



EDITORIAL
NAVEGANTE



NANOBURBUJAS DE AIRE Y LA REMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS POR METALES PESADOS EN PLANTACIONES DE CACAO

Ana Noemi Sandoval Vergara
José Bladimir Sánchez Cruz
Ludwig Nicolás Villanueva Mori



NANOBURBUJAS DE AIRE Y LA REMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS POR METALES PESADOS EN PLANTACIONES DE CACAO

Ana Noemi Sandoval Vergara

José Bladimir Sánchez Cruz

Ludwig Nicolás Villanueva Mori



EDITORIAL
NAVEGANTE

Todas nuestras publicaciones son sometidas a revisión doble-ciego de pares externo (*Peer Review Double Blinded*).

Esta publicación cuenta con licencia Creative Commons Reconocimiento - NoComercial - SinObraDerivada 3.0 Unported License.



ISBN: 978-628-7736-68-9

Nanoburbujas de aire y la remediación de suelos contaminados por metales pesados en plantaciones de cacao

© Ana Noemi Sandoval Vergara
© José Bladimir Sánchez Cruz
© Ludwig Nicolás Villanueva Mori

2025

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17554920>

©Editorial Navegante
www.editorialnavegante.com

Queda prohibida la reproducción bajo cualquier modalidad de toda o una parte de esta obra sin autorización expresa del titular de los derechos.

Diseño de carátula y composición: Editorial Navegante
Edición electrónica: Editorial Navegante.
Impreso en Colombia/ *Printed in Colombia*

NANOBURBUJAS DE AIRE Y LA REMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS POR METALES PESADOS EN PLANTACIONES DE CACAO

Ana Noemi Sandoval Vergara

José Bladimir Sánchez Cruz

Ludwig Nicolás Villanueva Mori



EDITORIAL
NAVEGANTE

Ana Noemi Sandoval Vergara

Correo: ansandoval@unsm.edu.pe

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9702-8434>

Afiliación: Universidad Nacional de San Martín.

José Bladimir Sánchez Cruz

Correo: jsanchezc@unsm.edu.pe

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6427-7824>

Afiliación: Universidad Nacional de San Martín.

Ludwig Nicolás Villanueva Mori

Correo: lunivimo10@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6468-9754>

Afiliación: Universidad César Vallejo.

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS.....	11
ÍNDICE DE FIGURAS.....	12
INTRODUCCIÓN	13

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS DE LA CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS Y LA TECNOLOGÍA DE NANOBUJAS	15
1.1 Metales Pesados en Agroecosistemas de Cacao: Orígenes, especiación y toxicidad	15
1.1.1 Fuentes Antropogénicas y Naturales de Contaminación por Cadmio (Cd), Plomo (Pb) y otros Metales Pesados	17
1.1.2 Dinámica y Biodisponibilidad de los Metales Pesados en el Suelo: pH, materia orgánica y textura.....	18
1.1.3 Impacto Fisiológico y Sanitario de la Acumulación de Metales Pesados en el Cacao (<i>Theobroma cacao L.</i>).....	21
1.2 Principios Físicoquímicos de las Nanoburbujas.....	23
1.2.1 Definición, Generación y Estabilidad de las Nanoburbujas de Aire	23
1.2.2 Propiedades Interfaciales: Potencial Zeta, Tensión Superficial y Generación de Especies Reactivas de Oxígeno (ROS).....	26

1.2.3 Interacción de las Nanoburbujas con la Matriz del Suelo y Contaminantes.	28
1.3 Estado del Arte: Tecnologías de Remediación de Suelos.....	30
1.3.1 Revisión de Métodos Convencionales: Fitorremediación, Enmiendas Químicas y Lavado de Suelos....	31
1.3.2 Tecnologías Emergentes y Sostenibles en la Remediación de Suelos Agrícolas.....	33
1.3.3 Potencial de la Tecnología de Nanoburbujas como Estrategia Innovadora.	34

CAPÍTULO II

MECANISMOS DE ACCIÓN DE LAS NANOBURBUJAS DE AIRE EN LA REMEDIACIÓN DE SUELOS CACAOTEROS

2.1 Movilización y Extracción de Metales Pesados.....	37
2.1.1 Desorción de Metales Pesados de las Partículas del Suelo Inducida por Nanoburbujas.....	38
2.1.2 Formación de Complejos Metálicos y su Transporte en la Solución del Suelo.	40
2.1.3 Sinergias con Agentes Quelantes y Enmiendas Orgánicas.....	42
2.2 Influencia de las Nanoburbujas en las Propiedades del Suelo y la Rizosfera.....	44
2.2.1 Efectos sobre la Estructura del Suelo: Agregación y porosidad.....	44
2.2.2 Modificación del Potencial de Óxido-Reducción (ORP) y del pH del suelo.	46
2.2.3 Impacto en la Comunidad Microbiana del Suelo y su Rol en la Biogeoquímica de los Metales.....	49

2.3 Interacción Nanoburbuja-planta: Implicaciones para el Cacao	51
2.3.1. Mejora de la Oxigenación en la Zona Radicular y su Efecto en la Sanidad de la Raíz.	51
2.3.2 Reducción de la Fitoextracción de Metales Pesados por la Planta de Cacao.....	54
2.3.3 Evaluación de la Respuesta Fisiológica y Bioquímica del Cacao al Tratamiento:	57

CAPÍTULO III

APLICACIÓN PRÁCTICA Y EVALUACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE NANOBURBUJAS EN CAMPO.....

3.1 Diseño e Implementación de un Sistema de Remediación In Situ.....	60
3.1.1 Metodologías para la Generación y Aplicación de Nanoburbujas en Parcelas de Cacao.	60
3.1.2 Parámetros Operacionales: Frecuencia de aplicación, dosis y monitoreo.....	65
3.1.3 Protocolos para el muestreo y análisis de Suelo, Agua y Tejido Vegetal.	68
3.2 Estudios de Casos y Evaluación de la Eficacia	71
3.2.1 Análisis Comparativo de la Eficiencia de Remoción de Metales Pesados.....	72
3.2.2 Evaluación de la Calidad del Suelo y la Salud del Cultivo post-tratamiento.	76
3.2.3 Cuantificación de la Reducción de Metales Pesados en Almendras de Cacao.	78
3.3 Consideraciones Económicas, Ambientales y Futuras líneas de investigación.....	81

3.3.1 Análisis de costo-beneficio de la Tecnología de Nanoburbujas frente a métodos tradicionales.....	82
3.3.2 Evaluación del Impacto Ambiental a largo plazo y sostenibilidad de la técnica.	87
3.3.3 Perspectivas Futuras: Optimización, escalabilidad y potencial de transferencia a otros cultivos.....	90

CAPÍTULO IV

REMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS POR METALES PESADOS MEDIANTE NANOBURBUJAS EN PLANTACIONES DE CACAO (<i>THEOBROMA CACAO</i>) EN LA REGIÓN SAN MARTÍN	93
4.1 Introducción	93
4.2 Aspectos Metodológicos.....	94
4.2.1 Formulación del Problema.....	97
4.2.2 Justificación	97
4.2.3 Objetivo General.....	98
4.2.4 Objetivos Específicos	98
4.2.5 Hipótesis.....	98
4.2.6 Variables	99
4.2.6 Diseño de la Investigación.....	100
4.6.7 Procedimiento de Muestreo.....	100
4.2.8 Técnicas de Recolección de Datos.....	103
4.2.9 Técnicas Estadísticas o de Análisis de Información.....	104
4.3 Hallazgos y Discusión	105
4.4 Conclusiones y recomendaciones.....	108
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	111

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	
<i>Ventajas y Desventajas de la Fitoextracción de Metales Pesados en la Agricultura.....</i>	<i>56</i>
Tabla 2	
<i>Metodologías de Generación de Nanoburbujas.....</i>	<i>63</i>
Tabla 3	
<i>Comparación y Aplicabilidad.....</i>	<i>75</i>
Tabla 4	
<i>Clasificación de Costo-Efectividad</i>	<i>83</i>
Tabla 5	
<i>Variables.....</i>	<i>99</i>
Tabla 6	
<i>Procedimiento de Muestreo</i>	<i>102</i>
Tabla 7	
<i>Técnicas de Recolección de Datos.....</i>	<i>103</i>
Tabla 8	
<i>Cronograma de Trabajo.....</i>	<i>107</i>
Tabla 9	
<i>Presupuesto.....</i>	<i>107</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	
<i>Proceso General de Fitoextracción</i>	54
Figura 2	
<i>Proceso de Reducción de Metales Pesados en Almendras de Cacao.....</i>	81

INTRODUCCIÓN

Actualmente la agricultura moderna atraviesa por diversos desafíos que limitan la capacidad de sostenibilidad y optimización de sus prácticas tradicionales, y el uso de recursos destinados a cultivos de alto valor y exigencia, como ocurre con el cacao, cuya producción es vital para economías como las del Perú, donde los cultivos crecen en regiones tropicales, haciendo necesario mejorar la salud de las plantas, aumentar el rendimiento de trabajo y reducir el impacto ambiental mientras son exploradas soluciones tecnológicas de vanguardia. Por ello, en este contexto, la nanotecnología emerge como una herramienta con potencial transformador, donde el uso de las nanoburbujas supone una estrategia prometedora, ya que su estructura gaseosa y nanométrica especializada ofrecen propiedades fisicoquímicas únicas que van desde una alta presión interna, hasta una carga eléctrica negativa y una superficie de gran contacto, con la que se pueden sobresaturar el agua con gases esenciales e influir positivamente en el medio radicular de la planta y la calidad del agua.

La implementación de las nanoburbujas en sistemas de fertirrigación de las plantaciones de cacao abren un nuevo horizonte en la gestión agrícola, donde su innovación posee implicación directa en la productividad y sanidad del cultivo, pues al mejorar la disponibilidad de oxígeno disuelto en la zona radicular, no solo se potencia el crecimiento de las raíces,

sino también la absorción de nutrientes, creando un ambiente propicio para el desarrollo de patógenos beneficiosos para la planta; el uso de las nanoburbujas se traduce en un aumento tangible del rendimiento y la mitigación de metales pesados en la producción de cacao, reduciendo la necesidad de agroquímicos para su crecimiento, es por ello que, el presente estudio se enfoca en validar y cuantificar el impacto agrónomo, económico y sanitario de la aplicación de las nanoburbujas, como una solución eficiente y económicamente viable para la producción de cacao o de otros cultivos.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS DE LA CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS Y LA TECNOLOGÍA DE NANOBURBUJAS

En tiempo presente, la sociedad enfrenta como desafío significativo la polución ambiental, donde es visible una degradación de la calidad del aire, agua y suelo en lo que respecta a la actividad agrícola, generándose un alarma especialmente, en los procesos de contaminación por la presencia de metales pesados, tanto por acciones humanas, como por la simple respuesta natural de los ecosistemas, lo que a gran escala, perjudica gravemente la seguridad alimentaria y la salud pública por su alta toxicidad, la cual se debe por una exposición prolongada o por bioacumulación. Así, estudios relevan que, dependiendo del tipo de metal o metaloide en cuestión, pueden surgir hasta problemas que afectan directamente a los órganos vitales del ser humano, razón por la que, resulta fundamental sumergirse en la identificación de formas químicas de tales elementos, para comprender con posterioridad cuáles son sus respectivas reacciones, proporcionando información debida sobre su naturaleza esencial y tóxica, y lograr con ello, evaluar los riesgos ambientes que producen.

1.1 Metales Pesados en Agroecosistemas de Cacao: Orígenes, especiación y toxicidad

Lo que comúnmente se conoce bajo la denominación de “Metales Pesados” hace referencia a elementos químicos cuya composición es alta

en masa por unidad de volumen y que, si bien ciertos tipos resultan ser indispensables en cantidades minúsculas para la vida, su presencia en mayores cantidades conlleva un riesgo significativo, pues el peligro radica en la capacidad que poseen de envenenamiento (toxicidad) y en el modo en que se almacenan y concentran progresivamente (bioacumulación) en los tejidos vivos, llegando a multiplicarse sus efectos a medida que avanza a través de los eslabones de la cadena alimenticia (Méndez et al., 2024). De este modo, la introducción de estos agentes en el medio ambiente es el resultado primordialmente de las actividades humanas, porque prácticas como la extracción de minerales, la fusión de metales y otros procesos como el descarte inapropiado de desechos liberan contaminantes que se dispersan en el agua, suelo y aire mediante filtraciones de líquidos, gases emitidos y vertidos directos.

Los metales pesados son el tipo de contaminantes más persistentes y complejos para remediar en la naturaleza. No solamente degradan la calidad de la atmósfera, de los cuerpos de agua y de los cultivos de alimentos, sino que también amenazan la salud y bienestar de animales y seres humanos. Los metales se acumulan en los tejidos de los organismos vivos, ya que, a diferencia de la mayoría de los compuestos orgánicos, no están sujetos a degradación metabólica. (Rodríguez et al., 2019, p.20).

Estos contaminantes representan una doble amenaza para las tierras de cultivo, entiéndase por estas, los agroecosistemas, porque por un lado pueden generar daños de alta magnitud sobre las plantas, entorpeciendo su pleno desarrollo y crecimiento, lo que a su vez reduce directamente el rendimiento agronómico, llegando a ser inclusive, elementos absorbidos por los vegetales destinados al consumo, perjudicando de forma directa la salud de las personas que los ingieren, por ejemplo, problemas cardíacos por la ingestión de arsénico, enfermedades pulmonares como la presencia de cadmio, afecciones en el riñón por el cromo, u otros padecimientos vinculados a dichos químicos, resultando nocivos para los ambientes agrícolas, tanto en la producción referida a la aplicación de abonos orgánicos como en lo que llega al consumidor final.

1.1.1 Fuentes Antropogénicas y Naturales de Contaminación por Cadmio (Cd), Plomo (Pb) y otros Metales Pesados

Según Galán y Romero (2008) el suelo es un componente natural que sostiene la vida de las plantas y alberga numerosos microorganismos, siendo entonces crucial para la agricultura por su fertilidad, en vista de que es el medio principal que sostiene la biodiversidad y del cual las plantas obtienen los minerales necesarios para su crecimiento. Sin embargo, es frecuente (como se mencionó) encontrar contaminantes como los metales pesados, cuya presencia puede ser perjudicial, llegándose a considerar que hay contaminación cuando sus niveles superan significativamente lo habitual, y que, en consecuencia, afecta las características físicas, químicas y biológicas del suelo, generando riesgos tanto para la salud humana como para los ecosistemas, comprendiendo que:

- **Cadmio (Cd).** Las principales causas de su aparición recaen en las actividades realizadas por el hombre, como la extracción y tratamiento de minerales, la producción de pigmentos y plásticos, así como la quema de residuos. Este metal pesado al ser consumido a través de alimentos contaminados, genera afectaciones en los riñones, pulmones y sistema cardiovascular, además de provocar problemas óseos o que impidan la reproducción. Igualmente, el Cadmio tiende a acumularse en las raíces de las plantas por absorción pasiva, hasta transportarse a través del xilema hacia sus hojas y frutos, siendo su acumulación influenciada por factores como el pH del suelo y las características específicas de cada planta.
- **Plomo (Pb).** Suele ser absorbido por inhalación, ingestión y mediante la piel:
 - 1) Al momento en que se inhalan determinadas partículas producidas por combustión de ciertos materiales;
 - 2) Cuando se ingiere agua o alimentos contaminados previamente y

- 3) Ante una exposición directa a él. Una vez que esté en el organismo, se expande en diversos tejidos, órganos y huesos, acumulándose progresivamente.
- **Arsénico (As).** Es un elemento no metálico que se encuentra adherido al suelo como consecuencia de las actividades mineras, las prácticas agrícolas intensivas y los procesos industriales, cuya exposición prolongada puede inducir cáncer en la piel, riñones, vejiga o pulmones, llegando inclusive a generar afecciones en el sistema nervioso central, pues el As suele acumularse en el organismo a lo largo del tiempo, incrementando el riesgo de desarrollar enfermedades. Sucede que, suele ser absorbido por las raíces y hojas de las plantas tanto pasiva o activamente, dependiendo de las condiciones ambientales, pero, una vez dentro se transporta mediante el xilema y floema hacia las partes superiores de la planta (Fowler et al., 2022).

Por esta razón, la presencia inicial de Cadmio (Cd) y otros metales pesados en los suelos de cacao se debe a factores naturales intrínsecos a la geología de la región, respectivamente, en vista de que está presente en la roca madre o en el material parental del propio suelo, por tanto, es una fuente natural con altas concentraciones de metales pesados en el suelo (Reyes et al., 2016). En las actividades agrícolas, el Cadmio y el Plomo se introducen en el agroecosistema principalmente a través de la aplicación de fertilizantes inorgánicos fosfatados, lo cual ocurre porque la roca fosfórica utilizada para fabricarlos contiene dichos metales como impurezas naturales, cuya aplicación constante a lo largo del tiempo resulta en una acumulación significativa.

1.1.2 Dinámica y Biodisponibilidad de los Metales Pesados en el Suelo: pH, materia orgánica y textura.

El sustrato destinado a la agricultura representa un componente esencial para la subsistencia de los seres vivos, toda vez que, su función trasciende de la mera provisión de recursos alimentarios, apoyando la

estructura de los ecosistemas y posicionándose como un hábitat para una miríada de organismos. La relevancia de dichos terrenos cultivables es extensa:

- 1) Son superficies que se constituyen como el cimiento de la actividad agraria, pues la productividad y el valor nutritivo de las cosechas están directamente ligados a su estado (Castañeda Méndez et al., 2025);
- 2) Es determinante para alcanzar cosechas abundantes, asegurando la perdurabilidad de los sistemas de suministro de alimentos;
- 3) Cumplen una función precisa en la garantía de la calidad de vida humana, al ser considerados un recurso irremplazable para el avance económico, social y ambiental;
- 4) Colaboran con la estabilidad intrínseca y con la riqueza de las especies, siendo fundamentales para los ecosistemas;
- 5) Los terrenos de cultivo contienen diversas especies microscópicas y vegetales que son vitales en los procesos biogeoquímicos del planeta propiamente, lo que a mayor escala, contribuye al mantenimiento de la armonía ecológica (Wu et al., 2024).

De este modo, la dinámica de los metales pesados en la extensión agrícola es multifactorial, debido a que se encuentra afectada por características inherentes al suelo y naturalmente, por los factores del entorno la contaminación a la que el mismo se haya expuesto, de ahí que, diversas investigaciones pretendan destacar que las propiedades que el suelo ostenta no sólo influyen (de manera inmediata) en la acumulación de elementos químicos tóxicos, sino que también afectan (de manera indirecta) la movilidad y la biodisponibilidad de tales contaminantes, teniendo que tener en consideración ciertas relaciones como:

- a) **MOS (Materia Orgánica del Suelo)**. Se observa una relación positiva y significativa entre la cantidad de materia orgánica del suelo y la concentración de metales pesados como el zinc y el cobre, lo cual se debe

a la notable capacidad que tiene la primera de retener estos elementos químicos, donde el uso de estiércol orgánico (fuente común de materia) también contribuye a la incorporación química y contaminante en el suelo. Principalmente, la MOS adsorbe y forma complejos o quelatos con los iones metálicos (como el cobre, plomo y zinc), lo que genera una reducción en su movilidad y en la biodisponibilidad para las plantas y organismos, disminuyendo de esta manera el riesgo de toxicidad (Wang et al., 2023).

