

**EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN POR CADMIO Y ARSÉNICO EN EL
SISTEMA DE PRODUCCIÓN ARROZ RIEGO DE LA PLANICIE ALUVIAL BAJA
DEL RÍO BOGOTÁ**

OMAR MONTENEGRO RAMOS

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

POSTGRADOS

SANTAFÉ DE BOGOTÁ

2000

**EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN POR CADMIO Y ARSÉNICO EN EL
SISTEMA DE PRODUCCIÓN ARROZ RIEGO DE LA PLANICIE ALUVIAL BAJA
DEL RIO BOGOTÁ**

OMAR MONTENEGRO RAMOS

**"Tesis de grado presentada como requisito parcial para optar al título de
MAESTRIA EN CIENCIAS AGRARIAS"**

**Director : Dr. LEONIDAS MEJÍA CIFUENTES
Codirectores : Dra. AMPARO ROJAS
RICARDO MARTINEZ
Maestro Universitario U.N.**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE AGRONOMIA
POSTGRADOS
Santafé de Bogotá
2000**

DEDICATORIA

A mi Madre

A la memoria de mi Padre

A Leonor, mi esposa

A mis hijos, Omar Mauricio, Diana Carolina y Ricardo Andrés

A mis hermanos

Por su apoyo moral, económico y sus expresiones afectivas que no me dejaron desfallecer y me alentaron para la culminación del presente trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Al Programa Nacional de Transferencia de Tecnología Agropecuaria PRONATTA por la cofinanciación de este proyecto.

A la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, Corpoica, porque como funcionario de ésta, recibí todo el apoyo logístico y técnico para el desarrollo de esta investigación.

A mi Director de Tesis, doctor Leonidas Mejía Cifuentes, quien con su paciencia y conocimientos hizo posible la culminación de este trabajo.

A la doctora Leyla Amparo Rojas y al Maestro Universitario Ricardo Martínez, por sus valiosos aportes al trabajo.

A los doctores Luis Lesmes y Orlando Vargas, Químicos del laboratorio de Química y Consultoría Colombiana –QUIMIA LTDA.-, por su participación y apoyo técnico.

Al doctor Antonio María Caicedo, Ingeniero Agrónomo, M.Sc. del C.I. Nataima, por su invaluable colaboración en los aspectos de riego y procesamiento estadístico de la información.

Al doctor Edgardo José García Barros, Director del CRECED Valle Cálido del Alto Magdalena de Corpoica, con sede en Girardot, por su colaboración y apoyo logístico.

A la señora Deissy Liliana Castillo Upegui, por su participación en la digitación y edición del documento final del trabajo.

A todas aquellas personas que de una u otra manera intervinieron, facilitando el logro de los objetivos propuestos en el presente trabajo.

NOTA DE ACEPTACIÓN

JURADO

JURADO

JURADO

Ibagué, junio de 2000

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	12
2. REVISION DE LITERATURA	15
2.1 CADMIO Y ARSENICO EN EL RIO BOGOTA	15
2.2 CADMIO Y ARSÉNICO EN SUELOS	19
2.3 CADMIO Y ARSENICO EN PLANTAS	24
2.4 CADMIO EN HUMANOS	31
2.5 ARSÉNICO EN HUMANOS	33
3. MATERIALES Y METODOS	35
3.1 MATERIALES	35
3.1.1 Localización y características de la zona de estudio	35
3.2 MÉTODOS	35
3.2.1 Definición y muestreo de los suelos	35
3.2.2 Muestreo de aguas	36
3.2.3 Método de Invernadero	37
3.2.3.1 Detalle del diseño experimental	37
3.2.3.2 Características físico químicas del suelo con que se realizó el experimento	37
3.2.3.3 Dosificación y preparación de las soluciones de Cadmio y Arsénico añadidas en las aguas de riego	41
3.2.4 Metodología de los ensayos de campo	42
3.2.4.1 Descripción y Análisis de los suelos	42
3.2.4.2 Descripción del sitio	42
3.2.4.3 Descripción del perfil modal del polipedón del lote experimental	43

	Pág
3.2.4.3.1 Características extrínsecas	43
3.2.4.3.2 Características intrínsecas del perfil modal	45
3.2.4.3.3 Características físico-químicas del lote experimental	48
3.2.5 Métodos Analíticos	52
3.2.5.1 Análisis de aguas	52
3.2.5.2 Análisis de suelos	52
3.2.5.2.1 Preparación de las muestras	52
3.2.5.2.2 Digestión y mineralización de las muestras	53
3.2.5.2.3 Determinación de Cadmio y Arsénico	53
3.2.5.3 Análisis de tejidos vegetales	54
3.2.5.3.1 Preparación de la muestra	54
3.2.5.3.2 Digestión o mineralización de las muestras	54
3.2.5.3.3 Determinación del Cadmio y el Arsénico	55
4. ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS	56
4.1 MUESTREO DE AGUAS	56
4.2 RESULTADOS ENSAYO DE INVERNADERO	57
4.2.1 Efecto del Cadmio y el Arsénico en el comportamiento fisiológico del arroz Variedad Oryzica-1	57
4.2.1.1 Altura de planta	60
4.2.1.2 Granos por panícula	61
4.2.1.3 Rendimiento	67
4.2.2 Concentraciones de Cadmio y Arsénico en el suelo a la cosecha	69
4.2.2.1 Concentraciones de Cadmio en el suelo	69
4.2.2.2 Concentraciones de Arsénico en el suelo	72
4.2.3 Concentraciones de Cadmio y Arsénico en el tejido foliar del arroz en el momento de la cosecha	73
4.2.4 Concentración de Cadmio y Arsénico en el grano de arroz	78
4.2.4.1 Acumulación de Cadmio en el grano de arroz	78
4.2.5 Análisis de regresión Múltiple	81

	Pág
4.3 RESULTADOS DE EXPERIMENTO DE CAMPO	84
4.3.1 Análisis de las variables de comportamiento fisiológico	84
4.3.1.1 Rendimiento	84
4.3.1.2 Altura de Planta	87
4.3.1.3 Número de granos por panícula	87
4.3.2 Variables cuantificadas en laboratorio	90
4.3.2.1 Contenido de Cadmio en el suelo	90
4.3.3 Contenidos de Arsénico en el suelo	93
4.3.4 Contenido de Cadmio en tejido foliar	94
4.3.5 Contenido de Cadmio en el grano	97
4.3.6 Contenido de Arsénico en tejido foliar	99
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	102
6. BIBLIOGRAFIA	105
ANEXOS	110

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Datos generales sobre las características y composición de las aguas del río Bogotá en diferentes sitios de su curso.	17
Tabla 2. Límites máximos permisibles (LMP) para Cadmio y Arsénico en aguas suelos y tejidos vegetales según diferentes normas nacionales e internacionales.	18
Tabla 3. Límites sugeridos o recomendados del Cadmio por diferentes organizaciones de Salud Pública Internacional.	32
Tabla 4. Límites recomendados o sugeridos para el Arsénico inorgánico por diferentes organismos de salud pública.	34
Tabla 5. Características físico-químicas del suelo homogenizado con el cual se estableció el ensayo de invernadero.	37
Tabla 6. Contenido de Cadmio y Arsénico de las aguas de riego aplicadas en los ensayos de invernadero.	40
Tabla 7. Combinación de tratamientos para las diferentes concentraciones de Cadmio y Arsénico aplicadas en el riego.	41
Tabla 8. Preparación de las soluciones de Arsénico a partir de Trióxido de Arsénico (As_2O_3).	41
Tabla 9. Preparación de las soluciones de Cadmio a partir de Sulfato de Cadmio octahidratado ($3\text{Cd SO}_4 \cdot 8 \text{H}_2\text{O}$)	42
Tabla 10. Principales características físico químicas del pedón modal del polipedón experimental de la Serie Manuel Sur (miembro de la Familia Arcillosa-Mixta Isohipertérmica de los Fluventic Vertic Haplustepts). Ricaurte, 1998.	48
Tabla 11. Tratamientos y volúmenes de riego en el ensayo de campo.	49

	Pág.
Tabla 12. Características químicas de las muestras de agua de riego para arroz. Hacienda Angostura, 1998.	56
Tabla 13. Análisis de varianza para las variables de comportamiento fisiológico en arroz con la aplicación de diferentes concentraciones de Cadmio y Arsénico en el agua de riego.	60
Tabla 14. Ecuaciones para la interacción Cd*As con las diferentes concentraciones sobre el número de granos por panícula.	67
Tabla 15. Ecuaciones para las interacciones de Cadmio y Arsénico con las diferentes concentraciones para el rendimiento de arroz en kg/ha.	69
Tabla 16. Análisis de varianza para los contenidos de Cadmio y Arsénico en el suelo con la aplicación de diferentes concentraciones en el agua de riego para el cultivo de arroz (Var. Oryzica-1).	70
Tabla 17. Ecuaciones de interacción del Cadmio y Arsénico en el suelo con la aplicación de diferentes concentraciones en el agua de riego.	72
Tabla 18. Ecuaciones de predicción para la interacción del Cadmio*Arsénico en el suelo con la aplicación de diferentes concentraciones de agua de riego.	73
Tabla 19. Análisis de varianza para el contenido de Cadmio y Arsénico en el tejido foliar del arroz Oryzica-1 con la aplicación de diferentes soluciones de Cadmio y Arsénico de concentraciones conocidas.	75
Tabla 20. Ecuaciones para la interacción en Cadmio y Arsénico para las diferentes concentraciones y su acumulación en el tejido foliar.	78
Tabla 21. Análisis de varianza para los contenidos de Cadmio y Arsénico en el grano de arroz con 4 niveles de aplicación en el agua de riego con soluciones de concentración conocida.	78
Tabla 22. Ecuaciones para la interacción en Cadmio y Arsénico para las diferentes concentraciones y su acumulación en el grano de arroz.	61
Tabla 23. Coeficiente de correlación y su significancia para las variables analizadas.	84

	Pág.
Tabla 24. Análisis de varianza para el rendimiento y las variables de comportamiento fisiológico en arroz Oryzica-1 con la aplicación de diferentes volúmenes de riego con aguas del río Bogotá. Ricaurte (Cund.) 1998.	85
Tabla 25. Análisis de varianza para las variables de calidad de molinería de arroz Oryzica-1 con la aplicación de diferentes volúmenes de riego con aguas del río Bogotá, Ricaurte (Cund.) 1998.	90
Tabla 26. Análisis de varianza para las variables cuantificadas en el laboratorio (datos transformados).	91
Tabla 27. Concentraciones totales de metales traza en suelos agrícolas.	93
Tabla 28. Contenidos de Cadmio, Arsénico y en granos de arroz y en pastos.	97

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Porcentaje de reducción del crecimiento en diferentes especies de plantas en función de la concentración de Cadmio en la solución Page et al, (1972).	30
Figura 2. Materos con bandeja recibidora	38
Figura 3. Perfil del pedón modal del suelo experimental (Manuel Sur)	46
Figura 4. Plano Experimento de Campo	51
Figura 5. Concentraciones de Arsénico en aguas del río Bogotá, durante un año agrícola. Ricaurte (Cund.) 1998.	58
Figura 6. Concentración de Cadmio en las aguas del río Bogotá, durante un año agrícola. Ricaurte (Cund.) 1998.	59
Figura 7. Interacción Cd*As y su efecto sobre la altura de plantas de arroz (<i>Oryza sativa</i> L.) Var. Oryzica-1 C.I. Nataima, Espinal (Tol.), 1999.	62
Figura 8. Efecto de diferentes concentraciones de Cadmio sobre el número de granos por panículas de arroz (<i>Oryza sativa</i> L.) Var. Oryzica-1 C.I. Nataima, Espinal (Tol.), 1999.	64
Figura 9. Efecto de diferentes concentraciones de Arsénico sobre el número de granos por panícula en arroz (<i>Oryza sativa</i> L.) Var. Oryzica-1 C.I. Nataima, Espinal (Tol.), 1999.	65
Figura 10. Interacción de Cd*As y su efecto sobre el número de granos por panícula en arroz (<i>Oryza sativa</i> L.) Var. Oryzica-1 C.I. Nataima, Espinal (Tol.), 1999.	66

	Pág.
Figura 11. Interacción de Cd*As y su efecto sobre los rendimientos de arroz (<i>Oryza sativa</i> L.) Var. Oryzica-1 C.I. Nataima, Espinal (Tol.), 1999.	68
Figura 12. Interacción de As*Cd en suelo cultivado con arroz en condiciones de invernadero y con la aplicación de soluciones de concentración conocida. Nataima, Espinal (Tol.) 1999	71
Figura 13. Interacción de As*Cd en suelo cultivado con arroz en condiciones de invernadero y con la aplicación de soluciones de concentración conocida. Nataima, Espinal (Tol.) 1999	74
Figura 14. Interacción Cd*As en el tejido foliar de arroz (<i>Oryza sativa</i> L.) Var. Oryzica-1 C.I. Nataima, Espinal (Tol.), 1999.	76
Figura 15. Efecto del Cadmio y el Arsénico sobre las concentraciones en el tejido foliar del arroz (<i>Oryza sativa</i> L.) Var. Oryzica-1 C.I. Nataima, Espinal (Tol.), 1999.	77
Figura 16. Efecto de la interacción de las concentraciones de Cadmio y Arsénico en el grano de arroz (<i>Oryza sativa</i> L) Var. Oryzica-1 con la aplicación de diferentes soluciones de concentración conocida en el agua de riego C.I. Nataima. Espinal (Tol.). 1999.	80
Figura 17. Efecto de la interacción de las concentraciones de Cadmio y Arsénico en el grano de arroz (<i>Oryza sativa</i> L.) Var. Oryzica-1 con la aplicación de diferentes soluciones de concentración conocida en el agua de riego C.I. Nataima, Espinal (Tol.), 1999.	82
Figura 18. Rendimiento de arroz paddy y Oryzica-1 para la evaluación de Cadmio y Arsénico con la aplicación de diferentes volúmenes de riego con agua del río Bogotá. Ricaurte (Cund.) 1998.	86
Figura 19. Altura de planta de arroz, variedad Oryzica-1 con la aplicación de diferentes volúmenes de riego con aguas del río Bogotá. Ricaurte (Cund.). 1998.	88
Figura 20. Granos por panícula de arroz Oryzica-1 para la evaluación de Cadmio y Arsénico con la aplicación de diferentes volúmenes de riego en las aguas del río Bogotá. Ricaurte (Cund.) 1998.	89
Figura 21. Contenido de Cadmio en suelos cultivados en arroz con la aplicación de diferentes volúmenes de riego con aguas del río Bogotá. Ricaurte (Cund.) 1998.	92

	Pág.
Figura 22. Contenido de Arsénico en suelos cultivados en arroz con la aplicación de diferentes volúmenes de riego con aguas del río Bogotá. Ricaurte (Cund.). 1998.	95
Figura 23. Contenido de Cadmio en tejido foliar con la aplicación de diferentes volúmenes de riego en arroz Oryzica-1 con aguas del río Bogotá. Ricaurte (Cund.). 1998.	96
Figura 24. Contenido de Cadmio en el grano de arroz con la aplicación de diferentes volúmenes de riego en arroz Oryzica-1 con agua del río Bogotá. Ricaurte (Cund.) 1998..	98
Figura 25. Contenido de Arsénico en tejido foliar de arroz con aplicaciones de diferentes volúmenes de riego con aguas del río Bogotá. Ricaurte (Cund.) 1998.	100

RESUMEN CORTO

Se realizaron ensayos simultáneos de campo e invernadero con arroz (*Oryza sativa* L., variedad Oryzica 1), en suelos de la cuenca baja del río Bogotá (Serie Los Manueles, miembro de la Familia arcillosa fina, mixta, isohipertérmica de los fluventic Vertic Haplustepts), para evaluar el efecto del Cadmio y Arsénico contenido en las aguas de riego (del río Bogotá y en las de invernadero), en el suelo y en a) los parámetros de crecimiento del arroz; b) en las diversas partes de la planta; y c) en el rendimiento y otras propiedades y aspectos. Los resultados obtenidos y mediciones complementarias en las aguas del río, permitieron concluir en general:

El Cadmio y Arsénico en las aguas del río fueron aumentando en los meses más secos y disminuyeron en los más lluviosos (para el Cd 5.8 µg/l a 0.7 µg/l; para As 47 µg/l a 24 µg/l); en ambos períodos los contenidos superaron los límites permisibles.

La altura del arroz fue mayor (98 cm) con riego sin Cadmio y Arsénico y disminuyó cuando el Cadmio y Arsénico máximos (Cd: 3 mg/l y As: 4.5 mg/l) y el efecto mostró una tendencia lineal inversa representable con la ecuación $Y = 94.8 - 10.2$, con una $r = 0.99$.

El aumento del Cadmio en el riego (de 1 a 3 mg/l) disminuyó en un 12.5% el número de granos por panícula; el aumento del Arsénico lo disminuyó en un 10%.

Las dosis más altas de Cadmio y Arsénico (Cd: 3 mg/l y As 4.5 mg/l) en el agua de riego disminuyeron significativamente el rendimiento del arroz (de 7892 kg a 3941 kg/ha arroz paddy). El agua sin Cadmio ni Arsénico generó los máximos rendimientos.

La mayor cantidad de Cadmio y Arsénico se acumuló en el tejido foliar cuando estos se aumentaron al máximo en el riego. El aumento simultáneo de Cadmio y Arsénico disminuyó progresivamente el Cadmio acumulado, poniendo de manifiesto cierta competencia entre los 2 elementos.

El Cadmio y Arsénico se acumularon en el grano con el aumento de los dos en el agua de riego pero en mayor cuantía el Cadmio. Las cantidades de Cadmio y Arsénico acumuladas fueron respectivamente 50 y 15 veces mayores que los máximos valores considerados permisibles por los organismos de salud pública.

El Cadmio y Arsénico acumulado en el suelo fueron mayores (Cd: 82.6 mg/kg; As 17.6 mg/kg) cuando el Cadmio y Arsénico aumentaron en riego (Cd; 3.5 mg/l; As: 4.5 mg/l).

El Cadmio y Arsénico del agua de riego aparentemente no afectaron la calidad molinera del arroz.

Palabras claves: Contaminación con Cadmio y Arsénico, Arroz (*Oryza sativa* L.), acumulación en granos, rendimientos.

RESUMEN

Casi desde el inicio de su curso hasta su desembocadura en el río Magdalena, el río Bogotá transporta una voluminosa y variada carga de contaminantes orgánicos e inorgánicos que incluye una amplísima gama de sustancias y elementos traza potencialmente tóxicos como el As, Cd, Co, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Se, V, Zn y otros más, muchos de ellos cancerígenos y de comprobados efectos mutagénicos y teratogénicos como sucede con el Cadmio y el Arsénico. Estos elementos y sustancias, al ser incorporados a los suelos y cultivos con el riego periódico y prolongado, tienden a acumularse en las diferentes fracciones adsorptivas de los suelos y a ser posteriormente absorbidas por los pastos y vegetales comestibles, con el grave riesgo que ello entraña para la salud pública (OMS, 1986; 1992).

A lo largo y ancho de su cuenca, las aguas del río Bogotá constituyen casi la única fuente de riego para los pastos y cultivos que se realizan en los suelos de la planicie aluvial. Esta situación ha generado la acumulación en los suelos más allá de los límites considerados permisibles, de varios de los elementos y sustancias tóxicas enumerados, y la consecuente contaminación de los productos vegetales que en ellos se producen. Así en el sector de la cuenca alta varias investigaciones han demostrado la presencia de Arsénico y Cadmio y varios otros de los elementos enumerados tanto en los suelos como en las aguas superficiales del río Bogotá y sus afluentes (Mejía y Panizzo, 1970; CDM-CEI, 1970; INGESERIES, 1991), en las aguas subterráneas y de riego (González y Mejía, 1996; Matamoros y Mejía, 1998; González y Vargas, 1998), en varios cultivos y hortalizas (Botero y Cifuentes, 1983; González y Mejía, 1996; Vargas y Mejía, 1998) y en los pastos y productos lácteos y cárnicos (Quimia, 1998; Vallejo, 1993). En la cuenca baja, en municipios como Tocaima, Agua de Dios, Ricaurte y Girardot, una considerable extensión de los

suelos cercanos al río que superan ampliamente las 2.000 hectáreas se han dedicado tradicionalmente al cultivo de arroz bajo riego, utilizando para ello las aguas del río Bogotá, las cuales son bombeadas directamente a éstos sin ningún tratamiento previo. Era por tanto presumible que el producto cosechado en esta área específicamente el arroz, fuese de alguna manera afectado en las diversas partes de la planta y en su rendimiento por uno o más de estos elementos traza potencialmente tóxicos y peligrosos. La presente investigación se concentró exclusivamente en el Cadmio y el Arsénico, elementos cuya presencia junto con la de otros más se demostró previamente, mediante algunos análisis exploratorios en los suelos, pastos y productos vegetales de la cuenca baja, a manera de verificación de la hipótesis que dio sustento a la presente investigación y se propuso los siguientes objetivos:

1. Determinar cuantitativamente las cantidades de Cadmio y Arsénico aportadas por las aguas del río Bogotá durante el período vegetativo del cultivo desde la siembra hasta la cosecha y durante los períodos de máxima y mínima precipitación (invierno y verano).
2. Determinar cuantitativamente la magnitud en que el Arsénico y el Cadmio contenido en las aguas del río Bogotá están afectando individual y/o simultáneamente no sólo las variables del desarrollo fisiológico como altura de planta, número de granos por panoja, número de panículas por planta, etc., sino también los rendimientos y la calidad del arroz.

Como objetivos específicos se propuso realizar ensayos de invernadero y de campo que mediante un diseño experimental y las pruebas de análisis estadístico adecuadas permitiesen establecer:

1. Las cantidades de Arsénico y de Cadmio acumuladas en el suelo tanto en el invernadero como en el campo durante el período de duración del cultivo hasta

la cosecha, como resultado de la concentración de los dos elementos en el agua de riego.

2. El efecto tanto individual como simultáneo de las concentraciones de Arsénico y de Cadmio en las aguas de riego tanto en el invernadero como en el campo, en las variables que definen el comportamiento fisiológico (altura de planta, número de panículas por planta, número de granos por panícula, rendimientos, etc. y en la calidad molinera del arroz).
3. Definir estadísticamente la forma en que la absorción del Cadmio y el Arsénico por parte del arroz afecta individual y/o simultáneamente el grado de acumulación de los dos elementos en las hojas, tallos y granos, al igual que el rendimiento del cultivo.

Con base en los resultados de laboratorio y análisis estadísticos obtenidos para las experiencias de invernadero y de campo se establecieron las siguientes conclusiones:

1. Las mediciones quincenales de control efectuadas durante un año a las aguas del río Bogotá en el área de estudio, demostraron que las concentraciones de Cadmio y de Arsénico variaron estacionalmente (Cadmio = 5.8 $\mu\text{g/l}$, a 0.7 $\mu\text{g/l}$; Arsénico = 47 $\mu\text{g/l}$ a 24 $\mu\text{g/l}$), siendo máximas en los meses más secos y mínimas en los meses de mayor precipitación valores que en todos los casos superaron los máximos permisibles tanto para uso doméstico como aguas para uso agrícola.
2. Se obtuvieron diferencias altamente significativas para el efecto del Cadmio y el Arsénico y su mutua interacción respecto a la altura de las plantas de arroz. La altura de las plantas fue máxima en 98 cm, en ausencia de Cadmio y Arsénico y mínima de 63 centímetros cuando las concentraciones adicionales fueron las máximas (Cadmio 3 mg/l, Arsénico 4.5 mg/l) capaces de inducir un fuerte efecto

depresivo equivalente al 33 % de reducción en el crecimiento de la planta. El efecto de los dos elementos cuando su respectiva concentración es máxima en el agua de riego mostró una tendencia lineal inversa representada por la ecuación: $Y = 94.8 - 10.2X$ con un $R^2 = 0.99$

3. El incremento del Cadmio adicionado de 1 a 3 mg/l en el agua de riego disminuyó considerablemente el número de granos por panícula pasando de 184 a 161, que representa una reducción del 12.5%. El Arsénico mostró un comportamiento similar al aumentar su concentración de 1 a 4.5 mg/l disminuyendo el número de granos de 181 a 160 equivalente a una reducción aproximada del 10%. Aunque la interacción entre el Cadmio y el Arsénico no fue estadísticamente significativa se muestra una tendencia a disminuir el número de granos por panícula cuando se aumentó simultáneamente la concentración de los dos elementos en el agua de riego.

4. Se observaron diferencias altamente significativas para el efecto del Cadmio y el Arsénico en las aguas de riego en el rendimiento del arroz tanto a nivel individual, como aplicados simultáneamente los dos elementos, sin embargo el efecto más notorio fue el sinergismo ejercido en la reducción del rendimiento cuando se aplicaron las dosis más altas de los dos elementos. Así, el rendimiento obtenido (7.892 kg/ha de arroz Paddy) en ausencia del Cadmio y el Arsénico se redujo en un 50% (3.941 kg/ha) cuando la concentración del Cadmio y Arsénico fue de 3 mg/l y 4.5 mg/l respectivamente.

5. El Cadmio y el Arsénico se acumularon en forma creciente tanto en el tejido foliar como en el grano, a medida que incrementó la concentración de los dos elementos en las aguas de riego. El arroz acumuló las máximas concentraciones de Cadmio en el tejido foliar, cuando se adicionaron las mayores cantidades de Cadmio en las aguas de riego. Sin embargo, cuando al agua de riego se le incrementó progresivamente el contenido de Arsénico la acumulación del Cadmio en el tejido

foliar disminuyó proporcionalmente lo que sugiere un antagonismo entre los dos elementos.

6. El Arsénico se acumuló progresivamente en el grano a medida que aumentó la proporción del elemento en el agua de riego pero con una tasa de acumulación menor que la del Cadmio. Las cantidades de Cadmio y de Arsénico acumuladas en el grano fueron 50 y 15 veces mayores que las concentraciones consideradas como límites permisibles por los organismos internacionales de salud.

7. Los suelos acumularon Cadmio y Arsénico dependiendo de su concentración respectiva en las aguas de riego y de la presencia y ausencia del Arsénico y/o del Cadmio como elemento acompañante. La acumulación de Cadmio en el suelo fue máxima (82.6 mg/kg) cuando la concentración de Cadmio fue mayor a 3 mg/l y la de Arsénico de 4.5 mg/l, comportamiento que al parecer sugiere un efecto sinérgico del Arsénico y el Cadmio en la absorción y acumulación en el suelo.

8. La acumulación del Arsénico en el suelo tendió a incrementarse desde (2.297 mg/kg hasta 17.621 mg/kg) con el aumento de la concentración del elemento en el agua de riego (de 0 a 4.5 mg/l). Sin embargo fue máxima con la presencia simultánea del Cadmio en baja proporción en el agua de riego. No obstante la rata de acumulación en el suelo tendió a disminuir cuando se aumentó la concentración en forma simultánea del Cadmio en el agua de riego.

9. La adición de Cadmio y Arsénico a través de los diferentes volúmenes de riego con las aguas del río Bogotá a las parcelas de campo no afectó significativamente la calidad molinera del arroz.

PALABRAS CLAVES: Contaminación, Cadmio, Arsénico, elementos traza mutagénicos, arroz, riego, acumulación.

EVALUATION OF THE CONTAMINATION BY CADMIUM AND ARSENIC IN PADDY RICE SOILS OF THE LOWER BASIN OF BOGOTA RIVER

SUMMARY

Almost since the first, to the last part of the Bogota River course where it flows to the Magdalena River, it carries a huge and varying amount of both organic and inorganic contaminants which include a wide spectrum of potentially toxic substances and trace element like As, Cd, Co, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Se, V, Zn and some else, many of them carcinogenic, mutagenic and teratogenic like Cadmium and Arsenic. Once those substances and elements incorporate to soils and crops through a daily and continuous irrigation, they tend to accumulate in the adsorptive soil fractions and furtherly enter to grasses and edible parts of crops, with that high and presumable risk wich this means to public health (OMS, 1986, 1992).

Through all the basin length, the dirty water of Bogotá river represents almost the only source of irrigation water for all grasses growing in the alluvial flood plain soils next to the river. This circumstance has given place to a gradual accumulation in soils above the permissible levels of some of the forementioned potentially toxic substances and elements and to its consequent absorption by all the vegetal products growing on them. So, in the high portion of the Bogotá river several investigations have demonstrated the presence of As and Cd and some other trace elements both in soils and the surface water of the Bogotá river and its afluentes (Mejía and Pannizo, 1970; CDM-CEI, 1970; INGESERIES, 1991) in the underground and irrigation water (Gonzalez y Mejía, 1996; Vargas y Mejía, 1998) and in grasses and lactic and carnic products (QUIMIA, 1998; VALLEJO, 1993). In the low basin in some municipalities like Tocaima, Anapoima, Agua de Dios and Ricaurte, a large

extent of soils which surpass 2000 has been traditionally used to grow paddy rice using for flooding and irrigation the Bogotá River water pumped directly to the rice without any previous treatment. Consequently it is assumed that most crops in the area and specially rice crops should be accumulated Cd, As or some other trace elements in parts of the plant and that yields should be reduced. Even all forementioned substances and trace elements are almost equally toxic and dangerous for human and animal health when they are absorbed above permissible limits, this research is concerned exclusively with Cadmium and Arsenic, two elements which were found in soils, grasses and vegetal products which were previously analyzed as a work hypothesis. Once proved, the present research was done to demonstrate the following general objectives:

1. Determine the amounts of Cd and As deposited by the Río Bogotá water through all growing season of rice crop since seedtime to the harvest and all year during maximum and minimal rainfall.
2. Periods determine quantitatively how much the As and Cd contained in irrigation water are individual or collectively affecting some growing physiological parameters like plant height, panicle number per plant, grain number per panicle, as well as yield and grain quality of rice; the specific objective were to determine through both greenhouse and field experiments:
 - The amount of Cd and As accumulated in soils both as a result of the progressive increase of Cd and As content in the irrigation water.
 - The individual and collective effect of increasing Cd and As content of the irrigation water on height of plants, number of panicles per plants, number of grains per panicle, and in yield and grain's quality as well;

- To define statistically define how the absorption of Cd and As by rice plants affects the accumulation of both elements in leaves shoots, and grains and the crop yield, and how each trace element mutually interfere in the accumulation rate.

Analytical results and statistical analysis obtained lead to the following general conclusions:

1. Yearly monitoring and monthly analysis of the Rio Bogotá water composition showed that Cd and As content changed seasonally (Cd: from 3.1 to 0.7 $\mu\text{g/l}$; As: from 47 $\mu\text{g/l}$ to 24.5 $\mu\text{g/l}$) being higher during dryest months and lower during rainy months; however, both Cd and As contents surpass minimum permissible limits advised for water both for domestic uses and crop irrigation;
2. Highly significative differences were observed for the effect of Cd and As content in the irrigation water on the rice plant height. It was higher (98 cm) when both Cd and As were absent in irrigation water, and lower (63 cm) when Cd and As content were maximum and able to cause the highest reduction (33%) in plant height. The effect of higher concentration of both trace elements follows an inverse lineal tendency according to the equation: $Y = 94.8 - 10.0 X$ with $R^2 = 0.99$.
3. Cadmium increase (from 1 to 3 mg/l) in irrigation water reduced considerably grain number per panicle (from 184 to 160), a 12.5%. For As there was a similar behavior when concentration was increased (from 1 to 4.5 mg/l), reducing grain number (from 181 to 160) in 10%. Even though the interaction between Cd and As was statistically significative, there was a general tendency to decrease grain number per panicle when both elements were simultaneously in irrigation water.

4. Highly significant differences were observed for the effect of Cd and As concentration in irrigation water on rice yield applied both alone and simultaneously. However, the most notorious effect was the synergism induced in yield reduction when the highest concentrations of Cd and As (3 and 4.5 mg/respectively) were added simultaneously to irrigation water. So, the maximum yield (7892 kg/ha paddy rice) obtained without (0 mg/l) Cd and As, was reduced 50% (3941 kg/ha) when Cd and As concentration were maximum (3 mg/l and 4.5 mg/l respectively).
5. Accumulation of Cd and As increased gradually both in rice foliage and grain as the concentration of both elements were increased in irrigation water. The highest concentration of Cd was accumulated in foliage, specially when highest amounts of Cd (3 mg/l) were added to irrigation water. However, when As concentration was gradually increased in the irrigation water, Cd accumulation in the foliage gradually decreased which suggests certain antagonism between As and Cd.
6. As accumulation in rice grain increased gradually as As concentration in irrigation water increased, but in a lower proportion than Cd. However, accumulation level of both Cd and As in rice grain widely surpass (50 and 15 times respectively) maximum permissible levels recommended by the International Health Organization.
7. Soils accumulated Cd and As depending on the concentration in which each individual or both elements were present in irrigation water. Cd accumulation was maximum (82.6 mg/kg) when the Cd (< 3 mg/l) and As (4.5 mg/l) were the highest, behavior which suggest a certain synergism between these elements in the accumulation of Cd.

