

EFFECTO DEL SULFATO DE CADMIO EN LA GERMINACIÓN Y EL CRECIMIENTO DE PLÁNTULAS DE CACAO (*Theobroma cacao* L.)Alain Acosta¹

Recepción: 13 de mayo de 2014

Aceptado: 16 de noviembre de 2014

Resumen

Se evaluó el efecto del cadmio en la germinación de semillas, morfología de plántulas y concentración de cadmio en la biomasa de tres variedades de cacao (*Theobroma cacao* L.) Colección Mendis Paredes-99 (CMP-99), Colección Mendis Paredes-15 (CMP-15), Colección Castro Naranjal-51 (CCN-51), con tratamientos de T₀ (testigo), T₁ (50 ppm), T₂ (100 ppm), T₃ (150 ppm), T₄ (200 ppm) y T₅ (250 ppm) bajo la forma de sulfato de cadmio, analizados con el diseño estadístico completamente al azar, con tres repeticiones. En el porcentaje de germinación y poder germinativo no se observaron efectos causados por la inoculación de cadmio, siendo la variedad CCN-51 quien obtuvo un mayor porcentaje de germinación en los tratamientos; en la morfología de plántulas el cadmio causó daños anatómicos en el tamaño de semillas cotiledóneas, altura de semillas cotiledóneas, tamaño de hojas, color de hojas, longitud de radícula, longitud de talluelo y tamaño de hojas, existiendo diferencias significativas entre tratamientos, siendo el T₄ y T₅ quienes causaron mayores efectos en las tres variedades, comparados con el tratamiento testigo. El cacao absorbe, transloca y acumula al cadmio en toda la plántula, observándose una mayor concentración en la variedad CMP-99, seguida de las variedades CMP-15 y CCN-51, existiendo diferencias significativas entre tratamientos, observándose mayor acumulación de cadmio en plántulas tratadas con el T₅.

Palabras clave: Cadmio, cacao, germinación, morfología, plántula.**Abstract**

Were evaluated the effect of cadmium on seed germination, seedling morphology and cadmium concentration in the biomass of three cocoa varieties (*Theobroma cacao* L.) Collection Mendis Paredes-99 (CMP-99), Collection Mendis Paredes-15 (CMP-15), Collection Castro Naranjal-51 (CCN-51), with treatment of T₀ (testing), T₁ (50 ppm), T₂ (100 ppm), T₃ (150 ppm), T₄ (200 ppm) y T₅ (250 ppm) in the form of cadmium sulfate, analyzed using completely randomized statistical design, with three replications. In the germination percentage and the germinative power were observed no effects caused by cadmium inoculation, being the CCN-51 variety who obtained a higher percentage of germination in the treatments; in the seedlings morphology cadmium caused anatomical damage in cotyledons seed size, seed cotyledons height, leaf size, color of leaves, radicle length, damping-off length and size of leaves, significant differences between treatments, T₄ and T₅ being who caused greater effect on the three varieties, compared with the control treatment. The cocoa absorbed cadmium accumulates and translocate throughout the seedling, with a greater concentration in the range CMP-99, followed by the CMP-15 and CCN-51 varieties, significant differences between treatments, showing higher cadmium accumulation in seedlings treated with T₅.

Key words: Cadmium, cocoa, germination, morphology, seedling.

¹ Tesista de Ingeniería Ambiental – Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS) – Tingo María, Perú - E mail: alainacostajara@gmail.com

Introducción

La producción del cacao en el departamento de Huánuco, principalmente en nuestra zona, es uno de los productos con mayor acogida por el mercado nacional e internacional, por su producción en grano y sus derivados, considerado como cultivo alternativo para el desarrollo del Alto Huallaga y alternativo al cultivo de la coca.

Con una tendencia de exportación como materia prima entre el 70% y 80%; las exportaciones se ven afectadas por la presencia de cadmio en las semillas, requiriéndose en el mercado internacional semillas de cacao con concentraciones máximas entre 0,3 a 0,5 ppm (UUEE y EEUU), estas concentraciones causan problemas a la salud por su alto grado de acumulación.

Dichas concentraciones se encuentran ligadas a la presencia del metal en el suelo, en forma natural, por la fertilización fosfática, por la aplicación de abonos de estiércol, o por efluentes que contienen residuos líquidos y sólidos de plantas hidrometalúrgicas, las plantas del cacao absorben ligeramente el cadmio presente en dichos suelos, los mismos que, tienden a concentrarlas en sus semillas grasosas.

En nuestra zona no se encuentran datos sobre la tolerancia del cacao a concentraciones de cadmio en la etapa inicial de desarrollo, como es la germinación de semillas y el crecimiento de plántulas.

Para el presente trabajo se plantearon los siguientes objetivos: determinar el efecto de las concentraciones de sulfato de cadmio en el porcentaje de germinación de *T. cacao* L., determinar el efecto de las concentraciones de sulfato de cadmio en la morfología de plántulas de *T. cacao* L. y determinar la concentración de cadmio en las plántulas de *T. cacao* L.

Materiales y métodos

Lugar de ejecución

El trabajo de investigación se desarrolló en el laboratorio de Ecología, en la Facultad de Recursos Naturales Renovables de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, políticamente ubicado en la ciudad de Tingo María, distrito de Rupa Rupa, provincia de Leoncio Prado, departamento de Huánuco.

Colección y selección de semillas

Se realizó un muestreo de tres variedades de semillas de cacao, CMP-99 (Colección Mendis Paredes), CMP-15 (Colección Mendis Paredes) y CCN-51 (Colección Castro Naranjal), por variedad se colectó 800 semillas haciendo un total de 2400 semillas, las semillas se colectaron en el Fundo La Alborada, ubicado en Castillo Grande, distrito de

Rupa Rupa, provincia de Leoncio Prado, región de Huánuco.

