

- Garcia, M y P. Garzon. (2009). Efecto del estrés salino sobre la anatomía de los protofilos en 2 genotipos de frijol (*vigna unguiculata*) en fase plantular. Memorias del XVII congreso venezolano de botánica (en formato digital). Universidad Centrooccidental “Lisandro Alvarado”. Barquisimeto. Venezuela.
- FAO. (2000). Global network on integrated soil management for sustainable use of salt-affected soils. Rome, Italy: FAO Land and Plant Nutrition Management.
- Karimi, E., A. Abdolzadeh y H. Zadehghipour. 2009. Increasing salt tolerance in olive *Olea europaea* L. plants by supplemental potassium nutrition involves changes in ion accumulation and anatomical attributes. *International journal of plant production* 3: 49-60.
- MUNNS, RANA; GOYAL, SHAM S.; PASSIOURA, JOHN. 2005. Salinity stress and its mitigation. University of California, Davis. 19 p.
- TANWAR, B. S. 2003. Saline water management for irrigation. International Commission on irrigation and drainage. New Delhi, India. 140 p.
- Volkmar KM, Hu Y, Steppuhn H (1998) Physiological responses of plants to salinity: a review. *Can. J. Plant Sci.* 78: 19-27.

REVISIÓN CADMIO EN CACAO (*Theobroma cacao*)

Lizeth Lorena Muñoz Villareal⁷, Diego Alejandro Londoño Puerta⁸, Álvaro Alean Vásquez⁹

Resumen

El cultivo de cacao ha tenido gran acogida en mercados internacionales y Colombia, dentro de los países latinoamericanos, tiene un gran potencial para la producción y exportación del grano fino de sabor y aroma. Antioquia en los últimos años ha crecido, tanto en área sembrada como en producción, ubicándose como el segundo departamento mas productor, después de Santander. Una de las grandes limitantes que se tienen a nivel mundial en las zonas productoras de cacao, es el Cadmio (Cd), este metal pesado que se encuentra naturalmente en el suelo es absorbido por las plantas de cacao y acumulado en raíces, tallos, hojas y frutos, este ultimo el producto de interés económico para los productores de cacao. El consumo del cadmio puede producir daños para la salud humana, para reducir la exposición, la Unión Europea (UE) en 2014 anunció los niveles máximos permitidos para el cadmio en los productos de cacao y chocolate que se venden en la UE. Esto se ha aplicado a partir del 1 de enero de 2019. Para conocer y entender el contexto mundial, nacional y regional de la producción de cacao, además de conocer la naturaleza, disponibilidad y absorción del cadmio en agroecosistemas cacaoteros, además de su legislación para la exportación del grano de cacao, se planteó la presente revisión bibliográfica, enmarcada en la fase 1 del proyecto “Identificación de los niveles de cadmio en agroecosistemas cacaoteros en la subregión de Urabá”.

Abstract

The crop of cocoa has had great reception in international markets, and Colombia within Latin American countries, has great potential for the production and export of fine grain flavor and aroma. Antioquia in recent years has grown, both in planted area and in production, ranking as the second most producing department, after Santander. One of the major limitations that have worldwide in cocoa producing areas, is cadmium (Cd), this heavy metal that is naturally found in the soil is absorbed by cocoa plants and accumulated in roots, stems, leaves and fruits, the latter the product of economic interest for cocoa producers. Cadmium consumption can cause damage to human health, to reduce exposure, the European Union (EU) in 2014 announced the maximum levels allowed for cadmium in cocoa and chocolate products sold in the EU. This has been applied as of January 1, 2019. To know and understand the global, national and regional context of cocoa production, in addition to knowing the nature, availability and absorption of cadmium in cocoa agroecosystems, in addition to its legislation for The export of cocoa beans, this bibliographic review was considered, framed in phase 1 of the project “Identification of cadmium levels in cocoa agroecosystems in the Urabá subregion”.

Breve historia del cacao.

El origen de esta especie es probablemente la región amazónica (cuenca alta del río Amazonas) y comprende países como Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia y Brasil. En esta región es donde se presenta la mayor variación de la especie. Se extendió de Sudamérica hasta México, pero no se sabe si su dispersión ocurrió naturalmente o con la ayuda del hombre. Sigue siendo un misterio el cómo llegó a Centro América, donde se ha cultivado por lo menos durante 3,000 años. El cacao se llevó de

7 Químico, M.Sc. (e), Gestora de Laboratorio SENNOVA Complejo Tecnológico Agroindustrial, Pecuario y Turístico, Apartadó, Antioquia. llmunozv@sena.edu.co

8 Ingeniero Agropecuario M.Sc., Líder SENNOVA Complejo Tecnológico Agroindustrial, Pecuario y Turístico, Apartadó, Antioquia. dalondonop@sena.edu.co

9 Químico, Técnico de Laboratorio SENNOVA Complejo Tecnológico Agroindustrial, Pecuario y Turístico, Apartadó, Antioquia. alvaroalean@hotmail.com

Brasil a la colonia portuguesa de Príncipe en 1822 y de ahí a Sao Tomé en 1830, ambas en el Golfo de Guinea. Ghana obtiene el cacao en 1879 y por el año de 1951 el oeste de África es el responsable del 60 % de la producción mundial. El género Theobroma, denominada así por el botánico Lineo quien la clasificó, se encuentra en estado natural en los pisos inferiores de las selvas húmedas de América tropical y prospera mejor entre los 18° N y 15° S del Ecuador a una altitud inferior a 1,250 m (Bermudez, 2015). De América se llevó por los españoles a Europa. Su comercio creció vigorosamente luego de ser conocido en el viejo mundo, lo que motivó sus siembras en áreas distintas a las inicialmente cultivadas por los indígenas americanos. Así fue como llegó a las islas del Caribe, Asia, Oceanía y África (FEDECACAO, 2015).

Economía del Cacao

El cacao se cultiva en países que geográficamente se ubican en la franja tropical de la tierra, es una especie de origen americano y sin embargo la mayor producción de éste se encuentra en África, continente que cuenta con tres grandes países productores que son: Costa de Marfil, Ghana y Nigeria. En Asia y Oceanía se destacan Indonesia y Nueva Guinea; en América se destacan países como Brasil, Ecuador, Colombia, República Dominicana, México y Venezuela (Guía Técnica para el Cultivo del Cacao, 2016).

Producción Mundial

El principal país cacaotero, Costa de Marfil, registró un importante crecimiento productivo pasando de representar

el 40,0% de la producción mundial en 2013/2014 a 43,1% en el 2017/2018. Los 10 principales productores de cacao en el mundo concentran el 94% de la producción mundial. El segundo productor, Ghana, parece estar estancada, no obstante, la producción de Ecuador en constante crecimiento está ayudando a compensar los efectos de ese estancado, como se observa en la Tabla 2 (Ministerio de Agricultura y Riego, 2019).

La producción mundial de cacao en grano descendió en un 3% durante la campaña cacaotera 2014/2015 para situarse en 4,236 millones de toneladas. Aunque la producción de Côte d'Ivoire se elevó a un máximo histórico de 1,796 millones de toneladas, superando así la cifra de la campaña anterior, en Ghana las compras acumuladas de cacao en grano por parte de la Ghana Cocoa Board durante la campaña 2014/2015 se situaron en 740.000 toneladas, un descenso del orden de 157.000 toneladas comparado con la campaña oficial anterior. Aunque la producción conjunta de las Américas aumentó en 36.000 toneladas a 763.000 toneladas, las cosechas de Asia y Oceanía disminuyeron en casi un 11% para situarse en 400.000 toneladas; la caída correspondió en gran medida a Indonesia. En términos de su cuota de la producción mundial total, África siguió siendo con mucho la mayor región productora, con el 73% de la producción mundial de cacao, mientras que las cuotas de las Américas y de Asia y Oceanía se situaron en el 18% y el 10%, respectivamente (ICCO, 2017).

Tabla 1. Producción mundial de cacao por principales países (Miles de Toneladas).

Países	2013/2014	2014/2015	2015/2016	2016/2017	2017/2018
Costa de Marfil	1746	1796	1581	2020	2000
Ghana	897	740	778	970	900
Indonesia	375	325	320	270	240
Brasil	228	230	210	174	190
Nigeria	248	195	200	245	260
Ecuador	232	262	232	290	280
Cameron	211	232	211	246	240
Perú	81	92	105	115	120
República Dominicana	70	82	80	57	70
Colombia	49	51	53	55	55
Subtotal	4137	4004	3700	4441	4355
Otros	233	248	297	298	290
Total	4370	4252	3997	4739	4645

Fuente: ICCO, 2019

América Latina es la principal región productora de las variedades "prime" (selectas) de cacao a nivel internacional, con cerca del 80 % de la producción mundial, se informó hoy en Lima durante el lanzamiento del Observatorio de la Iniciativa Latinoamericana de Cacao (ILAC). Según datos de la Organización Internacional del Cacao (ICCO), entre el 70 % y 100 % del total de la exportación de cacao de países como Bolivia, Colombia, Costa Rica, Ecuador, Perú y México corresponde a estas variedades especiales, como se evidencia en la Tabla 2 (Iniciativa latinoamericana del cacao, 2018).

