



CADMIO EN EL CACAO DE AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE

**Análisis de la
Investigación y
Soluciones Potenciales
para la Mitigación**

A. Meter, R.J. Atkinson and B. Laliberte

Descargo de responsabilidad: Los puntos de vista y opiniones expresados aquí son los de los contribuyentes y no necesariamente reflejan los puntos de vista y opiniones de sus respectivos institutos. En caso de preguntas y/o de comentarios específicos, diríjalos por favor a Bioversity International.

Bioversity International¹ es una organización global de investigación para el desarrollo. Tenemos una visión – que la biodiversidad agrícola nutre a las personas y sostiene el planeta. Nosotros proveemos evidencia científica, prácticas de gestión y opciones de políticas para usar y salvaguardar la biodiversidad agrícola y arbórea para lograr una seguridad alimentaria y nutricional global sostenible. Trabajamos con socios en países de bajos ingresos en diferentes regiones donde la biodiversidad agrícola y arbórea puede contribuir a mejorar la nutrición, la resiliencia, la productividad y la adaptación al cambio climático. Bioversity International es un Centro de Investigación CGIAR. El CGIAR es una asociación mundial de investigación para un futuro con seguridad alimentaria.
www.bioversityinternational.org

CAF – banco de desarrollo de América Latina tiene la misión de promover el desarrollo sostenible y la integración regional mediante el financiamiento de proyectos del sector público y privado, la provisión de cooperación técnica y otros servicios especializados. Fundado en 1970 y actualmente compuesto por 19 países – 17 de Latinoamérica y el Caribe, junto con España y Portugal – y 14 bancos privados, es una de las principales fuentes de financiamiento multilateral y un importante generador de conocimiento para la región. Como agencia implementadora del FMAM, CAF está trabajando en el desarrollo de una serie de proyectos que se alinean con las estrategias nacionales y los convenios internacionales suscritos por países miembros de CAF, así como la misión de CAF de promover el desarrollo sostenible y la integración regional. www.caf.com

Iniciativa Latinoamericana del Cacao (ILAC) es un proyecto establecido por la Unidad de Negocios Verdes/DSICC- Visepresidencia de Desarrollo Sostenible de CAF. Su objetivo es catalizar el desarrollo del cacao fino y aromático como una actividad económica sostenible y un elemento integrador de las personas que lo han utilizado de forma ancestral en América Latina, logrando un impacto social y ambiental significativo en la conservación de la biodiversidad asociada con el cacao, favoreciendo las PyMES y la entrada del cacao latinoamericano en mercados que valorizan el biocomercio y el suministro de calidad.
<http://scioteca.caf.com/handle/123456789/1110>

Citación: 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. Bioversity International, Roma, octubre 2019.

ISBN: 978-92-9255-136-0

ISBN: 978-980-422-162-0

Depósito legal: DC2019001810

Fecha de la versión: 4 noviembre 2019

© Bioversity International 2019

¹ Bioversity International es el nombre operativo del Instituto Internacional de Recursos Fitogenéticos (IPGRI)



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>

AGRADECIMIENTOS

El estudio fué coordinado por Brigitte Laliberte de Bioversity International y Federico Vignati de CAF – banco de desarrollo de América Latina.

Nos gustaría agradecer el apoyo proporcionado por CAF y su Iniciativa Latinoamericana de Cacao (ILAC), y por Bioversity International y el Programa de Investigación CGIAR sobre Bosques, Árboles y Agroforestería (FTA).

Reconocemos tambien el aporte de Carmen Rosa Chavez Hurtado de la DGA-MINAGRI, Perú.

Agradecemos a todas las instituciones e personas que proporcionaron información valiosa sobre los proyectos de investigación de cadmio y cacao. También agradecemos a todos aquellos que contribuyeron a la revisión y ayudaron a mejorar su calidad.

Agradecemos a René Gómez-García, Coordinador de la Unidad de Negocios Verdes de CAF. Adicionalment, agradecemos a Vincent Johnson de Bioversity International por sus comentarios y edición en inglés.

CONTRIBUYENTES

Nos gustaría expresar nuestro agradecimiento a todos aquellos que contribuyeron proporcionando información detallada y participando en la revisión de este documento:

Nombre	Institución	País
Daniel Bravo	AGROSAVIA	Colombia
Darwin Martinez	AGROSAVIA	Colombia
Anja Gramlich	Agroscope	Suiza
Andrew Meter	Bioversity International	Francia
Brigitte Laliberte	Bioversity International	Italia
Evert Thomas	Bioversity International	Perú
Rachel Atkinson	Bioversity International	Perú
Vincent Johnson	Bioversity International	Francia
Jayne Crozier	CABI	Reino Unido
Federico Vignati	CAF	Perú
Miguel Guzman	CAF	Uruguay
Nelson Larrea	CAF	Panamá
René Gómez-García	CAF	Perú
Gerardo Gallego	CIAT	Colombia
Mayesse DaSilva	CIAT	Colombia
Mirjam Pulleman	CIAT	Colombia
Michelle End	CRA	Reino Unido
Tony Lass	CRA	Reino Unido
Caleb Lewis	CRC	Trinidad y Tobago
Gideon Ramtahal	CRC	Trinidad y Tobago
Pathmanathan Umaharan	CRC	Trinidad y Tobago
Alfred Arthur	CRIG	Ghana
Paul Aikpokpodion	CRIN	Nigeria
Eduardo Chávez	ESPOL	Ecuador
Julia Manetsberger	European Cocoa Association (ECA)	Bélgica
Gracia Brisco	FAO-Codex Alimentarius	Italia
Monika Schneider	FIBL	Suiza
Jose Luis Zambrano	FONTAGRO/INIAP	Ecuador
Abdoellah Soetanto	ICCRI	Indonesia
Enrique Arévalo-Gardini	ICT	Perú
Manuel Carrillo	INIAP	Ecuador
Laurence Maurice	IRD	Ecuador
Fiorella Barraza	IRD/GET	Ecuador
David Argüello Jácome	KU Leuven	Bélgica
Francisco Gómez	Luker Chocolates	Colombia
Carmen Rosa Chavez	Ministerio de Agricultura y Riego	Perú
Daniel Kadow	Storck	Alemania
Alex-Alan Furtado de Almeida	UESC	Brasil
Dario Anherth	UESC	Brasil
Hugo Alfredo Huamani Yupanqui	UNAS	Perú
Magdalena López	Universidad de IKIAM	Ecuador
Beatriz Elena Guerra	Universidad de Santander	Colombia
Ramiro Ramirez	Universidad Nacional de Colombia	Colombia
Zhenli He	University of Florida	Estados Unidos
Frank Rasche	University of Hohenheim	Alemania
Konrad Martin	University of Hohenheim	Alemania
Rufus Chaney	USDA	Estados Unidos
Virupax C. Baligar	USDA	Estados Unidos

ACRÓNIMOS

AAS	Espectrometría de Absorción Atómica
ABC	ATP-binding cassette
AGROSAVIA	Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria
AMF	Hongos micorrízicos arbusculares
ALC	América Latina y el Caribe
ATP	Trifosfato de adenosina
BF	Factor de bioacumulación
Ca	Calcio
Ca(NO ₃) ₂	Nitrato de calcio
CABI	CAB International
CaCl ₂	Cloruro de calcio
CaCO ₃	Carbonato de calcio
CADMIUMF	Facilitador de difusión de cationes
CAOBISCO	Association of Chocolate, Biscuit and Confectionery Industries of Europe
CATIE	Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Costa Rica
Cd	Cadmio
CIAT	Centro Internacional de Agricultura Tropical
CIC	Capacidad del intercambio catiónico
Cl	Cloruro
CM	Masa de cacao
CRA	Cocoa Research Association UK
CRC	Cocoa Research Centre of the University of the West Indies, Trinidad y Tobago
CRIG	Cocoa Research Institute of Ghana
CRIN	Cocoa Research Institute of Nigeria
DGA	Dirección General Agrícola
DGT	Gradiente difusivo en película fina (método de extracción)
DTPA	Ácido dietileno-triamino-penta-acético
EAFIT	Universidad EAFIT - Escuela de Administración, Finanzas e Instituto Tecnológico, Colombia
EC	Conductividad eléctrica
ECA	European Cocoa Association
EDTA	Ácido etileno-diamino-tetra-acético
ENGIM	Ente Nazionale Giuseppini del Murialdo, Italia
ESPE	Universidad de las Fuerzas Armadas, Ecuador
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador
FAAS	Espectrometría de Absorción Atómica del Horno
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
FAS	Foreign Agricultural Services, USDA
FCC	Federation of Cocoa Commerce
FCIA	Fine Chocolate Industry Association, USA
FEDECACAO	Federación Nacional de Cacaoteros de Colombia
FER	Ferritina Fe (III)
FIBL	Instituto de Investigación para la Agricultura Orgánica, Suiza
FONTAGRO	Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria
FTA	CGIAR Research Program on Forests, Trees and Agroforestry
GEF	Fondo para el Medio Ambiente Mundial
GIZ	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit, Germany
H	Hidrógeno
ha	Hectárea
HCl	Ácido clorhídrico
HMA	Metales pesados ATPase
HNO ₃	Ácido nítrico
ICCRI	Indonesian Coffee and Cocoa Research Institute
ICCRI	Indonesian Coffee and Cocoa Research Institute
ICP-MS	Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente
ICP-OES	Espectrometría electroóptica con Plasma Acoplado Inductivamente

ICT	Instituto de Cultivos Tropicales, Perú
IDIAF	Instituto Dominicano de Investigaciones Agropecuarias y Forestales
IDIAP	Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá
IGAC	International Global Atmospheric Chemistry
ILAC	Iniciativa Latinoamericana del Cacao
INIA	Instituto Nacional de Innovación Agraria, Perú
INIAP	Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, Ecuador
INTA	Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, Costa Rica
IPNI	International Plant Nutrition Institute
IRD	Institut de recherche pour le développement, Francia
IREG	Transportador regulado por hierro
K	Potasio
kg	Kilogramo
KU Leuven	Katholieke Universiteit Leuven, Bélgica
MADR	Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia
mg	Milligramo
Mg	Magnesio
MINAGRI	Ministerio de Agricultura y Riego, Perú
Mn	Manganeso
N	Nitrógeno
NaNO ₃	Nitrato sódico
NAS	Nicotanimida sintasa
ng	Nanogramo
NGO	Organización no gubernamental
NH ₄ ⁺	Amonio
NO ₃ ⁻	Nitrato
NRAMP	Proteína del macrófago asociada a resistencia natural
NRCS	Natural Resources Conservation Service, USA
NRT	Transportador de nitrato
P	Fósforo
Pb	Plomo
pH	Potencial del hidrógeno
ppm	Partes por millón
PSU	Penn State University, USA
SAMS	S-adenosil metionina sintetasa
SENASA	Servicio Nacional de Sanidad Agraria, Peru
t	Tonelada
TF	Factor de translocación
UNDES	Universidad de Santander - Colombia
UE	Unión Europea
UESC	Universidade Estadual de Santa Cruz, Brasil
UNA	Universidad Nacional de Costa Rica
UNAL	Universidad Nacional de Colombia
UNAS	Universidad Nacional Agraria de la Selva
UNODC	United Nations Office on Drugs and Crime
USAID	United States Agency for International Development
USDA	Departamento de Agricultura de los Estados Unidos
UTE	UTE Universidad, Ecuador
VLIR	Consejo Universitario Flamenco, Países Bajos
YSL	Transportador de banda amarilla
ZIP	ZRT, proteína similar a IRT
ZnSO ₄	Sulfato de zinc

TABLA DE CONTENIDOS

Agradecimientos	
Contribuyentes	
Acrónimos	
Resumen Ejecutivo	1
1 Antecedentes	5
2 Fuentes de acumulación de cadmio en el suelo	10
2.1 Fuentes naturales del cadmio	10
2.2 Fuentes antropogénicas de cadmio	10
2.2.1 <i>Aplicación directa a suelos agrícolas</i>	11
2.2.2 <i>Agua de riego y sedimentos fluviales</i>	11
2.2.3 <i>Deposición atmosférica</i>	12
2.2.4 <i>Reciclaje de cadmio dentro de sistemas de producción del cacao</i>	12
3 Propiedades del suelo y biodisponibilidad del cadmio	13
3.1 Cadmio biodisponible	13
3.1.1 <i>Biodisponibilidad y especiación química del cadmio</i>	13
3.1.2 <i>Medición de cadmio biodisponible</i>	14
3.2 Propiedades del suelo que afectan la biodisponibilidad del cadmio a las plantas de cacao	15
3.2.1 <i>Relación entre las propiedades del suelo</i>	15
3.2.2 <i>Capacidad de Intercambio Catiónico</i>	17
3.2.3 <i>pH</i>	17
3.2.4 <i>Contenido de materia orgánica</i>	18
3.2.5 <i>Textura del suelo</i>	19
3.2.6 <i>Conductividad eléctrica</i>	20
3.2.7 <i>Macro y micronutrientes</i>	20
3.2.8 <i>Influencia de los microorganismos del suelo sobre el comportamiento del cadmio en los suelos</i>	21
4 La planta: mecanismos de absorción de cadmio, su partición y diferencias entre variedades	23
4.1 Mecanismo de absorción del cadmio	23
4.2 Partición de cadmio dentro de la planta	24
4.3 Diferencias genotípicas en la absorción y partición de cadmio	25
4.4 Tolerancia a los efectos tóxicos del cadmio	26
4.5 El efecto de la edad del árbol sobre la acumulación de cadmio	27
4.6 El efecto de la nutrición sobre la absorción de cadmio	27
4.7 El efecto de factores ambientales sobre la absorción de cadmio	28
4.8 Fitorremediación	28

4.9 El efecto del procesamiento post-cosecha	29
5 Soluciones de Mitigación	30
5.1 Evitar zonas de alto riesgo para el establecimiento de plantaciones	30
5.2 Reducir al mínimo la absorción de cadmio por el árbol del cacao	31
5.2.1 Manejo del suelo y enmiendas	31
5.2.2 Nutrición de la planta	32
5.2.3 Biorremediación	32
5.2.4 Variedades de baja acumulación	32
5.2.5 Otras prácticas agrícolas	33
5.3 Reducir los niveles de cadmio a través del procesamiento post-cosecha	33
5.4 Reducir los niveles de cadmio en chocolate mediante el mezclado	33
6 Proyectos de Investigación en curso sobre cadmio y cacao	34
6.1 Síntesis de proyectos en curso	35
6.2 Proyectos en curso	41
6.2.1 Regional – América Latina y el Caribe	41
6.2.2 Trinidad y Tobago	43
6.2.3 Perú	44
6.2.4 Ecuador	47
6.2.5 Colombia	53
6.2.6 Indonesia	64
7 Anexo	65
7.1 Anexo 1 – Contenido promedio de cadmio del grano informado por estudios en regiones de cultivo de cacao (referencias completas en las siguientes páginas)	65
7.1.1 Anexo 1.1 – Referencias completas	66
7.1.2 Anexo 1.2 – Contenido de cadmio de cacao en grano (mg/kg) informado en estudios realizados en África, Asia y ALC	67
7.2 Anexo 2 – Resultados de estudios de referencia	68
Bibliografía	70

RESUMEN EJECUTIVO

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.

Estamos cada vez más expuestos al cadmio en nuestra dieta. En respuesta a esto, la Unión Europea (UE) está estableciendo niveles máximos permisibles de cadmio en diferentes alimentos. En 2014, se establecieron los niveles máximos permitidos para el cadmio en los productos de cacao y chocolate vendidos en la UE. Esto se ha aplicado a partir del 1° de enero de 2019. Los niveles se basan en el consumo estimado de chocolate por diferentes grupos de edad.

El reglamento de la UE establece diferentes niveles para cuatro categorías de productos específicos de cacao y chocolate enumerados a continuación: 0.10 ppm para chocolate con leche con un contenido de materia seca total de cacao < 30%; 0.30 ppm para 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%; 0.80 ppm para chocolate con un contenido de materia seca total de cacao ≥ 50%; 0.60 ppm para cacao en polvo vendido al consumidor final o como ingrediente en cacao en polvo edulcorado vendido al consumidor final (chocolate para beber).

Se han establecido límites en Australia, Indonesia, Nueva Zelanda y Rusia, y en el Estado de California en los Estados Unidos. También hay una discusión activa de los límites recomendados a incluir en el *Codex Alimentarius*.

Si bien casi todos los límites se establecen en los productos de chocolate y cacao y no en el producto crudo, los compradores utilizan límites en los granos de cacao para garantizar que los productos finales estén por debajo de los niveles máximos permitidos establecidos. Estos caen entre 0.5 a 1.1 ppm.

En comparación con otras regiones de cultivo de cacao, los niveles de cadmio en cacao de América Latina y el Caribe (ALC) regularmente superan estos límites en ciertas áreas.

Gran parte del cacao producido en ALC es de pequeños agricultores cuyos medios de vida son particularmente vulnerables a las nuevas regulaciones. Muchos están involucrados en la producción de cacao de sabor fino de aroma que se usa comúnmente para productos con alto contenido de cacao y en productos de nicho de origen único, siendo el principal mercado Europa. Existe una necesidad apremiante de encontrar soluciones a corto, mediano y largo plazo para mitigar el problema.

Actualmente se están investigando o considerando soluciones basadas en el estado actual del conocimiento con respecto a i) las fuentes de acumulación de cadmio en los suelos, ii) los factores que afectan la biodisponibilidad del cadmio a las plantas de cacao, iii) los mecanismos fisiológicos de la absorción de cadmio por las plantas de cacao y la acumulación en los granos, iv) variaciones genéticas en la absorción y v) efectos de procesamiento post-cosecha en el contenido de cadmio en los granos.

El cadmio es absorbido por las plantas de cacao del suelo. Su presencia en el suelo 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 como la irrigación y la fertilización. En los suelos de cultivo de cacao de ALC, es probable que tanto las fuentes naturales como las antropógenas participen en el aumento de su contenido de cadmio, con la importancia relativa de diferentes fuentes según el área.

No todo el cadmio presente en el suelo es *biodisponible* para las plantas de cacao – que está disponible para la absorción por parte de las raíces. Si bien los niveles más altos de

contenido total de cadmio implican un mayor potencial de absorción de cadmio por parte de las plantas de cacao, se han reportado niveles altos de cadmio en granos de cacao que crecen en suelos con un contenido de cadmio total relativamente bajo. La biodisponibilidad del cadmio a las plantas está influenciada por múltiples propiedades del suelo: pH, contenido de materia orgánica, textura y mineralogía del suelo, capacidad de intercambio catiónico, conductividad eléctrica, contenido de macro y micronutrientes y la presencia de microorganismos. La alteración de algunas de estas propiedades puede reducir la biodisponibilidad del cadmio a las plantas de cacao.

El cadmio es absorbido por las plantas a través del transporte mediante procesos específicos y no específicos utilizados para iones, tales como Zn^{2+} , Fe^{2+} , Ca^{2+} , Cu^{2+} y Mg^{2+} . Después de la absorción por el sistema radicular, Cd^{2+} 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. Varios factores pueden afectar el proceso de absorción y repartición del cadmio en las plantas de cacao, como la edad del árbol o la nutrición de la planta. Particularmente interesante es la variabilidad en la absorción de cadmio a través de diferentes genotipos de cacao, lo que abre la posibilidad de identificar variedades de cacao de baja acumulación.

Los resultados de los estudios no permiten conclusiones claras, parece que las prácticas post-cosecha, como la fermentación, el secado, el tostado y el descascarillado, pueden afectar el contenido de cadmio en los granos de cacao.

Gran parte de la teoría de la absorción de cadmio existe, sin embargo solo algunas de las soluciones propuestas han sido o están en proceso de ser evaluadas en ALC. Además, las investigaciones hasta la fecha indican que es poco probable encontrar una solución única para reducir la acumulación de cadmio en los granos de cacao, debido a la heterogeneidad en las condiciones ambientales y del suelo en la región, las diferentes fuentes de cadmio, el uso de diferentes genotipos y las demandas de los compradores y sus mercados en la calidad del producto final.

Las soluciones también tienen diferentes implicaciones de costo, y su implementación efectiva requiere la motivación de una variedad de actores.

Sugerimos que un enfoque de jerarquía de mitigación puede ayudar a desarrollar un conjunto matizado e integrado de soluciones para reducir el nivel de cadmio en los granos de cacao y, por lo tanto, en el chocolate, considerando acciones desde la granja hasta el producto final que se adaptan a las condiciones específicas de la cadena de valor del cacao en cuestión:

- Evitar zonas de alto riesgo para el establecimiento de plantaciones
- Minimizar la absorción de cadmio por el árbol de cacao
- Reducir los niveles de cadmio mediante procesamiento post-cosecha
- Reducir los niveles de cadmio en chocolate altos en cadmio mediante el mezclado

Las acciones se resumen con más detalle a continuación:

- ***Evitar zonas de alto riesgo para el establecimiento de plantaciones:*** Hasta que existan soluciones rentables y eficientes para reducir la acumulación de cadmio en los granos de cacao, los sitios en riesgo de contaminación con cadmio deben evitarse para nuevas plantaciones. Si bien esto no es sencillo debido a la respuesta variable de los árboles de cacao a los niveles de cadmio del suelo, se podrían evitar las áreas que se sabe que tienen altos niveles de cadmio en el cacao. Se debe reconocer que, si bien muchos agricultores no pueden elegir o cambiar la ubicación de sus tierras agrícolas, pueden decidir qué cultivo plantar. En áreas de altos niveles de cadmio en el cacao, puede ser recomendable plantar otro cultivo, al menos a corto plazo.

- **Minimizar la absorción de cadmio por el árbol de cacao:** Algunas de las estrategias más prometedoras para reducir el cadmio en los granos de cacao implican minimizar su absorción por los árboles. Esto incluye la reducción del uso de fertilizantes contaminado por cadmio, y el agua de irrigación con alta concentración de sales. Esto se puede lograr agregando enmiendas de suelos que alteren las características del suelo, como el pH, o el contenido de materia orgánica del suelo para reducir la biodisponibilidad del cadmio a las plantas de cacao, aumentando el estado de nutrición de la planta que puede reducir la absorción de cadmio, agregando microorganismos o condiciones aptas para microbiota de suelo y otras especies de plantas que secuestran cadmio del suelo, y utilizando genotipos que son naturalmente bajos acumuladores. Mientras que la teoría es avanzada, los ensayos de campo apenas están comenzando.
- **Reducir los niveles de cadmio a través del procesamiento post-cosecha:** Puede ser posible reducir los niveles de cadmio en los granos de cacao a través de cambios en los métodos de procesamiento post-cosecha tradicionales de fermentación, secado, tostado y descascarillado. Se necesita más investigación, no solo para determinar el potencial de reducción de los niveles de cadmio, sino también para comprender los impactos en las cualidades físicas y de sabor.
- **Reducir los niveles de cadmio en chocolate altos de cadmio mediante el mezclado:** La mezcla de granos de cacao con alto contenido de cadmio con granos de otras regiones o incluso países con un contenido bajo de cadmio puede ser una solución efectiva a corto plazo para garantizar que los productos no excedan los límites reglamentarios. Sin embargo, para algunas áreas, esto resultará en la pérdida de la identidad regional y las diferencias de sabor que son clave para el mercado del cacao de sabor fino. Pues el cacao fino de aroma no se puede mezclar, un mecanismo detallado de trazabilidad de los niveles de cadmio puede permitir la separación de los granos antes de la fermentación.

Desde 2014 ha habido un aumento en los esfuerzos de investigación para abordar el problema de la acumulación de cadmio en el cacao, con el objetivo de encontrar soluciones. Actualmente hay al menos 28 proyectos en curso en ALC (Colombia, Ecuador, Perú y Trinidad y Tobago) e Indonesia.

Juntos, estos proyectos cubren la mayoría de las soluciones a corto, mediano y largo plazo actualmente consideradas. Varios proyectos están trabajando en la evaluación de enmiendas para modificar las propiedades del suelo, identificar genotipos de baja acumulación y biorremediación usando microorganismos. Dos áreas que siguen particularmente poco estudiadas son la fitorremediación (el uso de plantas para extraer cadmio en el suelo) y los aspectos socioeconómicos del problema (el impacto de las regulaciones en la cadena de valor global del cacao, la viabilidad económica para los agricultores y la ampliación del potencial de posibles soluciones de mitigación). El gobierno, el sector privado, los investigadores y los productores están avanzando en nuestro conocimiento para comprender mejor la aplicabilidad de las soluciones a corto, mediano y largo plazo propuestas actualmente por la teoría.

Los autores ofrecen las siguientes recomendaciones para ayudar a enfocar las acciones futuras:

1. Evaluar soluciones de mitigación en campos de agricultores en diferentes entornos y prácticas agrícolas que se centran principalmente en los métodos de manejo del suelo que son económica y prácticamente viables para los agricultores.

2. Identificar genotipos de baja acumulación y ensayar su uso como patrones y injertos en el campo.
3. Desarrolle de proyectos nacionales y regionales que utilicen metodologías comparables, y alinee las metodologías de investigación actuales para facilitar la comparación.
4. Identificar las fuentes de contaminación con cadmio y el efecto de los factores abióticos (temperatura, estrés hídrico, sombra) sobre la acumulación de cadmio en los granos.
5. Llenar la brecha de conocimiento con respecto a las bases fisiológicas de la absorción de cadmio, el transporte a través de la planta y la acumulación en granos de cacao.
6. Asegurarse de que las soluciones consideren la ganancia neta para los pequeños agricultores que viven en circunstancias económicas difíciles.
7. Identificar y cuantificar la efectividad de las soluciones de post-cosecha que podrían ser capaces de reducir el cadmio, manteniendo la calidad del cacao.
8. Comprometerse con la industria para comprender mejor los cambios en los niveles de cadmio durante la fabricación de productos de chocolate e identificar límites razonables para aplicar al producto crudo.
9. Establecer consistencia en los resultados analíticos de laboratorio, centrándose en la estandarización del muestreo, los métodos de extracción de cadmio y el análisis,
10. Establecer la utilidad de otros enfoques metodológicos para estimar los niveles de cadmio en granos de cacao.
11. Asegurar a los mercados y consumidores que el problema de contaminación con cadmio está localizado y no se aplica a un país entero o incluso a una región dentro del país.
12. Informar a los productores sobre los problemas y la investigación que se está llevando a cabo para alcanzar soluciones.

1 ANTECEDENTES

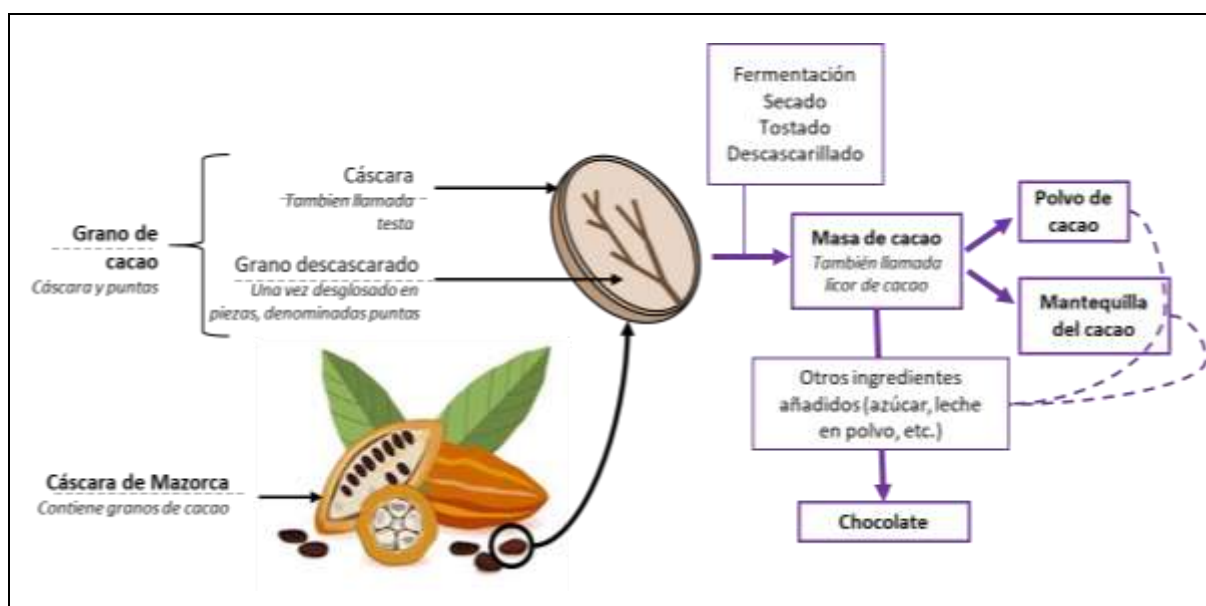
El cadmio es un metal pesado de origen natural, que no tiene una función conocida en los seres humanos. Se acumula en el cuerpo y afecta principalmente a los riñones, pero también puede causar desmineralización ósea. El cadmio atmosférico puede debilitar la función de los pulmones e incluso conducir al cáncer (Bernard 2008). Para reducir la exposición, la Unión Europea (UE) está estableciendo niveles máximos permitidos de cadmio en diferentes alimentos según la ingesta dietética. En 2014, la UE anunció los niveles máximos permitidos para el cadmio en los productos de cacao y chocolate que se venden en la UE (Tabla 1). Esto se ha aplicado a partir del 1° de enero de 2019. Los niveles se basan en los niveles estimados de consumo de chocolate por diferentes grupos de edad.