8. Accumulation of As in soils increased (from 2297 to 17621 $\mu\text{g}/\text{kg}$) when As concentration was increased in irrigation water (from 0 to 4.5 mg/l). However, soils accumulated the highest concentration of As when small amounts of Cd (1 mg/l) were simultaneously added to irrigation water, but As accumulation tends to decrease when Cd concentration increased above 1 mg/l.
9. Addition of Cd and As throughout the different volumes of water from the Bogotá river, to the field plots did not affect significantly the rice quality.

Key words: contamination, Cadmium, Arsenic, Rice, Irrigation, trace element, accumulation.

INTRODUCCIÓN

Pese al alto grado de contaminación que afecta actualmente al río Bogotá a lo largo de todo su curso, sus aguas constituyen la única fuente de riego para gran parte de los pastos y cultivos que se producen tanto en su cuenca alta, como en los suelos aluviales de sus cuencas baja y media. Particularmente en la cuenca baja, una importante superficie de los cultivos de arroz, plátano y pastos que se desarrollan en los suelos adyacentes al río en los municipios de Tocaima, Agua de Dios, Ricaurte y otras poblaciones, son regados con estas aguas, las cuales son bombeadas directamente a los cultivos sin ningún tipo de tratamiento previo.

Dentro de la voluminosa y variada carga de contaminantes orgánicos, de detergentes, de afluentes industriales tóxicos, de combustibles e hidrocarburos, de desechos urbanos de toda índole, que transporta el río a la altura de las cuencas media y baja, se destacan quizá como los más peligrosos para la salud pública, una amplísima gama de elementos traza y/o pesados que como el Cd, As, Hg, Cr, Ni, Mo, Se, Zn, Co, V, etc. y otros más, los cuales, al ser incorporados a los suelos con el agua de riego en forma continua y periódica, tienden a acumularse en las diferentes fracciones coloidales adsorptivas de los suelos (e.j. arcilla, materia orgánica, óxidos de Fe y/o Mn, materiales residuales aluminio – silícicos, etc) y a ser posteriormente absorbidos por los pastos y cultivos y, por ello, a incorporarse en las cadenas tróficas por encima de los niveles considerados como permisibles por los organismos nacionales e internacionales de salud (OMS, 1986 ; 1992), con las graves consecuencias que ello implica para la salud pública.

Aunque todos los elementos traza mencionados anteriormente como virtuales contaminantes de las aguas del río Bogotá, son casi igualmente tóxicos cuando se

ingieren en exceso, el presente trabajo se ha centrado exclusivamente en el Cadmio y Arsénico por el sólo hecho de que su presencia en los suelos y cultivos de la cuenca alta del río ha sido ampliamente demostrada en recientes investigaciones (González y Mejía, 1996), particularmente en las hortalizas que son regadas con sus aguas y que podrían estar siendo consumidas desde hace muchos años por muchas de las poblaciones de la Sabana de Bogotá. El Cadmio y el Arsénico son elementos altamente tóxicos, cancerígenos y mutagénicos (Vallejo, 1996). En los casos de intoxicación aguda, el primero ataca los riñones generando disfunciones irreversibles (proteinuria) e interfiere con el metabolismo del Calcio generando cálculos renales. Como cancerígeno ataca principalmente los testículos, la próstata y los pulmones. El Arsénico interfiere con los sistemas enzimáticos del metabolismo celular; afecta la piel, el sistema cardiovascular, el sistema nervioso, e induce procesos degenerativos del hígado y de los tubos renales. Como cancerígeno ataca principalmente los pulmones y la piel.

En la cuenca baja del Río Bogotá una extensión importante de suelos agrícolas que normalmente superan las 2000 hectáreas anuales en la planicie aluvial del río, se han dedicado tradicionalmente durante varios años al cultivo del arroz bajo riego, utilizando para ello las aguas altamente contaminadas del río, bombeándolas directamente a los cultivos sin ningún tipo de tratamiento previo. Es por tanto presumible, tal como lo han corroborado algunos muestreos y análisis previos (Quimia, 1997; LAQMA, 1997), que tanto los granos comestibles como las diferentes partes de la planta de arroz que se cosechan en estos suelos pueden contener cantidades variables, potencialmente tóxicas de Cadmio y Arsénico. Le confiere particular gravedad a esta situación, el hecho de que el arroz que se produce en toda la zona bajo estas condiciones no sólo abastece la demanda local, sino que un gran volumen de la producción total es despachada a los grandes centros de distribución y consumo como Bogotá, Cali e Ibagué. Se trata de volúmenes que normalmente superan las 12000 toneladas de arroz paddy, equivalentes a 8500 toneladas de arroz blanco, con un valor superior a los 8000 millones de pesos.

El objetivo general de la presente investigación consistió en determinar los niveles de Cadmio y Arsénico que son aportados por las aguas de riego del río Bogotá a cultivos de arroz realizados en suelos de su cuenca baja durante el período normal desde la siembra hasta la cosecha, y los niveles de Cadmio y Arsénico acumulados en el suelo, absorbidos y translocados por la planta, y ubicados tanto en la socas (tallos y hojas) como en el grano.

Los objetivos específicos fueron:

1. Establecer los contenidos promedios de Cadmio y Arsénico transportados por las aguas del río, mediante mediciones periódicas quincenales en sitios de toma y bombeo específicos durante un período de un año, que incluyó las épocas de máxima y mínima precipitación pluvial, (invierno y verano).
2. Establecer mediante experimentos de invernadero o casa de mallas utilizando para el cultivo del arroz en materas, aguas de riego con concentraciones variables de Cadmio y Arsénico conocidas, las cantidades de los dos elementos acumulados en el suelo y absorbidas y/o acumuladas por la planta de arroz a la cosecha en: a) La soca (tallo y hojas); y b) En los granos.
3. Establecer mediante experimentos de campo los contenidos de Cadmio y Arsénico que llegan a acumularse en un suelo, la soca (tallos y hojas) y en el grano; en lotes tradicionalmente arroceros, aplicando diferentes volúmenes de riego en los cuales se utilizan en forma continua y recurrente como única fuente, las aguas del río Bogotá.
4. Evaluar con base en los resultados de invernadero y de campo el efecto de las diferentes concentraciones de Cadmio y Arsénico y las posibles interacciones en: a) El macollamiento; b) La altura de planta; c) El rendimiento del cultivo.

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 CADMIO Y ARSÉNICO EN EL RÍO BOGOTÁ

A través de toda su cuenca, las aguas del río Bogotá y sus afluentes constituyen la principal fuente de riego para la gran mayoría de los pastos y cultivos que se realizan tanto en los suelos de la Sabana de Bogotá en la cuenca alta del río, como en los suelos de municipios como Tocaima, Anapoima, Agua de Dios, Ricaurte, etc., situados dentro de la cuenca media y baja y cercanos al río.

Numerosos estudios realizados por diferentes investigadores y entidades (CAR, 1981; 1982, 1986 y 1990; IGAC, 1992; ITT, 1965; CDM-CEI, 1970; Mejía y Panizzo, 1972; González y Mejía, 1995; Vargas y Mejía, 1996; Vargas y González, 1998, etc.) quienes en los últimos 60 años, han demostrado el alto grado de contaminación con elementos traza como el As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Sn, V, Zn, etc. y una amplia gama de sustancias orgánicas e inorgánicas potencialmente tóxicas, que afectan las aguas del río Bogotá, casi desde los primeros kilómetros a partir de su nacimiento. Muchos de estos elementos y sustancias una vez que se incorporan a las cadenas alimentarias al ser absorbidos por los pastos y cultivos, además de ser altamente tóxicos, son carcinogénicos, mutagénicos y causantes de serias anomalías en el organismo animal y humano, cuando son ingeridos más allá de los límites considerados permisibles.

Con la ayuda de equipos analíticos de alta sensibilidad, en los últimos años se ha logrado demostrar que las concentraciones de muchos de estos elementos traza y sustancias potencialmente tóxicas que transportan tanto el río Bogotá como sus afluentes, en muchos casos están muy cerca y en ocasiones superan los niveles

considerados permisibles incluso para las aguas de riego. Datos publicados desde hace más de 25 años y que aparecen en la Tabla 1 (Mejía y Panizzo, 1972) ya informaban sobre la presencia de elementos traza como el Cd, Hg, Pb, Cr, etc. en concentraciones que estaban en el límite o superaban el nivel considerado permisible por los organismos nacionales e internacionales de salud (Tabla 2). El mismo estudio logró establecer cuantitativa y/o cualitativamente una cantidad tan grande y variada de elementos, sustancias contaminantes y organismos patógenos, que prácticamente definían el río Bogotá como no apto para ningún uso o para el desarrollo ictiológico, llegando a ubicarlo entre los más contaminados del mundo.

Estudios similares realizados por la CAR (1986) desde hace más de trece años, permitieron establecer la presencia de importantes concentraciones de elementos como el Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb y Zn en los ríos Juan Amarillo, Tunjuelito y Fucha, tres de los más importantes tributarios del río Bogotá en la Sabana de Bogotá. Diez años atrás Duque y Orozco (1976) habían estudiado estos mismos tres afluentes, pero limitaron su interés solamente en la magnitud de la carga orgánica que cada uno de ellos descargaba respectivamente (122 t/día; 476 t/día y 23 t/día) en el río Bogotá y que posteriormente era vertida al menos en un 90% al río Magdalena. Además de la carga orgánica, el mismo estudio calculó en una forma aproximada que el río Bogotá vertía diariamente al río Magdalena en su desembocadura el equivalente a 79 kg de Pb, 70 kg de Cr, 20 toneladas de Fe, 5 toneladas de detergentes y 1473 toneladas de sólidos en suspensión. Estudios realizados por diferentes compañías particulares (Ingeseries, 1991) orientados también hacia la caracterización y cuantificación de los elementos traza que transporta el río Bogotá han reportado contenidos de Hg del orden de 67 μ g/l, de 11 μ g/l de Cd, 350 μ g/l de Pb y de 220 a 400 μ g/l de Cr, que están muy cerca o superan en algunos casos los límites considerados permisibles en aguas de riego. Resultados reportados por la misma compañía Ingeseries (1991) pero en lodos muestreados en diferentes tramos del río, reportan valores del orden de 13 mg/kg de Hg, 150 mg/kg de Pb, 3 mg/kg de

Cd y 45 mg/kg de Cr, que claramente reflejan la capacidad de estos lodos de retener y acumular estos elementos en sus coloides componentes.

Tabla 1. Datos generales sobre las características y composición de las aguas del río Bogotá en diferentes sitios de su curso (Mejía y Panizzo, 1972).

Componentes	Puente del Común	Después del J. Amarillo	Puente de Cund/ca	Después del río Fucha	Después del Río Tunjuelito
Sales mg/l					
Nitritos	0.027	0.027	0.016	0.030	0.004
Amonio	0.85	3.73	3.49	4.83	5.63
N-Orgánico	0.94	1.95	1.79	1.75	1.93
Nitratos	0.092	0.098	0.060	0.071	0.051
Cloruros	579	166	150	160	156
Elementos pesados mg/l					
Cobre	1.053	1.055	1.076	1.074	0.050
Cromo	0.40	0.22	0.39	0.36	0.26
Hierro	2.08	1.71	2.31	2.10	2.21
Níquel	0.104	0.110	0.156	0.228	0.190
Manganeso	0.077	0.074	0.086	0.102	0.111
Arsénico	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e
Elementos alcalinos mg/l					
Potasio	4.60	5.45	5.88	6.15	7.14
Sodio	128.56	45.75	39.61	38.60	40.13
Calcio	124.80	39.60	35.90	38.10	34.60
Magnesio	3.00	3.30	3.30	3.40	3.20
Sólidos totales mg/l	1290	483	420	496	724
Detergentes	0.93	1.35	1.50	1.80	1.78
Grasas	91.56	70.14	67.20	192.36	266.7

n.e = No evaluado

Para el caso de: Mercurio en sectores > 0.067 mg/l > que el límite permisible
 Cadmio en sectores > 0.010 mg/l > que el límite permisible
 Plomo en sectores > 0.350 mg/l > que el límite permisible

Por otra parte, los plaguicidas y productos químicos utilizados en las explotaciones agrícolas de las zonas más aledañas al cauce del río, están haciendo que esta

carga contaminante restrinja el uso de estas aguas en los diferentes sistemas productivos. En la Tabla 2 se presentan los límites máximos permisibles para Cadmio y Arsénico en suelo, aguas para uso agrícola, uso pecuario, consumo humano y plantas, según diferentes normas nacionales e internacionales.

Tabla 2. Límites máximos permisibles (LMP) para Cadmio y Arsénico en aguas y plantas según diferentes normas nacionales e internacionales.

País-Entidad-Organismo	Elementos	Agua potable (mg/l)	Agua uso agrícola (mg/l)	Agua uso pecuario (mg/l)	Plantas (mg/kg)
Colombia I.N.S	Arsénico	0.05	N.E.	N.E.	N.E.
	Cadmio	0.005	N.E.	N.E.	N.E.
INCONTEC	Arsénico	0.1	N.E.	N.E.	0.1 – 1.0
	Cadmio	0-01	N.E.	N.E.	0.01 – 0.1
Comité FAO-OMS	Arsénico	0.01-0.02	0.1	0.2	1.0
	Cadmio	0.01	0.01	0.05	0.01 –1.0
USA Public Health Service	Arsénico	0.05	N.E.	N.E.	N.E.
	Cadmio	0.01	N.E.	N.E.	0.01
Canadá	Arsénico	0.01	N.E.	N.E.	N.E.
	Cadmio	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Japón	Arsénico	0.05	N.E.	N.E.	N.E.
	Cadmio	0.01	0.05	N.E.	N.E.
Codigo. Nal de recursos Naturales	Arsénico	0.05	0.1	N.E.	N.E.
	Cadmio	0.01	0.01	N.E.	N.E.
E.P.A	Arsénico	0.05	N.E.	N.E.	N.E.
	Cadmio	0.01	N.E.	N.E.	N.E.

N.E. = No especificado

Se ha estimado que alrededor del 10% de esta carga contaminante es vertida al río Bogotá por los mataderos, curtiembres, establecimientos floricultores, industrias químicas, explotaciones carboníferas, fundiciones, termoeléctricas y por las alcantarillas transportadoras de los desechos urbanos, etc. que funcionan en las poblaciones situadas cerca del río en el trayecto anterior a su llegada a la ciudad de Bogotá. El 90% restante de la carga contaminante es producida por la inmensa

variedad de desechos líquidos y sólidos de toda índole que aporta la población, la industria, el parque automotor, las actividades agropecuarias, etc. (Castro, 1990).

2.2 CADMIO Y ARSÉNICO EN SUELOS

Hasta hace unos pocos años, aunque no se disponía de datos cuantitativos respecto a la cantidad de Cadmio y Arsénico presente en los suelos de Colombia y específicamente, en los situados dentro de la cuenca del río Bogotá, era muy probable que estos dos elementos traza y varios otros más estuviesen presentes en cantidades variables en los suelos y presumiblemente en los pastos y productos vegetales producidos por ellos. Esta alta probabilidad derivaba del hecho de que estos dos elementos traza y otros más mencionados anteriormente, habían sido encontrados y cuantificados en las aguas del río Bogotá y de sus afluentes que, como ya se anotó, constituyen casi la única fuente de agua de riego de los suelos y cultivos que se realizan desde hace más de medio siglo a lo largo y ancho de la cuenca del río Bogotá.

En efecto, varios de los estudios mencionados atrás sobre la calidad de las aguas del río Bogotá (CAR-Haskoning, 1986; Ingeseries, 1991) han permitido comprobar la presencia en las aguas de elementos como el Mercurio (0.002 a 0.067 mg/l), Cadmio (>0.011 mg/l), Cromo (0.050 a 0.067 mg/l), Plomo (>0.35 mg/l) y otros que como el Arsénico, Cobre, Níquel y Zinc que aunque se presumen presentes, no se cuantificaron. También sugería como obvia la presencia del Cadmio en los suelos de la Sabana de Bogotá, el hecho de haberse encontrado este elemento, en hortalizas como el apio y acelga cultivadas en las zonas hortícolas de la Sabana de Bogotá, en las cuales se encontraron concentraciones de Cadmio que fluctuaron para la acelga entre 1.13 y 2.66 mg/kg y entre 0.76 y 1.72 mg/kg para el apio, concentraciones que obviamente debieron ser provistas predominantemente o en alguna medida por el Cadmio acumulado en el suelo.

Las pruebas concluyentes de la presencia del Cadmio y del Arsénico en los suelos de la sabana de Bogotá han sido los trabajos realizados en los últimos años por diversos investigadores (González y Mejía, 1994; Vargas y Mejía, 1996; González y Vargas, 1998; Quimía, 1998; Matamoros, Mejía y Vargas, 1999), los cuales han permitido no solo demostrar la acumulación del Cadmio, Arsénico y varios otros elementos traza, que ha depositado principalmente el riego con las aguas del río Bogotá no solo en los suelos, sino también en los pastos y productos agropecuarios producidos por ellos, en su mayoría productos de consumo diario como las hortalizas, la carne y la leche. Estos estudios demostraron la presencia del Cadmio y Arsénico en por lo menos seis localidades estudiadas, de concentraciones que sobrepasaron los niveles considerados críticos por diferentes organismos de salud pública internacionales (Comité Mixto OMS-FAO, 1992) que han propuesto como límite crítico para el Cadmio y el Arsénico cantidades respectivamente de 3 mg/kg y 30 mg/kg, cantidades originalmente propuestas por Pendias y Pendias (1992). En éste, lo mismo que en estudios anteriores se demostró que para los suelos estudiados, la textura, las características químicas, el contenido de materia orgánica y la mineralogía de las arcillas han contribuido a facilitar que el Cadmio y el Arsénico suministrados en el agua de riego, se hallan acumulado progresivamente en las fases adsorptivas del suelo. Estos estudios en la fase de invernadero realizados con los suelos de la sabana de Bogotá, utilizando aguas de riego con diferentes concentraciones de Cadmio y Arsénico demostraron que el aumento de la concentración de Cadmio y Arsénico en las aguas de riego indujo una mayor acumulación de estos elementos en las partes comestibles de lechuga, pepino y zanahoria, lo que, por supuesto, determina un mayor riesgo para la salud de los consumidores de estos productos. También demostraron que existe una alta correlación entre los elementos Cadmio y Arsénico presentes en la solución del suelo y las cantidades encontradas en los tejidos foliares de lechuga, pepino y zanahoria y que su rendimiento tiende a disminuir a medida que se aumenta la concentración del Cadmio y el Arsénico en el agua de riego lo mismo que el efecto de interacción de los dos elementos (González y Mejía, 1994).

Investigaciones realizadas en otras latitudes confirman que en muchos países del mundo, el Cadmio constituye una de las mayores preocupaciones ambientales, ya que este elemento al ser absorbido por las plantas se convierte en un riesgo potencial para los consumidores, cuando la concentración del Cadmio, supera los límites considerados tolerables en los alimentos, provenientes de cultivos que han crecido en suelos contaminados. Así, por ejemplo, en el Japón y en Taiwan, las aguas residuales descargadas por extracciones mineras y plantas químicas, contaminaron las aguas de riego, las cuales al ser aplicadas a los cultivos de arroz generaron una absorción de altas concentraciones de Cadmio por los granos cosechados en estos suelos con niveles que fueron capaces de producir la intoxicación y en algunos casos la muerte a un gran número de consumidores. Este estudio demostró también que la concentración total (fracción móvil más fracción inmóvil) del Cadmio en el suelo, al igual que la tasa de difusión de los iones del elemento móvil a través de la solución del mismo, incide en la cantidad absorbida por las plantas y que es la fracción móvil la que constituye el verdadero riesgo de toxicidad a las plantas. (Dar-Yuan et al, 1996). Un error muy frecuente es el de evaluar este potencial de toxicidad, con base en el Cadmio total extraído del suelo, en lugar de evaluar la fracción móvil que puede ser obtenida mediante diferentes soluciones tales como: CaCl_2 0.01 M, HCl 0.1 M, DPTA o con resina quelatinizada. (Dar-Yuan et al, 1996).

Binghan et al, (1976), originalmente demostraron que la penetración del Cadmio a la planta se produce a través del proceso de difusión de iones en la solución del suelo hasta entrar en contacto con la superficie radicular. Esta difusión es por lo tanto un factor muy importante en el movimiento del Cadmio hacia las raíces y posteriormente al interior de la planta. Para medir la fracción móvil o biodisponible del Cadmio se han utilizado membranas de resinas quelatinizadas, colocadas en suelos saturados cuya absorción y fijación del Cadmio guarda una estrecha relación con la absorción de este elemento por las plantas de arroz. Este método puede ser

utilizado, para hacer mediciones in situ y para evaluar la biodisponibilidad del Cadmio en los lotes cultivados en arroz.

El Cadmio es un metal relativamente escaso, ya que ocupa el puesto 67 del orden de abundancia relativa de los elementos en la naturaleza y no se considera un elemento esencial ni para las plantas ni para los animales puesto que no cumple ningún papel o función biológica específica en el organismo, y por el contrario, se considera altamente tóxico tanto para las plantas como para los animales (Fassett, 1980). También se ha demostrado que el Cadmio presenta una gran afinidad con el Zinc, elemento al cual suele presentarse asociado en la naturaleza en concentraciones relativas que varían entre 1:100 y 1:12000 partes de Cadmio por partes de Zinc, dentro de la fracción mineral de la mayoría de los suelos.

Respecto del Arsénico, según Haan y Zwerman (1975) es un elemento que normalmente se encuentra en el suelo en forma de cation divalente (As^{++}) y que su principal mecanismo de unión y permanencia en el suelo es su adsorción en los sitios de intercambio del complejo coloidal. Los mismos autores afirman que el comportamiento químico del Arsénico es muy similar al del fósforo por lo tanto los factores que afectan o influyen en la fijación de los fosfatos solubles actúan en forma similar con el Arsénico. Así cationes como el Al^{+++} el Ca^{++} y el Fe^{+++} son potenciales fijadores de Arsénico, sin embargo, la mayor fijación la ejercen el hierro y el aluminio, y en menor grado el calcio. Al igual que los fosfatos, el Arsénico suele ser fijado en las capas más superficiales del suelo, no obstante, en ausencia de sustancias que lo puedan fijar, este elemento puede migrar y acumularse en las capas mas profundas de suelo, (Hargitaí, 1994). También se ha demostrado que el Arsénico presenta una marcada tendencia a formar complejos con iones cloruro e hidroxilo. (Hanne y Kronntje, 1973).

En general, puede decirse que existen algunas propiedades que afectan la forma y disponibilidad de los iones metálicos en los suelos y que deben ser tenidas en

cuenta cuando se trate de evaluar los niveles de contaminación en un área determinada.

Según Alloway, (1995) el pH, entendido como la presencia de cationes (H^+) en la solución del suelo, presenta un equilibrio dinámico con predominancia de las partículas negativas del suelo. Este equilibrio es afectado por los cambios en el potencial redox, cambios que suceden especialmente en condiciones de suelos inundados cuyas condiciones de reducción generalmente incrementan el pH, mientras que las condiciones de oxidación, por el contrario, lo disminuyen. Estas variaciones generan una dinámica muy activa de los metales pesados en los suelos, siendo generalmente más móviles en condiciones de acidez y reduciendo su disponibilidad con pH alcalinos.

En experimentos realizados en materos y en condiciones de invernadero utilizando dos tipos de suelo (Eutric Cambisol y Gleyic Luvisol) y plantas de maíz, cebolla y espinaca, Lechoczky, et al (1996) demostraron que al incrementar los niveles de Cadmio aplicados al suelo se incrementaron los contenidos de este elemento en los tejidos foliares de las tres especies y se redujo en forma significativa la producción de biomasa, especialmente en la espinaca (cultivo más sensible). Los contenidos de Cadmio en los tres cultivos dependieron del tipo de suelo, siendo influenciados especialmente por el pH, siendo mayores los contenidos en aquellas plantas que crecieron en suelos ácidos (Gleyic Luvisol).

Otro aspecto a tener en cuenta son los contenidos y calidad de la materia orgánica la cual influye en las propiedades químicas de los suelos, especialmente en el contenido de sustancias húmicas y no húmicas. Estas sustancias forman poli electrólitos de moderado peso molecular, que se originan por reacciones de síntesis secundaria de los microorganismos y que son de características disímiles en cuanto a su composición. Tales sustancias poseen una gran variedad de grupos funcionales como: Carboxylo, Fenohidroxylo, Carbonilo y Esteres etc. con

capacidad, para retener, acomplejar o precipitar iones metálicos. (Chen y Stevenson, 1986).

Por otra parte, la composición de la fracción mineral de los suelos está directamente relacionada con la capacidad de intercambio iónico. Suelos con altos contenidos de minerales de arcilla (Illitas, Esmécticas y Vermiculitas, etc.) sufren procesos de sustitución isomórfica que permiten la presencia de un potencial grande de cargas negativas en la superficie del mineral. Los minerales de arcilla de tipo 1:1 como la Caolinita tienen una superficie específica relativamente pequeña (5-40 m²/g) mientras que las de tipo 2:1 como la Vermiculita, Montmorillonita y Esmécticas poseen superficies específicas grandes (700- 800 m²/g), lo cual permite una gran capacidad en las superficies de contacto para que se realice la adsorción en forma intercambiable de iones metálicos. Igualmente, los minerales de arcilla usualmente se combinan con coloides húmicos formando complejos órgano-minerales que controlan la concentración de iones metálicos en la solución del suelo. (White, 1988).

2.3 CADMIO Y ARSÉNICO EN PLANTAS

Diversos estudios (Miller 1982; Keoppe, 1970) han sugerido, sin probarlo, que aunque los niveles de elementos traza, como el Cadmio, que se incorporan a las plantas a través de los suelos, suelen ser ínfimos, podría llegar a afectar la salud humana. Esto ha sido demostrado por estudios realizados por diversos investigadores (Mengel y Kirkby, 1982; Marshner, 1982) quienes consideran que este elemento puede ser extraído en cantidades significativas de los suelos por diferentes especies dependiendo de su disponibilidad en la solución del mismo. Esta disponibilidad estaría relacionada entre otros factores con la magnitud y tipo de contaminación antropica.

El Cadmio y el Arsénico, al igual que muchos otros elementos traza potencialmente tóxicos, una vez que se incorporan y acumulan en los suelos, pueden pasar a la solución del mismo y ser absorbidos por las plantas en cantidades que varían de acuerdo con la especie y con las variedades y/o biotipos, dando lugar a diferentes efectos tales como: alteraciones fisiológicas, cambios morfológicos en la planta, disminución de rendimientos, o a otros que aún no se conocen completamente.

En un trabajo llevado a cabo hace más de 60 años, pero de gran interés, realizado en algunos suelos arroceros del sudoeste de los Estados Unidos, se estudió el efecto de diferentes cantidades de Arsénico, que aparentemente mostró que las cantidades perdidas de este elemento no fueron tomadas por las plantas. Como explicación se sugirió, que las condiciones altamente reductoras del cultivo generaron las pérdidas del Arsénico, mediante un proceso en el cual el elemento fue reducido a Arsina gaseosa. De igual modo se atribuyó en forma concluyente un alto efecto tóxico de los compuestos reducidos de Arsénico sobre el arroz de inundación (Reed y Sturgis, 1936).

McLaughlin, et al (1994) encontraron que las concentraciones de Cadmio en tubérculos de papa (*Solanum tuberosum* L.) presentaban una relación directa con la conductividad eléctrica inducida por la alta presencia de Sodio, pH ácido y carbono total alto. No estuvo relacionado en cambio con la presencia de Fósforo o Azufre como se suponía; estos mismos autores afirman que el Arsénico y el Cloro inducen una mayor movilidad del Cadmio en el suelo, incrementando la fitodisponibilidad y la acumulación en los tubérculos de papa, en cultivos regados con aguas salinas en el sur de Australia.

En investigaciones adelantadas por Rubio, et al (1994) con plantas de arroz que crecieron en un medio contaminado por metales pesados (Cadmio y Níquel) se observó que estos elementos se acumularon en las raíces y afectaron los brotes (macollas) de las plantas e indujeron en estos tejidos disminuciones de las

concentraciones de Potasio, Calcio y Magnesio; indicando que el Cadmio y el Níquel interfieren en la distribución de estos elementos a las diferentes partes de la planta, efecto que se puede contrarrestar con la aplicación de fitohormonas (Ácido absísico o Ácido giberélico).

En los cultivos de arroz que se realizan en los suelos de la cuenca media y baja del río Bogotá, es muy presumible que el riego continuo y prolongado por muchos años con las aguas del río haya inducido una acumulación de Cadmio y Arsénico en el arroz, cuya magnitud se tratará de analizar a continuación con base en todos los factores que normalmente influyen tanto en la movilidad como en la biodisponibilidad de estos elementos.

De todos los elementos traza que pueden llegar a incorporarse a los suelos, algunos son relativamente inmóviles. No es este el caso del Cadmio, elemento que la planta puede absorber con relativa facilidad a través de las raíces incorporándose al sistema vascular para ser transportado y acumulado a las partes aéreas de la planta y bajo ciertas condiciones pueden alcanzar niveles de riesgo para la salud humana. La gran similitud química que existe entre el Cadmio y el Zinc permite que en ocasiones el Cadmio se mimetice y atravesase los mecanismos selectivos, y sea absorbido por las plantas y translocado a sus diferentes estructuras. No obstante, a diferencia del Zinc que es un micro nutriente esencial, el Cadmio es un elemento que alcanza rápidamente niveles tóxicos dentro de los tejidos ocasionando desarreglos en las actividades enzimáticas de las plantas. Su efecto tóxico es atribuido por una parte a los grupos tiol (-SH) de las enzimas y proteínas, y por otra, a su efecto negativo en el metabolismo del Hierro y el Magnesio, lo que genera clorosis en las plantas. (Mengel y Kirkby, 1992).

Wool House (1983) citado por Salisbury y Ross (1994) afirma que hay una considerable variación genética en la capacidad de diversas especies para tolerar cantidades de metales no esenciales tóxicos como el Plomo, Arsénico, Cadmio,

Plata, Aluminio, Mercurio, Estaño, etc., y que en algunas especies estos elementos se absorben solo en cierto grado, lo cual representa una forma de evitar la absorción y no de tolerancia o resistencia. En otros casos los elementos se acumulan en las raíces, con transporte limitado hacia las partes aéreas, y en otros más, tanto las raíces como las partes aéreas contienen cantidades mucho mayores de estos elementos que las que las especies o variedades no tolerantes pueden soportar.

Recientemente se ha descubierto un mecanismo de tolerancia muy importante y bastante generalizado en la filogenia por el cual los metales pierden su toxicidad al ser quelatados por "Fitoquelatinas" que son pequeños péptidos ricos en el aminoácido azufrado CISTEÍNA. Estos péptidos por lo general tienen de 2 a 8 unidades de cisteína en el centro de la molécula, así como un ácido glutámico y una glicina en extremos opuestos. Es así como los átomos de azufre de la cisteína se unen a los metales haciéndolos inocuos: También es probable que participen otros átomos como el Nitrógeno y el Oxígeno. Gekeler et al, 1989 citado por Salisbury y Ross (1994) afirman que son numerosas las especies que producen fitoquelatinas, pero que hasta ahora solo se les ha encontrado cuando se presenta un metal en cantidades tóxicas. También se producen en presencia de cantidades excesivas de elementos como Cobre y Zinc, por lo que pueden detoxificar incluso del exceso de metales esenciales. Por lo tanto, su formación representa una verdadera respuesta adaptativa a un stress ambiental, que actúa de manera semejante a como lo hacen las proteínas llamadas metalotioninas que son capaces de quelatar metales en los organismos animales y en el hombre, pero en contraste con las fitoquelatinas, no representan productos genéticos directos. Aún así, el control genético de su producción resulta ser una herramienta fundamental para comprender la capacidad de algunas especies para vivir sobre desechos metalíferos y otros suelos contaminados, (Salisbury y Ross, 1994).

El hecho de que numerosas plantas puedan crecer en suelos que contienen elevadas concentraciones de ciertos iones metálicos, indica que deben de estar de

alguna forma adaptadas a estas condiciones particulares. Las plantas pueden evitar los efectos tóxicos colonizando las áreas donde la concentración metálica sea menor dentro del área contaminada, o mediante mecanismos de exclusión o absorción selectiva (Barceló, 1992). Sin embargo, cuando se analizan los tejidos de algunas plantas como *Minuartia verna*, *Cerastium holosteroides*, *Agrostis tenue* o *Calluna vulgaris* se observa que presentan concentraciones elevadas de metales como Zn, Pb, Ni, Cr, Cu, Co. A estas plantas se les considera como tolerantes a los metales pesados y pueden ser consideradas como plantas indicadoras de yacimientos metalíferos.