Tabla 2. Indicadores de la región de Latinoamérica, variación anual de la producción y exportación de cacao en grano.

País	Producción Total (TM)		Exportaciones (TM)			Exportaciones (Miles de USD)		
	(TM 2017)	porcentaje de variación	Año 2016	Año 2017	Porcentaje variación	Año 2016	Año 2017	Porcentaje variación
Bolivia	2.000	-	115	213	85	655	1034	58
Brasil	173.800	33	389	754	94	1.634	2.936	80
Colombia	60.535	6.6	10.449	11.876	14	31.580	27.326	-13
Costa Rica	545	-	410	434	6	1.341	1.343	0
Ecuador	270.000	38	227.214	284.546	25	621.970	589.750	-5
México	30.000	-	169	1.032	511	866	2.811	225
Panamá	1.000	-	502	569	13	2.030	2.093	3
Perú	115.000	10	61.888	48.801	-21	201.569	118.845	-41
República Dominicana	80,00	-5	73.712	63.238	-14	227.941	178.034	-22
Trinidad y Tobago	500	-	365	321	-12	1.959	1.951	0
Total	733.380		375.213	411.791		1.091.545	925.089	

Fuente: ICCO, 2018

Producción de cacao en Colombia

De acuerdo con el informe presentado por el Departamento Nacional de Estadística (DANE) en el cuarto trimestre de 2015, la producción de cacao aumentó 32,6%, un 21%. Según el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR), el buen momento del sector cacaotero es debido a que este cultivo se perfila como una de las estrellas para el posconflicto y es uno de los productos priorizados en Colombia Siembra. Desde el año 2007, la producción y el área sembrada de cacao ha mostrado tendencia al aumento, ya que pasó de 146 mil hectáreas sembradas y 106 mil cosechadas en 2007, a 206 mil hectáreas sembradas y 162 mil sembradas en 2015. Por su parte, la producción pasó de 57 mil toneladas en 2007 a 90 mil toneladas en 2015, según lo registra (MADR, 2016).

El departamento de Santander es el principal productor de cacao a nivel nacional, con una participación del 41% del total de la producción, seguido por Antioquia con una participación del 9%, Arauca, Huila 8% cada uno, Tolima con 7% y Nariño en un 6%. El departamento que presenta el rendimiento más alto es Arauca, con 660 kilos por hectárea en el 2018, como se observa en la figura 2 (MADR, 2019).

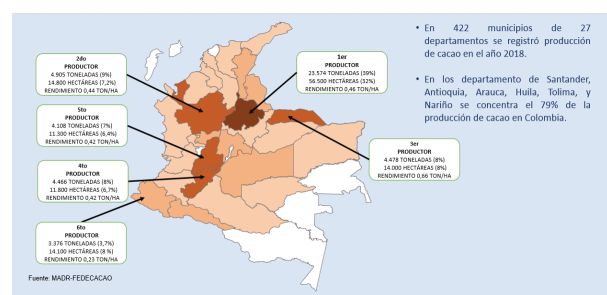


Figura 1. Zonas de producción, año 2018. Fuente: MADR, 2019

Así con base a los indicadores del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, en el año 2019 Santander lidera como el mayor productor del fruto en el país con una producción de 23.574 toneladas de cacao en 2018, siguiendo Antioquia con 4.905 toneladas y de tercer lugar parece Arauca con 4.478 toneladas (Tabla 3). Cabe mencionar, que para los años 2015 y 2016 Arauca fue el segundo mayor productor del país, superando a Antioquia con 1.238 toneladas en 2015 y 1.113 toneladas en 2016 como se evidencia en la siguiente tabla. En términos generales, Colombia hasta el año 2018 tuvo una economía creciente en este sector agroindustrial, ascendiendo desde el número de hectáreas cosechadas hasta el número de producción en toneladas, destacándose a nivel internacional por su creciente exportación de un producto destacado por su aroma y calidad (Contreras, 2017).

Departamento	Área (Ha)				Producción (Ton)				Rendimiento Ton/Ha			
	2015	2016	2017	2018	2015	2016	2017	2018	2015	2016	2017	2018
Santander	51.500	52.200	53.523	56.500	22.424	22.117	23.042	23.574	0,45	0,49	0,49	0,46
Antioquia	13.450	14.600	14.721	14.800	4.391	5.285	5.407	4.905	0,42	0,44	0,45	0,44
Arauca	11.200	13.000	13.126	14.000	5.629	6.398	5.037	4.478	0,55	0,64	0,68	0,66
Huila	13.100	13.300	13.553	13.593	3.787	4.159	4.822	4.466	0,42	0,42	0,42	0,42
Tolima	10.700	11.600	12.000	12.153	3.547	3.527	4.590	4.108	0,42	0,42	0,42	0,42
Nariño	14.400	14.900	14.918	14.100	2.876	2.059	2.871	3.376	0,19	0,13	0,19	0,23
Cesar	4.500	4.700	4.859	4.850	1.046	1.169	1.734	1.902	0,42	0,42	0,42	0,42
Meta	6.100	6.400	6.562	6.700	1.592	1.843	2.071	1.610	0,37	0,32	0,3	0,3
Otros	40.056	41.916	42.901	42.000	9.506	10.227	10.906	8.448	0,39	0,38	0,38	0,38
Total	165.006	173.208	175.430	176.075	54.798	56.785	60.535	56.867	0,43	0,45	0,45	0,43

Tabla 3. Indicadores de producción departamental . Fuente: MADR, 2019

Exportación de cacao colombiano

Analizando los indicadores expuestos por MADR, 2019. Las exportaciones de cacao tuvieron un incremento de 6.406 toneladas entre los años 2008-2018 (Tabla 4). Sin embargo, para el año 2018 se presentó una disminución en las exportaciones del fruto del 41%, frente a las registradas en el año 2017. Las principales causas obedecen a:

- Disminución de la producción nacional del cacao año 2018.
- Alta volatilidad del precio internacional del cacao (Bolsa de Nueva York).
- La principal empresa exportadora de cacao del año 2017 disminuyó su operación para el 2018 en -86%.

Año	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Exportaciones (Ton)	560	2.112	5.017	2.304	4.321	7.743	8.018	13.744	10.550	11.926	7.056
Variación exportaciones (%)		225%	138%	-54%	88%	79%	4%	71%	-23%	13%	-41%
Importaciones (Ton)	5.951	5.687	6.819	8.681	1.960	2.316	6.688	5.891	4.643	488	670
Variación importaciones (%)		-4%	20%	27%	-77%	18%	189%	-12%	-21%	-89%	31%
Balance (Ton)	-5.301	-3.575	-1.802	-6.377	2.360	5.427	1.330	7.854	5.906	11.437	6.386

Tabla 4. Exportaciones e importaciones de cacao colombiano. Fuente: MADR, 2019

Pese a la creciente productividad del cacao colombiano en años anteriores, se presentaron decrecimientos en lo que va del año 2019, ya que en los primeros cinco meses se manifestó una disminución del 24,28%, registrando exportaciones de 3.237 toneladas frente a 4.270 del 2018 (figura 2). A mayo de 2019, el 99% de las exportaciones se concentraron en los primeros 7 países relacionados en la tabla 5.

- El principal destino de exportación es México, con 1.700 ton y el 53% de participación en el mercado.
- Países Bajos – Holanda es el país que presenta la mayor variación positiva con 132%, pasando de 85 ton en el 2018 a 197 ton para el 2019.

