociación Colombiana de Ciencia y Tecnología de Alimentos*. Vol. 24, No 39.

Esteban, E. (2008). Transferencia suelo-planta de los metales pesados. Dpto. de Química Agrícola. Universidad Autónoma de Madrid. En Contaminación de suelos, tecnologías para la recuperación. Serie de ponencias. (Eds. Rocío Millán y Carmen Lobo) CIEMAT.

Falandysz, J. (2017). Mercury accumulation of three *Lactarius* mushroom species. *Food. Chemistry*, 214, 96–101. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.07.062>

Fedearroz, (2020). Semillas de arroz certificadas. Recuperado de <http://www.fedearroz.com.co/new/index.php>

Fedearroz. (2014). Informe evaluación impacto de la sequía en el cultivo del arroz en la subregión de la Mojana. Recuperado de http://www.fedearroz.com.co/doc_economia/Evaluacion_Sequia_Mojana_2014.pd.

Fedearroz. (2019). Producción de Arroz Paddy Seco en Colombia. Recuperado de http://www.fedearroz.com.co/new/apr_public.php

Fernández, R., Larios, R., Gómez, I., Gómez, B., López, S., Loredó, J., y Rucandío, I. (2015). Mercury accumulation and speciation in plants and soils from abandoned cinnabar mines. *Geoderma*, 253–254, 30–38.

Franquet, J.M., y Borrás, C. (2004). Variedades y mejora del arroz (*Oryza sativa*, L.). Universidad Nacional de Catalunya. Barcelona, España.

Fujimura, M., Usuki, F., Sawada, M., y Takashima, A. (2009). Methylmercury induces neuropathological changes with tau hyperphosphorylation mainly through the activation of the c-jun-N-terminal kinase pathway in the cerebral cortex, but not in the hippocampus of the mouse brain. *Neurotoxicology*. 30(6):1000-7.

Galán, E., Romero, A. (2008). Contaminación de suelo por metales pesados. *Revista de la sociedad española de mineralogía*, 10: 48-60.

Gaona, J. (2004). El mercurio como contaminante global. Desarrollo de metodologías para su determinación en suelos contaminados y estrategias para la reducción de su liberación al medio ambiente (Tesis de doctorado). Universidad Autónoma de Barcelona.

Gentés, S., Maury, R., Guyoneaud, R., Monperrus, M., André, J.-M., Davail, S., y Legeay, A. (2013). Mercury bioaccumulation along food webs in temperate aquatic ecosystems colonized by aquatic macrophytes in south western France. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 91, 180–7.

HO, P.T. (1969). The loess and origin of chinese agriculture. *Amer. Historical Review*, 75:1-36.

- Horvart, M., Nolde, N., Fajon, V., Jereb, V., Logar, M., Lojen, S., Jacimovic, R., Falnolga, I., Liya, Q., Faganeli, J., y Drobne, D. (2003).** Total mercury, methylmercury and selenium in mercury polluted areas in the province Guizhou, China. *The Science of The Total Environment*, 304, 231-256.
- Huguet, L., Castelle, S., Schäfer, J., Blanc, G., Maury-Brachet, R., Reynouard, C., & Jorand, F. (2010).** Mercury methylation rates of biofilm and plankton microorganisms from a hydroelectric reservoir in French Guiana. *Science of the Total Environment*, 408(6), 1338–1348.
- Jarma, A., Degiovanni, V., y Montoya, R. (2010).** Índices fisiotécnicos, fases de crecimiento y etapas de desarrollo de la planta de arroz *Oryza sativa* L.) .In: Degiovanni, V. M.; Martínez, C. P.; Motta O., Francisco (eds.). Producción eco-eficiente del arroz en América Latina. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, CO. p. 60-82.
- Kamari, A., Yusoff, M., Najiah, S., Putra, W. P., Ishak, C. F., Hashim, N., y Phillip, E. (2014).** Metal uptake in water spinach grown on contaminated soil amended with chicken manure and coconut tree sawdust. *Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)*, 13(9).
- Lago, V. M. (2018).** Biodisponibilidad de metales pesados en suelos contaminados, Universidad de Vigo (Tesis de doctorado). Universidad de Vigo, España.
- Li, B., Shi, J. B., Wang, X., Meng, M., Huang, L., Qi, X. L., y Ye, Z. H. (2013).** Variations and constancy of mercury and methylmercury accumulation in rice grown at contaminated paddy field sites in three Provinces of China. *Environmental pollution*, 181, 91.
- Liu, C., Wu, C., Rafiq, M., Aziz, R., Hou, D., Ding, Z., Lin, Z., Lou, L., Feng, Y., Li, T., y Yang, X. (2013).** Accumulation of mercury in rice grain and cabbage grown on representative Chinese soils. *Biomedicine & Biotechnology*, 14(12):1144-1151.
- López, I., Sierra, M. J., Rodríguez, J., y Millán, R. (2014).** Estudio de la absorción y distribución de mercurio en *Nerium oleander* L. en la ribera del río Valdeazogues (Estación de Chillón-Almadén). *Ciemat*, 67(14), 41pp.

- Maguire, J. D. (1962).** Speed of germination aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. *Crop Sci.* 2(1):176-177.
- Marrugo, J., Durango, J., Pinedo, J., Olivero, J., y Díez, S. (2015).** Phytoremediation of mercury-contaminated soils by *Jatropha curcas*. *Chemosphere*, Vol. 127, 58–63.
- Marrugo, J., Marrugo, S., Pinedo, J., Durango, J., y Díez, S. (2016).** Screening of native plant species for phytoremediation potential at a Hg-contaminated mining site. *Science of the Total Environment*, 542, 809–816. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.117>
- Marrugo, J., Pinedo, J., Paternina, R., Quiroz, L., y Pacheco, S. (2018).** Distribución espacial y evaluación de la contaminación ambiental por mercurio en la región de la Mojana, Colombia. *Revista MVZ Córdoba*, vol. 23
- Martínez, J., Virgen, J., Peña, M., y Santiago, A. (2010).** Índice de velocidad de emergencia en líneas de maíz. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 1(3), 289-304.
- Meagher, R., y Heaton, A. (2005).** Strategies for the engineered phytoremediation of toxic element pollution: mercury and arsenic. *J. of Ind. Microb. and Biotech*, 32:502-513.
- Medina, M. K., y Montano, Y. (2013).** Determinación del factor de bioconcentración y traslocación de metales pesados en el *Juncus arcticus* willd. y *Cortaderia rudiusscula* stapf, de áreas contaminadas con el pasivo ambiental minero alianza – Ancash (Tesis de pregrado) Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo Caiza.
- Méndez, O., y Raina M. (2008).** Phytoremediation of mine tailings in temperate and arid environments. *Rev. in Environ. Sci. and Biotech*, 7:47-59.
- Méndez, P. (2019).** Tendencias bajistas de los precios mundiales del arroz. Informativo mensual del mercado mundial del arroz - Enero 2019 n°179.