Ejecución del experimento

a. Porcentaje de germinación

Se registró el porcentaje germinación de semillas de las tres variedades de cacao con sus tratamientos, a partir del segundo día de sembrío y cada dos días, hasta el final de la investigación.

b. Poder germinativo

Se evaluó el poder germinativo en el sustrato de arena; registrando los porcentajes de germinación durante la germinación total en los días de incubación.

c. Evaluaciones morfológicas de semillas expuestas a concentraciones de sulfato de cadmio

De cada variedad se evaluó aleatoriamente 4 semillas germinadas por cada tratamiento, registrando los siguientes datos del aspecto general de la planta:

- Tamaño.
- Peso fresco y peso seco.
- Forma de la testa.
- Altura de cotiledón.
- Color.

d. Evaluaciones morfológicas de plántulas

De cada variedad se evaluó aleatoriamente 4 semillas germinadas por cada tratamiento y repetición, registrando los siguientes datos del aspecto general de la plántula:

- Pubescencia (1) Nada, (2) Escasa y (3) Abundante.
- Hojas:
- Tamaño: (1) Grandes, (2) Normales y (3) Pequeñas.
- Aspecto: (1) Achaparrado, (2) Roseta y (3) Normal.
- Color: verde oscuro, clorosis, verde azulado, bronceado.
- Necrosis: Ausencia y Presencia.

e. Longitud de radícula

Se registró el alargamiento de la radícula (mm), de cada variedad evaluándose aleatoriamente 4 plántulas por tratamiento y repetición, como un posible efecto tóxico.

f. Longitud de talluelo

Se registró la altura de los tallos (mm) alcanzados en el crecimiento de plántulas; midiéndolo desde la base del tallo de la plántula hasta la yema terminal, de cada variedad se evaluó aleatoriamente 4 plántulas por cada tratamiento y repetición, como un posible efecto tóxico.

g. Tamaño de hojas cotiledóneas

Se registró el largo (mm) y ancho (mm) de las hojas cotiledóneas de plántulas, de cada variedad se evaluó aleatoriamente 4 plántulas por cada tratamiento y repetición, como un posible efecto toxico.

h. Diámetro de talluelo

Se registró el diámetro del talluelo (mm) alcanzados en el crecimiento de plántulas, de cada variedad se evaluó aleatoriamente 4 plántulas por cada tratamiento.

i. Concentración de cadmio en plántulas

Se registró las concentraciones de cadmio en plántulas, empleando aleatoriamente 5 plántulas por variedad y tratamiento, analizándolos por Espectrofotómetro de Absorción Atómica.

Resultados

a. Efecto del cadmio en la morfología de las plántulas de cacao

a.1. Porcentaje de germinación

La primera respuesta bajo estudio se refiere a la germinación de semillas a diferentes concentraciones de sulfato de cadmio (Cuadro 1).

Cuadro 1. Porcentaje de germinación de *T. cacao* L. en presencia de sulfato de cadmio a diferentes concentraciones

Variedad	Tratamiento	Inicio de germinación (días)	Término de germinación (días)	Resultado de germinación (%)
CMP-99	T ₀	9	22	98,33 ± 1,66 ^a
	T ₁	9	22	98,33 ± 1,66 ^a
	T ₂	8	21	98,33 ± 1,66 ^a
	T ₃	8	22	91,67 ± 1,66 ^a
	T ₄	9	22	91,67 ± 3,33 ^a
	T ₅	8	22	98,33 ± 1,66 ^a
CMP-15	T ₀	9	22	96,67 ± 1,66 ^{ab}
	T ₁	9	20	98,33 ± 1,66 ^{ab}
	T ₂	9	21	98,33 ± 1,66 ^{ab}
	T ₃	8	21	95,00 ^a
	T ₄	8	21	98,33 ± 1,66 ^{ab}
	T ₅	9	22	100,00 ^b
CCN-51	T ₀	8	21	98,33 ± 1,66 ^a
	T ₁	9	19	100,00 ^a
	T ₂	8	22	98,33 ± 1,66 ^a
	T ₃	8	21	100,00 ^a
	T ₄	9	21	100,00 ^a
	T ₅	8	22	100,00 ^a

T₀: Testigo; T₁: 50 ppm CdSO₄; T₂: 100 ppm CdSO₄; T₃: 150 ppm CdSO₄; T₄: 200 ppm CdSO₄; T₅: 250 ppm CdSO₄
 Letras iguales, indica promedios iguales. Duncan al 5%.

En las Figuras 1, 2 y 3 se grafica el tiempo de germinación por cada variedad en estudio (CMP-99, CMP-15 y CCN-51).

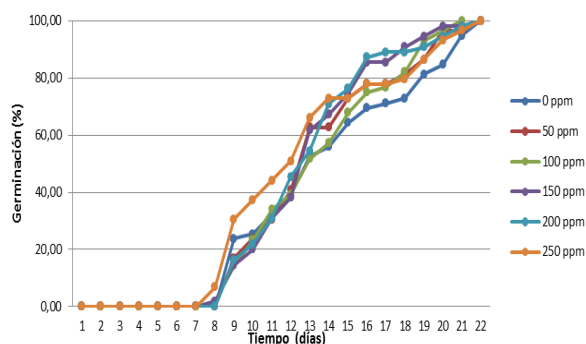


Figura 1. Porcentaje de la germinación de la variedad CMP-99

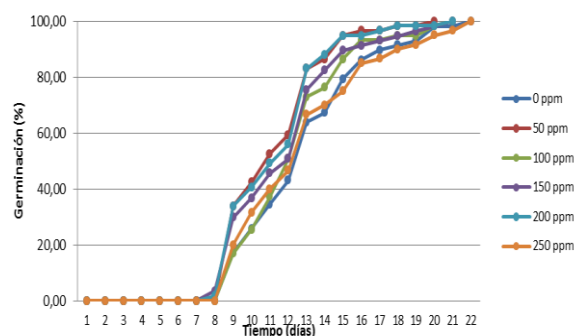


Figura 2. Porcentaje de la germinación de la variedad CMP-15

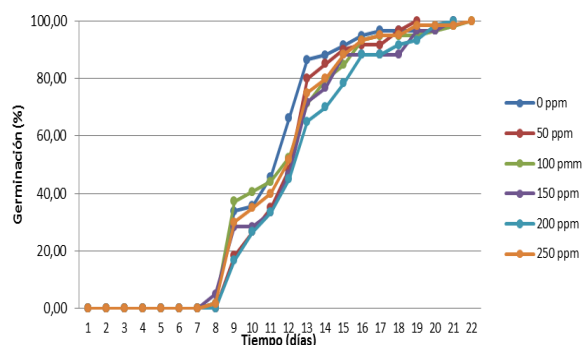


Figura 3. Porcentaje de la germinación de la variedad CCN-51

Cuadro 2. ANOVA del porcentaje de germinación de *T. cacao* L. en presencia de sulfato de cadmio a diferentes concentraciones

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Porcentaje de germinación (CMP-99)	Inter-grupos	173,611	5	34,722	2,778	,068
	Intra-grupos	150,000	12	12,500		
	Total	323,611	17			
Porcentaje de germinación (CMP-15)	Inter-grupos	44,444	5	8,889	1,600	,234
	Intra-grupos	66,667	12	5,556		
	Total	111,111	17			
Porcentaje de germinación (CCN-51)	Inter-grupos	11,111	5	2,222	,800	,571
	Intra-grupos	33,333	12	2,778		
	Total	44,444	17			

a.2. Poder germinativo

En el Cuadro 3 observamos los valores obtenidos para el poder germinativo de las tres variedades de cacao a diferentes concentraciones de sulfato de cadmio.