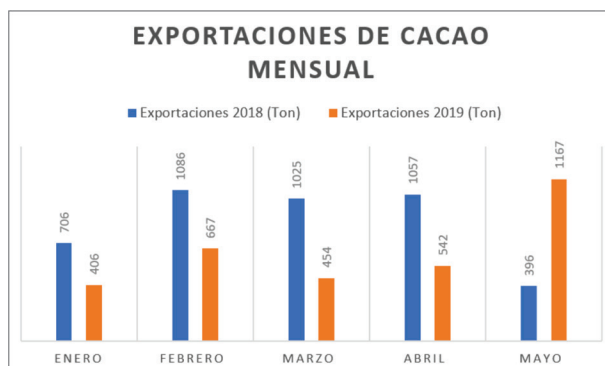


Figura 2. Exportaciones de cacao colombiano 2019. Fuente: MADR, 2019

País destino	2018		2019		Variación
	Total, Ton	Participación %	Total, Ton	Participación %	
México	1.125	26%	1.700	53%	51%
Malasia	700	16,4%	600	19%	-14%
Estados unidos	144	3,4%	214	7%	49%
Bélgica	321	7,5%	206	6%	-36%
Países Bajos- Holanda	85	2%	197	6%	132%
Indonesia	125	3%	150	5%	20%
Argentina	150	4%	125	4%	-17%
Francia	13	0%	14	0%	6%
Rusia	25	1%	13	0%	-50%
Italia	151	4%	7	0%	-95%
Canadá	601	14%	1	0%	-100%
España	576	13%	-	0%	-100%
Otros Países	254	6%	9	0%	-96%
Total	4.270	100%	3.237	100%	-24%

Tabla 5. Exportación de cacao colombiano a los principales países a mayo 2019. Fuente: MADR, 2019

El Cacao colombiano fue ratificado con un 95% de sabor y aroma en el último comité de la ICCO, gracias a las gestiones diplomáticas de la embajadora colombiana en Ghana y al trabajo técnico realizado por un representante de Casa Luker. El principal país destino de las exportaciones durante el año 2018 fue México, con una contribución en el mercado del 28% y llegando a las 1.974 toneladas enviadas. Los principales países destinos de exportaciones en el 2018 fueron en su orden; México, Malasia, Canadá, España, Bélgica y Holanda que en conjunto suman más del 80% del total de las exportaciones de cacao en Colombia. En el año 2018 exportó cacao a 23 países, con un total de 7.056 toneladas y teniendo un ingreso FOB de USD \$16 Millones (MADR, 2019).

Cadmio y el cacao

El cadmio es un metal pesado de origen natural, que no tiene una función conocida en los seres humanos. Se acumula en el cuerpo y afecta principalmente a los riñones, pero también puede causar desmineralización ósea. El cadmio atmosférico puede debilitar la función de pulmón e incluso conducir al cáncer. La planta de cacao absorbe naturalmente metales pesados del suelo y los concentra en las semillas (Augstburger *et al.*, 2000). El cadmio es absorbido por las plantas a través del transporte mediante procesos específicos y no específicos utilizados para iones, tales como Zn²⁺, Fe²⁺, Ca²⁺, Cu²⁺ y Mg²⁺. Después de la absorción por el sistema radicular, Cd²⁺ se transporta a la xilema, se mueve a las hojas y luego llega a la fruta a través del floema. En

general, la concentración de cadmio en el tejido de la planta disminuye a partir de las raíces le siguen los tallos, las hojas, cáscaras de mazorcas, cáscaras de granos y, finalmente, los granos (Meter, Atkinson & Laliberte, 2019).

Para reducir la exposición, la Unión Europea (UE) en 2014 anunció los niveles máximos permitidos para el cadmio en los productos de cacao y chocolate que se venden en la Unión Europea (UE) (Tabla 6). Esto se ha aplicado a partir del 1 de enero de 2019. Los límites se basan en los niveles estimados de consumo de chocolate por diferentes grupos de edad. Los niveles establecidos por la regulación de la UE son similares a los que se están discutiendo para su inclusión en el Codex Alimentarius de 0.8 mg/kg para chocolate con $\geq 50\%$ a $< 70\%$ de sólidos de cacao, y 0.9 mg/kg para chocolate con $> 70\%$ de sólidos de cacao. Las categorías y los límites para los productos con $< 50\%$ de sólidos de cacao en total y para el polvo de cacao (100% de sólidos de cacao) aún no se han definido. La UE no está sola en la regulación del cadmio en el chocolate, la Norma Nacional de Indonesia establece los siguientes límites máximos: Masa de Cacao 1 ppm, Manteca de Cacao 0.5 ppm, Torta Prensada de Cacao 0.5 ppm, Cacao en Polvo 1 ppm y Productos de Chocolate 0.5 ppm. La Norma 1.4.1 del Código de Normas Alimentarias de Australia y Nueva Zelanda sobre contaminantes y tóxicos naturales ha establecido un nivel máximo de cadmio en productos de chocolate y cacao a 0.5 ppm, y la Federación Rusa ha establecido el mismo umbral, pero para todo el chocolate y productos de chocolate, granos de cacao y

productos. El Estado de California EE.UU. ha establecido niveles máximos para el cadmio en los productos de chocolate bajo la Propuesta de Acuerdo Industrial 65 (19/02/2018). Los

productos que exceden los límites se pueden vender, pero en este caso se debe poner una advertencia en la etiqueta (Meter, Atkinson & Laliberte, 2019).

Producto	Nivel Máximo Permissible (mg/kg)
Chocolate con leche con un contenido de materia seca total de cacao < 30%	0,10
Chocolate con un contenido de materia seca total de cacao < 50%; chocolate con leche con un contenido de materia seca total de cacao ≥ 30%	0,30
Chocolate con un contenido de materia seca total de cacao ≥ 50%	0,8
Cacao en polvo vendido al consumidor final o como ingrediente en cacao en polvo edulcorado vendido al consumidor final (chocolate para beber)	0,6

Tabla 6. Niveles máximos permisibles de cadmio en la UE en cacao y productos de chocolate aplicados actualmente – adaptados del reglamento de la Comisión Europea (UE) 488/2014 del 12 de mayo de 2014. Fuente: U.E, 2014

Los niveles máximos permitidos en la regulación de la UE son para productos de chocolate y no la materia prima. Sin embargo, los compradores deben poder relacionar el nivel de cadmio en los granos de cacao con el producto final. Como la manteca de cacao contiene niveles mínimos de cadmio, la concentración de cadmio en la masa de cacao es similar a la del licor de cacao (el primer producto derivado de los granos de cacao después de la fermentación, el secado y el tostado). Conociéndose el porcentaje de masa de cacao en el producto final de chocolate, se puede utilizar la siguiente ecuación para estimar el nivel máximo de cadmio en la masa de cacao que permitirá que el producto de chocolate permanezca por debajo del umbral pertinente de la UE (Meter, Atkinson & Laliberte, 2019):

$$ML_{cm} = \frac{ML_{EU,P}}{X_{\%P}}$$

Donde:

ML_{cm} = Nivel máximo de cadmio en la masa del cacao $\left(\frac{mg}{kg}\right)$

$ML_{EU,P}$ = Nivel máximo permitido de a UE en el propucto terminado P $\left(\frac{mg}{kg}\right)$

$X_{\%P}$ = Porcentaje de masa de cacao en el producto terminao P

Legislación sobre los niveles de cadmio en cacao

Legislación sobre los niveles de cadmio en cacao a nivel mundial

Como se mencionó anteriormente la comisión europea notificó una regulación que fue obligatoria desde enero del 2019. Los países para los cuales no se encontraron registros sobre el contenido límite en chocolate y otros productos derivados del cacao fueron Bolivia, Perú, Nicaragua, Canadá, Japón, Reino Unido, Venezuela, Sudáfrica, Suiza, Rusia, Ecuador, Chile y Brasil. Algunos de estos países reportaban niveles máximos en contenidos de otros metales tóxicos como el plomo y el arsénico o en su legislación se encontraba limitado el cadmio para otros alimentos diferentes al cacao (Tabla 7). En Colombia la regulación 770 de 2014 establece las directrices concernientes a la vigilancia y control de residuos en alimentos, sin embargo, no hay una legislación en la cual se establezcan niveles permisibles de cadmio en chocolate y otros productos derivados del cacao (Calderón & Ramírez, 2019)

A pesar de la inexistencia de las leyes, el Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos (INVIMA) y el subcomité Codex Colombia sobre contaminante de los alimentos y propusieron una metodología para el muestreo y evaluación de este metal en diferentes productos como licor de cacao, cacao en polvo y chocolatinas (Invima, 2017).