No obstante, la calidad y tipo de MOS es determinante, porque ciertas formas de materia orgánica, especialmente la fracción soluble (por ejemplo, los ácidos fúlvicos), pueden producir complejos organometálicos asequibles que, paradójicamente, aumentan la movilidad y dispersión de algunos metales en la solución del suelo, lo que, a su vez, podría incrementar la lixiviación o, al ser asimilados, la toxicidad biológica. Por lo tanto, la MOS actúa como un amortiguador clave que, dependiendo de su naturaleza y estado de descomposición, puede estabilizar los metales y reducir sus riesgos, así como también, favorecer en ciertos casos, su transporte y asimilación.

b) **pH.** El nivel de acidez constituye un elemento determinante que incide en la configuración química y en el desplazamiento de los metales pesados dentro del sustrato:

- 1) En los ambientes de alto pH ciertos metales como el cadmio tienen la capacidad de disociarse de compuestos estables, incrementando su solubilidad y, consecuentemente, su disponibilidad
- 2) En cambio, el plomo en condiciones similares tiende a generar estructuras minerales que son resistentes a la disolución, lo que limita su capacidad de movimiento

- 3) Y, en suelos con carácter básico o alcalino, se observa un descenso en la absorción de elementos metálicos tóxicos por parte de las especies vegetales

De manera general, la introducción de nanomateriales al suelo puede elevar el pH, y esta modificación en combinación con una mayor concentración de material orgánico, contribuye a mitigar la acumulación de contaminantes químicos en las prácticas agrícolas (Zhou et al., 2024).

- d) **Textura del Suelo.** La composición granulométrica del terreno constituye un factor crucial en la forma en que los metales pesados son retenidos y se desplazan en el medio edáfico, donde las fracciones sólidas de menor tamaño, específicamente las constituidas por arcilla, exhiben un área superficial determinada y considerablemente superior en comparación con las partículas de mayor dimensión, tales como las que componen la arena. Esta característica estructural dota a la arcilla de una capacidad de fijación o adsorción más elevada para los iones de metales pesados, en consecuencia, los suelos con un predominio de partículas finas suelen mostrar una movilidad y lixiviación reducida de estos elementos potencialmente tóxicos, actuando como un sistema de confinamiento más eficaz. (Liu et al., 2024).

1.1.3 Impacto Fisiológico y Sanitario de la Acumulación de Metales Pesados en el Cacao (*Theobroma cacao* L.).

Una de las constantes actividades socio-económicas desarrolladas en las regiones del Perú es el cultivo del cacao, cuya composición en nutrientes es altamente rica en vitaminas, minerales, fibra y antioxidantes, entre los cuales se encuentran los polifenoles, la teobromina y el ácido genístico, lo que hace que sea considerado como un alimento que ofrece múltiples beneficios, pues sus componentes actúan como estimulantes para el sistema nervioso y el corazón, a la vez que posee propiedades

antiinflamatorias y analgésicas. Esta planta de cacao absorbe metales pesados que se encuentran en la superficie y los concentra en las semillas, de ahí que, es posible mencionar que elementos químicos como el cadmio y el plomo se encuentran naturalmente en la corteza terrestre de la planta (como minerales); no obstante, al momento en que es ingerida por el hombre, se instaura un riesgo potencial para la salud humana.

En vista de ello, el cadmio es el principal metal presente en el cultivo de cacao, entendido según Huang et al., (2014) como un elemento químico de alta toxicidad, capaz de impedir las funciones biológicas en los organismos vegetales, cuya presencia constante desencadena una serie de alteraciones en la morfología, arquitectura celular, fisiología y bioquímica de las plantas, donde diversos estudios han documentado la desestructuración de los cloroplastos, lo cual perjudica la eficiencia fotosintética, provoca cambios en la cantidad de granos dentro del fruto (almendra) y causa deformaciones en el núcleo de las células radicales, lo que a su vez limita el desarrollo general, la asimilación de la luz y el intercambio gaseoso, además de reducir la concentración de pigmentos fotosintéticos (Charrupi y Martínez, 2017).

De manera consecuente, Pérez (2020) ratifica que el cadmio impacta de manera doble, porque:

- 1) Reduce la cantidad de pigmentos cruciales como las clorofilas, afectando de manera indirecta el proceso lumínico.
- 2) Modifica la absorción y el transporte de elementos nutritivos esenciales, lo que afecta la funcionalidad de las enzimas.

Esto se debe a que perturba la integridad de las membranas celulares y compite con iones vitales como el potasio, magnesio, cobre y zinc, ocasionando un severo desequilibrio nutricional, con graves repercusiones en el crecimiento y la producción de la planta, la cual también recibe afectaciones en el material genético, las estructuras florales y malformaciones en los embriones seminales. Entonces, puede afirmarse

que la acumulación del cadmio como metal contaminante se esparce por todo el tejido de cacao, comenzando por la raíz, tallo y hojas, hasta desembocar en las cáscaras y el grano (Mite et al., 2010).

Conforme a ello, vale mencionar que la acumulación de metales pesados, particularmente el cadmio y el plomo, plantea un desafío complejo y extenso en las plantaciones peruanas de cacao, porque por una parte su acumulación dentro del tejido foliar y en el grano respectivo interfiere en la captación y transporte de los nutrientes esenciales, lo que genera un desbalance que afecta indirectamente el rendimiento agrícola y, por otro lado, genera un problema sanitario cuando dichos elementos químicos superan los límites máximos permisibles en los granos de cacao, comprometiendo la calidad de exportación y la seguridad alimentaria, pues la ingesta continua de cadmio en humanos a través de chocolate contaminado, está asociada con efectos perjudiciales para la salud, principalmente con un daño renal irreversible, fragilidad ósea y posible hepatotoxicidad a largo plazo, según expresan Meter y Laiberte (2019), siendo un riesgo que requiere de una gestión urgente en las zonas productoras del Perú, donde las concentraciones de metales pesados a menudo exceden los estándares internacionales.

1.2 Principios Fisicoquímicos de las Nanoburbujas

Hacen referencia a las propiedades físicas y químicas excepcionales que poseen las burbujas diminutas, debido a su tamaño nanométrico y que procuran explicar su comportamiento único y su utilidad en diversas aplicaciones, por las propiedades distintas que permiten que asciendan rápidamente y por la intensa energía, lo que hace que libere radicales libres que son especies químicas reactivas capaces de oxidar y degradar contaminantes, patógenos y microorganismos.

1.2.1 Definición, Generación y Estabilidad de las Nanoburbujas de Aire

Las nanoburbujas conforme a Criollo y Ochoa (2022) son minúsculas burbujas que albergan en su núcleo cuantiosas concentraciones

de oxígeno bajo presión, cuya dimensión métrica es submicrométrica, es decir, menor a $1\mu\text{m}$ y superior a la escala nanométrica, esto es, mayor a 1nm , lo cual permite establecerlas como entidades aproximadamente 2500 veces más reducidas que un simple cristal de sal, siendo dicha íntima magnitud la que les confiere la propiedad de permanecer en suspensión acuosa por períodos prolongados, aun cuando su función primordial en entornos líquidos sea elevar o aumentar la concentración de oxígeno disuelto en el agua. Su propósito se cimienta en dos mecanismos esenciales:

- 1) La oxigenación, que garantiza un suministro constante de oxígeno, actuando de forma efectiva en la neutralización de agentes contaminantes que se encuentren presentes en el agua y;
- 2) La oxidación, que hace referencia a la degradación de cualquier tipo de residuo hallado en el medio acuático, implicando, por tanto, la liberación de una alta densidad de radicales libres, cuya acción permite la erradicación de microorganismos.

De esta manera, dentro del proceso de eliminación de contaminantes, la tensión interna ejercida por estas estructuras nanométricas supera exponencialmente la presión de oxígeno circulante en el medio externo; sin embargo, a pesar de ello, desarrollan una carga eléctrica superficial de naturaleza negativa, lo que las habilita para participar o inmiscuirse en múltiples interacciones intermoleculares gracias a su elevada capacidad para forjar nuevos puentes de hidrógeno, siendo un fenómeno que es conocido como fuerza de cohesión o atracción, donde las nanoburbujas tienden a agregarse en racimos, facilitando la adhesión de partículas contaminantes de diversa índole.

Asimismo, muestran una particular afinidad por compuestos de carácter orgánico, tales como residuos de hidrocarburos, surfactantes, grasas y otros, lo que coadyuba al hecho de que una vez un conjunto suficiente de nanoburbujas se une a un contaminante, la densidad del agregado disminuye, promoviendo que la partícula se separe de la fase acuosa circulante, para que luego pueda ser retirada por medio de flotación o

filtración, siendo un método de separación y eliminación denominado cavitación por las propias funciones que cumple. Su producción requiere de un equipo especializado diseñado para crear un flujo concéntrico que introduce aire a una presión elevada, provocando la colisión de las burbujas macroscópicas convencionales, dando origen a las nanoburbujas (Criollo y Ochoa, 2022).

De manera que, esta metodología les confiere una notable estabilidad una vez estén dispersas en el fluido, ralentizando significativamente su ascenso hacia la interfaz líquida, lo que garantiza un periodo de interacción continuo y prolongado con los agentes contaminantes sobre lo que se apliquen (Praveen et al., 2012), siendo una técnica que se distingue por su nula agresión al entorno donde se implementa, dado que su único insumo operativo es el agua, que una vez es efectuada posibilita que las intervenciones de mantenimiento se espacien en el tiempo. Al mismo tiempo, su naturaleza libre de sustancias químicas o disolventes asegura que no se provoquen daños en los materiales de tipo pétreo y evita la adición de contaminantes a las descargas líquidas residuales generadas durante el proceso de saneamiento (Pandit y Sripati, 2016), de lo cual se puede inferir entonces ciertas características que definen y categorizan dichas cavidades:

- Su tamaño se mide en metros.
- El área de contacto es superior a la de las burbujas comunes, lo que mejora la transferencia de oxígeno.
- Es un purificador excepcional debido a la cantidad elevada de iones en su superficie de interacción entre gas y agua.
- Posee una carga eléctrica negativa en su apartado externo.
- Genera un efecto biológico activo y actúa como un absorbente físico-químico.

Ahora bien, aunque no existe una relación directa de las nanoburbujas y los metales pesados en el cultivo de cacao, es cierto que sí existe es un potencial tecnológico, porque al ser las primeras intrínsecamente estables gracias a su carga superficial negativa, permite permanecer mucho tiempo en solución, siendo una carga clave que facilita la adsorción (entiéndase unión) de iones de metales pesados como el cadmio y el plomo, que a menudo tienen una carga positiva en el suelo. Al concentrarse, las nanoburbujas podrían (teóricamente) separar y remover dichos contaminantes del agua de riego o del suelo mediante la filtración o bien, al colapsar liberar radicales de hidroxilo que puedan oxidar o inmovilizar los contaminantes, ofreciendo una vía para la remediación del suelo y la mitigación de la bioacumulación en el grano del cacao (Macassi, 2017).

1.2.2 Propiedades Interfaciales: Potencial Zeta, Tensión Superficial y Generación de Especies Reactivas de Oxígeno (ROS).

Se refieren al conjunto de características físico-químicas que existen en la interfase, es decir, la frontera o superficie de contacto entre dos fases de la materia inmiscibles (que no es posible mezclarlas) como un gas/sólido con un líquido; en el caso de una burbuja de aire en agua, esta interfase es la capa de moléculas que separa expresamente ambos componentes entre sí, definiendo el comportamiento único y potente que posee, al ser la química la capa fronteriza entre el gas y el líquido (Macassi, 2017). La propiedad más crucial es el Potencial Zeta, entendido como la carga eléctrica negativa que se forma espontáneamente en la superficie de la burbuja, creando una repulsión electrostática entre nanoburbujas individuales, lo que impide que se fusionen y estallen, pues procura garantizar su extraordinaria estabilidad y longevidad en el agua por un tiempo prolongado. Además, reduce la Tensión Interfacial del líquido, similar a un detergente, generando mejoras en la mojabilidad y permitiendo una penetración del agua de riego en el suelo más efectiva, siendo la base para sus aplicaciones en remediación y mejora agrícola.

- a) **Potencial Zeta.** De manera detallada, la superficie de la nanoburbuja adquiere de manera espontánea una inmensa carga eléctrica negativa, lo que resulta en un potencial zeta negativo y relativamente alto, otorgándole una alta afinidad de adsorción de iones o partículas de carga opuesta, como los iones de metales pesados (cadmio y plomo) o contaminantes con cargas positivas, siendo una capacidad que convierte a las nanoburbujas en agentes efectivos para la separación física y para alcanzar corregir la situación de contaminantes, ya que actúa como el motor que facilita la unión selectiva con las impurezas para su posterior remoción (Parmar y Majumder, 2013).
- b) **Tensión Superficial.** No es más que la fuerza de cohesión que actúa en la interfaz entre el gas que se encuentra dentro de la burbuja y el líquido circulante que usualmente es agua, es decir, es energía por unidad de área que se requiere para crear o expandir dicha interfaz, lo cual se ve modificado por el tamaño pequeño las caracteriza y distingue respecto a otras de un mayor volumen, siendo un componente que le confiere a la nanoburbuja su notable estabilidad y su capacidad para permanecer suspendida en líquido (Macassi, 2017).
- c) **Especies Reactivas de Oxígeno (ROS).** Especies como el radical hidroxilo, el anión superóxido y el peróxido de hidrógeno se posicionan como una categoría de moléculas inestables y altamente oxidantes que derivan de la reducción parcial de oxígeno molecular, y que, si bien son generadas de manera natural por el metabolismo de las células, un exceso de las mismas puede llegar a ocasionar estrés oxidativo al perjudicar componentes esenciales y determinantes (Flores, 2021), por ejemplo, las proteínas.

En este caso, las nanoburbujas se inmiscuyen en esta relación debido a su capacidad para producirlas de forma progresiva in situ en el agua, lo que potencia su utilización en tratamientos de oxidación, donde se postula que la presión interna alta y la carga eléctrica superficial de las nanoburbujas crean un entorno de mayor energía en la interfaz gas-

líquido que facilita la disociación de moléculas de agua y oxígeno en radicales libres, especialmente el radical hidroxilo; en general, las ROS le confieren un fuerte poder oxidante y esterilizante para erradicar patógenos y contaminantes.

1.2.3 Interacción de las Nanoburbujas con la Matriz del Suelo y Contaminantes.

En palabras de Macías (1993) la contaminación del suelo es entendida como una alteración química dentro de la capacidad productiva del terreno, lo cual es generado por el acopio de sustancias nocivas en concentraciones que rebasan la capacidad amortiguadora inherente al suelo, lo que provoca una modificación desfavorable en sus respectivas características. Dicha acumulación suele ser una consecuencia de acciones antrópicas externas (exógenas); no obstante, puede manifestarse de forma natural o interna (endógena) cuando los procesos de formación del suelo disgregan elementos químicos presentes en las rocas, concentrados en el sustrato hasta alcanzar umbrales perjudiciales.

Por ello, al abordar la contaminación generada por los elementos metálicos (anteriormente mencionados) es crucial considerar que su configuración y/o forma química posee mayor relevancia que su contenido en el suelo (Mulligan et al., 2001), de manera que, el estado que resulta de esta especiación ejerce una influencia determinante sobre su reparto en el sustrato, modelando su disolubilidad, movilización (mediante el suelo y las masas de aguas superficiales y subterráneas), disponibilidad biológica y su potencial de toxicidad, incluyendo entonces, en su definición como potencial agente contaminante. Así, la cinética y la accesibilidad de los metales están poderosamente mediadas por las condiciones físico-químicas del entorno edáfico, tales como el nivel de acidez y el potencial de óxido-reducción.

Paralelamente, es preciso mencionar que los componentes orgánicos e inorgánicos del suelo son los que en gran medida rigen los mecanismos de inmovilización de metales, principalmente a través de la adsorción, la formación de complejos y la precipitación, a lo cual debe unirse la biota, vegetales y microorganismos, pues estos tienen la capacidad de interactuar con los metales mediante procesos como la extracción, estabilización, bioadsorción y acumulación y traslocación biológica (Lloyd y Macaskie, 2000). En cualquier circunstancia, los metales perjudiciales en los sustratos terrestres no pueden ser eliminados, sino que, únicamente neutralizados, por ello y en vista de las mínimas variaciones en el ambiente para liberar metales previamente insolubilizados, es imperativo establecer una monitorización constante y exhaustiva de la distribución de estos contaminantes en el terreno, especialmente lo que revisten de mayor toxicidad.

De este modo, vale acotar la interacción que tiene la matriz del suelo con las nanoburbujas, debido a las características de esta última, por cuanto permiten que permanezcan suspendidas en el agua de riego por largo períodos, dispersándose de manera uniforme, lo que reduce a su vez la tensión superficial del agua y mejora su filtración en el suelo, al mismo tiempo que, reduce la compactación de suelos arcillosos al inducir la floculación de partículas. Igualmente, el aporte sostenido de oxígeno disuelto en concentraciones elevadas (hasta 20ppm) y un potencial superior de oxidación crea las condiciones óptimas para que se propicie el desarrollo de las raíces y la salud general del suelo (Moleaer, 2023).

Frente a los contaminantes, las nanoburbujas demuestran un doble mecanismo de acción: primero, la oxidación química y segundo, la separación física, pues su tamaño y carga permiten que se adhieran a partículas contaminantes, un proceso clave para la separación por flotación, siendo su potencial más significativo la oxidación al colapsar a menudo por estímulo liberan radicales de hidróxido, un oxidante extremadamente fuerte, capaz de destruir la estructura molecular de metales pesados (en el caso presente) difíciles de tratar en el agua y en el

suelo, incluyendo compuestos orgánicos y patógenos, y ofreciendo una alternativa natural (sin químicos) para la remediación, enfocándose en mejorar las condiciones y la eliminación directa de sustancias nocivas, al favorecer la actividad de microorganismos mediante oxígeno, lo cual puede acelerar la biodegradación de contaminantes orgánicos.

Por último, mejoran la movilidad iónica de los nutrientes y controlan patógenos como algas y hongos al causar su lisis celular directa por oxidación, siendo pues, una tecnología que se presenta como una solución novedosa y sostenible para el tratamiento de aguas residuales y la rehabilitación de suelos contaminados, contribuyendo a la seguridad alimentaria y ambiental (Moleaer, 2023).

1.3 Estado del Arte: Tecnologías de Remediación de Suelos

Los medios o métodos de saneamiento se orientan a tres acciones principales sobre el suelo: Confinamiento del material contaminante, extracción del sustrato y su descomposición, donde la técnica que se utiliza depende no solo de los parámetros de la matriz contaminada, sino también de su disponibilidad, confiabilidad, nivel de desarrollo en que se encuentre y sus respectivos costos operativos. Cada emplazamiento contaminado constituye un escenario que plantea un desafío particular; sin embargo, es factible analizar cada sitio considerando un conjunto restringido de atributos esenciales y buscar la alternativa más costo-efectiva para estas particularidades, lo que según Alexander (1994) se resumen en 4 aspectos de mitigación esenciales:

- El tipo de contaminante y sus propiedades fisicoquímicas son determinantes para establecer la necesidad de intervenir en el sitio y el procedimiento adecuado para el manejo de la sustancia, definiendo con ello, la movilidad del agente y su persistencia en el medio ambiente. La estructura molecular del contaminante, por su parte, establece su nivel de toxicidad y, consecuentemente, ayuda a fijar los umbrales de limpieza requeridos.

- La ubicación geográfica y las características específicas del lugar, junto con la utilización prevista del terreno influyen directamente en la meta de saneamiento a alcanzar y en las metodologías que pueden implementarse para lograrla.
- Los rasgos intrínsecos de los suelos, sedimentos y cuerpos de agua a menudo condicionan las especificaciones de los sistemas de depuración, y en el caso del suelo, la preparación del material, es decir, la modificación del contaminante para que sea susceptible de tratamiento y/o transporte desde su origen hasta la unidad de procesamiento, representa el paso de mayor criticidad en la mayoría de los protocolos de tratamiento.
- El potencial de las tecnologías de descontaminación puede variar de manera considerada en función de las condiciones propias de cada sitio y suelo (Alexander, 1994).