- Meng, B., Feng, X. B., Qiu, G. L., Wang, D. Y., Liang, P., Li, P., y Shang, L. H. (2012).** Inorganic mercury accumulation in rice (*Oryza sativa* L.). *Environ. Toxicol. Chem.*, 31 (9), 2093–2098.
- Meng, B., Feng, X., Qiu, G., Cai, Y., Wang, D., Li, P., Shang, L., y Sommar, J. (2010).** Distribution Patterns of Inorganic Mercury and Methylmercury in Tissues of Rice (*Oryza sativa* L.) Plants and Possible Bioaccumulation Pathways. *J. Agric. Food Chem.*, 58, 4951–4958.
- Meng, B., Feng, X., Qui, G., Anderson, C., Wang, J., y Zhao, L. (2014).** Localization and Speciation of Mercury in Brown Rice (*Oryza sativa* L) with Implications for Pan-Asian Public Health. *Environ Sci. Technol.* 48, 7974–798.
- Millán, R., Gamarra, R., Schmid, T., Sierra, M.J., Quejido, A, Sánchez, D.M., Cardona, A.I., Fernandez, M., y Vera, R. (2006).** Mercury content in vegetation and soils of Almaden mining área (spain). *Science of the Total Enviroment*, 368, 79-87.
- Millán, R., Lominchar, M. A., Rodríguez-Alonso, J., Schmid, T., y Sierra, M. J. (2014).** Riparian vegetation role in mercury uptake (Valdeazogues River, Almadén, Spain). *Journal of Geochemical Exploration*, 140.
- Moreno, F., Anderson, C., Stewart, R., y Robinson, B. (2005).** Mercury volatilisation and phytoextraction from base-metal mine tailings. *Environ. Poll.* 136:341-352.
- Naidu, R., Bolan, N. S., Megharaj, M., Juhasz, A. L., Gupta, S. K., Clothier, B. E., y Schulin, R. (2008).** Chemical bioavailability in terrestrial environments, chapter. In: Hartemink AE, McBratney AB, Naidu R (eds) Chemical bioavailability in terrestrial environments. *Developments in soil science*, vol. 32.

- Núñez, S. C. (2017).** Biocumulación, toxicidad e interacción de metilmercurio y especies de selenio (Tesis de doctorado). Universidad Complutense de Madrid.
- Olmos, S. (2007).** Apunte de morfología, fenología, ecofisiología, y mejoramiento genético del arroz. UNNE. Facultad de Ciencias Agrarias.
- Ortega, R. E. (2011).** Potencial de bioacumulación de mercurio (hg) por Caña Flecha (*Gynerium sagittatum*) (Aubl) Beauv en condiciones in vitro (Tesis de maestría). Sistema de Universidades Estatales del Caribe Colombiano, Sur-caribe.
- Palencia, G., Mercado, T., y Combatt, E. (2006).** Estudio Agro meteorológico del departamento de Córdoba. Universidad de Córdoba, Montería, 126p.
- Pérez, F., & Pita, J. M. (2001).** Viabilidad, vigor, longevidad y conservación de semillas. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Secretaria General de Estructuras.
- Pérez, G. (2005).** Disponibilidad de los metales tóxicos en sitios contaminados aplicación y limitaciones de la fraccionación en la determinación de gradientes de polución (Tesis de doctorado). Universidad autónoma de Barcelona.
- Pérez, H. M., Vidal, J. V., y Marrugo, J. L. (2014).** Evaluación de la capacidad acumuladora de mercurio del ají (*Capsicum annuum*). *Revista de Salud Pública*. Vol. 16 (6): 897-909.
- Qui, G., Feng, X., Li, P., Wang S., Li, G., y Shang, L. (2008).** Methylmercury accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) grown at abandoned mercury mines in Guizhou, China. *Agr Food Chem*, 56: 2465-2468.
- Químicos, P. P. (2002).** Evaluación mundial sobre el mercurio. *Ginebra, Suiza*. PNUMA Productos Químicos.

- Ramírez, A. (2008).** Intoxicación ocupacional por mercurio. *Anales de la Facultad de Medicina*, 69(1), 46-51. Recuperado de http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1025-55832008000100010
- Rengel, Z. (2015).** Disponibilidad de Mn, Zn y Fe en la rizosfera. *Revista de ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 15(2), 397- 409.
- Rezania, S., Ponraj, M., Talaiekhosani, A., Mohamad, S. E., Md Din, M. F., Taib, S. M., y Sairan, F. M. (2015).** Perspectives of phytoremediation using water hyacinth for removal of heavy metals, organic and inorganic pollutants in wastewater. *Journal of Environmental Management*, 163, 125–133. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.08.018>
- Ruiz, E.A., y Armienta, M. A. (2012).** Acumulación de arsénico y metales pesados en maíz en suelos cercanos a jales o residuos mineros. Universidad Nacional Autónoma de México. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 28 (2) 103-117.
- Saavedra, E. (2010).** Época de siembra en La Doctrina, Córdoba. *Fedearroz*, 485(58)
- Sepúlveda, L., Agudelo, L., y Arengas, A. (2006).** El mercurio, sus implicaciones en la salud y en el ambiente. *Revista Luna Azul*, vol. 4.
- Sierra, M. J. (2008).** Alternativas de uso agrícola para suelos con altos contenidos de mercurio: Aplicación a la comarca Minera de Almadén (Tesis de doctorado). Universidad Autónoma de Madrid, España.
- Sierra, M. J., Millan, R., y Esteban, E. (2008).** Potential use of *Solanum melongena* in agricultural areas with high mercury background concentrations. *Food and Chemical Toxicology*, 46 (6), 2143–2149
- Sobrino, J., Ortega, C., Flores, M., Escobar, C., Del campo, F., y Hernández, L. (2009).** Differential alterations of antioxidant defenses as bioindicators of mercury and cadmium toxicity in alfalfa. *Chemosphere*. 77(7):94654.