Cuadro 3. Poder germinativo de *T. cacao* L. en presencia de sulfato de cadmio a diferentes concentraciones

Tratamiento	Poder Germinativo CMP-99 (%)	Poder Germinativo CMP-15 (%)	Poder Germinativo CCN-51 (%)
T ₀	98,33 ± 1,66 ^a	96,67 ± 1,66 ^{ab}	98,33 ± 1,66 ^a
T ₁	98,33 ± 1,66 ^a	98,33 ± 1,66 ^{ab}	100,00 ^a
T ₂	98,33 ± 1,66 ^a	98,33 ± 1,66 ^{ab}	98,33 ± 1,66 ^a
T ₃	91,67 ± 1,66 ^a	95,00 ^a	100,00 ^a
T ₄	91,67 ± 3,33 ^a	98,33 ± 1,66 ^{ab}	100,00 ^a
T ₅	98,33 ± 1,66 ^a	100,00 ^b	100,00 ^a

T₀: Testigo; T₁: 50 ppm CdSO₄; T₂: 100 ppm CdSO₄; T₃: 150 ppm CdSO₄; T₄: 200 ppm CdSO₄; T₅: 250 ppm CdSO₄. Letras iguales, indica promedios iguales. Duncan al 5%.

En la Figura 4 se muestra la gráfica de los resultados del Cuadro 3.

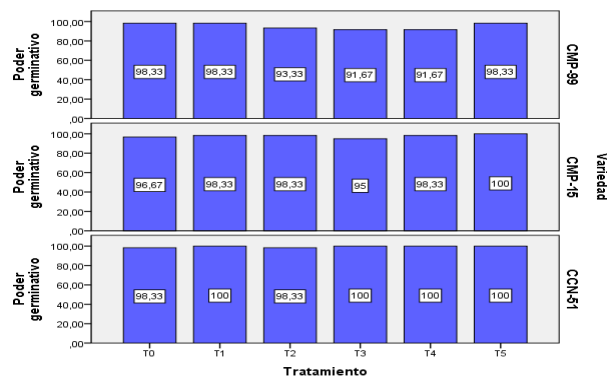


Figura 4. Gráfico de poder germinativo por variedad y tratamiento

Se presenta en el Cuadro 4 los resultados obtenidos mediante el estadístico ANOVA, a un nivel de significación de α = 0,05.

Cuadro 4. ANOVA del poder germinativo de *T. cacao* L. en presencia de sulfato de cadmio a diferentes concentraciones

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Poder germinativo (CMP-99)	Inter-grupos	173,611	5	34,722	2,778	,068
	Intra-grupos	150,000	12	12,500		
	Total	323,611	17			
Poder germinativo (CMP-15)	Inter-grupos	44,444	5	8,889	1,600	,234
	Intra-grupos	66,667	12	5,556		
	Total	111,111	17			
Poder germinativo (CCN-51)	Inter-grupos	11,111	5	2,222	,800	,571
	Intra-grupos	33,333	12	2,778		
	Total	44,444	17			

b. Efecto del cadmio en la morfología de las plántulas de cacao

b.1. Semillas

Altura de cotiledón

En el Cuadro 5 observamos los valores obtenidos para altura de cotiledones de las tres variedades de cacao a diferentes concentraciones de sulfato de cadmio.

Cuadro 5. Altura de cotiledón (mm) de las variedades CMP-99, CMP-15, CCN-51

	CMP-99	CMP-15	CCN-51
T ₀	79,91 ± 6,41 ^a	103,37 ± 1,68 ^a	114,52 ± 6,94 ^a
T ₁	78,88 ± 4,52 ^a	98,56 ± 2,04 ^{ab}	106,80 ± 5,99 ^{ab}
T ₂	78,77 ± 5,32 ^a	91,14 ± 1,61 ^{bc}	105,97 ± 4,00 ^{abc}
T ₃	77,94 ± 6,22 ^a	89,34 ± 4,10 ^{bc}	99,16 ± 4,86 ^{bc}
T ₄	60,97 ± 2,18 ^a	86,03 ± 3,65 ^{cd}	93,34 ± 1,32 ^{bc}
T ₅	59,70 ± 9,30 ^a	76,48 ± 6,12 ^d	85,32 ± 7,12 ^c

T₀: Testigo; T₁: 50 ppm CdSO₄; T₂: 100 ppm CdSO₄; T₃: 150 ppm CdSO₄; T₄: 200 ppm CdSO₄; T₅: 250 ppm CdSO₄. Letras iguales, indica promedios iguales. Duncan al 5%.

Cuadro 6. ANOVA de la altura de cotiledón (mm) de *T. cacao* L. en presencia de sulfato de cadmio a diferentes concentraciones

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
CMP-99 Altura de cotiledón (mm)	Inter-grupos	1294,248	5	258,850	2,352	,104
	Intra-grupos	1320,536	12	110,045		
	Total	2614,784	17			
CMP-15 Altura de cotiledón (mm)	Inter-grupos	1345,290	5	269,058	6,961	,003
	Intra-grupos	463,803	12	38,650		
	Total	1809,092	17			
CCN-51 Altura de cotiledón (mm)	Inter-grupos	1647,382	5	329,476	3,732	,029
	Intra-grupos	1059,308	12	88,276		
	Total	2706,691	17			

b.2. Plántulas

Tamaño de hojas

En el Cuadro 7, 8 y 9 se presentan los resultados obtenidos mediante la prueba de Chi-cuadrado para el tamaño de hojas.