1.3.1 Revisión de Métodos Convencionales: Fitorremediación, Enmiendas Químicas y Lavado de Suelos.

Una de las alternativas innovadoras y ecológica frente a los métodos fisicoquímicos tradicionales es la fitorremediación, reuniendo un conjunto de técnicas que utiliza la capacidad natural de las plantas y los microorganismos asociados a sus raíces para reducir, remover, transformar, degradar o estabilizar contaminantes presentes en el suelo, agua y sedimentos, como también los metales pesados y compuestos orgánicos. Sus principales ventajas incluyen su bajo costo, mínima alteración del suelo y la naturaleza ambientalmente amigable, a diferencia de los métodos tradicionales como la excavación y la incineración, que son generalmente más rápido, pero mucho más costosos.

De esta manera, Delgadillo et al. (2011) expresan que las diversas estrategias de fitorremediación se adaptan al tipo de contaminante, siendo la absorción y acumulación en la biomasa aérea, ideal para metales (fitoextracción) y la inmovilización en la raíz o el suelo para lograr reducir la movilidad (fitoestabilización) son las más comunes, además de otras como

la degradación por microorganismos en la rizosfera (rizodegradación) y la liberación de contaminantes transformados a la atmósfera (fitovolatilización). Entonces, si bien no es un método de remediación considerado “convencional” en el sentido estricto de las tecnologías físicoquímicas, su amplio desarrollo, efectividad y el coste operativo la han convertido en una estrategia biotecnológica viable y prometedora para la rehabilitación de los suelos a gran escala, especialmente en zonas con contaminación leve o superficial, donde los tratamientos tradicionales resultan inasumibles o inviables.

En cambio, las enmiendas químicas se establecen como una técnica de remediación que se clasifica dentro de los procesos de esta naturaleza, y que consiste en la incorporación de aditivos químicos al suelo contaminado, ya sea en el lugar o en suelo excavado, con el fin de inmovilizar, estabilizar o transformar los contaminantes en sustancias menos tóxicas o menos biodisponibles. El mecanismo principal es reducir la movilidad de los elementos dañinos como los metales pesados, mediante reacciones como la precipitación, adsorción o intercambio iónico, de ahí que las enmiendas más comunes incluyen materiales como la cal, yeso, fosfato o diversos materiales orgánicos e inorgánicos que alteran el pH o proporcionan superficies reactivas para que los contaminantes queden atrapados en la matriz del suelo, disminuyendo así el riesgo ambiental y para la salud (Bernal et al., 2007).

Ya por último, otra técnica especialmente eficaz y rápida es el lavado de suelos, sobre todo en suelos contaminados con metales pesados, la cual puede aplicarse ex situ, ya que es un proceso que opera mediante la excavación del suelo y su posterior tratamiento en una unidad de lavado, donde se implementa un fluido de extracción como agua, soluciones alcalinas, ácidos o agentes complejantes junto con la agitación mecánica para disolver o separar los contaminantes de las partículas del suelo (Fundación Chile, 2019).. Es pues, un método que se basa en que la mayoría de los elementos se adhieren a la fracción más fina del suelo (como la arcilla y el limo), donde el lavado busca concentrar la

contaminación en un volumen mucho menor, donde el líquido restante debe ser tratado posteriormente para remover los contaminantes antes de su reintroducción al ciclo, reduciendo drásticamente la extensión de material que requiere un tratamiento o disposición final más costosa.

1.3.2 Tecnologías Emergentes y Sostenibles en la Remediación de Suelos Agrícolas

Hablar de tecnologías emergentes y sostenibles en los suelos agrícolas centran su eje en el uso de procesos naturales para descontaminar y restaurar o remediar la salud del suelo de una forma que sea ecológica y rentable, desplazando en extensión los métodos físico-químicos tradicionales que son más costosos y agresivos. Dicho esto, las principales técnicas sostenibles se basan en la biología, utilizando seres vivos para así lograr tratar los contaminantes, siendo las dos más destacables la biorremediación y la fitorremediación (in supra), donde la primera emplea microorganismos que son capaces de descomponer contaminantes orgánicos en sustancias no tóxicas, lo cual puede llevarse o ejecutarse en el lugar contaminado o fuera de tal lugar, por ejemplo, en lechos biológicos; mientras que, la segunda utiliza plantas para sanear el suelo.

Este último se trata entonces de un proceso que se materializa de una manera distinta dependiendo del tipo de elemento y especie vegetal considerado, incluyendo variantes que van desde la absorción y acumulación de metales pesados en tejidos aéreos, los cuales se cosechan y se eliminan de manera segura, hasta la inmovilización de los contaminantes en la zona de raíz, impidiendo que se dispersen a las aguas subterráneas o al aire, contribuyendo en su conjunto, a la conocido como la Agricultura Regenerativa.

Además de técnicas biológicas, resalta la tecnología digital y la agricultura de precisión, que cumplen un rol emergente para la sostenibilidad, ya que el uso de sensores, drones y análisis de microbioma del suelo permite a los

agricultores identificar las zonas exactas de contaminación o degradación, siendo información detallada que facilita la aplicación y localiza los insumos biológicos o de los métodos de remediación, evitando la aplicación uniforme e innecesaria en todo el campo. Esto no solo optimiza los recursos y reduce los costos, sino que también previene la sobrecarga de químicos y el exceso de nutrientes en el ecosistema, cerrando el ciclo hacia una gestión del suelo más inteligente, eficiente y verdaderamente sostenible a largo plazo (Altieri y Nicholls, 2005).

1.3.3 Potencial de la Tecnología de Nanoburbujas como Estrategia Innovadora.

Primeramente, se amerita comprender una correcta aprehensión del concepto de “Nanociencia” por vincularse directamente con el estudio de fenómenos y la manipulación de materiales a una escala nanométrica, es decir que, dentro de dicho estudio, se fomenta el desarrollo y la práctica de átomos y moléculas en una escala considerablemente menor, obteniendo, por tanto, propiedades que difieren de las que caracterizan a los materiales convencionales. Ahora bien, de allí surgen un vasto número de metodologías, ejecuciones y estructuras que adquieren trascendencia en el sector agrario y medioambiental, debido a su potencial para solventar problemáticas que, con productos a escala ordinaria, resultan sumamente onerosas y no siempre resuelven con la debida eficacia, exteriorizando su importancia ante las repercusiones o efectos que su utilización conlleva en determinados procesos o fenómenos.

Así, en lo que respecta a la producción agrícola, el principio fundamental es minimizar las mermas y reducir las consecuencias adversas sobre los ecosistemas, causados por el empleo excesivo de insumos tales como fertilizantes y plaguicidas, lo cual se consigue con el empleo de nanopartículas, las cuales abarcan la generación de fertilizantes especializados, sustancias estimulantes del crecimiento y plaguicidas de acción sistémica. A su vez, esta nanotecnología posee utilidad como

una herramienta para la preservación ecológica, cuyo propósito es salvaguardar el entorno natural, ya sea mediante acciones de prevención, el saneamiento o la depuración de zonas afectadas por residuos nocivos (Karn et al., 2009).

Dichos expertos determinaron que la aplicación in situ ofrece múltiples beneficios; puesto que, disminuye el gasto total y el tiempo requerido para higienizar lugares y suelos contaminados, permitiendo su implementación a escala extensiva, pues elimina la exigencia de procesar y disponer de la tierra afectada, logrando reducir las concentraciones de agentes contaminantes a niveles casi nulos. Estos procedimientos emplean nanomateriales con capacidad reactiva para la transformación y neutralización de las sustancias dañinas, favoreciendo la reducción química y facilitando la catálisis para la atenuación de los contaminantes, de ahí que las implementaciones ambientales de la nanotecnología se agrupan en tres categorías:

- 1) Productos sostenibles y ecológicamente inofensivos (química verde o evitación de la polución);
- 2) Rehabilitación de sustancias afectadas por elementos peligrosos y;
- 3) Dispositivos de detección para los agentes presentes en el medio ambiente.

De esta forma, en la remediación de los suelos agrícolas cobra relevancia el término de “Nanoburbujas” por el hecho de que ofrece una estrategia innovadora que supera los simples métodos físico-químicos que tradicionalmente, han sido empleados, radicando su potencial en la capacidad que poseen de permanecer estables por un lapso de tiempo prolongado, lo que permite una transferencia de gases altamente eficiente en el suelo, pues significa que es posible inyectar estos agentes de manera más uniforme y profunda, facilitando la biodegradación de contaminantes orgánicos por microorganismos aeróbicos o la oxidación química de sustancias tóxicas como los metales pesados. La baja flotabilidad y la alta

área superficial de las nanoburbujas aseguran una reactividad constante y un impacto ambiental mínimo, ya que el proceso puede optimizarse para ser más rápido, y menos disruptivo que las técnicas de excavación o lavado, promoviendo una agricultura más sostenible y resistente (Karn et al., 2009).

Puede asegurarse así, que la implementación de este tipo de tecnología en los cultivos no es sólo una solución técnica, sino un cambio de paradigma hacia la ingeniería de precisión ambiental, invitando a una consideración más completa y extensa sobre cómo optimizar la interacción entre el gas y la matriz del suelo, mejorando la calidad química este al mismo tiempo que aumenta la calidad de la salud biológica y su respectiva estructura, debido a que, la provisión de oxígeno de manera eficaz, revitaliza la microbiota nativa que es esencial para la fertilidad a largo plazo, lo que al final se termina por alinear con los principios de la economía circular y la sostenibilidad, ofreciendo un método limpio y de bajo consumo energético para recuperar terrenos degradados, garantizando la seguridad alimentaria y la protección de los recursos hídricos subterráneos, subrayando entonces, la importancia de la nanociencia para abordar desafíos microscópicos como la degradación del suelo a escala global.

CAPÍTULO II

MECANISMOS DE ACCIÓN DE LAS NANOBURBUJAS DE AIRE EN LA REMEDIACIÓN DE SUELOS CACAOTEROS

La tecnología de las nanoburbujas constituye una estrategia eficaz, económica y natural para optimizar la calidad del suelo al disminuir o reducir su compactación, lo que facilita notablemente la penetración del agua de riego y proporciona una respuesta inmediata y duradera al problema de la sanidad. Gracias a la súper oxigenación y a las características químicas y físicas singulares de esta materia, junto al agua tratada que también potencia la salud del suelo, incrementa la disponibilidad de nutrientes para las plantas y mejora la capacidad de las raíces para absorber dichos nutrientes, siendo necesario profundizar en los componentes que interactúan en la acción que ejecutan.

2.1 Movilización y Extracción de Metales Pesados

En vista de ello, múltiples estudios han evidenciado que, a lo largo del beneficio del cacao (el conjunto de operaciones que se realizan después de la cosecha), las propiedades físico-químicas del grano experimentan modificaciones, siendo variaciones que dependen del tipo de recipiente utilizado para la fermentación y la duración del secado, factores que tienen el potencial de alterar la concentración de los metales, afectando así la calidad y la seguridad alimentaria del producto final (Ghosh y Ramakrishna, 2009). Dentro de este largo proceso, opera un ciclo donde primero ocurre

la movilización que es el paso del metal de su estado sólido en el suelo a la solución acuosa, proceso que es potenciado por condiciones de baja acidez y la presencia de materia orgánica o agentes quelantes; una vez solubles, los metales pueden extraídos del suelo de diversas formas: con el lavado de agua o soluciones químicas; por la absorción y concentración por plantas hiperacumuladores o por la extracción física directa que implica la remoción y disposición del suelo contaminado.

2.1.1 Desorción de Metales Pesados de las Partículas del Suelo Inducida por Nanoburbujas.

La desorción de metales pesados en palabras de Ceglowski y Schroeder (2015) refiere a la liberación que resulta ser intencional de iones metálicos que previamente han sido absorbidos (capturados o retenidos) en la superficie de un material sólido, de vuelta a una solución líquida, constituyéndose como el paso inverso de la absorción que se lleva a cabo para consumir dos objetivos principales: Regenerar y reutilizar el material absorbente, haciéndolo económicamente viable en lo que respecta a tratamientos en un periodo de tiempo prolongado y; para obtener una solución concentrada de los metales, facilitando su posterior recuperación en los casos en los que sí tiene valor o su tratamiento y disposición final como residuo concentrado. Generalmente la desorción se logra típicamente al modificar las condiciones del medio, exponiendo el material cargado a un agente desorbente, que suele ser una solución ácida que rompe los enlaces entre el metal y el absorbente, desplazando los metales a una fase líquida (Fomina y Gadd, 2014).

En este procedimiento las nanoburbujas representan una tecnología prometedora para la remediación de suelos contaminados con metales pesados, toda vez que, como burbujas gaseosas exhiben una estabilidad excepcional en el agua debido a su alta presión interna y su carga superficial negativa, pues al inyectarse en el agua intersticial del suelo, las nanoburbujas facilitan la liberación de los iones metálicos que se

encuentran fuertemente unidos a la matriz sólida, lo que se logra a través de mecanismos, incluyendo la agitación física y la generación de microcorrientes que aumentan el contacto y la eficiencia de lavado entre el fluido y las partículas contaminadas (Cegłowski y Schroeder, 2015).

De este modo, la efectividad de la etapa de desorción depende significativamente del tipo de gas utilizado para generar nanoburbujas, ya que es esto lo que influye en los componentes físico-químicos del medio, por ejemplo, se ha observado que aquellas que están definidas por aire son más eficientes en la liberación de metales como el plomo, a diferencia de las de hidrógeno al modificar el pH y el potencial de óxido reducción en el agua del poro. Conforme a ello, la alteración de estas propiedades es determinante, porque la solubilidad y la especiación de los metales pesados son sensibles en grandes cantidades a estos parámetros, entonces, al cambiar la forma química de los metales absorbidos, las nanoburbujas de gases reactivos facilitan su paso de la fase sólida (partículas del suelo) a la fase líquida (agua del poro), convirtiéndolos accesibles para su posterior extracción o tratamiento, según lo expresa Pintado (2018).

En términos de su aplicación de en la remediación, es una tecnología que ha sido evaluada a través de pruebas de columna de suelo, donde se simula el flujo de agua mediante la superficie contaminada, validando que la inyección de agua con nanoburbujas promueve un aumento considerable en la liberación de metales como el zinc, plomo o cadmio al lixiviado, siendo un fenómeno que no solo se atribuye a los cambios químicos inducidos, sino también a la capacidad que tienen para generar un proceso de fluidización parcial y abrir los poros, donde se mejora la permeabilidad y el transporte de los contaminantes liberados, ofreciendo por tanto, un método de lavado de suelos más rápido y eficiente, permitiendo la movilización y remoción efectiva de metales pesados para mitigar su riesgo ambiental y su ingreso a la cadena nutritiva.

2.1.2 Formación de Complejos Metálicos y su Transporte en la Solución del Suelo.

Las sustancias de coordinación, también denominadas complejos, se caracterizan por poseer un átomo o un ion metálico central al cual se encuentran enlazados diversos aniones o moléculas sin carga eléctrica que lo rodean, a los cuales se les da el nombre de ligantes y, es a partir de esta asociación molecular que puede originarse una entidad química con carga eléctrica (ion complejo), siendo posible que sea estabilizada a nivel de carga mediante la interacción de iones de carga opuesta, conocidos como contraiones; por ejemplo, la combinación de un metal con los ligantes produce un ion complejo, el cual se puede neutralizar con dos contraiones de otro elemento químico no metálico. A razón de ello, debe entenderse por un complejo una especie química singular, la cual exhibe propiedades tanto físicas como químicas inherentes, diferentes de los que posee el ion metálico y los ligantes que lo constituyen de forma individual, siendo una generación capaz de modificar significativamente otras características del ion metálico, tales como su potencial de oxidación o reducción (Santos Ruiz, 1959).

En la solución del suelo, Gracia y Snodgrass (2007) manifiestan que la formación de complejos metálicos se establece como un proceso químico indispensable para la movilidad y la biodisponibilidad de los elementos, cuyo fundamento radica en la capacidad de los iones metálicos como el cobre (Cu^{2+}), el zinc (Zn^{2+}) o el hierro (Fe^{3+}), de relacionarse electrostática o covalentemente con los ligandos, que son moléculas o iones con pares de electrones no compartidos, y que pueden tener una naturaleza orgánica (como aminoácidos) o inorgánica (como el cloruro); la estructura del complejo resultante, que a menudo es más soluble y menos reactivo que el ion metálico libre, es dependiente de factores como el pH, la fuerza iónica, la naturaleza metálica y el ligando involucrados, en aras de regular la toxicidad y la nutrición vegetal al modular la concentración del metal libre.

Por esta razón, el transporte de estos complejos metálicos mediante la solución del suelo está intrínsecamente vinculado a su estabilidad y solubilidad, las cuales son de mayor intensidad que las de los iones metálicos simples, especialmente el pH neutro o alcalino donde la precipitación de hidróxidos o carbonatos es termodinámicamente favorable. Entonces, el complejo interacciona como una unidad de transporte que evita la adsorción o precipitación del metal, permitiendo su movimiento por flujo de masas y difusión hacia la superficie de las raíces o capas más profundas del suelo, donde los ligandos orgánicos de bajo peso molecular resultan eficaces en este proceso debido a su alta solubilidad y la fuerte estabilidad que los conforman, pues desde una perspectiva estructural, se encuentra compuesto por un átomo central que es el metal, rodeado por un número definido de ligandos en una geometría específica, determinada por el número de coordinación, donde la unión se constituye mediante un enlace de coherencia en el que el ligando dona el par de electrones al orbital vacío del metal (Sparks, 2003).

La eficiencia en el transporte está unida a la carga neta y el tamaño del complejo, porque aquellos que son neutros o aniónicos pequeños suelen tener una movilidad mayor que los catiónicos o las formas absorbidas, puesto que, este equilibrio dinámico entre el metal libre, el acomplejado y el precipitado es el que rige la cantidad disponible de metal para ser lixiviado o absorbido por la biota, siendo los procesos de absorción – desorción en la matriz del suelo y la degradación microbiana de los ligandos elementos determinantes en el proceso.

De manera que, el fundamento químico de la complejación se sustenta en la minimización de la energía libre del sistema al formar un enlace más estable, asegurando que componentes esenciales permanezcan accesibles para las plantas, incluso en suelos o superficies con mayor capacidad de fijación, siendo un estudio crucial en la agronomía y remediación ambiental porque permite predecir la toxicidad de metales pesados o, en su defecto, ayuda a corregir las deficiencias nutricionales, utilizando agentes quelantes sintéticos o promoviendo la producción natural de sideróforos

que son ligandos orgánicos, ilustrando la importancia de las interacciones biogeoquímicas (Pintado, 2018).

2.1.3 Sinergias con Agentes Quelantes y Enmiendas Orgánicas.

Se entiende que el compuesto complejo se forma mediante la asociación de un ion o catión metálico con una especie química donadora de electrones, y cuando esta posee múltiples sitios de unión genera una o varias estructuras anulares con el metal, donde la entidad resultante se denomina quelato o compuesto quelado, siendo la sustancia donadora el agente quelante. Los enlaces de par electrónico que se establecen entre el metal y el donador, tanto en el complejo como en el quelato pueden tener un carácter que varía de predominantemente iónico a esencialmente covalente, una propiedad que está determinada por los átomos específicos involucrados en la interacción (Santos Ruiz, 1959).