- Stokes, J. D., Paton, G. I., y Semple, K. T. (2005).** Behaviour and assessment of bioavailability of organic contaminants in soil: relevance for risk assessment and remediation. *Soil Use and Management*. 21: 475-486.
- Torres, A. M. (2018).** “Factor de bioconcentración y translocación de especies Altoandinas para suelos contaminados con metales pesados provenientes de la planta concentradora de Mesapata, en condiciones de invernadero, 2015 - 2016” (Tesis de pregrado). Universidad Nacional “Santiago Antúnez de Mayolo” de Perú.
- Urango, M. D. P., y Marrugo, J. L. (2016).** Estrategias para disminuir la absorción de mercurio en arroz (*Oryza sativa*) cultivado en suelos contaminados.
- 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.
- Válega, M., Lima, A., Figueira, E., Pereira, E., Pardal, M., y Duarte, A. (2009).** Mercury intracellular partitioning and chelation in a salt marsh plant, *Halimione portulacoides* (L.) Aellen: strategies underlying tolerance in environmental exposure. *Chemosphere*. 74(4):530-6.
- Valero, J. O., (2019).** Dinámica de absorción de los macroelementos en el cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.) bajo condiciones de riego (tesis de pregrado) Universidad técnica de Babahoyo.
- Vargas, J. P. (2010).** El arroz y su medio ambiente. In: Degiovanni, V. M.; Martínez, C. P.; Motta O., Francisco (eds.). Producción eco-eficiente del arroz en América Latina. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, CO. p. 60-82.
- Vega, J. (2012).** Cáscara de arroz molida para nutrición animal. Recuperado de <https://www.engormix.com/ganaderia-carne/foros/cascara-arroz-molida-nutricion-t15779/>
- Wang, Y., y Greger, M. (2004).** Clonal Differences in Mercury Tolerance, Accumulation, and Distribution in Willow. *J. Environ. Qual*, 33:1779-1785.

Weinberg, J. (2007). Introducción a la contaminación por Mercurio para las ONG. New York.

Wuana, R. A., y Okieimen, F. E. (2011). Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation. *Isrn Ecology*.

Yan, K., Dong, Z., Wijayawardena, M. A., Liu, Y., Naidu, R., Semple, K. (2017). Measurement of soil lead bioavailability and influence of soil types and properties: A review. *Chemosphere*. 184: 27-42.

Yap, C., Ismail, A., Tan, S., Omar, H., y Koyama, J. (2007). Tolerance of high inorganic mercury of *Perna viridis*: laboratory studies of its accumulation, depuration and distribution. *J. Appl. Sci. Environ. Manage.* Vol. 11(3):119-125.

Zhang, H., Feng, X., Larssen, T., Shang, L., y Li, P. (2010). Bioaccumulation of methylmercury versus inorganic mercury in rice (*Oryza sativa* L.) grain. *Environmental Science & Technology*, 44(12), 4499-4504.

ANEXOS.

Anexo 1: Análisis de las propiedades químicas del suelo.

LABORATORIO DE SUELOS Y AGUAS	UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA, Cra 6 #76-103 vía Cereté	Tel: 7818056
PROPIETARIO: JOSÉ PEROSA SIERRA	CORREGIMIENTO: MIRA FLORES	Email: labsuelosyaquas@correo.unicordoba.edu.co
FINCA: LUISA LORA	MUNICIPIO: MAJAGUAL	N° SERIE: 097
VEREDA:	DPTO: SUCRE	CÓDIGO: 050318S-6I
		FECHA DE EMISIÓN: 23/03/2018

MUESTRA		pH	M.O	S	P	Ca	Mg	K	Na	Al+H	CIC _e	Cu	Fe	Zn	Mn	B
No	Identificación	1:1	%	mg/kg		cmol ⁺ /kg						mg/kg				
		6,24	2,42	11,2	1,0	13,2	6,9	0,12	0,12	---	20,3	2,5	16,1	1,8	49,0	0,06
			C	D	D	A	A	D	B			C	D	D	A	D
FECHA EJECUCIÓN DE ENSAYO		20/03/18	16/03/18	14/03/18	15/03/18	16/03/2018				---	23/03/18	21/03/2018				13/03/18

MUESTRA		Relaciones de cationes				Porcentaje de saturación de cationes			
No	Identificación	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K	(Ca+Mg)/K	Ca	Mg	K	Na
		1,9	110,0	57,5	167,5	65,0	34,0	0,6	0,6

INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

A: Contenido Abundante o valor alto pero no excesivo.
B: Contenido Suficiente valor adecuado (Bueno)
C: Contenido Moderado o valor medio (Regular)
D: Contenido Deficiente o valor bajo (Pobre)
E: Contenido Excesivo o valor muy alto, puede ser perjudicial
F: Contenido Ínfimo o valor muy bajo (Muy pobre)

MÉTODOS DE ANÁLISIS

pH: relación suelo-agua 1:1, Potenciométrico (NTC 5264)	Acidez intercambiable (Al+H): KCl 1.0 M NTC-5263
Materia orgánica (M.O): Walkley-Black (NTC 5403)	Capacidad de intercambio catiónico efectiva (CIC_e): Suma de cationes (IGAC 6° Ed, 2006)
Azufre disponible (S): Monofosfato de calcio 0.008 M (IGAC 6° Ed, 2006)	Elementos menores (Cu, Fe, Zn, Mn): Doble ácido (NTC-5526. Numerales 5.1.3.3 y 5.4.3.)
Fósforo disponible (P): Bray II (IGAC 6° Ed, 2006)	Boro (B): HCl 0.05 M (NTC-5404. Numerales 4.1.2, 4.4.1.)
Ca, Mg, K, Na: Acetato de amonio 1.0 M a pH 7.00 (IGAC 6° Ed, 2006)	

 ENRIQUE COMBATT CABALLERO Director Lab. de Suelos y Aguas
--

- OBSERVACIONES:**
- Consulte a un Ingeniero Agrónomo o profesional del área de suelos.
 - Los resultados contenidos en el presente informe sólo son representativos de las muestras analizadas
 - El laboratorio conserva las muestras de los clientes por tres meses, cumplido ese tiempo son desechadas.
- * Este laboratorio hace parte de la red de laboratorios del programa CALS de la Sociedad Colombiana de La Ciencia del Suelo.