País	Normativa	Descripción
Estados Unidos	Agencia para sustancias tóxicas y registros de enfermedades. Declaración de salud pública: cadmio	Alton niveles de cadmio entre 0,05-0,12 mg/kg en semillas de cacao
Hong Kong	Centro de alimentos seguros, capítulo 132 de la parte V de la Ordenanza en Salud Publica y los Servicios Municipales, en la regulación 3.	Regula las concentraciones de cadmio para los cereales y vegetales (0,1mg/kg), pescado, carne de cangrejo, ostras, gambas y camarones (2 mg/kg). No hay legislación para el cacao y derivados
México	Norma Oficial Mexicana NOM-186-SSA1/SCFI-2013, Cacao, chocolates y productos similares y derivados del cacao	Contenidos permisibles: menores a 0,5 mg/kg para arsénico y entre 0,1 a 1 mg/kg para el plomo. No hay registros para el cadmio
Unión Europea	En el reglamento 488 de 2014 de la Unión Europea (Comisión Europea, 2014*, 4).	Chocolate con leche con un contenido de materia seca total de cacao <30% (0,10 mg/kg Cd); chocolate con un contenido de materia seca total de cacao <50% y chocolate con leche con un contenido de materia seca total de cacao ≥30% (0,30 mg/kg Cd); chocolate con un contenido de materia seca total de cacao ≥50% (0,80 mg/kg Cd);

Australia y Nueva Zelanda	Código de normas alimentarias australianas y de Nueva Zelanda	Contenido máximo de cadmio en chocolates y productos del cacao menor a 0,5 mg/kg
Argentina	Código alimentario	Concentración de cadmio en chocolates y productos de cacao (contenido de cacao <40%) menor a 0,2 mg/kg. Para chocolates y productos mayor a 40% de contenido de cacao el límite es 0,3 mg/kg.
Uruguay	Ministerio de Salud pública	Para todos los productos del chocolate y derivados del cacao, el contenido de cadmio debe ser menor a 0,2 mg/kg
Corea del Sur	Gobierno de Corea	El gobierno de Corea ha legislado concentraciones máximas permisibles de "límite estándar" para cd (0,2 mg/kg) para arroz pulido.

Tabla 7. Legislación sobre niveles de cadmio en cacao a nivel mundial. Fuente: Calderón & Ramírez, 2019

Legislación colombiana sobre los niveles de cadmio en cacao.

Como se mencionó con anterioridad la regulación 770 de 2014 establece las directrices concernientes a la vigilancia y control de residuos en alimentos, sin embargo, no hay una legislación en la cual se establezcan niveles permisibles de cadmio en chocolate y otros productos derivados del

cacao a raíz de esto, los aportes de Colombia para la décima reunión del Programa Conjunto FAO/OMS sobre normas alimentarias del Comité del Codex sobre Contaminantes de los Alimentos, en Rotterdam, Holanda, en abril de 2015, es una propuesta (Tabla 8) con los siguiente niveles máximos para el cadmio en el Licor de cacao y productos derivados para observaciones (Invima, 2017):

Producto	Nivel máximo de Cadmio mg/kg
Licor de cacao	5
Cacao en polvo sin adición de azúcar	4
Cacao en polvo con adición de azúcar	0,4
Chocolate (chocolatina) con leche con un contenido de materia seca total de cacao < 30 %	0,2
Chocolate (chocolatina) con un contenido de materia seca total de cacao < 50 %; chocolate con leche con un contenido de materia seca total de cacao ≥ 30 %	0,4
Chocolate (chocolatina) con un contenido de materia seca total de cacao ≥ 50 %	2,5

Fuente: Invima, 2017

Cadmio en plantaciones de cacao

Fuentes de acumulación de cadmio en el suelo

La presencia de cadmio en los suelos es el resultado de una combinación de procesos naturales y antropogénicos. Los procesos naturales incluyen la meteorización de las rocas, la actividad volcánica, los incendios forestales, la erosión y la deposición en los sedimentos de los ríos, mientras que los procesos antropogénicos incluyen actividades mineras e industriales, así como prácticas agrícolas de riego y fertilización. El aumento observado de los niveles de cadmio en los suelos en los últimos años a escala mundial sugiere la importancia de los procesos antropogénicos. En LAC (los pequeños productores de los países de Latinoamérica y el Caribe), sin embargo, los mayores niveles de cadmio reportados en los granos de cacao en relación con otras regiones, así como las diferencias localizadas, implican que los suelos en algunas áreas pueden ser naturalmente ricos en cadmio, aunque esto no descarta el papel de las fuentes

antropogénicas, ni de una interacción entre los dos. Las fuentes se explican con más detalle en la siguiente sección (Meter, Atkinson & Laliberte, 2019).

Fuentes naturales del cadmio

Según He et al, 2015. La contribución de los procesos naturales a la contaminación con cadmio del suelo es de 3 a 10 veces menor que la de las fuentes antropogénicas. En los suelos naturales, no contaminados, la concentración de cadmio está influenciada en gran medida por la cantidad de cadmio en la roca madre y por las condiciones de meteorización locales, así como por el transporte y deposición en los sedimentos y el agua por los ríos. Comparando diferentes tipos de suelos, los derivados de rocas ígneas suelen contener cantidades bajas de cadmio, los suelos derivados de rocas metamórficas son intermedios, y los suelos derivados de rocas sedimentarias (especialmente lutitas) contienen altas cantidades (He et al, 2015). Gramlich et al, 2018 encontraron que los niveles de cadmio en los suelos

de cultivo de cacao variaron significativamente a lo largo de diferentes sustratos geológicos en Honduras y fue el más alto en los suelos aluviales originados de material sedimentario. Un patrón similar fue encontrado en Ecuador en un estudio de 159 granjas (Argüello et al, 2019). Otras fuentes naturales de cadmio del suelo incluyen la actividad volcánica, incendios forestales, partículas de suelo arrastradas por el viento y polvo de roca (Meter, Atkinson & Laliberte, 2019).

Fuentes antropogénicas de cadmio

La actividad antropogénica puede aumentar la concentración de cadmio en los suelos agrícolas mediante la aplicación de fertilizantes de fosfato derivados de material sedimentario y agua de riego de áreas con altos niveles de cadmio. La minería y la fundición de minerales, la quema de combustibles fósiles, y otras actividades industriales también pueden conducir a la contaminación localizada con cadmio. Si bien la deposición de sedimentos de los ríos es un proceso natural, las actividades como la minería y la degradación causada por el cambio del uso de la tierra en suelos ricos en metales aguas arriba de las áreas agrícolas probablemente aumentarán la concentración de estos metales en los sedimentos aguas abajo y pueden ser una fuente importante de cadmio en muchos suelos. En suelos tropicales en áreas húmedas, es más probable que ocurra la migración de cadmio en el perfil del suelo que su acumulación en la capa superior (Kabata, 2010; Rieuwerts, 2007). Por lo tanto, los resultados de múltiples estudios en suelos de cultivo de cacao en LAC que muestran concentraciones significativamente mayores de cadmio en la capa superior en comparación con otras capas, y una disminución general con la profundidad se han interpretado como el resultado de actividad antropogénica (Barraza et al., 2017; Gramlich et al., 2017; Arévalo et al., 2016; Chavez et al., 2015; Mite et al., 2010; Rodríguez Albarracín et al., 2019), aunque el mapeo de isótopos ha sugerido que el ciclo suelo planta puede llevar a un patrón similar (Imseng et al. 2018).

Cadmio dentro de sistemas de producción del cacao

Cuando se reportan altas concentraciones de cadmio en los granos de cacao, las concentraciones también son altas o incluso más altas en las hojas y en las cáscaras de las mazorcas. Las hojas muertas y las cáscaras de mazorcas generalmente se dejan degradar en las plantaciones para reducir la pérdida de nutrientes y mejorar la materia orgánica del suelo. Todo el cadmio en estos tejidos se lixiviará a través del suelo o se reciclará dentro del sistema. Para Mite et al, 2010; Barraza et al, 2017 y Gramlich et al, 2018 la mayor concentración de cadmio en las capas superiores de los suelos en relación con los subsuelos puede deberse, al menos en parte, a la acumulación a lo largo de los años de cadmio de hojas y cáscaras, aunque los autores no descartan la posibilidad

de contaminación de otras fuentes antropogénicas. En Colombia, Rodríguez Albarracín et al, 2019 encontraron que la hojarasca de cacao tiene un mayor contenido de cadmio que los granos y hojas de cacao con un promedio de 85.5 mg/kg, lo que según los autores implica un alto nivel de ciclos de cadmio en sus áreas de estudio. Sin embargo, la importancia relativa de esto en comparación con otros procesos aún no se ha entendido.

Propiedades del suelo que afectan la biodisponibilidad del cadmio a las plantas de cacao

Relación entre las propiedades del suelo

La disponibilidad de cadmio para las plantas está influenciada por múltiples propiedades del suelo que afectan las características químicas y físicas del cadmio en el suelo y pueden fluctuar en espacio y tiempo. Estos incluyen pH, contenido de materia orgánica, textura y mineralogía del suelo, capacidad de intercambio de cationes, conductividad eléctrica, contenido de macro y micronutrientes y la presencia de microorganismos (Shahid et al. 2016; S. He et al. 2015). La manipulación de estas propiedades es clave para el desarrollo de estrategias de mitigación que tienen como objetivo reducir la absorción de cadmio por el cacao (Hamid et al., 2019).