Entonces, en principio, las sinergias suceden cuando se mezclan varios agentes quelantes o cuando se emplean en conjunto con otros compuestos, como los antioxidantes o las vitaminas, cuyo propósito versa en obtener un efecto de eliminación más eficaz que el que se lograría utilizando cada uno de estos elementos por separado, siendo una acción compartida que permite, por ejemplo, eliminar una mayor variedad de metales con distintas afinidades, trasladarlos de diferentes áreas o entorno y, al mismo tiempo, proteger al organismo o al sistema de tratamiento del daño oxidativo o de la toxicidad que puede derivar del proceso de movilización de metales, lo que hace que el plan de acción sea más integral y efectivo. Los agentes se clasifican principalmente en sintéticos y naturales:

- Entre los sintéticos se encuentran los ácidos aminopolicarboxílicos, siendo el ácido etilendiaminotetraacético el más versátil, porque es capaz de crear complejos estables mediante diversos metales, lo que lo hace ideal para aplicaciones industriales y de fitoextracción de suelos contaminados.

- Entre los naturales resalta el ácido cítrico y demás ácidos orgánicos que, junto a otros compuestos, son considerados alternativas más ecológicas, atribuyéndoles la denominación de quelantes biodegradables porque permiten reducir el impacto ambiental al ser utilizados para inmovilizar metales o facilitar procesos de biorremediación en el suelo (Santos Ruiz, 1959).

En la remediación de suelos cacaoteros, los agentes quelantes cumplen una función crucial para mitigar la contaminación por cadmio, un metal pesado que suele afectar la calidad del grano, centrando su aplicación en la fitoextracción y en la inmovilización, donde se añaden por un lado, quelantes sintéticos como el EDTA o naturales como el ácido cítrico para unirse al cadmio que se encuentra en el suelo, volviéndolo más soluble y facilitando su absorción por plantas hipercumuladoras que luego son cosechadas y eliminadas.

Ahora, la aplicación de enmiendas orgánicas es indispensable porque contienen agentes donadores de electrones que operan como ligandos complejantes o agentes quelantes naturales, consistiendo su mecanismo de acción en la capacidad de coordinación, donde los iones metálicos esenciales para las plantas que son cationes, se unen a compuestos orgánicos. Al formar complejos o específicamente, quelados (estructuras cíclicas estables), las enmiendas previene que dichos micronutrientes precipiten o reaccionen con otros componentes del suelo, sobre todo en condiciones de pH elevado, manteniéndose en una forma soluble y biodisponible para la absorción radicular; por consiguiente, su uso mejora en gran escala la asimilación de nutrientes, corrigiendo carencias y potenciando la salud y productividad de los cultivos mediante el fenómeno de la quelación descrita, tal como lo señala Pintado (2018).

2.2 Influencia de las Nanoburbujas en las Propiedades del Suelo y la Rizosfera

Además de interacción que se mencionó in supra, las nanoburbujas tienen la posibilidad de mejorar las propiedades del suelo, más la que rodea las raíces, porque su pequeño tamaño ayuda a que permanezcan disueltas en el agua durante más tiempo y así tener una alta superficie de contacto, facilitando una mayor transferencia de oxígeno o de otros gases disueltos a las capas profundas del suelo, combatiendo la hipoxia o anoxia. Ello promueve un mejor ambiente para la respiración de las raíces y la actividad microbiana, lo cual es determinante para la descomposición de materia orgánica y la disponibilidad de nutrientes para las plantas, dado que, estas nanoburbujas alteran la estructura del suelo, favoreciendo la agregación de partículas y generando mejoras en la aireación y capacidad de retención de agua, obteniendo a una escala mayor, una salud adecuada del ecosistema del suelo (Morishita et al., 2024).

2.2.1 Efectos sobre la Estructura del Suelo: Agregación y porosidad.

La condición que presenta el suelo mediante el análisis granulométrico y la disposición especial de los mismos conforma lo que es conocido bajo la denominación de “estructura del suelo”, y que se vincula directamente con las distintas capas visibles de su perfil edáfico, definiéndola como el modo en que se asocian las partículas individuales de arcilla, arena y limo, que al agruparse, forman unidades de mayor tamaño conocidas como agregados (FAO, 2021), siendo sus características descritas mediante su morfología (forma), consistencia y estabilidad. La estructura del suelo es una propiedad dinámica que experimenta constantes alteraciones debido a la interacción de factores tanto internos y externos (físicos, químicos, biológicos y antrópicos) que operan dentro del sistema edáfico, dentro de los cuales se incluye:

- Las operaciones o prácticas agrícolas que implican el desplazamiento de masas de tierra o la incorporación de materiales orgánicos al sustrato.
- La actividad radicular, es decir, la fuerza mecánica ejercida por las raíces de la vegetación.
- Los cambios climáticos vinculados a las alteraciones entre ciclos de sequía y humedad.
- Las reacciones bioquímicas e iónicas.

En la agricultura, una estructura óptima caracterizada por una alta porosidad y estabilidad de los agregados es esencial porque permite la correcta infiltración y retención de agua, lo que asegura o garantiza una adecuada aireación para las raíces y los microorganismos, facilitando el desarrollo sin restricciones de las raíces para la absorción eficiente de los nutrientes; por lo contrario, una estructura caracterizada por la deficiencia causada por la compactación, reduce el espacio poroso y dificulta la penetración de las raíces y el acceso a los nutrientes, lo que afecta el movimiento del agua y aire, disminuyendo la productividad y resistencia del suelo a la erosión (Osuna et al., 2006).

a) **Porosidad.** Conforme a Ibáñez (2008) se refiere a la proporción del volumen de un suelo que no está ocupada por partículas sólidas, es decir, representa el espacio poroso disponible para la circulación y retención de agua y gases, que si bien suele ser una consecuencia inherente de la textura del suelo, puede ser modificada por las prácticas de manejo agronómico.

La porosidad resulta fundamental porque facilita el tránsito de aire y agua dentro del perfil edáfico que es un aspecto crítico para el desarrollo de las raíces, además de proveer el hábitat necesario para la fauna y los microorganismos, por esta razón, se le reconoce como uno de los mejores indicadores de la calidad física de un suelo, donde aquellos que posean un nivel de porosidad (ubicado típicamente entre el 10 % y el 25 %) no solo promueven el vigoroso crecimiento radicular, sino que

también exhibe una notable capacidad para retener grandes volúmenes de agua y materia orgánica; en cambio, en los sitios donde se registre una porosidad precaria, es imperativo ajustar los métodos de cultivo, por ejemplo, mediante la aplicación de enmiendas orgánicas o el uso de cubiertos vegetales con el fin de corregir esta condición.

b) **Agregación.** Es un proceso indispensable por el hecho que se refiere a la unión de las partículas individuales del suelo junto con la materia orgánica, la biota y las sustancias cementantes para así formar agregados más grandes y estables, siendo una buena estructura que es fundamental para la fertilidad y salud del suelo, ya que crea poros que permiten la circulación del agua (reteniendo humedad y evitando encharcamientos), el aire y el desarrollo de las raíces de los cultivos, protegiendo los nutrientes de la erosión y la descomposición rápida, lo cual resulta en una producción agrícola más sostenible y eficiente (Meza et al. 2011).

Estos dos componentes son determinantes en la estructura del suelo, influyendo directamente en su funcionamiento y productividad, permitiendo desarrollar una estructura estable que, con una adecuada agregación, asegura una porosidad balanceada con suficiente aireación, buen drenaje, capacidad de retención de humedad, baja resistencia a la penetración de raíces y protección a la materia orgánica, siendo un indicador esencial de la calidad del suelo agrícola (Meza et al., 2011).

2.2.2 Modificación del Potencial de Óxido-Reducción (ORP) y del pH del suelo.

Para Suslow (2004) el potencial redox constituye un indicador de la energía química involucrada en los procesos de oxidación-reducción, la cual se cuantifica al transformarse en energía eléctrica por medio de un electrodo, adquiriendo un valor positivo cuando se verifica un proceso de oxidación y un valor negativo cuando ocurre una reducción, lo que

usualmente provoca variaciones en el pH del entorno. El ORP expresado en milivoltios es la medición que evalúa el grado de oxidación presente en el agua, siendo un aspecto que puede reflejar la eficacia desinfectante de una sustancia en el medio acuoso, en lugar de su concentración específica. En este escenario, diversos agentes químicos como el bromo, cloro o el ozono, son reconocidos como oxidantes, siendo compuestos que destacan por ser excelentes desinfectantes porque su principal característica es la capacidad que poseen para oxidar (o captar electrones) de otras materias. Mediante esta acción, neutralizan bacterias patógenas, algas y materia orgánica, los cuales, de otro modo, podrían modificar la composición química de dichos desinfectantes.

En otras palabras, el ORP se encuentra vinculado a la determinación de la proporción entre la actividad de las sustancias que se encuentran oxidadas y las sustancias reducidas coexistentes en una solución acuosa, donde los electrodos diseñados para medir el potencial de óxido de reducción logran detectar el valor neto, estableciendo su aptitud para oxidar o reducir otras sustancias, generando cambios de pH dado que las reacciones de óxido-reducción a menudo implican la participación de iones hidrógeno o iones hidróxido, donde el ORP tiende a aumentar conforme se eleva la concentración de iones hidrógeno y, de manera inversa, disminuye al incrementarse la concentración de iones de hidróxido (Romero, 2009).

Se denomina potencial redox de un suelo a su capacidad reductora u oxidativa. Tal atributo se encuentra estrechamente vinculado con la aireación del sistema edáfico, así como con el pH, ya que ambos condicionan tanto la actividad microbiana como el tipo de reacciones que acaecen en él. (Ibáñez, 2008)

En este proceso, la humedad ejerce una influencia clave en las ejecuciones edáficas al alterar la distribución del aire dentro del sustrato, lo cual afecta consecuentemente la propagación del oxígeno (O_2) y la concentración de dióxido de carbono (CO_2). Ahora, bajo condiciones de drenaje deficiente, la principal sustancia con capacidad reductora en el suelo es la materia

orgánica, lo cual se debe a que se incorpora al sistema en un estado químico reducido a través de los aportes de biomasa y necromasa, donde el metabolismo del propio suelo tiende a oxidar esta materia mediante la intervención de otros elementos que, al reaccionar, pasan a formas más reducidas; en contraparte, es el oxígeno el agente oxidante primerio.

Dentro de este espectro de reacciones, una gran variedad de componentes estructurales del suelo posee la capacidad intrínseca de oxidarse o reducirse (fenómeno conocido como carga variable), siendo una dualidad donde cobra relevancia directa el entorno predominante en el medio edáfico, porque una ventilación adecuada promueve la oxidación, mientras que, la saturación hídrica o hidromorfia conduce a la escasez de oxígeno, generando un ambiente químico reductor. Así, el potencial de óxido-reducción es un factor determinante para aquellos elementos que pueden existir en la matriz del suelo con dos o más estados de oxidación, como son el oxígeno, carbono, nitrógeno, azufre, hierro y cobre, donde las condiciones del redox son de importancia en los procesos de meteorización o transformación de los minerales que se encuentran presentes en los suelos o en las rocas de origen, lo que hace que incidan de manera directa tanto en la clasificación y génesis de los tipos de suelo, como en la actividad biológica que se desarrolla en ellos (Ibáñez, 2008).

Asimismo, estas condiciones tienen un efecto significativo sobre la fertilidad del suelo, ya que regulan la biodisponibilidad de múltiples nutrientes esenciales para el desarrollo vegetal, frecuentemente a través de la modificación del pH, pues es el contexto en donde el color del suelo sirve como un indicador visual fiable de su potencial redox. Por otra parte, la oxidación de la materia orgánica en ausencia de ambientes reductores resulta finalmente en la descomposición de estos compuestos en dióxido de carbono (CO_2) y agua (H_2O); no obstante, si el entorno es anóxico (carente de oxígeno), este proceso de degradación puede culminar con la liberación de gas metano (CH_4) a la atmósfera.

En la práctica agrícola, su impacto directo recae sobre la disponibilidad de nutrientes y en la actividad microbiana, ya que, el pH regula la solubilidad de minerales determinantes, por ejemplo, muchos micronutrientes metálicos son menos disponibles en suelos alcalinos, mientras que, el aluminio puede ser tóxico en ciertos suelos ácidos, entonces, modificar el pH usando cal para subirlo optimiza la asimilación de elementos. Por su parte, el ORP mide la capacidad del suelo para oxidar o reducir sustancias, afectando además de la forma química, la movilidad de elementos como el nitrógeno o el hierro, determinando las condiciones de aireación o anegamiento, de ahí que, un manejo adecuado de ambos parámetros ayude a fomentar un ambiente de suelo saludable que maximice la eficiencia de los fertilizantes y el crecimiento de los cultivos (Ibáñez, 2008).

2.2.3 Impacto en la Comunidad Microbiana del Suelo y su Rol en la Biogeoquímica de los Metales.

- a) Las nanoburbujas generan en la comunidad microbiana un impacto que se define por el simple aumento significativo del oxígeno disuelto en el agua de riego, que puede llegar a posicionarse en concentraciones más altas que la saturación normal, siendo un ambiente que favorece a los microorganismos aeróbicos beneficiosos, por ejemplo, los encargados de la descomposición de la materia orgánica y la fijación de nitrógeno, promoviendo su crecimiento y la actividad metabólica (Moleaer, 2023).
- b) La carga superficial negativa de las NB y su capacidad para reducir la tensión superficial del agua mejoran la infiltración y aireación del suelo, lo que indirectamente genera beneficios en la biota microbiana al minimizar las condiciones de anoxia y compactación, lo que, a su vez, potencia la biodiversidad y la funcionalidad ecosistémica del suelo.
- c) En el área de la biogeoquímica de los metales, el incremento del ORP y la superoxigenación que es inducida por las NB adquieren un papel dual, especialmente en la movilización o no de metales pesados

y nutrientes, debido a que, la alta disponibilidad de oxígeno puede incrementar la oxidación de metales como el hierro y el manganeso, lo que suele derivar en su precipitación e inmovilización, reduciendo así su biodisponibilidad y toxicidad. Sin embargo, la alteración del entorno puede afectar en los ciclos del azufre, donde inciden en la formación y disolución de sulfuros metálicos, siendo cambios que están mediados por las interacciones entre los metales y los productos de la actividad microbiana aeróbica.

- d) Otro mecanismo sobre la comunidad microbiana involucra la generación de radicales libres cuando las NB colapsan debido a la diferencia de presión interna, y que al ser agentes oxidantes potentes, producen un efecto directo en la lisis celular de patógenos y el control de organismos indeseados como algas y hongos, lo que contribuye a la sanidad del suelo y las raíces, modulando la composición de la comunidad microbiana, ofreciendo una alternativa a los agroquímicos promoviendo un equilibrio microbiano más saludable para el crecimiento vegetal.
- e) La relación entre las NB, los microorganismos y los metales es compleja y aún sigue siendo objeto de estudio, no obstante, es determinante para la biorremediación de suelos contaminados y la optimización de la nutrición vegetal, por ejemplo, al favorecer los microorganismos que bioestimulan la disponibilidad de nutrientes como la movilidad iónica mejorada por la carga negativa de las NB, se aumenta la captación de macro y micronutrientes por las plantas.
- f) En el caso de contaminantes metálicos, la oxidación mediada por las NB y/o microorganismos puede cambiar o modificar formas tóxicas en especies menos reactivas, primeramente, es necesario comprender una correcta interacción sinérgica de las mismas con enmiendas orgánicas y otras sustancias específicas puede maximizar la eficacia en la remediación y en la productividad agrícola, asentando los fundamentos para las tecnologías futuras en la agronomía y claro está, en la gestión ambiental (Moleaer, 2023).

2.3 Interacción Nanoburbuja-planta: Implicaciones para el Cacao

Tal como se mencionó anteriormente, la relación que existe entre las nanoburbujas y el cacao se centra en la aplicación de la primera como una tecnología agrícola innovadora dentro de los sistemas de fertirrigación, debido a que, estas son introducidas en el agua de riego, logrando una mejor disolución y transferencia de oxígeno y nutrientes hacia las raíces de planta, optimizando su absorción, lo que permite que la productividad del cultivo incremente, mitigando la incidencia de enfermedades, obteniendo plantas de cacao más sanas y eficientes.

2.3.1. Mejora de la Oxigenación en la Zona Radicular y su Efecto en la Sanidad de la Raíz.

La presencia de oxígeno en el sustrato de crecimiento es determinante para la orientación de las raíces y su condición metabólica, resaltando entre ello, el fenómeno conocido como “Oxitropismo” que faculta a las raíces para evitar áreas del medio del cultivo con baja concentración de gas, constituyéndose esta respuesta fisiológica como un mecanismo para mitigar la competencia que existe entre las mismas por recursos vitales como el agua, nutrientes y el propio oxígeno (Porterfield y Musgrave, 1998).

La disponibilidad adecuada de oxígeno es esencial para el desarrollo de las plantas, siendo un elemento imprescindible en múltiples procesos metabólicos, que incluye el procesamiento de carbohidratos, la fijación de nitrógeno mediante simbiosis, la conservación del gradiente de protones y la asimilación de nutrientes por las raíces (para mencionar algunas). Lo que deriva de esta disponibilidad se manifiesta o exterioriza de manera inmediata en el crecimiento de la raíz y del vástago, llegando a afectar, por ejemplo, la progresión general de la planta (Morard et al., 2000).

De manera que, la respiración vegetal se posiciona como un proceso oxidativo que está regulado por diversas formas metabólicas, cuyo propósito versa en la prevención de escenarios de insuficiencia energética, incluso bajo condiciones de hipoxia (que es cuando existe carencia de oxígeno en los tejidos de la planta), pues es habitual que se presente ausencia de oxígeno en la rizosfera, lo que se debe a un alto ritmo de respiración radicular provocado por temperaturas elevadas, a una aireación deficiente del medio de cultivo o a una simple gestión de riego inadecuada (Carazo et al., 2015). Ahora bien, el proceso respiratorio de las raíces cuando se llega a cabo en condiciones aeróbicas, exige necesariamente un suministro constante de oxígeno hacia la rizosfera, cuya intensidad está determinada por factores como la temperatura ambiental, la concentración salina, la presencia de metales pesados, la tensión hídrica y el nivel de saturación del espacio poroso (Liao y Lin, 2001).

Sin embargo, debe destacarse que el elemento más directamente relacionado con la respiración es la disponibilidad del O_2 , porque es el gas que posibilita o impide (según el caso) el desarrollo del proceso, erigiéndose como un factor limitante indispensable tanto en suelos naturales, como en sustratos artificiales, pues una escasez del mismo puede provocar que las plantas presenten una disminución en la captación de agua, pueden demostrar síntomas de marchitamiento o pueden experimentar una reducción en la conductancia estomática. Estos efectos evidentemente se traducen en otras connotaciones negativas como un crecimiento lento y una merma en la productividad, incluso el deterioro y la necrosis padecidas por plantas, son atribuidas a la privación de O_2 en el sistema radicular (Boru et al., 2003).

Se destaca así, que el oxígeno desempeña un papel central debido a su participación en el metabolismo energético a través de la respiración en las vías del metabolismo del nitrógeno y como reactivo en las reacciones de desaturación de ácidos grasos y en la biosíntesis de fitohormonas esenciales como el etileno, el ácido abscísico y las giberelinas (Van y Licausi, 2015). Por el contrario, un bajo tenor de O_2 incrementa la vulnerabilidad de la planta a las infecciones por agentes patógenos, lo cual ocurre porque

las esporas son estimuladas por los exudados liberados en la rizosfera, promoviendo entonces, la formación de las estructuras de infección.

No obstante, para Lui et al., (2020) al introducir agua enriquecida con nanoburbujas de oxígeno se logra aumentar la concentración de oxígeno disuelto de forma estable y uniforme en la zona de la raíz, porque un suministro más alto y consistente es crucial para la respiración radicular, siendo un proceso metabólico que impulsa la absorción de nutrientes y agua, asegurando que haya un crecimiento más vigoroso y una mayor biomasa. Lo último ocasiona un efecto profundo en la sanidad de la planta al mitigar condiciones de estrés hídrico o anoxia, porque el oxígeno adicional disponible más allá de estimular el desarrollo de raíces más fuertes y densas, también se posiciona como una defensa biológica, donde en entornos con baja concentración de O_2 , las raíces se vuelven susceptibles a la proliferación de patógenos anaeróbicos o facultativos.