Barcelo et al, (1992) indican que la tolerancia a los metales tóxicos está genéticamente determinada y parece ser una característica dominante y poligénica. La tolerancia metálica suele ser muy específica y es por ello que las plantas que son tolerantes a un determinado ión no suelen serlo a otros iones aunque estos tengan características físico-químicas similares. Las tolerancias múltiples son escasas y se presentan cuando varios iones tóxicos están presentes en el mismo suelo, y, es por ello que hay clones de *Agrostis stolonifera* que son tolerantes al Magnesio y al Níquel. Existen diferentes mecanismos por los cuales las plantas tolerantes resisten los efectos tóxicos. En el caso del Zinc se ha encontrado que las plantas tolerantes acumulan el metal en las paredes celulares, evitando la presencia de concentraciones tóxicas del elemento en el interior del citoplasma celular. También se sabe que las plantas sintetizan agentes quelatantes que forman complejos con los metales transformándolos en inocuos. Las especies con tolerancia metálica tienden a ser excluidas de los suelos normales por las no tolerantes, que son más vigorosas y con una mayor tasa de crecimiento. A pesar de esto, las especies tolerantes son de gran utilidad en la recuperación de suelos contaminados por aguas con altos contenidos de metales o suelos adyacentes a zonas mineras.

Díaz-Aguilar et al (1994), demostraron que plantas de trigo cultivadas en soluciones nutritivas a las cuales se le adicionaron elementos como Cadmio, Níquel y Plomo

disminuyeron su crecimiento en forma significativa y atribuyeron esta reducción a causas como: 1) La pérdida de elasticidad de la pared celular; 2) La disminución de la tasa fotosintética; 3) La disminución de las cantidades de clorofila; y/o 4) La disminución en la captura y asimilación de CO₂ por cierre estomático.

Así mismo las investigaciones realizadas por Page et al (1972) demostraron que el Cadmio presenta un efecto global sobre el rendimiento de las plantas, y este difiere de una especie a otra, como lo demuestra la Figura 1, en la cual se observa el grado de sensibilidad de diferentes cultivos a la presencia de Cadmio en diferentes concentraciones.

En relación con la selectividad y la capacidad de absorber elementos como el Cadmio por algunas especies, Marsschner, et al (1991), afirma que es relevante destacar el caso de la lechuga (*Lectucca spp*), ya que es una planta capaz de absorber grandes cantidades de este elemento, de suelos que se encuentren altamente contaminados.

Respecto a la manera como las plantas pueden evitar o tolerar los efectos tóxicos de los metales, Leita et al (1993), mencionan varios mecanismos. Uno de ellos es un mecanismo muy complejo que limita la absorción del metal tóxico por parte de las raíces y su posterior translocación a las partes aéreas. Otro es un mecanismo de detoxificación que opera en los tejidos de la planta, a través del proceso de compartimentación celular, que le confiere tolerancia a la planta al efecto tóxico de un metal específico. También mencionan que algunas especies presentan una mayor capacidad para retener y acomplejar los elementos metálicos al nivel de las raíces, hecho que induce una acción protectora, que impide su translocación a las partes aéreas.

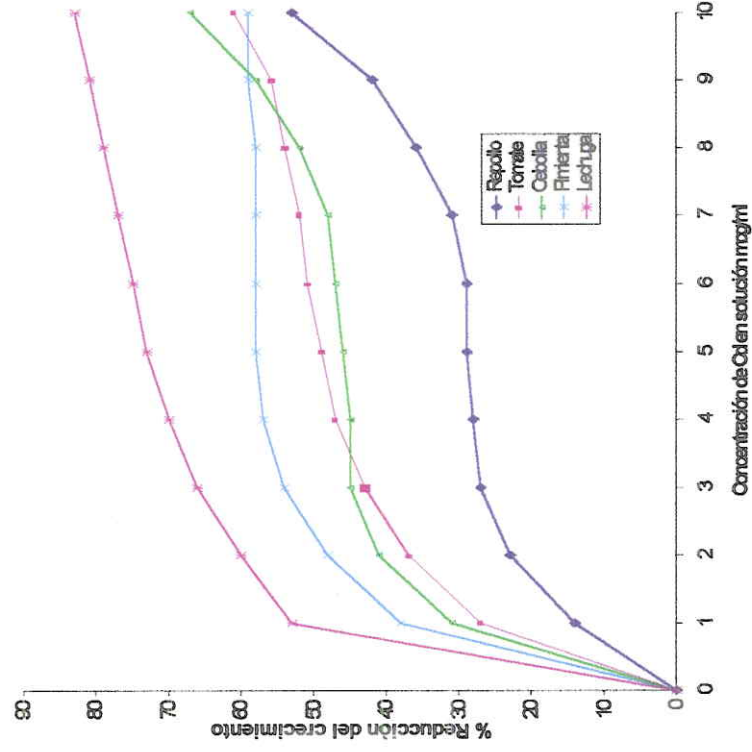
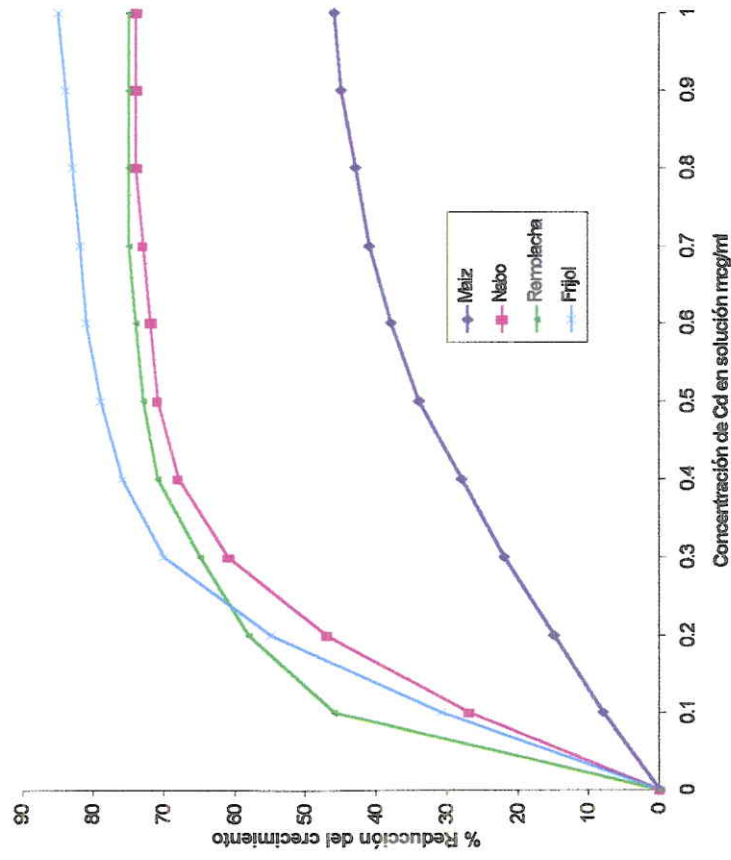


Figura 1. Porcentaje de reducción del crecimiento en dif. antes especies de plantas en función de la concentración de Cadmio en la solución, Page et al, (1972).

También hace referencia a algunas especies que poseen mecanismos de inactivación de sustancias tóxicas (elementos metálicos), a través de sustancias quelatantes o secuestrantes que se encuentran en los tejidos radiculares, inactivación que suele estar acompañada por un incremento en la capacidad de combinar los metales con pectinas y con la fracción proteica de la pared celular (Taylor, 1987).

2.4 CADMIO EN HUMANOS

El Cadmio es un elemento tóxico tanto para humanos como para animales, que tiende a ser acumulado en el hígado, riñón y pulmones. En el hígado, bloquea las enzimas que poseen grupos sulfhidrilos (SH) inhibiendo sus sitios activos y formando metalotioninas, que son sustancias complejas de alta toxicidad en los organismos vivos. La sintomatología de las intoxicaciones agudas se caracterizan por problemas respiratorios (bronquitis y neumonía), arterioesclerosis, e hipertensión arterial. Las intoxicaciones crónicas afectan el hígado y riñones produciendo en este último la excreción de las proteínas en la orina (proteinúria). La ingesta prolongada de este elemento altera el metabolismo del calcio (Ca), presentándose un halo amarillo alrededor de los dientes con pérdida del esmalte dentario, e induciendo osteoporosis; estos dos últimos síntomas caracterizan la enfermedad conocida como Itái-Itái, sumamente dolorosa. El Cadmio se considera un inductor de aberraciones cromosómicas que generan teratogénias, ya que es capaz de atravesar la placenta provocando malformaciones en los fetos en desarrollo, bajo peso al nacimiento y raquitismo infantil. También se asocia al Cadmio con problemas de cáncer testicular y de próstata, es de una alta velocidad de eritrosedimentación (Valle, 1986). En la Tabla 3 aparecen los límites establecidos por diferentes organizaciones a nivel internacional para la presencia de este elemento en el aire, los suelos, y las aguas.

Tabla 3. Límites sugeridos o recomendados de Cadmio por diferentes organizaciones de Salud Pública Internacional

Ubicación de la sustancia	Límite
Aire	
Normas Ocupacionales Federales	
Tiempo de exposición a polvos (8 horas) Por emanaciones	0.2 mg/m ³
Exposición Permanente	0.1 mg/m ³
Norma de NIOSH	
Tiempo de exposición a polvos (8 horas)	40 mg/m ³
Tiempo de exposición a emanaciones (5 mtos)	200 mg/m ³
Normas de la OMS	
Exposición a corto plazo	250 mg/m ³
Exposición a largo plazo	10 mg/m ³
Suelos	
Normas del comité mixto FAO -OMS	
Suelos agrícolas	1 mg/kg
Norma de la EPA	
Suelos normales (no contaminados con aguas residuales)	3 mg/kg
Aguas	
EPA	
Agua potable	10 µg/l
OMS	
Agua para consumo humano por un día	0.15 mg/l
Agua para consumo humano hasta siete días	0.02 mg/l
Para consumo humano a largo plazo	0.005 mg/l

EPA = Agencia de Protección Ambiental

FAO = Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación

NIOSH = Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional (EE. UU).

OMS = Organización Mundial de la Salud

Tomado del "US Department of Health and Human Services" Centro Panamericano de Ecología y Salud.1991.

Estudios realizados por la OMS 1991, demuestran que los abastecimientos de agua de los países industrializados contienen generalmente menos de 1 $\mu\text{g/l}$ pero en algunos casos se han encontrado concentraciones mayores. El límite superior provisional fijado en las "normas internacionales para el agua potable" es de 10 $\mu\text{g/l}$; suponiendo un consumo diario de 2.5 litros para un adulto, resultaría una ingestión máxima de Cadmio de 25 $\mu\text{g/persona día}$ lo cual indica que si se presenta una exposición a largo plazo o permanente se estaría superando hasta en 5 veces el nivel permisible para esta condición (0.005 $\mu\text{g/l}$).

2.5 ARSÉNICO EN HUMANOS

El Arsénico es un elemento fácilmente absorbible por el tracto digestivo y se distribuye en el cuerpo combinándose con proteínas, formando principalmente la Alfa-Globulina-Arsénico, la cual se considera como un tóxico del protoplasma celular, que se une a los grupos sulfhidrilos, inhibiendo la acción de varias enzimas del metabolismo celular y la respiración. Posee un efecto de dilatación y aumento de la permeabilidad capilar de intestino. Los efectos de la toxicidad crónica se caracterizan por pérdida de apetito, desarreglos gastrointestinales, conjuntivitis, Hiperqueratosis, melanodermia, neuritis periférica (pérdida sensorial en la punta de los dedos de manos y pies); y se le considera inductor de cáncer de piel, pulmón y muerte neonatal (Valle, 1986). En la Tabla 4 se relacionan los límites establecidos por diferentes organizaciones internacionales de salud pública, para la presencia de este elemento en el aire, alimentos y el agua.

Tabla 4. Límites recomendados o sugeridos para el Arsénico inorgánico por diferentes organismos de salud pública.

Ubicación de la sustancia	Límite
Aire	
Normas Ocupacionales Federales	
Tiempo de exposición de (8 horas)	0.01 mg / m ³
Normas de la NIOSH	
Tiempo de exposición (15 mtos)	0.02 mg / m ³
Normas de la ACGIH	
Valor promedio	0.2 mg / m ³
Alimentos	
Normas OMS	
Cerdo	0.5 mg/kg
Huevos	0.5 mg/kg
Carne de ave	0.5 mg/kg
Derivados de pollo	20 mg/kg
Agua potable	
Normas de la EPA	
Nivel máximo de contenido	0.05 mg / l
Concentración mínima con riesgo de cáncer en la vida	0.0002 mg / l

Tomado de " US Department. of Health and Human Services" Centro Panamericano de Ecología y Salud, 1991.

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 MATERIALES

3.1.1 Localización y características de la zona de estudio. Los suelos objeto de la presente investigación están ubicados en la vereda Manuel Sur del municipio de Ricaurte (Cundinamarca) en una zona tradicionalmente dedicada al cultivo del arroz bajo riego. Representan más del 80% de la Consociación Los Manueles y taxonómicamente pertenecen a la Serie Los Manueles, un miembro de la Familia Arcillosa fina, mixta, Iso-hipertérmica de los Fluventic Vertic Haplusteps. Son los suelos dominantes en el paisaje de terrazas bajas de la Llanura aluvial del río Bogotá en sus cuencas media y baja. Están situados a una altitud que fluctúa alrededor de los 431 msnm, y en la zona que ocupan, la precipitación media oscila alrededor de 1.300 mm anuales y la temperatura promedio es de 28°C, parámetros que junto con el valor medio de la evapotranspiración potencial media de la zona definen el dominio del bosque seco tropical (bs-T). El clima edáfico se caracteriza por un régimen de humedad ústico y un régimen de temperatura Isohipertérmico.

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Definición y muestreo de los suelos. Con base en el levantamiento general y detallado de los suelos del área, realizado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC,1994), se comprobó la pureza relativa de la unidad de mapeo identificada en dicho estudio como Serie Los Manueles, miembro principal dominante (>80%) de la Consociación Los Manueles y las características morfológicas, físicas, químicas y mineralógicas que tipifican el pedón modal del

polipedón dominante en dicha unidad. Para el efecto se hicieron descripciones y muestreos sistemáticos de varios pedones del polipedón y se verificaron las características y rasgos diagnósticos, de acuerdo con las normas y parámetros contenidas en el Manual de Reconocimiento de suelos del USDA (S.S.S. Staff, 1956; 1985) y en la Taxonomía de Suelos del USDA (S.S. Staff, 1999). De cada uno de los horizontes del perfil modal del polipedón se tomaron muestras de 2 kg, que se remitieron al Laboratorio de Suelos de Corpoica para la realización del análisis de caracterización, y de cuantificación de los contenidos iniciales de los elementos traza Cadmio y Arsénico en los suelos experimentales.

3.2.2 Muestreo de aguas. En la zona de estudio y en el sitio del Río Bogotá en donde está ubicada la bocatoma desde la cual se bombea el agua para el riego de los cultivos de arroz de las parcelas experimentales, con anterioridad a la realización de los experimentos, se tomaron muestras de las aguas del río cada quince (15) días para un total de veinticuatro (24) muestras en el curso de un año agrícola. En estas muestras se determinó el contenido total de Cadmio y Arsénico, y se analizó la variación de la concentración de los dos elementos en las aguas del río durante los períodos de máxima y mínima precipitación (ej. de marzo a mayo, de junio a agosto, de septiembre a noviembre y de diciembre a febrero) relacionándolos con los cambios de caudal.

Las muestras se tomaron a una profundidad de 30 cm utilizando envases de polietileno de 1 litro de capacidad, completamente limpios. Las muestras fueron embaladas y transportadas en termos perfectamente refrigerados, de acuerdo con las especificaciones de los Laboratorios químicos de CORPOICA y del Laboratorio químico de INGEOMINAS. Como se explica más adelante en ellas se hicieron determinaciones de rutina y los contenidos de Cadmio y Arsénico.

3.2.3 Método de invernadero

3.2.3.1 Detalle del diseño experimental. Dentro de la extensión que ocupa la Serie Los Manuales en la zona de estudio, se tomaron muestras del horizonte superficial en varios sitios o pedones, a profundidades comprendidas entre 0 y 25 cm, hasta completar una muestra compuesta de aproximadamente 750 kg, para la realización de ensayos de invernadero. La muestra total se secó al aire y bajo sombra. Una vez seca se molió y desagregó suavemente con un rodillo de madera y luego se tamizó a través de un tamíz de 80 mallas. Dos muestras de 2 kg de este material, se remitieron al laboratorio para análisis de caracterización y especiales (contenidos de Cadmio y Arsénico). El resto del material se distribuyó en materas de 12 kg de capacidad que se colocaron individualmente en bandejas receptoras de bordes cóncavos (Figura 2), para evitar las pérdidas del agua de riego adicionada durante el ensayo y del Cadmio y Arsénico adicionados artificialmente (con las soluciones de concentración conocida) a los materos.

3.2.3.2 Características Físico Químicas del suelo con que se realizó el experimento. El análisis de suelo homogenizado y muestreado en forma previa al llenado de los materos arrojó los siguientes resultados en la caracterización físico-química. Además de los contenidos iniciales de Cadmio y Arsénico. Tabla 5.

Tabla 5. Características físico – químicas del suelo homogenizado con el cual se estableció el ensayo de invernadero.

Horiz cm	pH	Tex	M.O	P ppm	Ca	Mg	K	Na	CIC	CE	Fe	Cu	Mn	Zn	B	Cd	As
					meq/100 g				ds/m	ppm							
0 - 22	7.1	Far	1.1	26	15.4	2.6	0.31	0.32	18.6	0.52	7.5	1.3	1.5	0.5	0.74	2.41	2.24

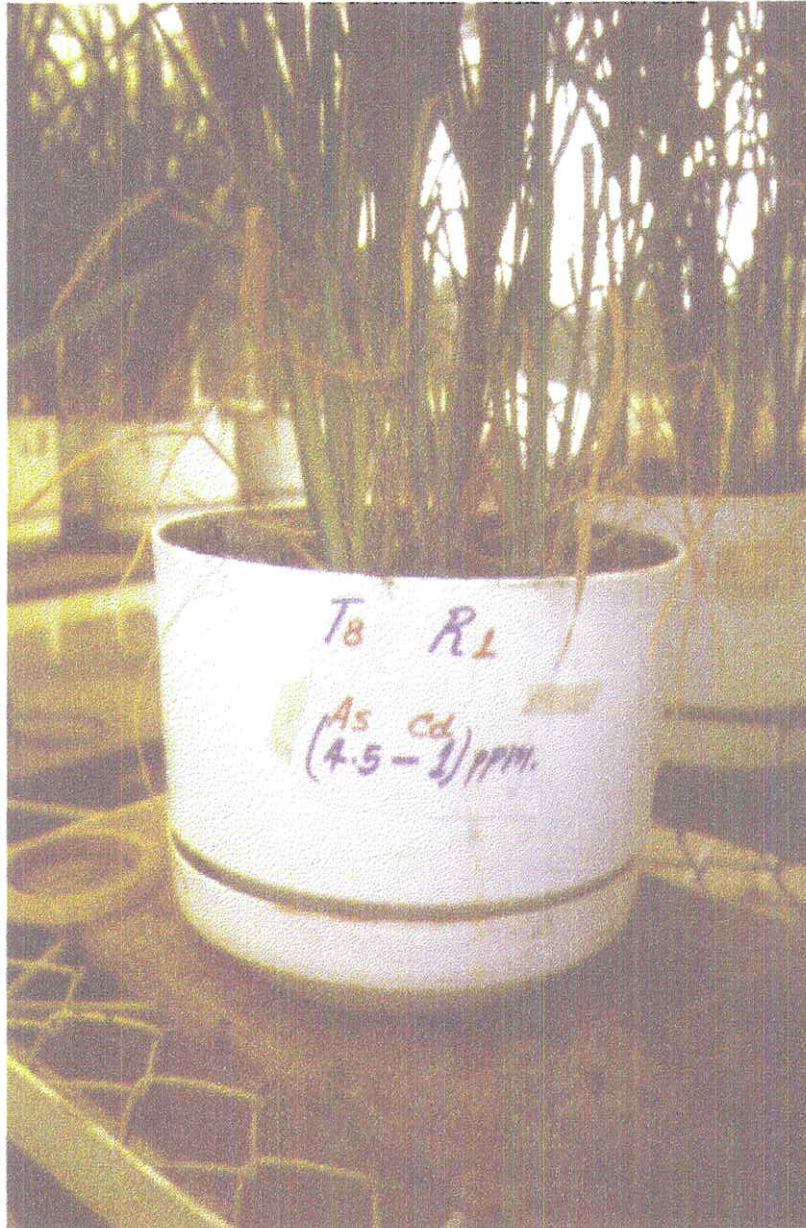


Figura 2. Materos con bandeja recibidora (permitió controlar las pérdidas de los tratamientos)

Como lo muestra la Tabla 5 el suelo presenta una textura de media a pesada con un pH que tiende a la alcalinidad, con bajos contenidos de materia orgánica, un contenido medio de fósforo, contenidos altos de Ca, relación Ca/Mg de (6:1), un contenido normal de Na (inferior a 1 meq/100 g), la conductividad eléctrica baja.

Estas condiciones de textura pesada, con altos contenidos de arcilla, tendencia a la alcalinidad y alta a moderada capacidad de intercambio catiónico, aparentemente presentan un medio apropiado para la retención y acumulación tanto de los elementos nutrientes como de los metales traza Cadmio y Arsénico en el suelo, cuando estos se suministran en forma recurrente con fuentes contaminadas de riego.

Los contenidos de Cadmio y Arsénico hallados en este suelo se consideran normales de acuerdo con los niveles establecidos por la Comunidad Económica Europea para suelos no contaminados o no tratados con aguas residuales.

El ensayo de invernadero se realizó en una casa de mallas del Centro experimental de Nataima (CORPOICA) localizado en el municipio del Espinal (Tolima) dentro de las coordenadas geográficas 4° 12' LN y 74° 52' Long N, aproximadamente a 800 metros del sitio en que realizaron las pruebas de campo. En la casa de mallas, por lo tanto, rigen las mismas condiciones climáticas y ambientales de los suelos y del sitio en que se montaron las experiencias de campo que, para el efecto, fueron Humedad Relativa: 76% Temperatura: 28°C.

Para el ensayo de invernadero se siguió un diseño completamente al azar con arreglo factorial (2)⁴, para un total de 16 tratamientos y 3 repeticiones, en el que los factores fueron los elementos traza Cadmio y Arsénico adicionados a las materas en las aguas de riego, en 4 diferentes niveles. Se utilizó como planta indicadora el arroz (*Oryza sativa* L.) de la variedad Oryzica-1, el cual se llevó hasta el momento de la cosecha.

Las Tablas 6 y 7 contienen respectivamente las cantidades de Cadmio y Arsénico de las aguas de riego aplicadas a los materos, y la combinación de tratamientos de los dos elementos, los cuales se aplicaron teniendo como criterio que el rango abarcara las posibles cantidades que se presentan en las aguas de riego del río Bogotá, y se pudiera tener efectos fisiológicos visibles sobre la planta indicadora (arroz), al igual que la facilidad para la preparación y aplicación de las soluciones en el agua de riego, ya que concentraciones muy pequeñas no presentarían efectos fisiológicos visibles y además se dificultaría su preparación y manipulación para adicionarlas en el riego.

Tabla 6. Contenido de Cadmio y Arsénico de las aguas de riego aplicadas en los ensayos de invernadero.

TRATAMIENTO	CONCENTRACIONES APLICADAS	
	Arsénico mg/l	Cadmio mg/l
1	0	0
2	1.5	0
3	3.0	0
4	4.5	0
5	0	1
6	1.5	1
7	3.0	1
8	4.5	1
9	0	2
10	1.5	2
11	3.0	2
12	4.5	2
13	0	3
14	1.5	3
15	3.0	3
16	4.5	3

Tabla 7. Combinación de tratamientos para las diferentes concentraciones de Cadmio y Arsénico aplicadas en el riego.

ARSÉNICO	CADMIO			
	0 mg/l	1 mg/l	2 mg/l	3 mg/l
0 mg/l	T1 (0-0)	T5 (0-1)	T9 (0-2)	T13 (0-3)
1.5 mg/l	T2 (1.5-0)	T6 (1.5-1)	T10 (1.5-2)	T14 (1.5-3)
3.0 mg/l	T3 (3.0-0)	T7 (3.0-1)	T11 (3.0-2)	T15 (3.0-3)
4.5 mg/l	T4 (4.5-0)	T8 (4.5-1)	T12 (4.5-2)	T16 (4.5-3)

3.2.3.3 Dosificación y preparación de las soluciones de Cadmio y Arsénico añadidas en las aguas de riego. Las soluciones de Cadmio y Arsénico que se adicionaron a las plantas de arroz como aguas de riego se prepararon a partir de reactivos de alta pureza (99.9%) en la forma en que se especifica a continuación.

Las soluciones de Arsénico se prepararon a partir de Trióxido de Arsénico (As_2O_3) disolviendo las cantidades que se especifican en la Tabla 8 en Hidróxido de Sodio (NaOH) 6N. Se diluyó posteriormente en agua bidestilada, se llevó a un pH de 5.5 con HNO_3 Al 2%, y se llevó a un volumen final de un litro con agua bidestilada. De estas soluciones concentradas se hicieron diluciones a fin de aplicar las diferentes concentraciones y tratamientos a las unidades experimentales durante su ciclo de crecimiento hasta la cosecha. Las concentraciones de las soluciones aparecen en la Tabla 8 como Arsénico elemental (As^0) y como anhídrido u óxido arsenioso (As^{+3}).

Tabla 8. Preparación de las soluciones de Arsénico a partir de Trióxido de Arsénico (As_2O_3)

Arsénico (As) en mg/l	Arsénico como As_2O_3 . (g/l)
2.160	2.860
4.320	5.710
6.480	8.560

Las soluciones de Cadmio se prepararon a partir de Sulfato de Cadmio sólido ($3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) grado reactivo (99.9%), disolviendo las cantidades exactas de la sal que se especifican en la Tabla 9 en agua bidestilada y ajustando el pH de la solución a 5.5, mediante la adición de HNO_3 del 1%, para posteriormente llevar a un volumen final de 1 litro con agua bidestilada. A partir de esta solución se hicieron diluciones para obtener las concentraciones de Cadmio que se deseaba aplicar a cada tratamiento.

De las soluciones concentradas se diluyeron 0.7 ml por cada litro de agua, solución que se aplicó diariamente a cada tratamiento, para un total de 120 aplicaciones.

Las concentraciones de las soluciones preparadas aparecen en la Tabla 9 expresadas en $\mu\text{g/l}$ de Cadmio y en g/l de Sulfato de Cadmio octahidratado.

Tabla 9. Preparación de las soluciones de Cadmio a partir de Sulfato de Cadmio octahidratado ($3\text{Cd SO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$)

Cadmio (mg/l)	Cadmio en g/l de $3\text{Cd SO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
1.440	3.285
2.880	5.710
4.320	9.855

3.2.4 Metodología de los ensayos de campo.

3.2.4.1 Descripción y Análisis de los suelos

3.2.4.2 Descripción del sitio. Los suelos en los cuales se realizaron las experiencias de campo están ubicados en la parte más baja de la planicie aluvial del río Bogotá y fisiográficamente corresponden a un paisaje de abanicos coalescentes

de relieve plano a ligeramente ondulado, ligeramente inclinado, con pendientes que no exceden del 3 ó 4%. El uso principal de la tierra en el sitio es mixto. Una parte del área está destinada a la ganadería semiintensiva de doble propósito (ceba y cría) con ganado cebú y pastos naturales y algunos implantados (principalmente Braquiaria). Secundariamente, otra parte de las tierras están dedicadas a cultivos como el arroz, algodón, sorgo y frutales en los predios de mayor tamaño, y a agricultura de pancoger de plátano, maíz y yuca en los predios más pequeños. En puntos cercanos al río se presentan inclusiones de bosques de galería, en su mayor parte guaduales. Para todos estos usos y especialmente para los predios más cercanos al río, la principal fuente de agua de riego ha sido a través de muchos años las aguas del río Bogotá.

El río Bogotá recorre por la parte central toda la zona agrícola de este a oeste, con dos flancos más o menos definidos. Un flanco occidental en el que están ubicados Girardot y Tocaima y un flanco oriental que corresponde a los municipios de Agua de Dios y Ricaurte. El lote en el que se efectuaron las experiencias de campo, por su cercanía al río, hace parte de la zona en que prevalece un sistema de explotación con arroz bajo riego, dentro de un esquema de economía empresarial. A continuación se describen las características morfológicas del perfil modal del polipedón en el que se montaron las parcelas del diseño experimental.

3.2.4.3 Descripción del Perfil Modal del polipedón del Lote Experimental.

3.2.4.3.1 Características extrínsecas. La descripción del sitio en el cual se desarrolló el experimento presenta la siguiente información y características morfológicas del perfil modal de la serie descrita como Manuel Sur por el Estudio detallado de suelos realizado por el IGAC (1994), para la construcción del Distrito de Riego Tocaima-Girardot.

Unidad de Mapeo	Consociación Los Manueles, Manuel Sur
Nombre de la Serie	Manuel Sur
Unidad de Mapeo y Taxonómica	La Serie Manuel sur es un miembro de la Familia: Arcillosa-Mixta Isohipertérmica de los Fluventic-Vertic-Haplustepts
Posición Geomorfológica	LLanura aluvial del río Bogotá parte baja, Cuenca baja del río Bogotá
Relieve	Plano a ligeramente ondulado con pendientes entre 0 y 10%
Materia Orgánica	De 0 - 3%
Posición dentro de la unidad Geomorfológica	800 metros de la ribera del río Bogotá margen izquierda aguas abajo.
Uso Actual	Cultivo de arroz
Altitud (msnm)	400 msnm
Relieve adyacente	Colinas suaves de poca altura
Vegetación	Pela, payande, pastos naturales, Igua, Acacio, Dividivi, Guacimo.
Zona de Vida	Bs-T.
T° Ambiental y Edáfica	28 °C, Reg. de temp isohipertérmica
T° Ambiental	30 °C
Nivel freático	> 1.5 m. en verano, superficial en el invierno.
Profundidad efectiva	Moderadamente profunda (60 cm).
Precipitación promedio anual	1350 mm
Material Geológico	Sedimentos aluviales finos del río Bogotá.
Régimen de humedad del suelo	Ústico marginal a Údico

Drenaje natural	Pobre a imperfecto (pobremente drenado a imperfectamente drenado)
Drenaje externo	Lento.
Drenaje interno	Lento a muy lento
Epipedón	Ocrico
Horizonte B	Cámbico
Material Parental	Sedimentos aluviales ricos en Ca y Mg

3.2.4.3.2 Características Intrínsecas del perfil modal. La Figura 3 muestra los rangos morfológicos del perfil modal del polipedón del lote experimental. La época de descripción fue al final del verano (primera quincena de marzo de 1998).

Ap 0 – 12 cm. Negro pardusco (10 YR 2/3) en húmedo (con presencia de una incipiente estratificación laminar); franco arcillosa, masiva con ligera tendencia a blocosa subangular fina a media, débil; dura en seco y firme en húmedo, pegajosa y plástica; abundantes poros tubulares finos y muy finos, macroporos escasos; comunes raíces finas y muy finas, macroorganismos no hay, pH 6.8, límite claro, plano.

Bw₁ 12 – 38 cm Pardo amarillento grisáceo (10 YR 4/2) en húmedo con abundantes moteados de color pardo rojizo, arcillosa, masiva con tendencia a blocosa sub-angular media, ligeramente dura, firme, muy pegajosa y muy plástica, abundantes microporos tubulares, macroporos escasos, pocas raíces muy finas, macroorganismos no hay, pH 7.0, límite claro y plano.



Figura 3. Perfil del pedón modal del polipedón experimental (Manuel Sur)

- BW₂** 38-72 cm Negro (10 YR 2/1) en húmedo, con abundantes moteados de color blanquecino; arcillosa, masiva con ligera tendencia a bloques subangulares, finos y medios ligeramente dura en seco, friable en húmedo, muy pegajosa y muy plástica; abundantes microporos tubulares finos; raicillas no hay; macroorganismos no hay, pH 7.5, límite difuso.
- C₁** 72-150 cm Negro pardusco (10 YR 2/3) en húmedo, abundantes moteos blanquecinos, arcillosa, prismática media, débil; dura, friable, muy pegajosa y muy plástica; abundantes microporos, tubulares finos; raíces no hay, macroorganismos no hay, pH 7.8, límite difuso.
- C₂** < 150 cm Negro pardusco (10 YR 2/3) en húmedo, arcillosa; masiva coherente, muy pegajosa y muy plástica, abundantes microporos, tubulares muy finos; raíces no hay, macroorganismos no hay, pH 7.0.

Observaciones especiales

1. En el primer horizonte se observan: a) grietas verticales de 2 mm de amplitud, que penetran hasta unos 15 cm dentro del horizonte subyacente; b) Una ligera estratificación muy fina que ratifica la influencia aluvial del río Bogotá.