Tabla 1 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

Producto	Nivel máximo permisible (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%	0.80
Cacao en polvo vendido al consumidor final o como ingrediente en cacao en polvo edulcorado vendido al consumidor final (chocolate para beber)	0.60

Fuente: Reglamento de la Comisión Europea (UE) 488/2014 del 12 de mayo de 2014

Figura 1 Términos utilizados desde el grano de cacao hasta la barra de chocolate



Los niveles establecidos por la regulación de la UE son similares a los que se están discutiendo para su inclusión en el Codex Alimentarius¹ 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 definido².

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 (SanPin 2.3.2-1078-01) ha establecido el mismo umbral, pero para todo el chocolate y productos de chocolate, granos de cacao y derivados.

El Estado de California en Estados Unidos 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.

Tabla 2 Nivel máximo permitido establecido según la Proposición 65 del Acuerdo Industrial (San Pin 2.2-1078-01)

Composición del Producto de Chocolate (% del contenido total de cacao)	Nivel máximo de cadmio (ppm) establecido para:	
	2018-2025	2025
< 65%	0.400	0.320
65-95%	0.450	0.400
$\geq 95\%$	0.960	0.800

Fuente: San Pin 2.2-1078-01

Como se pudo observar ya, los niveles máximos permitidos en la regulación de la UE son para productos de chocolate y no para 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:

$$ML_{CM} = \frac{ML_{EU.P}}{X_{\%P}}$$

¹ El Codex Alimentarius es una colección de estándares alimentarios adoptados internacionalmente y textos relacionados desarrollados para ayudar a armonizar la seguridad, la calidad y la equidad de la calidad de los alimentos a nivel internacional. La 12ª Sesión del Comité sobre Contaminantes en los Alimentos (CCCF-12) 2018 Codex Alimentarius revisó el anteproyecto de niveles máximos para cadmio en chocolate y productos derivados del cacao que se proporciona en este documento

² [Descargar PDF](#) – Programa Conjunto FAO/OMS Sobre Normas Alimentarias, Comité del Codex Sobre Contaminantes de los Alimentos – Anteproyecto de niveles máximos para el cadmio en el chocolate y los productos derivados del cacao

Donde:

ML_{CM} = Nivel máximo de cadmio en la masa del cacao (mg/kg)

$ML_{EU.P}$ = Nivel máximo permitido de la UE en el producto terminado P (mg/kg)

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

Por ejemplo, en el caso del chocolate oscuro que contiene 70% de masa de cacao (sólidos secos de cacao), para el cual la normativa de la UE establece un límite máximo permitido de 0.8 mg de cadmio/kg en el producto terminado, el nivel máximo de cadmio en la masa de cacao será:

$$ML_{CM} = \frac{0.8}{0.7} = 1.1 \text{ mg/kg}$$

Esto se puede usar como una aproximación a los niveles de cadmio en los granos de cacao, ya que la masa de cacao sin procesar contendría una cantidad similar de cadmio al de los granos o las semillas de los que se origina. Se están desarrollando herramientas en línea utilizando cálculos similares para diferentes productos de chocolate¹. Si bien este enfoque es útil para los casos en que existe un vínculo directo entre un lote de granos de cacao y la masa de cacao utilizada para hacer un solo producto de chocolate, este no es siempre el caso. Como resultado, muchos compradores parecen preferir un contenido de cadmio relativamente bajo para garantizar que los granos se puedan usar en cualquier receta y los compradores están solicitando límites para la concentración de cadmio en granos entre 0.5 y 1.1 mg/kg.

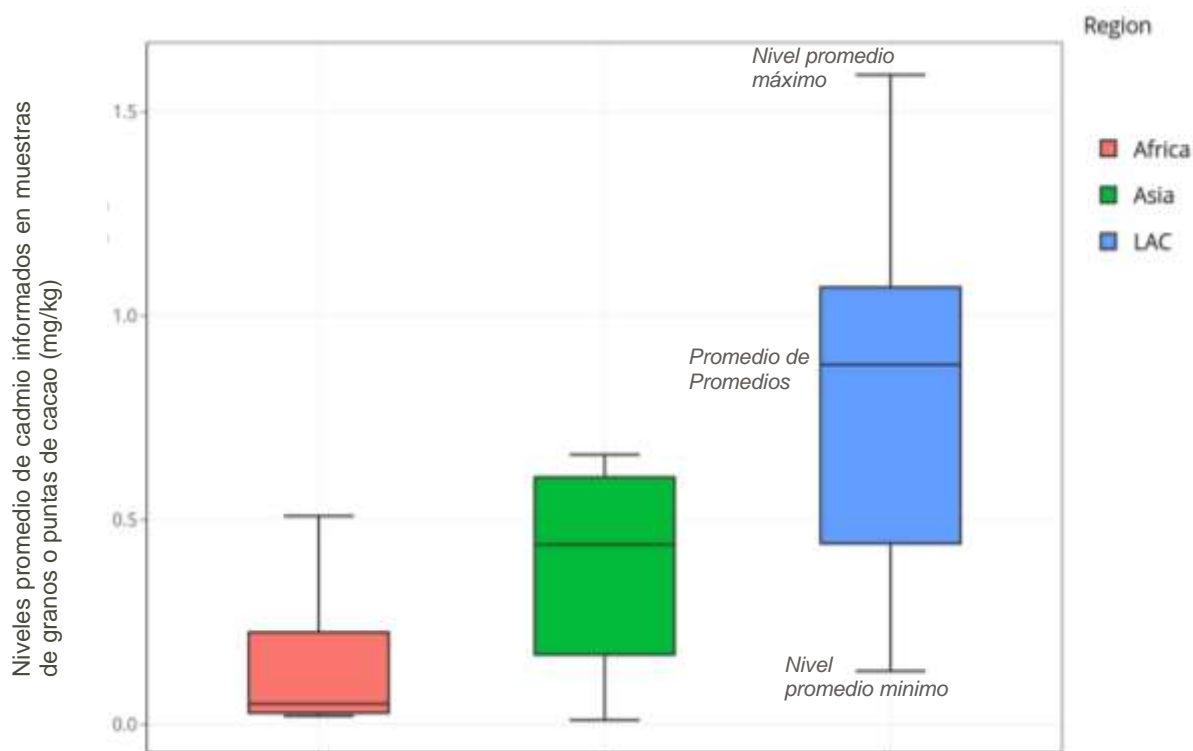
Es importante tener en cuenta que debido a la variabilidad del cadmio en los granos de cacao y al alto costo de los análisis de laboratorio, a menudo no se captura una estimación confiable de la concentración de cadmio en las pocas muestras analizadas. Esto puede dificultar el cálculo de cadmio en el producto final a partir de los niveles de cadmio en los granos. Como el reglamento de la UE no está escrito para los granos de cacao, no hay una estrategia de muestreo aceptada. Sin embargo, para otros productos similares que se venden en sacos, se sugiere que se tomen 5 muestras de cada saco de 60 kg, y para los productos enviados sueltos se piden 10 muestras por media tonelada (un análisis por cada 50 kg). Cada análisis esta hecho con 1kg.

Si bien estas regulaciones tienen un impacto global en toda la cadena de suministro de cacao, los pequeños productores de los países de América Latina y el Caribe (ALC) serán los más afectados. Los estudios en las regiones del mundo que producen cacao muestran que el contenido de cadmio en los granos de cacao es particularmente un problema en ALC (ver figura 2 y Anexo 1). Argüello et al. (2019) realizaron un estudio a nivel nacional en las principales regiones de cultivo de cacao de Ecuador, recolectando muestras de 159 granjas de cacao, y encontraron una concentración media de cadmio en los granos de 0.90 mg/kg (n=560), con 45% de muestras excediendo 0.60 mg/kg. Resultados similares también fueron encontrados por Barraza et al. (2017) y Chávez et al. (2015). La concentración de cadmio en granos de casi el 57% de los sitios de muestreo en un estudio en Perú (n=70) superó los 0.8 mg/kg (Arévalo-Gardini et al. 2017). Zug et al. (2019) informaron un contenido medio de cadmio de 2.46 mg/kg en una muestra de 40 granos de cacao de la región de Huánuco en Perú, el valor más alto en la literatura hasta la fecha – aunque los autores midieron el contenido en polvo desgrasado de granos de cacao secos y no de la semilla entera. El contenido de cadmio en estas muestras varió de 0.02 a un máximo de 12.5 mg/kg (Zug et al. 2019).

¹ ver <http://chocosafe.org>

Los estudios a nivel de granja muestran una variación considerable entre los sitios, con ciertas áreas o "puntos calientes" mostrando niveles de cadmio mucho más altos que otros (Gramlich et al. 2018; Bravo et al. 2018; Barraza et al. 2017; Argüello et al. 2019; Arévalo-Gardini et al. 2017; Tantalean Pedraza et al. 2017; Mite et al. 2010). Los resultados recientes de Ecuador mostraron variaciones en el contenido de cadmio en granos de cacao y en el suelo en múltiples niveles – provincias, cantones e incluso campos de agricultores – lo que implica un alto nivel de heterogeneidad en muchas escalas (Argüello et al. 2019).

Figura 2 Distribución de niveles promedio de cadmio en granos de cacao de África, Asia y ALC¹ (ver



el Anexo 1 para obtener más información)

Fuente: Elaboración propia

En general, los valores de contenido de cadmio en los granos de cacao reportados a través de ALC indican que el nuevo reglamento de la UE afectará a los productores de cacao en la región. Estos reglamentos son una amenaza potencial para el sustento de muchos pequeños agricultores, particularmente aquellos que producen cacao fino de aroma, comúnmente utilizado para productos con un alto contenido de cacao, así como productos de origen único donde la mezcla de cacaos pone en peligro el nicho de mercado.

En este contexto, existe una necesidad apremiante de identificar soluciones que reduzcan los niveles de cadmio en los granos de cacao y los productos finales de chocolate. Este documento revisa nuestra comprensión actual y la investigación activa para ayudar en esta tarea. Revisamos el conocimiento sobre las fuentes de contaminación con cadmio en los

¹ Este gráfico resume los datos de 21 estudios que midieron el contenido de cadmio de los granos o de las puntas de cacao – África (7 puntos de datos), Asia (4 puntos de datos) y ALC (19 puntos de datos). Los datos presentados son los promedios de cada estudio. El gráfico no tiene en cuenta el tamaño de la muestra y desviación estándar, ni diferencia entre los granos y las puntas. Ver Anexo 1 para información más detallada y referencias.

suelos, las propiedades del suelo que afectan la biodisponibilidad del cadmio y los mecanismos fisiológicos de la absorción de cadmio en los árboles de cacao. Presentamos los resultados de los ensayos para reducir la absorción de cadmio en el cacao y otros cultivos, y sugerimos directivas para posibles soluciones de mitigación a corto, mediano y largo plazo. Finalmente, se presenta una compilación de los proyectos de investigación en curso sobre cadmio y cacao para informarnos de los resultados que se pueden esperar en breve, e identificar posibles áreas de investigación e información pendientes.

2 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 ALC, 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.

2.1 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 (S. 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.

2.2 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-Pendias 2010; Rieuwerts 2007). Por lo tanto, los resultados de múltiples estudios en suelos de cultivo de cacao en ALC 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-Gardini 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). Los detalles de las fuentes clave de contaminación antropogénica con cadmio se presentan en las siguientes secciones.

2.2.1 Aplicación directa a suelos agrícolas

Los materiales directamente aplicados a los suelos pueden contener cadmio y contaminar los suelos. Estos incluyen lodos de aguas residuales (biosólidos), el compost, estiércol animal y fertilizante de fosfato (Adriano 2001; Alloway et al. 1999; Roberts 2014).

Los fertilizantes de fosfato son una de las fuentes más ubicuas de contaminación con cadmio en los suelos agrícolas de todo el mundo, ya que el cadmio a menudo ocurre en altas concentraciones en las rocas de fosfato de las que se produce el fertilizante (Chaney 2012). Las rocas de fosfato sedimentario pueden contener cadmio en concentraciones de 1 a 150 mg/kg – también se han registrado niveles de hasta 300 mg/kg (Fergusson 1990) – en comparación con fuentes volcánicas con 1 a 4 mg/kg. Cabe señalar que alrededor del 85% del fosfato usado en los fertilizantes proviene de depósitos sedimentarios (Roberts 2014).

La cantidad de cadmio que se aplica a una plantación de cacao mediante el uso de fertilizantes contaminados depende no solo de la concentración en la roca de origen, sino también del programa de fertilización que se está siguiendo. El uso pasado de la tierra también puede ser importante, ya que puede haber resultado en una acumulación de cadmio en el suelo (Alloway et al. 1999; Gramlich et al. 2018), aunque se espera que la lixiviación eliminara esto con el tiempo (Smolders, 2017).

En Malasia Peninsular, Zarcinas et al. (2004) atribuyeron los niveles de cadmio en los suelos de cultivo de cacao (media de 0.11 mg/kg) y granos de cacao (media de 0.66 mg/kg) al uso de fertilizantes con fosfato debido a una correlación significativa entre el contenido de fósforo y cadmio del suelo ($R^2=0.80$, $p < 0.01$). En ALC, algunos estudios también han indicado que los fertilizantes de fosfato son una posible fuente de cadmio en el suelo (Bravo et al. 2018; Gramlich et al. 2018) pero la baja aplicación de fertilizantes en muchas áreas puede limitar el impacto de esta fuente en las plantaciones.

Otras enmiendas de suelo también pueden contener altos niveles de cadmio. Estos incluyen compuestos de zinc y piedra caliza, los cuales a menudo se fabrican a partir de subproductos de la minería u otras industrias (Mortvedt 1985).

2.2.2 Agua de riego y sedimentos fluviales

Los ríos y arroyos que atraviesan áreas con altos niveles de cadmio pueden suministrar cadmio y otros metales pesados a las áreas agrícolas aguas abajo a través de aguas superficiales y subterráneas, o a través de sistemas de riego. El cadmio puede provenir de la meteorización de lecho de roca, pero las concentraciones pueden ser exacerbadas por la minería y la degradación de la tierra u otras operaciones (Smolders et al. 2003; Sun et al. 2010; Zhai et al. 2008; Oporto et al. 2007; Yang et al. 2006; Takijima et al. 1973; Mortvedt 1985). El agua no tiene que transportar altos niveles de cadmio para afectar los niveles del suelo: tanto las condiciones de agua salina como los ciclos de sequía-inundación pueden aumentar la 3.1.1 de cadmio presente en el suelo (Singh et al. 1999).

Investigaciones en plantaciones de cacao en ALC sugieren que el agua puede ser una fuente de contaminación de cadmio. Gramlich et al. (2018) sugirió que la deposición de sedimentos de las inundaciones de los ríos puede ser una fuente clave de cadmio en la capa superior del suelo en sus sitios de estudio en Honduras. Tres estudios en Ecuador han llegado a conclusiones similares. Un estudio en colaboración entre la cooperativa francesa Ethiquable y el Centro de Investigación IRD encontró que las concentraciones más altas de cadmio en granos de cacao se encontraron en granjas que eran inundadas regularmente por el río (con concentraciones que alcanzaron los 4.3 mg/kg; Maurice L., pers. comm.). Chávez et al. (2015) sugirieron que los niveles elevados de cadmio en los ríos utilizados para el riego podrían ser la fuente de altos niveles de cadmio del suelo observados en su

área de estudio, y Argüello et al. (2019) mencionaron que las muestras de granos con la mayor concentración de cadmio (5.28 – 10.4 mg/kg) procedían de una granja en una región con minería artesanal. En Perú, Llatance (2018) registró diferencias en las concentraciones de cadmio en muestras de suelo tomadas de suelos no inundados (< 0.008 mg/kg), inundados (0.043 mg/kg) y semi-inundados (0.11 mg/kg) en los que se retiene menos agua pero por un período de tiempo más largo.

2.2.3 Deposición atmosférica

Las principales fuentes de emisiones de cadmio a la atmósfera son los procesos industriales, incluyendo la minería y la fundición (especialmente de zinc), la producción de hierro y acero, las industrias de petróleo y gas, la incineración de desechos y la producción de cemento (Alloway y Steinnes 1999). El transporte de cadmio emitido a la atmósfera depende del tamaño de partícula con niveles muy altos de contaminación con cadmio ocurriendo hasta 30 km desde la fuente (Adriano 2001), y la contaminación a través de aerosoles se extiende a distancias mucho mayores. El cadmio de la deposición atmosférica se concentra en la capa superior del suelo húmico (Alloway y Steinnes 1999) y parece estar fácilmente disponible para las plantas (Adriano 2001).

No hay evidencia de que la contaminación atmosférica provoque un mayor contenido de cadmio en los granos de cacao, ya que las plantaciones normalmente no están ubicadas cerca de las zonas industriales. En Honduras, Gramlich et al. (2018) no encontraron influencia de la proximidad a sitios industriales en la concentración de cadmio en los suelos de cultivo de cacao. Barraza et al. (2017) no encontraron diferencias en el contenido promedio de cadmio en granos con la distancia de una refinería de petróleo en Esmeraldas, o de llamas de gas en la región del Amazonas y encontraron bajas concentraciones de cadmio en muestras de aerosol recolectadas en las granjas – por debajo del límite legislativo ecuatoriano de 0.5 ng/m³. Sin embargo, Acosta y Pozo (2013) informaron mayores concentraciones de cadmio en los granos de cacao de una granja cercana a la carretera Santo Domingo-Esmeraldas (Ecuador) en comparación con las granjas más lejanas, que atribuyen a la contaminación, pero no mostraron una significación estadística de sus hallazgos.

2.2.4 Reciclaje de cadmio dentro de sistemas de producción del cacao

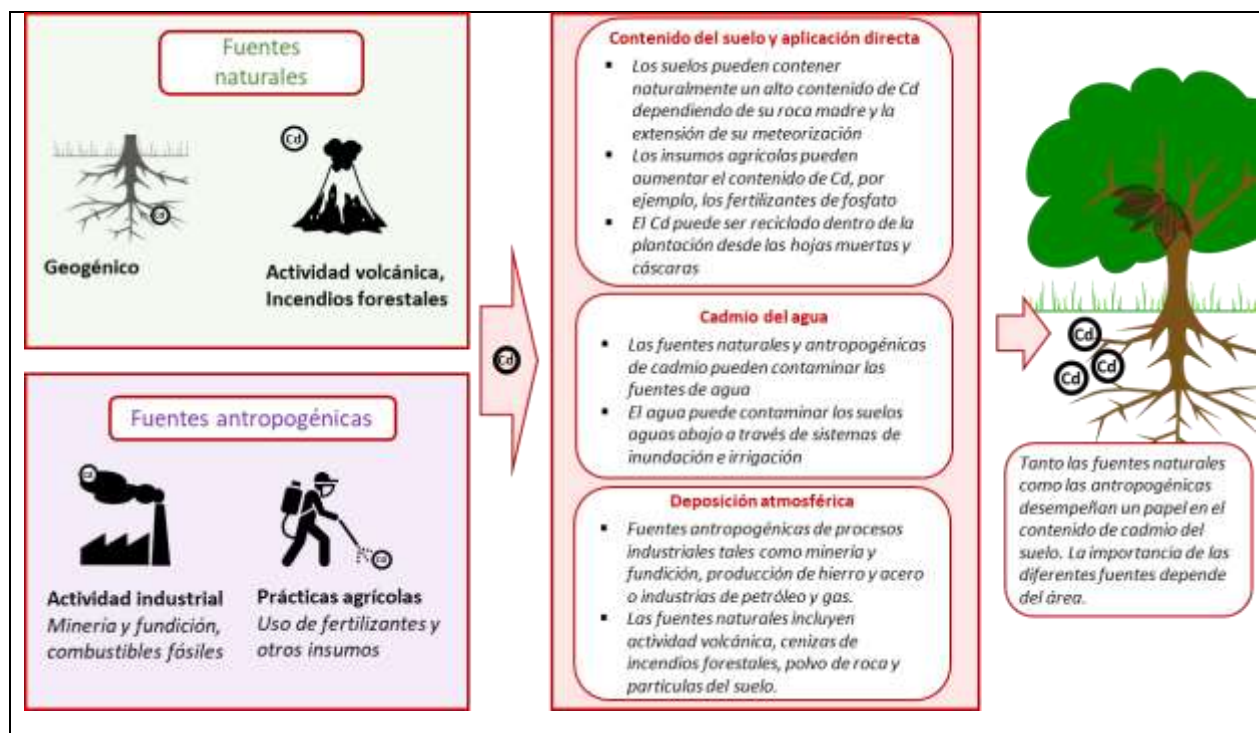
Cuando se reportan altas concentraciones de cadmio en los granos de cacao, las concentraciones también son altas o incluso más altas en las hojas y en las cáscaras de las mazorcas¹ (ver sección 4.2). Las hojas muertas y las cáscaras de mazorcas generalmente se dejan degradar en las plantaciones para 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 área de estudio. Sin embargo, la importancia relativa de esto en comparación con otros procesos aún no se ha entendido. El uso de

¹Aquí, la cascara de la mazorca se refiere a la cáscara de la fruta de la vaina del cacao que encierra todos los granos y la pulpa. La delgada cascarilla de un solo grano de cacao a veces se denomina cáscara o testa.

isótopos de cadmio estables para rastrear el reciclaje de cadmio entre el tejido en descomposición y el tejido vivo será útil para abordar esta brecha de conocimiento.

Figura 3 Posibles fuentes de entrada de cadmio a los suelos de cultivo de cacao



Fuente: Elaboración propia

3 PROPIEDADES DEL SUELO Y BIODISPONIBILIDAD DEL CADMIO

La acumulación de cadmio por las plantas de cacao está influenciada por la cantidad y disponibilidad de cadmio presente en el suelo. Los niveles más altos de contenido total de cadmio en el suelo implican un mayor potencial para la absorción de cadmio. Varios estudios han informado correlaciones positivas y estadísticamente significativas entre las concentraciones totales de cadmio en suelos y en granos de cacao (Ramtahal et al. 2016; Fauziah et al. 2001; Gramlich et al. 2018; Laila Marie Zug et al. 2019). Esto incluye un estudio a nivel nacional en Ecuador que hizo un mapeo de los niveles totales de cadmio en suelo y granos de cacao e identificó áreas problemáticas o "puntos calientes" (Argüello et al. 2019).

Sin embargo, el cadmio total del suelo no siempre es un buen indicador de cadmio en los granos de cacao, ya que solo una parte está disponible para las plantas (S. He et al. 2015; Shahid et al. 2016; Argüello et al. 2019; Gramlich et al. 2018, 2017; Remigio 2014). Entender la manera en que las propiedades del suelo afectan la biodisponibilidad de los metales y específicamente del cadmio en los suelos de cultivo de cacao es clave para desarrollar estrategias efectivas de mitigación del suelo.

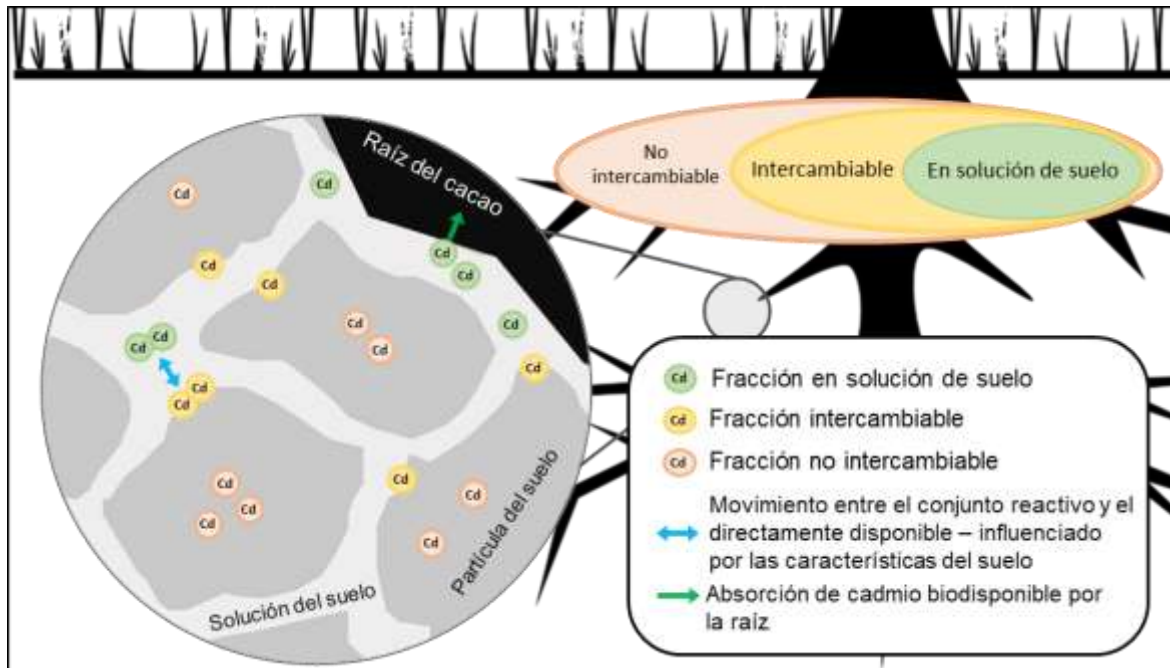
3.1 Cadmio biodisponible

3.1.1 Biodisponibilidad y especiación química del cadmio

En el suelo, los metales traza existen en muchas formas químicas y físicas, de las cuales no todas están disponibles, o *biodisponibles*, para la absorción por parte de organismos vivos (Adriano 2001; Singh et al. 1999). El contenido de cadmio del suelo se puede dividir en tres

fracciones anidados en función de la biodisponibilidad: total, cadmio intercambiable y cadmio en la solución de suelo (ver figura 4).

Figura 4 Fracciones de cadmio y biodisponibilidad en suelos [03]



Fuente: Elaboración propia

La fracción total contiene cadmio intercambiable, en la solución de suelo y no intercambiable (el cadmio que no está disponible y es poco probable que ingrese a la fracción intercambiable durante décadas, siglos o incluso más). La fracción intercambiable consiste en iones de cadmio adsorbidos en las superficies reactivas de la materia orgánica del suelo, óxidos metálicos hidratados ordenados de corto alcance y partículas de arcilla, y están potencialmente disponibles para la absorción por parte de la planta. La fracción en la solución de suelo está compuesta por los iones de cadmio libres o totalmente disueltos en la solución del suelo que están listos para ser absorbidos (Shahid et al. 2016; Pan et al. 2016). El movimiento desde el el intercambiable hacia solución de suelo se ve afectado por el pH del suelo, el contenido de materia orgánica, el contenido de arcilla y la reactividad, la capacidad de intercambio de cationes, la presencia de hidróxidos metálicos, la conductividad eléctrica, el contenido de macro y micronutrientes catiónicos y la presencia de microorganismos. Estas condiciones cambian en espacio y tiempo y con la profundidad del suelo. (Welch et al. 1999; Adriano 2001; He et al. 2015; Shahid et al. 2016).

3.1.2 Medición de cadmio biodisponible

3.1.2.1 Evaluación de cadmio biodisponible en el suelo

La cuantificación de la cantidad de cadmio en el suelo en cada una de las fracciones antes mencionadas requiere el uso de diferentes reactivos. El tamaño de la fracción intercambiable se puede determinar por extracción usando ácidos débiles (por ejemplo EDTA 0.05 M, HCl 0.1 M o HNO₃ 0.43 M), mientras que la fracción en la solución de suelo se mide con lisímetros o por una extracción del suelo utilizando sales débiles como CaCl₂, Ca(NO₃)₂, NaNO₃ o métodos de extracción DTPA (Pan et al 2016). El contenido total de cadmio del suelo generalmente se determina mediante la digestión con un ácido fuerte (EPA3050B para la digestión ácida de suelos – EPA 2015).