Cuadro 7. Prueba de chi-cuadrado para el tamaño de hoja CMP-99

		Valor	gl	Sig. asintótica (bilateral)
Chi-cuadrado de Pearson	de	20,343 ^a	10	,026
Razón de verosimilitudes	de	23,939	10	,008
Asociación lineal por lineal	por	12,434	1	,000
N de casos válidos		18		

a. 18 casillas (100,0%) tienen una frecuencia esperada inferior a 5. La frecuencia mínima esperada es ,83.

Cuadro 8. Prueba de chi-cuadrado para el tamaño de hoja CMP-15

		Valor	gl	Sig. asintótica (bilateral)
Chi-cuadrado de Pearson	de	31,500 ^a	10	,000
Razón de verosimilitudes	de	34,372	10	,000
Asociación lineal por lineal	por	14,605	1	,000
N de casos válidos		18		

a. 18 casillas (100,0%) tienen una frecuencia esperada inferior a 5. La frecuencia mínima esperada es ,67.

Cuadro 9. Prueba de chi-cuadrado para el tamaño de hoja CCN-51

		Valor	gl	Sig. asintótica (bilateral)
Chi-cuadrado de Pearson		24,109 ^a	10	,007
Razón de verosimilitudes		24,795	10	,006
Asociación lineal por lineal		11,667	1	,001
N de casos válidos		18		

a. 18 casillas (100,0%) tienen una frecuencia esperada inferior a 5. La frecuencia mínima esperada es ,33.

En la Figura 5 se presenta la representación gráfica de los resultados obtenidos para el tamaño de hojas de las tres variedades de cacao

a diferentes concentraciones de sulfato de cadmio.

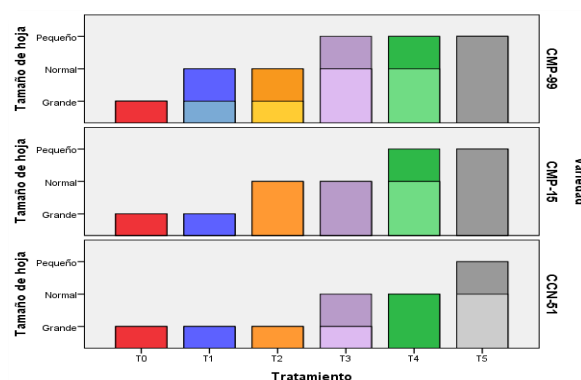


Figura 5. Tamaño de hojas para las variedades CMP-99, CMP-15 y CCN-51

Aspecto de hojas

En el Cuadro 10, 11 y 12 se presentan los resultados obtenidos mediante la prueba de Chi-cuadrado para el aspecto de hojas.

Cuadro 10. Prueba de chi-cuadrado para el tamaño de hoja CMP-99

		Valor	gl	Sig. asintótica (bilateral)
Chi-cuadrado de Pearson		31,201 ^a	10	,001
Razón de verosimilitudes		29,068	10	,001
Asociación lineal por lineal		7,185	1	,007
N de casos válidos		72		

a. 12 casillas (66,7%) tienen una frecuencia esperada inferior a 5. La frecuencia mínima esperada es 1,00.

Cuadro 11. Prueba de chi-cuadrado para el aspecto de hojas CMP-15

		Valor	gl	Sig. asintótica (bilateral)
Chi-cuadrado de Pearson		30,615 ^a	10	,001
Razón de verosimilitudes		29,949	10	,001
Asociación lineal por lineal		15,053	1	,000
N de casos válidos		72		

a. 12 casillas (66,7%) tienen una frecuencia esperada inferior a 5. La frecuencia mínima esperada es ,33.

Cuadro 12. Prueba de chi-cuadrado para el aspecto de hojas CCN-51

		Valor	gl	Sig. asintótica (bilateral)
Chi-cuadrado de Pearson		25,252 ^a	5	,000
Razón de verosimilitudes		24,214	5	,000
Asociación lineal por lineal		6,673	1	,010
N de casos válidos		72		

a. 6 casillas (50,0%) tienen una frecuencia esperada inferior a 5. La frecuencia mínima esperada es 2,17.

En la Figura 6, 7 y 8 se presentan los gráficos de los resultados obtenidos para el aspecto de hojas.

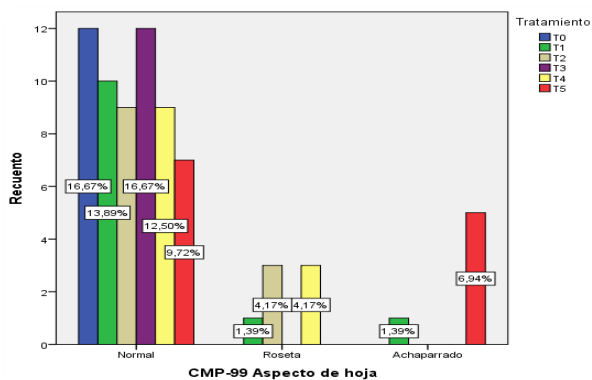


Figura 6. Aspecto de hojas para la variedad CMP-99 en presencia de sulfato de cadmio

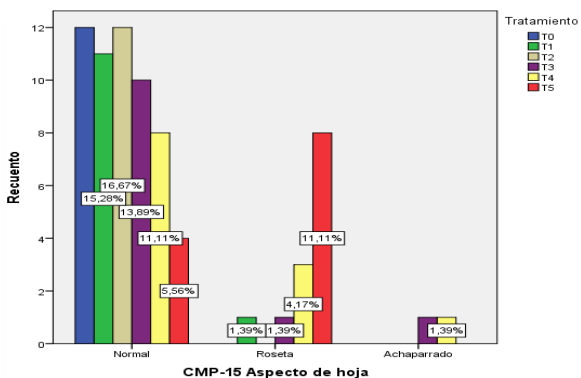


Figura 7. Aspecto de hojas para la variedad CMP-15 en presencia de sulfato de cadmio

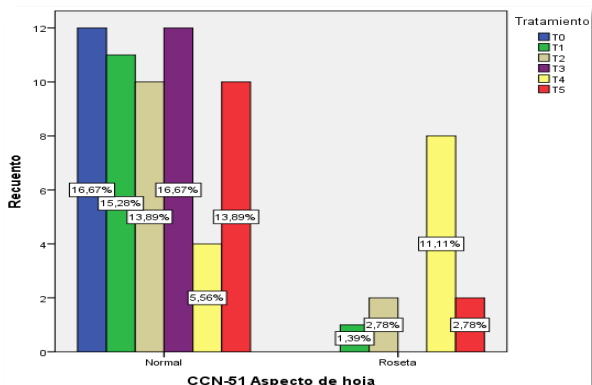


Figura 8. Aspecto de hojas para la variedad CCN-51 en presencia de sulfato de cadmio

Color de hojas

En el Cuadro 13, 14 y 15 se presentan los resultados obtenidos mediante la prueba de Chi-cuadrado para el aspecto de hojas.