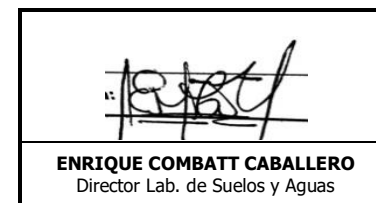
Anexo 2: Análisis de las propiedades físicas del suelo.

LABORATORIO DE SUELOS Y AGUAS	UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA , Cra 6 #76-103 vía Cereté	Tel: 7818056 Email: labsuelosvaquas@correo.unicordoba.edu.co
PROPIETARIO: JOSÉ PEROZA SIERRA	CORREGIMIENTO: MIRA FLORES	N° SERIE: 096
FINCA: LUISA LORA	MUNICIPIO: MAJAGUAL	CÓDIGO: 050318S-2I-5I
VEREDA:	DPTO: SUCRE	FECHA DE EMISIÓN: 23/03/2018

MUESTRA		TEXTURA				D.A	D.R	% HUMEDAD	CONSISTENCIA % Humedad			ESTABILIDADESTRUCTURAL	
No	Identificación	% A	% Ar	% L	Clase	(g/cm³)			LL	LP	IP	DPM	DGM
1	0-12CM	09	40	51	Arcillo Limoso	1.48							
2	12-28 CM	06	42	53	Arcillo Limoso	1.55							
3	28-50 CM	08	33	59	Franco Arcillo Limoso	1.59							
4	50-X CM	13	20.0	67.5	Franco Limoso	1.47							
FECHA DE EJECUCIÓN DEL ENSAYO		15/03/2018				21/03/18							

MÉTODOS DE ANÁLISIS

TEXTURA: Bouyoucos (IGAC 6° Ed, 2006)	% HUMEDAD : Gravimétrico (IGAC 6° Ed, 2006)
DENSIDAD APARENTE (D.A): Terrón parafinado (IGAC 6° Ed, 2006)	CONSISTENCIA: Atterberg (IGAC 6° Ed, 2006)
DENSIDAD REAL (D.R): Alcohol (IGAC 6° Ed, 2006)	ESTABILIDAD ESTRUCTURAL: Yoder (IGAC 6° Ed, 2006)



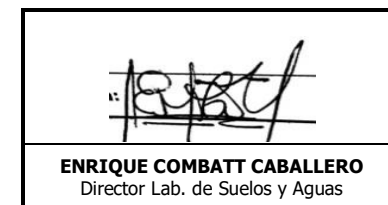
- OBSERVACIONES:**
- Consulte a un Ingeniero Agrónomo o profesional del área de suelos.
 - Los resultados contenidos en el presente informe sólo son representativos de las muestras analizadas
 - El laboratorio conserva las muestras de los clientes por tres meses, cumplido ese tiempo son desechadas.
- * Este laboratorio hace parte de la red de laboratorios del programa CALS de la Sociedad Colombiana de La Ciencia del Suelo.

LABORATORIO DE SUELOS Y AGUAS	UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA , Cra 6 #76-103 vía Cereté	Tel: 7818056 Email: labsuelosyaguas@correo.unicordoba.edu.co
PROPIETARIO: TESIS JOSÉ PEROZA SIERRA	CORREGIMIENTO:	N° SERIE: 346
FINCA: MIRA FLOREZ	MUNICIPIO: LA MOJANA	CÓDIGO: 190718S-II
VEREDA: MIRA FLOREZ	DPTO: SUCRE	FECHA DE EMISIÓN: 22/08/2018

MUESTRA		TEXTURA				D.A	D.R	% HUMEDAD	CONSISTENCIA % Humedad			ESTABILIDADESTRUCTURAL		
No	Identificación	% A	% Ar	% L	Clase	(g/cm³)			LL	LP	IP	DPM	DGM	
		18.9	40.3	40.8	Franco Arcillo Limoso									
FECHA DE EJECUCIÓN DEL ENSAYO		15/08/2018												

MÉTODOS DE ANÁLISIS

TEXTURA: Bouyoucos (IGAC 6° Ed, 2006)	% HUMEDAD : Gravimétrico (IGAC 6° Ed, 2006)
DENSIDAD APARENTE (D.A): Terrón parafinado (IGAC 6° Ed, 2006)	CONSISTENCIA: Atterberg (IGAC 6° Ed, 2006)
DENSIDAD REAL (D.R): Alcohol (IGAC 6° Ed, 2006)	ESTABILIDAD ESTRUCTURAL: Yoder (IGAC 6° Ed, 2006)



OBSERVACIONES:

- Consulte a un Ingeniero Agrónomo o profesional del área de suelos.
- Los resultados contenidos en el presente informe sólo son representativos de las muestras analizadas
- El laboratorio conserva las muestras de los clientes por tres meses, cumplido ese tiempo son desechadas.

* Este laboratorio hace parte de la red de laboratorios del programa CALS de la Sociedad Colombiana de La Ciencia del Suelo.

Anexo 3: Cuadrados medios del análisis de varianza para las [Hg] en cada uno de los órganos de planta en las variedades Fedearroz 67 y Fedearroz 68.

Factor	G.L	Raíz	Tallo	Hoja	Grano	Cascara
Variedad	1	1082744,3 **	6450,77**	169,43ns	22,5625 ns	3,67 ns
Concentración	5	25670002,33**	38686,79**	35161,34**	34810,37**	570,49 ns
Variedad*Concentración	5	3710195,31**	3748,93*	334,09ns	1275,28*	140,34 ns
Error	24	184421,62	4.444,49	11.762,98	2.066,59	1.098,65
Media		76842,32	185,19	490,12	86,11	45,78
C.V		29	23,46	36,01	22,99	42,44

*Diferencias significativas ($\alpha \leq 0.05$); G.L = Grados de libertad; C.V. = coeficiente de variación

Anexo 4: Comparación de medias del factor variedad para las [Hg] en cada uno de los órganos de planta en las variedades Fedearroz 67 y Fedearroz 68.

VARIEDAD	Raíz	Tallo	Hoja	Grano	Cascara
Variedad F-67	1132,0 a	44,6 b	63,65 a	39,58 a	16,26 a
Variedad F-68	768,0 b	71,39 a	59,30 a	41,16 a	15,62 a
Media	9,60	5,80	61,48	40,37	15,94
C.V	28,9	23	36,01	22,99	42,44

*Diferencias significativas ($\alpha \leq 0.05$); C.V. = coeficiente de variación

Anexo 5: Comparación de medias del factor concentración para las [Hg] en cada uno de los órganos de planta en las variedades Fedearroz 67 y Fedearroz 68.