La mayoría de los estudios de referencia para comprender cuáles de estos factores pueden ser importantes para influir en la absorción de cadmio por el cacao se han llevado a cabo en LAC – Ecuador, Perú, Trinidad y Tobago, Honduras y Bolivia. Estos estudios midieron diversas propiedades del suelo, así como factores agronómicos y otros, y determinaron su correlación con el cadmio total y biodisponible del suelo, así como el contenido de cadmio en el tejido de las plantas de cacao (hojas, granos, cáscaras de mazorca). Este informe encontró que muchos estudios han investigado esto, pero las diferencias en las propiedades del suelo medidas, los tipos de suelo, el diseño del muestreo, el tamaño de la muestra, la duración del estudio y el procedimiento de extracción de cadmio biodisponible dificultan su comparación. Consideramos que 9 de estos estudios, de estos, solo tres (Gramlich et al., 2018; Argüello et al., 2019) permiten formular conclusiones claras. Estos estudios forman la base de las siguientes secciones, junto con los resultados de ensayos que buscan cambiar las propiedades del suelo para reducir la absorción de cadmio por el cacao (Meter, Atkinson & Laliberte, 2019).

Capacidad de Intercambio Catiónico

La capacidad de intercambio de catiónico (CIC) es la capacidad total de un suelo para contener cationes intercambiables. Una mayor CIC implica una mayor capacidad de las superficies de partículas del suelo para

retener los cationes, y puede llevar a una disminución de la biodisponibilidad del cadmio. A medida que disminuye la CIC, existe una mayor competencia entre los cationes y Cd^{2+} para los sitios de ligazón que dan como resultado la desorción de cadmio de las partículas del suelo a la solución del suelo. La CIC está influenciada por las propiedades del suelo, incluida la textura, el contenido y tipo de arcilla y la mineralogía, el pH, el contenido de óxidos e hidróxidos de hierro, aluminio y manganeso y el contenido de materia orgánica. La mineralogía de arcilla es muy importante: las arcillas 1:1 son comunes en los suelos tropicales altamente meteorizados y tienen una CIC baja, mientras que las arcillas 2:1 tienen una CIC alta. Un aumento en el pH y el contenido de materia orgánica del suelo también suele asociarse con una CIC más alta, especialmente en suelos tropicales (Adriano, 2001).

PH

El pH del suelo parece que es uno de los parámetros más importantes que influyen en la especiación de cadmio, la movilidad, la solubilidad y, por lo tanto, su biodisponibilidad (Adriano, 2001). A medida que el pH disminuye, también lo hace el CIC del suelo. En los suelos alcalinos, el cadmio es menos biodisponible ya que tiende a ligarse fuertemente a las partículas del suelo. El aumento del pH del suelo de los suelos ácidos casi siempre conduce a una menor absorción de cadmio por las plantas (Shahid et al, 2016). La mayoría de los estudios sobre el cacao encuentran correlaciones significativas y negativas entre el pH del suelo y el cadmio biodisponible (Argüello et al. 2019). Sin embargo, el entorno de pH en el suelo no es uniforme ya que las plantas exudan ácidos de sus raíces para mejorar la solubilidad de nutrientes y iones (Dong et al, 2007). Esto significa que incluso en suelos neutros o alcalinos, todavía puede ocurrir acumulación de cadmio en los tejidos de las plantas. Se ha encontrado que el cadmio es un problema importante en el cacao que se cultiva en suelos de pH casi neutro (Remigio, 2014).

Los árboles de cacao crecen mejor en suelos con niveles de pH que van de 5.0 a 7.5. La aplicación de ciertas enmiendas a los suelos ácidos que aumentan el pH puede reducir la proporción de cadmio que está biodisponible y, por lo tanto, reducir la absorción de cadmio por las plantas (Ramtahal et al, 2018). Las enmiendas de uso común para este propósito incluyen cal apagada, dolomita y zeolita (Mahar et al, 2015).

Contenido de materia orgánica

El contenido de materia orgánica de los suelos juega un papel importante en la biodisponibilidad del cadmio debido a su capacidad para adsorber el metal. La capacidad de la materia orgánica para unirse con el cadmio es debido a su alta CIC, y el incremento de la actividad microbiológica, así como su capacidad quelante (Adriano 2001; S. He et al. 2015).

El contenido de materia orgánica también puede reducir la biodisponibilidad de cadmio indirectamente al afectar otras propiedades del suelo (Shahid et al, 2016), principalmente aumentando el pH del suelo, sin embargo, las sustancias húmicas a veces forman complejos solubles con cadmio y aumentan su movilidad (Khan et al, 2017).

El contenido de materia orgánica del suelo en las plantaciones de cacao en Honduras y Bolivia está correlacionado de manera significativa y negativa tanto con el cadmio biodisponible en el suelo como con el contenido de cadmio en los tejidos de las plantas de cacao (Gramlich et al, 2018). Se encontró una correlación similar en Ecuador entre el contenido de cadmio en los granos de cacao y el contenido de materia orgánica del suelo (Argüello et al, 2019). Chávez et al. (2016a) interpretan el mayor coeficiente de correlación entre cadmio soluble en ácido y contenido de cadmio en los granos de la capa subsuperficial (5–15 cm) en comparación con la capa superficial (0 – 5 cm) como resultado de la mayor cantidad de materia orgánica del suelo en la capa superficial. Un porcentaje muy bajo de materia orgánica del suelo en el norte del Perú (< 2%) puede explicar en parte las elevadas concentraciones de cadmio en los granos de cacao en la región (Remigio, 2014).

Chávez et al. (2016a) encontraron que una tasa de aplicación del 2% de vermicompost a podría reducir efectivamente el cadmio 0.01 M CaCl_2 extraíble y extraído con Mehlich 3 en suelos enriquecidos con 5 mg/kg de cadmio. Curiosamente, Chávez et al. (2016a) informaron que este efecto puede haber sido debido a un aumento sustancial en el pH del suelo, tal vez por la mineralización de nitrógeno orgánico.

Textura del suelo

La textura del suelo influye tanto en el contenido de cadmio como en su biodisponibilidad en los suelos debido a las diferentes capacidades de intercambio catiónico (Kabata, 2010). Los suelos de textura fina (arcillas) generalmente tienen una mayor capacidad de adsorción que los suelos de textura más gruesa (arenas), mientras que el contenido total de cadmio y la biodisponibilidad parecen ser más altos en los suelos francos (una mezcla de arcilla, arena y limo) que en los suelos arenosos (Kabata, 2010). Sin embargo, este patrón no siempre es claro, ya que la capacidad de adsorción de la arcilla depende de la estructura del mineral de arcilla dominante: los tipos de arcilla 2:1 tienen mayores capacidades de absorción que los tipos de arcilla 1:1. En los trópicos, las arcillas tienden a estar altamente meteorizadas y están dominadas por tipos de arcilla 1:1 con CIC correspondientemente más baja (Rieuwerts, 2007). Esta puede ser la razón de los resultados inconsistentes en los estudios correlativos en plantaciones de cacao en los que se han informado ser positivos, negativos y sin correlación entre

el contenido de arcilla y la biodisponibilidad de cadmio entre los estudios en Ecuador, Honduras, Bolivia y Perú (Gramlich et al, 2018, 2017). Dados estos resultados conflictivos, el contenido de arcilla no parece ser un indicador confiable de la biodisponibilidad de cadmio, aunque puede desempeñar un papel importante en la biodisponibilidad de cadmio para las plantas de cacao (Meter, Atkinson & Laliberte, 2019).

Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica del suelo (CE) es una medida de su capacidad para conducir una corriente eléctrica. Una CE alta indica un gran número de cationes (nutrientes) que se mantienen en los sitios de intercambio catiónico del suelo, e indica un suelo fértil. Sin embargo, los suelos con una alta CE debido al exceso de iones de sodio y magnesio (o cloruro) pueden ser perjudiciales para la salud de las plantas, y también aumentar la biodisponibilidad de cadmio (Ahmad, 2017). Como la mayor parte del cacao se produce en un bioma de la selva tropical, parecería que es poco probable que la CE del suelo sea alta. Sin embargo, podría ser un problema en áreas que utilizan agua de riego salina o donde los ciclos naturales o de riego de inundaciones y sequías son comunes, ya que el cloro puede formar complejos con Cd^{2+} en la fracción intercambiable que está ligado a las partículas del suelo y ponerlos en solución. Es probable que esto sea más importante en suelos alcalinos. Solo unos pocos estudios han investigado la relación entre la conductividad eléctrica y la biodisponibilidad del cadmio. Fauziah et al, 2001 encontraron una correlación significativa y positiva en los suelos de cultivo de cacao de Malasia. En Ecuador, Chavez et al, 2015 encontraron que el contenido de cadmio en grano de cacao se predecía mejor por el contenido de cadmio biodisponible y la CE de la capa superior del suelo ($r^2 = 0.73$, $p < 0.05$). Argüello et al, 2019 descubrieron que, a concentraciones de iones de cloruro en el suelo superiores a 500 ppm, la biodisponibilidad de cadmio aumentó dramáticamente. Esto corresponde a una CE (1: 5) de aproximadamente $350 \mu S cm^{-1}$ (Meter, Atkinson & Laliberte, 2019).