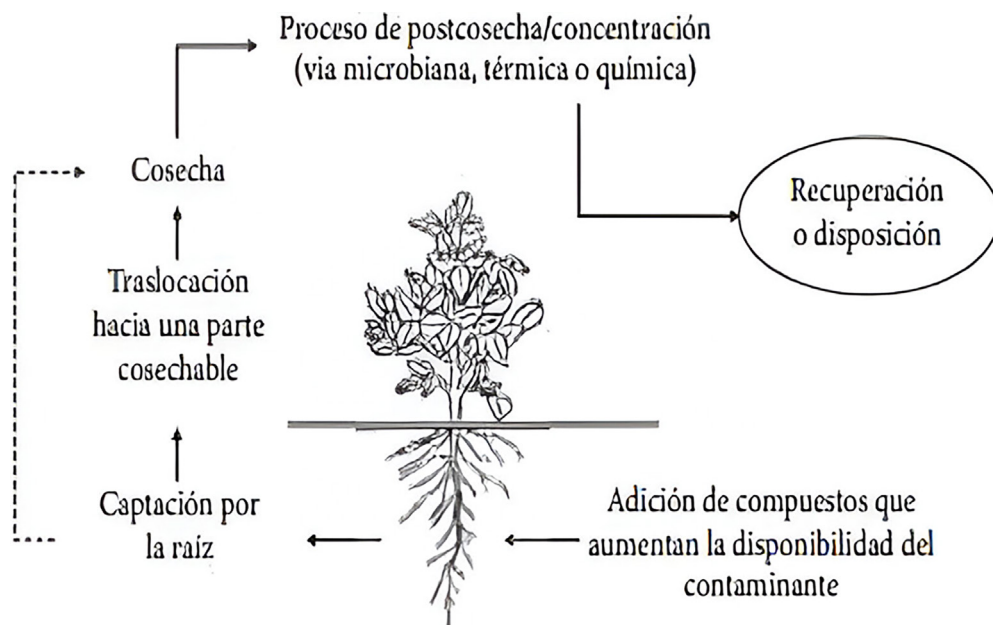
Al mantener niveles óptimos de OD en la rizosfera, las nanoburbujas crean un ambiente menos favorable para estos organismos dañinos, reduciendo significativamente la incidencia de enfermedades radiculares, manteniéndose como un control pasivo respecto a los patógenos, porque disminuye la necesidad de fungicidas químicos, impulsando sistemas de cultivo más sostenibles, donde claramente exista una salud vegetal intrínseca. En resumen, esta nueva tecnología mejora la sanidad radicular a través de oxigenación superior y persistente en la rizosfera, llegando a optimizar las funciones metabólicas de planta, lo que se traduce en una mejor absorción de nutrientes y un crecimiento robusto, actuando a su vez, como una estrategia preventiva al fortalecer la defensa natural de la raíz, lo que dificulta la colonización por agentes dañinos, promoviendo entonces, un mayor rendimiento y calidad de los cultivos al aprovechar el oxígeno como un agente determinante para el bienestar vegetal.

2.3.2 Reducción de la Fitoextracción de Metales Pesados por la Planta de Cacao.

Desde un punto de vista general, la fitoextracción constituye una metodología tecnológica que se basa en la utilización de vegetales con capacidad de acumular tanto sustancias tóxicas como compuestos orgánicos, manteniendo como objetivo primordial la remoción de dichas sustancias del medio edáfico al ser absorbidas y concentradas en las porciones de la planta que pueden ser cosechadas (Carpena y Bernal, 2007). Este mecanismo se articula a partir de componentes fisiológicos intrínsecos de la planta, los cuales le confieren la función de un agente extractivo, y es justo en el proceso de fotosíntesis donde la planta consigue captar los elementos metálicos presentes en el suelo a través de su sistema radicular para, posteriormente, almacenarlos en su biomasa aérea.

Figura 1

Proceso General de Fitoextracción



Nota: Tomado de Volke et al. (2025).

Ahora, entre los grupos vegetales que presentan una mayor idoneidad para esta aplicación, se destacan las especies metalófitas, que son entendidas como plantas que poseen una alta tolerancia a concentraciones elevadas de metales y que, además, prosperan de forma natural en tales entornos. Específicamente, en lo que respecta a la extradición de metales, los pastos (gramíneas) se catalogan como el género más apropiado para la fitorremediación de contaminantes, tanto en sus formas orgánicas como inorgánicas, cuya preferencia se justifica debido a su patrón de crecimiento y su notable adaptabilidad a una diversidad de condiciones climáticas y suelo (edáficas).

Por esta razón, debe conceptualizarse como una estrategia de saneamiento de carácter prolongado que, potencialmente demandará la ejecución de múltiples ciclos de cultivo sucesivos para lograr una reducción de la concentración de contaminantes hasta umbrales considerados aceptables, donde la extensión temporal requerida es directamente dependiente de variables clave como la naturaleza y concentración del agente contaminante, la duración del ciclo vegetativo y, la eficacia de remoción inherente a la especie vegetal seleccionada (Volke et al., 2005), los cuales son tomados en cuenta no sólo en la fitoextracción, sino también en los otros mecanismos con los cuales se involucra y trabaja conjuntamente (rizodegradación; fitodegradación y la fitoestabilización).

En el contexto del cultivo de cacao, para Casteblanco (2018) esta reducción de la fitoextracción hace referencia a las estrategias agronómicas y de postcosecha que están direccionadas a disminuir la absorción y acumulación de metales pesados, principalmente el cadmio, lo cual va desde el suelo hasta las semillas del grano de cacao, siendo un metal que se encuentra presente de forma natural o por contaminación antropológica de la planta que al situarse en las hojas y acumularse en las almendras, representa un riesgo para la salud de las personas. Por ello, dicha técnica de reducción (junto a las otras) pretende limitar la biodisponibilidad del cadmio en la rizosfera o sencillamente, bloquear su traslocación dentro de la planta,

pues el cacao no es un fitoextractor eficiente en el sentido de limpiar el suelo, sino que por lo contrario, acumula el metal en su parte comestible.

Esto se logra mediante prácticas como la aplicación de enmiendas al suelo que aumentan el pH, lo que inmoviliza los elementos metálicos contaminantes hasta el punto de reducir su solubilidad o, en caso tal, se puede lograr mediante el manejo de la genética seleccionando clones de cacao que exhiben una menor capacidad natural de absorción y traslocación del metal a la semilla. Además, existen otras técnicas de mitigación que se enfocan en la fitorremediación asistida, donde se implementan otras especies de plantas conocidas como hipercumuladoras cultivadas junto al cacao, las cuales sí están diseñadas para la fitoextracción porque absorben grandes cantidades de cadmio y lo almacenan en su biomasa foliar y radical, que luego es removida del campo, lo que reduce el contenido total del metal en el suelo disponible para el cacao, procurando asegurar la inocuidad del chocolate y garantizando la sostenibilidad económica de los productores.

Tabla 1

Ventajas y Desventajas de la Fitoextracción de Metales Pesados en la Agricultura

Ventajas	Desventajas
Suele ser más económica que los métodos físico-químicos tradicionales	Requiere de un período de tiempo extenso que depende del ciclo de crecimiento de las plantas
Método sostenible que no implementa en su configuración químicos tóxicos, por lo tanto, no altera la estructura ni la fertilidad del suelo significativamente, generando una menor perturbación en el sitio	Sólo es efectiva hasta la profundidad a la que llegan las raíces de la planta en cuestión

Ventajas	Desventajas
Permite tratar la contaminación en el propio sitio, evitando costos y riesgos de transporte de suelo contaminado.	Es más efectiva para contaminantes con concentraciones bajas o moderadas, ya que un nivel alto de concentración de metales puede dificultar su remoción
La vegetación colabora en la reducción de la erosión del suelo y permite estabiliza los metales pesados en la zona de las raíces	Después de producirse la cosecha, la biomasa vegetal contaminada debe ser manipulada y tratada, lo cual puede ser un gran desafío
La biomasa cosechada en algunos casos puede ser utilizada para la producción de bioenergía	Puede aumentar la solubilidad y movilidad de ciertos contaminantes, aumentando el riesgo de migración

Nota: Elaboración propia

2.3.3 Evaluación de la Respuesta Fisiológica y Bioquímica del Cacao al Tratamiento:

Actualmente, el estudio que existe respecto al tema de la nanotecnología versa en una investigación que se enfoca en la aplicación de nanoburbujas en el sistema de fertirrigación, relativamente reciente para el clon del cacao CCN-51 en condiciones de campo. La aplicación de nanoburbujas en el sistema de riego busca optimizar la absorción de nutrientes y la oxigenación en la zona radicular del cacao, aunque el estudio se centra en parámetros agronómicos y nutricionales, los mismos se vinculan de manera directa con la respuesta fisiológica y bioquímica de la planta (Cruz et al., 2021), donde la metodología en cuestión utiliza la

tecnología de emisor de NB por electrólisis para integrarlas en el agua de fertirriego, de donde se infieren las siguientes respuestas:

- a) **Mitigación de enfermedades.** Se observó una reducción en la incidencia de afecciones en el cultivo, lo que sugiere una mejora en la respuesta inmunológica o en la resistencia sistemática de la planta (como respuesta fisiológica de defensa) y/o un ambiente menos propicio para patógenos en el suelo, lo cual se debe, probablemente, al aumento de la oxigenación y las condiciones físico-químicas del agua y suelo.
- b) **Aumento de productividad.** Es la manifestación de una mejor actividad fisiológica general de la planta, incluyendo una fotosíntesis más eficiente y una mejor partición de biomasa hacia los frutos.
- c) **Optimización de la absorción de nutrientes.** Es la manera de medir la respuesta bioquímica de la planta, donde el principal mecanismo de acción de las NB recae en la absorción de nutrientes en el cultivo, ya que aquellas que están compuestas de oxígeno se adhieren a las membranas de las raíces, mejorando el microambiente radicular y la respiración, lo que a su vez optimiza la captación activa de iones y la eficiencia en el uso de los fertilizantes aplicados, lo que se traduce en un mejor estado nutricional del cacao propiamente.

Conforme a ello, la investigación llevaba a cabo por Cruz et al., (2021) arroja como principal conclusión que la aplicación de las NB mediante el sistema de riego es una tecnología efectiva y validada que optimiza de manera precisa y significativa, la producción y salud del cultivo de cacao, potenciando la respuesta fisiológica al mejorar la absorción de nutrientes y la oxidación radicular, lo que ocasionó una mayor productividad del producto y una respuesta de defensa más eficiente de la planta, exteriorizando conjuntamente, que el sistema de NB es una alternativa viable para mejorar la eficiencia agronómica y económica del manejo de plantación del cacao.

CAPÍTULO III

APLICACIÓN PRÁCTICA Y EVALUACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE NANOBURBUJAS EN CAMPO

La investigación científica sobre nuevas tecnologías para la remediación ambiental, como es el caso de las nanoburbujas, se ha posicionado rápidamente como una promesa de laboratorio para su aplicación en campo por sus propiedades fisicoquímicas únicas que permiten una alta estabilidad en soluciones acuosas y en una gran área superficial específica, lo que termina haciéndolas candidatas ideales a la hora de mejorar la transferencia de masa de gases y promover reacción químicas en matrices tan complejas como el suelo productivo.

No obstante, la razón de esta investigación se basa en que los estudios controlados han validado teóricamente la funcionalidad de las nanoburbujas en el campo, pero la verdadera evaluación de su eficiencia depende exclusivamente de la aplicación práctica de las mismas en ambientes reales, por lo que, al integrarse en el contexto de Perú, la validación exitosa de esta tecnología no solo aportará conocimiento científico, sino una herramienta concreta para mejorar la calidad del producto y mejorar la comercialización del cacao peruano.

3.1 Diseño e Implementación de un Sistema de Remedación In Situ

La remediación in situ, como señala Fernández (2021), resulta de un enfoque innovador que pretende tratar la contaminación por metales pesados directamente en el sitio en cuestión, sin necesidad de tener que excavar o transportar grandes volúmenes de suelo para su tratamiento, por lo que, la implementación exitosa de un sistema de nanoburbujas para suelos contaminados con metales pesados requiere de una planificación meticulosa, tanto en el diseño del tratamiento como en la logística de aplicación de esta herramienta, por lo que, es necesario realizar un estudio de caracterización del suelo, donde pueda identificarse o determinarse la concentración exacta y la especie química de los metales pesados que afectan al suelo dada la biodisponibilidad de estos absorbidos por el cacao, teniendo en cuenta que la efectividad de las nanoburbujas puede variar según las condiciones del metal y su conexión con la materia orgánica.

3.1.1 Metodologías para la Generación y Aplicación de Nanoburbujas en Parcelas de Cacao.

El cultivo de cacao en las tierras del Perú son un pilar económicas en sus muchas regiones que gozan de ambiente tropical, por lo que, normalmente se encuentra enfrentando desafíos relacionados con la salud del suelo, la eficiencia del riego de la plantación y la incidencia de enfermedades que puede ser transmitidas al consumidor, por ello, en este contexto la nanotecnología agrícola emerge como una solución de vanguardia a la que encabeza el uso de las nanoburbujas, por su dote de propiedades fisicoquímicas que permiten su estabilidad en el agua, así como su potencial de superficie negativo y su capacidad para generar radicales libres que actúan como una “batería de gas” que oxigena y purifica, como es pretendido, el agua utilizada para el riego del cacao, lo que representa una estrategia firme para optimizar el desarrollo radicular de la planta y maximizar la absorción de nutrientes.

Así, la aplicación efectiva de esta tecnología depende directamente de las metodologías de generación y aplicación empleadas, ya que estas están diseñadas para forzar la reducción del gas a la escala nanométrica requerida para el cultivo (un tamaño inferior a los 200 nanómetros), por ello, el enfoque que se toma desde el proceso de generación de nanoburbujas, mucho antes de pasar a su aplicación en el suelo, como indica Macassi (2017) inicia con el uso de equipos especializados que fuerzan la disolución de un gas en el agua (sea este el oxígeno o el ozono) mientras utilizan diferentes tipos de principios físicos para reducir el tamaño de las burbujas, implicando sistemas de inyección de gas en agua a alta presión y velocidad para formar las partículas diminutas que las componen, inyectándolas posteriormente en el suelo o el agua de riesgo para la oxigenación y nutrición de las plantas:

- a) **Disolución a Presión (Presurización):** Este método se basa en el principio de que la solubilidad de un gas en un líquido, según encuadra la Ley de Henry, puede aumentar con la presión, entendiéndolo desde el principio de funcionamiento extendido donde el agua es bombeada a un recipiente (generador) al que se le inyecta el gas (O_2) a alta presión, disolviéndose así por completo en el líquido hasta alcanzar un estado de sobresaturación liberado por medio de una boquilla hacia la presión atmosférica normal, logrando generar una alta concentración de nanoburbujas de manera eficiente, pues la repentina pero también intensa caída de la presión provoca que el gas disuelto sea expulsado violentamente del líquido (Foudas et al., 2023).
- b) **Flujo de Rotación:** Este enfoque promueve la aplicación de fuerzas mecánicas intensas para reducir el tamaño de las burbujas de manera estable pero precipitada, conforme a este mecanismo el agua y el gas son introducidos en una cámara donde les es inducido un flujo de remolino o vórtice a muy alta velocidad, donde las tuberías o conductos que atraviesan suelen estar diseñados para que el líquido siga trayectorias curvas y angostas, de tal forma, es esa alta velocidad del flujo la que genera fuerzas paralelas a la superficie y turbulencia dentro del líquido,

donde la fuerza mecánica que impacta contra él rompen o cortan las burbujas más grandes que se le introducen, para así reducirlas de manera progresiva y hacerlas pasar de microburbujas a nanoburbujas, aprovechando los resultados de la hidrodinámica del vórtice, no obstante, pese a su eficacia, la concentración de burbujas que se obtiene suele ser menor que la obtenido por la disolución a presión (Foudas et al., 2023).

- c) **Mezclador Estático:** Es uno de los dispositivos más simples que promueve la mezcla íntima del gas y el líquido sin partes móviles de por medio, es decir, inicia con la inyección en la corriente de agua antes de que esta pase a través de un mezclador estático, que esencialmente se trata de un tramo de tuberías con elementos internos fijos, como rejillas o placas, donde a medida que el fluido y el gas pasan por medio de esos elementos internos del mezclador a alta velocidad, se crea una turbulencia intensa movidas por diversos cambios de dirección, generando un cizallamiento hidráulico que rompe mecánicamente con las burbujas grandes hasta reducirlas de manera continua a burbujas más pequeñas y cuyo proceso culmina cuando estas alcanzan una escala nanométrica ideal para la remediación (Foudas et al., 2023).
- d) **Electrólisis o Generación Electroquímica:** Este método de generación de nanoburbujas no depende de la compresión del gas, sino más bien de una reacción química originada por el uso de electricidad, al momento en que se sumergen dos electrodos (ánodo y cátodo) en el agua y se aplica una corriente eléctrica, haciendo que el agua se descomponga electroquímicamente, separando el elemento H_2O para transformarlo en O_2 y H_2 , generando estos gases directamente en la superficie de los electrodos como burbujas nacientes del proceso, las cuales se nuclean y liberan inicialmente en tamaños tan pequeños que casi sin mayor esfuerzo entran eficazmente en el rango nanométrico, como indica Medina (2024).

e) **Ultrasonido o Vibración Supersónica:** Su basamento práctico está en la aplicación de energía del tipo acústica en el líquido, es decir, se logra producir con el uso de un transductor de ultrasonido que envía ondas acústicas en alta frecuencia a través del agua donde el gas ha sido disuelto, su mecanismo de formación inicia al momento en que las vibraciones ultrasónicas provocan ciclos de alta-baja presión en el líquido (Napte y Biradar, 2024), de modo que, durante el ciclo en que hay baja presión es que se forman las microcavidades de vapor y gas, conocidos como un fenómeno llamado “cavitación acústicas”, así cuando el ciclo de alta presión inicia, estas colapsan violentamente hasta que las microcavidades se rompen en múltiples nanoburbujas, lo que puede inclusive llegar a generar radicales libres que contribuyan a la purificación del agua, sin embargo, aunque sí resulta efectivo a la hora de generar nanoburbujas, en la escala agrícola se ve limitado.

Tabla 2
Metodologías de Generación de Nanoburbujas.