El cadmio dentro de la fracción intercambiable ocurre en muchas fracciones diferentes (por ejemplo, intercambiables, ligadas a óxido, ligadas a carbonato, ligadas a materia orgánica).

Varios estudios han calculado la importancia relativa de estas fracciones en el suelo al comparar su concentración con el nivel de cadmio en los tejidos de las plantas. Esto se lleva a cabo con métodos de extracción de pasos múltiples, utilizando sales neutras o ácidos de concentración cada vez mayor para extraer el cadmio de cada fracción (Rao et al. 2008).

En los estados nigerianos de Ondo y Ogun, Aikpokpodion et al. (2012b, 2012a) encontraron que las fracciones residuales y oxidables representan una gran parte del contenido total de cadmio en los suelos de cultivo de cacao. En general, se considera que estas fracciones no están disponibles para las plantas y están asociadas con la meteorización de las rocas madre. En Ecuador Chávez et al. (2016b) encontraron que las fracciones solubles en ácido y reducibles representaban la mayor parte del contenido total de cadmio del suelo. De las cinco fracciones que consideraron (soluble en agua, soluble en ácido, reducible, oxidable y residual), la fracción soluble en ácido se correlacionó más con el contenido de cadmio en los granos de cacao, lo que llevó a los autores a sugerir que este fue el principal contribuyente a la fracción de cadmio biodisponible en sus sitios de estudio.

Aunque la eficiencia y la previsibilidad de un solo tipo de extracción para medir el cadmio disponible depende de los factores del suelo y las especies que se estudian (Adriano 2001), Ramtahal, Yen, Ahmad, et al. (2015) y Chavez et al. (2015) encontraron que los extractantes potentes (reactivos quelantes de metales, Mehlich 3 y ácido clorhídrico (HCl) proporcionaron una mejor estimación del cadmio biodisponible que los más neutros debido a la importancia relativa de la fracción de cadmio soluble en ácido para cacao (Chavez et al. 2016b). Gramlich et al. (2018) encontraron que el mejor método de predicción de contenido de cadmio en los granos de cacao era mediante medidas de cadmio biodisponible en el suelo mediante extracción usando un gradiente de difusión a través de lamina fina (DGT) y métodos de extracción con Mehlich 3. También se pueden aplicar nuevos enfoques que utilizan composiciones de isótopos estables de cadmio para evaluar la importancia relativa de los insumos de cadmio antropogénicos y el reciclaje de cadmio, así como la transferencia de la fracción biodisponible a las plantas (Imseng et al. 2019, 2018). Se debe tomar en cuenta que dado que ninguno de los métodos de extracción estima el cadmio biodisponible con alta precisión y que diferentes estudios han utilizado diferentes métodos, la comparación de los niveles de cadmio biodisponible entre los estudios puede no ser posible.

3.1.2.2 Medición de la concentración de cadmio en el suelo y tejidos de plantas

El análisis confiable de la concentración de cadmio es clave para entender el problema. Tanto el protocolo de extracción, como la elección del instrumento analítico, y su calibración, juegan un papel importante en esto. Las máquinas de uso común incluyen la Espectrometría de Absorción Atómica (AAS), la Espectrometría de Absorción Atómica del Horno (FAAS), la Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS) y la Espectrometría electroóptico con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES). La elección más adecuada depende del nivel de cuantificación requerido, si se están midiendo uno o más metales traza, así como la limitación presupuestaria (Thermo Elemental 2002). Además, mientras que la estimación del cadmio total preparado con extracción de ácido fuerte es relativamente robusta, la digestión con ácidos débiles para estimar el cadmio biodisponible es mucho más difícil de analizar de manera confiable y puede requerir el uso de ICP-MS (McBride 2011).

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

3.2.1 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 (Adriano 2001; Singh et al. 1999; 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 ALC – Bolivia, Ecuador, Honduras, Perú y Trinidad y Tobago (véase el Anexo 2). 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 son lo suficientemente robustos para la comparación presentada en la Tabla 3 (ver referencias bajo la tabla). De estos, solo tres (Gramlich et al. 2017, 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.

Tabla 3 Resumen de los resultados de los estudios de referencia (ver el Anexo 2 para resultados detallados)

Propiedades del suelo		Efecto informado sobre la biodisponibilidad de cadmio y/o el contenido de cadmio en tejidos de cacao		Estudios*
Contenido de cadmio	Cadmio total del suelo	↑	Resultados consistentes a través de los estudios	2, 3, 4, 7, 5 (↑)
	Cadmio biodisponible (efecto sobre el contenido de cadmio en las partes de las plantas de cacao)	↑	Resultados consistentes a través de los estudios	2, 1 (↑)
pH	pH del suelo	↓	Resultados consistentes a través de los estudios	1, 2, 3 (↓)
MO	Materia orgánica	↓	Resultados consistentes a través de los estudios	1, 2, 3 (↓)
Material madre	Substrato geológico	Si	Resultados consistentes a través de los estudios	2,3
Textura del Suelo	Contenido de arcilla	↑ / ↓	Resultados inconsistentes	1, 2 (↑); 2 (↓)
	Contenido de arena	↓	Muy pocos resultados	8 (↓)
CADMIUM F	CIC	x	Resultados no concluyentes	
Salinidad	CE	x	Resultados no concluyentes	
Micro-macro-nutrientes u otros metales traza	Zn	x	Resultados no concluyentes	
	Fe	↑	Resultados constantes a través de los estudios	1, 2 (↑)
	P	↑ / ↓	Resultados inconsistentes	1 (↓); 5, 9 (↑)
	Pb	x	Resultados no concluyentes	
	Ca 2+	x	Resultados no concluyentes	
	Mg2+	↓	Muy pocos resultados	2 (↓)
	K	↓	Muy pocos resultados	2 (↓)
	Mn	↓	Muy pocos resultados	9 (↓)
Actividad microbiana del suelo	Colonización de micorizza	x	Resultados no concluyentes	

Propiedades del suelo		Efecto informado sobre la biodisponibilidad de cadmio y/o el contenido de cadmio en tejidos de cacao		Estudios*
Factores agronómicos	Aplicación de fertilizante	x	Resultados no concluyentes	
	Monocultivo vs agroforestería	Sí	Muy pocos resultados	1
Factores agronómicos	Orgánico vs convencional	Sí	Muy pocos resultados	3
	Edad de la plantación	↓	Muy pocos resultados	3 (↓)
	Diámetro del tronco	Sí	Muy pocos resultados	1
	Efecto cultivar	Sí	Muy pocos resultados	1
Otros factores	Altitud	x	Resultados no concluyentes	
	Proximidad a sitio industrial	x	Resultados no concluyentes	
	Impacto de actividades petroleras	x	Resultados no concluyentes	4 (x)

Fuente: Elaboración propia

*Estudios: 1 (Gramlich et al. 2017); 2 (Gramlich et al. 2018); 3 (Argüello et al. 2019); 4 (Barraza et al. 2017); 5 (Fauziah et al. 2001); 6 (Arévalo-Gardini et al. 2017); 7 (Huamani y Rojas, 2011) ; 8 (Huamani-Yupanqui et al. 2012); 9 (Jonas, 2016)

- ↑ El aumento conduce a una mayor biodisponibilidad de cadmio y/o contenido de cadmio en los tejidos de cacao
↓ El aumento conduce a una menor biodisponibilidad de cadmio y/o contenido de cadmio en los tejidos de cacao
Si Tiene un efecto sobre la biodisponibilidad de cadmio y/o el contenido de cadmio en tejidos de cacao
x Sin efecto estadísticamente significativo sobre la biodisponibilidad de cadmio y/o el contenido de cadmio en tejidos de cacao

3.2.2 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).

3.2.3 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; Sauvé et al. 2000) – aunque esto puede ser contrarrestado por la salinidad (ver sección 3.2.6). La mayoría de los estudios sobre el cacao encuentran correlaciones significativas y negativas entre el pH del suelo y el cadmio biodisponible (Low et al. 1994; Bravo et al. 2018; Barraza et al. 2017; Gramlich et al. 2018, 2017; Argüello et al. 2019) – la excepción ocurre en Malasia Peninsular (Fauziah et al. 2001). 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 en el norte de Perú (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; Shi et al. 2009). En Ramtahal et al. (2018) se presenta una metodología que utiliza los parámetros del suelo para calcular la cal necesaria para reducir la absorción de cadmio.

Se han realizado cuatro estudios sobre la biodisponibilidad de cadmio en suelos de cultivo de cacao en ALC. En un experimento de campo en el Perú, Zamora (2018) informó de una disminución significativa en el contenido de cadmio de los granos después de la aplicación de dolomita (a 1.8, 2.7 y 3.6 kg/planta) durante 12 meses, aunque no se proporcionan resultados del control ni del tamaño de la muestra. También en Perú (Schneider 2016) investigó el efecto de la cal apagada a 2.5 y 1.85 t/ha (dosis bajas) y 5.8 y 3.6 t/ha (dosis altas), sobre la biodisponibilidad del cadmio en los suelos de cultivo de cacao. Después de 5 meses, encontraron una diferencia significativa en el contenido biodisponible de cadmio del suelo entre el control y los tratamientos encalados, con una diferencia significativa en dosis altas de cal. (Schneider 2016). El efecto sobre la concentración de cadmio en granos no se midió debido a circunstancias imprevistas. Ramtahal et al. (2018) aplicó cal apagada a los árboles de cacao (3 kg/árbol) en un experimento de campo en Trinidad y Tobago y midió el pH del suelo, el cadmio biodisponible del suelo y el contenido de cadmio de las hojas de cacao todos los meses durante 18 meses. A pesar de las variaciones naturales del pH observadas en el suelo no tratado, se encontró un aumento significativo del pH en los suelos tratados con cal. El cadmio total de la hoja disminuyó tanto en árboles encalados como no tratados ($p < 0.05$), pero la reducción para los árboles encalados fue 3 veces mayor que la de los árboles no tratados. Los resultados serán corroborados con la medición de la concentración de cadmio en granos. Finalmente, Chavez et al. (2016a) investigaron el efecto de la zeolita sobre la biodisponibilidad de cadmio en un experimento de laboratorio aplicada al 0.5 y 2% del peso total con diferentes dosis de cadmio y tres tipos de suelo. No se observó un aumento del pH del suelo, y ni 0.01 M CaCl_2 ni los niveles Mehlich de cadmio extraíble se redujeron después de 28 días en ninguno de los tratamientos. Chavez et al. (2016a) usaron zeolita natural; se ha sugerido que las formas sintéticas son más efectivas para elevar el pH y reducir la biodisponibilidad del cadmio (Shi et al. 2009; Wingenfelder et al. 2005).

Un factor clave para la efectividad de las enmiendas de suelo que modifican el pH es asegurar que sean incorporadas en el suelo. En las plantaciones de cacao establecidas, esto puede ser un desafío debido al riesgo de dañar las raíces superficiales. Sin embargo, se ha demostrado que si se mezcla con materia orgánica (compost, abonos, biosólidos o abonos verdes), y se aplica en la superficie, la biodegradación de la materia orgánica causa la formación de sales de Ca que son solubles y se filtran en el suelo (Hue 1999; Liu et al. 2001).

3.2.4 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 cadmio. La capacidad de la materia orgánica para unirse con el cadmio se debe a su alta CIC, y el incremento de la actividad microbológica, 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 (Khan et al. 2017). Sin embargo, las sustancias húmicas a veces forman complejos solubles con cadmio y aumentan su movilidad (Q. B. He y Singh 1993; Khan et al. 2017).

El contenido de materia orgánica del suelo en las plantaciones de cacao en Bolivia y Honduras y 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. 2017, 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).

Hay estudios que han informado de una disminución en cadmio biodisponible del suelo y de absorción de cadmio por las plantas utilizando diversas enmiendas de materia orgánica como biochar (Anawar et al 2015; M. Ahmad et al 2014), gallinaza, estiércol de cerdo o ganado y compost (Khan et al. 2017), vermicompost (Pinto et al. 2016), carbón activado (Xu et al. 2014) o carbón (Kwiatkowska-Malina 2018). Se han realizado dos estudios sobre el efecto de las enmiendas de materia orgánica sobre la biodisponibilidad del cadmio en las plantaciones de cacao, utilizando compost y gallinaza (Zamora 2018) y vermicompost (Chavez et al. 2016a). Zamora (2018) aplicó altas dosis de compost y estiércol de pollo (30, 60 y 90 t/ha) en el campo y midió el efecto resultante sobre el contenido de cadmio en los granos. Aunque la respuesta fue variable, en general el compost redujo el cadmio en los granos de cacao y el estiércol de pollo no lo hizo. Chávez et al. (2016a) encontraron que una tasa de aplicación del 2% de vermicompost a podría reducir efectivamente el cadmio 0.01 M CaCl₂ 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.

El uso de biochar y otros carbones activados para la inmovilización de metales pesados ha demostrado ser eficaz en muchos otros cultivos y está ganando atención para su uso en el cacao – ver Rizwan et al. (2016) para una reseña. Dado que estos compuestos son altamente variables, también lo es su eficacia. Los parámetros más importantes que influyen en esto son la elección del material de origen (Xu et al. 2014; Fellet et al. 2014; Yasmin Khan et al. 2017), la temperatura de pirólisis (Cui et al. 2016), y las características del suelo del sitio (M. Ahmad et al. 2014; Anawar et al. 2015).

3.2.5 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-Pendias 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 (Adriano 2001; Kabata-Pendias 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 (Huamaní-Yupanqui et al. 2012; Gramlich et al. 2018, 2017; Chavez et al. 2015). 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.

3.2.6 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 (Khoshgoftar et al. 2004; A. 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 (Chaney pers. comm.). 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 (ver sección 4.7), ya que el Cl^- puede formar complejos con Cd^{2+} en la fracción intercambiable que está ligado a las partículas del suelo y ponerlos en solución (Singh et al. 1999; Grant et al. 1999). Es probable que esto sea más importante en suelos alcalinos (McLaughlin et al. 1998).

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 $350 \mu\text{Scm}^{-1}$.

3.2.7 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.

3.2.7.1 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 dihidrogeno 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, Huamaní-Yupanqui 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.

3.2.7.2 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). Esto se discute más en la sección 4.6. 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).

3.2.7.3 Sílice

Se sabe que el elemento sílice (SiO_2) reduce la biodisponibilidad del cadmio del suelo, así como su absorción y movimiento dentro de las plantas. (Tredler et al. 2005; 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.

(Shawabkeh 2000). 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 Zuazo 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).

3.2.7.4 Otros elementos

Muchos otros elementos en el suelo pueden influir en la absorción de cadmio (Shahid et al. 2016; Kabata-Pendias 2010). 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 (Sarwar et al. 2010; S. 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, 2017), 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).

3.2.8 **Influencia de los microorganismos del suelo sobre el comportamiento del cadmio en los suelos**

Hay resultados positivos y negativos sobre el efecto de los microorganismos del suelo (bacterias, levaduras y otros hongos, incluidos los hongos micorrízicos arbusculares) en la absorción de cadmio por las plantas. Es probable que esto se deba a la variedad de organismos en consideración y sus interacciones dentro de la comunidad del suelo. Las bacterias tolerantes a cadmio vienen de un amplio grupo filogenético que parece presentar diversos mecanismos para la inmovilización de cadmio en estudios *in vitro* y en experimentos de campo (Bravo et al. 2018) aumentado la bioprecipitación en Otavita o en formas secundarias de carbonato de cadmio que se solo forman debido al metabolismo microbiano (carbonatogénesis) (Bravo et al. 2011). Sin embargo, también se sabe que la actividad microbiana del suelo aumenta la disponibilidad de cadmio mediante la excreción de ácidos orgánicos y la subsiguiente solubilización de minerales que contienen cadmio (Shahid et al. 2016). Se ha observado en varios estudios que las plantas inoculadas con

micorrizas absorbían menos cadmio y/o eran más tolerantes a las altas concentraciones de cadmio en el suelo que las plantas sin micorrizas (Janoušková et al. 2006, 2005; Jiang et al. 2016). Sin embargo, así como los hongos micorrícicos amplían la capacidad de los sistemas de raíces para secuestrar los nutrientes del suelo, también se ha demostrado que aumentan la absorción de cadmio por parte de las plantas (Leyval et al. 1997; Gaur et al. 2004; Ramtahal et al. 2014). Hasta donde sabemos, las micorrizas no son muy buenas en la inmovilización del cadmio (Ramtahal et al. 2014). Sin embargo, investigación adicional debería estudiar la especificidad de los consorcios nativos de micorrizas en los sistemas de raíces del cacao para ver si el efecto de bloqueo de cadmio podría ocurrir en interacciones especializadas.

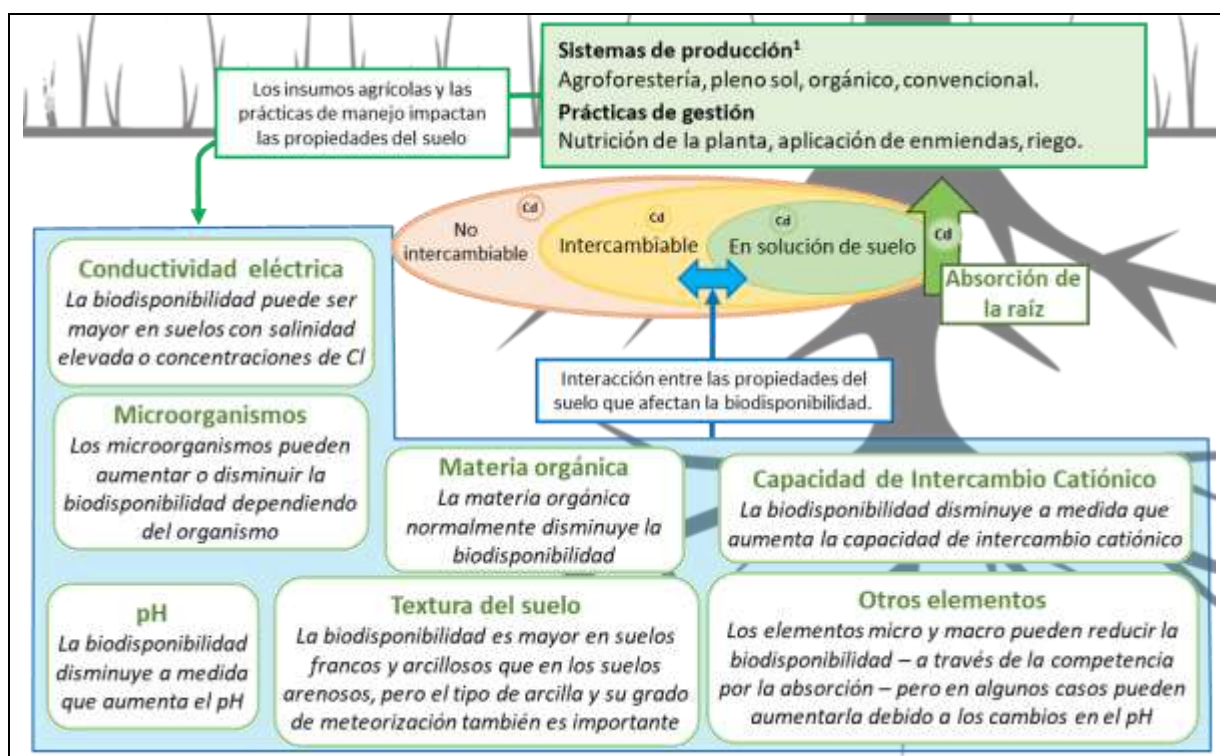
3.2.8.1 *Biorremediación*

La biorremediación utiliza organismos vivos para eliminar o neutralizar altas concentraciones de contaminantes de un sitio o fuente específica. Tanto las plantas (fitorremediación) como los microorganismos se utilizan para la remediación de suelos (Alvarez y Polti 2014). Aunque las plantaciones de cacao no crecen en suelos con concentraciones de cadmio excepcionalmente altas, el enfoque parece haber recibido mucho interés.

Los microorganismos pueden ser útiles para reducir la biodisponibilidad de un metal pesado en el suelo, o aumentarla para facilitar su eliminación mediante otras técnicas (la fitorremediación, por ejemplo). Varios microorganismos han sido identificados como altamente tolerantes al cadmio y capaces de reducir el cadmio disponible para las plantas (Beltrán-Pineda y Gómez-Rodríguez 2016). Estos incluyen microorganismos y consorcios microbianos identificados a partir de plantaciones de cacao en Colombia (Bravo et al. 2018; Caceres y Torres 2017).

Tres experimentos en macetas han investigado la efectividad de los microorganismos en la acumulación de cadmio en el cacao. Ramtahal et al. (2012) encontraron que la adición de un producto comercial que contiene micorriza dio lugar a un aumento de la concentración de cadmio en las plántulas. Usando un producto similar Jacome et al. (2016) informaron una disminución en la concentración de cadmio en las plántulas en suelos enriquecidos con 12 y 24 mg/kg de cadmio, pero no a niveles más bajos. Revoredo et al. (2017) investigaron el efecto de dos cepas diferentes de levaduras *Streptomyces* sobre la acumulación de cadmio en plantas de cacao en suelos enriquecidos con (100 mg/kg y 200 mg/kg). Además de los niveles de enriquecimiento muy altos, el tamaño de la muestra era demasiado pequeño para proporcionar resultados significativos. De manera similar, Pérez Moncada et al. (2019) encontraron una reducción en el contenido de cadmio en los granos de cacao cuando se cultivan con hongos micorrícicos arbusculares nativos en suelos con picos de 24 mg/kg de cadmio. Resultados no publicados utilizando levaduras aisladas a partir de un sitio minero en Perú han demostrado reducir los niveles de cadmio en el cacao en experimentos en macetas, pero se requiere una validación adicional (Duran pers. comm.).

Figura 5 Propiedades del suelo que afectan la disponibilidad de cadmio para las plantas de cacao



4 LA PLANTA. MECANISMOS DE ABSORCIÓN DE CADMIO, SU PARTICIÓN Y DIFERENCIAS ENTRE VARIEDADES Fuente: Elaboración propia

4.1 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.

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 NRAMP, ZIP, HMA) probablemente desempeñan un papel en la absorción de cadmio por las raíces, la carga en el xilema y el transporte dentro de la planta¹ (Guo et al. 2016; Clemens et al. 2013). 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 cadmio

¹ Estos incluyen la superfamilia de casete de unión ATP (ABC), HMA (ATPasa de metales pesados), ZIP (ZRT, proteína similar a IRT), NRAMP (proteína macrófaga asociada a resistencia natural), YSL (transportador de banda amarilla), NAS (nicotinamina sintasa), SAMS (S-adenosil-metionina sintetasa), FER (ferritina Fe (III)), CADMIUMF (facilitador de difusión de cationes), NRT (transportador de nitrato) e IREG (transportador regulado por hierro) (Shahid et al. 2016; Clemens et al. 2013)

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; Ueno et al. 2010). 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.

4.2 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 4).

Tabla 4 Resumen de los resultados de los estudios sobre las concentraciones de cadmio en diferentes partes de la planta de cacao

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

Fuente: Elaboración propia

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 (Sêkara et al. 2005). En contraste, 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 (ver también Takrama et al. 2015; Crozier 2012). Tales diferencias parecen tener una base genética (Laila Marie Zug et al. 2019; ver sección 4.3), pero algunos de los resultados pueden deberse a un artefacto de preparación del material (Lewis et al. 2018).

El tratamiento post-cosecha (fermentación y secado) también puede desempeñar un papel en la partición de cadmio en el grano (Ramtahal et al. 2015; Alianza Cacao 2018 pers. comms.). 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 método¹. 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.

4.3 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 (Nawaz et al. 2016; Savvas et al. 2010; Zhou et al. 2017). La variabilidad genotípica en la acumulación de cadmio entre las variedades de

¹ Espectrometría de masas de cuadrupolo triple de plasma acoplado inductivamente de ablación láser (LA-ICP-TQMS)

cacao se ha informado en varios estudios (Cryer et al. 2012; Arévalo-Gardini et al. 2017; Gramlich et al. 2017; Barraza et al. 2017; Argüello et al. 2019; Lewis et al. 2018). Arévalo-Gardini et al. (no publicado) encontró 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 (Barraza, Maurice et al. en prep.) 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. 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 (Engbersen et al. 2019). 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).

Un estudio general de asociación del genoma de más de 600 genotipos de cacao está actualmente en curso en la University of the West Indies. El estudio compara la variabilidad fenotípica en la acumulación de cadmio con la variabilidad en los marcadores genéticos que están vinculados a los genes involucrados. Parece que hay cuatro mecanismos de importancia: i) la densidad y la eficiencia del transportador de membrana que determina la absorción activa de cadmio en la raíz; ii) secuestro de cadmio en las vacuolas de la raíz para que no entre en el xilema; iii) transporte desde la raíz hasta el brote a través de la carga en el xilema y iv) translocación desde las hojas hasta los granos a través del floema. Comprender las bases genéticas de la variabilidad entre genotipos en la absorción, el secuestro y la translocación de cadmio puede ayudar en la selección de aquellos genotipos que parecen ser bajos acumuladores de cadmio para ensayos como patrones y injertos.

4.4 Tolerancia a los efectos tóxicos del cadmio

Según S. He et al. (2017), las plantas pueden mostrar signos de toxicidad cuando la concentración total de cadmio en el suelo supera los 8 mg/kg, la concentración de cadmio biodisponible en el suelo es > 0.001 mg/kg, o la concentración de cadmio en el tejido de la planta alcanza los 3–30 mg/kg (Solís-Domínguez et al. 2007; Chen et al. 2011). Si bien al menos dos de estos límites se han excedido en muchos de los estudios publicados sobre el cacao, no se han reportado daños fisiológicos.

Los hiperacumuladores son especies o genotipos que pueden acumular metales pesados en sus órganos supra superficiales en concentraciones de 100 a 1000 veces más altas que las encontradas en especies no hiperacumuladoras, sin sufrir ningún efecto fitotóxico discernible (Muszyńska et al. 2016). Van der Ent et al. (2013) sugieren que un hiperacumulador de cadmio debería ser capaz de tolerar niveles de 100 mg/kg en hojas sin efectos secundarios. Los experimentos de laboratorio con plántulas de cacao que usaron suelos enriquecidos en 50 y 100 mg/kg de cadmio encontraron cambios ultraestructurales y daños a la maquinaria fotosintética y al metabolismo antioxidante (Castro et al. 2015; Pereira et al. 2017), lo que sugiere que el cacao no puede ser considerado como un hiperacumulador. Sin embargo, Pereira et al. (2017) interpretaron el hecho de que las plantas translocaron cadmio a tejidos como un signo de tolerancia al cadmio, ya que las plantas intolerantes tienden a tener una mayor acumulación en las raíces (Verbruggen et al. 2009). Estos estudios también informaron evidencia de diferencias genotípicas en la tolerancia al cadmio (Castro et al. 2015; Pereira et al. 2017).

4.5 El efecto de la edad del árbol sobre la acumulación de cadmio

La edad de un árbol puede influir en su absorción de cadmio. Resultados de Argüello et al. (2019) y Alianza Cacao (no publicado) indicaron que las plantas jóvenes de cacao absorben más cadmio que las antiguas. Entre las posibles explicaciones para esto se encuentran que los árboles más viejos tienen raíces más profundas (aprovechando el subsuelo que contiene menos cadmio que la capa superior del suelo), las plantaciones más antiguas tienen un mayor contenido de Ca en la capa superior del suelo, bloqueando la absorción de cadmio (Argüello et al. 2019), los árboles más jóvenes crecen más rápido y la alta biomasa de los árboles más viejos reduce la concentración de cadmio a través de la dilución (Letten et al. 2011). Si bien Gramlich et al. (2017) encontraron una correlación positiva entre el diámetro del tronco del cacao y la absorción de cadmio, el diámetro del tronco estaba fuertemente relacionado con el sistema agroforestal y el tipo de cultivar, por lo que es posible que esta correlación no sea causal.

4.6 El efecto de la nutrición sobre la absorción de cadmio

La presencia de micro y macro nutrientes puede afectar la cantidad de absorción de cadmio por las raíces de las plantas (Christensen et al. 1999; Sarwar et al. 2010). Cd^{2+} comparte muchas propiedades con Zn^{2+} así como otros cationes divalentes incluyendo Ca^{2+} , Mg^{2+} , Mn^{2+} y Fe^{2+} , y puede competir con estos por las mismas membranas de transporte de raíz (Pereira et al. 2017; Castro et al. 2015; Gramlich et al. 2018).