En este horizonte también se observa una estratificación muy fina en forma de laminilla oscura atribuible a procesos de deposición aluvial por la actividad sedimentaria de las aguas del río Bogotá.

2. En el segundo horizonte se observan de 10 a 15% de manchas definidas, de forma alargada con un color pardo rojizo (7.5 YR 4/4). También son comunes las películas brillantes que recubren los poros tubulares y los agregados que podrían

ser superficies de presión muy incipientes probablemente ocasionadas por procesos alternos de expansión y contracción ocasionados por la presencia de montmorillonita en el horizonte. También se observan abundantes poros tubulares finos y muy finos con revestimiento rojizo de óxidos de Fe.

3. En los horizontes 3, 4 y 5 son comunes y abundantes los poros tubulares finos y muy finos, discontinuos con revestimientos brillantes en sus paredes. En estos horizontes, lo mismo que en los superficiales, también se observaron moteados blanquecinos que podrían ser originados por la acumulación de carbonatos libres de Ca y/o Mg.

3.2.4.3.3 Características Físico-Químicas del lote Experimental: Las principales características del perfil representativo del polipedón en el cual se realizaron los experimentos de campo se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10. Principales características físico-químicas del pedón modal del polipedón experimental de la Serie Manuel Sur (miembro de la Familia Arcillosa-Mixta Isohipertérmica de los Fluventic Vertic Haplustepts). Ricaurte 1998

Horizont	Text	M.O	pH	P	S	Ca	Mg	K	Na	CIC	Zn	B	Cd	As
				ppm		Meq/100 g					ppm			
0 - 22 cm	FAr	1.1.	7.1	19	26	16.3	2.86	0.26	0.32	19.7	0.4	0.8	4.4	5.2
23 - 51	FAr	0.8	7.0	7	19	33.8	10.7	0.29	0.92	45.7	0.2	0.7	3.6	2.7
51 - 72	Ar	0.5	7.9	26	37	31.7	8.3	0.50	0.59	41.1	0.4	0.6	—	—
72 - 150	Ar	0.5	7.5	21	46	28.6	8.6	0.44	0.76	38.4	0.3	0.6	—	—
150 -180	Ar	0.4	8.3	10	9	28.1	9.4	0.35	0.98	38.8	0.2	0.7	—	—
> -180	Ar	0.3	8.4	5	14	28.1	10.4	0.40	0.97	39.9	0.2	0.7	—	—

Son suelos de textura fina a muy fina FAr a Ar, de mineralogía mixta con predominancia de arcillas de tipo montmorillonítico, pero con un porcentaje inferior al 30%, lo cual le confiere una alta capacidad para retener cationes básicos, al igual que metales traza como el Cadmio y el Arsénico. El contenido de materia orgánica es bajo incluso en el primer horizonte. Esta circunstancia unida al bajo contenido

de arcilla del horizonte explica la CIC relativamente baja de este horizonte en comparación con las de los restantes horizontes, los cuales a partir del segundo aumentan casi al doble en su contenido de arcilla, hecho que explica el notable incremento de la CIC, que permanece con un valor casi constante cercano a 40 meq/100 g en todos los horizontes.

Una vez identificada espacialmente la unidad de mapeo y taxonómica (Suelo de la Serie Los Manueles) en que se planeó realizar el ensayo, se seleccionó un área plana a ligeramente inclinada con un 3% de pendiente, de 1200 m², dentro de la Serie Los Manueles para la realización de los ensayos de campo. El área se dividió en 15 unidades experimentales de 40m² cada una, distribuidas de acuerdo con un diseño de bloques completamente al azar con cinco (5) tratamientos y tres (3) repeticiones, tal como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11. Tratamientos y volúmenes de riego en el ensayo de campo.

Tratamientos	Volúmenes de riego m ³ /ha/cosecha
T ₁	12.000
T ₂	18.000
T ₃	24.000
T ₄	30.000
T ₅	36.000

Los volúmenes de riego que aparecen en la Tabla se consideraron como tentativos o exploratorios, tomando en consideración que el volumen de riego típico o tradicional en la zona es de 24.000 m³/ha/cosecha, volumen que se tomó como testigo o volumen de referencia.

Para la aplicación de estos volúmenes de riego fue necesario levantar los caballones para la conducción del agua, instalar tubos de PVC de diferentes diámetros (1 y 2 pulgadas), aforar las descargas en cada una de las parcelas y

calcular el tiempo de riego para todo el experimento. En la Figura 4, se esquematiza el plano del experimento de campo, con la disposición de las parcelas y los tratamientos aplicados (volúmenes de riego).

El manejo agronómico del cultivo fue uniforme para todos los tratamientos lo mismo que la toma de datos de las siguientes variables que fueron tenidas en cuenta y evaluadas al momento de la cosecha.

- Numero de macollas por metro cuadrado (1 m²/unidad experimental)
- Numero de macollas por planta (50 plantas/unidad experimental)
- Numero de granos por panícula (10 panículas/unidad experimental)
- Altura de planta (50 plantas/unidad experimental)
- Rendimiento en arroz paddy (40 m²/unidad experimental)
- Porcentaje de grano blanco (1000 g/unidad experimental)
- Porcentaje de cascara (1000 g/unidad experimental)
- Porcentaje de grano pulido (1000 g/unidad experimental)
- Porcentaje de harina (1000 g/unidad experimental)
- Porcentaje de grano entero (1000 g/unidad experimental)
- Porcentaje de grano partido (1000 g/unidad experimental)

De los valores obtenidos para cada una de estas variables se hizo análisis de varianza. Además, siguiendo el modelo de contrastes ortogonales para polinomios propuesto por Martínez Garza (1993), se obtuvo el patrón de respuesta y la ecuación de regresión para el rango explorado en el cultivo del arroz (*Oryza sativa* L.) variedad Oryzica – 1 para los niveles de absorción y acumulación de Cadmio y Arsénico en el suelo, tejido foliar y grano como resultado de la aplicación de los diferentes volúmenes de riego con las aguas del río Bogotá.

PLANO EXPERIMENTO DE CAMPO

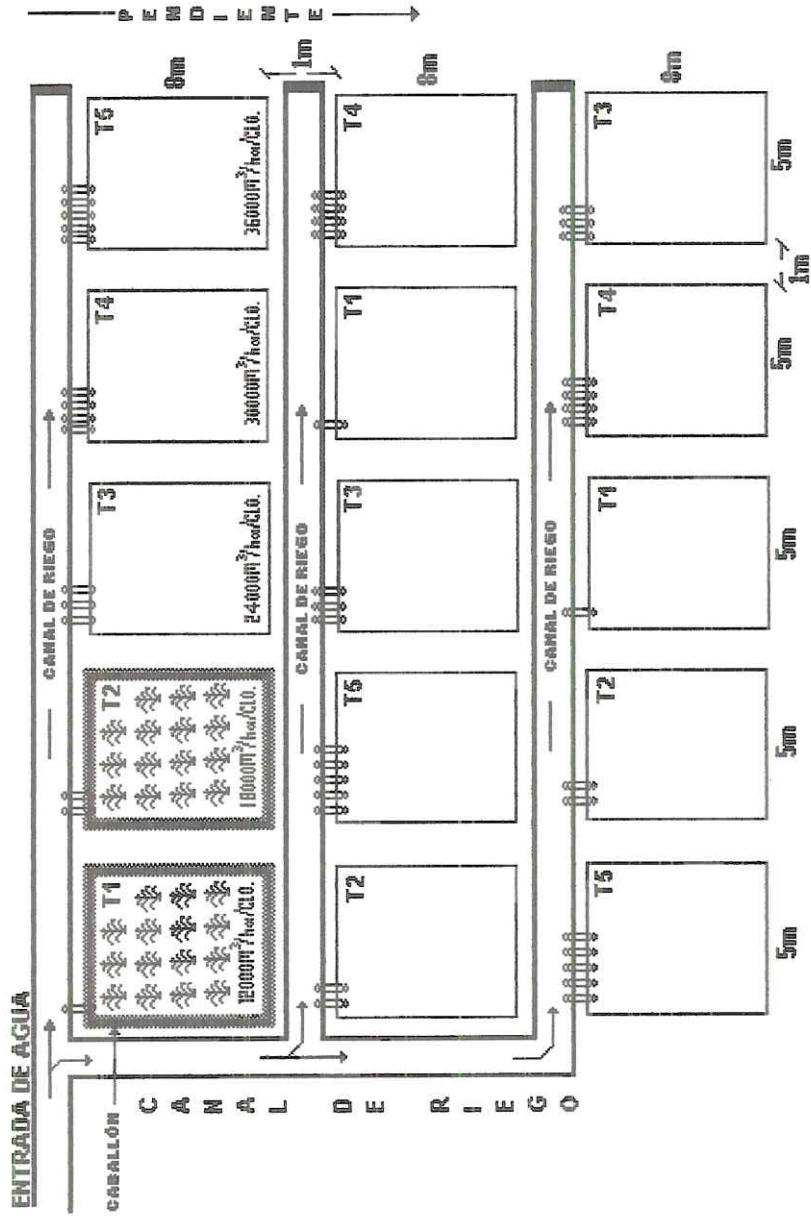


Figura 4. Plano del Experimento de Campo

3.2.5 Métodos analíticos

3.2.5.1 Análisis de aguas. Tanto para los análisis de rutina (pH, presencia de cationes y presencia de aniones) como para los especiales de Cadmio y Arsénico las muestras de aguas tomadas durante el monitoreo quincenal se filtraron a través de una membrana de 0.45 U con el fin de eliminar el material suspendido y dejar en la muestra los materiales o elementos solubles.

A las muestras filtradas se les adicionó HNO_3 (2 ml por cada 500 ml de agua) con el fin de disminuir el pH a un valor inferior a 2 para evitar la precipitación de los elementos. De cada una de las muestras se tomó una alícuota para la lectura en el equipo de absorción atómica, y el resto de la muestra se conservó convenientemente refrigerada.

Para la determinación del Cadmio y el Arsénico en las aguas se prepararon patrones con concentraciones desde 0 hasta una concentración máxima capaz de incluir todas las lecturas posibles encontradas en las aguas. Con las soluciones patrones de Cadmio y Arsénico se obtuvo una curva de absorbancia vs concentración para cada uno de los elementos traza; la cual permitió determinar la concentración de Cadmio y Arsénico en cada una de las muestras de agua leídas.

3.2.5.2 Análisis de suelos

3.2.5.2.1 Preparación de las muestras. Las muestras colectadas en los sitios y forma en que se especificó anteriormente, se secaron al aire y en la sombra en su primera fase y luego se completó su secado con la ayuda de una lámpara infrarroja. Una vez secas se trituraron y molieron con un rodillo de madera y se tamizaron a través de un tamiz de 80 mallas. En este material se determinó la fracción móvil o disponible del Cadmio y Arsénico, la cual constituye el verdadero riesgo de toxicidad

para las plantas, junto con la tasa de difusión de iones a través de la solución del suelo, como lo explica Chen (1992) citado por Dar-Yuan (1996). Esto significa que en las muestras de suelo se diferencian básicamente dos fracciones: una inmóvil representada por las fracciones que se encuentran fuertemente ligadas a la red cristalina del suelo compuesta por los aluminosilicatos; y una fracción móvil que está representada por aquellas cantidades del elemento que están ligadas en forma intercambiable a la fracción coloidal del suelo, a los carbonatos, a los óxidos de Fe y/o Mn, a la materia orgánica y otros compuestos oxidables.

3.2.5.2.2 Digestión y mineralización de las muestras. Para este estudio solo se determinó la fracción móvil o disponible de los elementos Cadmio y Arsénico la cual se extrajo con HCl 1N. Para ello se utilizaron 100 g de muestra y se adicionaron 20 ml de HCl 1N. Las muestras se agitaron durante una hora en agitador recíproco y luego se filtraron a través de una membrana de 0.45 µm; el filtrado se recogió en frascos de vidrio con tapa de seguridad.

3.2.5.2.3 Determinación de Cadmio y Arsénico. La determinación del Cadmio y Arsénico en los suelos se hizo por espectrofotometría de absorción atómica, por el método de Llama, debido a que los contenidos hallados fueron superiores a 2 mg/kg de suelo, concentración que se considera el límite crítico para el uso de esta metodología ya que concentraciones inferiores a estas requieren de mayor precisión con metodologías de atomización electrotérmica (horno de grafito) o generación de hidruros, estas determinaciones se realizaron en un equipo Buck Scientific modelo 20 V-GP, con las condiciones de longitud de onda, de corriente, slit y corrección de fondo, según el background, que se especifican en el manual del equipo.

Para el efecto se prepararon previamente las soluciones patrones de Cadmio y Arsénico con el fin de elaborar las curvas correspondientes de absorbancia vs concentración, que permitiesen cuantificar los dos elementos en las muestras de

suelos. Tanto para el Cadmio como para el Arsénico se prepararon patrones estándar de 1000 ppm a partir de titrisoles. Para las soluciones patrones de Cadmio se tomaron las cantidades necesarias del patrón concentrado de 1000 ppm para preparar patrones cuyas concentraciones aumentasen progresivamente desde 0.2 hasta 50 ppm de Cadmio y diluyendo con HCl 1N.

Para los patrones de Arsénico se tomaron las alícuotas del patrón de 1000 ppm, para preparar soluciones con concentraciones de 10, 20, 50 y 100 ppm de Arsénico; las diluciones se realizaron con HNO₃ del 5%.

3.2.5.3 Análisis de tejidos vegetales

3.2.5.3.1 Preparación de la muestra. Las muestras de tejido foliar y de grano se secaron al aire y en la sombra completando su deshidratación con la ayuda de una lámpara infrarroja. Una vez secas, las muestras se molieron en un mortero de ágata hasta su pulverización y luego se tamizaron a través de un tamiz de 60 mallas.

3.2.5.3.2 Digestión o mineralización de las muestras. Se tomó una submuestra de 100 g de cada una de las muestras tanto de tejido vegetal como de grano y se colocaron en sendos erlenmeyers de 150 ml. Se les adicionó la cantidad de HNO₃ necesaria para humedecer la muestra, de forma que quedase un ligero sobrenadante. Se dejaron en reposo por espacio de 12 horas al cabo de las cuales se le adicionó 1ml de HCl, 3 ml de HNO₃ y 2 ml de HClO₄. Las muestras se calentaron en una plancha eléctrica hasta la emisión de humos blancos, evitando el secamiento de las muestras. Se dejaron enfriar y se les adicionó 0.2 ml de HNO₃ al 10%, se trasvasó el contenido de los erlenmeyers a los balones aforados de 25 ml y se completó a volumen con agua desmineralizada.

3.2.5.3.3 Determinación del Cadmio y el Arsénico. Las concentraciones de Cadmio en las muestras de tejido foliar y de grano se determinaron en el mineralizado, por absorción atómica de llama con las condiciones de longitud de onda, slit, corrección de background etc. especificadas en el manual del equipo. La absorción se leyó con base en el modo Pick-Height, con 5 segundos para tiempo de integración.

El Arsénico se determinó por absorción atómica con horno de grafito, y se utilizó nitrato de níquel (NiNO_3) como modificador de la matriz. Se trabajó con las siguientes especificaciones para el horno:

Secado	:	110°C	Rampa :	10 seg 30 seg
Carbonización	:	1250°C	Rampa :	10 seg 30 seg
Atomización	:	2600°C		6 seg

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 MUESTREO DE AGUAS

Los resultados promedios de los análisis de las aguas tomadas en la bocatoma para el riego de los cultivos de arroz en el sitio en el cual se ubicó el experimento de campo se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12. Características químicas de las muestras de agua de riego para arroz, Hacienda Angosturas 1998.

pH	C.E	Cationes meq/l				Aniones meq/l			μ g/L	
		Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃	SO ₄	Cl	Cd ⁺⁺	As ⁺⁺
7.4	0.42	1.75	0.47	1.2	0.52	2.74	0.71	1.68	2.35	37.0

Los datos revelan que son aguas ligeramente alcalinas, con una conductividad eléctrica moderada y a pesar de poseer contenidos relativamente altos de Sodio, los pH son cercanos a la neutralidad.

Los contenidos de Cadmio y Arsénico en la solución se determinaron mensualmente durante todo un año, a fin de establecer la fluctuación estacional, de los dos elementos durante el invierno y el verano.

La concentración de Arsénico en las aguas del río fluctuaron en un rango entre 24 y 47 μg/l, presentándose las mas bajas concentraciones durante los meses de abril y mayo para el primer semestre, y septiembre, octubre y noviembre

para el segundo semestre, coincidiendo las mismas concentraciones con las épocas de invierno, por cuanto el fenómeno de dilución por el aumento del caudal del río disminuyó la concentración del elemento. En los meses de enero, febrero julio y agosto, considerados como épocas de verano o de menores lluvias, se generaron fenómenos de aumento de concentración del elemento por los bajos volúmenes del caudal del río, (Figura 5). El 72% de las muestras analizadas superaron el Límite Máximo Permisible (LMP) para las aguas dulces, (Decreto 475 de 1997 del Ministerio de Salud). Las concentraciones de Cadmio fluctuaron entre 0.7 y 5.8 $\mu\text{g/l}$, coincidiendo los mayores valores con los meses de verano (julio y Agosto) y las épocas de mas bajo caudal, mientras que en las épocas de invierno (mayo, abril, octubre y noviembre) se obtuvieron los contenidos más bajos debido al aumento del caudal del río, (Figura 6). El 25% de las muestras mostraron concentraciones que superan el Limite Máximo Permisible establecido por la norma oficial.

4.2 RESULTADOS ENSAYO DE INVERNADERO

A continuación se analizan y discuten los resultados obtenidos en los experimentos de invernadero, teniendo como base los análisis estadísticos propuestos en la metodología. Este análisis está relacionado con el comportamiento y acumulación de los dos elementos (Cadmio y Arsénico) en el suelo y en las plantas de arroz; en estas últimas se analizarán los resultados en el tejido foliar y en el grano, teniendo en cuenta su efecto sobre las variables de comportamiento fisiológico y su acumulación en dichos tejidos y por último su efecto sobre los rendimientos.

4.2.1 Efecto del Cadmio y el Arsénico en el comportamiento fisiológico del arroz. De las variables de comportamiento fisiológico evaluados solamente la altura de planta, el número de granos por panícula y el rendimiento presentaron diferencias estadísticas significativas por lo tanto a ellos se hará referencia y cuyos análisis de varianza se presentan en la Tabla 13.

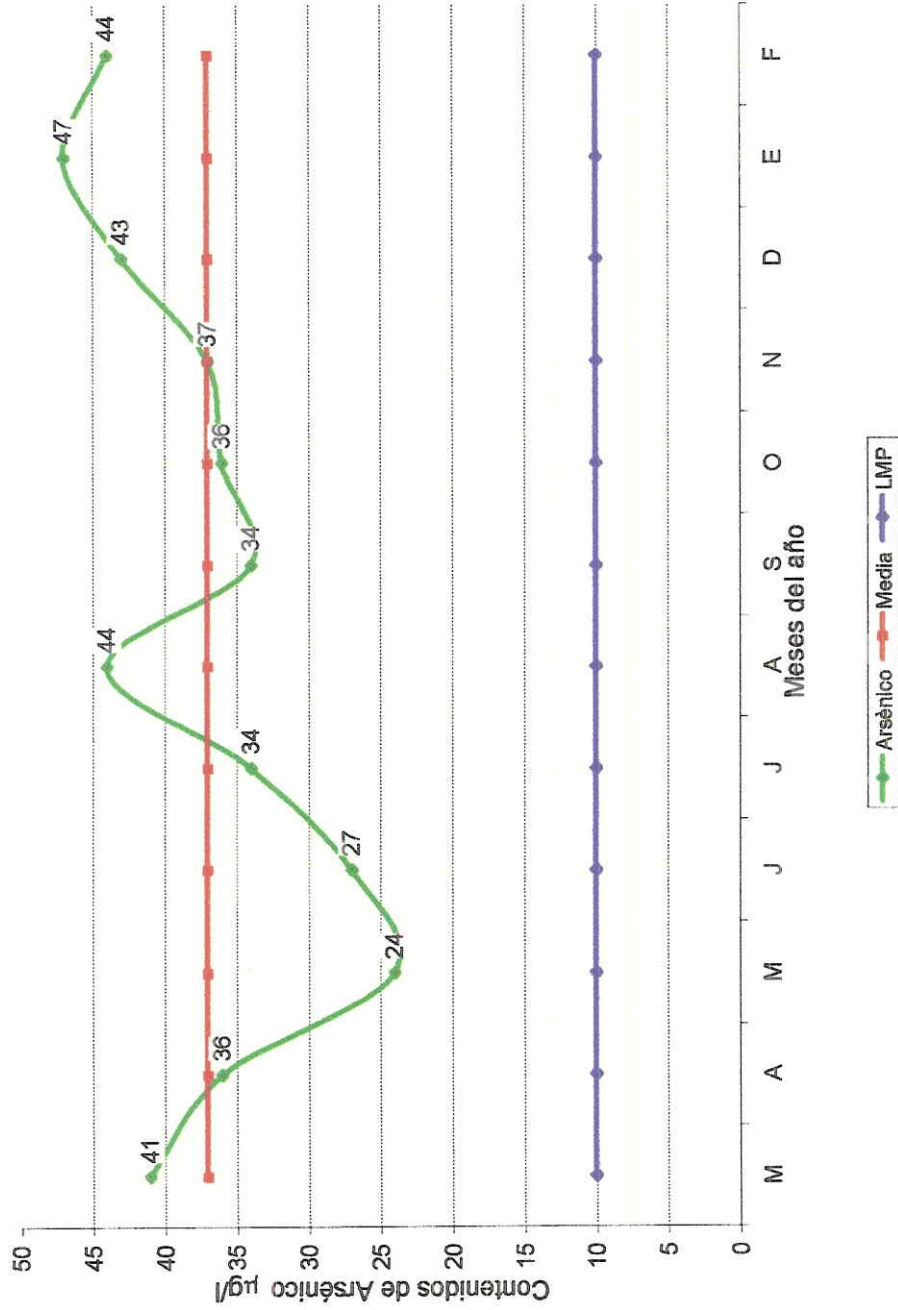


Figura 5. Concentraciones de Arsénico en aguas del río Bogotá, durante un año agrícola. Ricaurte (Cund.) 1998.

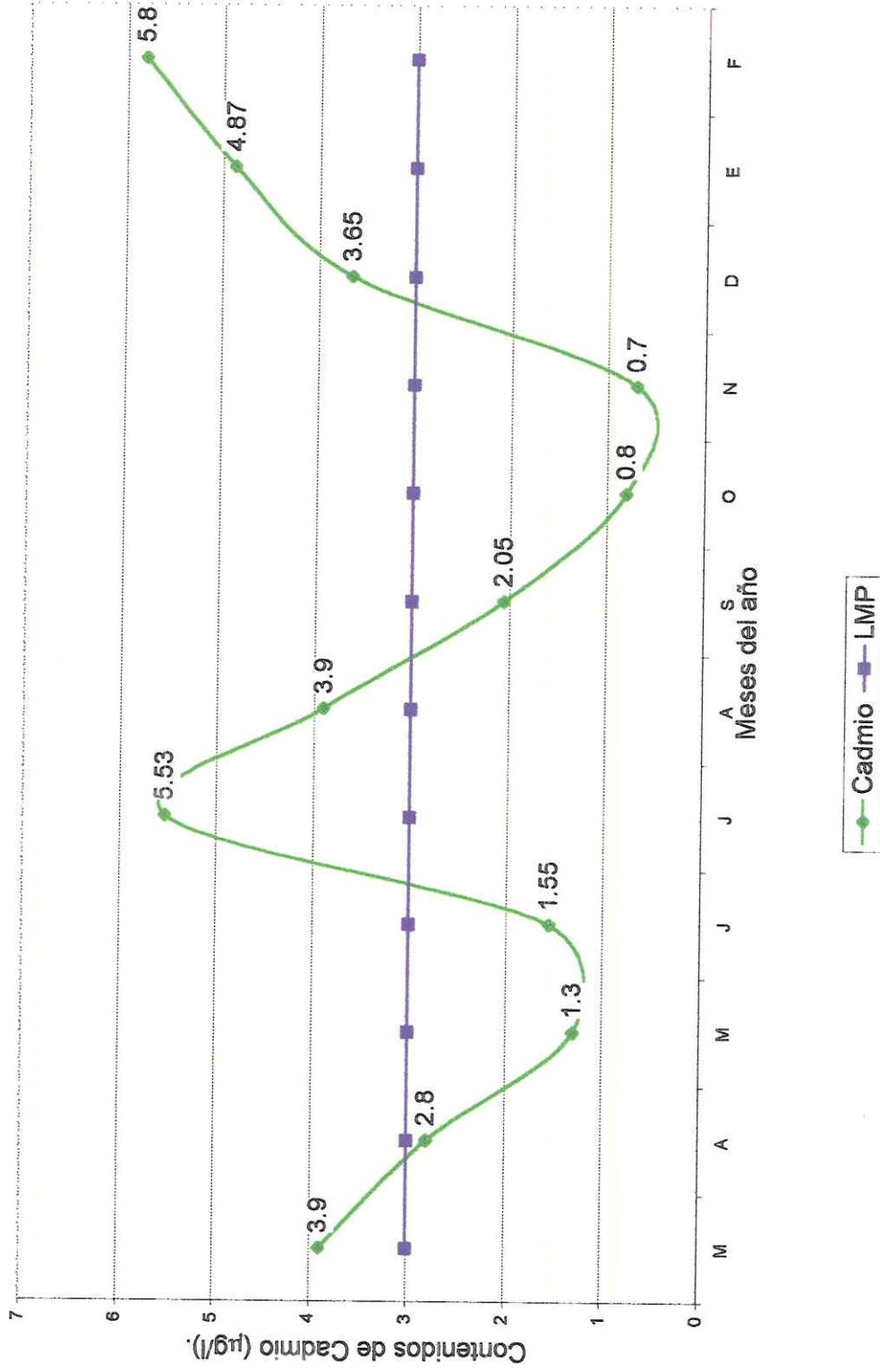


Figura 6. Concentración de Cadmio en las aguas del río Bogotá, durante un año agrícola. Ricaurte (Cund.) 1998

Tabla 13. Análisis de varianza para las variables de comportamiento fisiológico en arroz con la aplicación de diferentes concentraciones de Cadmio y Arsénico en el agua de riego

Fuentes de Variación	Grados de Libertad	Cuadrado Medio	Coefficiente de Variación (%)	R ²
Variable: Altura de Planta				
Cd	3	1435.5**	1.6	0.98
As	3	147.6**	--	--
Cd * As	9	40.4**	--	--
Variable: Macollas por planta				
Cd	3	1.83 NS	21.8	0.33
As	3	2.61 NS	--	--
Cd * As	9	0.74 NS	--	--
Variable: Panículas por planta				
Cd	3	0.63 NS	22.3	0.21
As	3	1.07 NS	--	--
Cd * As	9	0.37 NS	--	--
Variable: Granos por panícula				
Cd	3	1755.2**	6.7	0.70
As	3	998.1**	--	--
Cd * As	9	240.1 NS	--	--
Variable: Rendimiento				
Cd	3	17374524.2**	3.8	0.97
As	3	2491834.2**	--	--
Cd * As	9	1009234.3**	--	--

** = Altamente significativo NS = No significativo

4.2.1.1 Altura de planta. El análisis de varianza de este parámetro mostró diferencias altamente significativas tanto para las concentraciones de Cadmio y Arsénico como para la interacción de los dos elementos.

Las concentraciones de Cadmio y Arsénico presentan un efecto de interacción altamente significativo, que afectó la altura de las plantas de arroz, (Figura 7). Es así como al aplicar en el riego una cantidad constante de 4.5 mg/l de Arsénico e incrementar las concentraciones de Cadmio desde 0 hasta 3 mg/l, se presenta el mayor grado de toxicidad para el arroz, ya que la altura de planta se reduce en un 32%, pasando de un promedio de 93 cm sin la aplicación de Cadmio a 63 cm con la adición de 3 mg/l de este elemento; con una tendencia lineal inversa representada

por la ecuación $\hat{Y} = 94.8 - 10.2X$ y un $R^2 = 0.99$. Este mismo efecto se observa aunque en menor grado con las aplicaciones de cantidades constantes de 1.5 y 3.0 mg/l de Arsénico y con incrementos de las concentraciones de Cadmio cuyo efecto en la reducción de la altura de planta fue del 25%, siendo más drástico a partir de 2 mg/l; sus ecuaciones correspondientes para el rango explorado son respectivamente: $\hat{Y} = 97.6 - 9X$ $R^2 = 0.88$ y $\hat{Y} = 96.8 - 7.7X$ $R^2 = 0.98$. Lo que permite concluir que la presencia de los dos elementos en la fracción disponible del suelo potencian su absorción lo cual significa una reducción hasta del 36% en el desarrollo de las plantas que afecta drásticamente el crecimiento de esta variedad de arroz. Este efecto se considera relacionado con la competencia que ejerce el Cadmio con algunos nutrientes como el Zinc o el complejamiento con elementos como el Calcio.

También se observa un efecto importante de reducción (21%) en la altura de las plantas de arroz, inducido exclusivamente por los incrementos de las concentraciones de Cadmio cuando no se aplicó Arsénico en el riego pasando de 97 cm con 1 mg/l de Cadmio a 77 cm con 3.0 mg/l de este elemento, con una ecuación de predicción $\hat{Y} = 97.5 - 5.8X$ y un $R^2 = 0.83$.

4.2.1.2 Granos por panícula. El número promedio de granos por panícula presentó diferencias altamente significativas para las diferentes concentraciones de Cadmio y de Arsénico pero a diferencia de la altura de planta no hubo diferencias estadísticas para la interacción de los dos elementos como lo muestra la Tabla 13.

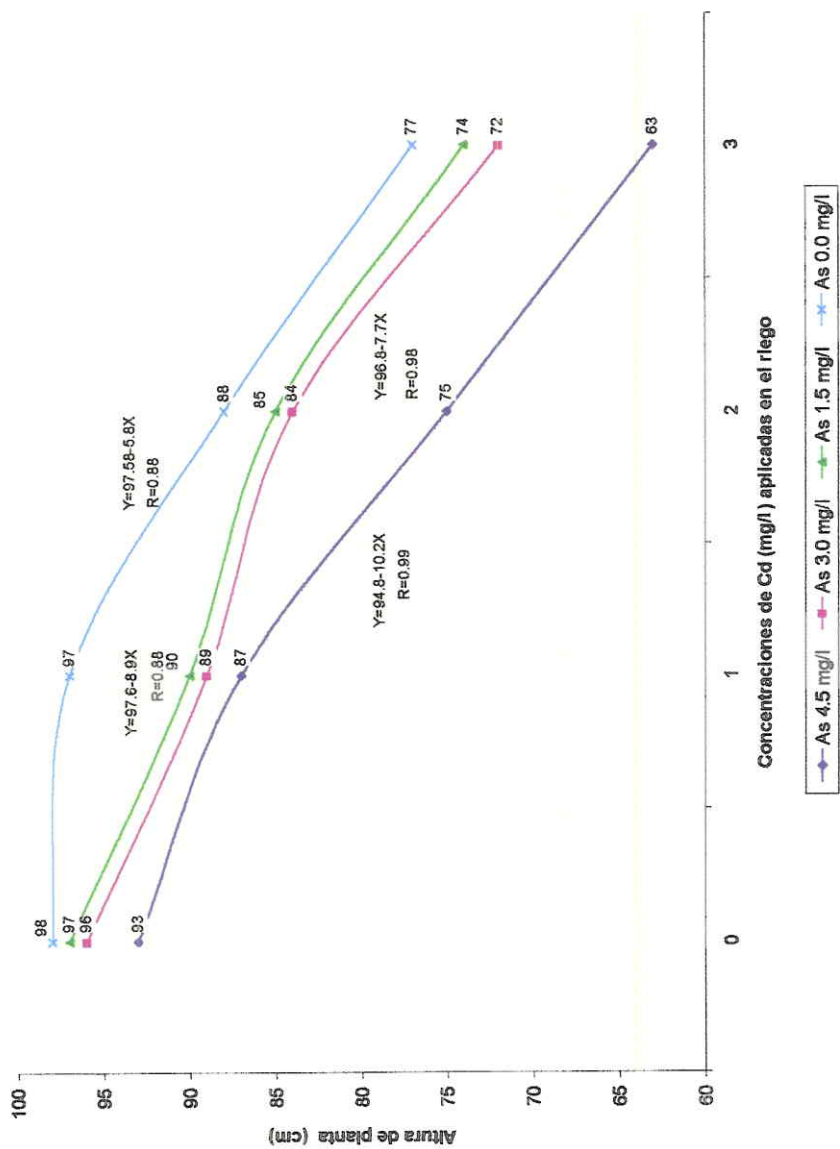


Figura 7. Interacción Cd*As y su efecto sobre la altura de plantas de arroz (*Oryza sativa* L.) Var. Oryzica-1 C.I. Nataima, Espinal (Tol.) 1999

Al analizar el comportamiento de Cadmio en forma individual se observa que el incremento en las concentraciones del elemento Cadmio en el riego disminuye considerablemente el número de granos por panícula pasando de 184 a 161 lo cual significa una reducción del 12.5%, y que repercute drásticamente en los rendimientos del cultivo especialmente con niveles superiores a 1 mg/l en el agua de riego. La ecuación es de tipo lineal y muestra una reducción promedia de 8.9 granos por panícula por el aumento de cada unidad de Cadmio aplicada en el riego explicando éste el 92% de la variabilidad de esta componente del rendimiento: $\hat{Y} = 186.14 - 8.9 X$ $R = 0.92$. (Figura 8).