Metodología	Principio Físico Esencial	Mecanismo de Fragmentación	Ventaja Operacional Clave
Disolución a Presión	Ley de Henry (Sobresaturación de Gas)	Caída drástica de la presión del líquido saturado	Genera la mayor concentración de nanoburbujas
Flujo de Rotación (Vórtice).	Hidrodinámica y Cizallamiento	Fuerzas de cizallamiento intensas creadas por un flujo giratorio de alta velocidad	Utiliza un principio mecánico robusto, simple de implementar en línea

Metodología	Principio Físico Esencial	Mecanismo de Fragmentación	Ventaja Operacional Clave
Mezclador Estático	Turbulencia y mezcla de alta velocidad	Cizallamiento hidráulico y división del flujo al pasar por elementos fijos	Requiere bajo mantenimiento, porque no tiene partes móviles
Electrólisis	Reacción Electroquímica	Nucleación de gases (Ejem: O ₂ , H ₂) directamente en la superficie del electrodo	Método libre de compresión de gas con aplicación comprobada en fertirrigación de cacao
Ultrasonido	Cavitación Acústica	Colapso violento de microcavidades de gas inducido por ondas supersónicas	Puede generar especies reactivas de oxígeno adicionales

Nota: Elaboración propia

En cuanto a las metodologías que instan a la aplicación de las nanoburbujas en las parcelas de cacao una vez generadas, la aplicación principal de las mismas se da a través del sistema de riego, donde a menudo combinado con la fertilización posee en principio el nombre de “nano fertirrigación”, compuesta por dos etapas:

- 1) **Nano Fertirrigación:** Es el método de aplicación más común, donde el equipo generador de nanoburbujas se instala en el sistema de riego cerca del punto de inyección del agua o en el cabezal de riego para que el generador infunda el agua con millones de pequeñas nanoburbujas

de oxígeno que también pueden transportar nutrientes disueltos si en el proceso de riego se usa de la fertirigación para enriquecer las propiedades del agua. El agua con nanoburbujas, en este caso, se distribuye a las parcelas de cacao a través de un sistema de riego que típicamente se da por medio del riego por goteo o bien, por microaspersión, lo que asegura la entrega directa a la zona radicular (raíces) de las plantas de cacao, donde al ser las nanoburbujas estables y pequeñas, penetran con facilidad el suelo incrementando el OD en la zona de las raíces, siendo crucial para un árbol como el de cacao (*Theobroma Cacao*) que es sensible a la falta de aireación en suelos pesados o mal drenados (Lahmod y Altaee, 2021).

- 2) **Aplicación para la Purificación de Agua:** Antes de la distribución al campo, las nanoburbujas son inyectadas en embalses o balsas de riego para purificar el agua reduciendo la presencia de microorganismos y patógenos en el agua, protegiendo tanto la salud de la planta como la integridad del sistema de riegos, reduciendo los tapones que se puedan generar en los goteros.

3.1.2 Parámetros Operacionales: Frecuencia de aplicación, dosis y monitoreo.

La optimización del proceso de aplicación de nanoburbujas en parcelas de cacao y la remediación del suelo depende de un control riguroso de parámetros operacionales que son clave para su proceso, como ocurre con la dosis empleada, que se traduce en la concentración de oxígeno disuelto aplicado al suelo, la frecuencia de aplicación y el monitoreo de sus efectos; dado que el cacao es un cultivo perenne sensible a la falta de oxígeno radicular, estos parámetros deben poder ajustarse a las necesidades que requiera el cultivo y las condiciones del suelo donde es sembrado, por lo que, los parámetros operacionales en cuanto a la frecuencia, dosis o monitoreo no son universales para todas las plantaciones, sino que se ajustan a la función del tipo de suelo y al objetivo de la producción.

La aplicación de nanoburbujas en los cultivos de cacao está íntimamente ligados al calendario de riego y fertirrigación de la plantación, dado que, como el cacao es una planta que requiere de constante humedad, especialmente en los meses más secos del año, la aplicación tiende a ser muy regular, por lo que, en estos casos el método más eficiente es integrar el generador de nanoburbujas en el sistema de riego por goteo, que normalmente es el que se prefiere en las siembras de cacao. La frecuencia de aplicación es, por lo general, la misma que la del riego necesario para el cultivo dependiendo de las condiciones de humedad del suelo, no obstante, en estudios de nano fertirrigación en cacao, se ha aplicado el agua tratada con nanoburbujas en la misma frecuencia que el abono para optimizar la absorción de nutrientes y el desarrollo de la mazorca (Jun-Lei et al., 2023).

Por otro lado, la dosis aplicada a las burbujas no se mide respecto al volumen líquido inyectado sino en la saturación de gas en el agua y el tiempo de exposición que como se ha hecho mención antes, normalmente el gas que se utiliza para el cacao en estos casos suele ser oxígeno (O_2) para crear condiciones aeróbicas óptimas en la zona radicular; esta dosificación es definida también por la capacidad del equipo generado en la saturación del agua, donde el principal objetivo es incrementar u optimizar los niveles de Oxígeno Disuelto (OD) en el agua de riego, llevándolos más allá de los niveles de saturación que naturalmente tiene, puesto que, un alto OD suele ser clave para que las raíces prosperen y aumenten en producción de energía (ATP), así como en el transporte de nutrientes, donde la alta eficiencia de las nanoburbujas en la entrega de nutrientes permite un parámetro de dosificación indirecto producido por la reacción en la cantidad de fertilizante requerido, comprendiendo que, la nanotecnología puede permitir la reducción de fertilizantes sin sacrificar el rendimiento (Medina, 2024).

Asimismo, el efecto de la dosis puede amplificarse gracias a las propiedades físico-químicas de las nanoburbujas en uso de mecanismos de acción como los siguientes:

- **La sanidad vegetal:** Cuando se usan gases como oxígeno u ozono, las nanoburbujas suelen generar radicales libres, como compuestos oxidantes que actúan directamente en el agua de riego y el suelo, ayudando a destruir virus, parásitos y bacterias que causan enfermedades en las plantaciones de cacao.
- **Física del suelo:** Al modificar la tensión superficial del agua, las nanoburbujas facilitan que el agua se mueva mucho mejor a través del suelo, por lo que, este cambio físico resulta en una mayor infiltración y contribuye significativamente a disminuir la compactación.

En el caso del proceso del monitoreo, este no solo se verifica con el funcionamiento del equipo, sino por la respuesta del cultivo y del suelo a la intervención con nanoburbujas, validando la inversión dispuesta para esta tecnología (Jun-Lei et al., 2023), por lo que, en lo que respecta al monitoreo en la calidad del agua que, por supuesto, está directamente ligado con la actividad operacional del sistema de generación y aplicación de nanoburbujas, este se mide típicamente en el agua justo después del generado y antes de que llegue a la planta, siendo parte de sus mediciones más importantes:

- a) **Los niveles de Oxígeno Disuelto (OD)**, para confirmar que el generador está funcionando y que se está entregando la dosis de gas adecuada.
- b) **El Potencial de Óxido-Reducción (ORP)**, donde un aumento de estos niveles puede indicar un ambiente más oxidativo en el agua y la zona radicular, lo que se relaciona con la mitigación de patógenos anaeróbicos y la degradación de biofilm en el sistema de riego.
- c) El diámetro y concentración de nanoburbujas, y por último, que, aunque es más técnico se pueden aun así utilizar equipos especializados para verificar que se están generando las nanoburbujas ultrafinas en la concentración esperada.

Los resultados de la aplicación se evalúan también mediante la comparación con un grupo de control, por lo que, en el monitoreo agronómico del cacao, este se enfoca en la productividad y la salud de la planta, centrando el monitoreo final se centra en el aumento de la actividad y la calidad del grano, analizando a nivel nutricional las hojas y el suelo para verificar que la absorción de nutrientes sea óptima, confirmando la eficiencia de la nanoburbuja en el transporte de insumos, donde la aplicación de las nanoburbujas puede demostrar la reducción de presencia de enfermedades comunes del cacao (Foudas et al., 2023).

3.1.3 Protocolos para el muestreo y análisis de Suelo, Agua y Tejido Vegetal.

Según indica López (2024), el muestreo es la fase inicial y más crítica para evaluar la eficacia de la aplicación de nanoburbujas en la optimización de la producción del cacao, de modo que, los protocolos para ello utilizados deben estar rigurosamente ajustados para capturar los cambios específicos que la nanotecnología provoca en el suelo, en el agua de riego y en la fisiología de la planta:

- a) **Muestreo del suelo:** En cuanto al muestreo del suelo, puede decirse que este tiene un doble objetivo, comenzando por el de evaluar la fertilidad, seguido de monitorear las condiciones fisicoquímicas del suelo que han sido afectadas por la inyección de nanoburbujas, lo que puede verse en el proceso de la siguiente forma:
- Para analizar los niveles de nutrientes, respecto al muestreo de fertilidad estándar, se sigue un protocolo agronómico tradicional con una adaptación importante para la experimentación con nanoburbujas, donde se utiliza un patrón sistemático (zigzag) para asegurar su representatividad, tomando múltiples submuestras dentro de cada unidad de manejo para formar una muestra completa, sin sobrepasar una profundidad de 0 a 30cm que corresponde a la

zona radicular activa del cacao y el área de influencia de riego por goteo, siendo necesario que en su adaptación sea posible analizar por separado las zonas que llegan a recibir el tratamiento con nanoburbujas en contraste a aquellas zonas de control que reciben un riego normal, para atribuir los cambios en la disponibilidad de nutrientes a la tecnología (Foudas et al., 2023).

- Igualmente, se elabora un muestreo de oxigenación, como una medición específica para la tecnología de nanoburbujas, el cual debe realizarse in situ para obtener de ello datos más precisos, razón por la que en su instrumentación se emplean sondas electroquímicas portátiles de alta precisión para medir el Oxígeno Disuelto (OD) y el Potencial de Óxido-Reducción (ORP) en el agua del suelo, donde las lecturas se toman directamente en la zona de la raíz activa que suele estar cerca del emisor cuando el riego es por goteo, para lo que es fundamental medir la profundidad efectiva del riego en pro de verificar la penetración del agua tratada en los suelos, con una frecuencia temporal de mediciones hechas inmediatamente antes de su activación y aproximadamente 30 minutos después de un ciclo de riego con nanoburbujas, repitiendo el mismo ciclo periódicamente para monitorear la capacidad de estas en lo que respecta a la estabilización de OD en el suelo.
- También en cuanto al efecto de las nanoburbujas en la floculación y la reducción de la compactación del suelo requieren de un monitoreo físico, por lo que, se hace uso de un penetrómetro para medir la resistencia a la penetración del suelo en distintos puntos de la zona, pudiendo tomar a su vez muestras del núcleo para determinar la densidad aparente y la porosidad en laboratorio, repitiéndose las mediciones con intervalos de tiempo definitivos, con una línea base de medición previa al inicio del tratamiento.

b) **Muestreo de agua:** Este muestreo es el que garantiza que el diseño del sistema de generación de nanoburbujas esté funcionando como

corresponde, cumpliendo con los estándares de calidad para el agua tratada:

- Lo primero es un muestreo para verificar la dosis de gas entregada por el equipo, donde las muestras son tomadas directamente después de que el agua sale del generador de nanoburbujas, y luego al final de la línea de riego, donde está el punto con la presión más baja, donde es la medición al final de la línea la que confirma que la estabilidad de las nanoburbujas es suficiente para mantener los altos niveles de gas a lo largo de todo el sistema que lo distribuye.
- Aunque no resulta exclusivo de la nanotecnología, también se hace un muestreo en la calidad del agua para medir el pH, la Conductividad Eléctrica, y la presencia de sales y alcalinidad en el agua. Este monitoreo continuo de la CE y del pH contribuye a la comprensión de cómo la inyección de gas y la posterior reducción de la tensión superficial del agua (como efecto de las nanoburbujas) pueden influenciar la dinámica de las sales y nutrientes en el agua del muestrario (Foudas et al., 2023).
- Por último, se emplea un muestreo para biofilm, que es una inspección visual regular de las cintas y emisores de goteo, tomando muestras de raspado de las paredes internas de las tuberías (de ser necesario), para verificar el éxito de la tecnología en la reducción de taponamientos y el mantenimiento de la uniformidad del riego (López, 2024).

c) **Muestreo de Tejido Vegetal:** Por último, este análisis de tejido vegetal es el que proporciona la evidencia de que las mejoras en el suelo y el agua se están traduciendo en una mejor nutrición y salud de la planta:

- Principalmente, se inicia con un muestreo de nutrientes foliares, donde el estándar está en muestrear las hojas fisiológicamente maduras y estables en su contenido nutricional, seleccionando una

muestra compuesta de entre 50 a 100 hojas sanas por lote, debiendo coincidir este muestreo con la época de máxima demanda nutricional del cacao o realizarse bien al inicio y al final de la temporada para comparar el estado y evolución nutricional a lo largo del tiempo (López, 2024).

- En relación, dentro del proceso se realiza un muestreo de productividad y sanidad, realizando un conteo sistemático y periódico de la incidencia de enfermedades en los frutos y hojas para cuantificar el efecto mitigador de las nanoburbujas, monitoreando su rendimiento durante la cosecha, registrando el conteo total de mazorcas y el peso de las almendras secas por planta o unidad de área, para concluir con el indicador final de la viabilidad económica de la tecnología.

3.2 Estudios de Casos y Evaluación de la Eficacia

Dada la escasa información que hoy día se maneja sobre la aplicabilidad de las nanoburbujas en el sector agrónomo, las pocas investigaciones que se pueden encontrar sobre su uso, sirven una línea de contenido dispuesta no solo a demostrar la actividad operativa del sistema de riego utilizado para la generación y aplicación de esta tecnología, sino que también van dirigidas a comprobar y evaluar la eficacia con que este sistema es aplicado en los cultivos o bien, en las aguas que ameritan ser tratadas por su alto contenido contaminante, siendo una prueba casi irrefutable y comparable a las medidas tradicionales, la efectividad de las nanoburbujas a la hora de reducir o mitigar los metales pesados de un sector específico, como ocurre con las plantaciones de cacao en Perú, proveyendo una estrategia innovadora que a largo plazo apunta a una mayor adaptabilidad, economía y personalización en la siembra.

3.2.1 Análisis Comparativo de la Eficiencia de Remoción de Metales Pesados.

El problema central de la absorción de metales pesados en las plantaciones de cacao, resulta del hecho de que el árbol de cacao es un acumulador natural de cadmio (Cd) porque lo toma directamente del suelo y lo transporta instantáneamente al grano, debido a su alta movilidad en el sistema de suelo-planta natural, superando los límites permitidos para la exportación (Jiménez, 2015), asimismo, el plomo (Pb) también es un contaminante relevante, aunque hay menos datos comparativos de remoción específica en el contexto cacaotero. Las técnicas de remediación, como son conocidas, se dividen en estrategias de inmovilización/disminución de la biodisponibilidad en el suelo y en estrategias de remoción/captura directa (Cayotopa-Torres et al, 2021), donde entran a posibilidad la comparación entre la biorremediación y la fitorremediación como mecanismos para mitigar el cadmio en las plantaciones de cacao, consideradas ambas como tecnologías prometedoras amigables al ambiente.

- 1) **Biorremediación / Bioinmovilización:** La biorremediación en los suelos cacaoteros, según Casteblanco (2018), se centra en el uso de organismos vivos (microorganismos como bacterias y hongos) o los productos que de ellos se generan para reducir la movilidad, toxicidad o concentración del cadmio en el producto natural de interés, para degradar, transformar o bien, inmovilizar, contaminantes ambientales, su principal ventaja radica en que es un proceso natural menos costoso y más sostenible que los métodos fisicoquímicos tradicionales. En el caso de los metales pesados, al no ser degradables sino transformables o inmovilizables, la biorremediación se enfoca en proveer dos procesos principales para su mitigación:
 - a) La biosorción y la bioacumulación, como el mecanismo de mayor eficiencia, que ocurre:

- 1) De manera pasiva cuando no requiere de energía metabólica activa para darse (biosorción), porque en este caso el metal se une a la superficie celular del microorganismo mediante fuerzas fisicoquímicas (como el intercambio iónico o la precipitación);
 - 2) De manera activa, cuando el proceso metabólico es dependiente de la energía por donde el metal es transportado activamente a través de la membrana celular y secuestrado dentro de la célula (Bioacumulación).
- b) La biotransformación y bioprecipitación, cuando mediante los microorganismos pueden alterar el estado de oxidación o solubilidad del metal (Casteblanco, 2018), todo ello a través de la producción de metabolitos como ácidos orgánicos, sulfuros o fosfatos para que el microorganismo pueda inducir a la precipitación del cadmio, lo que genera que el metal pase de tener una forma soluble y biodisponible a una forma insoluble, que no es tóxica ni inerte.

La bioinmovilización, por otro lado, según enfoca Casteblanco (2018) se considera una subcategoría de la biorremediación o mejor dicho, en una estrategia de mitigación que ataca directamente a la rizosfera para buscar más eficazmente la reducción de la biodisponibilidad de un contaminante sin que exista la necesidad de removerlo del suelo, razón por la que, en lo que refiere al cacao, la actividad agrícola de los sembradíos suele optar por esta estrategia de para “encerrar” el cadmio (Cd) y que la planta no pueda absorberlo. Así, en los cultivos de cacao el objetivo principal no está realmente en “limpiar” el suelo por completo, sino en impedir que el árbol de cacao absorba el cadmio y lo transporte al grano, punto en el cual la bioinmovilización se vuelve crítica, porque comienza a actuar en la raíz donde ocurre la absorción (Chancay et al., 2021).

La inmovilización, como se espera, es lograda mediante la aplicación de agentes biológicos o sus derivados para alterar las condiciones del suelo, lo cual puede darse a través de tres métodos:

- 1) La modificación del pH y precipitación, donde la acidificación del suelo es el factor que más aumenta la biodisponibilidad del cadmio, por lo que, los agentes de bioinmovilización trabajan para aumentar el pH local, asimismo, ciertas bacterias pueden contribuir a inmovilizar el cadmio en el suelo, evitando su acumulación en las raíces de las plantas de cacao (Cayotapa-Torres et al., 2021);
 - 2) La adsorción por enmiendas de origen biológico, donde la estructura porosa y alcalina del biocarbón es el medio perfecto para la bioinmovilización al aumentar la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) y el pH del suelo, creando sitios de alta afinidad donde el Cd queda fuertemente absorbido, reduciendo su biodisponibilidad; y
 - 3) El bloqueo por micorrizas arbusculares, que actúan como una esponja en la rizosfera.
- 3) **Fitorremediación:** Es una disciplina biotecnológica que utiliza plantas vasculares (superiores) y organismos asociados (rizosfera) que contribuyen a la reducción de concentración de los efectos nocivos provenientes de contaminantes ambientales, entre ellos, el Cadmio (Cd) que se ubica en los suelos y aguas. Esta estrategia es una alternativa ecológica de bajo costo en comparación a las técnicas fisicoquímicas tradicionales, lo cual capitaliza la capacidad natural de ciertas especies vegetales para interactuar con los contaminantes (Castebianco, 2018), así en lo que respecta al contexto de los metales pesados en los suelos de cacao, las estrategias principales son la Fitoextracción y la Fitoestabilización:
- a) **Fitoextracción:** Es el mecanismo más buscado para la limpieza permanente del suelo, siendo la estrategia opuesta a la bioinmovilización, pues consiste en utilizar plantas hiperacumuladoras o plantas de alta biomasa con un crecimiento rápido que son capaces de absorber grandes cantidades del metal

del suelo a través de sus raíces y translocarlo eficientemente a sus partes aéreas (hojas y tallo), así una vez que la planta ha madurado, la biomasa contaminada se cosecha y se incinera o se dispone como residuo tóxico, eliminando el Cd del ecosistema, pero de manera inherentemente lenta porque su remoción total depende de la biomasa producida y del número de ciclos de cultivo necesarios.

- b) **Fitoestabilización:** Se centra en reducir la movilidad y la biodisponibilidad del contaminante en lugar de removerlo, comenzando por la selección de plantas que retienen el Cd en la rizosfera, minimizando la lixiviación, la erosión y la dispersión por el viento, logrado a través de la precipitación, adsorción o la complejación del metal en el área de la raíz, reduciendo la exposición del cultivo principal (el cacao), según Casteblanco (2018).