Cd^{2+} y Zn^{2+} comparten la misma proteína de transporte en las células epidérmicas de la raíz en casi todas las especies de plantas estudiadas. La excepción es el arroz que acumula Cd^{2+} via la proteína de transporte Mn^{2+} (Green et al. 2003). Se ha informado que zinc inhibe fuertemente la absorción de cadmio por el trigo, la espinaca y la lechuga (Green et al. 2003; Paul y Chaney 2017). Sin embargo, otros estudios encontraron que los niveles más altos de zinc en los suelos llevaron a un aumento en la biodisponibilidad o absorción de cadmio por parte de las plantas (Adriano 2001; Sarwar et al. 2010; Kabata-Pendias 2010). Un factor que gobierna la relación entre zinc y cadmio es su concentración relativa en el suelo. Un bajo ratio de Cd:Zn (< 0.01) podría asegurar que las plantas se saturan rápidamente en zinc y limiten su absorción de cadmio como se observa en varios cultivos (Adriano 2001; Sarwar et al. 2010).

Los resultados de estudios correlativos sobre los niveles de zinc y cadmio en el suelo y los granos de cacao hasta el momento no han aumentado nuestra comprensión del papel del zinc en la reducción de la absorción de cadmio. Estos estudios han demostrado que un mayor contenido de zinc no está relacionado con una reducción de la absorción de cadmio en las plantas de cacao (Argüello et al. 2019; Crozier 2012; Arévalo-Gardini et al. 2017; Gramlich et al. 2017). En Honduras, Gramlich et al. (2018) encontraron una correlación débil pero positiva entre las concentraciones de zinc y cadmio en las hojas. En estudios realizados en Perú y Venezuela, Crozier (2012) encontró una relación fuerte y positiva entre el contenido de cadmio biodisponible y el contenido de zinc en el suelo. Más recientemente, Argüello et al. (2019) encontraron concentraciones de zinc en hojas de cacao que estaban dentro del rango de nutrición adecuada de la planta, pero la concentración de zinc de la hoja no se mantuvo en sus modelos que predicen las concentraciones de cadmio de la planta. Según los autores, esto sugiere que es poco probable que la deficiencia de zinc haya sido un factor que afecte la acumulación de cadmio en los granos de cacao – al menos dentro de su área de estudio (Argüello et al. 2019). Del mismo modo, Gramlich et al. (2017) no encontraron correlaciones negativas entre el contenido de zinc en el suelo y el contenido de cadmio en las hojas de cacao, cáscaras de mazorcas o granos, y concluyeron que los niveles más altos de zinc no reducirían la absorción de cadmio.

La aplicación de zinc como sulfato de zinc ($ZnSO_4$) para limitar la absorción de cadmio ha demostrado ser efectiva en lechugas y espinacas, especialmente cuando se combina con la

aplicación de piedra caliza para prevenir la acidificación del suelo (Paul y Chaney 2017). Para los cultivos frutales, también existe la opción de aplicar zinc a través de una aplicación foliar para evitar la acidificación del suelo mientras se inhibe la transferencia de cadmio a las frutas. En el único estudio publicado hasta ahora sobre el efecto de agregar zinc a los suelos con altos niveles de cadmio, Zamora (2018) encontró una modesta tendencia decreciente en el contenido de cadmio de grano de cacao cuando se aplicó sulfato de zinc (a 0.09, 0.18 y 0.27 kg por planta). Finalmente, los resultados preliminares de un pequeño ensayo de campo en Perú sugieren que la fertilización óptima puede reducir los niveles de cadmio en granos (Zamora pers. comm.). Se requieren ensayos más robustos para comprender el papel de la fertilización y zinc en la absorción de cadmio.

4.7 El efecto de factores ambientales sobre la absorción de cadmio

El cacao se cultiva bajo una gama de sistemas de producción y prácticas agrícolas. Estos van desde monocultivos a pleno sol hasta sistemas agroforestales donde los árboles frutales y de madera proporcionan sombra. Las prácticas agrícolas incluyen la producción orgánica y convencional y los sistemas de riego incluye la lluvia hasta la dependencia completa del riego. Estos factores pueden afectar las características del suelo, como el balance hídrico, la cantidad de materia orgánica, la disponibilidad de nutrientes, así como las fluctuaciones de temperatura (Deheuvels et al. 2014). Tal como se discutió en secciones anteriores, todos estos pueden influir en la disponibilidad de cadmio. Si bien el uso de diferentes especies de árboles de sombra también puede afectar la absorción de cadmio por parte del cacao (Gramlich et al. 2017; Argüello et al. 2019), el papel de los sistemas agrícolas en la acumulación de cadmio requiere un estudio adicional.

El cadmio se puede reciclar dentro del sistema a través de prácticas tales como dejar la hojarasca y las cáscaras de las mazorcas en el suelo (consulte la sección 2.2.4). La importancia relativa de esto en comparación con otros procesos aún no se ha entendido, pero es poco probable que sea alta. Además, el resultado de eliminar esta materia orgánica puede reducir los niveles de nutrientes disponibles para las plantas, la materia orgánica en el suelo y aumentar su erosión. Se requiere trabajo adicional para evaluar la contribución de este proceso de reciclaje a la acumulación de cadmio en los granos y para evaluar las compensaciones involucradas en la abstención de reincorporar la biomasa de cacao en los sistemas de producción.

El agua contaminada puede ser una fuente importante de cadmio en los sistemas de producción de cacao irrigado (ver sección 2.2.2). La evaluación de la entrada de iones de cadmio y cloruro en la granja a través del agua, así como el impacto de las inundaciones, se puede realizar a nivel de granja para determinar si los cambios en la gestión del agua podrían reducir la cantidad de cadmio biodisponible en el suelo. La remediación de agua se puede realizar con diatomita (Shawabkeh 2000; Liva et al. 2007) o un sistema de filtros. También existe la posibilidad de que la biorremediación pueda ayudar a purificar el agua de riego antes de su uso (Cazón et al. 2012).

4.8 Fitorremediación

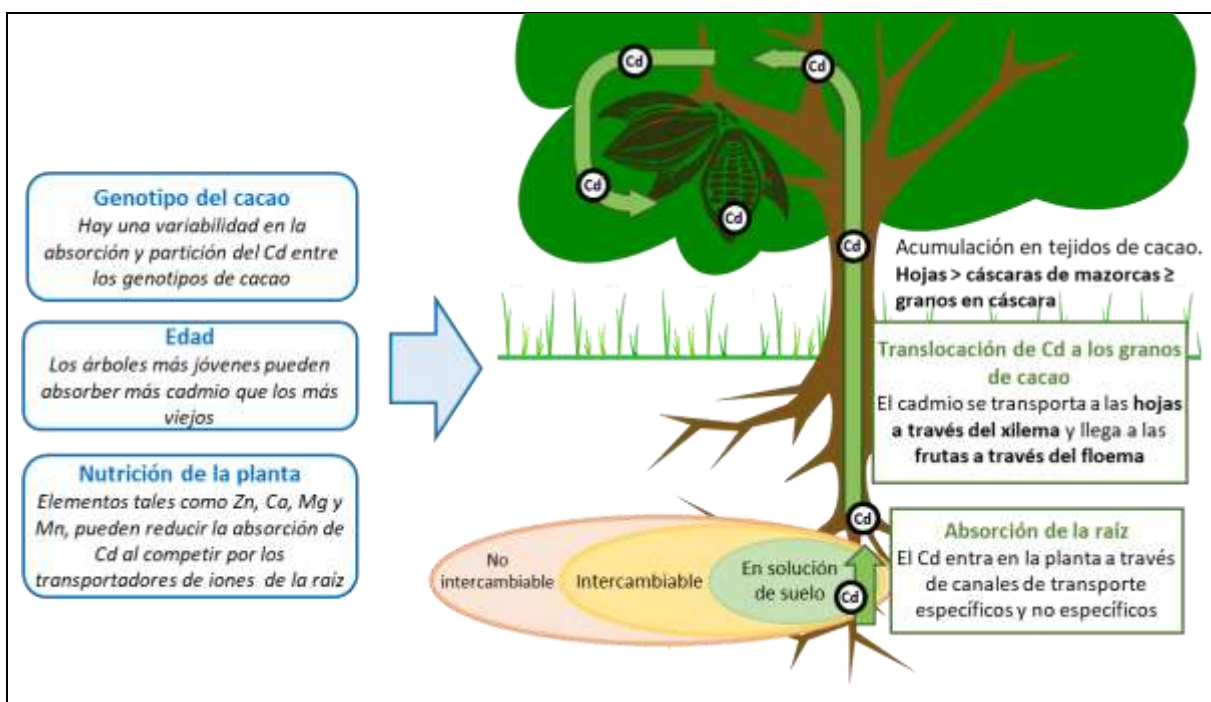
Una vez que los granos de cacao se han cosechado de los árboles, los procesos post-cosecha de fermentación, secado, tostado, y descascarillado comienzan.

Se ha observado que el cadmio parece migrar a la superficie del grano durante la fermentación y la remoción de la cáscara del grano puede resultar en una disminución en la concentración de cadmio dentro del grano (Alianza cacao, pers. comm.). Sin embargo, Kruszewski et al. (2018) midieron los niveles de cadmio en cacao crudo originario de Ecuador y República Dominicana y en los materiales de masa de chocolate procesado de tres fabricantes diferentes. No encontraron una disminución en el contenido de cadmio después del descascarillado y sugieren que la única solución es la adición de otras materias

primas (azúcar, leche, etc.), mientras que Mounicou et al. (2003) informan un aumento en la concentración de cadmio en granos a través de una reducción en el contenido de agua.

Dado que el cadmio es más soluble en condiciones ácidas, y que parte del proceso de fermentación resulta en la producción de ácidos, es necesario realizar más investigaciones para comprender la influencia general de la fermentación tradicional, el secado y tostado en el contenido de cadmio de los granos de cacao, así como los impactos en las cualidades físicas y de sabor. Esta información puede llevar al desarrollo de nuevas técnicas de fermentación. El sector privado está investigando algunos de los aspectos en este momento, utilizando microbiología (en granos) y nanotecnología (en masa de cacao) y ha logrado obtener una reducción en el contenido de cadmio entre 20% y 25%, pero hasta el momento no hay detalles disponibles. Si bien es una línea de investigación nueva, no se descarta su utilidad en la reducción del metal sin afectar las propiedades organolépticas de sabor y aroma de los cacaos especiales de ALC.

Figura 6 Absorción y partición de cadmio dentro de la planta de cacao



Fuente: Elaboración propia

4.9 El efecto del procesamiento post-cosecha

Una vez que los granos de cacao se han cosechado de los árboles, los procesos post-cosecha de fermentación, secado, tostado, y descascarillado comienzan.

Se ha observado que el cadmio parece migrar a la superficie del grano durante la fermentación y la remoción de la cáscara del grano puede resultar en una disminución en la concentración de cadmio dentro del grano (Alianza cacao, pers. comm.). Sin embargo, Kruszewski et al. (2018) midieron los niveles de cadmio en cacao crudo originario de Ecuador y República Dominicana y en los materiales de masa de chocolate procesado de tres fabricantes diferentes. No encontraron una disminución en el contenido de cadmio después del descascarillado y sugieren que la única solución es la adición de otras materias primas (azúcar, leche, etc.), mientras que Mounicou et al. (2003) informan un aumento en la concentración de cadmio en granos a través de una reducción en el contenido de agua.

Dado que el cadmio es más soluble en condiciones ácidas, y que parte del proceso de fermentación resulta en la producción de ácidos, es necesario realizar más investigaciones para comprender la influencia general de la fermentación tradicional, el secado y tostado en el contenido de cadmio de los granos de cacao así como los impactos en las cualidades físicas y de sabor. Esta información puede llevar al desarrollo de nuevas técnicas de fermentación. El sector privado está investigando algunos de los aspectos en este momento, utilizando microbiología (en granos) y nanotecnología (en masa de cacao) y ha logrado obtener una reducción en el contenido de cadmio entre 20% y 25%, pero hasta el momento no hay detalles disponibles. Si bien es una línea de investigación nueva, no se descarta su utilidad en la reducción del cadmio en los granos de cacao por el bloqueo del flujo de cadmio. Sin embargo, las propiedades organolépticas deberían ser monitoreadas para garantizar que las cualidades del cacao fino y armático no se vean afectadas.

5 SOLUCIONES DE MITIGACIÓN

Una jerarquía de mitigación puede ayudarnos a desarrollar un conjunto matizado e integrado de soluciones para reducir el nivel de cadmio en los granos de cacao y, por lo tanto, en el chocolate, considerando acciones desde la granja hasta el producto final que se adaptan a las condiciones específicas de la cadena de valor del cacao.

- Evitar zonas de alto riesgo para el establecimiento de plantaciones
- Minimizar la absorción de cadmio por los árboles de cacao.
- Reducir los niveles de cadmio a través del procesamiento post-cosecha
- Reducir los niveles de cadmio en chocolate altos en cadmio mediante el mezclado

Es poco probable que exista una solución única para reducir la acumulación de cadmio en los granos de cacao debido a la heterogeneidad en las condiciones ambientales y del suelo en la región, las diferentes fuentes de cadmio, el uso de diferentes genotipos y las demandas de los compradores y sus mercados sobre la calidad del producto final.

Las soluciones también tienen diferentes implicaciones de costo, y su implementación efectiva requiere la motivación de una variedad de actores. Debe tenerse en cuenta que las soluciones que se están desarrollando para su aplicación en la plantación deben ser factibles para los productores de la región que, en general, cultivan cacao a pequeña escala y con recursos financieros y técnicos limitados. Si bien se espera que muchas de las soluciones mejoren la salud del suelo y aumenten la productividad, aumentando el rendimiento del cacao y ayudando así a cubrir los costos adicionales requeridos en los nuevos enfoques de manejo, este no siempre es el caso. Otras soluciones, como el tratamiento del agua de riego, pueden tener costos de implementación fuera del alcance de los productores.

Además, aunque gran parte de la teoría de las medidas de mitigación existe, solo algunas de las soluciones identificadas han sido o están en proceso de ser evaluadas en ALC, y se necesita más investigación para lograr conclusiones claras sobre su aplicabilidad a escalas mayores y en diferentes condiciones ambientales. Otras soluciones posibles aún no han sido ensayadas.

5.1 Evitar zonas de alto riesgo para el establecimiento de plantaciones

Hasta que existan soluciones rentables y eficientes para reducir la acumulación con cadmio en los granos de cacao, los sitios en riesgo de contaminación con cadmio deben ser evitados para nuevas plantaciones. Si bien un análisis del suelo puede ayudar, la identificación de áreas de alto riesgo no siempre es sencilla, ya que el contenido total de cadmio del suelo y la biodisponibilidad del cadmio pueden variar ampliamente dentro de un área pequeña (Argüello et al. 2019). Además, el cacao cultivado en suelos que contienen

niveles relativamente bajos de cadmio aún puede acumular altas concentraciones de cadmio en los granos. Como tales, los umbrales reguladores del cadmio del suelo para tierras agrícolas y agua de riego (p.e. Perú¹) pueden no ser muy informativos ya que el cadmio total del suelo por sí solo no siempre es un indicador confiable. Una mejor estrategia podría ser evitar el establecimiento de nuevas plantaciones dentro de las áreas de cultivo de cacao que se sabe que tienen problemas para vender su cacao para la exportación. Este enfoque requiere un conocimiento detallado de los niveles de cadmio en granos en una región particular, información que se está desarrollando en muchas de las regiones productoras de cacao. Una mejor comprensión de las fuentes de contaminación con cadmio y la evaluación de las áreas de riesgo basada en técnicas de mapeo digital de suelos utilizando covariables ambientales podrían ayudar a definir pautas efectivas para establecer nuevas plantaciones de cacao.

Debe reconocerse que, si bien muchos agricultores no pueden elegir o cambiar la ubicación de sus tierras agrícolas, pueden decidir qué cultivo cultivar en sus tierras. Por lo tanto, hasta que se hayan desarrollado soluciones, se puede recomendar a los agricultores de las áreas que se cree que tienen un alto riesgo de acumulación de cadmio en el cacao que planten otro cultivo, al menos a corto plazo.

5.2 Reducir al mínimo la absorción de cadmio por el árbol del cacao

Algunas de las estrategias más prometedoras para reducir el cadmio en los granos de cacao implican minimizar su absorción por los árboles. Esto se puede lograr i) agregando enmiendas al suelo que alteran las características del suelo, como el pH o el contenido de materia orgánica del suelo para reducir la biodisponibilidad del cadmio a las plantas de cacao, ii) aumentando el estado de nutrientes de la planta que pueden reducir la absorción de cadmio, iii) agregando microorganismos y otras especies de plantas que secuestran cadmio del suelo, y iv) utilizando genotipos que son naturalmente bajos acumuladores.

5.2.1 Manejo del suelo y enmiendas

Si bien el desarrollo de un conjunto de soluciones efectivas aún está en su infancia, una vez que se han detectado altas concentraciones de cadmio en los granos de cacao en una plantación, un análisis del suelo puede ayudar a identificar qué enfoque o enfoques de manejo del suelo son probables de ser los más efectivos.

5.2.1.1 El pH del suelo

Las estrategias dirigidas a aumentar el pH del suelo para reducir la biodisponibilidad del cadmio en las plantas de cacao que crecen en suelos ácidos parecen tener un gran potencial como soluciones a corto – ver sección 3.2.3 – y mediano plazo y existe la necesidad de ensayos más grandes con una mayor duración para evaluar el potencial de estas estrategias en diferentes ambientes. También es importante asegurar que la aplicación superficial de materiales de cal pueda penetrar en la zona de la raíz en el suelo, mediante la combinación con materia orgánica.

Cabe señalar que hay ejemplos de cacao que crece en suelos con pH neutro a alcalino que tienen altos niveles de cadmio en sus granos (Remigio 2014). Además, en áreas donde se prohíben algunas fuentes de material de encalado debido a su uso en la fabricación de cocaína, será necesario utilizar enmiendas alternativas como el biochar.

¹ [Descargar PDF](#) – Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM

5.2.1.2 *Materia orgánica*

El aumento del contenido de materia orgánica del suelo es una solución prometedora y rentable para reducir la biodisponibilidad del cadmio en los suelos – ver sección 3.2.4. Esto incluye el uso de abonos, ácidos fúlvicos y biochar entre otros. Los resultados iniciales son alentadores. Sin embargo, se debe tener en cuenta que algunas enmiendas de materia orgánica pueden contener altos niveles de metales pesados y deben analizarse para determinar el contenido de cadmio antes de su aplicación (Khan et al. 2017).

5.2.1.3 *Sílice*

Se necesitan más investigaciones en ensayos de campo para evaluar el potencial de aplicación de diatomita como fuente de sílice para reducir el contenido de cadmio en el agua contaminada y la biodisponibilidad del cadmio en los suelos, aunque su eficacia conocida en la filtración de agua sugiere su utilidad.

5.2.2 **Nutrición de la planta**

Como los nutrientes y elementos del suelo pueden influir en la biodisponibilidad y la absorción del cadmio por parte de las plantas de cacao, es probable que la nutrición adecuada de las plantas sea importante – ver sección 4.6. Los productores de cacao en ALC comúnmente no aplican niveles óptimos de fertilizante, y se debe prestar más atención a la inclusión de este aspecto en los ensayos sistemáticos. Para aquellos que aplican fertilizantes de fosfato y zinc, es importante asegurarse de que no contengan altos niveles de cadmio ya que en muchos países de América Latina faltan regulaciones.

Es probable que el papel del zinc sea especialmente importante para ayudar a reducir la absorción de cadmio, ya sea aplicado directamente en el suelo (con enmiendas de encalado para evitar la acidificación del suelo) o mediante una pulverización foliar. Esto requiere más ensayos.

5.2.3 **Biorremediación**

Las plantas y los microorganismos que se han identificado como hiperacumuladores de cadmio se han propuesto para la remediación del suelo en las plantaciones de cacao, aunque no hay resultados de ensayos de campo – ver secciones 3.2.8 y 4.8. El concepto de biorremediación se desarrolló para suelos con un contenido de metales pesados excepcionalmente alto, que no es el caso de las plantaciones de cacao en ALC. La utilidad en suelos con concentraciones relativamente bajas de cadmio sigue siendo poco clara. Además, la biorremediación es más eficiente en suelos ácidos donde el cadmio está biodisponible. Esta condición es contraria a todas las otras soluciones de mitigación de suelos discutidas arriba. Una complicación adicional se asocia con la recolección oportuna y la eliminación segura de la biomasa de los hiperacumuladores de plantas que pueden ser difíciles de implementar en áreas rurales. Las evaluaciones de campo son necesarias para sopesar la viabilidad del uso de microorganismos y plantas hiperacumuladoras para reducir la biodisponibilidad de cadmio.

5.2.4 **Varietades de baja acumulación**

Existe evidencia de una amplia gama de variabilidad natural entre los genotipos con respecto a la absorción de cadmio y la partición en el cacao – ver sección 4.3. Es probable que la identificación de genotipos sea una parte muy importante de la solución a medio y largo plazo, y especialmente en áreas con altos niveles de cadmio en el suelo.

Una mejor comprensión de la base genética de esta variación es clave para poder identificar rizomas que absorben menos cadmio e impiden su posterior translocación a vástagos que transportan menos cadmio desde el rizoma hasta las hojas y frutos. Esto puede ir de la mano con ensayos de material que ya se ha identificado como de baja acumulación en observaciones de campo y experimentos con macetas.

5.2.5 Otras prácticas agrícolas

La adaptación de prácticas agrícolas clave puede desempeñar un papel importante en el manejo del cadmio dentro de los sistemas de producción de cacao. Estos incluyen la gestión del agua y el riego, la gestión de la granja y el sistema de producción en sí (orgánico, convencional, agroforestal, monocultivo). Limitar la entrada de cadmio en la plantación de cacao a través del tratamiento del agua de riego puede ser importante para algunas áreas, pero no está claro cuáles son los otros factores clave en el sistema de producción que influyen en la disponibilidad de cadmio.

5.3 Reducir los niveles de cadmio a través del procesamiento post-cosecha

La investigación y los avances en el procesamiento post-cosecha están en su infancia y es necesario realizar más investigaciones para comprender la influencia general de la fermentación tradicional, el secado y el tostado en el contenido de cadmio de los granos de cacao, así como los impactos en las cualidades físicas y de sabor – ver sección 4.9. Sin embargo, es poco probable que estos procesos reduzcan significativamente el cadmio sin ningún efecto en otras propiedades y puede que solo sean aplicables al cacao cerca de los umbrales regulatorios.

5.4 Reducir los niveles de cadmio en chocolate mediante el mezclado

La mezcla de granos de cacao con alto contenido de cadmio con granos de otras regiones o incluso países con un contenido bajo de cadmio puede ser una solución efectiva a corto plazo para garantizar que los productos no excedan los límites reglamentarios. Sin embargo, para algunas áreas, esto resultará en la pérdida de la identidad regional y las diferencias de sabor que son clave para el mercado del cacao fino de aroma. Si bien esto representa un nicho de mercado en la UE, también es el mercado más importante para los productores en muchas áreas de ALC.

Para el cacao fino de aroma que no se puede mezclar, existe una creciente comprensión de que la variación a escala fina en los niveles de cadmio y la biodisponibilidad del suelo también se refleja en el nivel de cadmio del grano – por lo que las parcelas vecinas pueden tener concentraciones muy diferentes de cadmio en el grano cosechado. Un muestreo a escala fina puede permitir la separación de los granos que tienen niveles aceptables por encima del umbral de la UE de los que no, lo que permite una venta continua de una mayor proporción de granos en comparación con cuando el muestreo se realiza a mayor escala (Remigio 2014). Mientras los niveles se mantengan constantes a lo largo del tiempo y se pueda establecer un método rentable de análisis de muestras, esto permitiría la venta continua de parte de la cosecha mientras se desarrollan y evalúan medidas de mitigación en los campos de los agricultores.

6 PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN EN CURSO SOBRE CADMIO Y CACAO

Se ha contactado a varias instituciones con respecto a la información sobre proyectos en curso o próximos sobre cadmio. Recibimos información sobre 26 proyectos en 5 países y dos proyectos regionales:

Regional – ALC	2
Colombia	12
Ecuador	6
Indonesia	1
Perú	6
Trinidad y Tobago	1
<i>Total</i>	<i>28</i>

La siguiente sección presenta información clave sobre los proyectos identificados relacionados con el cadmio y el cacao. Para cada proyecto, la descripción de los objetivos generales del proyecto se ha dividido en diferentes temas de investigación o tipos específicos de experimentos.

La descripción de los proyectos incluye la siguiente información (cuando corresponda):

- **Información general**
 - Título del proyecto
 - Institución líder/implementadora
 - Expertos clave
 - Socios
 - Fuentes de financiamiento
 - Alcance geográfico
 - Fecha inicial
 - Fecha final
- **Objetivo general**
- **Medición de los niveles de cadmio en suelos o granos de cacao y mapeo de suelos**
 - Ubicaciones/Área cubierta
 - Descripción
- **Medición de los niveles de cadmio en el tejido de la planta de cacao**
 - Descripción
- **Identificación de fuentes de contaminación con cadmio en el suelo**
 - Fuentes investigadas
 - Descripción
- **Manejo de suelos y nutrientes**
 - Tipo(s) de intervención
 - Descripción
- **Propiedades geoquímicas del suelo, factores agronómicos y biodisponibilidad/absorción de cadmio**
 - Descripción
- **Fitorremediación y biorremediación**
 - Tipo(s) de intervención
 - Descripción
- **Variabilidad genética en la absorción y partición de cadmio**
 - Descripción

- **Mecanismos fisiológicos de la absorción y partición del cadmio**
 - Descripción
- **Prácticas post-cosecha**
 - Descripción
- **Socioeconomía y transferencia de tecnología**
 - Descripción
- **Referencias publicadas**
- **Resultados previstos**

Esta información sobre todos los proyectos se resume en la siguiente sección. La información detallada sobre cada proyecto en curso figura en la sección 6.2.

6.1 Síntesis de proyectos en curso

La figura 7 resume la información detallada de cada proyecto. Cada proyecto de investigación puede centrarse en una o más áreas de investigación específicas.

Figura 7 Áreas de proyectos de investigación en curso (*Nombre de proyectos en paréntesis*)



Fuente: Elaboración propia

La siguiente sección resume los proyectos de investigación (país y código del proyecto) en las principales áreas de investigación. Los proyectos se detallan en la sección 6.2.

Medición de los niveles de cadmio en los suelos o granos de cacao y mapeo del suelo	
Ecuador P10*	Mapeo de las regiones de cultivo de cacao de Ecuador según el contenido de cadmio del grano – 15 departamentos que representan el 97% del total del área de producción (completado y publicado)
Colombia P18	Caracterización del suelo (química, física, cadmio) para mapear áreas adecuadas para el cacao, así como para definir zonas de manejo para una producción óptima y sostenible en Colombia.
Colombia P23	Modelización espacial del contenido de cadmio en suelos cultivados con cacao. Dinámica del cadmio en suelos pedregosos con altos niveles del elemento en granos. Los resultados muestran una alta variabilidad espacial de los niveles de Cadmio en el suelo y la planta, tanto a nivel municipal como dentro de las fincas.
Colombia P24	Medida de Cd en el suelo y en los granos de cacao en fincas de Antioquia y Santander, distritos de Colombia. Realización de una compilación de Cd en el suelo y granos de Colombia según el acuerdo entre AGROSAVIA - Fedecacao para desarrollar modelos de distribución geoespacial de Cd en el cacao de Colombia.
Colombia P24	Contenido total y niveles de disponibilidad de metales pesados, cadmio, mercurio, arsénico y plomo en el suelo y granos de cacao secos de Colombia. Este trabajo se basó en la determinación de metales pesados en el suelo, la presencia de trazas de estos metales en los granos de cacao y en concentraciones superiores a las permitidas por el mercado internacional.
Medición de los niveles de cadmio en el tejido de la planta de cacao	
Indonesia P28	Estudio de los contenidos de cadmio en los granos de cacao producidos en las áreas de producción en Indonesia y los importados de otros países
Identificación de fuentes de contaminación con cadmio en el suelo	
Ecuador P10	Analizar la concentración de cadmio en los suelos y granos de cacao de 30 fincas para identificar puntos calientes y fuentes de contaminación en diferentes altitudes y sistemas agroforestales
Ecuador P13	Determine las fuentes de cadmio y los procesos de transferencia entre el suelo y tejidos de cacao en ambientes tropicales utilizando marcadores isotópicos y biogeoquímicos.
Colombia P23	Diagnóstico de la concentración de Cadmio en suelos y granos de cacao y evaluación de si los contenidos de Cadmio en plantas son de origen geogénico o antropogénico.
Colombia P24	Evaluación de fuentes antropogénicas (principalmente de fertilizantes químicos y abonos) y geogénicas (principalmente mediante la técnica 2D-ERT) de Cd en fincas de cacao de los distritos de Antioquia y Santander en Colombia.