Cuadro 13. Prueba de chi-cuadrado para el color de hojas CMP-99

	Valor	gl	Sig. asintótica (bilateral)
Chi-cuadrado de Pearson	13,471 ^a	5	,019
Razón de verosimilitudes	16,657	5	,005
Asociación lineal por lineal	8,834	1	,003
N de casos válidos	72		

a. 6 casillas (50,0%) tienen una frecuencia esperada inferior a 5. La frecuencia mínima esperada es 1,67.

Cuadro 14. Prueba de chi-cuadrado para el color de hojas CMP-15

	Valor	gl	Sig. asintótica (bilateral)
Chi-cuadrado de Pearson	6,983 ^a	5	,222
Razón de verosimilitudes	7,931	5	,160
Asociación lineal por lineal	3,989	1	,046
N de casos válidos	72		

a. 6 casillas (50,0%) tienen una frecuencia esperada inferior a 5. La frecuencia mínima esperada es 4,33.

Cuadro 15. Prueba de chi-cuadrado para el color de hojas CCN-51

	Valor	gl	Sig. asintótica (bilateral)
Chi-cuadrado de Pearson	10,286 ^a	5	,068
Razón de verosimilitudes	11,714	5	,039
Asociación lineal por lineal	7,824	1	,005
N de casos válidos	72		

a. 6 casillas (50,0%) tienen una frecuencia esperada inferior a 5. La frecuencia mínima esperada es 1,50.

En la Figura 9, 10 y 11 se presentan los gráficos para el color de hojas.

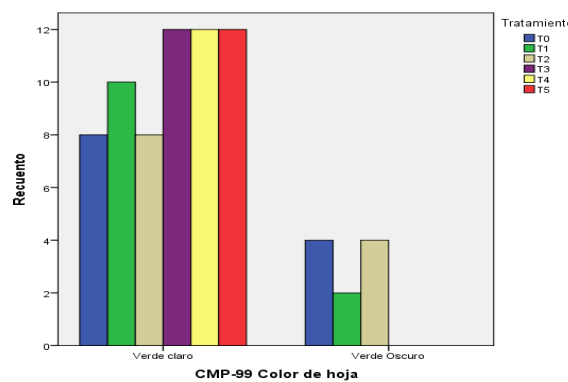


Figura 9. Color de hojas para la variedad CMP-99 en presencia de sulfato de cadmio

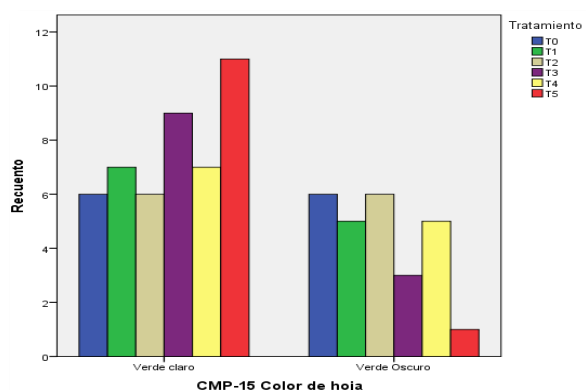


Figura 10. Color de hojas variedad CMP-15 en presencia de sulfato de cadmio

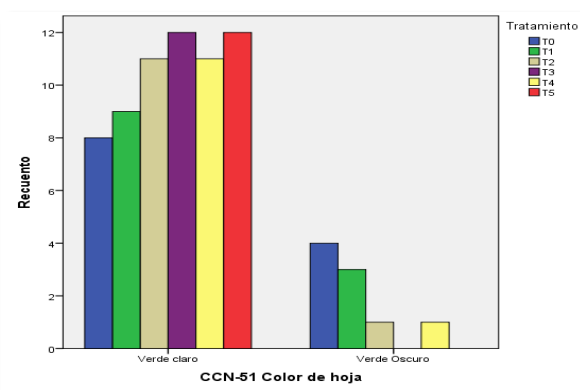


Figura 11. Color de hojas variedad CCN-51 en presencia de sulfato de cadmio

Órganos de la plántula

En el Cuadro 16 se observa los valores obtenidos para la longitud de radícula, longitud de talluelo, largo y ancho de hojas cotiledones y diámetro de

talluelo de las tres variedades de cacao a diferentes concentraciones de sulfato de cadmio.

Se presenta en el Cuadro 17 los resultados obtenidos mediante el estadístico ANOVA, a un nivel de significación de $\alpha = 0,05$.

Cuadro 16. Longitud de radícula, longitud de talluelo, largo y ancho de hojas cotiledones y diámetro de talluelo de las variedades CMP-99, CMP-15 y CCN-51