Macro y micronutrientes

Sarwar et al, 2010 proporcionan una discusión detallada de la naturaleza compleja del papel de la nutrición mineral en la reducción de la absorción de cadmio. Algunos iones pueden influir en la absorción de cadmio directamente a través de la competencia por los sitios de intercambio del suelo, y la quelación o complejación con compuestos de cadmio. Sin embargo, predecir el efecto no siempre es sencillo, ya que también depende del compuesto aplicado y del modo de aplicación que puede resultar en un cambio en el pH o la CIC y, por lo tanto, afectar la biodisponibilidad del cadmio (Meter, Atkinson & Laliberte, 2019).

Fósforo

Se ha informado que la aplicación de fertilizantes de fosfato no contaminados con cadmio o reduce la biodisponibilidad del cadmio al inmovilizar el cadmio en el suelo, o lo aumenta al reducir el pH del suelo (S. He et al. 2015; Mahar et al. 2015). En Venezuela, (Nereida, 2011) encontró que la aplicación de fósforo a 50 o 150 mg/kg por árbol en la forma de dihidrógeno fosfato de potasio reducía los niveles de cadmio biodisponible en el suelo. En Bolivia (Gramlich et al, 2017) encontraron un efecto negativo del contenido de P del suelo en la concentración de cadmio biodisponible y un efecto negativo débil en la concentración de cadmio en las cáscaras de mazorcas. En cambio, Huamani et al, 2012 encontraron que los niveles de cadmio del suelo se correlacionaban de manera significativa y positiva con el contenido de P en las hojas de cacao. Fauziah et al, 2001 y Zug et al, 2019 también encontraron que el contenido de P biodisponible del suelo se correlacionó positivamente con el contenido de suelo de cadmio biodisponible, pero creen que esto se debe al uso de fertilizantes de fosfato contaminados con metales pesados (Meter, Atkinson & Laliberte, 2019).

Zinc

El cadmio y el zinc comparten propiedades químicas muy similares, y esto ha llevado a la conclusión de que una deficiencia relativa de zinc en el suelo puede llevar a una mayor absorción de cadmio, ya que compiten por las mismas membranas de transporte (Sarwar et al., 2010; Adriano, 2001). Parece que la proporción de cadmio a zinc en los suelos es normalmente de 1: 200-500. Los suelos con relaciones más bajas que esto (como las lutitas marinas) pueden exhibir una alta acumulación de cadmio en los cultivos (Chaney, 2012).

Silicio

Se sabe que el óxido de silicio (SiO_2) reduce la biodisponibilidad del cadmio del suelo, así como su absorción y movimiento dentro de las plantas. (Sarwar et al., 2010). Una fuente comúnmente utilizada como un filtro rentable y eficiente para el agua contaminada es la tierra de diatomeas o diatomita. La diatomita también se puede incorporar a los suelos para reducir la biodisponibilidad del cadmio del suelo (Liva et al, 2007). En Perú, los ensayos en macetas con plantas de cacao han demostrado una reducción de la biodisponibilidad de cadmio, especialmente con aplicaciones de más del 5% y actualmente se está realizando un ensayo de campo (Arbulu, 2017). La contaminación del agua subterránea de los suelos también se puede prevenir mediante la colocación de una capa de diatomita bajo la capa de enraizamiento del suelo (Liva et al, 2007).

Otros elementos

Muchos otros elementos en el suelo pueden influir en la absorción de cadmio (Shahid *et al.* 2016). El efecto del contenido de N en el suelo sobre la biodisponibilidad de cadmio parece depender de si se usa NO_3^- o NH_4^+ , la tasa de aplicación y el momento y las especies de plantas estudiadas (He *et al.*, 2015). Por ejemplo, cuando se aplica como NH_4^+ , la acidificación del suelo puede ocurrir, lo que lleva a una mayor biodisponibilidad del cadmio. En Perú, Zug *et al.*, 2019 encontraron que el uso de fertilizantes N en particular incrementó dramáticamente el contenido de cadmio en los granos de cacao. Otros elementos investigados con respecto a su efecto sobre la biodisponibilidad de cadmio incluyen Fe, Pb, Ca, Mg, Mn y K. Argüello *et al.*, 2019 encontraron que el Mn extraíble con oxalato explicó el 8% de la variación en las concentraciones de cadmio en granos en un modelo de regresión con cadmio total del suelo, pH y carbono orgánico total. Se sabe que los oxihidróxidos de manganeso son fuertes adsorbentes de metales. Gramlich *et al.*, 2018 encontraron que el contenido de Mg y K en el suelo tenía una influencia negativa menor en las concentraciones de cadmio en la planta, lo que los autores creen que se debe a la competencia de iones. Gramlich *et al.*, 2018 encontraron que el Fe estaba correlacionado positivamente con el cadmio disponible medido por DGT en los suelos de cacao de Bolivia y Honduras. Sin embargo, en Honduras, la disponibilidad de Fe también estuvo fuertemente correlacionada con el pH, lo que explica la correlación con el cadmio (Gramlich *et al.*, 2018).

La planta: mecanismos de absorción de cadmio, su partición y diferencias entre variedades

Mecanismo de absorción del cadmio

El cadmio es un elemento no esencial para las plantas y su absorción se debe al transporte mediante procesos específicos y no específicos utilizados para iones como el Fe^{2+} , Ca^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} y Mg^{2+} (Shahid *et al.*, 2016). Después de la absorción por el sistema radicular, Cd^{2+} es transportado al xilema para llegar a las hojas. En las hojas Cd^{2+} es transportado activamente al floema desde donde llega a los frutos (Shahid *et al.*, 2016; Clemens *et al.*, 2013). El cadmio también puede llegar a los frutos directamente del xilema (Meter, Atkinson & Laliberte, 2019).

La absorción de cadmio por las hojas ha recibido mucha menos atención que a través de las raíces. Mientras que Shahid *et al.*, 2017 sugieren que para algunas especies la absorción foliar de cadmio podría ser importante, en el cacao esto parece ser insignificante (Barraza *et al.*, 2017).

Se ha identificado que varias familias importantes de genes transportadores de membrana (incluyendo los transportadores regulados por zinc, las proteínas similares a

los transportadores regulados por hierro (ZIP), la resistencia natural y las proteínas de macrófagos (NRAMP), las ATPasas de metales pesados (HMA)) probablemente desempeñan un papel en la absorción de cadmio por las raíces, la carga en el xilema y el transporte dentro de la planta (Guo *et al.*, 2016). En muchas especies estudiadas, el transportador ZIP que apoya que el Zn^{2+} cruza la membrana de la célula epidérmica de la raíz es responsable de la absorción de cadmio. Además, las células de la raíz tienen transportadores HMA3 que bombean Cd^{2+} a las vacuolas de las células de la raíz, lo que limita el transporte de Cd al xilema. Se han observado plantas con un HMA3 mutante en el arroz, la soja, y el trigo que son mucho menos eficientes en el bombeo de Cd^{2+} a las vacuolas (Wang *et al.*, 2012). La sobreexpresión del mismo transportador HMA3 redujo el transporte de Cd^{2+} a brotes de arroz y grano (Ueno *et al.*, 2010).

Estas familias de genes están altamente conservadas a través de las familias de plantas y parecen tener homólogos identificables en el genoma del cacao (Cryer *et al.*, 2012). Ullah *et al.*, 2018 identificaron y secuenciaron cinco genes de la familia NRAMP en cacao y encontraron que NRAMP5 codifica una proteína capaz de transportar iones de Cd^{2+} en levadura. Sin embargo, mientras que las proteínas NRAMP han demostrado ser importantes en la absorción de cadmio en el arroz (Ishikawa *et al.*, 2012; Sasaki *et al.*, 2012), hasta la fecha esta proteína no se ha implicado para ningún otro cultivo. Una mayor comprensión del papel de estos genes de transporte en la absorción y partición de cadmio ayudará a la identificación de genotipos de cacao de baja acumulación para ensayos de campo (Meter, Atkinson & Laliberte, 2019).