Manejo de suelos y nutrientes	
Tipos de intervención	<ul style="list-style-type: none"> • Biochar (Perú P04, Ecuador P10, Ecuador P11) • Material de encalado (Perú P08, Ecuador P10) • Bacterias tolerantes al cadmio - CdtB (Colombia P24) • Compost (Ecuador P10) • Vermicompost (Ecuador P10) • Ácidos húmicos y fúlvicos (Ecuador P10) • Micronutrientes (Ecuador P10) • Café residual (Ecuador P11) • Aceite de palma residual (Ecuador P11). • Quinoa residual (Ecuador P11) • Materia orgánica (Perú P08, Indonesia P28) • NA (Trinidad y Tobago P03, Perú P06, Ecuador P15) • Fertilización óptima (Regional ALC P01, Perú P04) • Sílice (Perú P04)
Regional ALC P01	Estudio del efecto de la omisión de nutrientes en la concentración de cadmio y la productividad del cultivo
Trinidad y Tobago P03	Ensayos de campo utilizando enmiendas en colaboración con el sector privado
Perú P04	Ensayos de campo utilizando diferentes enmiendas
Perú P06	Evaluar diferentes enmiendas orgánicas en la absorción de cadmio en el cacao
Perú P08	Evaluar diferentes enmiendas orgánicas y cal en la absorción de cadmio en el cacao
Ecuador P10	Ensayos en 10 granjas modelo con diferentes niveles de pH (bajo, medio, alcalino), utilizando enmiendas para elevar el pH, materia orgánica y aplicación foliar de micronutrientes
Ecuador P11	Ensayos de invernadero utilizando diferentes enmiendas. Las prácticas con el mejor desempeño se utilizarán para ensayos de campo en el norte de Ecuador, en suelos alcalinos y de pH bajo
Ecuador P14	Diagnóstico del manejo de la granja de cacao agroforestal a través de entrevistas
Ecuador P15	Muestreo y análisis de enmiendas y suelos de plantaciones de cacao de áreas con granos con altos niveles de cadmio. Ensayos en invernadero para determinar la absorción y biodisponibilidad del cadmio
Colombia P24, P26, P27	Evaluación de estrategias de manejo del suelo para reducir la presencia de cadmio en los granos de cacao.
Indonesia P28	Efecto de la materia orgánica sobre la absorción de cadmio.

Propiedades geoquímicas del suelo, factores agronómicos y biodisponibilidad /absorción de cadmio	
Ecuador P10	Evaluación del efecto de 10 propiedades del suelo de los suelos de cultivo de cacao y 14 factores agronómicos sobre la concentración de cadmio en los suelos y los granos de cacao mediante análisis de regresión multivariante (terminado, ver referencias publicadas).
Ecuador P14	Se medirán las propiedades físicas, químicas, biológicas y mineralógicas de los suelos y su efecto sobre la biodisponibilidad del cadmio se determinará mediante análisis de correlación, regresiones múltiples y análisis de conglomerados
Ecuador P15	Comprender el mecanismo que causa la biodisponibilidad del cadmio en las plantaciones de cacao mediante la extracción secuencial, la caracterización fisicoquímica y mineralógica del suelo y estudios termodinámicos y cinéticos
Colombia P23	Muestras de cacao en grano y muestras de suelo de 100 fincas analizadas para determinar los niveles de Cadmio en granos, el Cadmio pseudo-total y el Cadmio bio-disponible y otras propiedades del suelo (pH, carbono orgánico, P, Fe, Mn, Zn y Cu).
Colombia P24	Evaluación de fuentes geogénicas (composición mineralógica de Cd utilizando la técnica 2D-ERT) de Cd en fincas de cacao de Antioquia y Santander, distritos de Colombia y su análisis con elementos del suelo y bacterias tolerantes al Cadmio (CdtB).

Fitorremediación y biorremediación	
Tipos de intervención	Levaduras acumuladoras de cadmio (Perú P04). Micorrizas (Perú P04, Colombia P16, P10, P24). <i>Heliconia psittacorum</i> (Colombia P16) Plantas (Ecuador P15)
Perú P04	Ensayos de campo utilizando levaduras acumuladoras de cadmio
Perú P04	Ensayos en invernadero con micorrizas comerciales y bacterias
Ecuador P15	Identificación y evaluación de plantas leguminosas encontradas en plantaciones de cacao para fitorremediación
Colombia P16	Ensayos en vivero utilizando <i>Heliconia psittacorum</i> solamente y asociada con biomasa fúngica
Colombia P17	Evaluar, in vitro, el nivel de tolerancia al cadmio de las especies de hongos nativos de los suelos de cultivo de cacao en San Vicente de Chucurí.
Colombia P21	Caracterización de las comunidades de hongos micorrizas arbusculares (AMF) que permitirán la identificación de AMF con tolerancia al estrés potencial para el desarrollo de estrategias de mitigación en plantas de cacao bajo estrés de Cd-Zn. Inoculación con comunidades AMF de suelos enriquecidos con Cadmio y AMF comercial.
Colombia P22	Las bacterias y hongos resistentes al cadmio asociados a la rizosfera del cacao se aislaron e identificaron a través de marcadores morfológicos y moleculares. También se evaluó su capacidad para solubilizar fósforo, fijar nitrógeno y degradar la celulosa. Los resultados de este estudio proporcionarán el conocimiento de los microorganismos resistentes al Cadmio asociados al cultivo de cacao y destacarán las posibles cepas para estrategias basadas en biotecnología para mitigar la absorción de Cadmio en el cacao.

Colombia P24	Evaluación de bacterias tolerantes al cadmio (CdtB) y micorrizas para la inmovilización de Cd en fincas de cacao de los distritos de Antioquia y Santander en Colombia utilizando huellas dactilares metabólicas con microcalorimetría isotérmica (IMC) y análisis de sus conversiones químicas con XRD / XRF y MALDI-TOF, así como con genes funcionales implicados en la inmovilización y quelación del cadmio. Monitoreo de sus capacidades en plántulas en experimentos de invernadero y enmiendas en macetas de campo experimentales para secuestrar el Cd en suelos en granjas de cacao de los distritos de Antioquia y Santander.
--------------	--

Variabilidad genética en la absorción y partición de cadmio	
Regional ALC P01	Genotipos de cacao con menos acumulación de cadmio, propuesta para la edición de genes.
Trinidad y Tobago P03	Ensayos de campo utilizando prometedoras rizomas de baja acumulación de cadmio
Perú P04	Identificación de genotipos de baja acumulación (cribado de > 1000 genotipos nacionales)
Perú P04	Los ensayos de campo con prometedoras rizomas de baja acumulación y vástagos
Perú P07	Evaluar diferentes absorciones de cadmio de diferentes clones de cacao
Ecuador P11	Cribado de 10 accesiones diferentes para baja acumulación de cadmio
Ecuador P13	Comparación de la transferencia de cadmio y el reciclaje entre el suelo y la planta para 2 variedades
Colombia P21	Efecto del injerto sobre la captación de Cd-Zn y la fisiología vegetal de dos genotipos bajo estrés Cd-Zn. Se realizó un experimento de prueba utilizando plantas no injertadas, auto injertadas e injertadas de cuatro genotipos diferentes (IMC67, CAU43 como portainjertos y FSV41, CCN51 como scions).
Colombia P25	Selección parental por atributos de interés: caracterización molecular, criterios de calidad, resistencia a enfermedades y absorción de cadmio.
Indonesia P28	Cribado de algunos rizomas en la absorción de cadmio del suelo

Mecanismos fisiológicos de la absorción y partición del cadmio	
Ecuador P13	Seguir los procesos de transferencia y acumulación desde el suelo hasta los granos de cacao utilizando trazadores isotópicos y biogeoquímicos
Ecuador P14	Medir el contenido total de cadmio y el contenido de micronutrientes en la raíz, el tallo, las hojas y los granos
Colombia P21	La nutrición, la eficiencia fotosintética, la partición de HM y el crecimiento de dos genotipos de cacao (IMC67 y PA121) se evalúan en suelos enriquecidos naturales con concentraciones altas y bajas de Cd-Zn
Colombia P23	Se analizó el Cadmio en tejidos de hojas y frutos (cáscara, grano y cáscara de las mazorcas). También se determinó la presencia de hojarasca en el suelo y hojarasca de cacao alrededor de los árboles. El factor de bioacumulación (BF) se calculó como la relación de Cadmio en la hoja o el grano a la del suelo, y el factor de translocación (TF) como la relación de Cadmio en la hoja a la de los tejidos de la fruta.

Prácticas post-cosecha	
Ecuador P11	Monitorear cada dos meses, el contenido de cadmio de los granos de cacao (secado y fermentado) de 15 centros de recolección para ordenar los granos en lotes que cumplen con las regulaciones de la UE.
Ecuador P12	Efecto de los procesos de fermentación y secado sobre el contenido de cadmio en granos de cacao
Ecuador P13	Monitorear la transferencia de cadmio (enriquecimiento o pérdida) dentro cada paso de la elaboración del producto final de chocolate (granos secos, granos fermentados, granos tostados y licor de cacao)
Colombia P19	Reducción del contenido de cadmio en granos de cacao colombianos fermentados finos de aroma que se cultivan en áreas con mayor contenido de cadmio mediante estrategias de nanotecnología.
Colombia P20	Reducción del contenido de cadmio en granos de cacao colombianos fermentados finos de aroma mediante el uso de estrategias biotecnológicas con microorganismos durante la post-cosecha.
Socioeconomía y ampliación de soluciones potenciales	
Ecuador P10	Evaluación de la cadena de valor del cacao y cuantificación del impacto económico de las regulaciones de la UE en áreas de cultivo de cacao contaminadas en Ecuador. Investigación del impacto económico de las posibles estrategias de mitigación y el potencial de ampliación para los pequeños productores de cacao.

6.2 Proyectos en curso

6.2.1 Regional – América Latina y el Caribe

ID del proyecto	P01
Título del proyecto	Plataforma Multi Agencia de cacao para América Latina y el Caribe “Cacao 2030-2050”
Institución líder/ implementadora	Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP) Escuela Politécnica del Litoral (ESPOL)
Expertos clave	Manuel Carrillo Centeno (INIAP) Eduardo Chávez (ESPOL) Ramón Espinel (ESPOL)
Socios	Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) Costa Rica, Instituto Dominicano de Investigaciones Agropecuarias y Forestales (IDIAF), Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) Perú, Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá (IDIAP), Universidad Nacional de Costa Rica (UNA), CATIE (Costa Rica), CIAT (Colombia), CEFA (Italy), GIZ (Alemania), Rikolto (VECO), Fine Chocolate Industry Association (FCIA)
Fuentes de financiamiento	FONTAGRO
Alcance geográfico	América Latina y el Caribe
Estatus de propuesta	Aprobada
Fecha inicial	2019
Fecha final	2022
Enlaces	https://www.fontagro.org/micrositios/plataforma-multiagencia-de-cacao-2030-2050/
Objetivo general	Desarrollar y transferir tecnología para la producción de cacao fino de aroma, con calidad y seguridad en América Latina y el Caribe, fortaleciendo las capacidades de los sistemas nacionales de I & D & I con un horizonte de impacto de 2030 y 2050. Los objetivos específicos del proyecto son: i) generar conocimiento y alternativas para el manejo del cadmio en el cacao, ii) establecer y estandarizar una metodología para medir el cadmio para generar mapas y técnicas para reducir los niveles de cadmio, iii) generar información socioeconómica del impacto de las regulaciones internacionales, y iv) difundir y transferir el conocimiento y las alternativas generadas por el proyecto.
Resultados previstos	<ul style="list-style-type: none"> • Genotipos del cacao con menos acumulación de cadmio. • Estudio del efecto de la omisión de nutrientes en la concentración de cadmio y la productividad del cultivo. • Propuesta para la edición de genes. • Metodología estandarizada para la determinación del cadmio en la región. • Informe que contiene mapas de cadmio de algunos países, y validación de estrategias para mitigar la absorción de cadmio. • Informe de efectos del secado y fermentación de cacao sobre el contenido de cadmio. • Documento de marco estratégico para la Plataforma de Cacao a largo plazo 2030-2050. • Análisis socioeconómico y de impacto de las regulaciones de la UE relativas a la concentración de cadmio. • Análisis de la normativa vigente para la importación de fertilizantes

ID del proyecto	P01
	<p>en la región.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Memorias de talleres anuales. • Planes de formación para entrenadores, periodistas, y agricultores. • Repositorio virtual/plataforma con información sobre el cadmio en cacao.

ID del proyecto	P02
Título del proyecto	Fomentar innovaciones relevantes para el clima y bajo en cadmio para mejorar la resiliencia y la inclusividad de la cadena de cacao en Colombia, Ecuador y Peru (Clima-LoCa)
Institución líder/ implementadora	ALLIANCE BIOVERSITY-CIAT
Expertos clave	Mayesse Da Silva, Mirjam Pulleman, Andres Charry, Christian Bunn, Rachel Atkinson, Evert Thomas, Xavier Argout, Eduardo Chavez, Erik Smolders, Darwin Martinez, Rey Gastón Loor, Manuel Carrillo, Pathmanathan Umaharan, Laurence Maurice, Caren Rodriguez, Roxana Yockteng, Olivier Sounigo, Angela Castaño, Jaime Osorio, Andrea Montenegro y otros en cada uno de los países de implementación.
Socios	ALLIANCE BIOVERSITY-CIAT, CIRAD, AGROSAVIA, INIAP, ESPOL, WAGENINGEN UNIV., KU LEUVEN, CRC, IRD
Fuentes de financiamiento	Europe Aid (DeSIRA)
Alcance geográfico	Colombia, Ecuador, Perú
Estatus de propuesta	Contrato en proceso de finalización
Fecha inicial	Enero 2020 (planificada)
Fecha final	Diciembre 2023 (planificada)
Objetivo general	Clima-LoCa abordará importantes desafíos relacionados con la resiliencia, competitividad e inclusividad de los crecientes sectores del cacao en Colombia, Ecuador y Perú. Aquí, la resiliencia se refiere a la capacidad de los pequeños productores y otros actores de la cadena productiva para mitigar los impactos negativos de la nueva regulación de inocuidad de la UE sobre cadmio en cacao; y del cambio climático. Más específicamente, el objetivo de la Acción es apoyar el desarrollo, la implementación y el escalamiento de innovaciones relevantes para el clima y bajo en cadmio que se ajusten a los diversos contextos de la producción de pequeños cacaoteros.
Resultados previstos	<p>El objetivo se logrará en base a 4 productos que se desarrollan a través de 4 paquetes de trabajo (WPs) interdisciplinarios.</p> <ul style="list-style-type: none"> • WP1 desarrollará líneas de base y evaluaciones de impacto para el cadmio y el cambio climático, e informará políticas públicas teniendo en cuenta la variación edafoclimática, genética y socioeconómica dentro y entre los 3 países • WP2 proporcionará evaluaciones científicas en ensayos de investigación en múltiples sitios para identificar prácticas y genotipos que reduzcan la acumulación de cadmio en la almendra de cacao, considerando los efectos sobre la productividad, la salud del suelo, la relevancia para el clima y los costos-beneficios • WP3 piloteará prácticas agronómicas y genotipos de bajo absorción de cadmio en colaboración con asociaciones de agricultores, y desarrollará conjuntamente estrategias de mitigación y escalamiento en plataformas de multi-actores • WP4 fortalecerá la coordinación regional de la investigación y la

ID del proyecto	P02
	capacidad científica (incl. capacidad de laboratorios). Todos los WP incluyen actividades importantes dedicadas a la difusión de los resultados del proyecto y desarrollarán herramientas para la toma de decisiones y materiales de capacitación, dirigidos a diversos usuarios.

6.2.2 Trinidad y Tobago

ID del proyecto	P03
Título del proyecto	Fase 2 "Mitigación de la Bioacumulación del cadmio en Theobroma Cacao L."
Institución líder/ implementadora	Centro de Investigación del Cacao
Expertos clave	Caleb Lewis, Gideon Ramtahal
Socios	ECA, CAOBISCO, FCC
Fuentes de financiamiento	Fondo de Investigación Conjunta de ECA/CAOBISCO/FCC
Alcance geográfico	Trinidad y Tobago
Fecha inicial	2018
Fecha final	2019
Objetivo general	Este proyecto retomará la primera fase del proyecto e intensificará los ensayos de campo. Las actividades incluirán: <ul style="list-style-type: none"> • Ensayos de campo con enmiendas en colaboración con el sector privado • Ensayos de campo utilizando prometedoras rizomas de baja acumulación de cadmio
Manejo de suelos y nutrientes	
Descripción	Ensayos de campo con enmiendas en colaboración con el sector privado
Variabilidad genética en la absorción y partición de cadmio	
Descripción	Ensayos de campo que utilizan prometedoras rizomas de baja acumulación de cadmio identificados en la fase 1 en diferentes entornos.
Resultados previstos	<ul style="list-style-type: none"> • Resultados sobre la eficiencia de diferentes enmiendas como soluciones de mitigación para la absorción de cadmio por las plantas de cacao • Nuevas percepciones sobre los efectos del uso de rizomas de baja acumulación con diferentes vástagos y dentro de diferentes entornos

6.2.3 Perú

ID del proyecto	P04
Título del proyecto	cadmio y cacao: identificando soluciones a corto y largo plazo
Institución líder/ implementadora	Bioversity internacional
Expertos clave	Evert Thomas, Rachel Atkinson
Socios	MINAGRI, SENASA, INIA; U. Científica del Sur; U. San Marcos; U. Nacional de Piura
Fuentes de financiamiento	Gobierno Peruano
Alcance geográfico	Perú
Fecha inicial	2018
Fecha final	2020
Objetivo general	<p>Este proyecto estudiará primero la presencia de cadmio en áreas cercanas a las actividades del proyecto e investigará soluciones a corto y mediano plazo a través de:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ensayos de campo utilizando enmiendas de suelo y levaduras acumuladoras de cadmio. • Ensayos de campo que evalúan genotipos de baja acumulación • Ensayos de invernadero usando micorrizas en suelos con diferentes niveles de cadmio y de pH, y combinando genotipos de baja acumulación
Manejo de suelos y nutrientes	
Tipo de intervención	<ul style="list-style-type: none"> • Biochar (Inkan Negra / U. Científica del Sur) • Fertilización óptima (Yara) • Tierra de Diatomeas (Feys Perú) • Levadura de alta acumulación (Fertilev – Bioxlab / U San Marcos) • Combinaciones
Descripción	Experimentos utilizando 14 tratamientos realizados en plantaciones establecidas y nuevas con productores asociados con la Cooperativa Norandino para determinar el efecto sobre la acumulación de cadmio en los frutos y la disponibilidad de cadmio en el suelo
Fitorremediación y biorremediación	
Tipo(s) de intervención	<ul style="list-style-type: none"> • Micorriza comercial
Descripción	Se llevarán a cabo experimentos controlados en invernaderos para evaluar la capacidad de las micorrizas comerciales de acumular cadmio, combinando el uso de 1 a 5 genotipos prometedores de baja acumulación en suelos con diferentes concentraciones de cadmio y niveles de pH.
Variabilidad genética en la absorción y partición de cadmio	
Descripción	El proyecto identificará genotipos de cacao nativos de Perú con baja acumulación de cadmio a través de una colección de > 1000 plantas en todo el país mediante la medición de los niveles de cadmio en hojas y suelos (se esperan ~ 100 genotipos). Esto servirá como referencia antes de los ensayos de campo y para la caracterización genética. Además, se realizarán ensayos metagenómicos de micorrizas asociadas. Una vez identificados como posibles genotipos de baja acumulación, los ensayos de campo de rizomas promisorios permitirán verificar el efecto del injerto y del ambiente (especialmente los suelos alcalinos).
Resultados previstos	<ul style="list-style-type: none"> • Resultados sobre la eficiencia de la aplicación de diferentes

ID del proyecto	P04
	<p>enmiendas y usando levaduras acumuladoras de cadmio como solución para reducir la absorción de cadmio en las plantas de cacao (primeros resultados a principios de 2019, más a mediados de 2019 y principios de 2020)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Resultados sobre la eficiencia de la aplicación de micorrizas como una solución para reducir la absorción de cadmio en las plantas de cacao (a principios de 2019) • Se identificaron genotipos peruanos prometedores que muestran bajos niveles de cadmio en las hojas que crecen dentro de suelos con alto contenido de cadmio. Estos genotipos prometedores podrían usarse en nuevos programas de selección y como rizomas en diferentes regiones de cultivo de cacao (a principios de 2019) • Nuevas percepciones sobre el papel del genotipo

ID del proyecto	P05
Título del proyecto	Plan de Acción Cacao Seguro USDA-FAS/MINAGRI
Institución líder/ implementadora	Instituto de Cultivos Tropicales-ICT / USDA-FAS – MINAGRI
Expertos clave	Harold Tarver (USDA-FAS), Benjamin Lownik (USDA-FAS), Enrique Arévalo-Gardini (ICT), Tommy Fairlie Canon (ICT/USDA-FAS)
Socios	USDA-FAS (Cacao Seguro Project), USAID, MINAGRI, SENASA, INIA
Fuentes de financiamiento	USAID, USDA-FAS
Alcance geográfico	Perú
Fecha inicial	2018
Fecha final	2021
Objetivo general	<p>Este proyecto busca estimular la intensificación de la investigación sobre el cadmio en el cacao en Perú a través de acciones (financiamiento de proyectos, etc.) tomadas por el gobierno peruano. Los Temas de Investigación Incluyen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ensayos de los enfoques más prometedores para mitigar la acumulación de cadmio • La respuesta concertada de Perú en el ámbito internacional, CODEX, UE, etc., • Estándares de laboratorio y metodologías para analizar el contenido de cadmio • Alcance

ID del proyecto	P06
Título de proyecto	Efecto de las enmiendas orgánicas en la acumulación de cadmio en el cacao
Institución líder/ implementadora	Instituto de Cultivos Tropicales – ICT
Expertos clave	César O. Arévalo-Hernández, Enrique Arévalo-Gardini, Juvicksa Correa, Virupax Baligar
Socios	USDA-ARS
Fuentes de financiamiento	USDA-ARS, ICT
Alcance geográfico	Perú – Tarapoto-San Martín

ID del proyecto	P06
Fecha inicial	2017
Fecha final	2018
Objetivo general	Evaluar diferentes enmiendas orgánicas en la absorción de cadmio en el cacao.

ID del proyecto	P07
Título del proyecto	Absorción de cadmio y plomo en diferentes clones de cacao utilizados en plantaciones comerciales
Institución líder/ implementadora	Instituto de Cultivos Tropicales – ICT
Expertos clave	Enrique Arévalo-Gardini, Virupax Baligar, César O. Arévalo-Hernández, Jimmy Chupillon
Socios	USDA-ARS
Fuentes de financiamiento	USDA-ARS, ICT
Alcance geográfico	Perú – Tarapoto-San Martín
Fecha inicial	2017
Fecha final	2018
Objetivo general	Evaluar diferentes absorciones de cadmio y plomo de diferentes clones de cacao

ID del proyecto	P08
Título del proyecto	Efecto de la cal y enmiendas orgánicas en la absorción de cadmio en el cacao
Institución líder/ implementadora	Instituto de Cultivos Tropicales – ICT
Expertos clave	César O. Arévalo-Hernández, Enrique Arévalo-Gardini, Virupax Baligar, Josselyn Revollar
Socios	USDA-ARS
Fuentes de financiamiento	USDA-ARS, ICT
Alcance geográfico	Perú – Tarapoto-San Martín
Fecha inicial	2017
Fecha final	2019
Objetivo general	Evaluar diferentes enmiendas orgánicas y cal en la absorción de cadmio en el cacao.

ID del proyecto	P09
Título del proyecto	Inter Lab for Peruvian Laboratories (Proyecto Cacao Seguro)
Institución líder/ implementadora	Instituto de Cultivos Tropicales – ICT/USDA FAS
Expertos clave	César O. Arévalo-Hernández, Enrique Arévalo-Gardini
Socios	USDA-FAS (Proyecto Cacao Seguro), USAID

ID del proyecto	P09
Fuentes de financiamiento	USAID, USDA-FAS
Alcance geográfico	Perú – Tarapoto-San Martín
Fecha inicial	2018
Fecha final	2019
Objetivo general	La determinación de cadmio (Cd) para grano de cacao y polvo a través de Inter-Laboratory Comparación dentro de los laboratorios peruanos tienen una variabilidad similar y menor en los resultados

6.2.4 Ecuador

ID del proyecto	P10
Título de proyecto	Estudio nacional: En marcha 2017-2020. ESPOL – KU Leuven (Bélgica)
Institución líder/ implementadora	ESPOL
Expertos clave	Eduardo Chávez, Erik Smolders, Ramón Espinel, Miet Marteens, David Argüello, José Luis Vázquez, Daniela Montalvo
Socios	KU Leuven, Colaboración con Industria y ONGs para implementar
Fuentes de financiamiento	VLIR-UOS
Alcance geográfico	Ecuador
Fecha inicial	2017
Fecha final	2020
Objetivo general	El proyecto busca identificar los impactos agronómicos y económicos de las regulaciones de la UE sobre el cadmio y comunicar los resultados a los productores de cacao. Las estrategias de mitigación a corto y largo plazo para reducir la acumulación de cadmio en los granos de cacao se evaluarán mediante un enfoque holístico y sistemático. Los resultados se transferirán a todas las partes interesadas de la cadena de valor del cacao, y en particular a los pequeños productores de cacao.
Medición de los niveles de cadmio en suelos o granos de cacao y mapeo de suelos	
Ubicaciones/Área cubierta	Regiones de cultivo de cacao de Ecuador (15 departamentos que representan el 97% del total del área de producción)
Descripción	Muestreo de suelos, hojas de cacao y granos (n = 571) en 15 departamentos de Ecuador para el mapeo del suelo basado en la concentración de cadmio de los granos (<i>Terminado, ver referencias publicadas</i>).
Manejo de suelos y nutrientes	
Tipo(s) de intervención	Diferentes materiales de encalado, compost, vermicompost, humus, ácidos húmicos y fúlvicos, biochar, micronutrientes.
Descripción	Ensayos en 10 granjas modelo con diferentes niveles de pH (bajo, medio, alcalino). <ul style="list-style-type: none"> • Aplicación de enmiendas para reducir el pH del suelo dentro de suelos ácidos (diferentes materiales de encalado). • Aplicación de materia orgánica en suelos alcalinos (compost, ácidos húmicos y fúlvicos, vermicompost). • Aplicación foliar de micronutrientes (en áreas deficientes, suelos tanto alcalinos como ácidos)

ID del proyecto	P10
	<ul style="list-style-type: none"> Biochar en suelos amazónicos
Propiedades geoquímicas del suelo, factores agronómicos y biodisponibilidad/absorción de cadmio	
Descripción	Evaluación del efecto de 10 propiedades del suelo de los suelos de cultivo de cacao y 14 factores agronómicos sobre la concentración de cadmio en los suelos y los granos de cacao a través de análisis de regresión multivariante (<i>Terminado, ver referencias publicadas</i>).
Socioeconomía y transferencia de tecnología	
Descripción	Se realizarán entrevistas semiestructuradas para evaluar la cadena de valor del cacao y cuantificar el impacto económico de las regulaciones de la UE en áreas de cultivo de cacao contaminadas. También se investigará el impacto económico de las posibles estrategias de mitigación y el potencial de ampliación para los pequeños productores de cacao.
Referencias publicadas	Argüello, D. <i>et al.</i> (2019) 'Propiedades del suelo y factores agronómicos que afectan las concentraciones de cadmio en los granos de cacao: A nationwide survey in Ecuador', <i>Science of the Total Environment</i> . Elsevier B.V., 649, pp. 120–127.
Resultados previstos	<ul style="list-style-type: none"> Algunos resultados ya están publicados (<i>Mapa del suelo, propiedades del suelo y efecto de los factores agronómicos en la concentración de cadmio en los granos</i>) Resultados sobre la eficiencia de diferentes enmiendas como soluciones de mitigación para reducir la absorción de cadmio en las plantas de cacao Evaluación del impacto de la regulación de la UE en las áreas de cultivo de cacao contaminadas de Ecuador (a finales de 2018) Evaluación del impacto económico y del potencial de ampliación de las soluciones de mitigación para pequeños propietarios (para 2020)

ID del proyecto	P11
Título del proyecto	Proyecto GIZ - CEFA - ESPOL Herramientas Integrales para Identificar y Mitigar Zonas Cacaoteras Contaminadas con Cadmio en la Amazonia Norte y Manabi
Institución líder/ implementadora	ESPOL
Expertos clave	Eduardo Chávez
Socios	ESPOL, GIZ, CEFA
Fuentes de financiamiento	UE
Alcance geográfico	Ecuador (Amazonas del Norte y Manabi)
Fecha inicial	
Fecha final	
Objetivo general	<ul style="list-style-type: none"> Analizar el contenido de cadmio en los suelos y granos de cacao muestreados de 30 granjas para identificar puntos calientes y fuentes de contaminación Ensayos con diferentes enmiendas dentro de granjas modelo. Cribado de accesiones para genotipos de baja acumulación Monitorear el contenido de cadmio de los granos de cacao de los centros de recolección para clasificar los granos en lotes que

ID del proyecto	P11
	cumplan con las regulaciones de la UE
Identificación de fuentes de contaminación con cadmio en el suelo	
Fuentes investigadas	
Descripción	Analizar, siguiendo diferentes metodologías, la concentración de cadmio en los suelos y granos de cacao de 30 granjas para identificar puntos calientes así como fuentes de contaminación a través de diferentes altitudes y sistemas agroforestales.
Manejo de suelos y nutrientes.	
Tipo(s) de intervención	Residuo de café, residuo de la palma de aceite y residuo de la quinoa, combinación de diversos biocharcoals
Descripción	Diferentes enmiendas (residuo de café, residuo de la palma de aceite y residuo de la quinoa, combinación de diversos biochars) están siendo ensayadas en el invernadero. Tres dosis (0, 1, 2%), suelos con diferentes características (pH de 5.2 y 7.9, contenido de cadmio de 0.74 y 1.12 mg/kg). Las prácticas de mejor rendimiento serán evaluadas dentro de los 5 granjas modelo en las provincias del norte amazónico y provincia de Manabi en Ecuador, en suelos alcalinos y de pH bajo (en enero de 2019).
Variabilidad genética en la absorción y partición de cadmio	
Descripción	Cribado 10 accesiones diferentes para baja acumulación de cadmio. Si los resultados son exitosos, esto servirá como base para un estudio más amplio, con la identificación de los genes involucrados en la absorción de cadmio y el estudio posterior sobre los mecanismos de absorción de cadmio, así como los ensayos de injertos.
Prácticas post-cosecha	
Descripción	Supervisar cada dos meses el contenido de cadmio de los granos de cacao (secos y fermentados) de 15 centros de recolección para clasificar los granos en lotes que cumplan con las regulaciones de la UE.
Resultados previstos	<ul style="list-style-type: none"> • Puntos calientes identificados dentro de 10 granjas estudiadas • Fuentes identificadas de contaminación • Resultados sobre la eficiencia de diferentes enmiendas como soluciones de mitigación para la absorción de cadmio por las plantas de cacao • Genotipos prometedores de baja acumulación identificados • Resultados sobre la eficiencia de la solución de mitigación post-cosecha basada en la clasificación de granos de cacao según su contenido de cadmio para cumplir con las regulaciones de la UE

ID del proyecto	P12
Título del proyecto	
Institución líder/ implementadora	KU Leuven
Expertos clave	Erik Smolders, Eduardo Chávez, Ruth Vanderschueren
Socios	ESPOL, KU Leuven
Fuentes de financiamiento	
Alcance geográfico	Ecuador
Fecha inicial	
Fecha final	

Objetivo general	Proyecto PhD enfocado en el tratamiento post-cosecha para mitigar el cadmio.
Prácticas post-cosecha	
Descripción	La primera parte del proyecto se centra en el efecto de los procesos de fermentación y secado sobre el contenido de cadmio en los granos de cacao.