[Hg] ($\mu\text{g}/\text{kg}^{-1}$)	Raíz	Tallo	Hoja	Grano	Cascara
86	57,5 d	12,35 c	28,10 c	8,10 e	9,47 a
500	243,2 d	30,23c	36,45 c	11,08 de	13,65 a
1.000	474,7 dc	63,23 b	43,85 c	26,63 dc	14,03 a
2.500	842,0 c	57,50 b	53,75 bc	38,87 c	17,87 a
5.000	1,726,1 b	67,8 b	92,33 ba	59,23 b	19,25 a
10.000	2413,9 a	116,9 a	114,37 a	98,30 a	21,38 a
Media	9,60	5,80	61,48	40,37	15,94
C.V	28,9	23,46	36,01	22,99	42,44

*Diferencias significativas ($\alpha \leq 0.05$); C.V. = coeficiente de variación

Anexo 6: Cuadrados medios del análisis de varianza para las [Hg] en cada uno de los órganos de la planta en las variedades Fedearroz 2000 y Fedearroz 473.

Factor	G.L	Raíz	Tallo	Hoja	Grano	Cascara
Variedad	1	112694,70 n.s	1,36 n.s	935,45*	346,69*	3,15 n.s
Concentración	5	14119311,11**	1986,68**	2627,64**	4004,97**	35,89**
Variedad*concentración	5	393476,79**	8,29 n.s	162,61 n.s	87,52 n.s	5,27 n.s
Error	36	78807,00	10,26	85,98	48,69	5,72
Media		1021,24	23,56	43,85	26,80	9,93
C.V		27,49	13,60	21,15	26,04	24,09

*Diferencias significativas ($\alpha \leq 0.05$); G.L = Grados de libertad; C.V. = coeficiente de variación

Anexo 7: Comparación de medias del factor variedad para las [Hg] en cada uno de los órganos de la planta en las variedades Fedearroz 2000 y Fedearroz 473.

Variedad	Raíz	Tallo	Hoja	Grano	Cascara
Variedad F-2000	972,75 a	23,39 a	48,27 a	29,49 a	9,67 a
Variedad F-473	1069,66 a	23,73 a	39,44 b	24,11 b	10,18 a
Media	1021,24	23,56	43,85	26,8	9,93
C.V	27,49	13,6	21,15	26,04	24,09

*Diferencias significativas ($\alpha \leq 0.05$); C.V. = coeficiente de variación

Anexo 8: Comparación de medias del factor concentración para las [Hg] en cada uno de los órganos de planta en las variedades Fedearroz 2000 y Fedearroz 473.

[Hg] ($\mu\text{g}/\text{kg}^{-1}$)	Raíz	Tallo	Hoja	Grano	Cascara
86	59,1 d	10,54 d	24,86 c	4,39 c	6,9 c
500	206,5 dc	12,24 d	31,33 bc	8,93 c	9,45 bac
1.000	239,8 dc	13,8 dc	34,96 bc	14,58 bc	11,09 ba
2.500	548,9 c	17,83 c	39,05 b	24,19 b	8,38 bc
5.000	1585,4 b	40,16 b	65,4 a	56,04 a	11,00 ba
10.000	3487,6 a	46,8 a	67,08 a	52,69 a	12,78 a
Media	1021,24	23,56	43,85	26,80	9,93
C.V	27,49	13,60	21,15	26,04	24,09

*Diferencias significativas ($\alpha \leq 0.05$); C.V. = coeficiente de variación

Anexo 9: Cuadrados medios del análisis de varianza para el factor de bio-acumulación de Hg en cada uno de los órganos de la planta en las variedades Fedearroz 2000 y Fedearroz 473.

Factor	GL	Raíz	Tallo	Hoja	Grano
Variedad	1	0,0008	0,0002	0,0001	0,00003
Concentración	5	0,23 **	0,017 **	0,095 **	0,018**
Variedad*concentración	5	0,02 *	0,0003	0,0001	0,00001
Error	36	0,003	0,0002	0,0002	0,0001
Media		0,37	0,03	0,07	0,04
C.V		15,74	41,40	19,29	28,72

*Diferencias significativas ($\alpha \leq 0.05$); G.L = Grados de libertad; C.V. = coeficiente de variación

Anexo 10: Comparación de medias del factor variedad en el factor de bio-acumulación de Hg en cada uno de los órganos de planta en las variedades Fedearroz 2000 y Fedearroz 473.

Variedad	Raíz	Tallo	Hoja	Grano
Variedad F-2000	0,37 a	0,03 a	0,07 a	0,04 a
Variedad F-473	0,37 a	0,03 a	0,07 a	0,04 a
Media	0,37	0,03	0,07	0,04
C.V	15,74	41,40	19,29	28,72

*Diferencias significativas ($\alpha \leq 0.05$); C.V. = coeficiente de variación

Anexo 11: Comparación de medias del factor concentración para el factor de bio-acumulación de Hg en cada uno de los órganos de planta en las variedades Fedearroz 2000 y Fedearroz 473.

[Hg] (µg/kg-1)	Raíz	Tallo	Hoja	Grano
86	0,69 a	0,12 a	0,29 a	0,13 a
500	0,41 b	0,02 b	0,06 b	0,04 b
1.000	0,24 ed	0,01 bc	0,04 bc	0,03 bc
2.500	0,22 e	0,007 bc	0,02 cd	0,01 cd
5.000	0,32 cd	0,008 bc	0,01 cd	0,01 cd
10.000	0,35 bc	0,004 bc	0,007 d	0,007 d
Media	0,37	0,03	0,07	0,04
C.V	15,74	41,40	19,29	28,72

*Diferencias significativas ($\alpha \leq 0.05$); C.V. = coeficiente de variación

Anexo 12: Cuadrados medios del análisis de varianza para el factor de bio-acumulación de Hg en cada uno de los órganos de la planta en las variedades Fedearroz 67 y Fedearroz 68.