Partición de cadmio dentro de la planta

En general, la concentración de cadmio en tejido de la planta disminuye a partir de las raíces > tallos > hojas > cáscaras de las mazorcas > semillas (Benavides *et al.*, 2005). Esto parece cumplirse para el cacao donde se ha reportado una disminución en la concentración de cadmio desde la hoja a la cáscara de las mazorca hasta el grano descascarado (Tabla 10). El transporte de cadmio a través del xilema puede explicar por qué otras partes de la planta contienen menos cadmio que las hojas, ya que se necesita transporte activo hacia el floema (Sékara *et al.*, 2005). Chávez *et al.*, 2015 informaron niveles de cadmio en hojas que estaban por debajo del límite de detección, mientras que la concentración en granos excedió 1 mg/kg. Se han informado niveles más altos de cadmio en la cáscara del grano en comparación con el grano descascarado en varios estudios, pero no todos. Tales diferencias parecen tener una base genética (Zug *et al.*, 2019), pero algunos de los resultados pueden deberse a un artefacto de preparación del material (Lewis *et al.*, 2018).

Tabla 10. Resumen de los resultados de los estudios sobre las concentraciones de cadmio en diferentes partes de la planta de cacao

Estudio	Región	País	Concentración de cadmio en tejido de planta de cacao
Gramlich <i>et al.</i> , 2018	LAC	Honduras	hoja > cáscara de las mazorca = grano descascarado
Gramlich <i>et al.</i> , 2017	LAC	Bolivia	hoja > cáscara de las mazorca = grano descascarado
Gramlich <i>et al.</i> , 2017	LAC	Ecuador	hoja > cáscara de las mazorca = grano en cáscara
Barraza <i>et al.</i> , 2017	LAC	Ecuador	cáscara > hoja > cáscara de las mazorca > grano
Mite <i>et al.</i> , 2010	LAC	Ecuador	grano descascarado > cáscara de grano >> hoja
Chávez <i>et al.</i> , 2015	LAC	Ecuador	grano descascarado > cáscara de grano >> hoja
Tantalean <i>et al.</i> , 2017	LAC	Perú	vástago > hoja > raíz > grano en cáscara > cáscara de las mazorca
Llatance <i>et al.</i> , 2018	LAC	Perú	raíz > vástago > hoja > grano en cáscara
Zug <i>et al.</i> , 2019	LAC	Perú	grano descascarado (seco, en polvo) > cáscara
Rodríguez Albarracín <i>et al.</i> , 2019	LAC	Colombia	Camada de hojas > hoja > grano descascarado
Ramtahal <i>et al.</i> , 2016	LAC	Trinidad y Tobago	hoja > cáscara de las mazorca > cáscara del grano > grano descascarado
Ramtahal <i>et al.</i> , 2015	LAC	Trinidad y Tobago	cáscara de grano > grano descascarado
Fauziah <i>et al.</i> , 2001	LAC	Malasia	hoja > cáscara de las mazorca > grano descascarado

Fuente: Meter, Atkinson & Laliberte, 2019.

El tratamiento post-cosecha (fermentación y secado) también puede desempeñar un papel en la partición de cadmio en el grano (Ramtahal *et al.*, 2015). Recientemente, Thyssen *et al.*, 2018 mapearon la distribución de varios contaminantes, incluido el cadmio, en la sección transversal de un grano de cacao fermentado usando un nuevo método. Su análisis sugiere que el cadmio está ubicado en el lado interno de la cáscara de la semilla, así como en la parte meristemática y tiene una distribución similar a zinc y, en cierta medida, a Mg, K y P. No se sabe si el mismo patrón está presente en los granos antes de la fermentación (Meter, Atkinson & Laliberte, 2019).

Diferencias genotípicas en la absorción y partición de cadmio

El uso de genotipos de baja acumulación de origen natural, solos, como patrón, injerto, o en combinación, se considera parte integral para reducir la acumulación de cadmio en tejidos de plantas comestibles de muchos cultivos (Zhou *et al.*, 2017). La variabilidad genotípica en la acumulación de cadmio entre las variedades de cacao se ha informado en varios estudios (Argüello *et al.*, 2019; Lewis *et al.*, 2018) encontrando que la concentración de cadmio en las hojas de las plántulas de 60 genotipos de cacao cultivados en suelos enriquecidos con cadmio oscila entre 1 mg/kg y 10

mg/kg. El Banco Internacional de Germoplasma de Cacao en Trinidad y Tobago también observó diferencias en la concentración de cadmio en los granos de cacao entre 100 de sus accesiones que crecen en condiciones de suelo muy similares (Lewis *et al.*, 2018). Un estudio de isótopos mostró una diferencia significativa en la transferencia de cadmio del suelo a los tejidos de las plantas entre el cacao nacional fino de aroma ecuatoriano y el híbrido CCN51 (Meter, Atkinson & Laliberte, 2019). En el norte de Honduras, un estudio que comparó 11 cultivares de cacao injertados encontró variaciones significativas en el contenido de cadmio de granos entre los cultivares y ninguna relación entre el contenido de cadmio de granos y del suelo. Estos resultados sugieren que las diferencias en el contenido de cadmio del grano de cacao podrían deberse a diferencias genotípicas en la carga de cadmio durante la maduración del grano (Engbersen *et al.*, 2019).

Conclusión

El entendimiento de la dinámica del cadmio, tanto en la planta de cacao como en su legislación, son esenciales para abordar el problema que nos acoge. El cadmio está naturalmente en el suelo, los profesionales del campo deben investigar en alternativas para la remediación de los niveles de este metal pesado en los agroecosistemas cacaoteros,

además de medición de los niveles de absorción de los clones regionales de cacao, para así identificar los mejores diseños de cultivo en nuestras regiones. Esta revisión nos deja abiertas las puertas a múltiples investigaciones.