El Arsénico en forma individual presenta un comportamiento similar al del Cadmio y afectó fuertemente el número de granos por panícula en las plantas de arroz con reducciones superiores al 10%; efecto muy notorio cuando se incrementan las concentraciones por encima de 3 mg/l en el agua de riego, la ecuación presenta un comportamiento lineal inverso, con una reducción promedia de 6.4 granos por panícula por el incremento de cada unidad de Arsénico agregada $\hat{Y} = 182.6 - 6.4 X$ $R = 0.91$, como se observa en la Figura 9.

A pesar de que estadísticamente la interacción de los dos elementos no mostró significancia, ($P = 0.11$) se observó una tendencia general a disminuir el número de granos por panícula a medida que se incrementaron las concentraciones de los dos elementos. (Figura 10). Es así como a niveles de 3 mg/l de Cadmio y 4.5 mg/l de Arsénico se presentó la máxima reducción llegando a obtenerse solo 153 granos por panícula. Esto representa una disminución del 21% que se traduciría en considerables pérdidas de producción.

En la Tabla 14 se relacionan las ecuaciones para cada una de las concentraciones evaluadas.

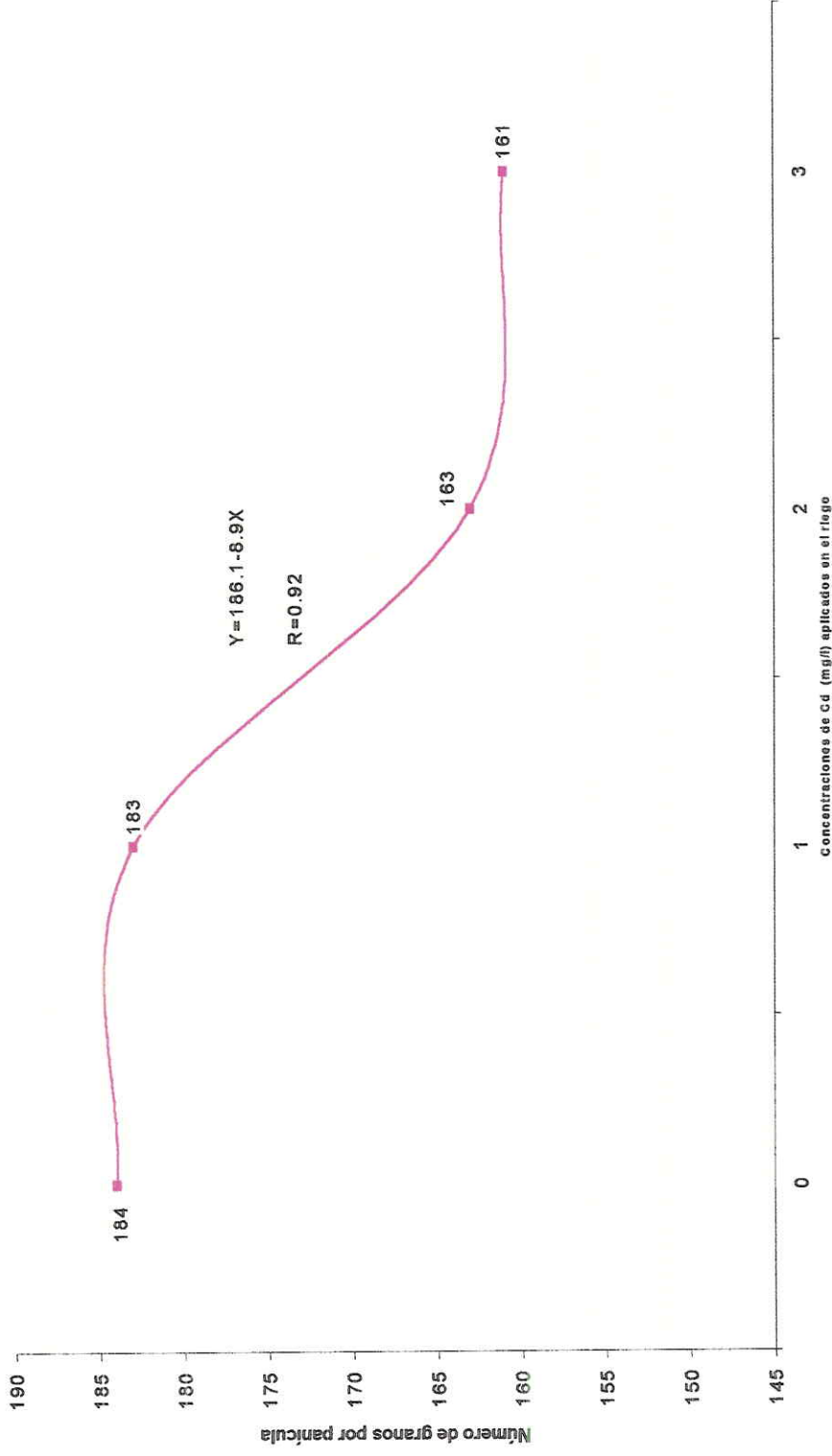


Figura 8. Efecto de diferentes concentraciones de Cadmio sobre el número de granos por panículas de arroz (*Oryza sativa* L.) Var. Oryzica-1 C.I. Nataima, Espinal (Tol.) 1999.

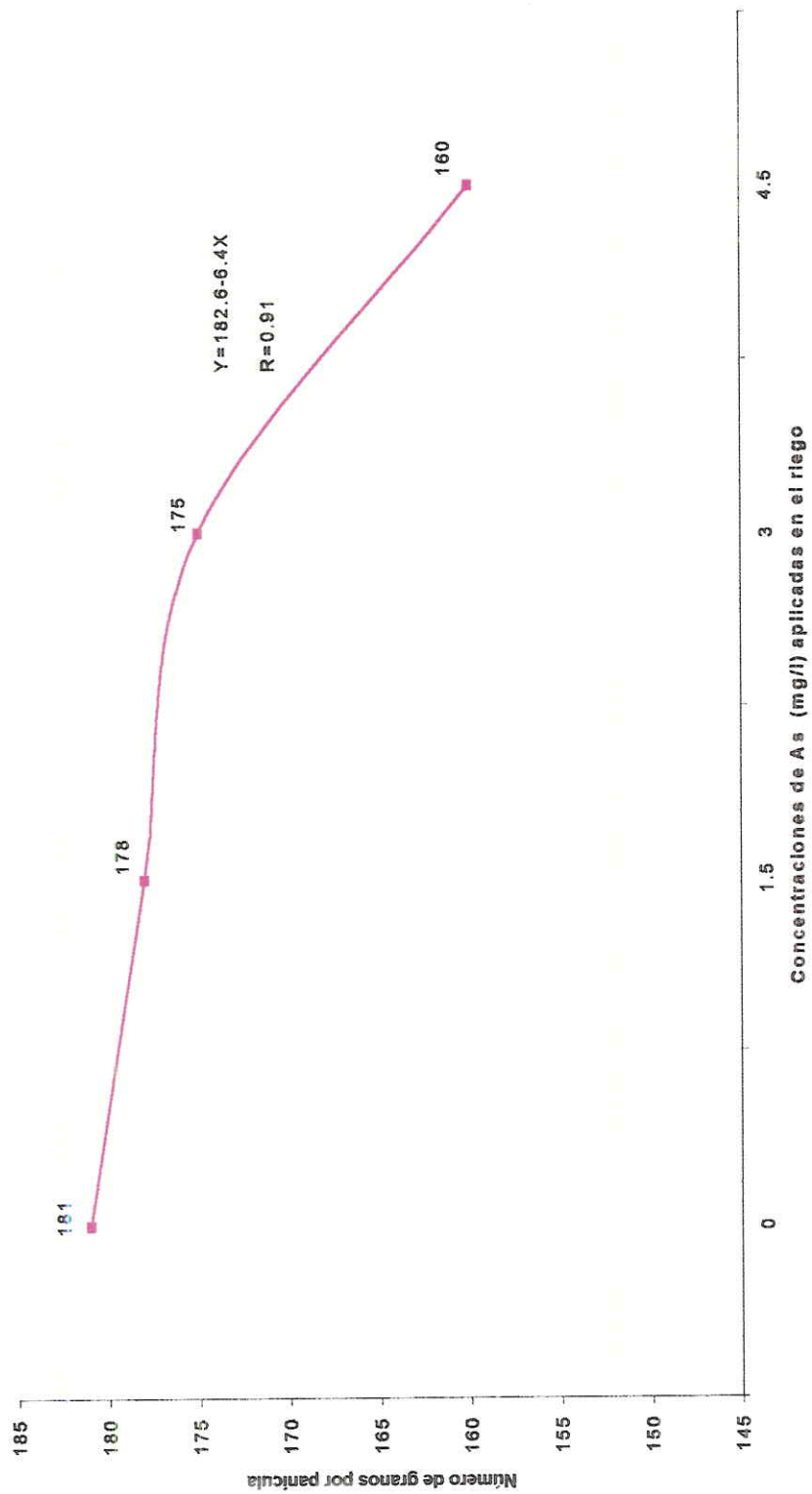


Figura 9. Efecto de diferentes concentraciones de Arsénico sobre el número de granos por panícula en arroz (*Oryza sativa* L.) Var. Oryzica-1 C.I. Nataima, Espinal (Tol.) 1999.

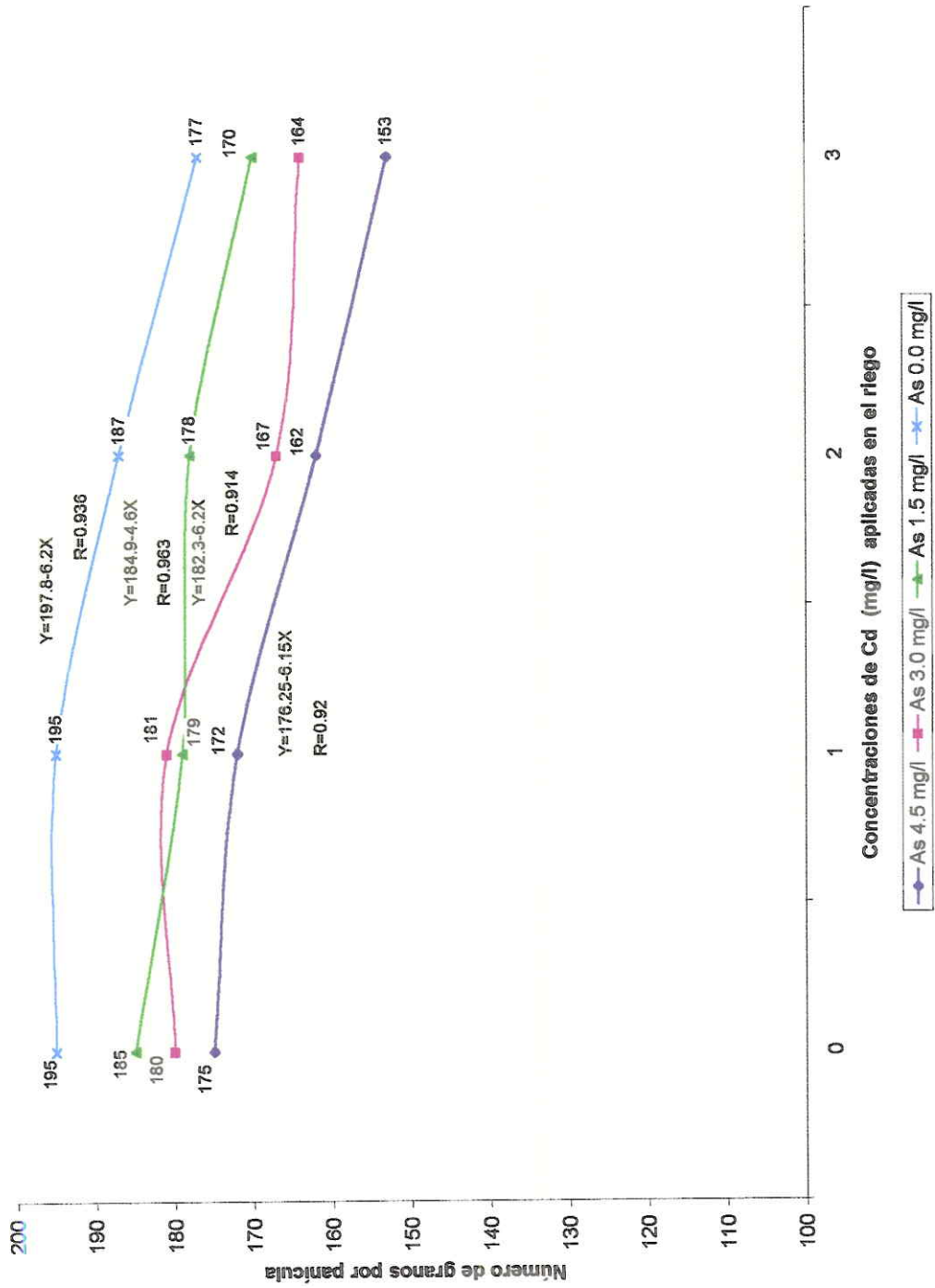


Figura 10. Interacción de Cd*As y su efecto sobre el número de granos por panícula en arroz (*Oryza sativa* L.) Var. Oryzica-1, C.I. Nataima, Espinal (Tol.) 1999.

Tabla 14. Ecuaciones para la interacción Cd*As con las diferentes concentraciones sobre el número de granos por panícula.

Interacción Cd*As	Ecuación para el Número de granos por panícula
AS 0	$\hat{Y} = 197.8 - 6.2 X$ $R = 0.936$
AS 1	$\hat{Y} = 184.9 - 4.6 X$ $R = 0.963$
AS 3.0	$\hat{Y} = 182.3 - 6.2 X$ $R = 0.914$
AS 4.5	$\hat{Y} = 176.2 - 6.1 X$ $R = 0.923$

4.2.1.3 Rendimiento. El análisis de varianza para este parámetro mostró diferencias altamente significativas tanto para las concentraciones de Cadmio y Arsénico como para su interacción, (Tabla 13).

Al analizar el comportamiento de los dos elementos en forma simultánea sobre el rendimiento se presenta una drástica incidencia reduciéndose en forma significativa la producción, (Figura 11). Especialmente cuando se aplicó una cantidad constante de Arsénico de 4.5 mg/l en el agua de riego, con cantidades variables de Cadmio, reducción que llegó al 50% de los rendimientos, cuya ecuación presenta una merma de 1034 kg de arroz paddy por hectárea, por cada unidad de Cadmio adicionada, explicando en el 99% la variabilidad del rendimiento para dicho nivel de Arsénico aplicado (Tabla 15).

Cuando se utilizaron cantidades constantes de Arsénico de 1.5 y 3.0 mg/l con la adición de cantidades variables de Cadmio la reducción de los rendimientos alcanzó el 26% y 29% respectivamente, siendo su efecto más notorio a partir de la aplicación de 1 mg/l de Cadmio, con mermas de 657.5 kg de arroz paddy por cada unidad de Cadmio adicionada (Tabla 15).

La adición de Arsénico solamente sin la aplicación de Cadmio presentó diferencias estadísticas pero con valores muy cercanos (CV = 3.8%) que oscilaron entre 7332 kg/ha y 7892 kg/ha, representando mermas inferiores al 7%.

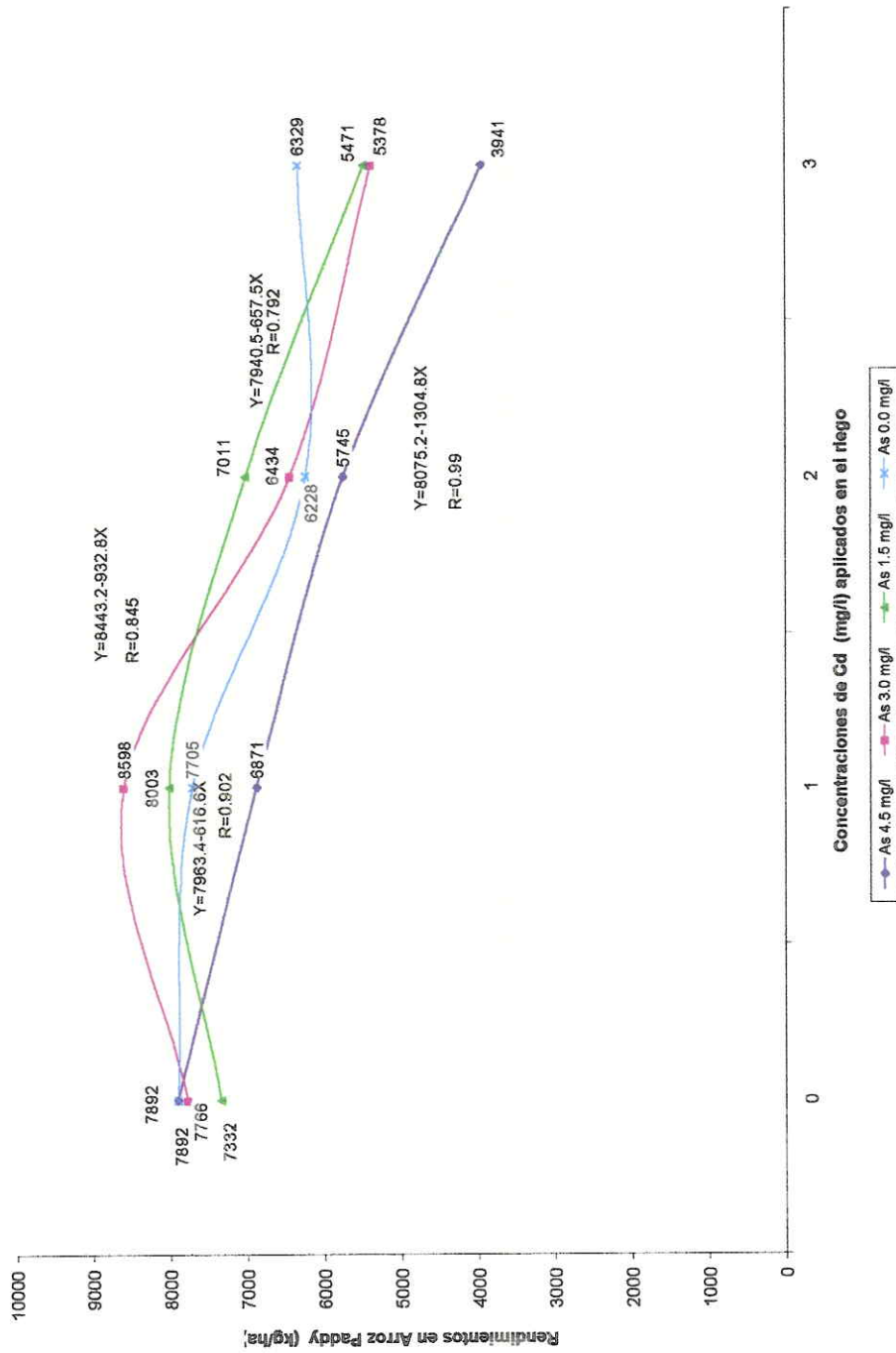


Figura 11. Interacción de Cd*As y su efecto sobre los rendimientos de arroz (*Oryza sativa* L.) Var. Oryzica-1 C.I. Nataima, Espinal (Tol.) 1999.

Cuando se variaron las cantidades de Cadmio sin la adición de Arsénico se observa una reducción de los rendimientos del 19% con una ecuación de predicción $\hat{Y} = 7963 - 616.6X$ y un $R^2 = 0.90$ indicando que solamente con la adición de cada unidad de Cadmio en el riego se reducen los rendimientos en 616.6 kg de arroz paddy por hectárea explicando la variabilidad de este parámetro en un 90%. Los modelos de respuesta para cada una de las interrelaciones se representan en la Tabla 15.

Tabla 15. Ecuaciones para las interacciones de Cadmio y Arsénico con las diferentes concentraciones para el rendimiento de arroz en kg/ha.

Interacción Cd*As	Ecuación para el rendimiento en arroz Paddy
AS 0.0 (mg/l)	$\hat{Y} = 7963.4 - 616.6 X$ $R^2 = 0.902$
AS 1.5 (mg/l)	$\hat{Y} = 7940.5 - 657.5 X$ $R^2 = 0.792$
AS 3.0 (mg/l)	$\hat{Y} = 8443.2 - 932.8 X$ $R^2 = 0.845$
AS 4.5 (mg/l)	$\hat{Y} = 8075.2 - 1304.8 X$ $R^2 = 0.991$

4.2.2 Concentraciones de Cadmio y Arsénico en el suelo a la cosecha. Una vez cosechado el ensayo se procedió al muestreo y análisis del suelo de cada uno de los materos, o unidades experimentales, para conocer los contenidos de Cadmio y Arsénico y así evaluar el proceso de acumulación de los dos elementos con su adición en diferentes concentraciones en el agua de riego.

4.2.2.1 Concentraciones de Cadmio en el suelo. Realizados los análisis de varianza se encontró que la acumulación de Cadmio en el suelo presenta diferencias altamente significativas tanto para cada uno de los elementos como para la interacción (Tabla 16).

Tabla 16. Análisis de varianza para los contenidos de Cadmio y Arsénico en el suelo con la aplicación de diferentes concentraciones en el agua de riego para el cultivo de arroz (Var. Oryzica 1).

Fuente de Variación	G.L.	C.M.	C.V.%	R ²
Variable: Contenido de Cadmio en el suelo				
Cd	3	10772465278**	5.5	0.99
As	3	36909722**	--	--
Cd * As	9	92594907**	--	--
Variable: Contenido de Arsénico en el suelo				
Cd	3	17139568.3**	8.5	0.99
As	3	240277795.9**	--	--
Cd * As	9	17299241.9**	--	--

El efecto de la adición simultánea de Cadmio y Arsénico en el agua de riego sobre la acumulación de los elementos en el suelo, dio origen a un considerable incremento de la acumulación de los dos elementos en las fracciones adsorptivas del suelo cuando los dos estuvieron presentes. Su acumulación no cambió en forma importante cuando las concentraciones de Cadmio fueron de 1 y 2 mg/l para cualquiera de los niveles de Arsénico, lo cual parece indicar que a estos niveles los elementos no presentan interacción aunque si una ligera competencia por los sitios de intercambio en la fracción sólida del suelo, (Figura 12). Los incrementos fueron más evidentes cuando las concentraciones en el agua de riego fueron superiores a 2 mg/l para el Cadmio y cualquier nivel para el Arsénico, situación para la cual se llegó a niveles de acumulación de Cadmio hasta de 82.6 mg/kg, cuando las máximas concentraciones de Cadmio y Arsénico en el agua de riego fueron de 3 mg/l de Cadmio y 4.5 mg/l de Arsénico, respectivamente.

Los contenidos de Cadmio en el suelo cuando no se hizo adición de este elemento a través del riego oscilaron entre 1333 µg/kg y 2000 µg/kg valores que estuvieron ligeramente por debajo de los contenidos hallados inicialmente en el suelo.

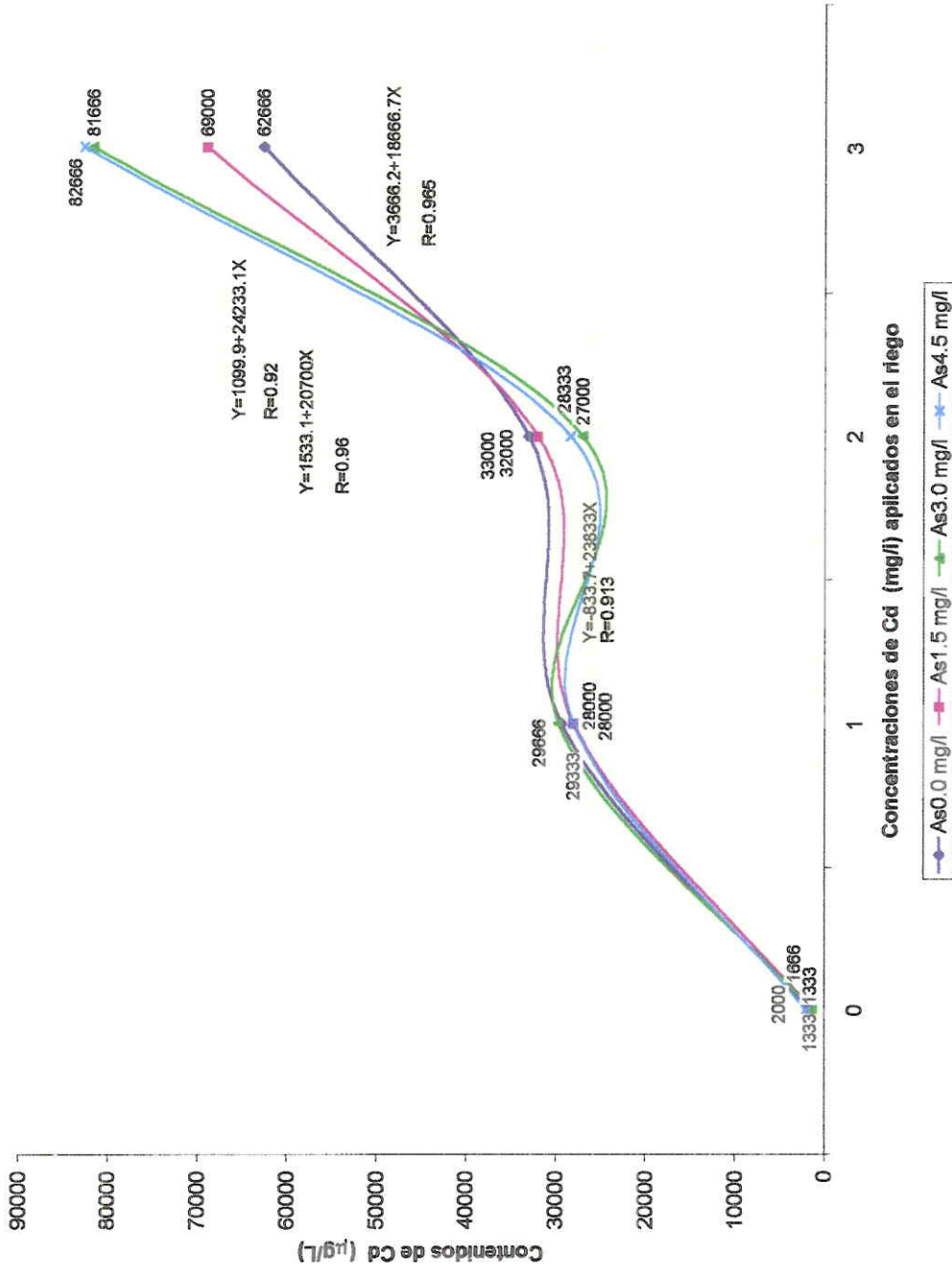


Figura 12. Interacción de As*Cd en suelo cultivado con arroz en condiciones de invernadero y con la aplicación de soluciones de concentración conocida. Nataima, Espinal (Tol.) 1999.

Las cantidades de Cadmio halladas en el suelo con la aplicación de este elemento en el riego pero sin la adición de Arsénico, presenta incrementos con valores que oscilaron entre 28000 $\mu\text{g}/\text{kg}$ para 1 mg/l hasta 82600 $\mu\text{g}/\text{kg}$ para 3.0 mg/l, representando una acumulación promedia del 300%. La ecuación de predicción para el rango explorado corresponde a la primera relacionada en la Tabla 15. Esta indica que se tiene un incremento de 24233 $\mu\text{g}/\text{kg}$ de suelo por cada unidad de Cadmio adicionada en el riego y la variabilidad de este parámetro es explicada en un 92% por los incrementos del Cadmio.

Los modelos de respuesta de la interacción Cadmio*Arsénico en la acumulación de estos elementos en el suelo se representan en la Tabla 17.

Tabla 17. Ecuaciones de interacción del Cadmio y Arsénico en el suelo con la aplicación de diferentes concentraciones en el agua de riego.

Interacción Cd * As	Ecuación para el contenido de Cd en el suelo
Arsénico 0 (mg/l)	$\hat{Y} = 3666.2 - 18606.7 X$ $R^2 = 0.965$
Arsénico 1.5 (mg/l)	$\hat{Y} = 1533.1 - 20700 X$ $R^2 = 0.961$
Arsénico 3.0 (mg/l)	$\hat{Y} = 833.7 - 23833 X$ $R^2 = 0.913$
Arsénico 4.5 (mg/l)	$\hat{Y} = 1099.9 - 24233 X$ $R^2 = 0.929$

4.2.2.2 Concentraciones de Arsénico en el suelo. En el análisis de varianza realizado para esta variable se presentaron diferencias altamente significativas, tanto para cada uno de los elementos como para la interacción (Tabla 16.)

Las concentraciones de Arsénico en el suelo se ven incrementadas con la presencia de ciertas concentraciones de Cadmio mostrando un efecto interactivo de estos dos elementos que facilita su acumulación. Así tenemos que cuando se varían las cantidades de Arsénico, manteniendo constante la aplicación de 1 mg/l de Cadmio, alcanza niveles de acumulación de hasta 17621 $\mu\text{g}/\text{kg}$ de suelo; cuando no se

adiciona Cadmio los contenidos son de 13673 $\mu\text{g}/\text{kg}$ de suelo, indicando que altas concentraciones de Arsénico en combinación con valores bajos de Cadmio se acumulan en mayor cantidad en el suelo. Mientras que valores altos de Cadmio en combinación con valores altos de Arsénico, se acumulan en menor proporción (Figura 13).

Los modelos de respuesta para la interacción de Cadmio*Arsénico en la acumulación de este elemento en el suelo se relacionan en la Tabla 18.

Tabla 18. Ecuaciones de predicción para la interacción del Cadmio*Arsénico en el suelo con la aplicación de diferentes concentraciones en el agua de riego

Interacción As * Cd	Ecuación para Arsénico acumulado en el suelo
Cadmio 0 (mg/l)	$\hat{Y} = 549.3 + 2636 X$ $R^2 = 0.93$
Cadmio 1 (mg/l)	$\hat{Y} = 725.8 + 3180 X$ $R^2 = 0.94$
Cadmio 2 (mg/l)	$\hat{Y} = 1885 + 1321 X$ $R^2 = 0.97$
Cadmio 3 (mg/l)	$\hat{Y} = 2732.27 + 1793 X$ $R^2 = 0.95$

Puede decirse en general que los anteriores resultados guardan una estrecha correlación con las características del suelo utilizado para el ensayo, cuyas características físico – químicas, al parecer, facilitan la retención y acumulación del Cadmio y el Arsénico cuando estos elementos son suministrados en forma continua y por largos períodos en las aguas de riego.

4.2.3 Concentraciones de Cadmio y Arsénico en el tejido foliar del arroz en el momento de la cosecha. Los análisis de varianza, (Tabla 19), muestran que la acumulación de Cadmio y el Arsénico en el tejido foliar del arroz tiene diferencias altamente significativas tanto para cada uno de los elementos considerados individualmente como para la interacción de los dos considerados simultáneamente.