ID del Proyecto	P13
Título del proyecto	CADCAO (cadmio en cacao)
Institución líder/ implementadora	Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD, Francia)
Expertos clave	Dr. Laurence Maurice (IRD Ecuador/GET, Profesor Invitado en la Univ. Andina Simon Bolivar (Quito)), Prof. Mark Rehkämper (Imperial College, London, UK), Dr. Eva Schreck (U. Toulouse/GET), Dr. Fiorella Barraza (IRD/GET)
Socios	Laboratorio Géosciences Environnement Toulouse (IRD, GET, Francia), Laboratorio de Espectrometría de Masas y Geoquímica de Isótopos (MAGIC) en el Imperial College de Londres. Cooperative Company ETHIQUABLE (France).
Fuentes de financiamiento	Institut Olga Triballat (France) y Cooperative Company ETHIQUABLE (France).
Alcance geográfico	Ecuador (Costa del Pacífico y Región Amazónica)
Fecha inicial	Diciembre 2017
Fecha final	Julio 2019
Objetivo general	<p>El objetivo principal del proyecto CADCAO es mejorar la comprensión de los mecanismos de transferencia y bioacumulación de cadmio de los suelos a los granos de cacao, especialmente en las variedades cultivadas en Ecuador y destinadas al mercado europeo (CCN-51 y "Sabor Fino" Nacional). Los objetivos de este estudio, utilizando marcadores isotópicos y biogeoquímicos, son:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Determinar las fuentes de cadmio en ambientes tropicales • Seguir los procesos de transferencia y acumulación del suelo al tejido del cacao (hojas, cáscaras de mazorcas y granos) • Monitorear la transferencia de cadmio (enriquecimiento o pérdida) dentro cada paso de la elaboración del producto final de chocolate (granos secos, granos fermentados, granos tostados y licor de cacao)

Identificación de fuentes de contaminación con cadmio en el suelo	
Fuentes investigadas	
Descripción	Determinar las fuentes de cadmio en ambientes tropicales utilizando trazadores isotópicos y biogeoquímicos.
Mecanismos fisiológicos de la absorción y partición del cadmio	
Descripción	Seguir los procesos de transferencia y acumulación desde el suelo a los granos de cacao utilizando marcadores isotópicos y biogeoquímicos.
Prácticas post-cosecha	
Descripción	Monitorear la transferencia de cadmio (enriquecimiento o pérdida) dentro cada paso de la elaboración del producto final de chocolate (granos secos, granos fermentados, granos tostados y licor de cacao)
Resultados previstos	<ul style="list-style-type: none"> • Fuentes identificadas de la contaminación con cadmio • Rastreo de transferencia de cadmio y reciclaje entre el suelo y los

ID del Proyecto	P13
	<p>tejidos de cacao</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nuevas percepciones sobre los mecanismos fisiológicos de absorción de cadmio por las plantas de cacao • Resultados sobre el efecto de las prácticas de post-cosecha y producción sobre el contenido de cadmio en granos de cacao y productos a base de cacao

ID del proyecto	P14
Título del proyecto	INIAP – Universidad Regional Amazónica Ikiam
Institución líder/ implementadora	INIAP – Universidad Ikiam
Expertos clave	Magdalena López PhD, Paulo Barrera MsC.
Socios	ENGIM (Cooperación Italiana), GIZ (Cooperación Alemana)
Fuentes de financiamiento	INIAP, ENGIM, GIZ, Universidad Ikiam
Alcance geográfico	Ecuador – Amazonía Ecuatoriana Central
Fecha inicial	2/11/2018
Fecha final	2/10/2020
Objetivo general	Determinar la dinámica del cadmio en cuatro zonas dedicadas al sistema agroforestal de cacao en dos suelos predominantes en Napo – Ecuador

Medición de los niveles de cadmio en suelos o granos de cacao y mapeo de suelos

Ubicaciones/Área cubierta	Tena, Archidona y Aorosemena en la provincia de Napo. Área 7434 ha
Descripción	Se criaron 16 granjas agroforestales de cacao, en cada una se tomaron 20 submuestras de suelo a dos profundidades (0-15 y 15-30 cm) para determinar el total de cadmio. Además, se elegirán 5 plantas de cacao al azar y se tomarán 4 submuestras de hojarasca para determinar el Cadmio total y las muestras de suelo a una profundidad de 0-15 cm para establecer los contenidos de cadmio disponibles en cada planta. Estos resultados serán correlacionados con el contenido del Cadmio en las diversas partes de las plantas del cacao.

Manejo de suelos y nutrientes

Tipo(s) de intervención	Diagnóstico del manejo de la granja con cacao agroforestal a través de entrevistas
Descripción	En 16 granjas se llevarán a cabo estudios y recopilación de información de campo para caracterizar social, económica y agrónomicamente los diferentes sistemas productivos en 4 zonas de la provincia de Napo. La biodiversidad florística también se determinará en los sistemas productivos.

Propiedades geoquímicas del suelo, factores agronómicos y biodisponibilidad/absorción de cadmio

Descripción	Para las 5 plantas de cacao muestreadas en cada granja, también se recolectarán muestras de suelo. Se medirán las propiedades físicas, químicas, biológicas y mineralógicas de los suelos y su efecto sobre la biodisponibilidad del cadmio se determinará mediante análisis de correlación, regresiones múltiples y análisis de conglomerados.
-------------	---

Mecanismos fisiológicos de absorción y partición de cadmio

Descripción	En 5 plantas de cacao, mediremos el contenido total de cadmio en la raíz, el tallo, las hojas y los granos, para cada granja y en dos estaciones (estación seca y estación húmeda). También se medirán macro y micronutrientes en el tejido de plantas
-------------	--

ID del proyecto	P15
Título del proyecto	Técnicas para disminuir la disponibilidad de CADMIO en suelos de cacaoteras
Institución líder/ implementadora	Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP)
Expertos clave	Manuel D. Carrillo Z., Luz María Martínez, Markus Gräfe, Alexis Debut, Wuellins Durango, RAúl Jaramillo y Karina Peña
Socios	INIAP, Universidad UTE, Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE), International Plant Nutrition Institute (IPNI)
Fuentes de financiamiento	INIAP, UTE, ESP, IPNI
Alcance geográfico	Ecuador
Fecha inicial	2017
Fecha final	2020
Objetivo general	Comprender la dinámica del cadmio en el suelo para reducir su biodisponibilidad utilizando métodos para reducir la absorción por las plantas de cacao
Manejo de suelos y nutrientes	
Tipo(s) de intervención	Evaluar la disponibilidad de cadmio en suelos de cultivo de cacao tratados con diferentes enmiendas convencionales y orgánicas
Descripción	Caracterizar enmiendas de suelos y suelos de cultivo de cacao en niveles de cadmio Determinar la biodisponibilidad de cadmio bajo diferentes condiciones en un experimento del invernadero.
Propiedades geoquímicas del suelo, factores agronómicos y biodisponibilidad/absorción de cadmio	
Descripción	Establecer mecanismos mediante los cuales el cadmio del suelo se vuelve disponible a través de estudios cinéticos y termodinámicos y utilizando métodos de extracción secuencial. Realizar una caracterización físicoquímica y mineral del suelo Comprender los procesos físicoquímicos de adsorción y desorción del cadmio del suelo. Llevar a cabo la fraccionamiento de la fase sólida de cadmio del suelo.
Fitorremediación y biorremediación	
Tipo(s) de intervención	Identificación y evaluación de plantas leguminosas encontradas en plantaciones de cacao para fitorremediación
Descripción	Evaluación de plantas leguminosas como potenciales fitosanitarios. Recolección de plantas leguminosas y preparación de semillas para la siembra. Evaluación de su capacidad para extraer cadmio.

6.2.5 Colombia

ID del proyecto	P16
Título del proyecto	Phytoremediation y Myco-remediation de cadmio en un suelo de cacao Theobroma a nivel de vivero (estrategias biológicas para mejorar la calidad del cultivo)
Institución líder/ implementadora	Universidad de Santander – Fedecacao
Expertos clave	Beatriz Elena Guerra (Universidad de Santander), Jaider Muñoz (Universidad de Santander), Diannefir Duarte (Fedecacao)
Socios	Universidad de Santander, Federación de cacaoeros de Colombia (fedecacao)
Fuentes de financiamiento	Universidad de Santander- Fedecacao
Alcance geográfico	Colombia
Fecha inicial	08-2016
Fecha final	08-2018
Objetivo general	Evaluar la eficiencia de <i>Heliconia psittacorum</i> sola y asociada con biomasa fúngica para la biorremediación en suelos de cultivo de cacao contaminados con cadmio (vivero)
Fitorremediación y biorremediación	
Tipo(s) de intervención	<i>Heliconia psittacorum</i> sola y asociada con biomasa fúngica
Descripción	La contaminación del suelo por diversas actividades antropogénicas ha resultado en un grave problema relacionado con la acumulación de metales pesados con un impacto negativo para la agricultura. Varias especies de plantas se consideran tolerantes a los metales pesados o se adaptan fácilmente a estos ambientes contaminados, lo que los convierte en candidatos para evaluar su potencial como fitosanitarios. <i>Heliconia psittacorum</i> es una planta que crece comúnmente en plantaciones de cacao en Santander-Colombia y crece en simbiosis con hongos endomicorrizales arbusculares. Este estudio evaluará su nivel de tolerancia en suelos contaminados naturalmente por cadmio, cuando se cultiva sola o asociada con hongos micorrízicos arbusculares y hongos de vida libre.

ID del proyecto	P17
Título del proyecto	Estudio de la biodiversidad y la tolerancia al cadmio en hongos filamentosos nativos de los suelos de cacao en Santander - Colombia
Institución líder/ implementadora	Universidad de Santander - Colombia (UDES) - Universidad EAFIT - Colombia
Expertos clave	Beatriz Elena Guerra (Universidad de Santander), Javier Correa (Universidad EAFIT)
Socios	Universidad de Santander, Universidad EAFIT
Fuentes de financiamiento	Universidad de Santander
Alcance geográfico	Colombia
Fecha inicial	08-2018
Fecha final	10-2019
Objetivo general	Evaluar el nivel de tolerancia fúngica in vitro, a altas concentraciones de cadmio.

ID del proyecto	P17
Fitorremediación y biorremediación	
Tipo(s) de intervención	Especie nativa de hongos de los suelos de cultivo de cacao de San Vicente de Chucurí
Descripción	Las biomasas fúngicas utilizan mecanismos como la bioacumulación o biosorción de metales pesados, en sus tejidos sin afectar su metabolismo, y se ha informado que diferentes especies de hongos tienen la capacidad de sobrevivir adaptándose o mutando a altas concentraciones de metales pesados. De ahí el objetivo de este trabajo está dirigido al aislamiento de hongos filamentosos del suelo contaminado por cadmio de la región del cacao del municipio de San Vicente de Chucurí (Santander), con el propósito de evaluar el nivel de tolerancia para las especies de hongos nativos en diferentes concentraciones del metal pesado, ensayos que se evaluarán a través del crecimiento y desarrollo en medios micológicos modificados con cadmio (100, 200, 300 ppm respectivamente) y se identificarán posteriormente las especies molecularmente más tolerantes.

ID del proyecto	P18
Título del proyecto	Cacao para la Paz - Mapeo del Sistema de Información Geográfica para la Producción Optimizada de Cacao en Colombia
Institución líder/ implementadora	CIAT (coordinador en el país) e implementado junto con PSU y USDA-NRCS
Expertos clave	Mayesse Da Silva, Gerardo Gallego, Zamir Libohova, Charles Kome, Siela Maximova, Mark Gultinan, Patrick Drohan
Socios	CIAT, USDA-FAS, USDA-NRCS, Universidad Estatal de Pensilvania, FEDECACAO, IGAC, UNODC
Fuentes de financiamiento	USAID/USDA
Alcance geográfico	Colombia
Fecha inicial	2018
Fecha final	2019
Objetivo general	Este proyecto forma parte de la iniciativa Cacao para la Paz. Su objetivo es promover una comprensión más profunda de la variabilidad espacial de las características del suelo y el cadmio, el suministro de agua para el cultivo de cacao, y evaluar la diversidad de plantas en la Sierra Nevada de Santa Marta en Colombia para definir áreas adecuadas para la producción óptima y sostenible de cacao, así como definir zonas de manejo para mejorar la gestión. La definición de áreas adecuadas toma en cuenta las características del suelo, las condiciones climáticas y el contenido de cadmio del suelo.
Mapeo de suelos	
Ubicaciones/Área cubierta	Sierra Nevada de Santa Marta
Descripción	Caracterización del suelo (química, física, cadmio) para mapear áreas adecuadas para el cacao, así como para definir zonas de manejo para una producción óptima y sostenible en Colombia. Los mapas de suelo de alta resolución (30 m; escala 1:25000) se desarrollarán según los enfoques de mapeo digital del suelo.

ID del proyecto	P19
Título del proyecto	Desarrollo de estrategias de bio- y nano-tecnología para la reducción del cadmio en los granos de cacao colombiano de fino de

ID del proyecto	P19
	aroma.
Institución líder/ implementadora	CasaLuker/Universidad de los Andes.
Expertos clave	Johann Osma, Juan Carlos Cruz, Claudia M Rodriguez, Sergio Leonardo Florez, Ana Lucia Campana. Hector Hugo Olarte
Socios	Universidad de Antioquia.
Fuentes de financiamiento	CasaLuker.
Alcance geográfico	Municipios de los departamentos de Santander y de Arauca.
Fecha inicial	Mayo 2017
Fecha final	Febrero 2019
Objetivo general	Reducción del contenido de cadmio en granos de cacao colombiano fermentado fino de aroma que se cultivan en áreas con el mayor contenido de cadmio mediante estrategias de nanotecnología.

Prácticas post-cosecha

Descripción	Este proyecto propone la optimización de las estrategias bio- y nanotecnológicas desarrolladas previamente por CasaLuker y la Universidad de los Andes, para la reducción del contenido de cadmio en los granos de cacao fermentados mediante el ajuste de las condiciones de producción, la operación y el control de estas estrategias a escala de laboratorio y semi-industrial para lograr procesos de ampliación a nivel industrial. La Universidad de Los Andes y CasaLuker han estado desarrollando procesos de reducción de cadmio durante las etapas post-cosecha y procesos posteriores a escala de laboratorio y semi-industrial que les han permitido abordar el cumplimiento de las normas internacionales. Uno de los enfoques más exitosos ha sido la preparación de cuerpos micelares en matrices de cacao entre un 10% y un 30% de reducción, lo que ha permitido fabricar complejos químicos con las moléculas que contienen cadmio para eliminarlo. Otro enfoque basado en el uso de microorganismos de remoción de metales pesados ha sido evaluado y validado en condiciones de laboratorio y en una escala semi-industrial. Al mismo tiempo, se desarrollará un plan para garantizar la calidad de la matriz de cacao durante todo el proceso de eliminación, para mantener las cualidades del cacao "Fino de Aroma" producido en Colombia. Esto se hará a través de un monitoreo de las características organolépticas del grano que permite ajustar de manera iterativa los procesos escalados.
-------------	---

ID del proyecto	P20
Título del proyecto	Proyecto de la mitigación de cadmio con el uso de microorganismos
Institución líder/ implementadora	CasaLuker S.A.
Expertos clave	Claudia Rodriguez, Johanna Hurtado, Paula Andrea Pedraza, Patricia Ahumada, Martha Cepeda, Hector Hugo Olarte, Maria José Chica – Agrosavia: Daniel Bravo, Martha Gomez, Eddy Bautista, Andrés Diaz.
Socios	CorpoGen, Agrosavia
Fuentes de financiamiento	CasaLuker
Alcance geográfico	Colombia
Estatus de propuesta	En proceso
Fecha inicial	2015

ID del proyecto	P20
Fecha final	2019
Objetivo general	Reducción del contenido de cadmio en granos de cacao colombiano fermentado fino de aroma mediante el uso de estrategias biotecnológicas con microorganismos durante la post-cosecha.
Prácticas post-cosecha	
Descripción	Las estrategias de búsqueda para reducir la cantidad de metales tóxicos en los alimentos se han convertido en un foco importante para el desarrollo de estudios en diversas partes del mundo. Las estrategias biotecnológicas, en este caso, consisten en la aplicación de microorganismos en los procesos de disminución de cadmio del cacao. Bacillus y lactobacillus de diferentes orígenes con una alta capacidad de retención de cadmio se han observado en diferentes estudios. Los resultados de CasaLuker obtenidos en las pruebas de eliminación de cadmio de granos previamente desarrolladas en nuestro grupo, evaluaron varias cepas seleccionadas por su potencial en esta aplicación. Se realizaron pruebas a escala de laboratorio y se seleccionaron aquellas con los mejores porcentajes de remoción de cadmio. Las cepas de referencia también se evaluaron de acuerdo con lo que se informó en estudios anteriores, también, los microorganismos del fermento de cacao para aprovechar las condiciones de fermentación. Posteriormente, se realizaron ensayos a escala piloto con volúmenes entre 10 kg y 40 kg de masa de cacao, observando retiros entre 13% y 28% con tiempo de contacto entre 12 y 24 horas. Una vez que concluya la estandarización de la etapa piloto, se espera que se realicen pruebas in situ y semiindustriales en una de las regiones de Colombia donde los contenidos más altos de cadmio están presentes en el cacao.

ID del proyecto	P21
Título del proyecto	Efecto de las comunidades locales de hongos micorrizas arbusculares e injertos en la fisiología del cacao bajo estrés de cadmio y zinc
Institución líder/ implementadora	Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá (UNAL) Federación Nacional de cacaoteros de Colombia (FEDECACAO)
Expertos clave	Jhon Felipe Sandoval (UNAL), Edwin Gutiérrez (FEDECACAO), Alia Rodríguez (UNAL), Esperanza Torres Rojas (UNAL)
Fuentes de financiamiento	COLCIENCIAS, UNAL, FEDECACAO, Fondo Nacional de Cacao, Gobernación de Cundinamarca, Corredor tecnológico Agroindustrial.
Alcance geográfico	Colombia
Fecha inicial	2017
Fecha final	2019
Objetivo general	Determinar el efecto de las comunidades locales de hongos de micorriza arbuscular (AMF) y el injerto en la fisiología de diferentes genotipos de cacao bajo estrés de cadmio y zinc.
Fitorremediación y biorremediación	
Tipo(s) de intervención	Inoculación con comunidades de AMF de suelos enriquecidos con Cadmio y AMF comercial
Descripción	1. Los hongos micorrizas arbusculares (AMF) son simbiontes obligados presentes en la rizosfera del cacao y su diversidad de comunidad se modifica según diversos factores abióticos, como la concentración de cadmio (Cd) y zinc (Zn) en los suelos. Se ha informado que AMF tolerante al Cd-Zn podría usarse en aplicaciones biotecnológicas, sin

ID del proyecto	P21
	<p>embargo, es necesario identificar el papel de estas comunidades locales en los procesos de biorremediación. En esta investigación, caracterizamos la estructura de la comunidad local de AMF presente en suelos de la rizosfera de cacao con baja y alta concentración natural de estos metales en una región productora en Colombia. La caracterización de estas comunidades de AMF permitirá la identificación de un potencial tolerante al estrés de metales pesados para el desarrollo de estrategias de mitigación en plantas de cacao bajo estrés de Cd-Zn.</p> <p>2. AMF pueden reducir la absorción de metales pesados en la planta Cd, como el cadmio (Cd) y el zinc (Zn); sin embargo, esta respuesta depende de diferentes factores, como el genotipo de la planta y el inóculo de AMF. Esta investigación determinó el efecto de las comunidades locales de AMF en la fisiología de dos portainjertos injertados de cacao (IMC67 y CAU43, ambos injertados con FSV41) bajo estrés Cd y Zn como alternativa de manejo de suelos enriquecidos con AMF en una región colombiana. Los resultados de este proyecto resaltan la importancia de la interacción genotipo-AMF como un factor importante que determina la respuesta fisiológica del cacao bajo el estrés de Cd y Zn.</p>

Variabilidad genética en la absorción y partición de cadmio

Descripción	<p>El injerto es una técnica de propagación de cacao extendida en Colombia, esta práctica permite a los cultivadores clonar plantas de cacao con mejores características de calidad y rendimiento. Sin embargo, hay poca información sobre los efectos del injerto sobre la absorción y la partición de cadmio (Cd) y de zinc (Zn) en las plantas de cacao. Esta investigación evaluó el efecto del injerto sobre la absorción de Cd-Zn y la fisiología de la planta de dos genotipos bajo estrés de Cd-Zn. Se realizó un experimento de prueba utilizando plantas no injertadas, autoinjertadas e injertadas de cuatro genotipos diferentes (IMC67, CAU43 como portainjertos y FSV41, CCN51 como scions). Este estudio proporcionará información sobre la captación y partición de Cd-Zn de la planta para seleccionar los genotipos que resultan en una menor acumulación de Cd-Zn para los programas de implementación de viveros.</p>
--------------------	---

Mecanismos fisiológicos de absorción y partición de cadmio

Descripción	<p>El cadmio (Cd) y el zinc (Zn) son metales pesados que pueden alterar la fisiología de la planta dependiendo de su concentración en el suelo; Sin embargo, en el cacao, estas alteraciones solo se han descrito en condiciones artificiales que modifican la dinámica de los metales pesados en un sistema de suelo-planta natural. En esta investigación, se evaluó la nutrición, la eficiencia fotosintética, la partición de Cd y Zn y el crecimiento de dos genotipos de cacao (IMC67 y PA121) en suelos enriquecidos naturales con concentraciones altas y bajas de Cd-Zn. Los resultados de esta investigación proporcionan información novedosa sobre las interacciones catiónicas antagónicas, la acumulación de plantas de Cd-Zn y las alteraciones fisiológicas de las plantas de cacao que crecen en un suelo natural enriquecido con Cd-Zn.</p>
--------------------	---

ID del proyecto	P22
Título del proyecto	Caracterización de bacterias y hongos resistentes al cadmio de la rizosfera del cacao
Institución líder/ implementadora	Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá (UNAL) Federación Nacional de cacaoteros de Colombia (FEDECACAO)

ID del proyecto	P22
Expertos clave	Henry Alexander Cordoba Novoa (AGROSAVIA, UNAL), Jeimmy Alexandra Cáceres Zambrano (UNAL), Esperanza Torres Rojas (UNAL)
Fuentes de financiamiento	UNAL, Gobernación de Cundinamarca, Corredor tecnológico Agroindustrial, FEDECACAO.
Alcance geográfico	Colombia
Fecha inicial	2015
Fecha final	2019
Objetivo general	Caracterizar bacterias y hongos resistentes al Cadmio a partir de cacao cultivado en suelos enriquecidos naturales de Cadmio.
Fitorremediación y biorremediación	
Tipo(s) de intervención	Bacterias y hongos aislados de cacao cultivados en suelos naturalmente enriquecidos con Cadmio
Descripción	La biorremediación de metales pesados con bacterias y hongos puede ser una estrategia eficiente, respetuosa con el medio ambiente y de bajo costo para el manejo de suelos contaminados con Cadmio. En esta investigación, se aislaron bacterias y hongos resistentes a Cadmio asociados a la rizosfera del cacao a través de marcadores morfológicos y moleculares. También se evaluó su capacidad para solubilizar fósforo, fijar nitrógeno y degradar la celulosa. Los resultados de este estudio proporcionan el conocimiento de los microorganismos resistentes al Cadmio asociados al cultivo de cacao y destacan las posibles cepas para estrategias basadas en biotecnología para mitigar la absorción de Cadmio en el cacao.