Bibliografía

- Contreras, C. (2017). Análisis de la cadena de valor del cacao en Colombia: generación de estrategias tecnológicas en operaciones de cosecha y poscosecha, organizativas, de capacidad instalada y de mercado (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Argüello, D., Chavez, E., Laurysen, F., Vanderschueren, R., Smolders, E., & Montalvo, D. (2019). Soil properties and agronomic factors affecting cadmium concentrations in cacao beans: A nationwide survey in Ecuador. *Science of the Total Environment*, 649, 120–127.
- Arévalo-Gardini, E., Arévalo-Hernández, C. O., Baligar, V. C., & He, Z. L. (2017). Heavy metal accumulation in leaves and beans of cacao (*Theobroma cacao* L.) in major cacao growing regions in Peru. *Science of The Total Environment*, 605–606, 792–800.
- Barraza, F., Schreck, E., Lévêque, T., Uzu, G., López, F., Ruales, J., ... Maurice, L. (2017). Cadmium bioaccumulation and gastric bioaccessibility in cacao: A field study in areas impacted by oil activities in Ecuador. *Environmental Pollution*, 229, 950–963.
- Chavez, E., He, Z. L., Stoffella, P. J., Mylavarapu, R. S., Li, Y. C., Moyano, B., & Baligar, V. C. (2015). Concentration of cadmium in cacao beans and its relationship with soil cadmium in southern Ecuador. *Science of the Total Environment*, 533, 205–214.
- Arbulu Zuazo, A. (2017). Estudio de investigación para determinar el efecto de la diatomita y materia orgánica a nivel de vivero como alternativas de remediación al problema de cadmio en suelo en cultivos de cacao. Perú.
- Adriano, D. C. (2001). Trace Elements in Terrestrial Environments: Biogeochemistry, Bioavailability, and Risks of Metals. Retrieved from
- Chaney, R. (2012). Food Safety Issues for Mineral and Organic Fertilizers. In *Advances in Agronomy* (Vol. 117, pp. 51–116).
- Chavez, E., He, Z. L., Stoffella, P. J., Mylavarapu, R., Li, Y., & Baligar, V. C. (2016). Evaluation of soil amendments as a remediation alternative for cadmium-contaminated soils under cacao plantations. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(17), 17571–17580.
- Cryer, N. C., & Hadley, P. (2012). Cadmium Uptake and Partitioning Within the Cocoa Plant. Retrieved July 31, 2018, from Wroksnop/Reading University website.
- Dong, J., Mao, W. H., Zhang, G. P., Wu, F. B., & Cai, Y. (2007). Root excretion and plant tolerance to cadmium toxicity – a review. *Plant Soil Environment*, 2007(30571097), 193–200.
- Fauziah, C. I., Rozita, O., Zauyah, S., Anuar, A. R., & Shamshuddin, J. (2001). Heavy metal content in soils of Peninsular Malaysia grown with cocoa and in cocoa tissues. *Malaysian Journal of Soil Science*, 5, 47–58.
- Gramlich, A., Tandy, S., Andres, C., Paniagua, J. C., Armengot, L., Schneider, M., & Schulin, R. (2017). Cadmium uptake by cocoa trees in agroforestry and monoculture systems under conventional and organic management. *Science of The Total Environment*, 580, 677–686.
- Guo, H., Hong, C., Xiao, M., & Chen, X. (2016). Real-time kinetics of cadmium transport and transcriptomic analysis in low cadmium accumulator *Miscanthus sacchariflorus*. *Planta*, 244, 1289–1302.
- He, S., He, Z., Yang, X., Stoffella, P. J., & Baligar, V. C. (2015). Chapter Four–Soil Biogeochemistry, Plant Physiology, and Phytoremediation of Cadmium-Contaminated Soils (D. L. Sparks, Ed.). In (pp. 135–225).
- Hamid, Y., Tang, L., Sohail, M. I., Cao, X., Hussain, B., Aziz, M. Z., ... Yang, X. (2019). An explanation of soil amendments to reduce cadmium phytoavailability and transfer to food chain. *Science of The Total Environment*, 660, 80–96.
- Liva, M., Muñoz-olivas, R., Bouaid, A., Liva, M., Fernández-hernando, P., Luis, J., & Cámara, C. (2007). New perspectives for the application of diatomaceous earth to the remediation of polluted waters and soils. *Revista CENIC Ciencias Químicas*, 38(2), 283–287.
- Lewis, C., Lennon, A. M., Eudoxie, G., & Umaharan, P. (2018). Genetic variation in bioaccumulation and partitioning of cadmium in *Theobroma cacao* L. *Science of The Total Environment*, 640–641, 696–703.
- Mahar, A., Ping, W., Ronghua, L. I., & Zengqiang, Z. (2015). Immobilization of Lead and Cadmium in Contaminated Soil Using Amendments: A Review. *Pedosphere: An International Journal*, 25(4), 555–568.
- Nereida, S. (2011). Cadmium availability in two Venezuelan soils: phosphorus effect. *Revista Ingenieria UC.*, 18(2), 7–14.
- Ramtahal, G., Chang Yen, I., Hamid, A., Bekele, I., Bekele, F. L., Maharaj, K., & Harrynanan, L. (2018). The Effect of Liming on the Availability of Cadmium in Soils and Its Uptake in Cacao (*Theobromac acao* L.) In Trinidad & Tobago. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49(19), 2456–2464.
- Remigio, A. J. (2014). Determinación de procedimientos, interpretación de resultados de análisis y elaboración de interrelaciones de los diferentes estudios para determinar la concentración de cadmio en los granos de cacao.

- Rieuwerts, J. S. (2007). The mobility and bioavailability of trace metals in tropical soils: A review. *Chemical Speciation and Bioavailability*, 19(2), 75–85.
- Rodríguez Albarracín, H. S., Darghan Contreras, A. E., & Henao, M. C. (2019). Spatial regression modeling of soils with high cadmium content in a cocoa producing area of Central Colombia. *Geoderma Regional*, 16, e00214.
- Shahid, M., Dumat, C., Khalid, S., Niazi, N. K., & Antunes, P. M. C. (2016). Cadmium Bioavailability, Uptake, Toxicity and Detoxification in Soil-Plant System. In P. de Voogt (Ed.), *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology Volume 241* (pp. 73–137).
- Sasaki, A., Yamaji, N., Yokosho, K., & Ma, J. F. (2012). Nramp5 Is a Major Transporter Responsible for Manganese and Cadmium Uptake in Rice. *The Plant Cell*, 24(5), 2155–2167.
- Sarwar, N., Ullah, S., S Malhi, S., Zia, M., Naeem, A., Saif, S., & Farid, G. (2010). Role of Mineral Nutrition in Minimizing Cadmium Accumulation by Plants. *Journal of Science of Food and Agriculture*, 90.
- Sékara, A., Ciura, J., & Jędrszczyk, E. (2005). Cadmium and Lead Accumulation and Distribution in the Organs of Nine Crops: implications for phytoremediation. *Polish Journal of Environmental Studies*, 14(4), 509–516.
- Ullah, I., Wang, Y., Eide, D. J., & Dunwell, J. M. (2018). Evolution, and functional analysis of Natural Resistance-Associated Macrophage Proteins (NRAMPs) from *Theobroma cacao* and their role in cadmium accumulation. *Scientific Reports*, 8(1), 1–15.
- Ueno, D., Yamaji, N., Kono, I., Huang, C. F., Ando, T., Yano, M., & Ma, J. F. (2010). Gene limiting cadmium accumulation in rice. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(38), 16500–16505.
- Wang, Y., Yu, K.-F., Poysa, V., Shi, C., & Zhou, Y.-H. (2012). A Single Point Mutation in GmHMA3 Affects Cadmium (Cd) Translocation and Accumulation in Soybean Seeds. *Molecular Plant*, 5(5), 1154–1156.
- Zug, K. L. M., Huamaní Yupanqui, H. A., Meyberg, F., Cierjacks, J. S., & Cierjacks, A. (2019). Cadmium Accumulation in Peruvian Cacao (*Theobroma cacao* L.) and Opportunities for Mitigation. *Water, Air, & Soil Pollution*, 230.
- Zhou, J., Wan, H., He, J., Lyu, D., & Li, H. (2017). Integration of Cadmium Accumulation, Subcellular Distribution, and Physiological Responses to Understand Cadmium Tolerance in Apple Rootstocks. *Frontiers in Plant Science*, 8(June).
- Kabata-Pendias, A. (2010). *Trace Elements in Soils and Plants*, Fourth Edition. Retrieved from.
- Khan, M. A., Khan, S., Khan, A., & Alam, M. (2017). Soil contamination with cadmium, consequences and remediation using organic amendments. *Science of The Total Environment*, 601–602, 1591–1605.
- Mite, F., Carrillo, M., & Durango, W. (2010). Avances del monitoreo de presencia de cadmio en almendras de cacao, suelos y aguas en Ecuador. XII Congreso Ecuatoriano de La Ciencia Del Suelo. Santo Domingo, 17-19 de Noviembre Del 2010. Santo Domingo.
- Imse, M., Wigganhauser, M., Keller, A., Müller, M., Rehkämper, M., Murphy, K., Bigalke, M. (2019). Towards an understanding of the Cd isotope fractionation during transfer from the soil to the cereal grain. *Environmental Pollution*, 244, 834–844.
- Huamaní-Yupanqui, H. A., Huauya-Rojas, M. A., Mansilla-Minaya, L. G., & Neira-Trujillo, G. M. (2012). Presence of heavy metals in organic cacao (*Theobroma cacao* L.) crop. *Acta Agronómica*, 61(4), 309–314.
- Ahmad, A. (2017). Salinity in soil increased cadmium uptake and accumulation potential of two terrestrial plants, *International Journal of Biosciences (IJB)*, 10, p.132-142.
- Engbersen, N., Gramlich, A., Lopez, M., Schwarz, G., Hattendorf, B., Gutierrez, O., & Schulin, R. (2019). Cadmium accumulation and allocation in different cacao cultivars. *Science of The Total Environment*, 678.
- Meter A., Atkinson R.J. y Laliberte B. (2019). Cadmio en el cacao de América Latina y el Caribe – Análisis de la investigación y soluciones potenciales para la mitigación. *Bioersity International*, Roma, Julio 2019.
- Ministerio de Agricultura y Riego. (2019). Observatorio COMMODITIES: Cacao. Boletín de publicación trimestral: 1ª Edición. Perú.
- Organización Internacional de Cacao (ICCO). (2017). Informe Anual 2014/2015. Recuperado de https://www.icco.org/about-us/international-cocoa-agreements/cat_view/1-annual-report.html
- MADR. (2019). Cadena de cacao- Indicadores e Instrumentos 2019. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Recuperado de: <https://sioc.minagricultura.gov.co/Cacao/Pages/Documentos.aspx?RootFolder=%2FCacao%2FDocumentos%2F002%20%20Cifras%20Sectoriales&FolderCTID=0x0120003EDA72C8E75E664DA8175AEB0E4979D1&View=%7BC7E510CA-0215-472D-B6EB-025F8FA57883%7D>.
- Contreras, C. (2017). Análisis de la cadena de valor del cacao en Colombia: generación de estrategias tecnológicas en operaciones de cosecha y poscosecha, organizativas, de capacidad instalada y de mercado (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.