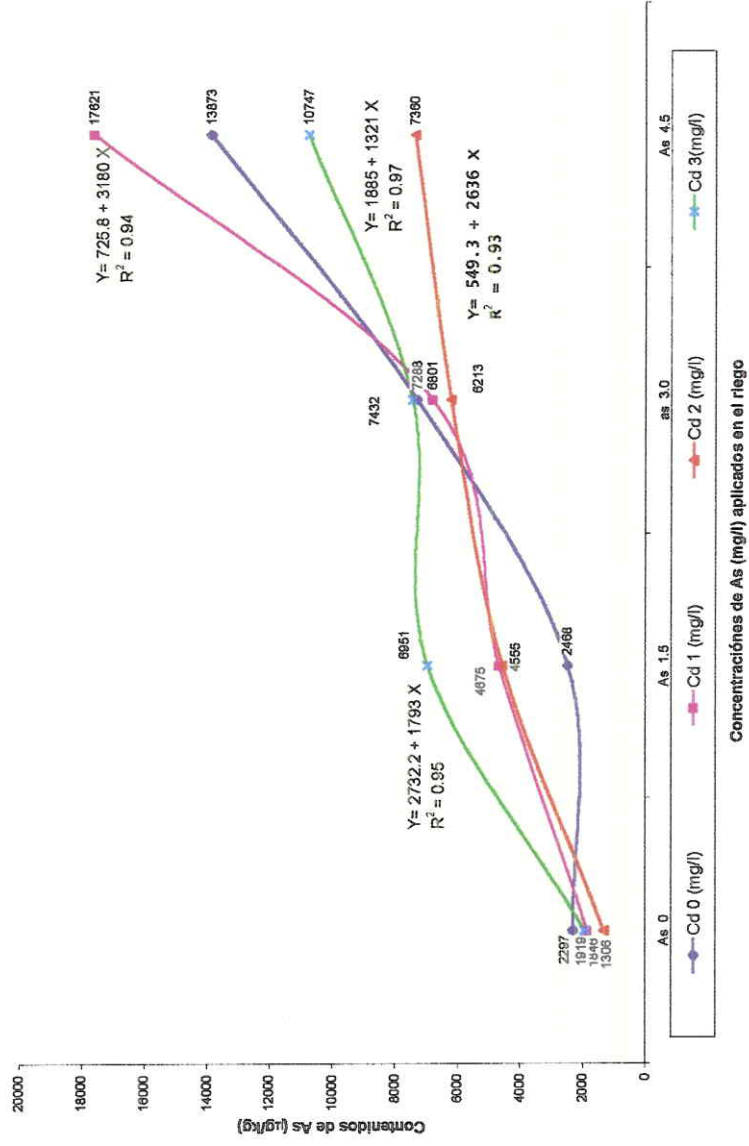


Figura 13. Interacción de As* Cd en suelo cultivado con arroz en condiciones de invernadero y con la aplicación de soluciones de concentración conocida. Nataima Espinal (Toj) 1999.

Tabla 19. Análisis de varianza para el contenido de Cadmio y Arsénico en el tejido foliar del arroz Oryzica-1 con la aplicación de diferentes soluciones de Cadmio y Arsénico de concentraciones conocidas.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Cuadrado Medio	Coefficiente de Variación (%)	R ²
Variable: Cadmio en tejido foliar				
Cd	3	625380247.7 **	12.92	0.979
As	3	221772995.0 **		
Cd * As	9	61911069.0 **		
Variable: As en tejido foliar				
Cd	3	2563700.0 **	11.95	0.873
As	3	3308388.8 **		
Cd * As	9	992500.0 **		

Al analizar la interacción de los dos elementos respecto a su acumulación en el tejido foliar, (Figura 14), se observó que cuando se incrementan las concentraciones de Cadmio hasta un nivel de 2 mg/l en el agua de riego, con cualquier nivel de Arsénico, tiende a acumularse una mayor cantidad de Cadmio en el tejido, pero a partir de los 2 mg/l el Cadmio acumulado disminuye, lo cual parece indicar que concentraciones altas de los dos elementos en la solución del suelo parecen inducir un bloqueo en su absorción por parte de la planta y por lo tanto menor acumulación en los tejidos.

Al analizar cada una de las concentraciones de Arsénico frente a las de Cadmio, se observa que a mayor concentración de Arsénico son menores los contenidos acumulados en el tejido foliar lo que parece indicar un efecto de competencia de los dos elementos respecto a la absorción y acumulación en el tejido foliar. Este efecto de interacción negativa puede observarse con mayor claridad en la Figura 15.

La interacción del Cadmio y el Arsénico del agua de riego respecto a absorción y acumulación en el tejido foliar se comporta según un modelo cuadrático para el rango explorado cuyas ecuaciones respectivas aparecen en la Tabla 20.

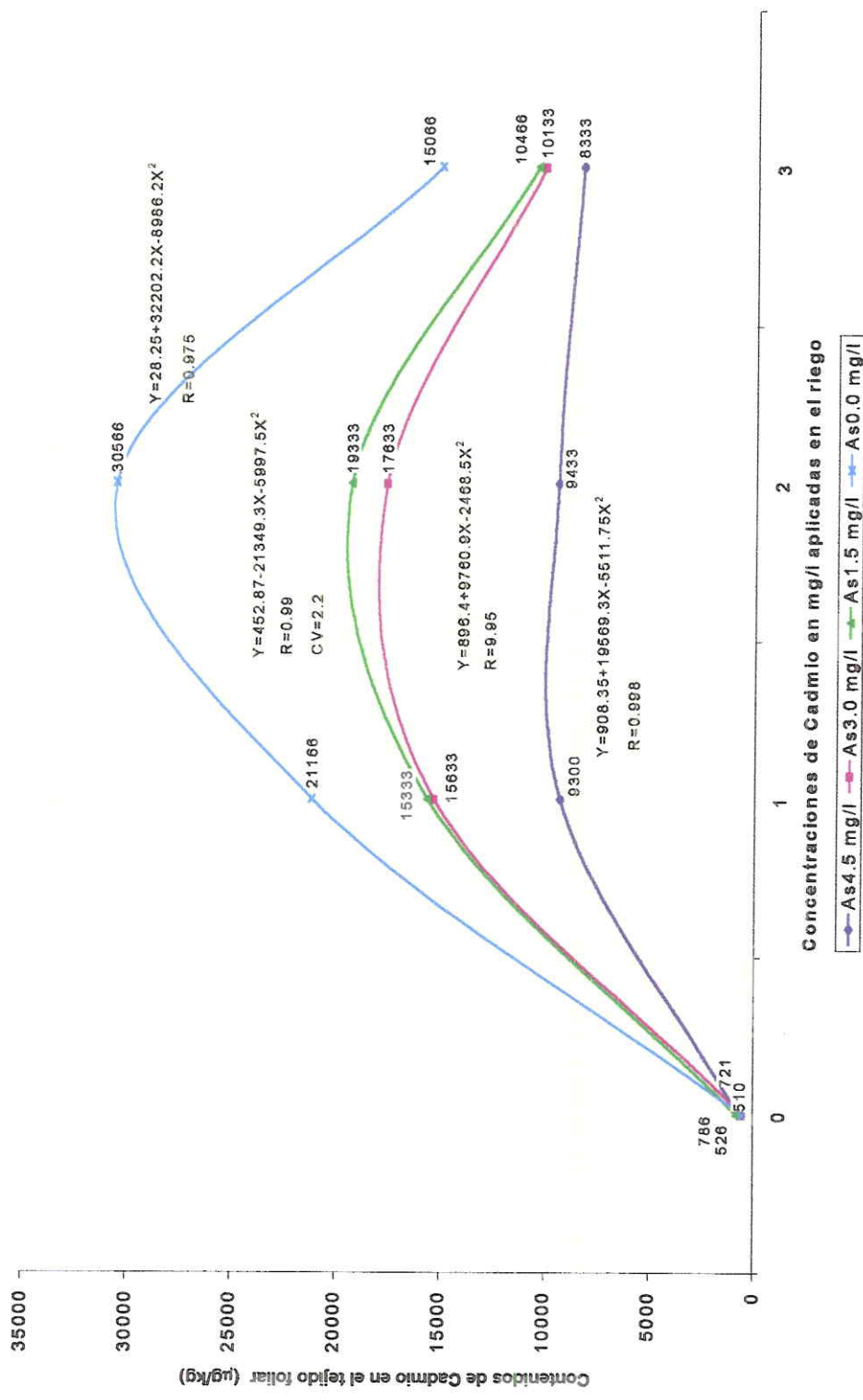


Figura 14. Interacción Cd*As en el tejido foliar del arroz (*Oryza sativa* L.) Var. Oryzica-1 C.I. Nataima, Espinal (Tol.) 1999

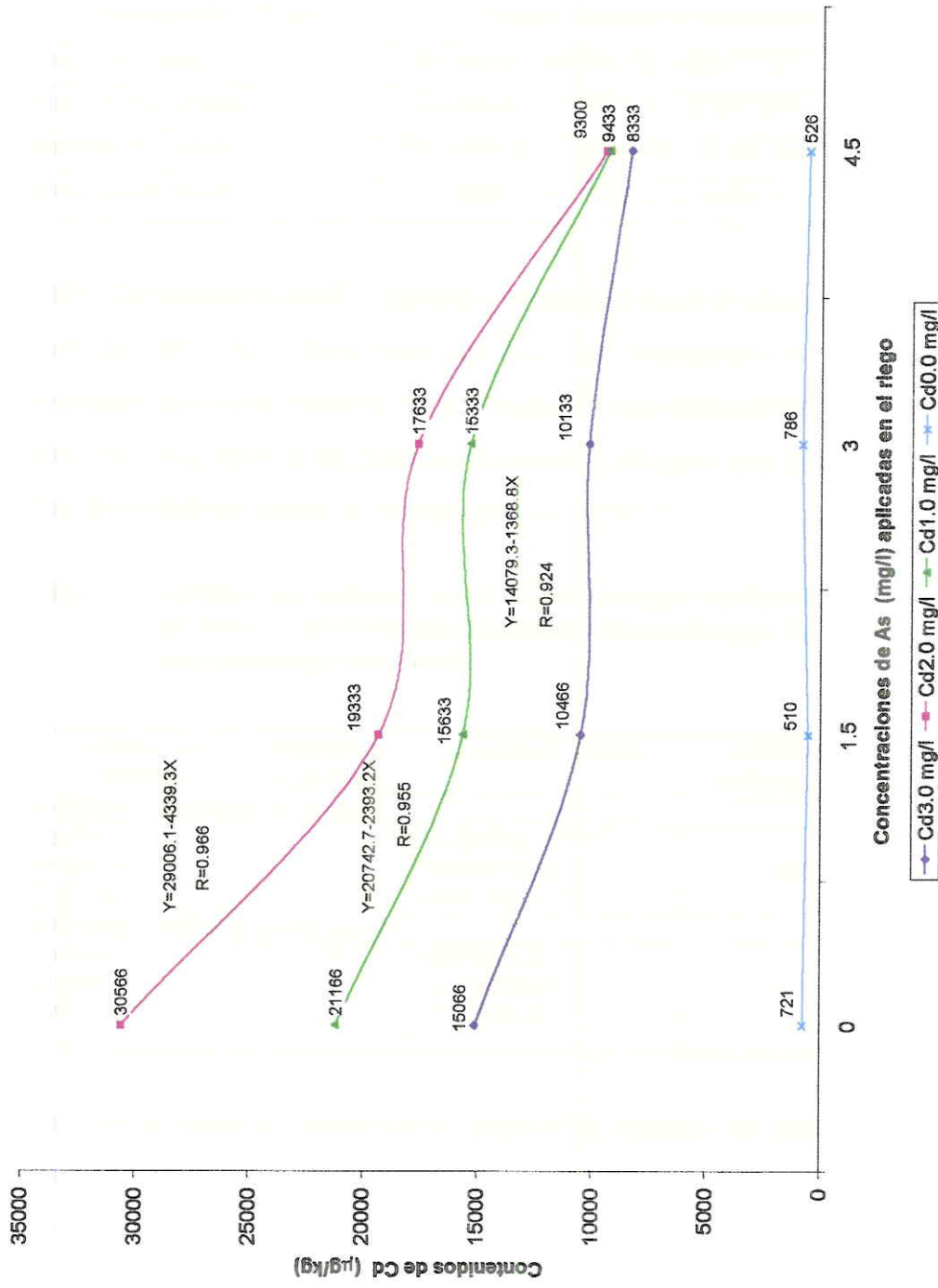


Figura 15. Efecto del Cadmio y el Arsénico sobre las concentraciones en el tejido foliar del arroz (*Oryza sativa* L.) Var. Oryzica-1 C.I. Nataima, Espinal (Tol.)

Tabla 20. Ecuaciones para la interacción en Cadmio y Arsénico para las diferentes concentraciones y su acumulación en el tejido foliar.

Interacción Cd*As	Ecuación para el Cadmio en el Tejido Foliar
Arsénico 0 (mg/l)	$\hat{Y} = 28.25 + 32.202.2 X - 8.986.2 X^2$ R= 0.975
Arsénico 1.5 (mg/l)	$\hat{Y} = 452.8 + 21.349.3 X - 5.997.5 X^2$ R= 0.991
Arsénico 3.0 (mg/l)	$\hat{Y} = 908.35 + 19569.3 X - 5.511.75 X^2$ R= 0.998
Arsénico 4.5 (mg/l)	$\hat{Y} = 896.4 + 9.760.9 X - 2.468.5 X^2$ R= 0.953

4.2.4 Concentración de Cadmio y Arsénico en el grano de arroz. Los análisis de varianza para los contenidos de los dos elementos en el grano pusieron en evidencia que hubo efectos de acumulación con diferencias altamente significativas para los tratamientos de Cadmio y Arsénico al igual que para la interacción de los dos elementos tal como se observa en la Tabla 21.

Tabla 21. Análisis de varianza para los contenidos de Cadmio y Arsénico en el grano de arroz con 4 niveles de aplicación en el agua de riego con soluciones de concentración conocida.

Fuentes de Variación	Grados de Libertad	Cuadrado Medio	Coficiente de variación (%)	R
Variable: Cadmio en el grano				
Cadmio	3	91726642.47 **	9.33	0.984
Arsénico	3	19824510.52 **		
Cd * As	9	4585102.37 **		
Variable: Arsénico en el grano				
Cadmio	3	5067618.28 **	14.9	0.947
Arsénico	3	14329122.51 **		
Cd * As	9	1013450.16 **		

Los dos elementos presentaron diferentes niveles de acumulación en el grano, acumulaciones que se discuten separadamente, primero el Cadmio y el luego el Arsénico.

4.2.4.1 Acumulación de Cadmio en el grano de arroz. Al analizar el comportamiento del Cadmio con el tratamiento cero de Arsénico respecto a su acumulación en el grano, se observó que sus concentraciones varían entre 203

$\mu\text{g}/\text{kg}$ y $9000 \mu\text{g}/\text{kg}$, variación que fue determinada solo por las concentraciones de Cadmio en el agua de riego cuyos incrementos son muy amplios y presentan grandes diferencias con respecto al testigo; el comportamiento se asimila a una regresión lineal cuyo modelo de predicción corresponde a la primera ecuación relacionada en la Tabla 22. (Figura 16).

De igual manera si se analiza el contenido de Cadmio sin la aplicación de este elemento en el agua de riego (Testigo) se observa que se presentan contenidos que oscilaron entre 203 y $444 \mu\text{g}/\text{kg}$ y que los incrementos en la absorción guardaron una estrecha relación con las concentraciones del elemento iniciales en el suelo, presentando una absorción y translocación al grano que osciló entre el 8 y el 18%. (Figura 16).

Al analizar la interacción de los dos elementos y su acumulación en el grano de arroz (Figura 16) se puede inferir que a medida que se adiciona e incrementan las concentraciones de Cadmio en el agua de riego hasta $3 \text{ mg}/\text{l}$, también se incrementan los contenidos del elemento en el grano de arroz, siendo estos incrementos inversos a las adiciones de Arsénico, indicando que a concentraciones altas de Arsénico el Cadmio tiende a disminuir su acumulación en el grano.

Se observa que el comportamiento de cada una de las concentraciones de Arsénico frente a las de Cadmio tiende a incrementarse el Cadmio sin la aplicación de Arsénico, obteniendo los mayores valores de acumulación ($9.000 \mu\text{g}/\text{kg}$) en tanto que al tener valores constantes de 1.5 y $3 \text{ mg}/\text{l}$ de Arsénico e incrementando las adiciones de Cadmio, este elemento se encuentra en el grano con una menor tasa de acumulación y con comportamientos similares para estas dos concentraciones.

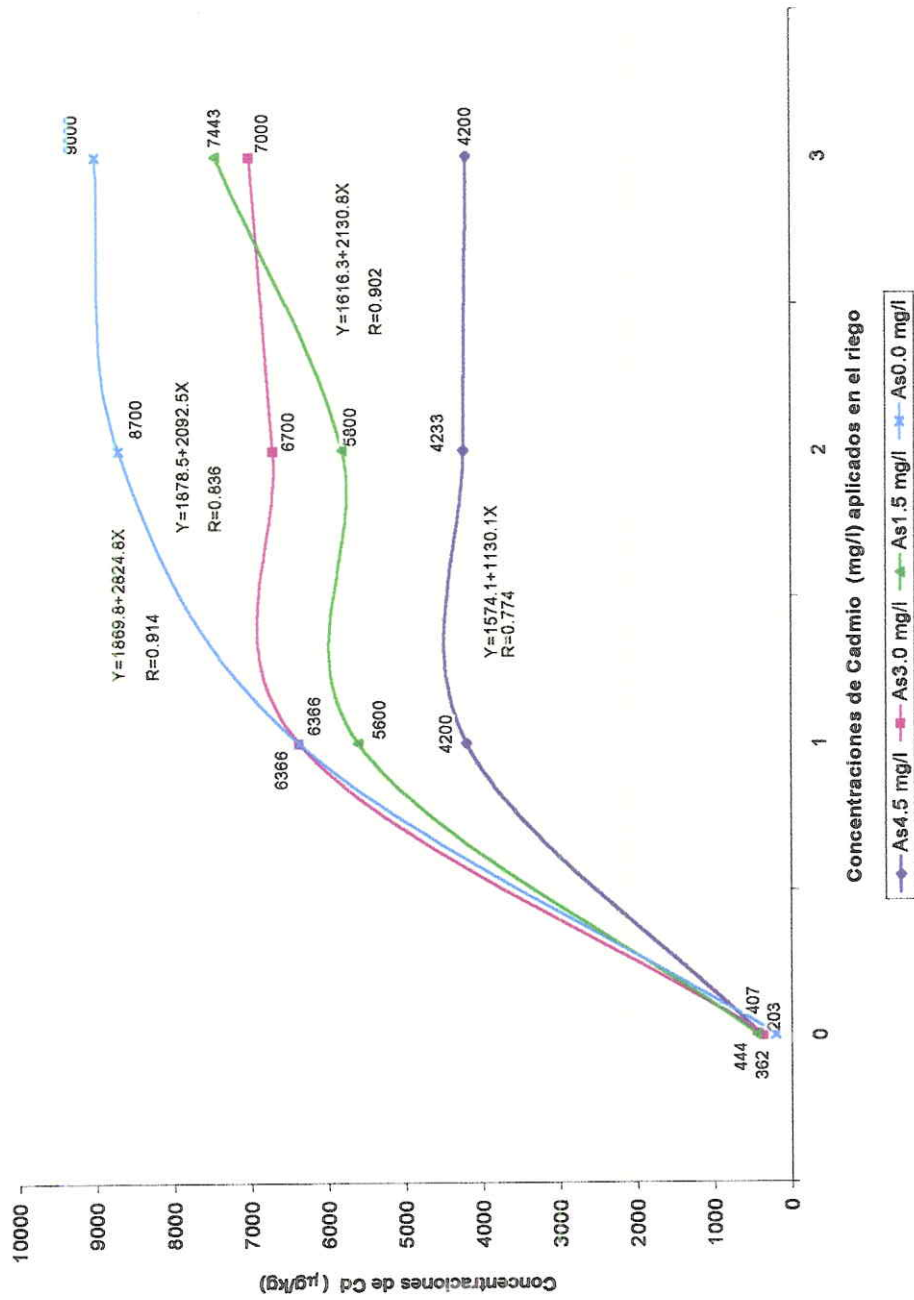


Figura 16. Efecto de la interacción de las concentraciones de Cadmio y Arsénico en el grano de arroz (*Oryza sativa* L.) Var. Oryzica-1 con la aplicación de diferentes soluciones de concentración conocida en el agua de riego C.I. Nataima. Espinal (Tol.) 1999.

El Cadmio presenta su nivel más bajo de acumulación en el grano con los niveles más altos de ambos elementos adicionados en el riego.

Todo lo anterior indica que existe un efecto de competencia entre los dos elementos para su acumulación en el grano de arroz ejerciéndose un efecto de interacción negativa probablemente en su translocación a las diferentes estructuras de la planta. Este efecto de competencia puede observarse con mayor claridad en la Figura 17 en donde a medida que se incrementan las concentraciones de Cadmio aplicadas en el agua de riego se disminuyen las cantidades de Arsénico acumuladas en el grano para todos los niveles de Arsénico adicionadas. Lo cual muestra que posiblemente el Cadmio y el Arsénico podrían estar compitiendo por los grupos funcionales -SH (Tiol) de las enzimas y proteínas, hecho que impide la acumulación del Cadmio en estas estructuras de la planta.

Tabla 22. Ecuaciones para la interacción en Cadmio y Arsénico para las diferentes y concentraciones y su acumulación en el grano de arroz

Interacción Cd*As	Ecuación para acumulación de Cadmio en el grano de arroz
Arsénico 0 (mg/l)	$\hat{Y} = 1869.8 + 2824.8 X$ R= 0.914
Arsénico 1.5 (mg/l)	$\hat{Y} = 1616.3 + 2130.8 X$ R= 0.902
Arsénico 3.0 (mg/l)	$\hat{Y} = 1878.5 + 2092.5 X$ R= 0.836
Arsénico 4.5 (mg/l)	$\hat{Y} = 1574.1 + 1130.1 X$ R= 0.774

4.2.5 Análisis de Regresión Múltiple. Al correlacionar entre si las concentraciones del Cadmio y el Arsénico en el suelo y en diferentes partes de la planta, el análisis de regresión múltiple mostró, entre otras cosas:

1. El Cadmio presente en el grano depende en forma altamente significativa de las concentraciones de este elemento en el tejido foliar, obteniéndose los siguientes coeficientes para la función:

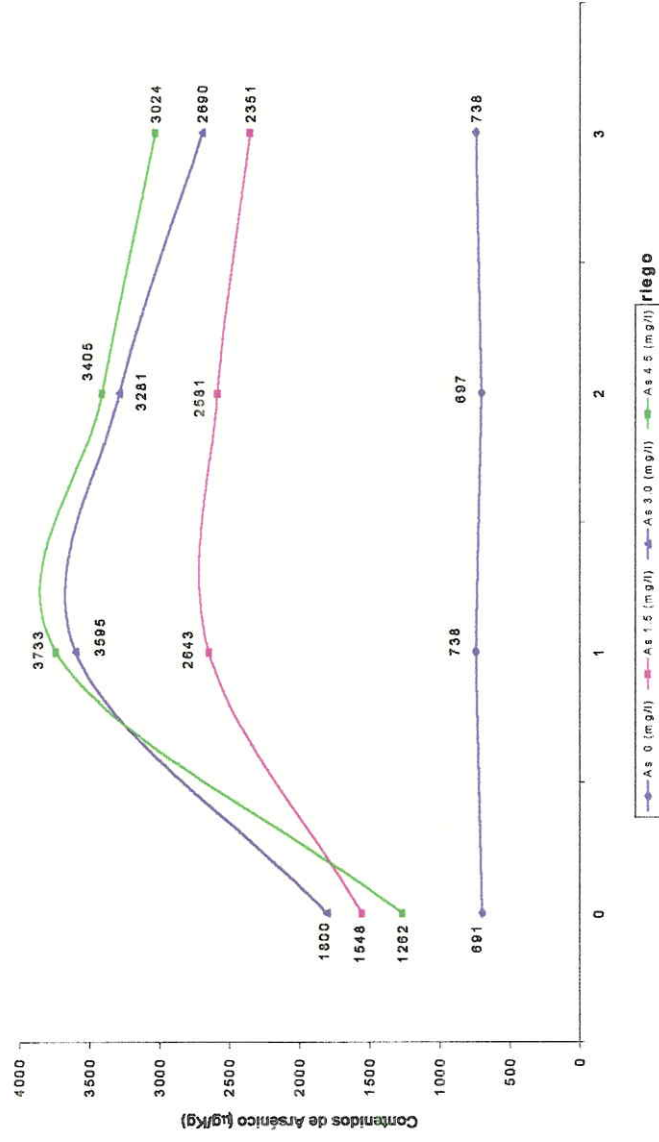


Figura 17. Efecto de la interacción de las concentraciones de Cadmio y Arsénico en el grano de arroz (*Oryza sativa* L.) Var Oryzica-1 con la aplicación de diferentes soluciones de concentración conocida en el agua de riego C.I. Nataima Espinal (Tol), 1999.

$Cd(\text{grano}) = f(Cd \text{ suelo}, Cd \text{ tejido foliar}, Cd \text{ suelo} * Cd \text{ tejido foliar})$

$$\hat{Y} = 491.93 + 0.0324 X_1 + 0.2484 X_2 + 4 \times 10^{-5} X_1 X_2$$

$$R^2 = 0.84$$

\hat{Y} = Contenido estimado de Cadmio en el grano

X_1 = Contenido de Cadmio en el suelo (NS)

X_2 = Contenido de Cadmio en el tejido foliar (**)

$X_1 X_2$ = Interacción Cadmio en el suelo * Cadmio tejido foliar (NS)

NS = No significativo

** = Altamente significativo

El modelo de predicción será: $\hat{Y} = 491.93 + 0.2484 X_2$

2. Que, de igual manera, el Arsénico acumulado en los granos de arroz depende en forma altamente significativa de las cantidades acumuladas por la planta en el tejido foliar, mientras que las cantidades halladas en el suelo y la interacción entre el Cadmio y el Arsénico no presentan influencia alguna para la función:

$As(\text{grano}) = f(As \text{ suelo}, As \text{ tejido foliar}, As \text{ suelo} * As \text{ tejido foliar})$

$$\hat{Y} = -1.213.45 + 0.246 X_1 + 1.029 X_2 - 5.3 \times 10^{-5} X_1 X_2$$

$$R_2 = 0.514$$

\hat{Y} = Contenido estimado de Arsénico en el grano

X_1 = Contenido de Arsénico en el suelo (NS)

X_2 = Contenido de Arsénico en el tejido foliar (**)

$X_1 X_2$ = Interacción Arsénico en el suelo * Arsénico tejido foliar (NS)

NS = No significativo

** = Altamente significativo

El modelo de predicción será: $\hat{Y} = 1213.45 + 1020 X_2$

Los análisis de correlación para las variables Cadmio en el suelo, Cadmio en el tejido foliar, Cadmio en el grano, Arsénico en el suelo, Arsénico en el tejido foliar y Arsénico en el grano presentan un alto grado de asociación se muestra en la Tabla 23.

Tabla 23. Coeficiente de correlación y su significancia para las variables analizadas.

Variables	Coefficiente de Correlación
As suelo * As foliar	0.4559 **
As suelo * As grano	0.5535 **
Cd suelo * Cd grano	0.5940 **
As foliar * As grano	0.6516 **
Cd foliar * Cd grano	0.8609 **
As suelo * Cd foliar	-0.3521 *
As suelo * Cd grano	-0.2995 *
Cd suelo * As foliar	0.3994 *
Cd suelo * Cd foliar	0.3469 *
Cd suelo * As grano	0.3286 *

4.3 RESULTADOS DEL EXPERIMENTO DE CAMPO

4.3.1 Análisis de las variables de comportamiento fisiológico. Los análisis estadísticos (ANAVA, Regresiones y pruebas de contrastes ortogonales para polinomios) demostraron que el rendimiento, la altura de planta y el número de granos por panícula presentan diferencias significativas, mientras que las variables: número de macollas/m², número de macollas/planta no presentó diferencias estadísticas, (Tabla 24). A continuación se discuten las características y el comportamiento de cada una de las variables.

4.3.1.1 Rendimiento. Los rendimientos promedios en arroz paddy oscilaron entre 4616.7 kg/ha y 7003 kg/ha. La menor producción se obtuvo con el volumen más bajo de riego (12000 m³/ha/ciclo), probablemente por déficit hídrico, lo cual aceleró

la maduración y condujo a un menor número de granos por panícula, en tanto que con un volumen de riego de 18000 m³/ha/ciclo se alcanzó el mayor rendimiento. Los tratamientos con valores superiores a 18000 m³/ha/ciclo mostraron una marcada tendencia a decrecer los rendimientos, que se atribuye a una mayor tasa de respiración y quizá también a una disminución de la tasa de asimilación neta, además los excesos de agua aplicados en el riego pueden inducir la pérdida de nutrimentos que presentan cierta movilidad dentro del suelo (NO₃, SO₄) y algunas bases cambiables como K y Mg, (Figura 18). Una vez realizadas las pruebas de contrastes ortogonales para polinomios se encontró que esta variable se ajusta a un modelo cuadrático cuya ecuación de predicción para el rango explorado es:

$$\hat{Y} = 1141.4 + 0.04331 X + 9 \times 10^{-6} X^2 \quad R^2 = 0.482.$$

Tabla 24. Análisis de varianza para el rendimiento y las variables de comportamiento fisiológico en arroz Oryzica-1 con la aplicación de diferentes volúmenes de riego con aguas del río Bogotá. Ricaurte (Cund.) 1998

Fuente de Variación (Variables)	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F (calculado)	P. > f	CV %
Rendimiento						
Repetición	2	177863.3	88931.6	0.80	0.484 NS	5.93
Tratamiento	4	9151592.5	2287893.1	20.47	0.0001 **	
Granos por Panícula						
Repetición	2	788.9	394.4	1.83	0.223 NS	8.27
Tratamiento	4	5201.6	1300.4	6.02	0.0121 **	
Altura de Planta						
Repetición	2	2.80	1.40	0.41	0.675 NS	1.44
Tratamiento	4	205.60	51.40	15.12	0.0001 **	
Macollas/m²						
Repetición	2	1096.13	548.06	0.88	0.450 NS	6.93
Tratamiento	4	3441.73	860.43	1.38	0.327 NS	
Macollas/Planta						
Repetición	2	0.6760	0.3380	1.27	0.332 NS	8.57
Tratamiento	4	3.7573	0.9393	3.53	0.068 NS	

NS= No significativa ** = Altamente significativa

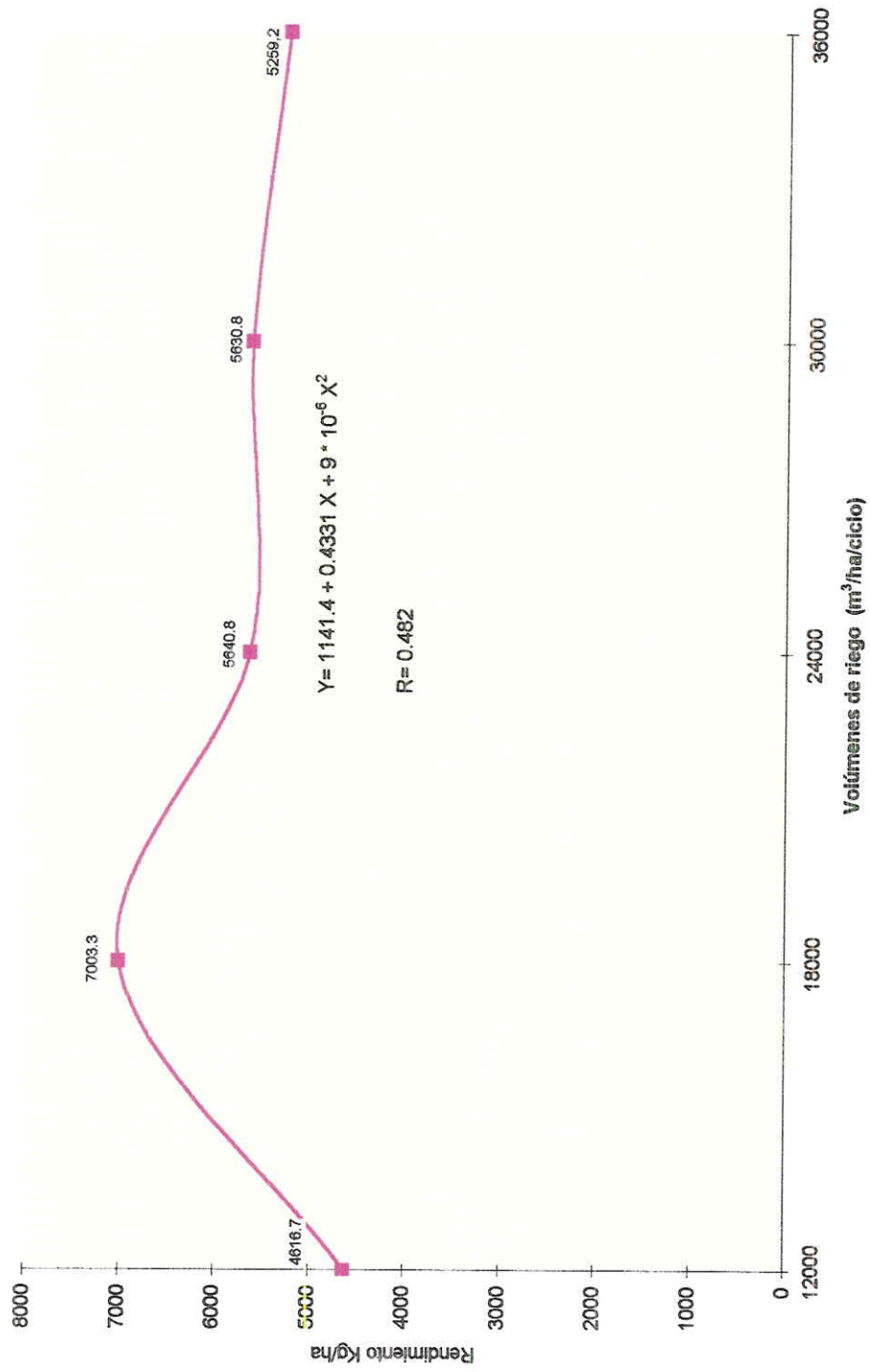


Figura 16. Rendimiento de arroz paddy y Oryzica/1 para la evaluación de Cadmio y Arsénico con la aplicación de diferentes volúmenes de riego con agua del río Bogotá, Ricaurte (Cund.) 1998.