ID del proyecto	P23
Título del proyecto	Mejoramiento tecnológico de la producción de cacao en las provincias de Rionegro y Alto Magdalena, Cundinamarca.
Institución líder/ implementadora	Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá (UNAL)
Expertos clave	John Fernando Soler Arias (UNAL), Heidy Soledad Rodríguez Albarracín (UNAL), Martha Cecilia Henao Toro (UNAL)
Fuentes de financiamiento	Gobernación de Cundinamarca (Corredor Tecnológico Agroindustrial Derivado 2)
Alcance geográfico	Colombia
Fecha inicial	2017
Fecha final	2019
Objetivo general	Evaluar el riesgo de contaminación del grano de cacao con cadmio en respuesta a la concentración de cadmio total y disponible en el suelo, en sistemas productivos de dos regiones de la zona andina colombiana.
Medición de los niveles de cadmio en suelos o granos de cacao y mapeo de suelos	
Ubicaciones/Área cubierta	
Descripción	<ol style="list-style-type: none"> 1. Modelización espacial del contenido de cadmio en suelos cultivados con cacao. Se siguió una metodología de observación, a través de un muestreo exploratorio, para establecer la relación de la variabilidad espacial de Cadmio y algunas propiedades químicas del suelo, con los contenidos de Cadmio en la planta. Se identificaron zonas dentro de la región con mayores concentraciones de cadmio. 2. Dinámica del cadmio en suelos pedregosos con altos niveles del elemento en granos de cacao. En fincas con altos niveles de Cadmio

ID del proyecto	P23
	en granos, nos enfocamos en la determinación de Cadmio a dos profundidades del suelo (0-30 y 60-100 cm), y el fraccionamiento del elemento (determinación de las fases intercambiables, carbonatos, orgánica y óxidos de hierro y manganeso). Los resultados muestran una alta variabilidad espacial de los niveles de Cadmio en el suelo y la planta, tanto a nivel municipal como dentro de las fincas
Identificación de fuentes de contaminación con cadmio en el suelo	
Fuentes investigadas	Antropogénico vs. natural.
Descripción	Para hacer un diagnóstico de la concentración de Cadmio en suelos y granos de cacao y evaluar si los contenidos de Cadmio en plantas son de origen geogénico o antropogénico, se seleccionaron 100 fincas y se tomaron muestras de un árbol de cacao con frutos maduros en cada granja para determinar el Cadmio en granos. Se evaluaron el nivel total y biodisponible de Cadmio y otras propiedades del suelo (pH, carbono orgánico, P, Fe, Mn, Zn y Cu), en los suelos alrededor del árbol. También se analizaron los niveles de Cadmio en fertilizantes y enmiendas y en la roca madre de los suelos.
Propiedades geoquímicas del suelo, factores agronómicos y biodisponibilidad/absorción de cadmio	
Descripción	Para hacer un diagnóstico de la concentración de Cadmio en suelos y granos de cacao y evaluar si los contenidos de Cadmio en plantas son de origen geogénico o antropogénico, se seleccionaron 100 fincas y se tomaron muestras de un árbol de cacao con frutos maduros en cada granja para determinar el Cadmio en granos. Se evaluaron el nivel total y biodisponible de Cadmio y otras propiedades del suelo (pH, carbono orgánico, P, Fe, Mn, Zn y Cu), en los suelos alrededor del árbol. También se analizaron los niveles de Cadmio en fertilizantes y enmiendas y en la roca madre de los suelos.
Mecanismos fisiológicos de absorción y partición de cadmio	
Descripción	En los cultivos de cacao seleccionados, se tomaron muestras de una planta con frutos maduros. Se analizó el Cadmio en tejidos de hojas y frutos (cáscara, grano y cáscara de las mazorcas). También se determinó la presencia de hojarasca en la tierra y hojas de cacao alrededor de los árboles. El factor de bioacumulación se calculó como la relación de Cadmio en la hoja o el frijol a la del suelo, y el factor de translocación como la relación de Cadmio en la hoja a la de los tejidos de la fruta. Se evaluó que la planta de cacao puede ser considerada como acumulador de cadmio. El riesgo de ciclismo de Cadmio en los cultivos del área de estudio puede ser alto, ya que la basura es un producto directo de la abscisión foliar de cacao durante todo el año y la hoja es el órgano con la mayor concentración de Cadmio.

ID del proyecto	P24
Título del proyecto	El Cadmio en el cultivo de cacao y las estrategias tecnológicas para su manejo
Institución líder/ implementadora	AGROSAVIA
Expertos clave	Daniel Bravo (Gerente del proyecto y líder de la investigación en bioremediación), Nesrine Chaali, Rocio Gámez, Andrea Montenegro, Margarita Gómez, Clara León, Diana Serralde, Viviana Varón, Ruth Quiroga, Gustavo Araujo, Urley Pérez, Gersain Rengifo, Santiago López, Juan Gil.
Socios	FEDECACAO, ESPOL, CasaLuker
Fuentes de financiamiento	Ministerio de Agricultura y desarrollo rural de Colombia (MADR)
Alcance geográfico	Colombia
Fecha inicial	2019
Objetivo general	Caracterizar la presencia de Cd en el cultivo de cacao para generar estrategias de mitigación en suelos, plantas y granos
Descripción	<p>Pese a que se tienen identificados ciertos aspectos del problema con el Cadmio, los aspectos críticos de la contaminación siguen presentando una cierta complejidad. Debe considerarse, por tanto, el origen - si es geogénico o antropogénico como presentado en estudios previos - y cuáles son las fuentes que mantienen el flujo de cadmio hacia el grano a nivel ecosistémico. Sin embargo, dada dicha complejidad de la distribución del metal también debe estudiarse a nivel local por predio, incluso por hectárea cultivada. De hecho, hay muchas preguntas por responder, desde su comportamiento espaciotemporal, para diferentes usuarios en la cadena (comunidad productora, académica, industrial y regulatoria). En granjas seleccionadas de los distritos de Santander y Antioquia, estamos midiendo cadmio y utilizando CdtB y analizando aspectos geológicos y biológicos del flujo de Cd en el sistema. Se analiza el cadmio en las hojas y frutos, incluidas las cáscaras, los granos y la cáscara de vaina. También se considera el cadmio en el suelo y la hojarasca de cacao alrededor de los árboles. Como en un trabajo anterior, el factor de bioacumulación (BF) se calcula como la relación de cadmio en las hojas o granos a la de los suelos, y el factor de translocación (TF) como la relación de cadmio en las hojas a la de los tejidos de la fruta. Debido a la complejidad del problema, mitigar la presencia de cadmio requiere soluciones con aportes multi-métodos y multi-enfoques que permitan: i) ahondar en las fuentes de Cadmio para comprenderlo mejor desde una perspectiva holística; y ii) definir estrategias plausibles a corto, mediano y largo plazo, con impactos sobre la producción nacional de cacao. El portafolio de ofertas tecnológicas, por tanto, deberá ser variado y consistente tanto con los tiempos de imposiciones reglamentarias, como a las capacidades corporativas de AGROSAVIA reales, experticias y disposiciones de cooperación internacional para generar soluciones potenciales a los productores de cacao nuestro país.</p>

ID del proyecto	P25.1
Título del proyecto	Selección de genotipos de cacao prometedores por atributos agronómicos de interés: diversidad genética, criterios de productividad, resistencia a enfermedades y absorción de cadmio.
Institución líder/ implementadora	AGROSAVIA
Expertos clave	Roxana Yockteng; Caren Rodríguez; Andrea Montenegro, Jaime Osorio
Fuentes de financiamiento	Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia (MADR)
Alcance geográfico	Colombia
Fecha inicial	2019
Objetivo general	Realizar una bioprospección del germoplasma disponible (bancos de germoplasma y colecciones de trabajo) mediante caracterización fenotípica, molecular, absorción de cadmio y compatibilidad para seleccionar genotipos prometedores ("colección central") que alimentarán el programa de mejora genética.

Variabilidad genética en la absorción y partición de cadmio	
Descripción	<p>Colombia no solo tiene una gran diversidad genética de la especie <i>Theobroma cacao</i> (Osorio et al.2017), sino también una gran diversidad de las especies silvestres hermanas del cacao. Al analizar muestras de diferentes herbarios en el país, se encontraron informes para las especies de las 22 especies del género <i>Theobroma</i> y de las 10 especies de las 17 descripciones del género <i>Herrania</i>.</p> <p>A pesar de esta variabilidad intraespecífica de <i>T. cacao</i> e interespecífica de las especies hermanas en Colombia, el cultivo de cacao presenta problemas derivados de la pérdida de esta variabilidad. El uso de cultivos monoclonales ha llevado a la pérdida de esta variabilidad, haciendo que estas plantaciones sean más susceptibles a enfermedades como la moniliasis y la mazorca negra (Evans 2007) y generando baja productividad debido a la autoincompatibilidad.</p> <p>Además, el cacao es una planta acumuladora de metales pesados, particularmente cadmio. La presencia de este elemento en el cacao producido en Colombia (León Moreno 2012) genera un problema de seguridad alimentaria en comparación con los mercados nacionales e internacionales, ya que el cacao no puede comercializarse si los niveles de cadmio en el grano exceden los niveles permitidos.</p> <p>En este proyecto, los estudios de asociación del genotipo con el fenotipo continuarán a medida que las bases de datos fenotípicas (incidencia de enfermedades, datos asociados con la productividad, etc.) se realimentan.</p>

ID del proyecto	P25.2
Título del proyecto	Identificación de atributos agronómicos en el cacao cuya expresión se ve afectada por el patrón con el fin de establecer un programa de mejora genética de patrones que contribuya a mejorar el comportamiento de los clones de interés.
Institución líder/ implementadora	AGROSAVIA
Expertos clave	Caren Rodríguez, Roxana Yockteng, Andrea Montenegro, Jaime Osorio, Xavier Argout
Fuentes de financiamiento	Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia (MADR)

ID del proyecto	P25.2
Alcance geográfico	Colombia
Fecha inicial	2019
Objetivo general	Estudiar el efecto del patrón en la expresión de atributos agronómicos de interés en la taza orientada a establecer un programa de mejora genética de patrones de cacao.

Variabilidad genética en la absorción y partición de cadmio

Descripción	<p>En Colombia, la propagación de Theobroma cacao se realiza principalmente a través de la técnica de injerto, combinando atributos de interés entre copas y patrones; sin embargo, en el país la base genética de los materiales utilizados como estándares es limitada, basada principalmente en el uso de progenies de 3 genotipos seleccionados por su adaptabilidad a las condiciones ácidas del suelo y su resistencia a Ceratocystis sp. Para responder a los desafíos actuales que enfrenta el cultivo de cacao colombiano, incluido el bajo rendimiento, las enfermedades limitantes y el estrés abiótico, como el déficit hídrico y la absorción de cadmio, es necesario garantizar una base genética más amplia que permita responder a las necesidades específicas de los productores de granos de cacao del país, así como los mercados internacionales. En una primera etapa de investigación, se identificarán los atributos agronómicos para los cuales el patrón tiene un efecto en la expresión de estos en la copa. Los resultados de las primeras fases contribuirán a definir la estrategia que se adoptará para cada atributo en un programa de mejoramiento genético como se describe a continuación: 1. Cuando no hay efecto del patrón en la copa, el atributo no será considerado para la selección de patrones 2. Cuando la influencia del patrón en la copa es importante, el atributo será considerado en el programa de mejora del patrón 3. Cuando la influencia del patrón y la interacción copa / patrón son importantes, el atributo será considerado y la selección de los patrones se implementará utilizando combinaciones con clones de interés como la copa 4. Una vez que los atributos para los cuales el patrón ejerce un efecto y la interacción copa / patrón son importantes, los atributos de interés en el patrón se combinarán a partir de un programa de mejora genética.</p>
-------------	--

ID del proyecto	P26
Título del proyecto	Acreditación de técnicas para la determinación de residuos de pesticidas en piña, anacardo, arroz y contaminantes de cadmio y de arsénico en arroz y cadmio en cacao.
Institución líder/ implementadora	AGROSAVIA
Expertos clave	María Angelica Pichimata, Andrea Montenegro, Yeni Rodriguez
Fuentes de financiamiento	Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia (MADR)
Alcance geográfico	Colombia
Fecha inicial	2019
Objetivo general	Demostrar las técnicas para la determinación de residuos de pesticidas en piña, arroz, anacardos y contaminantes cadmio y arsénico en arroz y cadmio en cacao, de acuerdo con los requisitos establecidos por la norma NTCISO / IEC 17025: 2017

Manejo de suelos y nutrientes

ID del proyecto	P26
Descripción	La Corporación ha estado trabajando con diferentes proyectos relacionados con la calidad de la seguridad alimentaria de manera transversal en todas las redes de investigación, por esta razón es importante y relevante contar con técnicas acreditadas que permitan obtener resultados confiables y rastreables a nivel internacional con respecto al contenido de As, cadmio y residuos de pesticidas en los alimentos. Este proyecto de investigación tiene como objetivo acreditar las técnicas para la determinación de residuos de pesticidas en piña, arroz, anacardo y cadmio y contaminantes de arsénico en arroz y cadmio en cacao, de acuerdo con los requisitos establecidos por NTC ISO / IEC 17025: 2017, que será abordado en aproximadamente dos años de ejecución y generará 3 ofertas tecnológicas asociadas a la prestación de servicios de laboratorio con estas técnicas. Los resultados de este proyecto pueden beneficiar a la comunidad académica y científica para que se puedan generar nuevos proyectos de investigación, las organizaciones de monitoreo y control, los productores, las empresas y los exportadores que requieren dicho análisis.

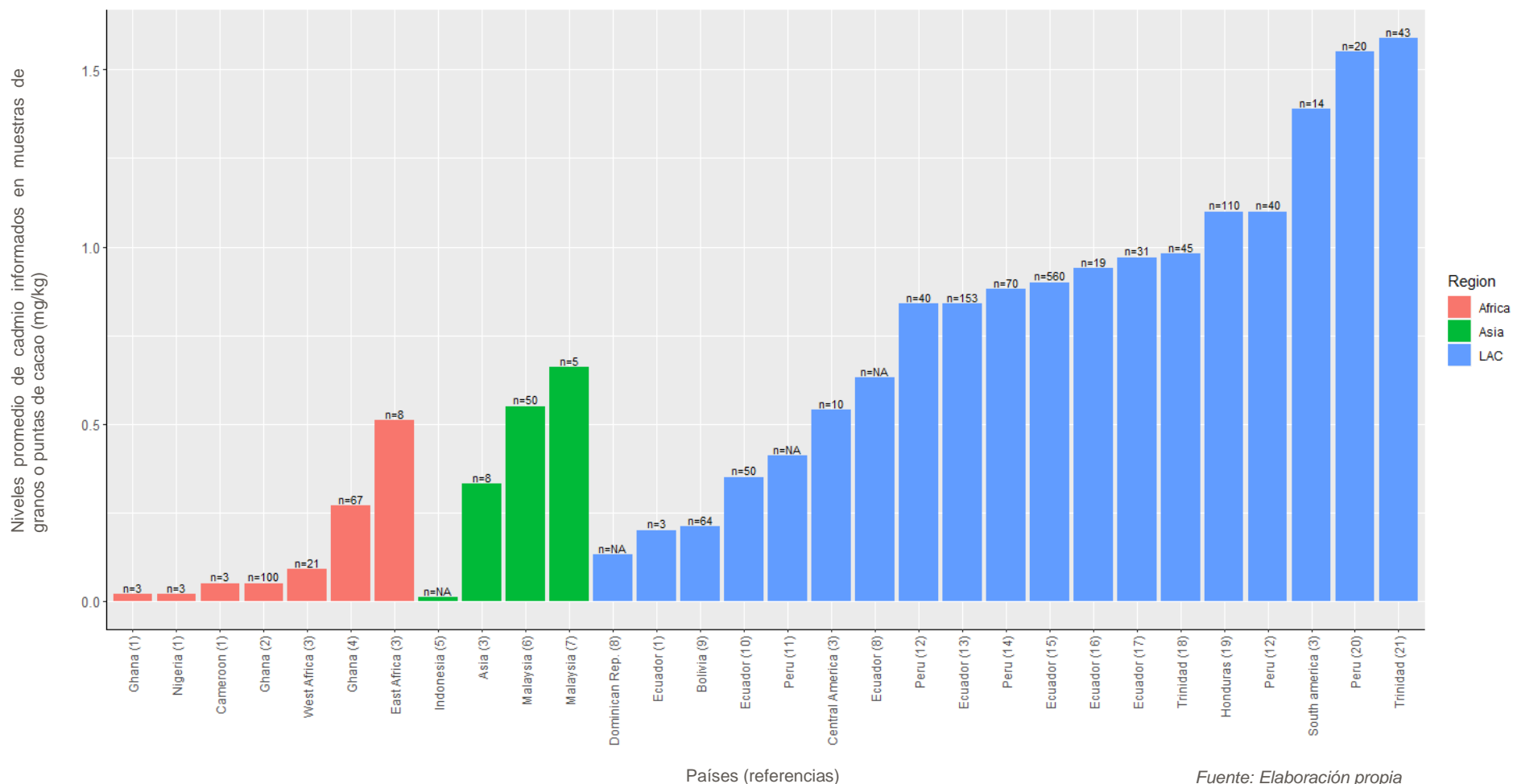
ID del proyecto	P27
Título del proyecto	Determinación del origen del cadmio y de las estrategias para mitigar los niveles de metales en granos de cacao y suelos en Arauca
Institución líder/ implementadora	AGROSAVIA
Expertos clave	Daniel Bravo; Carlos González; Mario Porcel; Gustavo Araujo; Marcela López; Rafael Novoa; Gersain Rengifo.
Fuentes de financiamiento	Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia (MADR)
Alcance geográfico	Colombia
Fecha inicial	2019
Objetivo general	Contribuir a la mitigación de los niveles de cadmio en el cacao mediante la generación de nuevas recomendaciones y tecnologías.
Manejo de suelos y nutrientes	
Descripción	Con respecto a la seguridad, se propone desarrollar una estrategia innovadora de fertilización que se base en los niveles iniciales de cadmio en la relación suelo - granos de cacao, como punto de partida para el trabajo del suelo. Con un enfoque de métodos múltiples con herramientas agrícolas de precisión, como la geoelectrónica, la geomicrobiología puede recomendar una fertilización integral y se generarán recomendaciones de manejo para mitigar el cadmio tanto en los suelos como en los granos de cacao, proporcionando criterios de decisión para reducir los niveles de cadmio en el medio y a largo plazo, y permitiendo mejorar y mantener con el tiempo el estado de seguridad de los granos en Arauca.

6.2.6 Indonesia

ID del proyecto	P28
Título del proyecto	Mitigación del cadmio a través de la mejora del suelo y cribado del genotipo
Institución líder/ implementadora	ICCRI
Expertos clave	Soetanto Abdoellah Soeparto, Erwin Prastowo, Niken Puspitasari, Indah Anitasari, Bayu Setyawan
Socios	
Fuentes de financiamiento	ICCRI
Alcance geográfico	Indonesia
Fecha de inicio	2018
Fecha final	2020
Objetivo general	<ul style="list-style-type: none">• Cribado de algunos rizomas en la absorción de cadmio del suelo• El efecto de la materia orgánica en la absorción del cadmio• Estudio de los contenidos de cadmio en los granos de cacao producidos en las áreas de producción en Indonesia y los importados de otros países

7 ANEXO

7.1 Anexo 1 – Contenido promedio de cadmio del grano informado por estudios en regiones de cultivo de cacao (referencias completas en las siguientes páginas)



(1)(Vitola et al. 2016); (2)(Amankwaah et al. 2015); (3)(Bertoldi et al. 2016); (4)(Takrama et al. 2015); (5)(Assa et al. 2018); (6)(Fauziah et al. 2001); (7)(Zarcinas et al. 2004); (8)(Kruszewski et al. 2018); (9)(Gramlich et al. 2017); (10)(Acosta et al. 2013); (11)(Llatance 2018); (12)(Tantalean Pedraza et al. 2017); (13)(Mite et al. 2010); (14)(Arévalo-Gardini et al. 2017); (15)(Argüello et al. 2019); (16)(Chavez et al. 2015) ; (17)(Barraza et al. 2017); (18)(Ramtahal, Yen, Bekele, et al. 2015); (19)(Gramlich et al. 2018); (20)(Cárdenas 2012); (21)(Ramtahal et al. 2014)

7.1.1 Anexo 1.1 – Referencias completas

- Acosta, S., & Pozo, P. (2013). Determinación de cadmio en la almendra de cacao (*Theobroma cacao*) de cinco fincas ubicadas en la vía santo domingo - esmeraldas, mediante espectrofotometría de absorción atómica con horno de grafito. *Infoanalítica*, 1(1), 69–82. Retrieved from
- Amankwaah, D., Nnuro, W. A., Awudza, J., & Afful, S. (2015). Determination of heavy metals in cocoa beans from some major cocoa growing regions in Ghana. *Food Science and Technology*, 16(1), 225.
- 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.
- 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.
- Assa, A., Noor, A., R Yunus, M., Misnawi, & N Djide, M. (2018). Heavy metal concentrations in cocoa beans (*Theobroma cacao* L.) originating from East Luwu , South Sulawesi, Indonesia. *Journal of Physics: Conference Series*, 979, 12011.
- 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.
- Bertoldi, D., Barbero, A., Camin, F., Caligiani, A., & Larcher, R. (2016). Multielemental fingerprinting and geographic traceability of *Theobroma cacao* beans and cocoa products. *Food Control*, 65, 46–53.
- Cárdenas, A. (2012). Presencia de cadmio en algunas parcelas de cacao orgánico de la cooperativa agraria industrial Naranjillo, Tingo María, Perú. Universidad Nacional Agraria de la Selva.
- 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.
- 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.
- Gramlich, A., Tandy, S., Gauggel, C., López, M., Perla, D., Gonzalez, V., & Schulin, R. (2018). Soil cadmium uptake by cocoa in Honduras. *Science of The Total Environment*, 612(September 2017), 370–378.
- Kruszewski, B., Obiedziński, M. W., & Kowalska, J. (2018). Nickel, cadmium and lead levels in raw cocoa and processed chocolate mass materials from three different manufacturers. *Journal of Food Composition and Analysis*, 66, 127–135.
- Llatance, W. O. (2018). Bioacumulación de cadmio en el cacao (*Theobroma cacao*) en la Comunidad Nativa de Pakun , Perú. *Revista Forestal Del Perú*, 33(1), 63–75.
- 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.
- Ramtahal, G., Chang Yen, I., Bekele, I., Bekele, F., Wilson, L., Maharaj, K., & Sukha, B. (2015). Implications of distribution of cadmium between the nibs and testae of cocoa beans on its marketability and food safety assessment. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 7(5), 731–736.
- Ramtahal, G., Yen, I. C., Bekele, I., Bekele, F., Wilson, L., & Sukha, B. (2014). Cost-effective Method of Analysis for the Determination of Cadmium, Copper, Nickel and Zinc in Cocoa Beans and Chocolates. *Journal of Food Research*, 4(1), 193–199.
- Takrama, J., Afrifa, A. A., Ofori-Frimpong, K., Jonfia-Essien, W. A., Agyemang, P., & Galyuon, I. (2015). Cadmium contamination of cocoa beans and cocoa growing agricultural soils of Ghana: There is no cause for public alarm. *Peak Journal of Public Health and Management*, 56–61.
- Tantalean Pedraza, E., Ángel, M., & Rojas, H. (2017). Distribución del contenido de cadmio en los diferentes órganos del cacao CCN-51 en suelo aluvial y residual en las localidades de Jacintillo y Ramal de Aspuzana Distribution of cadmium content in the different organs of cacao CCN-51 in aluvial and residua. 1(2), 69–78.
- Vitola, V., & Ciprovica, I. (2016). The effect of cocoa beans heavy and trace elements on safety and stability of confectionary products. *Rural Sustainability Research*, 35(330).
- Zarcinas, B. A., Pongsakul, P., McLaughlin, M. J., & Cozens, G. (2004). Heavy metals in soils and crops in Southeast Asia 2. Thailand. *Environmental Geochemistry and Health*, 26(3), 359–371.

7.1.2 Anexo 1.2 – Contenido de cadmio de cacao en grano (mg/kg) informado en estudios realizados en África, Asia y ALC

Estudio (Referencia completa en Anexo 1.1)	Región	País	n	Medio	DE	min	máx
Vitola y Ciprova, 2016	África	Ghana	3	0.02	0.003	NA	NA
Vitola y Ciprova, 2016	África	Nigeria	3	0.02	0.003	NA	NA
Vitola y Ciprova, 2016	África	Camerún	3	0.05	0.010	NA	NA
Amankwaah et al. 2015	África	Ghana	100	0.05	NA	0.005	0.095
Bertoldi et al. 2016	África	África Occidental	21	0.09	0.042	NA	NA
Takrama et al. 2015	África	Ghana	67	0.27	NA	0.248	0.336
Bertoldi et al. 2016	África	África Oriental	8	0.51	NA	NA	NA
Assa et al. 2018	Asia	Indonesia	NA	0.01	NA	NA	NA
Bertoldi et al. 2016	Asia	Asia	8	0.33	0.176	NA	NA
Fauziah et al. 2001	Asia	Malasia	50	0.55	0.109	NA	NA
Zarcinas et al. 2004	Asia	Malasia	5	0.66	NA	0.204	1.680
Kruszewski et al. 2018	LAC	Rep. Dominicana	NA	0.13	0.031	NA	NA
Vitola y Ciprova, 2016	LAC	Ecuador	3	0.20	0.040	NA	NA
Gramlich et al. 2017	LAC	Bolivia	64	0.21	0.020	NA	NA
Acosta y Pozo, 2013 (2)	LAC	Ecuador	50	0.35	NA	NA	NA
Llatance et al 2018	LAC	Perú		0.41	NA	NA	NA
Bertoldi et al. 2016	LAC	Centroamérica	10	0.54	0.302	NA	NA
Kruszewski et al. 2018	LAC	Ecuador	NA	0.63	0.067	NA	NA
Tantalean et al. 2017	LAC	Perú	40	0.84	NA	NA	NA
Mite et al. 2010	LAC	Ecuador	153	0.84	NA	0.320	1.800
Argüello et al. 2019	LAC	Ecuador	560	0.90	NA	0.03	10.4
Chavez et al. 2015	LAC	Ecuador	19	0.94	NA	0.020	3.000
Barraza et al. 2017	LAC	Ecuador	31	0.97	0.84	0.09	3.51
Ramtahal, 2015	LAC	Trinidad	45	0.98	0.248	NA	NA
Arévalo-Gardini et al. 2017	LAC	Perú	70	0.88	0.0.30	0.17	1.78
Gramlich et al. 2018	LAC	Honduras	110	1.10	0.100	NA	NA
Tantalean et al. 2017	LAC	Perú	40	1.10	NA	NA	NA
Bertoldi et al. 2016	LAC	Sudamérica	14	1.39	1.089	NA	NA
Cárdenas, A. 2012	LAC	Perú	20	1.55	NA	NA	NA
Ramtahal et al. 2014	LAC	Trinidad	43	1.59	0.152	NA	NA

Fuente: Elaboración propia

n=tamaño de muestra; *DE*=desviación estándar; *min*=mínimo; *max*=máximo; *NA*=no disponible

7.2 Anexo 2 – Resultados de estudios de referencia

*Estudios: 1 (Gramlich et al. 2017); 2 (Gramlich et al. 2018); 3 (Argüello et al. 2019); 4 (Barraza et al. 2017); 5 (Fauziah et al. 2001); 6 (Arévalo-Gardini et al. 2017); 7 (Huamani et al. 2011); 8 (Huamani-Yupanqui et al. 2012); 9 (Jonas 2016)

Estudio*	Variable de respuesta	Cadmio Biodisponible del Suelo						Cadmio del Grano												Cadmio de la Cáscara				Cadmio de la Hoja					
		1	2	2	2	5	8	1	2	2	2	3	3	3	3	3	4	7	9	1	2	2	5	1	1	2	5	2	
Tipo de análisis		RM	RM	RM	RM	CP	CP	RM	RM	RM	RM	RM	RM	RM	RM	RM	RM	RS	CP	RM	RM	RM	CP	RM	RM	RM	CP	RM	
Umbral de valor p		0.05	0.05	0.05	0.05		0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.01	0.05	0.05	0.05	0.05	0.01	0.05	0.05	0.05	0.01	0.05	
R-cuadrado		0.38 - 0.55	0.88	0.85	0.87			NA	0.53	0.57	0.69	0.48	0.57	0.65	0.45	0.65		0.18		0.24	0.62	0.73		0.60	0.59	0.59		0.57	
Contenido de cadmio	Cadmio total del suelo		+	+	+					+		+	+	+		+	+	+				+	+				+	+	
	Cadmio biodisponible								+												+			+	+	+			
pH	pH del suelo	-		-						-		-	-	-		-						-							
MO	Materia orgánica		-	-									-	-		-						-		-	-			-	
Tipo de suelo	Substrato geológico		Sí	Sí	Sí					Sí	Sí				Sí							Sí							
Textura del Suelo	Contenido de arcilla	+	+	+	+																-								
	Contenido de arena						-																						
CIC	CIC																												
Salinidad	CE																												
Micro-macro-nutrientes	Zn																												
	Fe	+	+		+																							+	
	P	-				+														+	-?								
	Pb																												
	Ca 2+																												
	Mg2+																										-		
	K																												-
Mn																												-	

	Variable de respuesta	Cadmio Biodisponible del Suelo				Cadmio del Grano											Cadmio de la Cáscara			Cadmio de la Hoja																	
Actividad Microbiana del Suelo	Colonización micorrízica																																				
Factores agronómicos	Aplicación de fertilizante																																				
	Monocultivo vs agroforestería																																				
	Orgánico vs convencional																																				
	Edad del huerto																																				
	Diámetro del tronco																																				
	Efecto cultivar																																				
Otros factores	Altitud																																				
	Proximidad a sitio industrial																																				
	Impacto de actividades petroleras																																				

Fuente: Elaboración propia

RM/RS Regresión Múltiple/Simple

CP Correlación Pearson

+ Relación positiva (el aumento conduce a un aumento de la variable de respuesta)

- Relación negativa (el aumento conduce a una disminución de la variable de respuesta)

Sí Efecto estadísticamente significativo sobre variable de respuesta

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, S., & Pozo, P. (2013). Determinación de cadmio en la almendra de cacao (*Theobroma cacao*) de cinco fincas ubicadas en la vía santo domingo - esmeraldas, mediante espectrofotometría de absorción atómica con horno de grafito. *Infoanalítica*, 1(1), 69–82. Retrieved from
- Adriano, D. C. (2001). *Trace Elements in Terrestrial Environments: Biogeochemistry, Bioavailability, and Risks of Metals*. Retrieved from
- 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.
- Ahmad, M., Rajapaksha, A. U., Lim, J. E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., ... Ok, Y. S. (2014). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere*, 99, 19–23.
- Aikpokpodion, P. E., Lajide, L., & Aiyesanmi, A. F. (2012a). Assessment of Heavy Metals Mobility in Selected Contaminated Cocoa Soils in Ondo State, Nigeria. *Global Journal of Environmental Research*, 6(1), 30–35.
- Aikpokpodion, P. E., Lajide, L., & Aiyesanmi, A. F. (2012b). Metal fractionation in soils collected from selected cocoa plantations in ogun state, Nigeria. *World Applied Sciences Journal*, 20(5), 628–636.
- Alloway, B. J., & Steinnes, E. (1999). Anthropogenic Additions of Cadmium to Soils. In M. J. McLaughlin & B. R. Singh (Eds.), *Cadmium in Soils and Plants* (pp. 97–123).
- Alvarez, A., & Polti, M. A. (2014). Bioremediation in Latin America: Current Research and Perspectives.
- Amankwaah, D., Nnuro, W. A., Awudza, J., & Afful, S. (2015). Determination of heavy metals in cocoa beans from some major cocoa growing regions in Ghana. *Food Science and Technology*, 16(1), 225.
- Anawar, H. M., Akter, F., Solaiman, Z. M., & Strezov, V. (2015). Biochar: An Emerging Panacea for Remediation of Soil Contaminants from Mining, Industry and Sewage Wastes. *Pedosphere*, 25(5), 654–665.
- Ansari, A. A., Gill, S. S., Gill, R., Lanza, G. R., & Newman, L. (2016). *Phytoremediation: Management of Environmental Contaminants*. Retrieved from
- 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*. Peru.
- 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 cocoa growing regions in Peru. *Science of The Total Environment*, 605–606, 792–800.
- Arévalo-Gardini, E., Obando-Cerpa, M. E., Zúñiga-Cernades, L. B., Arévalo-Hernández, C. O., Baligar, V., & He, Z. (2016). Heavy metals in soils of cocoa plantations (*Theobroma cacao* L) in three regions of Peru. *Ecología Aplicada*, 15(2), 81.
- 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.
- Assa, A., Noor, A., R Yunus, M., Misnawi, & N Djide, M. (2018). Heavy metal concentrations in cocoa beans (*Theobroma cacao* L.) originating from East Luwu, South Sulawesi, Indonesia. *Journal of Physics: Conference Series*, 979, 12011.
- 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.
- Beltrán-Pineda, M. E., & Gómez-Rodríguez, A. M. (2016). Biorremediación de Metales Pesados Cadmio (Cd), Cromo (Cr) y Mercurio (Hg), Mecanismos Bioquímicos e Ingeniería Genética: Una Revisión. *Revista Facultad De Ciencias Básicas*, 12(2), 172-197
- Benavides, M. P., Gallego, S., & Tomaro, M. (2005). Cadmium Toxicity in Plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17, 21–34.
- Bertoldi, D., Barbero, A., Camin, F., Caligiani, A., & Larcher, R. (2016). Multielemental fingerprinting and geographic traceability of *Theobroma cacao* beans and cocoa products. *Food Control*, 65, 46–53.
- Bravo, D., Braissant, O., Solokhina, A., Clerc, M., Daniels, A. U., Verrecchia, E. & Junier, P. (2011), Use of an isothermal microcalorimetry assay to characterize microbial oxalotrophic activity. *FEMS Microbiology Ecology*, 78: 266-274
- Bravo, D., Diaz, S., Benavides-Erazo, J., Rengifo-Estrada, G., Braissant, O., & Leon-Moreno, C.