		CMP-99	CMP-15	CCN-51
Longitud de radícula (mm)	T ₀	64,07 ± 2,30 ^a	77,94 ± 2,63 ^a	88,62 ± 6,35 ^a
	T ₁	61,59 ± 0,76 ^a	67,01 ± 3,82 ^a	88,04 ± 3,02 ^a
	T ₂	60,76 ± 12,26 ^a	66,96 ± 5,83 ^a	78,46 ± 6,99 ^a
	T ₃	62,90 ± 2,99 ^a	68,82 ± 8,66 ^a	75,01 ± 10,32 ^a
	T ₄	60,23 ± 4,83 ^a	66,45 ± 2,52 ^a	76,22 ± 12,15 ^a
	T ₅	55,28 ± 5,04 ^a	66,07 ± 1,45 ^a	69,31 ± 0,72 ^a
Longitud de talluelo (mm)	T ₀	247,48 ± 3,80 ^a	274,37 ± 8,83 ^a	302,74 ± 3,36 ^a
	T ₁	218,21 ± 7,18 ^b	259,34 ± 10,65 ^{ab}	301,96 ± 6,79 ^a
	T ₂	197,25 ± 1,87 ^c	260,59 ± 4,98 ^{ab}	251,74 ± 16,72 ^{bc}
	T ₃	202,91 ± 9,98 ^{bc}	221,27 ± 6,76 ^c	277,50 ± 18,48 ^{bc}
	T ₄	173,39 ± 5,37 ^d	234,27 ± 2,82 ^{bc}	234,65 ± 26,55 ^c
	T ₅	142,34 ± 6,15 ^e	181,18 ± 16,06 ^d	236,21 ± 10,83 ^c
Largo de hojas cotiledóneas (mm)	T ₀	125,14 ± 6,27 ^a	119,19 ± 3,66 ^a	117,87 ± 2,99 ^a
	T ₁	79,58 ± 11,50 ^{bc}	109,19 ± 5,76 ^a	98,83 ± 9,08 ^{ab}
	T ₂	82,81 ± 9,09 ^b	114,70 ± 4,42 ^a	84,80 ± 8,29 ^b
	T ₃	64,63 ± 7,70 ^{bc}	81,10 ± 12,88 ^b	88,06 ± 5,18 ^b
	T ₄	55,67 ± 8,96 ^c	93,20 ± 8,45 ^{ab}	59,33 ± 7,68 ^c
	T ₅	27,69 ± 5,16 ^d	43,84 ± 12,56 ^c	54,71 ± 10,07 ^c
Ancho de hojas cotiledóneas (mm)	T ₀	44,39 ± 1,63 ^a	43,79 ± 1,18 ^a	49,55 ± 1,39 ^a
	T ₁	30,06 ± 4,74 ^b	41,93 ± 2,16 ^a	40,84 ± 3,81 ^{ab}
	T ₂	30,34 ± 3,44 ^b	41,12 ± 1,85 ^a	36,17 ± 3,52 ^b
	T ₃	24,46 ± 3,35 ^b	29,77 ± 5,39 ^b	37,09 ± 2,26 ^b
	T ₄	23,44 ± 3,99 ^b	36,86 ± 3,26 ^{ab}	24,40 ± 3,02 ^c
	T ₅	9,68 ± 1,77 ^c	15,66 ± 4,54 ^c	22,11 ± 4,62 ^c
Diámetro de talluelo (mm)	T ₀	4,10 ± 0,12 ^a	4,21 ± 0,30 ^a	4,07 ± 0,09 ^a
	T ₁	4,13 ± 0,23 ^a	4,23 ± 0,32 ^a	4,28 ± 0,08 ^a
	T ₂	4,33 ± 0,28 ^a	4,28 ± 0,01 ^a	4,30 ± 0,15 ^a
	T ₃	4,40 ± 0,13 ^a	4,32 ± 0,35 ^a	4,31 ± 0,46 ^a
	T ₄	4,47 ± 0,46 ^a	4,41 ± 0,07 ^a	4,44 ± 0,05 ^a
	T ₅	4,76 ± 1,26 ^a	5,60 ± 0,37 ^b	4,53 ± 0,08 ^a

T₀: Testigo; T₁: 50 ppm CdSO₄; T₂: 100 ppm CdSO₄; T₃: 150 ppm CdSO₄; T₄: 200 ppm CdSO₄; T₅: 250 ppm CdSO₄

Letras iguales, indica promedios iguales. Duncan al 5%.

Cuadro 17. ANOVA de la longitud de radícula, longitud de talluelo, largo y ancho de hojas cotiledones y diámetro de talluelo de *T. cacao* L. en presencia de sulfato de cadmio

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.	
Longitud de radícula (mm)	CMP-99	Inter-grupos	139,476	5	27,895	,260	,926
		Intra-grupos	1285,217	12	107,101		
		Total	1424,693	17			
	CMP-15	Inter-grupos	309,082	5	61,816	,888	,518
		Intra-grupos	835,022	12	69,585		
		Total	1144,104	17			
	CCN-51	Inter-grupos	874,998	5	175,000	,991	,463
		Intra-grupos	2119,899	12	176,658		
		Total	2994,897	17			
Longitud de talluelo (mm)	CMP-99	Inter-grupos	19733,690	5	3946,738	33,454	,000
		Intra-grupos	1415,721	12	117,977		
		Total	21149,411	17			
	CMP-15	Inter-grupos	17425,816	5	3485,163	13,195	,000
		Intra-grupos	3169,558	12	264,130		
		Total	20595,374	17			
	CCN-51	Inter-grupos	14506,205	5	2901,241	3,865	,026
		Intra-grupos	9007,768	12	750,647		
		Total	23513,972	17			
Largo de hojas cotiledóneas (mm)	CMP-99	Inter-grupos	63366,079	5	12673,216	15,063	,000
		Intra-grupos	55528,601	66	841,342		
		Total	118894,680	71			
	CMP-15	Inter-grupos	47704,368	5	9540,874	10,333	,000
		Intra-grupos	60941,845	66	923,361		
		Total	108646,213	71			
	CCN-51	Inter-grupos	34211,413	5	6842,283	9,839	,000
		Intra-grupos	45898,610	66	695,433		
		Total	80110,023	71			
Ancho de hojas cotiledóneas (mm)	CMP-99	Inter-grupos	7701,876	5	1540,375	11,417	,000
		Intra-grupos	8904,338	66	134,914		
		Total	16606,214	71			
	CMP-15	Inter-grupos	6809,556	5	1361,911	9,726	,000
		Intra-grupos	9241,557	66	140,024		
		Total	16051,113	71			
	CCN-51	Inter-grupos	6363,634	5	1272,727	9,861	,000
		Intra-grupos	8518,657	66	129,071		
		Total	14882,291	71			
Diámetro de talluelo (mm)	CMP-99	Inter-grupos	,883	5	,177	,467	,794
		Intra-grupos	4,538	12	,378		
		Total	5,421	17			
	CCN-51	Inter-grupos	4,539	5	,908	3,829	,026
		Intra-grupos	2,845	12	,237		
		Total	7,383	17			
	CCN-51	Inter-grupos	,363	5	,073	,538	,744
		Intra-grupos	1,618	12	,135		
		Total	1,981	17			

b.3. Concentración de cadmio en plántulas *T. cacao* L. expuestas a diferentes concentraciones de sulfato de cadmio

En el Cuadro 18 se observa los valores obtenidos para las concentraciones de cadmio en plántulas.