Factor	GL	Raíz	Tallo	Hoja	Grano
Variedad	1	0,02	0,006 *	0,002*	0,0004
Concentración	5	0,14**	0,015 **	0,09**	0,03**
Variedad*concentración	5	0,01	0,0007	0,0005 *	0,001 *
Error	24	0,009	0,0003	0,002	0,0003
Media		0,43	0,05	0,08	0,06
C.V		22,78	32,55	12,13	27,99

*Diferencias significativas ($\alpha \leq 0.05$); G.L = Grados de libertad; C.V. = coeficiente de variación

Anexo 13: Comparación de medias del factor variedad para el factor de bio-acumulación de Hg en cada uno de los órganos de planta en las variedades Fedearroz 67 y Fedearroz 68.

Variedad	Raíz	Tallo	Hoja	Grano
Variedad F-67	0,45 a	0,04 b	0,09 a	0,05 a
Variedad F-68	0,40 a	0,07 a	0,08 b	0,06 b
Media	0,43	0,05	0,08	0,06
C.V	22,78	32,55	12,13	27,99

*Diferencias significativas ($\alpha \leq 0.05$); C.V. = coeficiente de variación.

Anexo 14: Comparación de medias del factor concentración para el factor de bio-acumulación de Hg en cada uno de los órganos de planta en las variedades Fedearroz 67 y Fedearroz 68.

[Hg] (µg/kg-1)	Raíz	Tallo	Hoja	Grano
86	0,67 a	0,14 a	0,33 a	0,20 a
500	0,49 b	0,06 b	0,07 b	0,05 b
1.000	0,47 b	0,06 b	0,04 c	0,04 bc
2.500	0,34 bc	0,02 c	0,02 d	0,02 bc
5.000	0,35 bc	0,01 c	0,01 d	0,02 c
10.000	0,24c	0,01 c	0,01 d	0,01 c
Media	0,43	0,05	0,08	0,06
C.V	22,78	32,55	12,13	27,99

*Diferencias significativas ($\alpha \leq 0.05$); C.V. = coeficiente de variación.

Anexo 15: Cuadrados medios del análisis de varianza para el factor de translocación de Hg en la planta, en las variedades Fedearroz 2000 y Fedearroz 473.

Factor	G.L	FT
Variedad	1	0,01 *
Concentración	5	0,57 **
Variedad*concentración	5	0,01 **
Error	36	0,001
Media		0,290
C.V		14,450

*Diferencias significativas ($\alpha \leq 0.05$); G.L = Grados de libertad; C.V. = coeficiente de variación; FT = factor de translocación.

Anexo 16: Comparación de medias del factor variedad para el factor de translocación en las variedades Fedearroz 2000 y Fedearroz 473.

Variedad	FT
Variedad F-2000	0,31 a
Variedad F-473	0,28 b
Media	0,290
C.V	14,450

*Diferencias significativas ($\alpha \leq 0.05$); C.V. = coeficiente de variación; FT = factor de translocación.

Anexo 17: Comparación de medias del factor concentración para el factor de translocación, en las variedades Fedearroz 2000 y Fedearroz 473.

[Hg] (µg/kg-1)	FT
86	0,80 a
500	0,30 b
1.000	0,34 b
2.500	0,17 c
5.000	0,11 dc
10.000	0,06 d
Media	0,290
C.V	14,450

*Diferencias significativas ($\alpha \leq 0.05$); C.V. = coeficiente de variación; FT = factor de translocación.

Anexo 18: Cuadrados medios del análisis de varianza para el factor de translocación de Hg en la planta, en las variedades Fedearroz 67 y Fedearroz 68.

Factor	G.L	FT
Variedad	1	0,03
Concentración	5	0,68 **
Variedad*concentración	5	0,01
Error	24	0,17
Media		0,37
C.V		22,41

*Diferencias significativas ($\alpha \leq 0.05$); G.L = Grados de libertad; C.V. = coeficiente de variación; FT = factor de translocación.

Anexo 19: Comparación de medias del factor variedad para el factor de translocación en las variedades Fedearroz 67 y Fedearroz 68.

Variedad	FT
Variedad F-67	0,35 a
Variedad F-68	0,41 b
Media	0,37
C.V	22,41

*Diferencias significativas ($\alpha \leq 0.05$); C.V. = coeficiente de variación.

Anexo 20: Comparación de medias del factor concentración para el factor de translocación, en las variedades Fedearroz 67 y Fedearroz 68.

[Hg] ($\mu\text{g}/\text{kg}^{-1}$)	FT
86	1,04 a
500	0,38 b
1.000	0,32 bc
2.500	0,20 dc
5.000	0,15 d
10.000	0,18 dc
Media	0,37
C.V	22,41

*Diferencias significativas ($\alpha \leq 0.05$); C.V. = coeficiente de variación; FT = factor de translocación.

Anexo 21: Valores medios de porcentajes de germinación e índice de velocidad de germinación de las variedades Fedearroz 2000 y Fedearroz 473 en función a las concentraciones de Hg en el grano de arroz.

Variedad	[Hg] (μg Hg/kg^{-1})	[Grano] (μg Hg/kg biomasa seca)	Germinación (%)	IVG
Fedearroz 2000	86	11,25	70,25	13,30
	500	18,24	75,25	12,78
	1.000	27,86	58,00	10,05
	2.500	38,98	46,25	6,93
	5.000	66,77	76,00	12,96
	10.000	71,85	51,50	8,21
Fedearroz 473	86	11,29	96,00	18,90
	500	18,46	98,00	20,98
	1.000	23,45	94,50	17,97
	2.500	26,15	98,25	18,99
	5.000	67,28	99,00	20,53
	10.000	72,98	98,25	20,03

*IVG= Índice de velocidad de germinación

Anexo 22: Valores medios de porcentajes de germinación e índice de velocidad de germinación de las variedades Fedearroz 67 y Fedearroz 68 en función a las concentraciones de Hg en el grano de arroz.

Variedad	[Hg] ($\mu\text{g Hg/kg}^{-1}$)	[Grano] ($\mu\text{g Hg/kg biomasa seca}$)	Germinación (%)	IVG
Fedearroz 67	86	14,88	75,67	13,29
	500	28,65	65,67	12,14
	1.000	42,08	75,67	15,06
	2.500	64,65	80,33	16,09
	5.000	79,31	64,67	10,16
	10.000	105,45	69,33	11,58
Fedearroz 68	86	20,27	67,67	10,15
	500	21,55	55,00	8,93
	1.000	38,44	85,67	14,16
	2.500	48,82	78,00	12,07
	5.000	77,65	39,33	6,72
	10.000	133,89	79,67	17,14

*IVG= Índice de velocidad de germinación

Anexo 23: Requerimientos nutricionales para cada variedad de arroz para producir 6 ton/ha

Requerimientos Nutricionales (kg/ha)				
Elemento	Fedearroz 67	Fedearroz 68	Fedearroz 2000	Fedearroz 473
N	11,4	102	116,4	84,4
P	24	21	24	106
K	114	102	114	52,4
Ca	27,6	24	-	-
Mg	18	18	-	-
S	18	12	-	-
Fe	2,3	15,49	-	-
Mn	2,46	72,35	-	-
Zn	0,3	1,64	-	-
Cu	0,07	3,01	-	-
B	0,08	-0,05	-	-

Anexo 24: Valores promedios de altura de las cuatro variedades de arroz comercial en función a las concentraciones de Hg en el suelo.