- (2018). Cadmium and cadmium-tolerant soil bacteria in cacao crops from northeastern Colombia. *Journal of Applied Microbiology*, 124, 1175–1194.
- Caceres, J., & Torres, E. (2017). Microorganismos cultivables asociados a cadmio (cd) presentes en suelos cacaoteros de los municipales de Yacopi y Nilo, como estrategia de bioremediacion. Proceedings of the International Symposium on Cocoa Research. Lima.
- Cárdenas, A. (2012). *Presencia de cadmio en algunas parcelas de cacao orgánico de la cooperativa agraria industrial Naranjillo, Tingo María, Perú*. Universidad Nacional Agraria de la Selva.
- Castebianco, J. A. (2018). Heavy metals remediation with potential application in cocoa cultivation. *La Granja: Revista de Ciencias de La Vida*, 27(1), 21–35.
- Castro, A. V., de Almeida, A.-A. F., Pirovani, C. P., Reis, G. S. M., Almeida, N. M., & Mangabeira, P. A. O. (2015). Morphological, biochemical, molecular and ultrastructural changes induced by Cd toxicity in seedlings of *Theobroma cacao* L. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 115, 174–186.
- Cazón, J. P., Bernardelli, C., Viera, M., Donati, E., & Guibal, E. (2012). Zinc and cadmium biosorption by untreated and calcium-treated *Macrocystis pyrifera* in a batch system. *Bioresource Technology*, 116, 195–203.
- 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. (2016a). Evaluation of soil amendments as a remediation alternative for cadmium-contaminated soils under cacao plantations. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(17), 17571–17580.
- Chavez, E., He, Z. L., Stoffella, P. J., Mylavarapu, R. S., Li, Y. C., & Baligar, V. C. (2016b). Chemical speciation of cadmium: An approach to evaluate plant-available cadmium in Ecuadorian soils under cacao production. *Chemosphere*, 150, 57–62.
- 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.
- Chen, L., Long, X.-H., Zhang, Z.-H., Zheng, X.-T., Rengel, Z., & Liu, Z.-P. (2011). Cadmium accumulation and translocation in two Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) cultivars. *Pedosphere* 21 (5): 573–80. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pedosphere.2011.05.005>.
- Christensen, T. H., & Haug, P. M. (1999). Solid Phase Cadmium and the Reactions of Aqueous Cadmium with Soil Surfaces. In M. J. McLaughlin & B. R. Singh (Eds.), *Cadmium in Soils and Plants* (pp. 65–96).
- Clemens, S., Aarts, M. G. M., Thomine, S., & Verbruggen, N. (2013). Plant science: the key to preventing slow cadmium poisoning. *Trends in Plant Science*, 18(2), 92–99.
- Crozier, J. (2012). Heavy metals in Cocoa. *International Workshop on Possible EU Regulations on Cadmium in Cocoa and Chocolate Products*. Retrieved from
- Cryer, N. C., & Hadley, P. (2012). Cadmium Uptake and Partitioning Within the Cocoa Plant. Retrieved July 31, 2018, from Wrokshop/Reading University website:
- Cui, X., Fang, S., Yao, Y., Li, T., Ni, Q., Yang, X., & He, Z. (2016). Potential mechanisms of cadmium removal from aqueous solution by *Canna indica* derived biochar. *Science of the Total Environment*, 562, 517–525.
- Deheuvels, O., Rousseau, G. X., Soto Quiroga, G., Decker Franco, M., Cerda, R., Vilchez Mendoza, S. J., & Somarriba, E. (2014). Biodiversity is affected by changes in management intensity of cocoa-based agroforests. *Agroforestry Systems*, 88(6), 1081–1099.
- Deng, D., Shu, W. S., Zhang, J., Zou, H. L., Lin, Z., Ye, Z. H., & Wong, M. H. (2007). Zinc and cadmium accumulation and tolerance in populations of *Sedum alfredii*. *Environmental Pollution*, 147(2), 381–386.
- Deng, L., Li, Z., Wang, J., Liu, H., Li, N., Wu, L., ... Christie, P. (2016). Long-term field phytoextraction of zinc/cadmium contaminated soil by *Sedum plumbizincicola* under different agronomic strategies. *International Journal of Phytoremediation*, 18(2), 134–140.
- 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.
- 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.
- EPA. (2015). Method 3050B - Acid digestion of sediments, sludges and soils.
- 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.
- Fellet, G., Marmioli, M., & Marchiol, L. (2014). Elements uptake by metal accumulator species grown on mine tailings amended with three types of biochar. *Science of the Total Environment*, 468–469, 598–608.
- Fergusson, J. E. (1990). *The heavy elements: chemistry, environmental impact, and health effects*. Retrieved from
- Gaur, A., & Adholeya, A. (2004). Prospects of arbuscular mycorrhizal fungi in phytoremediation of heavy metal contaminated soils. *Current Science*, 86(4).
- Geeroms, J. (2016). *The influence of micro-nutrient availability on the uptake of cadmium by cacao trees*. Brussels.
- 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.
- Gramlich, A., Tandy, S., Gauggel, C., López, M., Perla, D., Gonzalez, V., & Schulin, R. (2018). Soil cadmium uptake by cocoa in Honduras. *Science of The Total Environment*, 612(September 2017), 370–378.
- Grant, C. A., Bailey, L. D., McLaughlin, M. J., & Singh, B. R. (1999). Management Factors which Influence Cadmium Concentrations in Crops. In M. J. McLaughlin & B. R. Singh (Eds.), *Cadmium in Soils and Plants* (pp. 151–198).
- Green, C. E., Chaney, R. L., & Bouwkamp, J. (2003). Interactions Between Cadmium Uptake and Phytotoxic Levels of Zinc in Hard Red Spring Wheat. *Journal of Plant Nutrition*, 26(2), 417–430.
- 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.
- 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.
- He, Q. B., & Singh, B. R. (1993). Effect of organic matter on the distribution, extractability and uptake of cadmium in soils. *Journal of Soil Science*, 44(4), 641–650.
- 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).
- He, S., Yang, X., He, Z., & BALIGAR, V. C. (2017). Morphological and Physiological Responses of Plants to Cadmium Toxicity: A Review. *Pedosphere*, 27(3), 421–438.
- Huamani-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.
- Hue, N. (1999). Amelioration of Subsoil Acidity through Surface Application of Organic Manures. *Journal of Environmental Quality*, 28, 623–632.
- Imseng, M., Wiggerhauser, M., Keller, A., Müller, M., Rehkämper, M., Murphy, K., ... Bigalke, M. (2018). Fate of Cd in Agricultural Soils: A Stable Isotope Approach to Anthropogenic Impact, Soil Formation, and Soil-Plant Cycling. *Environmental Science & Technology*, 52(4), 1919–1928.
- Imseng, M., Wiggerhauser, 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.
- Ishikawa, S., Ishimaru, Y., Igura, M., Kuramata, M., Abe, T., Senoura, T., ... Nakanishi, H. (2012). Ion-beam irradiation, gene identification, and marker-assisted breeding in the development of low-cadmium rice. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(47), 19166–19171.
- Jacome, D., Fernandez, J., & Rrodriguez, A. (2016). Dinamica del cadmio en plantas de cacao micorrizadas en suelos del tropico. *Memorias Del XXI Congreso Latinoamericano de La Ciencia Del Suelo. 24-28 de Octubre 2016. Quito - Ecuador*, 113–119.
- Janoušková, M., Pavlíková, D., Macek, T., & Vosátka, M. (2005). Arbuscular mycorrhiza decreases cadmium phytoextraction by transgenic tobacco with inserted metallothionein. *Plant and Soil*, 272(1), 29–40.
- Janoušková, M., Pavlíková, D., & Vosátka, M. (2006). Potential contribution of arbuscular mycorrhiza to cadmium immobilisation in soil. *Chemosphere*, 65(11), 1959–1965.
- Jiang, Q.-Y., Zhuo, F., Long, S.-H., Zhao, H.-D., Yang, D.-J., Ye, Z.-H., ... Jing, Y.-X. (2016). Can arbuscular mycorrhizal fungi reduce Cd uptake and alleviate Cd toxicity of *Lonicera japonica* grown in Cd-added soils? *Scientific Reports*, 6, 21805.

- 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.
- Khoshgoftar, A. H., Shariatmadari, H., Karimian, N., Kalbasi, M., Van Der Zee, S. E. A. T. M. Van Der, & Parker, D. R. (2004). Salinity and Zinc Application Effects on Phytoavailability of Cadmium and Zinc. *Soil Science Society of America Journal*, 68, 1885–1889.
- Kruszewski, B., Obiedziński, M. W., & Kowalska, J. (2018). Nickel, cadmium and lead levels in raw cocoa and processed chocolate mass materials from three different manufacturers. *Journal of Food Composition and Analysis*, 66, 127–135.
- Letten, S., Vandecasteele, B., Vos, B. De, Vansteenkiste, D., & Verschelde, P. (2011). Intra- and inter-annual variation of Cd, Zn, Mn and Cu in foliage of poplars on contaminated soil. *Science of The Total Environment*, 409(11), 2306–2316.
- 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.
- Leyval, C., Katarzyna T. & Kurt Haselwandter. Effect of heavy metal pollution on mycorrhizal colonization and function: physiological, ecological and applied aspects. *Mycorrhiza* 7 (1997): 139-153.
- Li, J., Baker, A. J. M., Ye, Z., Wang, H., & Shu, W. (2012). *Phytoextraction of Cd-Contaminated Soils : Current Status and Future Challenges*. 2113–2152.
- Liu, J., & Hue, N. V. (2001). Amending subsoil acidity by surface applications of gypsum, lime, and composts. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 32(13–14), 2117–2132.
- 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.
- Llatance, W. O. (2018). Bioacumulación de cadmio en el cacao (*Theobroma cacao*) en la Comunidad Nativa de Pakun, Perú. *Revista Forestal Del Perú*, 33(1), 63–75.
- Low, K. S., & Lee, C. K. (1994). Effect of pH and Inorganic Reagents on the Immobilization of Cadmium in Some Malaysian Cocoa-growing Soils. *Pertanika Journal of Science and Technology*, 2(2), 181–187.
- 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.
- McBride, M. B. (2011). A comparison of reliability of soil cadmium determination by standard spectrometric methods. *Journal of Environmental Quality*, 40(6), 1863–1869.
- McLaughlin, M. J., Maier, N. A., Correll, R., Smart, M. K., Sparrow, L. A., & McKay, A. (1998). Prediction of cadmium concentrations in potato tubers (*Solanum tuberosum*) by pre-plant soil and irrigation water analyses. *Soil Research*, 37(1), 191–208. Retrieved from
- 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.
- Mortvedt, J. (1985). Plant Uptake of Heavy Metals in Zinc Fertilizers Made From Industrial By-Products1. *Journal of Environmental Quality - J ENVIRON QUAL*, 14.
- Mounicou, S., Szpunar, J., Andrey, D., Blake, C., & Lobinski, R. (2003). Concentrations and bioavailability of cadmium and lead in cocoa powder and related products. *Food Additives and Contaminants*, 20(4), 343–352.
- Muszyńska, E., & Hanus-Fajerska, E. (2016). Why are heavy metal hyperaccumulating plants so amazing? *BioTechnology*, 96(4), 265–271.
- Nawaz, M. A., Imtiaz, M., Kong, Q., Cheng, F., Ahmed, W., Huang, Y., & Bie, Z. (2016). Grafting : A Technique to Modify Ion Accumulation in Horticultural Crops. *Frontiers in Plant Science*, 7(October), 1–15.
- Nereida, S. (2011). Cadmium availability in two Venezuelan soils: phosphorus effect. *Revista Ingeniería UC.*, 18(2), 7–14.
- Oporto, C., Vandecasteele, C., & Smolders, E. (2007). Elevated Cadmium Concentrations in Potato Tubers Due to Irrigation with River Water Contaminated by Mining in Potosí, Bolivia. *Journal of Environmental Quality*, 36, 1181–1186.
- Pan, Y., Koopmans, G. F., Bonten, L. T. C., Song, J., Luo, Y., Temminghoff, E. J. M., & Comans, R. N. J. (2016). Temporal variability in trace metal solubility in a paddy soil not reflected in uptake by rice (*Oryza sativa* L.). *Environmental Geochemistry and Health*, 38(6), 1355–1372.

- Paul, A., & Chaney, R. (2017). Effect of Soil Amendments on Cd Accumulation by Spinach from a Cd-Mineralized Soil. *Journal of Environmental Quality*, 46.
- Pereira, R., Araújo, D., Almeida, A. F. De, Silva, L., Mangabeira, P. A. O., Olimpio, J., ... Baligar, V. C. (2017). Photosynthetic, antioxidative, molecular and ultrastructural responses of young cacao plants to Cd toxicity in the soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 144(June), 148–157.
- Pérez Moncada, A. U., Gómez Ramírez, M., Ordoñez Serralde, D. P., Peñaranda Rolón, M. A., Wilches Ortiz, A. W., Ramírez, L., & Rengifo Estrada, A. G. (2019). Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) as a strategy to reduce the absorption of cadmium in cocoa (*Theobroma cacao*) plants. *Terra Latinoamericana*, 37, 121–130.
- Pinto, T. de O., García, A. C., Guedes, J. do N., do A. Sobrinho, N. M. B., Tavares, O. C. H., & Berbara, R. L. L. (2016). Assessment of the Use of Natural Materials for the Remediation of Cadmium Soil Contamination. *PLOS ONE*, 11(6), 1–14.
- Ramtahal, G., Chang Yen, I., Bekele, I., Bekele, F., Wilson, L., Maharaj, K., & Sukha, B. (2015). Implications of distribution of cadmium between the nibs and testae of cocoa beans on its marketability and food safety assessment. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 7(5), 731–736.
- 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 (*Theobroma cacao* L.) In Trinidad & Tobago. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49(19), 2456–2464.
- Ramtahal, G., Chang Yen, I., Seegobin, D., Bekele, I., Bekele, F., Wilson, L., & Harrynanan, L. (2012). Investigation of the effects of mycorrhizal fungi on cadmium accumulation in cacao. *Proceedings of the Caribbean Food Crops Society*, 48, 147–152. Mexico.
- Ramtahal, G., Yen, I. C., Ahmad, N., Bekele, I., Bekele, F., Maharaj, K., ... Harrynanan, L. (2015). Prediction of Soil Cadmium Bioavailability to Cacao (*Theobroma cacao* L.) using Single-Step Extraction Procedures. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 46(20), 2585–2594.
- Ramtahal, G., Yen, I. C., Bekele, I., Bekele, F., Wilson, L., Maharaj, K., & Harrynanan, L. (2016). Relationships between Cadmium in Tissues of Cacao Trees and Soils in Plantations of Trinidad and Tobago. *Food and Nutrition Sciences*, 07(01), 37–43.
- Ramtahal, G., Yen, I. C., Bekele, I., Bekele, F., Wilson, L., & Sukha, B. (2014). Cost-effective Method of Analysis for the Determination of Cadmium, Copper, Nickel and Zinc in Cocoa Beans and Chocolates. *Journal of Food Research*, 4(1), 193–199.
- Ramtahal, G., Yen, I. C., Hamid, A., Bekele, I., Bekele, F., Maharaj, K., & Harrynanan, L. (2018). The Effect of Liming on the Availability of Cadmium in Soils and Its Uptake in Cacao (*Theobroma cacao* L.) In Trinidad & Tobago. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 0(0), 1–9.
- Rao, C. R. M., Sahuquillo, A., & Lopez Sanchez, J. F. (2008). A Review of the Different Methods Applied in Environmental Geochemistry For Single and Sequential Extraction of Trace Elements in Soils and Related Materials. *Water, Air, and Soil Pollution*, 189(1), 291–333.
- 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*.
- Revoredo, A. G., & Hurtado, J. (2017). Efecto del tratamiento con 3 cepas de streptomicetos en la acumulación de cadmio en plantas de *Theobroma cacao* L. *Proceedings of the International Symposium on Cocoa Research*. Lima.
- Rieuwerts, J. S. (2007). The mobility and bioavailability of trace metals in tropical soils: A review. *Chemical Speciation and Bioavailability*, 19(2), 75–85.
- Rizwan, M., Ali, S., Qayyum, M. F., Ibrahim, M., Zia-ur-Rehman, M., Abbas, T., & Ok, Y. S. (2016). Mechanisms of biochar-mediated alleviation of toxicity of trace elements in plants: a critical review. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(3), 2230–2248.
- Roberts, T. L. (2014). Cadmium and phosphorous fertilizers: The issues and the science. *Procedia Engineering*, 83, 52–59.
- 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.
- 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.
- 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.
- Sauvé, S., Hendershot, W., & Allen, H. E. (2000). Solid-Solution Partitioning of Metals in

- Contaminated Soils: Dependence on pH, Total Metal Burden, and Organic Matter. *Environmental Science & Technology*, 34(7), 1125–1131.
- Savvas, D., Colla, G., Roupshael, Y., & Schwarz, D. (2010). Amelioration of heavy metal and nutrient stress in fruit vegetables by grafting. *Scientia Horticulturae*, 127(2), 156–161.
- Schneider, L. (2016). Effects of Liming on Cadmium Availability in Soils and Update by Cocoa. ETH Zurich.
- Sêkara, A., Ciura, J., & Jêdrszczyk, 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.
- 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).
- Shahid, M., Dumat, C., Khalid, S., Schreck, E., Xiong, T., & Niazi, N. K. (2017). Foliar heavy metal uptake, toxicity and detoxification in plants: A comparison of foliar and root metal uptake. *Journal of Hazardous Materials*, 325, 36–58.
- Shawabkeh, R. A. (2000). The Feasibility of Using Diatomite and Mn – Diatomite for Remediation of Pb²⁺, Cu²⁺, and Cd²⁺ from Water. *Separation Science and Technology*, 35(14), 2299–2310.
- Shi, W. yu, Shao, H. bo, Li, H., Shao, M. an, & Du, S. (2009). Progress in the remediation of hazardous heavy metal-polluted soils by natural zeolite. *Journal of Hazardous Materials*, 170(1), 1–6.
- Simmons, R. W., Chaney, R. L., Angle, J. S., Kruatrachue, M., Klinphoklap, S., Reeves, R. D., & Bellamy, P. (2015). Towards Practical Cadmium Phytoextraction with *Nocca Caerulescens*. *International Journal of Phytoremediation*, 17(2), 191–199.
- Singh, B. R., & McLaughlin, M. J. (1999). *Cadmium in Soils and Plants* (M. J. McLaughlin & B. R. Singh, Eds.).
- Smolders, A., Lock, R., der Velde, G., Medina Hoyos, R., & Roelofs, J. (2003). Effects of Mining Activities on Heavy Metal Concentrations in Water, Sediment, and Macroinvertebrates in Different Reaches of the Pilcomayo River, South America. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 44(3), 314–323.
- Smolders, E. (2017). Scientific aspects underlying the regulatory framework in the area of fertilisers – state of play and future reforms. IP/A/IMCO/2016-19 - PE 595.354. European Union. 30 pp.
- Solís-Domínguez, F. A., González-Chávez, M. C., Carrillo-González, R., & Rodríguez-Vázquez, R. (2007). Accumulation and localization of cadmium in *Echinochloa polystachya* grown within a hydroponic system. *Journal of Hazardous Materials*, 141(3), 630–636.
- Sun, H., Li, Y., Ji, Y., Yang, L., Wand, W., & Li, H. (2010). Environmental contamination and health hazard of lead and cadmium around Chatian mercury mining deposit in western Hunan Province, China. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 20(2), 308–314.
- Takijima, Y., & Katsumi, F. (1973). Cadmium contamination of soils and rice plants caused by zinc mining III. Effects of water management and applied organic manures on the control of cd uptake by plants. *Soil Science and Plant Nutrition*, 19(1), 29–38.
- Takrama, J., Afrifa, A. A., Ofori-Frimpong, K., Jonfia-Essien, W. A., Agyemang, P., & Galyuon, I. (2015). Cadmium contamination of cocoa beans and cocoa growing agricultural soils of Ghana: There is no cause for public alarm. *Peak Journal of Public Health and Management*, 56–61.
- Tantalean Pedraza, E., Ángel, M., & Rojas, H. (2017). *Distribución del contenido de cadmio en los diferentes órganos del cacao CCN-51 en suelo aluvial y residual en las localidades de Jacintillo y Ramal de Aspuzana* Distribution of cadmium content in the different organs of cacao CCN-51 in aluvial and residual. 1(2), 69–78.
- Thermo Elemental. (2002). *AAS, GFAAS, ICP or ICP-MS? Which technique should I use? - An elementary overview of element analysis.*
- Thyssen, G. M., Keil, C., Wolff, M., Sperling, M., Kadow, D., Haase, H., & Karst, U. (2018). Bioimaging of the elemental distribution in cocoa beans by means of LA-ICP-TQMS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 33(2), 187–194.
- Treder, W., & Cieslinski, G. (2005). Effect of Silicon Application on Cadmium Uptake and Distribution in Strawberry Plants Grown on Contaminated Soils. *Journal of Plant Nutrition*, 28(6), 917–929.
- 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.
- 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.
- Van der Ent, A., Baker, A. J. M., Reeves, R. D., Pollard, A. J., & Schat, H. (2013). Hyperaccumulators of metal and metalloid trace elements: Facts and fiction. *Plant and Soil*, 362(1), 319–334.
- Verbruggen, N., Hermans, C., & Schat, H. (2009). Mechanisms to cope with arsenic or cadmium excess in plants. *Current Opinion in Plant Biology*, 12(3), 364–372.
- Villafort Carvalho, M. T., Amaral, D. C., Guilherme, L. R. G., & Aarts, M. G. M. (2013). *Gomphrena claussenii*, the first South-American metallophyte species with indicator-like Zn and Cd accumulation and extreme metal tolerance. *Frontiers in Plant Science*, 4, 180.
- Vitola, V., & Ciprova, I. (2016). The effect of cocoa beans heavy and trace elements on safety and stability of confectionary products. *Rural Sustainability Research*, 35(330).
- Wang, A. S., Angle, J. S., Chaney, R. L., Delorme, T. A., & Reeves, R. D. (2006). Soil pH Effects on Uptake of Cd and Zn by *Thlaspi caerulescens*. *Plant and Soil*, 281(1), 325–337.
- 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.
- Welch, R. M., & Norvell, W. A. (1999). Mechanisms of Cadmium Uptake, Translocation and Deposition in Plants. In M. J. McLaughlin & B. R. Singh (Eds.), *Cadmium in Soils and Plants* (pp. 125–150).
- Wingenfelder, U., Nowack, B., Furrer, G., & Schulz, R. (2005). Adsorption of Pb and Cd by amine-modified zeolite. *Water Research*, 39(14), 3287–3297.
- Xu, D., Zhao, Y., Sun, K., Gao, B., Wang, Z., Jin, J., Wu, F. (2014). Cadmium adsorption on plant- and manure-derived biochar and biochar-amended sandy soils: Impact of bulk and surface properties. *Chemosphere*, 111, 320–326.
- Yang, Q. W., Lan, C. Y., Wang, H. B., Zhuang, P., & Shu, W. S. (2006). Cadmium in soil–rice system and health risk associated with the use of untreated mining wastewater for irrigation in Lechang, China. *Agricultural Water Management*, 84(1), 147–152.
- Yasmin Khan, K., Ali, B., Cui, X., Feng, Y., Yang, X., & Joseph Stoffella, P. (2017). Impact of different feedstocks derived biochar amendment with cadmium low uptake affinity cultivar of pak choi (*Brassica rapa* ssp. *chinensis* L.) on phytoavoidance of Cd to reduce potential dietary toxicity. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 141(March), 129–138.
- Zamora, C. D. (2018). Cooperative Agroindustrial Cacao Alto Huallaga – Paquete Tecnológico para disminuir el contenido de cadmio de los granos de cacao.
- Zarcinas, B. A., Pongsakul, P., McLaughlin, M. J., & Cozens, G. (2004). Heavy metals in soils and crops in Southeast Asia 2. Thailand. *Environmental Geochemistry and Health*, 26(3), 359–371.
- Zhai, L., Liao, X., Chen, T., Yan, X., Xie, H., Wu, B., & Wang, L. (2008). Regional assessment of cadmium pollution in agricultural lands and the potential health risk related to intensive mining activities: A case study in Chenzhou City, China. *Journal of Environmental Sciences*, 20(6), 696–703.
- 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).
- 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.