Cuadro 18. Concentraciones de cadmio (ppm) en plántulas de las variedades CMP-99, CMP-15 y CCN-51

Concentraciones de cadmio (ppm)	CMP-99	CMP-15	CCN-51
	T ₀	4,02 ± 0,08 ^a	4,97 ± 0,06 ^a
T ₁	8,29 ± 0,02 ^b	10,52 ± 0,08 ^b	6,25 ± 0,06 ^b
T ₂	11,65 ± 0,00 ^c	15,73 ± 0,81 ^c	12,38 ± 0,46 ^c
T ₃	20,83 ± 0,35 ^d	14,78 ± 0,83 ^{cd}	10,06 ± 0,01 ^d
T ₄	15,03 ± 0,15 ^e	16,94 ± 0,54 ^d	12,37 ± 0,04 ^c
T ₅	40,69 ± 0,06 ^f	17,02 ± 0,52 ^d	19,69 ± 0,41 ^e

T₀: Testigo; T₁: 50 ppm CdSO₄; T₂: 100 ppm CdSO₄; T₃: 150 ppm CdSO₄; T₄: 200 ppm CdSO₄; T₅: 250 ppm CdSO₄
 Letras iguales, indica promedios iguales. Duncan al 5%.

Cuadro 19. ANOVA de la concentración de cadmio (ppm) en plántulas de *T. cacao* L. a diferentes concentraciones

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
CMP-99 Concentración de cadmio (ppm)	Inter-grupos	2557,415	5	511,483	6304,927	,000
	Intra-grupos	,973	12	,081		
	Total	2558,389	17			
CMP-15 Concentración de cadmio (ppm)	Inter-grupos	337,116	5	67,423	69,215	,000
	Intra-grupos	11,689	12	,974		
	Total	348,805	17			
CCN-51 Concentración de cadmio (ppm)	Inter-grupos	450,545	5	90,109	222,723	,000
	Intra-grupos	4,855	12	,405		
	Total	455,400	17			

Discusión

a. Porcentaje de germinación y energía germinativa de *T. cacao* L. expuestas a diferentes concentraciones de sulfato de cadmio

La germinación del cacao en las tres variedades varía entre 96,67% y 98,33% para el tratamiento testigo, este resultado se compara a investigaciones realizadas en cinco variedades de cacao en un rango de 90% a 95%, obteniéndose un porcentaje germinación mayor al estudiado en experimentos similares (1), el porcentaje de germinación de semillas es importante debido a que indica la proporción de semillas capaces de germinar y desarrollarse; siendo un factor importante el vigor de la semilla que viene a ser la suma de propiedades que determinan el nivel de actividad y desempeño de la semilla durante la germinación y emergencia de la plántula (2).

Los cuadros estadísticos indican que el cacao en su etapa de germinación tendría un efecto resistente y acumulador ante el cadmio, (3), es posible que al incrementar los niveles de cadmio en los ensayos se hubiese observado un mayor efecto tóxico en la germinación (4), el aumento de la concentración de metal puede disminuir la germinación de la semilla.

b. Evaluación morfológica externa de plántulas de *T. cacao* L.

La semilla cotiledóneas de las plantas colectadas fue una de las estructuras que no mostró variabilidad dentro del presente estudio, el cacao pertenece al grupo de semillas recalcitrantes, las cuales presentan la característica de no poder secarse sin sufrir daño, pues su viabilidad se reduce con la desecación y al llegar a un contenido de humedad crítico la viabilidad se reduce a cero (5).

La morfología externa de planta tiene diferente respuesta o efecto ante los tratamientos con sulfato de cadmio, las plántulas más grandes presentan mayor tolerancia a metales pesados que las más pequeñas (6), estos resultados se debe a que el xilema no se desarrolló adecuadamente, ya que el cadmio induce la lignificación prematura del xilema (7).

Al evaluar la longitud de la radícula de *T. cacao* L. expuestas a concentraciones de cadmio, según ANOVA no existen diferencias estadísticas entre tratamientos, el cadmio no es un elemento esencial para las plantas vasculares, su absorción se realiza fácilmente a través de las raíces pudiendo ser ésta de manera pasiva o activa, la circulación dentro de la planta se cree que ocurre, al igual que con otros metales pesados, por formación de complejos metal orgánicos (8).

El tallo fue el órgano que presentó diferencias morfológicas en presencia de las concentraciones de cadmio, el cadmio es un elemento de fácil translocación a la parte superior de las plantas (9).

En la determinación de las respuestas del tamaño de las hojas con respecto al largo y ancho, donde indican que hay especies de plantas que toleran las concentraciones elevadas de metales en el suelo porque restringen su absorción y translocación hacia las hojas, esto se debe a la estrategia de las plantas acumuladoras, las cuales pueden concentrar metales en sus partes aéreas, en niveles que exceden varias veces el nivel presente en el suelo o sustrato, estas especies de plantas hiperacumuladoras son capaces de absorber altos niveles de contaminantes y concentrarlos en raíces, tallos y hojas (10, 11).

En la evaluación del diámetro del talluelo no existen diferencias estadísticas, esta respuesta podría explicar la forma de traslocación de los metales a los órganos de la planta, diferenciándose desde una etapa inicial de germinación a una etapa final de crecimiento, en donde podemos observar que el cadmio tuvo efecto en la raíz, seguido por las hojas y tallos, este comportamiento cambia en su etapa final de crecimiento, mostrándose mayores efectos en hojas que en raíz y al final en tallos (12).

c. Concentración de cadmio en plántulas *T. cacao* L. expuestas a diferentes concentraciones de sulfato de cadmio

Al realizar las pruebas de concentración de cadmio en plántulas, según el ANOVA se afirma que existen diferencias significativas a lo menos en uno de los resultados encontrados, la biomasa tiene diferente concentración por cada tratamiento evaluado. BAKER (1981), BARCELÓ *et al.* (2003), afirman que todas las plantas absorben metales del suelo donde se encuentran, pero en distinto grado dependiendo de la especie vegetal y de las características y contenido de metales en el suelo (13, 14), las plantas pueden adoptar diversas estrategias frente a la presencia de cadmio en el sustrato, difiriendo en la capacidad de acumular metales en sus órganos, mayormente en raíces, tallos, hojas, frutos y semillas, presentando diferentes niveles de concentración y acumulación de metales pesados; sin embargo, otras los absorben y acumulan activamente en su biomasa, lo que requiere una fisiología muy especializada (15), el Cd interfiere en la entrada, transporte y utilización de elementos esenciales (Ca, Mg, P y K) y del agua, provocando desequilibrios nutricionales e hídricos en la planta (16, 17, 18, 19).