4.3.1.2 Altura de Planta. Los promedios de altura de planta para los diferentes tratamientos oscilaron entre 123.7 y 133.6 cm y al parecer revelan una relación directamente proporcional entre la altura y el aumento de los volúmenes de riego; así, la menor altura se presentó con 12000 m³/ha/ciclo, y la máxima se obtuvo con 36000 m³/ha/ciclo. Se asume que esto podría deberse a una elongación mayor de las plantas de arroz con la aplicación de altos volúmenes de riego y quizá también por la competencia intraespecífica, generando plantas más suculentas y con mayor cantidad de fitomasa que no fue reflejado en la producción, fenómeno conocido como vicio o consumo de lujo, tal como lo muestra la Figura 19. El comportamiento de esta variable se asimila a un modelo lineal cuya ecuación de predicción es: $\hat{Y} = 117.9 + 0.00041 X$ y un $R^2 = 0.973$

4.3.1.3 Número de granos por panículas. Los promedios del número de granos por panículas oscilaron entre 149 y 206, obteniéndose el mayor número de granos por panícula (206) con la aplicación de 18000 m³/ha/ciclo, y el menor (149 granos por panícula) con la aplicación de un volumen de riego de 12000 m³/ha/ciclo. Este comportamiento está estrechamente correlacionado con la producción ya que este parámetro se considera un componente del rendimiento. Esto aparentemente indica que volúmenes superiores a 18000 m³/ha/ciclo inducen vaneamiento, fenómeno que parece estar relacionado con la temperatura del agua del río Bogotá, la cual es muy baja para el riego y los grandes volúmenes tardan mayor tiempo en llegar a la temperatura ambiente (28°C) aunque esto no afecte el rendimiento, (Figura 20). El análisis de contrastes para polinomios ortogonales permitió determinar que esta variable tiene un comportamiento cuadrático, cuya ecuación de predicción para el rango de los volúmenes de riego aplicados es:

$$\hat{Y} = 55 + 0.011 X - 2.3 \times 10^{-7} X^2 \quad R^2 = 0.57.$$

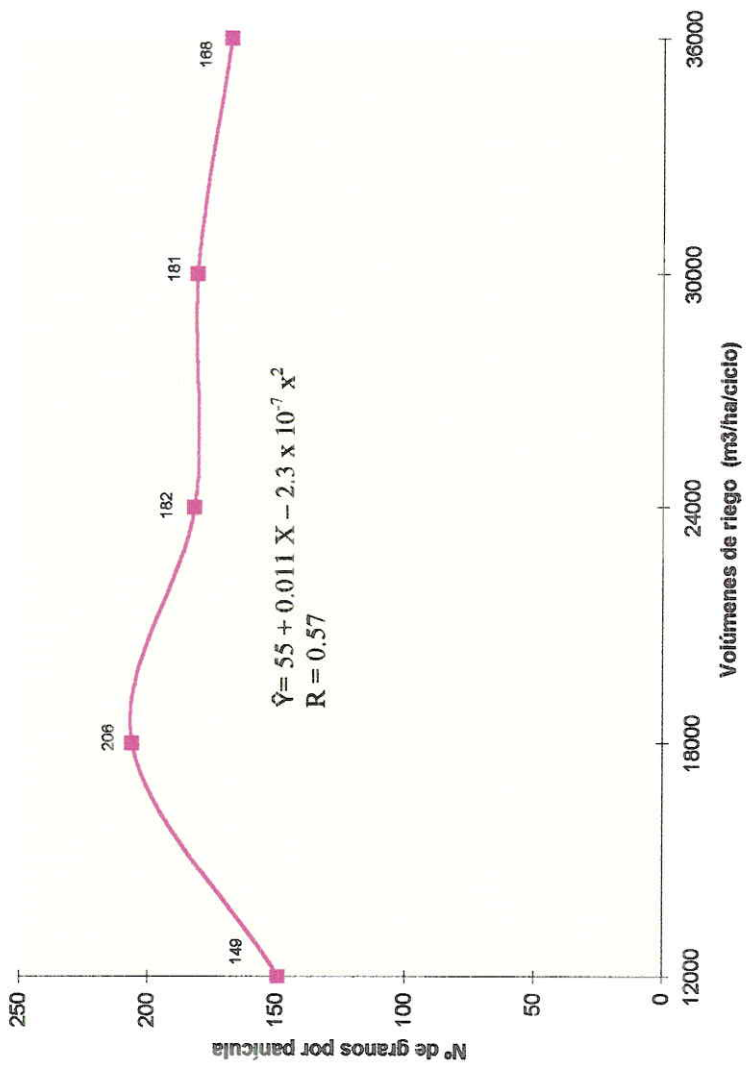


Figura 20. Granos por panícula de arroz Oryzica-1 para la evaluación de Cadmio y Arsénico con la aplicación de diferentes volúmenes de riego en las aguas del río Bogotá. Ricaurte (Cund.) 1998.

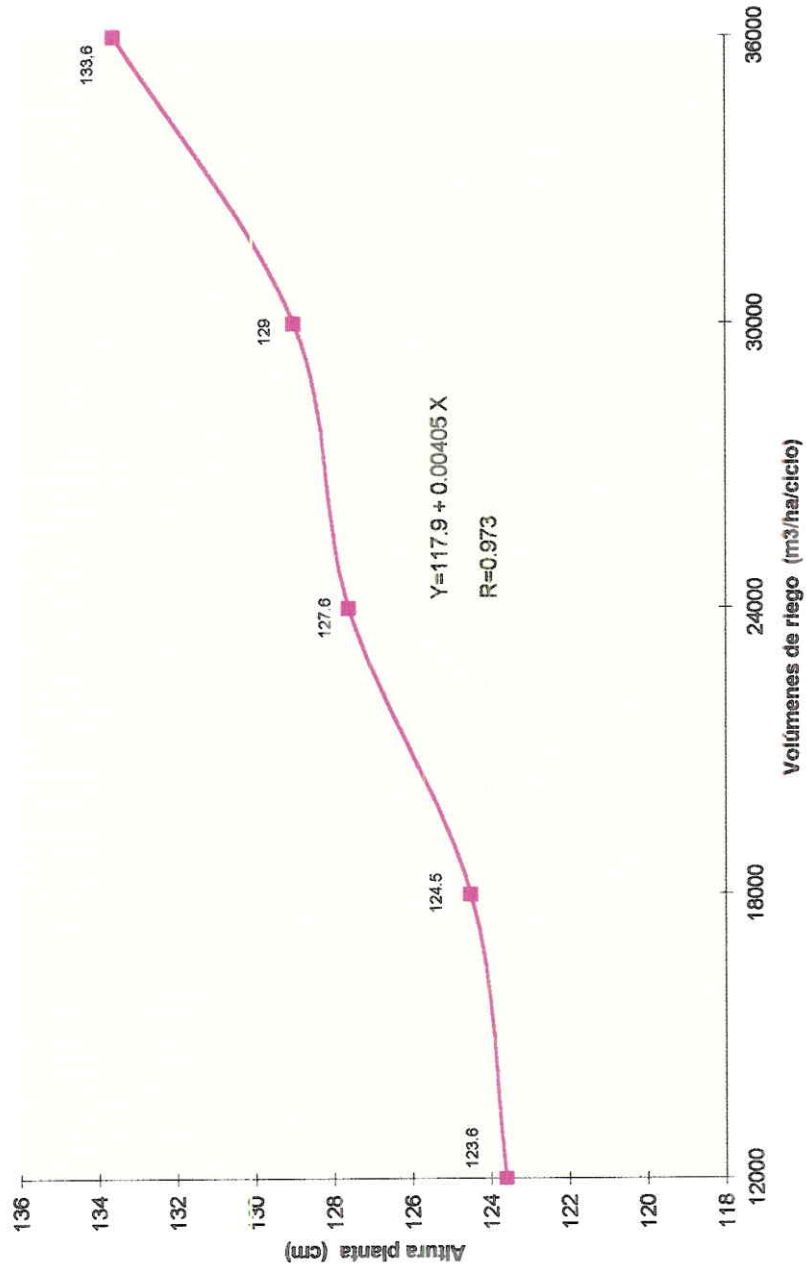


Figura 19. Altura de planta de arroz, variedad Oryzica-1 con la aplicación de diferentes volúmenes de riego con aguas del río Bogotá. Ricaurte (Cund.). 1998.

Los parámetros de calidad de molinería (% grano limpio, % cáscara, % de harina, % grano entero y % grano partido) no presentaron diferencias estadísticas ni grandes variaciones en sus promedios, (Tabla 25).

Tabla 25. Análisis de varianza para las variables de calidad de molinería en arroz Oryzica-1 con la aplicación de diferentes volúmenes de riego con aguas del río Bogotá, Ricaurte (Cund.) 1998

Fuente Variación (Variables)	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F (calculado)	P. > f	CV %
Porcentaje de Grano Limpio						
Repetición	2	3.9293	1.964	1.02	0.4032 NS	1.64
Tratamiento	4	1.7293	0.432	0.22	0.9172 NS	
Porcentaje Cáscara						
Repetición	2	3.929	1.64	1.03	0.403 NS	8.91
Tratamiento	4	17293	0.431	0.21	0.916 NS	
Porcentaje Grano pulido						
Repetición	2	3.532	1.766	0.73	0.509 NS	2.02
Tratamiento	4	1.230	0.307	0.13	0.968 NS	
Porcentaje de Harina						
Repetición	2	0.6773	0.3386	0.34	0.720 NS	12.53
Tratamiento	4	4.2973	1.074	1.08	0.426 NS	
Porcentaje de Grano entero						
Repetición	2	6.0253	3.012	1.03	0.3990 NS	2.48
Tratamiento	4	2.9173	0.729	0.25	0.9017 NS	
Porcentaje de Grano Partido						
Repetición	2	2.021	1.010	0.15	0.865 NS	4.35
Tratamiento	4	7.129	1.782	0.26	0.895 NS	

4.3.2 Variables cuantificadas en laboratorio

4.3.2.1 Contenido de Cadmio en el suelo: Al realizar el análisis de varianza no se detectaron diferencias estadísticas para ninguno de los tratamientos de aplicación de riego, (Tabla 26). Sin embargo, se observa que los contenidos de Cadmio en el

suelo incrementaron alcanzando su máxima acumulación con la aplicación de 24000 m³/há/ciclo con el uso de las aguas del río Bogotá cuyo promedio de aporte de Cadmio a estos suelos es de 3 µg/l. Con volúmenes superiores se presentó una marcada tendencia a disminuir estas concentraciones, probablemente debido a un efecto de lavado o lixiviación hacia los drenajes o hacia horizontes más profundos de perfil del suelo, o quizá también a una mayor facilidad para que el Cadmio fuese adsorbido por las arcillas de tipo 2:1 (Esmectitas o Vermiculita), o también, aunque con menor probabilidad, a la formación de complejos organometálicos, (Figura 21). Los análisis de contrastes ortogonales para polinomios determinó que la variable se ajusta a un modelo cuadrático cuya ecuación de predicción es: $\hat{Y} = -148.4 + 0.165 X - 3.7 \times 10^{-6} X^2$ $R^2 = 0.975$

Tabla 26. Análisis de Varianza para las variables cuantificadas en el laboratorio (datos transformados).

Fuente Variación (Variables)	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F (calculado)	P. > f	CV %
Cadmio en el suelo						
Repetición	2	0.0692889	0.03464	1.94	0.205 NS	11.39
Tratamiento	4	0.17601293	0.0440	2.47	0.129 NS	
Arsénico en el suelo						
Repetición	2	0.58809	0.29404	4.48	0.0995 NS	12.53
Tratamiento	4	0.92133	0.23033	3.51	0.0617 NS	
Cadmio en Tejido foliar						
Repetición	2	0.10686	0.05343	0.58	0.5808 NS	13.67
Tratamiento	4	0.33572	0.08393	0.91	0.500 NS	
Arsénico en Tejido foliar						
Repetición	2	0.332836	0.166418	3.81	0.0688 NS	12.45
Tratamiento	4	0.524919	0.131229	3.0	0.0868 NS	
Cadmio en el grano						
Repetición	2	0.08531693	0.04265847	1.19	0.3516 NS	8.8
Tratamiento	4	0.83688907	0.2092227	5.86	0.0167 *	

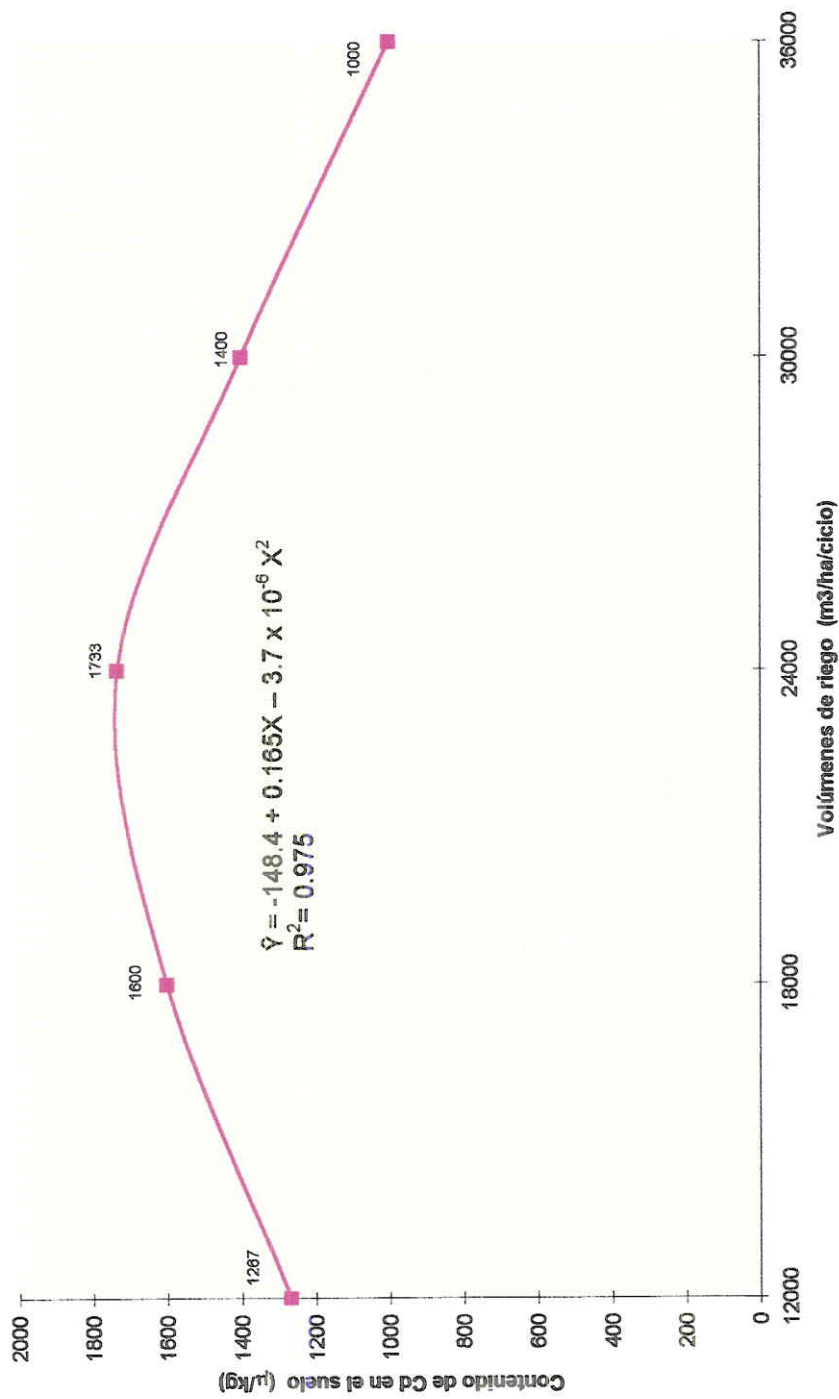


Figura 21. Contenido de Cadmio en suelos cultivados en arroz con la aplicación de diferentes volúmenes de riego con aguas del río Bogotá. Ricaurte (Cund.) 1998.

Respecto a la posibilidad de que el riego continuo con las aguas del río llegue a producir altos niveles de acumulación de Cadmio en estos suelos, es necesario tomar como referencia los valores normalmente aceptados o propuestos por organismos nacionales y/o internacionales, como los que presenta la Tabla 27.

Tabla 27. Concentraciones totales de metales traza en suelos agrícolas.

Elementos (μ g/kg)	A	B	C	D	E	F
As	2000	30000	20000	14000	8.400	50000
Cd	-	3000	1000	-	500	1000
Hg	2100	5000	2000	500	100	-
Pb	20000	100000	50000	60000	28000	80000

A : Niveles aceptables para la producción de alimentos sanos

B : Valores considerados fitotóxicos

C : Valores de concentración máxima aceptable (MAC) propuestos por la comunidad económica europea para suelos tratados con lodos residuales.

D : Valores de concentración máxima aceptables (MAC) propuestos por el Ministerio de Agricultura de ONTARIO Canadá.

E : Concentraciones promedias en suelos limosos superficiales

F : Valores de concentración máxima aceptables (MAC) propuestos por el comité mixto FAO – OMS.

* Tomado de Kabata Pendias 1992 y Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud.

Al comparar los resultados obtenidos en este experimento con los valores de la Tabla 27, se observa que en su totalidad son iguales o superiores a los niveles de concentraciones máxima aceptable propuestos por la CEE y por el Comité Mixto FAO-OMS, lo que significa que la acumulación del Cadmio en el suelo inducida por el riego continuo con las aguas del río Bogotá es un proceso que sin duda llegará a acumular el Cadmio en el suelo en un futuro, en niveles tan altos que, tarde o temprano, los frutos y productos cosechados en ellos constuirán un grave riesgo para la salud pública.

4.3.3 Contenidos de Arsénico en el Suelo: En el análisis de varianza no se observaron diferencias estadísticas para este parámetro con la aplicación de los

diferentes volúmenes de riego. Sin embargo, su comportamiento fue muy similar al del Cadmio ya que se alcanzó el máximo punto de acumulación con 30000 m³/há/ciclo para luego disminuir cuando se aumentó el volumen de riego como lo muestra la Figura 22.

Al comparar los valores obtenidos con los niveles de concentración máxima aceptables (MAC) propuestos por la C.E.E. y el Comité Mixto FAO-OMS se observa que solo cuando se adicionaron 30.000 m³/ha/ciclo se superan estos límites, indicando que aunque el riego del arroz con las aguas del río Bogotá en el momento actual no constituye un riesgo inmediato de toxicidad para la salud pública, hacia un futuro más o menos cercano la acumulación gradual del elemento en los suelos, puede llegar a constituir un riesgo que no debe perderse de vista y que impone la necesidad de un permanente monitoreo. Los datos obtenidos mostraron una tendencia cuadrática cuya ecuación de predicción para el rango explorado es: $\hat{Y} = -468.2 + 0.0536 X - 1 \times 10^{-6} X^2$ $R^2 = 0.69$

4.3.4 Contenido de Cadmio en Tejido Foliar. El análisis estadístico mostró diferencias significativas entre los tratamientos, pero al comparar los contenidos medios del Cadmio en el tejido foliar se observó que el contenido se incrementa a medida que aumentan los volúmenes de riego, alcanzando su mayor valor de acumulación con 30000 m³/ha/ciclo para luego decrecer cuando se pasó a un nivel de riesgo mayor (36000 m³/ha/ciclo), (Figura 23). Mediante contrastes ortogonales para polinomios se determinó una tendencia cúbica para esta variable con una ecuación de predicción para el rango explorado en donde:

$$\hat{Y} = 296 - 0.0198 X + 1.1 \times 10^{-6} X^2 - 1 \times 10^{-8} X^3 \quad R^2 = 0.995$$

Para efectos comparativos la Tabla 28 resume algunos datos sobre el contenido de Cadmio, Arsénico y Plomo en granos de arroz y pastos tomados de Kabata-Pendias (1992).

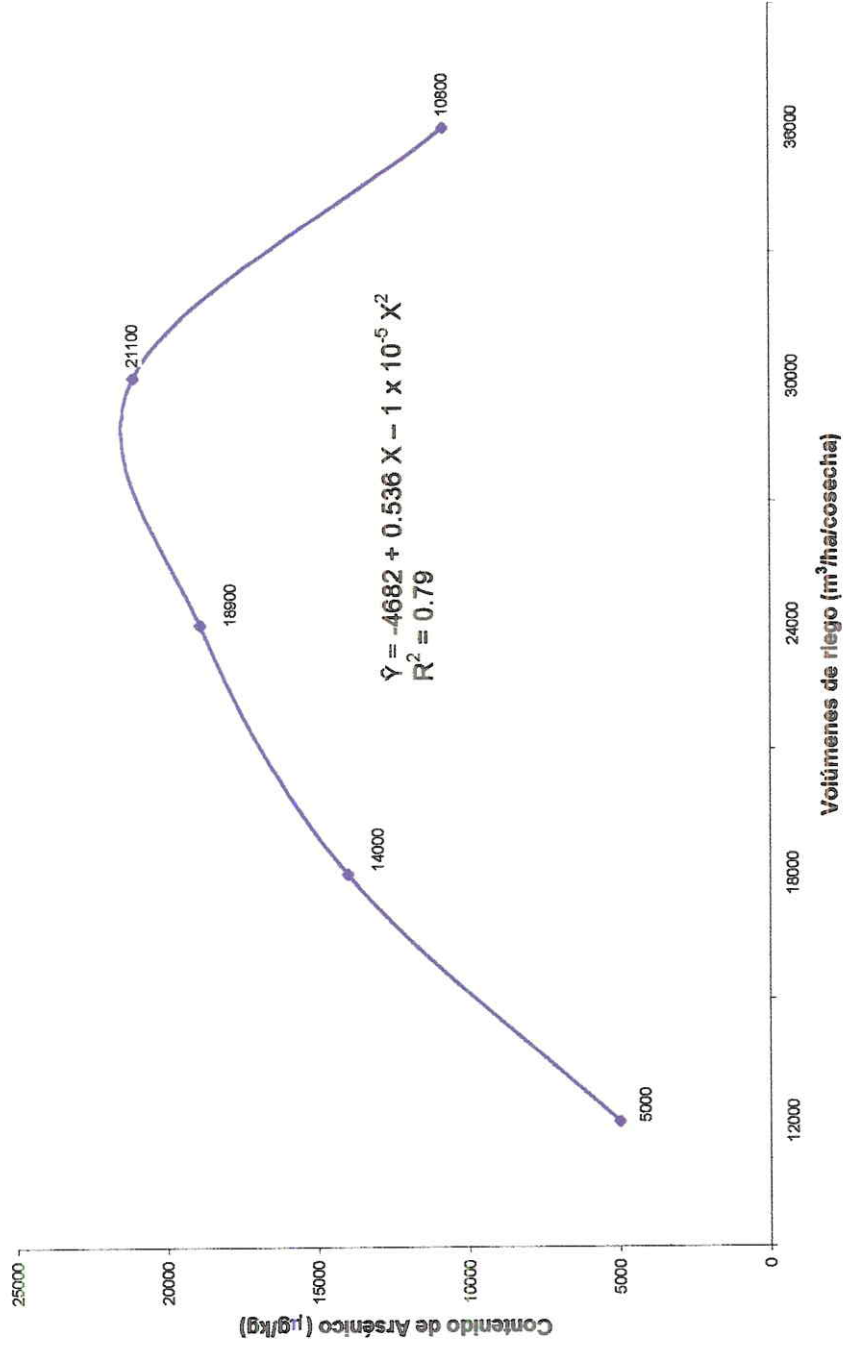


Figura 22. Contenido de Arsénico en suelos cultivados en arroz con la aplicación de diferentes volúmenes de riego con aguas del río Bogotá. Ricaurte (Cund.) 1998.

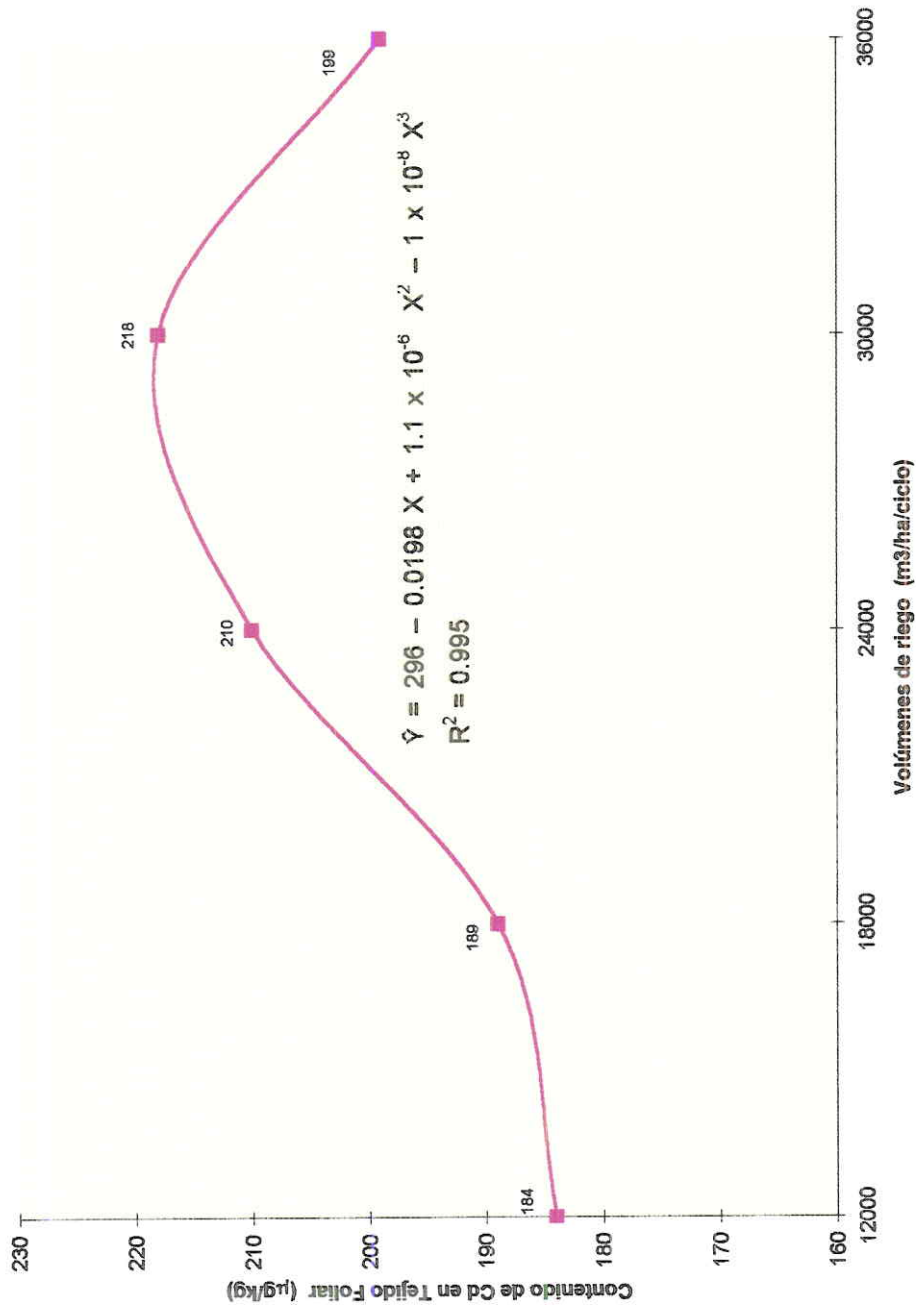


Figura 23. Contenido de Cadmio en Tejido foliar con la aplicación de diferentes volúmenes de riego en arroz Oryzica-1 con aguas del río Bogotá. Ricaurte (Cund.), 1998

Tabla 28. Contenidos de Cadmio, Arsénico y Plomo en granos de arroz y en pastos.

CULTIVO	Cadmio ppb	Arsénico ppb	Plomo ppb
Arroz grano	70-120	110-200	470
Pastos	50-270	280-330	2000

* Tomado de Kabata - Pendias and Pendias. 1992

Al comparar los resultados obtenidos con los de la Tabla 28 para pastos, se observa que aunque no se trata de la misma planta los valores encontrados en el tejido foliar del arroz podría decirse que están dentro del rango considerado como normal.

4.3.5 Contenido de Cadmio en el grano: En relación con este parámetro, sí se presentaron diferencias significativas entre tratamientos, con valores promedios que oscilaron entre 65 y 307 $\mu\text{g}/\text{kg}$ observándose una relación inversa entre el contenido de Cadmio en el grano de arroz y los volúmenes de riego, (Figura 24), cuya ecuación de predicción corresponde a un modelo lineal en donde: $\hat{Y} = 368.8 - 9.1 \times 10^{-3} X$ y un $R^2 = 0.96$. Indicando que hay una reducción promedio de 0.0091 $\mu\text{g}/\text{kg}$ por cada m^3 de riego aplicado durante el ciclo del cultivo.

Al comparar los resultados obtenidos con los valores que se presentan en la Tabla 28 se observa que el 80% de estos superan el límite máximo considerado como normal o permisible, es indudable que el Cadmio representa un riesgo potencial de acumulación hasta niveles tóxicos en el grano. Esto significa también que el Cadmio es un catión que es absorbido en forma efectiva por el arroz de la solución del suelo y que penetra a través del sistema radicular, translocándose a las diferentes estructuras de la planta con una baja acumulación en el tejido foliar, pero con una considerable acumulación en el grano de arroz.

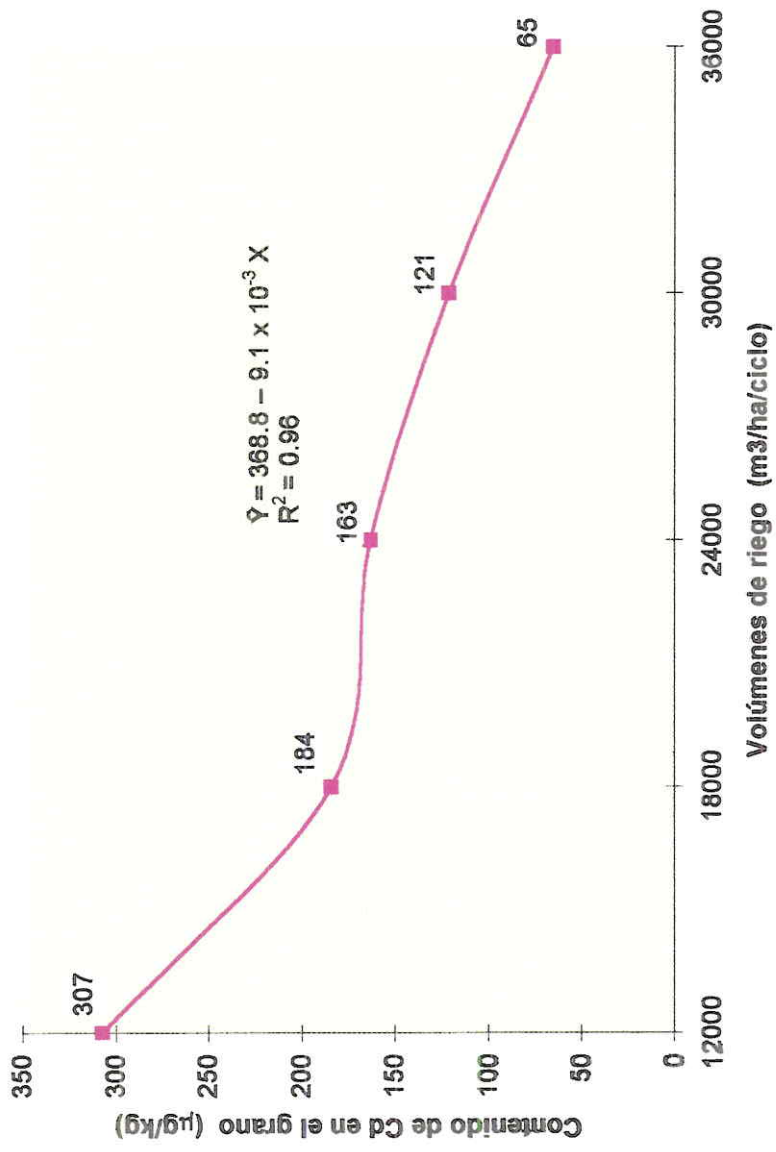


Figura 24. Contenido de Cadmio en el grano de arroz con la aplicación de diferentes volúmenes de riego en arroz Oryzica-1 con aguas del río Bogotá. Ricaurte (Cund.). 1998.