Ensayo	Textura	Variedad	[Hg] (μg/kg ¹)	Altura de las plantas (cm)						
				15 DDE	30 DDE	45 DDE	60 DDE	75 DDE	90 DDE	105 DDE
1	Franco Arcillo Limoso	F - 67	86	20,8 ± 2,0	52,0 ± 5,0	78,5 ± 4,3	86,8 ± 2,6	92,0 ± 3,5	102,3 ± 3,2	106,0 ± 2,6
			500	17,8 ± 4,2	43,7 ± 18,3	60,3 ± 33,2	84,0 ± 5,6	94,3 ± 1,2	103,0 ± 3,0	110,3 ± 6,5
			1.000	20,3 ± 0,6	53,3 ± 1,5	75,0 ± 5,0	89,0 ± 7,5	96,7 ± 3,1	110,7 ± 2,1	111,5 ± 1,8
			2.500	18,5 ± 3,0	46,0 ± 6,9	75,3 ± 2,1	87,1 ± 3,8	92,0 ± 4,4	105,3 ± 10,1	107,2 ± 8,0
			5.000	19,8 ± 2,5	48,8 ± 9,4	75,2 ± 4,5	91,3 ± 2,5	96,3 ± 1,5	108,7 ± 4,9	112,0 ± 1,7
			10.000	20,7 ± 1,5	53,0 ± 5,6	77,5 ± 4,4	95,3 ± 3,8	101,8 ± 2,5	112,7 ± 4,7	115,7 ± 4,5
		F - 68	86	15,2 ± 1,3	46,5 ± 5,5	79,0 ± 3,6	91,2 ± 4,3	101,8 ± 3,8	111,8 ± 6,9	111,0 ± 6,5
			500	18,5 ± 1,3	47,0 ± 3,6	67,2 ± 5,3	84,2 ± 4,5	92,2 ± 4,3	99,0 ± 3,0	112,8 ± 3,7
			1.000	17,5 ± 0,5	46,5 ± 2,2	73,0 ± 2,6	92,3 ± 2,3	101,0 ± 4,4	102,5 ± 10,2	105,3 ± 3,7
			2.500	16,7 ± 0,8	43,3 ± 4,0	81,2 ± 7,6	92,7 ± 4,6	98,7 ± 1,5	105,7 ± 5,7	105,8 ± 1,9
			5.000	17,2 ± 1,8	36,3 ± 11,9	62 ± 21,3	85 ± 9,6	94,3 ± 1,5	102,3 ± 9,3	115,2 ± 9,2
			10.000	17,0 ± 0,9	52,0 ± 14,2	74,7 ± 7,9	89 ± 3,0	95,3 ± 4,5	106,0 ± 2,6	106,2 ± 2,8
2	Arcillo Limoso	F- 2000	86	21,8 ± 5,0	59,4 ± 3,4	81,3 ± 1,3	96,5 ± 1,7	101,0 ± 7,5	115,0 ± 9,6	149,9 ± 8,1
			500	25,8 ± 0,6	64,8 ± 1,3	80,5 ± 4,4	99,3 ± 4,6	104,8 ± 2,1	116,1 ± 1,8	103,6 ± 27,1
			1.000	27,4 ± 1,7	64,0 ± 1,8	84,9 ± 3,7	100,3 ± 6,2	104,0 ± 3,4	116,3 ± 0,5	110,6 ± 5,4
			2.500	25,8 ± 3,6	64,1 ± 3,9	85,1 ± 2,0	95,8 ± 4,4	102,5 ± 2,4	113,5 ± 1,9	114,6 ± 1,4
			5.000	26,0 ± 3,8	62,9 ± 5,5	86,8 ± 6,3	97,4 ± 7,5	108,3 ± 12,8	117,3 ± 10,1	118,1 ± 8,8
			10.000	23,4 ± 3,0	60,1 ± 2,4	87,6 ± 3,0	101,3 ± 4,1	104,3 ± 2,5	111,8 ± 2,1	107,4 ± 5,8
		F- 473	86	22,0 ± 2,0	55,8 ± 3,3	77,8 ± 5,3	87,9 ± 4,0	94,3 ± 5,9	112,0 ± 1,3	98,5 ± 1,7
			500	20,9 ± 2,4	58,0 ± 3,8	74,8 ± 6,8	87,5 ± 3,4	95,8 ± 1,5	102,0 ± 6,7	99,8 ± 1,4
			1.000	22,0 ± 2,7	56,8 ± 3,9	79,8 ± 3,1	88,0 ± 3,4	93,0 ± 3,2	100,3 ± 5,6	101,5 ± 5,4
			2.500	26,5 ± 3,2	61,8 ± 4,9	83,5 ± 5,3	91,0 ± 9,0	100,3 ± 12,5	107,9 ± 16,8	107,5 ± 16,3
			5.000	22,0 ± 3,7	57,1 ± 2,5	80,0 ± 5,7	83,5 ± 7,2	88,0 ± 9,3	96,8 ± 7,6	97,4 ± 5,3
			10.000	25,3 ± 1,7	57,0 ± 1,4	83,9 ± 5,0	90,4 ± 6,1	93,5 ± 6,1	101,3 ± 9,7	101,0 ± 4,5

*DDE= Días después de la emergencia

Anexo 25: Valores promedios de macollamiento de las cuatro variedades de arroz comercial en función a las concentraciones de Hg en el suelo.