Tabla 3
Comparación y Aplicabilidad

Criterio	Biorremediación (Microorganismos)	Fitorremediación
Rapidez y Duración	Es rápida en la acción de los microorganismos (días a semanas), pero puede requerir aplicaciones periódicas	Es lenta (meses a años), porque depende del ciclo de crecimiento de la planta “aspiradora”
Manejo del Cultivo de Cacao	Es compatible porque puede aplicarse como enmienda o fertilizante biológico, sin interrumpir necesariamente la producción de cacao	Es incompatible, requiere rotación o intercultivo de especies hiperacumuladores, lo que impacta la productividad
Mecanismo Dominante	Inmovilización/Biosorción. Busca bloquear el Cd en la rizosfera o en la biomasa microbiana	Extracción/Estabilización. Busca remover el metal del suelo o retenerlo en las raíces

Criterio	Biorremediación (Microorganismos)	Fitorremediación
Costo	Por lo general es más económico que la fitorremediación si se utilizan cepas nativas y subproductos	El costo es variable, en él se incluye el costo de las semillas, la siembra, el cultivo y la disposición final de la biomasa contaminada
Viabilidad en Campo	Posee una alta viabilidad con la bioinmovilización como estrategia preventiva y de mitigación continua	Su viabilidad va de media a baja en lo que respecta a la extracción directa en plantaciones establecidas, es más viable en rotación o en áreas marginales

Nota: Elaboración propia

3.2.2 Evaluación de la Calidad del Suelo y la Salud del Cultivo post-tratamiento.

La evaluación de la calidad del suelo post-tratamiento se centra en confirmar si la remediación (donde se ve la aplicación de nanoburbujas) ha alterado las propiedades químicas del suelo de manera favorable para reducir la biodisponibilidad y movilidad del cadmio (Cd), todo ello a través de un proceso integral que busca validar la efectividad de la intervención y asegurar que el cacao además de estar libre de contaminantes también prospere agrónomicamente; este proceso se despliega entonces a través de mediciones físico-químicas del suelo y análisis biológicos de la planta, centrándose en unos pocos puntos clave que resumen el éxito o el fracaso del tratamiento.

La evaluación del suelo es la primera línea de evidencia para determinar si el tratamiento ha funcionado a nivel basal, con el objetivo principal

de reducir la disponibilidad de cadmio para la planta, de modo que, el primer punto clave consiste en diferenciar las concentraciones de cadmio en el suelo, siendo insuficiente medir la concentración total del Cd, pues si se aplicó un método de inmovilización como las nanoburbujas, ese valor no cambiará, ya que el metal sigue estando presente (Cayotopa-Torres et al., 2021), por ello lo que más importa es la concentración del cadmio biodisponible para la planta o más bien, el que es extraíble, así este valor que mide la porción de Cd soluble y móvil, es el que debe mostrar una reducción drástica post-tratamiento, confirmando que la estrategia de remediación promovida por la bioinmovilización (nanoburbujas o enmiendas), ha tenido éxito al bloquear el metal (Casteblanco, 2018).

En relación a ello, además del contaminante, deben monitorearse las propiedades del suelo que controlan la movilidad del cadmio, pues la elevación del Potencial de Hidrógeno (pH) es un punto crucial durante la implicación de las estrategias, ya que el Cd es altamente móvil en suelos ácidos, razón por la que se busca que el tratamiento haya movido el pH a un rango neutro o ligeramente alcalino, que minimice la solubilidad del metal (Chancay et al, 2021). Complementariamente, la evaluación de la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) y la Materia Orgánica indica si el suelo ha mejorado su capacidad para tener y secuestrar el Cd de forma estable, siendo un indicador positivo del funcionamiento de enmiendas o de la actividad microbiana mejorada por las nanoburbujas.

Así, en cuanto a la salud y cosecha del cultivo de cacao, la evaluación de la planta valida el resultado del tratamiento en la cadena alimentaria, que es el objetivo final de la mitigación en un producto de alto comercio como este, por ello, el punto definitivo a evaluar es la Concentración de Cadmio en el grano seco, al que se le realizan diversos análisis profundos para confirmar que los niveles de metal en el producto final han descendido por debajo de los límites máximos permitidos que exige el mercado internacional, cuestión cuya efectividad se traduce directamente en estos números provocados por el tratamiento de inmovilización o remoción (Chancay et al., 2021). Las hojas, por ejemplo, son un sitio de acumulación

eficiente del metal, por lo que, una reducción en la agrupación foliar de la hoja es un indicador temprano de mitigación exitosa, pues indica que el tratamiento ha logrado reducir la absorción radicular de la planta.

Finalmente, dentro de este largo proceso se evalúan los parámetros de salud y productividad del cultivo, donde un tratamiento catalogado exitoso no es solo aquel que inmoviliza el contaminante, sino el que también ayuda a mejorar la vitalidad de la planta, lo cual deviene instintivamente del monitoreo de la absorción de Zinc (Zn) del cacao, ya que un aumento en este micronutriente demuestra que la planta está usando su defensa competitiva natural contra el cadmio: esto, junto con la medición del rendimiento y la biomasa del cultivo, ratifica que el tratamiento ha logrado aliviar el estrés generado por la toxicidad del metal, conduciendo a una producción de cacao más saludable y abundante.

3.2.3 Cuantificación de la Reducción de Metales Pesados en Almendras de Cacao.

Esta cuantificación en las almendras de cacao es el indicador base de la eficacia de cualquiera estrategia de remediación efectuada en el suelo, la planta o bien, durante todo el procesamiento de la post-cosecha, pues este análisis se encuentra principalmente centrado en el Cadmio (Cd), que es el metal pesado más móvil y problemático para la *Theobroma cacao* L, superando a menudo los límites permisibles por las regulaciones internacionales que interfieren en la actividad del mercado peruano (Jiménez, 2015), pues casi inherentemente, el cacao suele comportarse como un fitoacumulador del Cd, al transportar el metal desde la raíz hasta la almendra de cacao, siendo las hojas y las cáscaras los sitios de más alta concentración en la planta, lo que hace que cuantificar la disminución del metal sea un proceso de alta precisión analítica y de riguroso diseño experimental.

En las almendras de cacao secas la cuantificación del cadmio y otros metales requiere de metodologías de alta sensibilidad y baja detección, donde los métodos estándar más utilizados son:

- 1) La Espectrofotometría de Absorción Atómica con Horno de Grafito (GFAAS) y
- 2) La Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS),

Los cuales son instrumentos esenciales porque los límites máximo permisibles (LMPs) son bajos, y cualquier evaluación de la reducción debe ser capaz de discriminar pequeñas variaciones con alta certeza estadística (Cayotopa-Torres et al., 2021), así el éxito de la remediación se cuantifica mediante la tasa de reducción porcentual del Cd en las almendras del grupo de tratamiento en comparación a los clasificados como “grupo control” que no son tratados de la misma forma o de ninguna.

En principio, vale decir que, la dimensión de reducción de cadmio en la almendra va a depender en su mayoría de la vía de mitigación utilizada, como pueden ser:

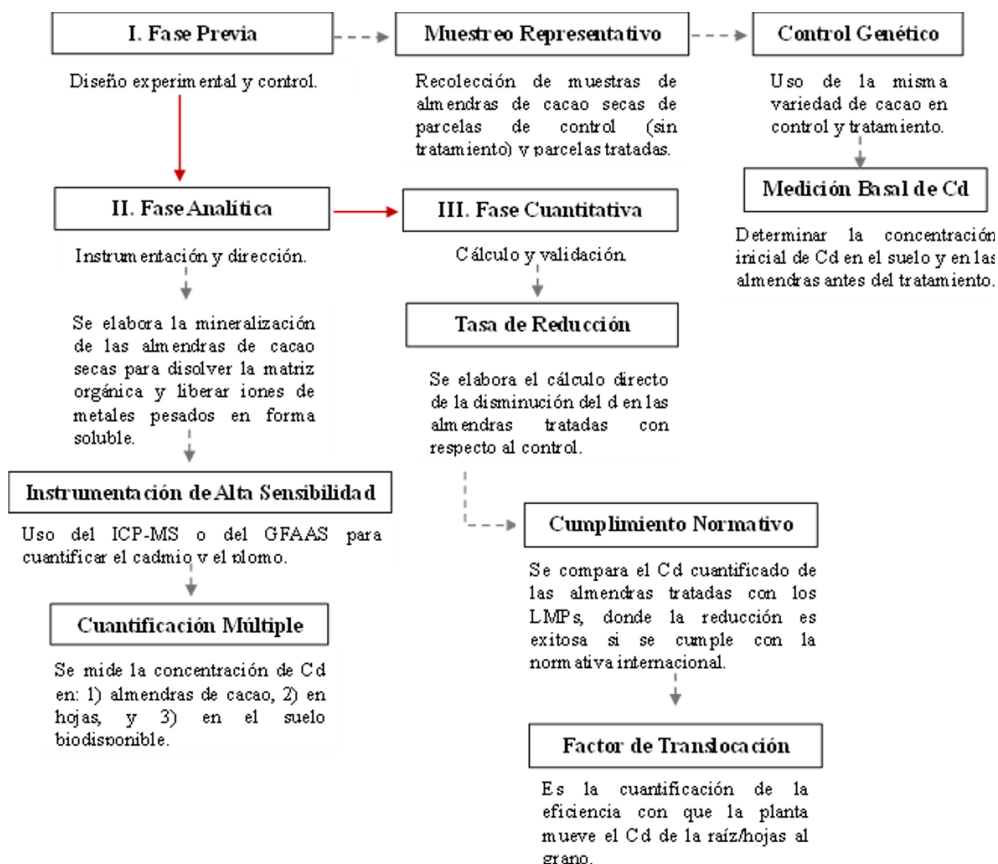
- a) **Estrategias geoquímicas.** La reducción por estrategias como la bioinmovilización o las de aspecto geoquímico, las cuales están centradas en reducir la biodisponibilidad del cadmio en el suelo, lo que es igual a una menor absorción por la raíz y a su vez, una concentración mucho más mínima de metal en la almendra, puesto que, en lo que refiere a la bioinmovilización los estudios cuantifican que su eficacia en las almendras es mucho más prometedora que otras técnicas porque la aplicación del biocarbón es bueno en reducir significativamente el contenido de cadmio en la planta, mientras que, estrategias geoquímicas como la elevación de los niveles de pH fomentan la precipitación del cadmio volviéndolo insoluble (Silva et al., 2022).

- b) **Estrategias biológicas.** También existen estrategias biológicas en el campo que muestran efecto en la verificación final del grano, donde la fórmula de efecto de los hongos y bacterias suponen una reducción que viene indirectamente del resultado dado por la bioinmovilización del metal, donde la cuantificación de la reducción en el grano resulta más variable que otras, pues dependerá enteramente de la capacidad del microorganismo para sobrevivir y continuar actuando en las difíciles condiciones del suelo donde se aplica (Cayotopa-Torres et al., 2021).
- c) **Estrategias post-cosecha.** Por último, diversos estudios han calificado la eficacia de la reducción del metal a través de estrategias post-cosecha, que, aunque no eliminan el cadmio que ya ha sido absorbido por la planta durante su crecimiento, sí pueden influir cuantificablemente en la concentración final, donde por medio de la fermentación y secado se pueden lixiviar o reducir ligeramente el contenido de los metales en la almendra, aunque por sí solo no sea capaz de cumplir con los parámetros estimados.

No obstante, así como por varios medios es posible cuantificar y calificar la reducción de metales pesados en el cacao, del mismo modo se atraviesan desafíos complejos que van desde lo metodológico hasta lo agronómico para su eficacia, comenzando por las complicaciones de la heterogeneidad del suelo, donde la distribución del metal pesado a menudo es irregular en la parcela, haciendo que los resultados cuantificados deban promediarse sobre múltiples muestras para obtener una representación real de los efectos del tratamiento, cosa que en el área agronómica, resulta complejo porque estas estrategias deben enfrentarse a la variedad natural del cacao, que es un factor genético clave que interviene y afecta la cuantificación, al ser ciertas almendras de cacao menos propensa a acumular cadmio que otras (Jiménez, 2015).

Figura 2

Proceso de Reducción de Metales Pesados en Almendras de Cacao



Nota: Elaboración propia.

3.3 Consideraciones Económicas, Ambientales y Futuras líneas de investigación

El abordaje de la mitigación de metales pesados en las almendras de cacao requiere que dentro de su proyección sean integradas dimensiones como la sostenibilidad económica y ambiental del proceso, además de apuntar a futuras áreas de investigación donde también un análisis presupuestal y sostenible es necesario para considerar una inversión que

genere resultados, cuestión que es movida principalmente por la necesidad de cumplir con las regulaciones internacionales que convierten a la eliminación del cadmio y de otros metales contaminantes en un desafío que directamente afecta la viabilidad económica de los cacao-cultores y la salud del ecosistema.

3.3.1 Análisis de costo-beneficio de la Tecnología de Nanoburbujas frente a métodos tradicionales.

La dimensión económica en la intervención de la nanotecnología en los cultivos de cacao, es trascendental para la consolidación de un mercado donde la mayoría de los productores de cacao son considerados como pequeños agricultores cuyos recursos son escasos y limitados, por lo que, a la hora de escoger y aplicar una estrategia de remediación, esta debe demostrar una clara rentabilidad y a la par, un bajo costo de implementación inicial, lo que logra que estas opciones puedan dividirse en costo-efectividad (Tabla 3).

El dilema de la contaminación por cadmio en el cacao exige esta comparación rigurosa de las tecnologías de mitigación, por lo que, el análisis de costo-beneficio es fundamental para determinar qué estrategia, entre la innovación de las nanoburbujas y los métodos tradicionales (geoquímicos/biológicos) ofrece la mayor rentabilidad y sostenibilidad a largo plazo para los productores (Chancay et al., 2021), cuestión que lleva resaltar cómo la tecnología de las nanoburbujas representan un enfoque de alta tecnología y baja disrupción del suelo, siendo su principal ventaja el hecho de que se trata de un mecanismo de acción rápida y de doble beneficio en cuanto mejora agrónomicamente la oxigenación de la planta y produce la remediación química.

Tabla 4
Clasificación de Costo-Efectividad

Clasificación de Costo-Efectividad	Estrategia de Mitigación	Mecanismo Principal	Inversión Inicial	Viabilidad Operaciones
Alto Costo - Efectividad	Encalado / Enmiendas de pH	Aumentando el pH en el suelo se provoca la precipitación química del cadmio en formas insolubles	Baja, porque los materiales son accesibles y de bajo costo	Alta, puesto que, es una práctica agrícola conocida, y requiere de monitoreo periódico del pH
	Adición de Zinc	Por su competencia iónica, el zinc compite con el cadmio por los mismos transportadores en la raíz del cacao, reduciendo la absorción del contaminante	Media-baja, el fertilizante es asequible y necesario como nutriente esencial	Alta, pues resulta compatible con la fertilización regular
Medio Costo -Efectividad	Bioinmovilización (biocarbón)	Mediante adsorción y secuestro se aumenta el pH y la Capacidad de Intercambio Cationico (CIC) fijando el cadmio de forma estable	Media, porque posee un alto costo inicial para la producción o compra del biocarbón.	Media, ya que requiere de una aplicación inicial muy grande, en contraste a sus efectos duraderos
	Genotipos de Baja Absorción	Se propaga clones de cacao genéticamente menos eficientes para transportar el cadmio al grano.	Media, porque posee un alto costo inicial en investigación y viveros especializados.	Muy alta, pues su solución es permanente y sin costo para el agricultor después de la siembra.

Clasificación de Costo- Efectividad	Estrategia de Mitigación	Mecanismo Principal	Inversión Inicial	Viabilidad Operaciones
Bajo Costo - Efectividad	Fitoextracción (Plantas hiperacumuladores)	Plantar especies que absorben grandes cantidad de cadmio del suelo para su posterior cosecha y eliminación	Baja, por el económico precio de las semillas	Mínima, porque genera pérdidas de ingresos por la interrupción del cultivo de cacao y crea residuos tóxicos
	Nanoburbujas y tecnologías hídricas avanzadas	Inmovilización acelerada, por el uso de nanoburbujas de oxígeno, que promueven la precipitación química y una mejor biota del suelo	Alta, porque su inversión en equipos generadores y sistemas de riego son significativos	Media, pues posee un bajo costo operacional, pero requiere mantenimiento técnico y energía

Nota: Elaboración propia

Sin embargo, para ser decisivos en su implementación, vale comparar cómo su costo-beneficio contrasta el de otros métodos tradicionales, normalmente de origen geoquímico, para mitigar del mismo modo metales pesados como el cadmio; de este modo, debe plantearse en principio la existencia de la mitigación geoquímica tradicional como el método estándar a utilizar por los agricultores, donde el uso de cal agrícola es implementado para elevar los niveles de pH del suelo, haciendo más favorable para los pequeños productores este tipo de estrategias que permiten una baja inversión inicial y una alta accesibilidad de los materiales, dado el bajo costo de la cal, pero sobre todo por su reducción confiable del Cd biodisponible del suelo, asegurando una inversión mínima sin mayores riesgos (Chancay et al., 2021).

De manera similar, cabe resaltar que muchas veces la intención estratégica de los productores opta por la aplicación de componentes como el sulfato de Zinc (ZnSO_4) que actúa como inhibidor competitivo del cadmio y posee un costo moderado para su uso, logrando ofrecer un beneficio no solo directo en la remediación, sino también en la nutrición posterior del cultivo sin que los costos de oportunidad sean exagerados o muy elevados, ya que esta estrategia es por completo compatible con la producción continua del cacao, donde los costos operacionales requieren únicamente de aplicaciones periódicas que mantengan los altos niveles de pH en el suelo, mientras se transportar grandes volúmenes de material.

En respuesta, la tecnología de las nanoburbujas se posiciona como un extremo opuesto del espectro económico, caracterizado principalmente por una alta inversión inicial inducida por la necesidad de adquirir e instalar en el cultivo un generador especializado y un sistema de inyección integrado al riego, lo que bien se puede considerar como una barrera persistente entre el uso de la nanotecnología y los pequeños productores de cacao. No obstante, esta tecnología posee beneficios de alto contraste en las plantaciones, puesto que, promete un significativo beneficio agronómico y ambiental que a largo plazo logra compensar y justificar su inversión, así como lo hace su costo operacional, que es relativamente bajo

en comparación a otros medios, ya que se limita al consumo energético y al mantenimiento del sistema (Cayotopa-Torres et al., 2021).

Sus beneficios se basan en una doble acción natural, pues por un lado facilita la inmovilización acelerada del Cd en la rizosfera a través de la alcalinización superficial del suelo o la generación de radicales libres, mientras que por otro, ofrece un suministro sostenido de oxígeno para las raíces, lo que ayuda a mejorar la absorción de nutrientes como el Zinc, contribuyendo a la salud general de la planta, cuestión que se traduce como un aumento cuantificable del rendimiento de la misma, con una reducción más eficiente del cadmio en la almendra de cacao, haciéndolo más limpio.

El análisis costo-beneficio para las nanoburbujas solo puede verse positivo en escenarios donde es posible amortizar la inversión inicial a gran escala o mediante modelos cooperativos auxiliados, por ello, otras opciones como la bioinmovilización con biocarbón sitúan a las nanoburbujas en un término bajo de costo-beneficio, pues el biocarbón implica un costo inicial medio derivado de su producción, pero ofrece un beneficio ambiental muy superior, al ser un subproducto de la economía circular que mejora la Capacidad de Intercambio Catiónico y la salud del suelo a largo plazo (Cayotopa-Torres et al., 2021); si a esta estrategia se le contrasta con la fitoextracción, se tiene que esta última presenta un costo de oportunidad mucho peor, aunque su costo inicial sea bajo, ya que la necesidad de detener o de rotar el cultivo con la colocación de plantas hiperacumuladoras conlleva a una pérdida directa de ingresos insostenible para los productores.