Conclusiones

1. Las concentraciones de sulfato de cadmio no afectaron a las variedades CMP-99, CMP-15 y CCN-51, en cuanto al porcentaje de germinación, el porcentaje de germinación fue mayor en la variedad CCN-51 teniendo un efecto resistente y acumulador al cadmio.
2. Las concentraciones de sulfato de cadmio no afectaron a las variedades CMP-99, CMP-15 y CCN-51, en cuanto a la energía germinativa; el

mayor porcentaje de energía germinativa lo presento la variedad CMP-99, teniendo una respuesta resistente a las condiciones ambientales presentes en el estudio, como la humedad, temperatura y luz.

3. Las concentraciones de sulfato de cadmio afectaron a las plántulas en cuanto a su morfología, en las variedades CMP-99, CMP-15 y CCN-51, causando daño anatómico en las plántulas con respecto a la evaluación morfológica de semillas, de plántulas y las longitudes de radícula, talluelo y tamaño de hojas.
4. En cuanto a la morfología de las plántulas sometidas a concentraciones de sulfato de cadmio, las variedades más vulnerables son CMP-99 y CMP-15, afectando principalmente al tamaño de las semillas cotiledóneas, altura de semillas cotiledóneas, tamaño de hojas, color de hojas, longitud de radícula, longitud de talluelo y tamaño de hojas.
5. Se determinó que el cacao absorbe, transloca y acumula al cadmio en toda la plántula de las variedades CMP-99, CMP-15 y CCN-51, observándose una mayor concentración en la variedad CMP-99, seguida de las variedades CMP-15 y CCN-51, presentándose la acumulación de forma ascendente en los tratamientos.

Referencias bibliográficas

1. Rangel M, Zavaleta H, Córdova L, López A, Delgado A, Vidales I, Villegas A. Anatomía e histoquímica de la semilla del cacao (*Theobroma cacao* L.) Criollo mexicano. 2011; 35(3): 189-197
2. ISTA. International Seed Testing Association. Rules for Seed Testing. Zürich. 2007.
3. Lawal S. Effect of cadmium, lead and nickel salt solutions on the germination and early growth of spinach (*Spinacia oleracea* L.) Department of Applied Science, College of Science and Technology, Kaduna Polytechnic, Kaduna, Nigeria. 2011; 6 (9): 1-6
4. Jaja E, Odoemena C. Effect of Pb, Cu and Fe compounds on the germination and early seedling growth of tomato varieties. 2004; 8:51-53.
5. Pernía B, De Sousa A, Reyes R, Castrillo M. Biomarcadores de contaminación por cadmio en las plantas. Universidad Simón Bolívar. Venezuela. 2008; 33 (2): 112-119.
6. Mende, C. Efecto de Cd disuelto en agua en la germinación de semillas y el crecimiento de plántulas de Agave lechuguilla provenientes de zonas con diferente nivel de contaminación por metales. Biol. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica. San Luis Potosí, México. 2010. 90 p.
7. Durceková K, Huttová L. Rhizosphere localized cationic peroxidase from barley roots is strongly activated by cadmium and correlated with root growth inhibition. Institute of Botany, Slovak Academy of Sciences, Bratislava, Slovakia. 66 2007; (7): 1292-1300.
8. Sobrero M. Estudio de la fitotoxicidad de metales pesados y del herbicida glifosato en ambientes acuáticos. Bioensayos con plantas vasculares como organismos diagnósticos. Universidad Nacional de La Plata. La Plata, Argentina. 2010. 239 p.
9. Chaney R, Giordano P. Microelements as related to plant deficiencies and toxicities. Soils for management of organic wastes and wastewaters. 1977; 235-279.
10. Ruiz E, Armietta M. Acumulación de arsénico y metales pesados en maíz en suelos cercanos a jales o residuos mineros. Universidad Nacional Autónoma de México. 2012; 28(2) 103-117.
11. Rotkittikhun R, Kruatrachue M, Chaiyarat R, Ngernsarsaruay C, Pokethitiyook P, Pajitprapaporn A, Baker A. Uptake and accumulation of lead by plants from the Bo Ngam lead mine area in Thailand. 2006; 144:681-688.
12. Beltran M. Fitoextracción de suelos contaminados con cadmio y zinc usando especies vegetales comestibles. Universidad Autónoma Metropolitana. México. 2001. 176 p.
13. Baker A. Accumulators and excluders strategies in the response of plants to heavy metals. 1981; 3: 643-654.
14. Barceló J, Poschenrieder C. Phytoremediation: principles and perspectives. Contributions to Science Institut d'Estudis Catalans. Barcelona, España. 2003; 2(3): 333-344.
15. Kloke A, Sauerbeck D, Vetter H. Study of the Transfer Coefficient of Cadmium and Lead in Ryegrass and Lettuce. Nriagu, J. (Ed) In: Changing Metal Cycles and Human Health, Springer-Verlag, Berlin. 1994. 113 p.
16. Baker A., Walter P. Ecophysiology of metal uptake by tolerant plants. En: Heavy metal tolerance in plants: Evolutionary aspects. 1990. p. 155-157.
17. Poschenrieder C, Gunsé B, Barceló J. Influence of cadmium on water relations, stomatal resistance, and abscisic acid content in expanding bean leaves. 1989; 90:1365-1371.
18. Sandalio L, Dalurzo H, Gomez M, Romero M, Del Rio L. Cadmium-induced change in the growth and oxidative metabolism of pea plants. J. Exp. Bot. Granada, España. 2001; 52(364): 2115-2126.
19. Singh P, Tewari R. Cadmium toxicity induced changes in plant water relations and oxidative metabolism of Brassica juncea L. plants. 2003; 24:107-112.