Ensayo	Textura	Variedad	Macollamiento							
			[Hg] ($\mu\text{g}/\text{kg}^1$)	12 DDE	20DDE	28 DDE	36 DDE	44 DDE	52 DDE	60 DDE
1	Franco Arcillo Limosa	F - 67	86	3,3 $\pm$ 0,6	4,6 $\pm$ 0,6	9,3 $\pm$ 1,2	11 $\pm$ 1,0	14,6 $\pm$ 2,3	17,6 $\pm$ 2,1	17,6 $\pm$ 2,1
			500	3,6 $\pm$ 0,6	5,3 $\pm$ 3,8	9,6 $\pm$ 7,5	11 $\pm$ 7,8	14,6 $\pm$ 6,7	17,6 $\pm$ 7,5	17,6 $\pm$ 7,5
			1.000	3,6 $\pm$ 0,6	5,6 $\pm$ 0,6	11 $\pm$ 1,7	12,3 $\pm$ 1,5	17,3 $\pm$ 3,8	17,6 $\pm$ 2,3	17,6 $\pm$ 2,3
			2.500	2,3 $\pm$ 0,6	4 $\pm$ 1,0	7 $\pm$ 2,0	9 $\pm$ 1,0	16 $\pm$ 1,0	17,3 $\pm$ 0,6	17,3 $\pm$ 0,6
			5.000	3,3 $\pm$ 0,6	5 $\pm$ 1,7	5,6 $\pm$ 4,9	10,6 $\pm$ 2,5	16 $\pm$ 1,7	17,3 $\pm$ 2,5	17,3 $\pm$ 2,5
			10.000	2,3 $\pm$ 0,6	4,6 $\pm$ 0,6	8,3 $\pm$ 1,2	10,3 $\pm$ 0,6	15,6 $\pm$ 3,5	16 $\pm$ 2,6	16 $\pm$ 2,6
		F - 68	86	2 $\pm$ 1,0	3,3 $\pm$ 0,6	5,6 $\pm$ 0,6	6,3 $\pm$ 0,6	11,3 $\pm$ 2,1	15,3 $\pm$ 6,8	15,3 $\pm$ 6,8
			500	3 $\pm$ 1,0	3,6 $\pm$ 0,6	5,6 $\pm$ 1,2	7,3 $\pm$ 0,6	9,6 $\pm$ 1,5	10 $\pm$ 0,7	10 $\pm$ 0,7
			1.000	2,3 $\pm$ 0,6	3,3 $\pm$ 0,6	5,6 $\pm$ 0,6	6 $\pm$ 1,0	10 $\pm$ 1,0	11,3 $\pm$ 1,2	11,3 $\pm$ 1,2
			2.500	3 $\pm$ 1,0	3 $\pm$ 1,0	7,3 $\pm$ 2,5	7,3 $\pm$ 2,5	11,3 $\pm$ 0,6	11,6 $\pm$ 1,2	11,6 $\pm$ 1,2
			5.000	1,6 $\pm$ 0,6	3 $\pm$ 1,0	4,6 $\pm$ 3,5	7,3 $\pm$ 4,7	9 $\pm$ 4,4	10,3 $\pm$ 3,1	10,3 $\pm$ 3,1
			10.000	2 $\pm$ 1,0	3,3 $\pm$ 0,6	6 $\pm$ 1,7	8,6 $\pm$ 1,5	12,6 $\pm$ 1,2	13,6 $\pm$ 1,2	13,6 $\pm$ 1,2
2	Arcillo Limoso	F- 2000	86	4 $\pm$ 0,8	5,25 $\pm$ 1,3	11,75 $\pm$ 2,1	11,75 $\pm$ 2,1	17,25 $\pm$ 4,3	17,25 $\pm$ 4,3	17,25 $\pm$ 4,3
			500	3,5 $\pm$ 0,6	6,25 $\pm$ 1,9	10,75 $\pm$ 2,1	10,75 $\pm$ 2,1	15 $\pm$ 2,4	15 $\pm$ 2,4	15 $\pm$ 2,4
			1.000	3,5 $\pm$ 0,6	5,75 $\pm$ 0,5	11,75 $\pm$ 1,9	11,75 $\pm$ 1,9	16,25 $\pm$ 2,5	16,25 $\pm$ 2,5	16,25 $\pm$ 2,5
			2.500	3,5 $\pm$ 0,6	6,75 $\pm$ 0,5	11 $\pm$ 1,4	11 $\pm$ 1,4	15,75 $\pm$ 5,9	15,75 $\pm$ 5,9	15,75 $\pm$ 5,9
			5.000	3 $\pm$ 0,8	6 $\pm$ 2,0	11,5 $\pm$ 1,9	12 $\pm$ 1,6	18 $\pm$ 2,8	18 $\pm$ 2,8	18 $\pm$ 2,8
			10.000	4,25 $\pm$ 1,7	5,75 $\pm$ 0,5	13,25 $\pm$ 0,5	15 $\pm$ 1,8	19,5 $\pm$ 2,4	20,5 $\pm$ 2,5	20,5 $\pm$ 2,5
		F- 473	86	5 $\pm$ 1,4	8 $\pm$ 2,7	17,25 $\pm$ 4,3	17,25 $\pm$ 4,3	22,5 $\pm$ 1,0	23,5 $\pm$ 2,1	23,5 $\pm$ 2,1
			500	4 $\pm$ 0,8	8,75 $\pm$ 1,7	15,25 $\pm$ 1,7	16,25 $\pm$ 1,9	21,75 $\pm$ 2,9	22,75 $\pm$ 1,5	22,75 $\pm$ 1,5
			1.000	3,25 $\pm$ 0,5	7,5 $\pm$ 2,4	15,5 $\pm$ 1,9	17,5 $\pm$ 3,1	20,5 $\pm$ 2,9	21,5 $\pm$ 3,7	21,5 $\pm$ 3,7
			2.500	3,75 $\pm$ 0,5	9,5 $\pm$ 1,7	17,25 $\pm$ 1,0	17,5 $\pm$ 1,3	18 $\pm$ 1,6	18,5 $\pm$ 1,3	18,5 $\pm$ 1,3
			5.000	3,5 $\pm$ 0,6	8,25 $\pm$ 1,7	14,25 $\pm$ 6,3	16,25 $\pm$ 2,6	21,75 $\pm$ 3,7	22,75 $\pm$ 2,9	22,75 $\pm$ 2,9
			10.000	5,5 $\pm$ 1,0	9,25 $\pm$ 1,5	19 $\pm$ 4,1	21,25 $\pm$ 5,4	28 $\pm$ 4,1	28,5 $\pm$ 5,1	28,5 $\pm$ 5,1

*DDE= Días después de la emergencia