4.3.6 Contenido de Arsénico en Tejido Foliar. El análisis de varianza no reveló diferencias estadísticas para ninguno de los tratamientos pero los valores promedios presentan una relación inversa con respecto a los volúmenes de riego, (Figura 25), con un comportamiento cuadrático para esta variable cuya ecuación de predicción es: $\hat{Y} = 124.2 - 0.011 X + 3 \times 10^{-7} X^2$ y un $R^2 = 0.96$

Al comparar estos resultados con los valores propuestos en la Tabla 28, puede verse que todos se encuentran por debajo del valor inferior del rango considerado como normal, lo que indica que el riego continuo con las aguas del río Bogotá por el momento no implica un riesgo de acumulación del elemento en el suelo y su posterior translocación al tejido foliar y al grano, ya que todos los valores encontrados para el grano estuvieron por debajo del límite superior (330 ppb).

Sin embargo existe la posibilidad de una acumulación del elemento para un futuro más o menos distante, que impone la necesidad de un programa de monitoreo.

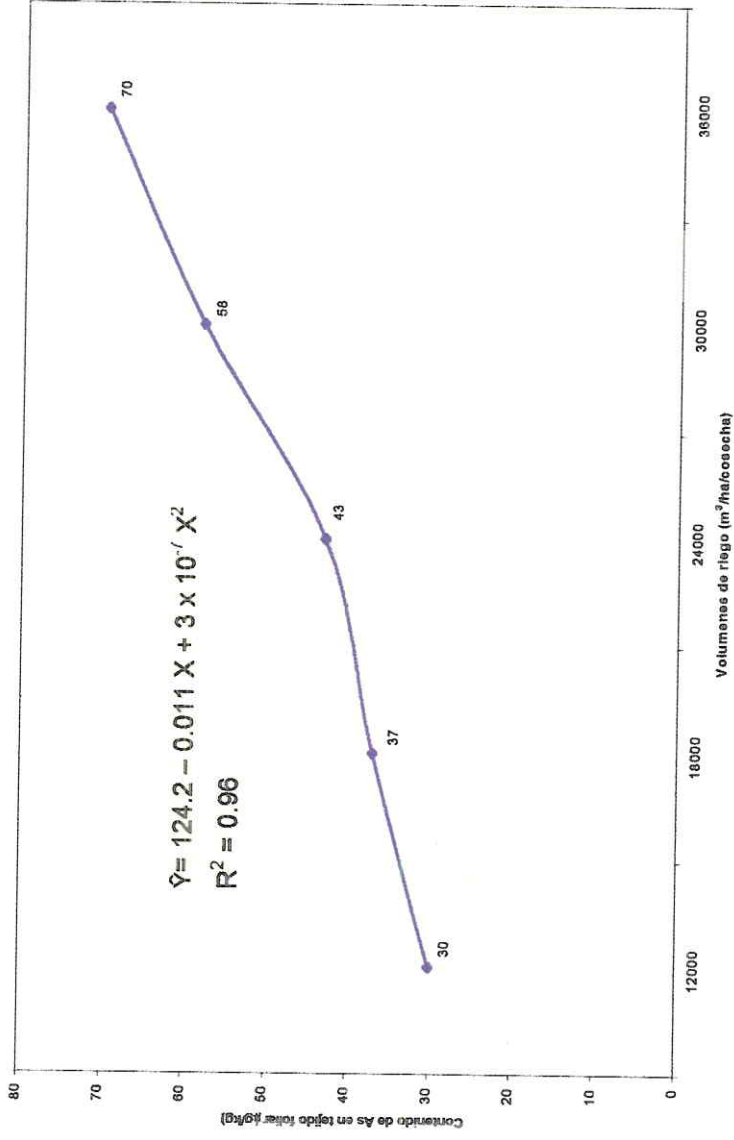


Figura 25. Contenido de Arsénico en tejido foliar de arroz con aplicaciones de diferentes volúmenes de riego con aguas del río Bogotá. Ricaurte (Cund.) 1998

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Las características físicas y químicas de los suelos utilizados tanto en los ensayos de campo como para el ensayo de invernadero presentaron condiciones que facilitaron que el Cadmio y el Arsénico suministrados en el agua de riego se acumularan en las fracciones adsorptivas del suelo.

2. En los experimentos de invernadero los resultados obtenidos para la adsorción y acumulación del Cadmio y Arsénico en el suelo, tejido foliar y en el grano en el momento de la cosecha permiten afirmar que:

2.1 Los suelos acumulan cantidades progresivamente crecientes de Cadmio y Arsénico a medida que se incrementan las concentraciones de estos dos elementos en el agua de riego, llegando a alcanzar niveles capaces de afectar el desarrollo fisiológico normal de las plantas de arroz. Para el caso del Cadmio los niveles de 1 y 2 mg/l aplicados en el agua de riego no presentan incrementos significativos con la adición simultánea de Arsénico, mientras que niveles superiores (3 mg/l) alcanzan acumulaciones en el suelo extremadamente altas (82000 µg/kg) con la adición simultánea de cualquier nivel de Arsénico. El Arsénico presenta incrementos aproximadamente constantes para todos los niveles de concentración aplicados, llegando a generar niveles de acumulación en el suelo hasta de 12400 µg/kg de suelo.

2.2 Las altas concentraciones de Cadmio y Arsénico disponibles en el suelo al ser absorbidas por las plantas afectan el comportamiento fisiológico de éstas, induciendo una menor altura, disminuyendo el número de granos por panícula y afectando drásticamente los rendimientos con mermas hasta del 50%.

2.3 El Cadmio y el Arsénico adicionados a través de los diferentes volúmenes de riego con las aguas del río Bogotá no afectan de manera significativa los parámetros de calidad molinera del grano de arroz.

2.4 La acumulación del Cadmio y el Arsénico en el tejido foliar del arroz aumentó en forma diferente para cada uno de los elementos, en relación con la concentración de ellos aplicada en el riego. El arroz acumuló las máximas concentraciones de Cadmio en el tejido foliar con aplicaciones de 2 y 3 mg/l de Cadmio en el riego, superando los límites críticos considerados permisibles por varios organismos nacionales e internacionales de control sanitario, para tejidos similares (pastos); sin embargo la acumulación de este elemento fue afectada por un posible antagonismo con el Arsénico, ya que a medida que se incrementaron las concentraciones de Arsénico en el agua de riego los contenidos de Cadmio en los tejidos fueron menores, lo que sugiere un efecto de competencia entre estos elementos que se refleja en su respectiva acumulación en los tejidos.

2.5 El grano de arroz acumuló cantidades crecientes de Cadmio a medida que se aumentaron las cantidades de este elemento en el riego siendo estas menores a las acumuladas por el tejido foliar, pero no obstante fueron 50 veces mayores que los valores considerados como normales por los organismos internacionales para este tipo de productos comestibles.

2.6 El Arsénico se acumuló en el grano de arroz en forma creciente a medida que se aumentaron las concentraciones de Arsénico en el riego pero con tasas inferiores a las del Cadmio; no obstante, las cantidades acumuladas también superan hasta en 15 veces los valores considerados como normales para este tipo de alimentos.

2.7 Se comprobó que existe una alta correlación entre la concentración de estos elementos en la solución del suelo y las concentraciones halladas tanto en el tejido foliar como en el grano.

3. En el experimento de campo los resultados obtenidos al aplicar diferentes volúmenes de riego en el cultivo de arroz usando las aguas del río Bogotá, sin ningún tratamiento previo demuestran que:

3.1 El Cadmio en el grano de arroz presenta concentraciones que superan hasta en 3 veces el límite superior permisible establecido por el comité mixto FAO-OMS para este tipo de alimentos, constituyendo por tanto una fuente potencial de intoxicación para los consumidores del grano, debido a los procesos de bioacumulación en el organismo.

3.2 Los contenidos de Cadmio encontrados en el tejido foliar aunque no superaron los límites considerados como peligrosos para este tipo de forrajes, puede sin embargo constituir un gran riesgo para los animales (bovinos) expuestos permanentemente al consumo de estas socas, por cuanto podrían llegar a acumularse en cantidades tóxicas en el organismo animal, llegando a la población consumidora de leche y productos cárnicos.

3.3 Los contenidos de Arsénico tanto en los suelos como en el tejido foliar y en el grano no superan los niveles de contaminación máximos permisibles pero si podrán tener un proceso continuo de acumulación que podría crear riesgos potenciales de bioacumulación en las cosechas y toxicidad a los consumidores.

3.4 El volumen de riego con el cual se obtuvieron los mayores rendimientos en el arroz Oryzica-1 para las condiciones del experimento fue de 18000 m³/ha/ciclo.

3.5 La altura de la planta presentó una relación directa con el volumen de riego: a mayores volúmenes de riego se presentaron las mayores alturas de planta.

4. Se recomienda un programa sistemático de monitoreo de cultivos y de control de calidad de las aguas de riego que permita realizar un diagnóstico del

comportamiento de estas fuentes de contaminación y su posible impacto en la calidad de los productos comestibles y en la salud de la población consumidora de los alimentos.

5. Se recomienda investigar el comportamiento del Cadmio en generaciones sucesivas de cultivos de arroz en la zona estudiada, para con base en el grado de acumulación de este peligroso elemento, contemplar la posibilidad de destinar estas áreas solo a la multiplicación de semillas, o a cultivos no comestibles.

6. Se recomienda desarrollar programas de descontaminación de las aguas del río Bogotá en cajas de oxidación, a fin de que el agua utilizada para el riego pueda ser depurada de elementos que como el Cadmio y el Arsénico sean potencialmente tóxicos.

BIBLIOGRAFÍA

AGUDELO, C. 1994. Río Bogotá: En el muña es cadáver. Diario el Tiempo, sección E, mayo 22 Santafé de Bogotá

ALLOWAY, B.J., 1995. Heavy Metals in Soils; Cadmiun in soils, second ediction Ed. Blackie Academic professional, London Pg. 135-144.

BARCELÓ, J.C., NICOLAS, G.R., SABATER, B. G. y SANCHEZ, R.T. 1992. Nutrición Mineral. pág. 166-167. en: Fisiología vegetal. 6ª edición. Pirámide, Madrid.

BOWEN, H J M., 1986. Environmental Chemistry of the Element, academic Press London.

C.D.M / C.E.I. 1970. Estudio de la contaminación y polución del río Bogotá en el trayecto comprendido entre los puntos "Vuelta grande" y Alicachín, longitud aproximada de 69 km, Informe para la empresa de acueductos y alcantarillado de Bogotá (E.A.A.B) numero 389 Archivo HE/BVI Santafé de Bogotá.

CASTRO, J., 1996. Revista SEMANA Secc. La Nación Art. Cuando el río suena; julio 9 de 1996. p. 54-55

CORPOICA- PRONATTA 1997. Evaluación de la contaminación por metales pesados tóxicos en los subsistemas de producción de la planicie aluvial baja del río Bogotá Informe Minagricultura Pronatta Santafé de Bogotá.

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL (CAR)., 1990 Programa de aforo y muestreo del río Bogotá y otras fuentes superficiales en el área de la CAR (febrero de 1990).

----- 1987. Programa de descontaminación del río Bogotá, primera etapa, plantas de tratamiento, informe de la subdirección técnica CAR Santafé de Bogotá.

-----1982. Análisis de calidad de aguas del río Bogotá, informe número 330 archivo HE/BVI Santafé de Bogotá.



-----1982. Estimación sobre la contaminación del río Bogotá informe número 323 archivo HE/BVI Santafé de Bogotá.

CHEN, Y. and STEVENSON, F.J., 1986 The role of organic matter in modern agriculture, Eds. p. 73-112.

DAR-YUAN, L., PO-HSING, CH. and KUN-HUANG, H. 1996. Determination of the Cadmium available in rice cultivation in Taiwan. .Plant and soil. 82(18): 233-239.

DIAZ, A. I., ALICANTOR, G. and CARRILLO, R.; 1994. Morfology, Fisiology and Nutrition of Wheat as Affected by Cadmio, Ni and Pb Aditions. Congreso Mundial de la Ciencia del Suelo; Acapulco México ISSS vol 3. p. 168-169.

DUQUE, J.H. y OROZCO, V.A. 1976. Estudio sobre la contaminación y toxicidad de las aguas del río Bogotá, Tesis Universidad Nacional de Colombia. Santafé de Bogotá

FASSETT, D.W. 1980. Metals in the enviroment. Ed Waldron H. A.Academic press London. p. 61-110

GONZÁLEZ, G. S. , y MEJÍA, L.C. 1994. Contaminación por Cadmio y Arsénico en suelos y hortalizas en sector de la cuenca del río Bogotá. Tesis de grado Maestría. Facultad de Agronomía Universidad Nacional de Colombia. Santafé de Bogotá.

GRADEX INGENIERIA Ltda. 1992. Estudio de Impacto Ambiental del distrito de riego Tocaima- Girardot. Trabajo realizado para el Instituto Nacional de Adecuación de Tierras (INAT) Santafé de Bogotá.

HAANDE, F.A., and ZWERMAN, P.J. 1976. Pollution of soil pg.192-291 in : Bolt & Bruggenwert Ed. soil chemisty basic element. Elsevier Scientific. Publishing Company, Amsterdam.

HAHNE, H.C., and KROONTJE, W. 1973. Significance of pH and cholride concentration of behavior of heavy metals pollutions: Mercury, Cadmiun, Zinc and Lead J. Envir. Quality. p. 444- 450.

HARGITAÍ, I. 1994. The rol of hidrophility and organophility in the movement of Toxic element in soils. Trans World Soil Sc. Acapulco México.

I.I.T 1965. Estudio sobre el empleo de cloro residual en el tratamiento de las aguas altamente contaminadas del río Bogotá, Informe CAR Santafé de Bogotá.

INGESERIES Ltda. 1991. Informe final del programa de aforo y muestreo en los ríos Bogotá, Ubaté, Suárez y sus afluentes; muestreo a embalse, lagos y lagunas; presentación y transporte de muestras. CAR. Santafé de Bogotá.

INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTIN CODAZZI (IGAC) 1982. Detección de áreas afectadas por sales en el sistema de riego de La Ramada. Municipio de Mosquera Cundinamarca, estudio realizado para la CAR, Santafé de Bogotá.

----- 1992. Estudio detallado de suelos para el área de influencia del distrito de riegos Tocaima –Girardot, Trabajo realizado para la CAR. Santafé de Bogotá Volumen 1°.

INSTITUTO NACIONAL DE ADECUACIÓN DE TIERRAS (INAT), 1992. Estudio de Impacto Ambiental para el Distrito de Riego Tocaima-Girardot. Realizado por Gradex Ingenieria Ltda. p. 56-59.

INTERNATIONAL PROGRAME ON CHEMICAL SAFETY. 1992. Cadmiun Enviromental health criteria vol. . 134. p. 273-280.

KABATA-PENDIAS, A., AND PENDIAS, H. 1992. Trace elements in soils and plants. 2nd edition. CRC press. Boca Ratón. Ann Arbor London Fl.

LECHOCZKY, E. SZABADOS, I. MARTH, P. 1996. Cadmiun content of plant as affected by soil Cadmiun concentration. Soil Science and Plant Analysis. Monticello, N. Y. Marcel Dekker INC. V.27. p. 1765-1777.

LEITA, L. et al, 1993. Response of Leguminosae to Cadmio Exposure Journal of Plant Nutrition, vol 16. p. 2001- 2028.

MARSCHNER, H. 1986 Mineral nutritions of higher plants. Horst. Mraschner Inst of plant nutrition, University of Hochemheim fed Rep Germany, Academic press. London.

MARTINEZ GARZA, A. 1993. Diseño de experimentos con fertilizantes. Simposio de Estadística, Diseño de experimentos. Santafé de Bogotá, junio de 1993.

MCLAUGHLIN, M.J., PALMER, L.T., TILLER, K.G. BEECH, T.A. 1994. Incresed Soil Salinity cause elevated Cadmiun concentrations in Field-Grown potato tubers. IN: Journal of enviromental quality. Wisconsin American Society of Agronomy, sept-oct. V. 23, p. 1013-1018.

Mc GRATH, S. P., and GILLER, K. E. 1994. Long term effect de lands aplication of sewnge sludge: Soil Microorganism. and plant. trans world Soil Sc. Cong. Acapulco, México.

MEJÍA, G. y PANNIZZO, L. 1972. Estudio de la contaminación del río Bogotá. Química industrial. p. 16-33.

MENGEL, K., and KIRKBY A. E. 1982. Principles of plant nutricion. 3ª ed. & International Potasa Institute , Bern , Switzerland. P. 127-140.

MILLER, R.J y KEOPPE, D.E. 1982. Acumulation and fisiological effect of lead in corn. Proc. 4th on trace sustances in Enviroment. Health, Columbia Mo. p. 96-121.

O'NEILL, P.,1995. Heavy Metals in Soils; Arsenic Relationships Soil-Plant. Second Ediction Ed. Blackie Academic Professional, London FI.

OMS. Organización Mundial de la Salud. 1972. Serie de Informaciones técnicas numero 505 Evaluación de Diversos Aditivos Alimentarios y de los Contaminantes Mercurio, Plomo y Cadmio, Informe presentado por los expertos del Comité Mixto. FAO-OMS, en Aditivos Alimentarios. Ginebra Suiza.

PAGE, A.L., BINGHAM, F. T., NELSON, C. 1972. Cadmiun and growth of various plants species as influenced by solutions Cadmiun concentration, Jour Enviroment. Quality. p. 288-291.

RUBIO, M.I. ESCRIG, I. MARTINEZ-CORTINA, C. LOPEZ-BENT, F.J., SANZ, A. 1994. Cadmiun and Nickel accumulation in Rice Plants. Effects on Mineral Nutrition and Possible Interactions of Absciscic and Gibberellic Acids. IN: Plant Growth Regulation. Netherlands Kluwer Academic Publishers. V. 14. P. 151-157.

SALISBURY, F., AND ROSS, C. W. 1994. Fisiología vegetal 4ª ed Nutrición Mineral. pag. 138. Grupo Editorial Iberoamérica México D.F.

SOIL SURVEY STAFF (1999). Soil Taxonomy a basic System of Soil Classification for Making and Interpreting. Soil Surveys. USDA. Natural Resources Conservation Service Second. Edition goret. Printing Offic, Washingtong D.C.

TAYLOR. J.K. 1987. Quality assurance of chemical measurement. Michigan Lewis Publichers p. 496-498.

US. DEPARTAMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES. 1991. Un sistema para la prevención, valoración y control de las exposiciones a sitios peligrosos y sus efectos en la salud. Centro panamericano de ecología humana y la salud y OMS.

VALLE, V. P., 1996. Toxicología de Alimentos Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud; organización Mundial de la Salud (OMS), Metepec, México D.F México p. 155-159.

VARGAS, O. y MEJÍA L.C. 1996. Contaminación por plomo y mercurio en suelos y hortalizas en un sector de la cuenca del río Bogotá. Tesis de grado Maestría Facultad de Agronomía Universidad Nacional de Colombia Santafé de Bogotá.

WHITE, R.E., 1987. Introduction to the principles and practice of Soil Science, 2nd ed., Blackwell Oxford. p. 33-34.

A N E X O S

Tabla de datos originales para la evaluación de Cd y As en arroz con la aplicación de soluciones de concentración conocida (resultados de laboratorio) 1999.

SUELO				ARROZ				TEJIDO FOLIAR			
Laboratorio	Referencia	Arsénico As µg/Kg	Cadmio Cd µg/Kg	Laboratorio	Referencia	Arsénico As µg/Kg	Cadmio Cd µg/Kg	Laboratorio	Su Referencia	Arsénico As µg/Kg	Cadmio Cd µg/Kg
S-232	S-101	2108	1	GARR-328	Oryzica-1-101	643	348	TF-280	TF-101	2760	665
S-233	S-102	2216	1	GARR-329	Oryzica-1-102	1786	469	TF-281	TF-102	2080	770
S-234	S-103	7594	1	GARR-330	Oryzica-1-103	1643	197	TF-282	TF-103	2240	950
S-235	S-104	54	3	GARR-331	Oryzica-1-104	1072	458	TF-283	TF-104	3080	600
S-236	S-105	1343	26	GARR-332	Oryzica-1-105	929	6400	TF-284	TF-105	2280	20500
S-237	S-106	4865	27	GARR-333	Oryzica-1-106	2929	5400	TF-285	TF-106	3200	13300
S-238	S-107	7594	30	GARR-334	Oryzica-1-107	3643	6600	TF-286	TF-107	3600	18200
S-239	S-108	16378	27	GARR-335	Oryzica-1-108	3643	4400	TF-287	TF-108	3240	9400
S-240	S-109	1351	33	GARR-336	Oryzica-1-109	658	7800	TF-288	TF-109	1480	33000
S-241	S-110	4500	32	GARR-337	Oryzica-1-110	2786	6900	TF-289	TF-110	2846	8000
S-242	S-111	7270	28	GARR-338	Oryzica-1-111	3643	5500	TF-290	TF-111	4280	17000
S-243	S-112	7769	28	GARR-339	Oryzica-1-112	3500	3300	TF-291	TF-112	3640	8500
S-244	S-113	2054	60	GARR-340	Oryzica-1-113	786	7000	TF-292	TF-113	1880	16400
S-245	S-114	5800	67	GARR-341	Oryzica-1-114	2215	7500	TF-293	TF-114	3720	10000
S-246	S-115	7405	81	GARR-342	Oryzica-1-115	2929	4000	TF-294	TF-115	3240	10000
S-247	S-116	10351	62	GARR-343	Oryzica-1-116	3643	4000	TF-295	TF-116	3320	8000

SUELO				ARROZ				TEJIDO FOLIAR			
Laboratorio	Referencia	Arsénico As µg/Kg	Cadmio Cd µg/Kg	Laboratorio	Referencia	Arsénico As µg/Kg	Cadmio Cd µg/Kg	Laboratorio	Su Referencia	Arsénico As µg/Kg	Cadmio Cd µg/Kg
S-248	S-201	2540	2	GARR-344	Oryzica-1-201	929	402	TF-296	TF-201	1480	800
S-249	S-202	2540	1	GARR-345	Oryzica-1-202	1786	358	TF-297	TF-202	2000	460
S-250	S-203	7405	1	GARR-346	Oryzica-1-203	1972	196	TF-298	TF-203	1560	600
S-251	S-204	13135	2	GARR-347	Oryzica-1-204	1215	233	TF-299	TF-204	2690	550
S-252	S-205	2000	33	GARR-348	Oryzica-1-205	643	6500	TF-300	TF-205	1600	21000
S-253	S-206	4189	29	GARR-349	Oryzica-1-206	2500	6000	TF-301	TF-206	4120	17600
S-254	S-207	5459	25	GARR-350	Oryzica-1-207	3358	5600	TF-302	TF-207	3640	12800
S-255	S-208	17621	27	GARR-351	Oryzica-1-208	3643	4000	TF-303	TF-208	3560	9000
S-256	S-209	1270	30	GARR-352	Oryzica-1-209	929	9500	TF-304	TF-209	1480	31000
S-257	S-210	4950	31	GARR-353	Oryzica-1-210	2472	7600	TF-305	TF-210	2540	11000
S-258	S-211	6270	25	GARR-354	Oryzica-1-211	3786	5700	TF-306	TF-211	3800	19000
S-259	S-212	7513	28	GARR-355	Oryzica-1-212	3215	3400	TF-307	TF-212	4040	7000
S-260	S-213	1919	63	GARR-356	Oryzica-1-213	643	8000	TF-308	TF-213	2520	13800
S-261	S-214	6702	69	GARR-357	Oryzica-1-214	2315	7200	TF-309	TF-214	3840	11600
S-262	S-215	6973	78	GARR-358	Oryzica-1-215	3643	4100	TF-310	TF-215	4200	8700
S-263	S-216	10162	81	GARR-359	Oryzica-1-216	4072	4600	TF-311	TF-216	4360	10800
S-264	S-301	2243	2	GARR-360	Oryzica-1-301	500	339	TF-312	TF-301	1480	700
S-265	S-302	2648	2	GARR-361	Oryzica-1-302	1072	305	TF-313	TF-302	1800	600

SUELO				ARROZ				TEJIDO FOLIAR			
Laboratorio	Referencia	Arsénico As µg/Kg	Cadmio Cd µg/Kg	Laboratorio	Referencia	Arsénico As µg/Kg	Cadmio Cd µg/Kg	Laboratorio	Su Referencia	Arsénico As µg/Kg	Cadmio Cd µg/Kg
S-266	S-303	6865	2	GARR-362	Oryzica-1-303	1786	217	TF-314	TF-303	1720	610
S-267	S-304	14485	2	GARR-363	Oryzica-1-304	1500	141	TF-315	TF-304	3120	430
S-268	S-305	1297	29	GARR-364	Oryzica-1-305	643	6200	TF-316	TF-305	2760	22000
S-269	S-306	4973	30	GARR-365	Oryzica-1-306	2500	4000	TF-317	TF-306	3080	19000
S-270	S-307	7351	30	GARR-366	Oryzica-1-307	3786	6300	TF-318	TF-307	3160	15000
S-271	S-308	18864	30	GARR-367	Oryzica-1-308	4215	4200	TF-319	TF-308	3160	9500
S-272	S-309	1297	36	GARR-368	Oryzica-1-309	500	8800	TF-320	TF-309	2760	27700
S-273	S-310	4216	33	GARR-369	Oryzica-1-310	2786	7300	TF-321	TF-310	2360	9000
S-274	S-311	5200	28	GARR-370	Oryzica-1-311	3615	5900	TF-322	TF-311	3200	16900
S-275	S-312	7027	29	GARR-371	Oryzica-1-312	3400	3000	TF-323	TF-312	4200	9500
S-276	S-313	1784	65	GARR-372	Oryzica-1-313	786	6000	TF-324	TF-313	2600	15000
S-277	S-314	7351	71	GARR-373	Oryzica-1-314	2115	7300	TF-325	TF-314	4040	9800
S-278	S-315	7920	79	GARR-374	Oryzica-1-315	2500	3600	TF-326	TF-315	3280	11700
S-279	S-316	10730	80	GARR-375	Oryzica-1-316	4358	4000	TF-327	TF-316	2840	9500

Tabla de datos originales para la evaluación de Cd y As en arroz con diferentes volúmenes de riego con aguas del río Bogotá. Ricaurte (Cund.) 1999. Resultados de laboratorio

Obs	Trat.	Rep.	Cd.S ppm	As.S ppb	Cd.G ppb	As.F ppb	Cd.F ppb
1	1	1	1.4	50	480	30	194
2	1	2	1.2	50	245	30	234
3	1	3	1.2	50	196	30	126
4	2	1	1.6	152	254	53	165
5	2	2	1.2	219	148	30	189
6	2	3	2.0	50	150	30	213
7	3	1	2.2	467	130	70	84
8	3	2	1.2	50	192	30	199
9	3	3	1.8	50	169	30	347
10	4	1	1.4	219	96	80	250
11	4	2	1.0	233	129	30	183
12	4	3	1.8	181	139	65	223
13	5	1	1.0	200	73	80	158
14	5	2	1.2	76	99	30	240
15	5	3	0.8	50	23	100	199

Trat : Tratamientos
 Rep : Repeticiones
 CdSpmm : Contenidos de Cadmio en el suelo en partes por millón
 Assppb : Contenidos de Arsénico en el suelo en partes por billón
 CdGppb : Contenidos de Cd en el grano en partes por billón
 AsFppb : Contenidos de Arsénico en el tejido foliar en partes por billón
 CdFppb : contenidos de Cadmio en el tejido foliar en partes por billón

Tabla de datos originales para la evaluación de Cadmio y Arsénico en arroz con diferentes volúmenes de riego con aguas del río Bogotá.
 Variables fisiológicas del experimento de campo.

Obs	Trat.	Rep.	Rend.	Macm2	MacPl	Grapan	AltPl	%Granli	%casc	%GranPul	% Harin	%GranEnt	%GranPart
1	1	1	4282.5	319	6.7	184	123	83.0	17.0	74.7	8.3	67.7	7.0
2	1	2	4725.0	359	5.6	140	122	84.1	15.9	77.4	6.7	71.7	5.7
3	1	3	4842.5	389	5.2	125	124	85.2	14.8	78.2	7.0	67.8	10.4
4	2	1	6997.5	365	5.8	215	127	84.8	15.2	77.1	7.7	69.5	7.6
5	2	2	6847.5	376	6.2	197	123	84.3	15.7	76.2	8.1	68.5	7.7
6	2	3	7165.0	324	5.8	207	124	83.5	16.5	77.3	6.2	67.0	10.3
7	3	1	5527.5	333	5.4	183	126	85.0	15.0	76.3	8.7	67.3	9.0
8	3	2	5687.5	315	6.2	170	127	85.2	14.8	76.0	9.2	70.5	5.5
9	3	3	5707.5	358	5.4	195	130	85.0	15.0	76.8	8.2	67.0	9.8
10	4	1	5355.0	363	7.0	191	128	84.8	15.2	75.7	9.1	71.0	4.1
11	4	2	6350.0	391	7.6	180	131	84.5	15.5	77.7	6.8	67.5	10.2
12	4	3	5187.5	378	6.4	174	128	83.7	16.3	75.0	8.7	69.7	5.3
13	5	1	5395.0	358	6.0	166	132	83.7	16.3	76.5	7.2	68.0	8.5
14	5	2	5262.5	396	5.2	168	134	87.5	12.5	78.5	9.0	70.0	8.5
15	5	3	5120.0	368	5.8	171	135	82.1	17.9	73.8	8.3	69.0	4.8

Trat : Tratamiento
 Rep : Repetición
 Rend : Rendimiento
 Macm2 : Macollas por metro cuadrado

MacPl : Macollas por planta
 Grapan : Granos por panícula
 AltPl : Altura de planta
 %Granli : % de Grano limpio
 %casc : % de cascara

%granPu : % de grano pulido
 %harin : % de Harina
 %granEn : %Grano entero
 %GranPar : % grano partido

Tabla de datos originales para la evaluación de Cd y As en arroz con la aplicación de soluciones de concentración conocida. Variables fisiológicas, experimento de invernadero, 1999.

Obs	Trat.	Cd	As	Rep	hpl	m/pl	P/pl	G/pn	Rend.
1	1	1	1	1	97	6	5	194	7807
2	1	1	1	2	96	6	4	174	7435
3	1	1	1	3	96	7	5	187	8505
4	2	1	2	1	97	5	4	173	7330
5	2	1	2	2	98	5	4	169	7192
6	2	1	2	3	97	7	6	184	7475
7	3	1	3	1	98	5	5	200	8162
8	3	1	3	2	99	6	5	172	7650
9	3	1	3	3	97	4	4	215	7487
10	4	1	4	1	92	6	5	182	8020
11	4	1	4	2	94	5	4	172	7730
12	4	1	4	3	95	5	4	188	7927
13	5	2	1	1	98	6	4	179	7587
14	5	2	1	2	96	6	5	184	7550
15	5	2	1	3	98	7	5	182	7980
16	6	2	2	1	89	5	5	199	8000
17	6	2	2	2	91	5	5	164	7820
18	6	2	2	3	88	6	5	187	8190
19	7	2	3	1	89	4	4	194	8462
20	7	2	3	2	91	5	5	200	8837
21	7	2	3	3	92	6	6	193	8495
22	8	2	4	1	94	5	5	145	6545
23	8	2	4	2	95	4	3	182	6995
24	8	2	4	3	93	5	4	189	7075
25	9	3	1	1	88	8	7	166	6257
26	9	3	1	2	90	4	4	164	6300
27	9	3	1	3	88	4	4	172	6307
28	10	3	2	1	84	4	4	168	7095
29	10	3	2	2	86	5	4	165	6872
30	10	3	2	3	85	6	5	170	7067
31	11	3	3	1	86	6	5	170	6000
32	11	3	3	2	85	4	3	162	6652
33	11	3	3	3	83	4	4	173	6650
34	12	3	4	1	74	4	3	157	5700
35	12	3	4	2	75	3	3	140	5985
36	12	3	4	3	76	4	4	160	5552
37	13	4	1	1	78	4	3	176	6125
38	13	4	1	2	78	8	7	171	6650
39	13	4	1	3	76	4	3	165	6212
40	14	4	2	1	75	5	5	189	5250
41	14	4	2	2	76	4	4	159	5777
42	14	4	2	3	73	4	4	183	5387
43	15	4	3	1	72	5	4	158	5235
44	15	4	3	2	70	6	5	165	5387
45	15	4	3	3	76	5	4	169	5512
46	16	4	4	1	64	6	4	125	3937
47	16	4	4	2	62	6	5	135	4052
48	16	4	4	3	63	4	4	145	3835

hpl : Altura de planta
M/pl : Macollas por planta
P/pl : Panículas por planta

G/pn : Granos por panícula
Rend: Rendimiento