De esta forma, mientras que los métodos tradicionales geoquímicos como el uso de cal agrícola, que es indiscutiblemente la opción de mejor costo y efectividad inmediata para los pequeños productores, aunque funcional para el cumplimiento normativo, no aborda el potencial agronómico de la parcela ni ofrece mejoras sustanciales en la productividad del cultivo de cacao, como indican Chancay et al., (2021), por el contrario, la tecnología

de las nanoburbujas aunque presentan un bajo costo-efectividad inicial, dado que requiere de una alta inversión para los equipos generadores, dicho gasto representa una inversión estratégica que apuesta por la eficiencia y el rendimiento agronómico que bajo las condiciones adecuadas de financiamiento y proyección, pueden convertirse en una estrategia superior a largo plazo para la sostenibilidad integral del sembradío cacaotal.

3.3.2 Evaluación del Impacto Ambiental a largo plazo y sostenibilidad de la técnica.

La implementación de nanoburbujas tiene por propósito la mitigación de metales pesados en la agricultura, que es lo que ocurre con el Cadmio (Cd) en el cacao, razón por la que también el impacto ambiental que tiene esta intervención en el ambiente y su sostenibilidad es comparado con otras prácticas estándar y tradicionales, por ello, aunque las nanoburbujas se promocionan como una solución ambientalmente amigable y no disruptiva a la plantación, su sostenibilidad real depende de factores energético, de la periodicidad de su mantenimiento y de la no toxicidad de sus subproductos, pues la principal fortaleza ambiental de la nanotecnología radica en su capacidad para lograr la bioinmovilización química del cadmio sin tener que introducir grandes volúmenes de enmiendas en el suelo o generar residuos tóxicos contaminantes, a diferencia de otras técnicas de remediación (Huang, 2022).

En este caso, diferente de la fioextracción que produce biomasa contaminada que amerita ser tratada como un residuo peligroso, la aplicación de las nanoburbujas no generan residuos sólidos de este tipo contaminante, pues su mecanismo se basa en la transformación del contaminante in situ, donde el cadmio u otros metales pesados pasan de tener una forma soluble y fácilmente movable a una forma insoluble e inerte, fijándose químicamente a la matriz del suelo, lo que es una ganancia ambiental de mucho significado porque ello evita los costos y riesgos que están asociados con la gestión de los residuos peligrosos que otros medios

producen. Así, la sostenibilidad a largo plazo de las nanoburbujas en la rizosfera de la planta se ve relacionada con su contenido de gas, donde al inyectar las nanoburbujas de oxígeno, se logra un suministro sostenido y uniforme de oxígeno disuelto en la zona radicular, como indica Huang (2022), siendo este entorno aerobio el que optimiza la actividad de los microorganismos beneficiosos.

Este es el modo en que la nanotecnología logra contrastar con otros métodos agresivos que pueden desequilibrar aunque sea temporalmente la microflora del suelo, puesto que, en el caso de la implementación de las nanoburbujas el riesgo ambiental es mucho menor, ya que el subproducto es un gas esencial para la vida; sin embargo, para que la tecnología sea sostenible a largo plazo, la fijación del cadmio debe ser permanente, por lo que se ha teorizado que la precipitación del Cd inducida por las nanoburbujas a través de medios como el pH local o radicales libres crea formas estables (como los hidróxidos o carbonatos) que son poco probables de volver a solubilizarse a menos que el pH del suelo caiga en picada (Jiménez, 2015), por ello, la implementación continua o periódica de nanoburbujas de oxígeno puede ayudar a mantener las condiciones del suelo estables y favorables, asegurando que el contaminante de la planta permanezca inerte a lo largo del tiempo de la plantación.

Es cierto decir además que la generación de nanoburbujas requiere de generadores eléctricos (a menudo mediante cavitación o cizallamiento) para micronizar el gas, lo que indica, por evidencia, un empleo energético continuo durante la operación, lo que genera dos vertientes en su operatividad:

- 1) El impacto negativo generado cuando la energía proviene de fuentes no renovables (combustibles fósiles) haciendo que el uso de las nanoburbujas pueda contribuir en dejar una mayor huella de carbono en contraste con el encalado tradicional que no requiere energía.

- 2) La mitigación del impacto que viene dada por la sostenibilidad elevada significativamente cuando los sistemas de nanoburbujas se alimentan con energía solar fotovoltaica o fuentes de energía hidroeléctrica limpia, lo cual es una tendencia común en la agricultura moderna y un requisito, casi obligatorio, para la sostenibilidad a largo plazo de esta estrategia en regiones tropicales como las de Perú.

En este sentido, la durabilidad y el mantenimiento continuo de los generadores de nanoburbujas poseen un papel importante en lo que refiere a la sostenibilidad logística de la estrategias, pues en regiones remotas donde existen plantaciones de cacao, el acceso a las piezas de repuesto, a los técnicos calificados y el servicio especializado de quien pueda realizar su reparación (Macassi, 2017), es ciertamente limitados, de modo que, si los equipos fallan de manera frecuente o tienen una vida útil corta, la tecnología se vuelve insostenible por el alto grado de costo de reemplazo, generando un impacto ambiental que surge del desecho de equipos electrónicos sofisticados, cosa que en el caso de los métodos tradicionales, cuando se trata de la aplicación de cal o biocarbón, suele ser más sencillo porque depende de una maquinaria agrícola básica, que bajo distintos medios es posible y fácil de mantener.

En conclusión, a largo plazo la tecnología de las nanoburbujas posee suficiente potencial para ser una solución altamente sostenible, siempre que se cumpla con dos condiciones críticas, como indica López (2024):

- 3) Una fuente de energía limpia, donde la transición de estrategias tradicionales a los sistemas de generación de nanoburbujas sea alimentada por energía renovable para minimizar la huella de carbono e impactar menos negativamente el ambiente.
- 4) Un diseño robusto de generación y aplicación de nanoburbujas que sea duradero, de bajo mantenimiento y económicamente accesible para los pequeños productores, habituado para condiciones ambientales rigurosas y remotas de las plantaciones de cacao.

Así es posible asegurar que, de cumplir con tales condiciones, las nanoburbujas como tecnología innovadora, puede llegar a ofrecer un impacto ambiental netamente positivo, centrado en mejorar la salud del suelo en tanto se evita la generación de residuos tóxicos y se proporciona una herramienta eficiente, capaz de superar las limitaciones y trabas de la inmovilización pasiva de los métodos geoquímicos estándar por los que optan los pequeños productores, no obstante, es esencial atenerse al hecho de que, el alto índice de inversión inicial y la dependencia energética del sistema, sin un diseño logístico y presupuestal apropiado puede llegar a resultar inviable para la mayoría de los productores, lo que lleva a considerar que el uso de la nanotecnología tiene justificación en sus resultados duraderos y a largo plazo, antes que la inmediatez de su eficacia.

3.3.3 Perspectivas Futuras: Optimización, escalabilidad y potencial de transferencia a otros cultivos.

El uso de nanoburbujas en el sector agrícola promete enfrentar los desafíos de la escasez hídrica, la sanidad vegetal y la sostenibilidad de la producción de alimentos que cumplan con las condiciones establecidas por la normativa internacional para su comercialización, por lo que, siendo así, la nanotecnología se sustenta en la estabilidad y flotabilidad neutra de estas burbujas de aire que maximizan la transferencia de gas disuelto y la liberación de radicales al colapsar. De tal modo, las perspectivas futuras de esta tecnología linealmente se basa en tres ejes funcionales operativos:

- 1) La optimización de la aplicación de nanoburbujas en el medio agrícola, haciendo más eficiente y sostenible no solo su inversión sino su funcionalidad;
- 2) La escalabilidad del sistema implementado, donde a mayor trabajo mejor adaptabilidad, y
- 3) La transferencia a nuevos ámbitos productivos, que no se cierran únicamente a los sembradíos de cacao.

Esta optimización, como se ve dispuesta, tiene por objetivo maximizar los beneficios agronómicos de la nanotecnología, donde tal operación no puede estancarse en la sola idea de la “superoxigenación” general del cultivo contaminado por metales pesados, sino también establecer un rango óptimo de concentración y tamaño de las nanoburbujas de oxígeno para las distintas etapas fenológicas por las que cada cultivo atraviesa, tomando iniciativa desde la germinación y el desarrollo vegetativo hasta la propia floración o madurez del cacao o agro-producto (Criollo y Ochoa, 2022), nótese que la dosis ideal para un cultivo hidropónico de hoja verde, puede distar significativamente de la dosis requerida para el desarrollo radicular profundo de una almendra de cacao o de un arándano, lo que lleva entonces a personalizar el desarrollo radicular, mejorar la absorción de agua y acortar los ciclos de cosecha.

Además del oxígeno, las nanoburbujas también pueden variar en su composición, siendo que, su optimización también lleva al uso de otros gases con enorme potencial, como es el caso de las nanoburbujas compuestas por ozono (O_3) que poseen gran efectividad en la desinfección manteniéndose libre de residuos químicos en el agua de riego y el lavado de productos, gracias al poder oxidante del ozono, o también las de nitrógeno (N_2) u otros gases nobles que pueden optimizarse para controlar procesos específicos en su sistema cerrado; lo que se espera del futuro de la nanotecnología, es que los protocolos de riego fomenten un ambiente aeróbico que favorezca el crecimiento de la microbiota del suelo, lo que aumentará la resistencia de la planta a patógenos nocivos, y la dejará aprovechar de los nutrientes del suelo de forma natural (Macassi, 2017).

Por otro lado, la validación experimental y comercial temprana de la adopción de las nanoburbujas resuena en su escalabilidad, que no es otra cosa sino la capacidad comprobable que tiene para mantenerse funcional ante las altas demandas de trabajo en el campo, comenzando por la reducción del consumo energético de los generadores que con equipos más eficientes y robustos hacen que la nanotecnología sea rentable incluso en cultivos con márgenes más limitados, porque facilitan su adopción en la agricultura de

regadío a gran escala (Macassi, 2017). Esta escalabilidad es el medio para fortalecer el diseño de sistemas modulares que pretenden adaptarse con facilidad y bajo costo a la infraestructura de riego preexistencia (sea esta por goteo, aspersión u otro), por lo que, básicamente la estandarización de estos equipos, haciéndoles tratar grandes volúmenes de agua sin mayores modificaciones en su capacidad de bombeo es crucial para su adopción.

Uno de los mayores atractivos de esta tecnología es su potencial de transferencia, siendo adaptable a distintos tipos de cultivos dada su naturaleza, pudiendo ir desde cultivos básicos hasta otros más extensivos que no se cierran únicamente a cultivos como el cacao, pues el éxito de su transferencia en cultivos de alto valor en la hortofruticultura (tomates, pimientos, etc.), impulsa su traspaso a plantas como las de arroz, maíz o caña de azúcar, que poseen grande volúmenes de agua pero que a su vez atraviesa por desafíos en la calidad del suelo (Medina, 2024). Esta tecnología tiene el potencial para transferirse a cultivos en condiciones de mayor estrés hídrico o salino, pues al mejorar la aireación y reducir la compactación del suelo, las nanoburbujas pueden ayudar a la planta a mitigar los efectos negativos de la salinidad y la falta de agua, ampliando las áreas cultivables a zonas marginales.

Casi del mismo modo, es posible realizar una transferencia intersectorial y ambiental, donde la aplicación más amplia se puede hallar en la gestión de embalses, lagos y aguas de reutilización, lugares en que las nanoburbujas funcionan como una herramienta ecológica para mitigar la proliferación de algas, reducir los lodos y mejorar la calidad general del agua, lo que garantiza una fuente de riego más limpia y segura para todos los cultivos a lo largo de la cadena hídrica; igualmente, el uso de las nanoburbujas de ozono puede ser transferido al lavado y desinfección de frutas y hortalizas post-cosecha, ofreciendo una alternativa química mucho más segura para el control de patógenos superficiales y el aumento de la vida útil de los productos alimenticios tratados.

CAPÍTULO IV

REMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS POR METALES PESADOS MEDIANTE NANOBURBUJAS EN PLANTACIONES DE CACAO (THEOBROMA CACAO) EN LA REGIÓN SAN MARTÍN

4.1 Introducción

Una de las actividades económicas de mayor relevancia para muchos países tropicales, como ocurre en el caso de Perú, es el cultivo de cacao, no obstante, la sostenibilidad y sustento de los suelos en los últimos años se ha convertido en un tema controversial entre los agricultores, puesto que, la evidencia opta por demostrar que la constante degradación de los suelos ha logrado afectar la fertilidad de las zonas que antes eran utilizadas para esta actividad, razón por la que esto ha obligado al rubro a utilizar técnicas agrícolas que colaboren amigablemente con el ambiente, sin aventajar una producción mayor exigida por la alta demanda de actual de cacao o bien, de alimentos en general, a costa de la salud de los suelos, tal y como ocurre con la aparición de una amenaza latente, como lo es la contaminación del suelo por metales pesados, entre ellos, el cadmio (Cd) y el plomo (Pb), que son objeto de estudio en la presente investigación.

En este caso particular, estos metales contaminantes sufren el riesgo de acumularse dentro de los granos de cacao, siendo así un riesgo significativo para la salud del consumidor final, que puede afectar no solo la calidad del

producto sino también su comercialidad a nivel global, impactando de este modo incluso en el sector económico sostenido a base de la agronomía. Estos metales pesados, ha de saberse, provienen de fuentes antropogénicas como fertilizantes, fungicidas o actividades mineras cercanas a los cultivos, incluso pueden provenir exclusivamente de la composición geoquímica del suelo donde es plantado el cacao; la remediación y recuperación del suelo dañado compone entonces un desafío complejo, como ocurre en la región de San Martín, puesto que, los métodos que tradicionalmente se utilizan para el tratar el suelo son costosos y destruyen el ecosistema, sin contar que en su mayoría son inviables en plantaciones extensas donde las excavaciones y el confinamiento no logran resultados factibles.

De tal forma, el potencial aplicativo de las nanoburbujas de aire o de otros gases en la remediación de los suelos contraminados por metales pesados en las plantaciones de cacao de la región de San Martín centran su operatividad bajo diversos mecanismos de recuperación, como es proveer una alta concentración de oxígeno disuelto proporcionado por las nanoburbujas de aire estimulando el proceso metabólico de los microorganismos que requieren oxígeno para obtener energía, cuestión que indirectamente influye en la especiación y movilidad de los metales pesados, y que por lo tanto, más directamente, son usadas para generar la oxidación o precipitación de determinados metales, provocando una alteración en su estado de valencia que logra hacerlos menos biodisponibles para las plantas, por tanto, la actual investigación tiene por pretendido optimizar la generación, uso y dosis apropiada de las nanoburbujas en la región de San Martín, ofreciendo esta herramienta como una solución de ingeniería verde prometedora para la sostenibilidad de los cultivos de cacao.

4.2 Aspectos Metodológicos

La problemática planteada, principalmente, lleva a considerar en principio que el Perú se encuentra batallando con un constante desafío ambiental que ha trascendido al área comercial con extensión considerable,

ya que, conforme indican los estudios realizados por el Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA, 2021), Perú es considerado como un exportador global de cacao reconocido por su alta calidad, pero que al mismo tiempo se encuentra dentro de la lista de países con mayor vulnerabilidad a la contaminación por cadmio (Cd) y otros metales pesados, como lo ha dejado entrever no solo el INIA sino también otras organizaciones que han comprobado la presencia de cadmio en los suelos agrícolas más importantes del país, siendo parte de ellas la región de San Martín que es objeto de estudio en la presente investigación.

Ocurre entonces que, la contaminación por cadmio (Cd) u otros metales contaminantes resuenan urgentemente en la actividad agrícola, dado que, exceden los límites que la normativa internacional ha indicado tolerables en la producción de cacao u otros alimentos, razón que ha levantado las alarmas no solo de los productores, sino también de los exportadores de cacao en la región, puesto que, esta contaminación no puede decirse que proviene solo de fuentes externas a la tierra, sino que, por el contrario, en muchos escenarios se debe casi únicamente a las características naturales del suelo en que se siembra, más aún cuando estos suelos son ácidos y escasos de materia orgánica, lo que genera que las condiciones en que se planta el cacao promueva la absorción y disponibilidad del cadmio (Cd) absorbido a través de las raíces de las plantas, donde soluciones comunes como la aplicación de enmiendas químicas o bien, la fitorremediación, superan la capacidad de costos o son de baja eficiencia para el productor, todavía más si se trata de productores pequeños que no logran sobrellevar tales gastos.

Esta misma urgencia puede verse en la región de San Martín, al ser uno de los principales centros de producción de cacao en Perú, donde según estudios realizados por el gobierno regional y organizaciones como la Mesa Técnica del Cacao también en sus suelos se han identificado diversas y extensas zonas que contienen una alta concentración de cadmio en los suelos cultivados y en los granos resultantes de la actividad agraria, causando un gran impacto que ha afectado a la economía local, a razón

de que estas condiciones han generado la pérdida de oportunidades de exportación y con ello, la penosa disminución de ingresos que obtienen las familias agrarias, así como también ha acrecentado las dudas sobre una posible viabilidad de esta actividad a largo plazo si no son mejoradas las condiciones del cultivo (GORE San Martín, 2020).

Las soluciones de remediación actuales, disponibles para el agricultor, como la fitorremediación o la aplicación de enmiendas químicas son insuficientes a causa de sus grandes limitaciones, donde no solo su dificultad de implementación sino también sus deficientes resultados en el campo engrosan el problema para las familias productoras de cacao, quienes carecen tanto de recursos como de conocimiento técnico para abordar una correcta remediación (Paredes, 2021); por lo tanto, en este contexto, las nanoburbujas se posicionan como una alternativa innovadora, donde con burbujas sumamente pequeñas que poseen propiedades fisicoquímicas únicas y son estables en el agua, es posible paralizar u oxidar los metales pesados contaminantes mediante mecanismos como la alteración del pH local y la interacción con la materia orgánica.

Debido a lo antes expuesto, la presente investigación logra plantear la necesidad de iniciar una investigación en el impacto que tienen las nanoburbujas de aire en el proceso de remediación de suelos cacaoteros por metales pesados en las plantaciones ubicadas en San Martín, donde se impulsa un doble propósito en su análisis:

- 1) Generar conocimiento científico a futuros investigadores del área, y
- 2) Aportar una herramienta práctica que contribuya a mejorar el suelo y la producción agrícola, reivindicando al cacao peruano dentro de la competición de los mercados internacionales donde tiene presencia.

Estudios etnográficos del área agrícola, vale decir, han revelado que, aunque los productores reciben información sobre la afección de los metales pesados, a la gran mayoría le es complejo conectar con estas condiciones y afrontarlas bajo prácticas comunes en el rubro, haciendo

todavía más difícil que se adopten medidas de corrección o prevención en las zonas, razón por la que toma impulso el objeto de estudio en el presente trabajo, como una propuesta resolutive a largo plazo.

4.2.1 Formulación del Problema

¿Cuál es el efecto de las nanoburbujas en la remediación de suelos contaminados por metales pesados en plantaciones de cacao (*Theobroma cacao*) en la región de San Martín?

4.2.2 Justificación

En cuanto a su justificación, la tecnología de nanoburbujas se presenta como un método incipiente que todavía da pasos cortos pero que muestra un gran potencia en lo que respecta a la remediación de los suelos, como la técnica más amable con el área a la hora de convertir metales pesados en formas menos peligrosas y menos susceptibles de ser transportadas por el suelo a los granos de cacao, siendo esto posible gracias a la capacidad de las burbujas ultradelgadas para generar radicales libres en el suelo, impulsando así las reacciones de oxidación y reducción; no obstante, su aplicación en ambientes tropicales, como ocurre en el Perú, carece de estudios suficientes para concebir su real actividad en las plantaciones, creando la necesidad de generar nuevo conocimiento que respalde su uso (Jin et al, 2020).

Esta línea de estudio busca evaluar cuán eficientes logra ser el uso de las nanoburbujas (estén compuestas por aire, ozono u oxígeno), como una alternativa de remediación mucho más económica y ambientalmente amigable para los suelos contaminados, siendo una opción ecológica el uso de la tecnología del campo, que puede dejar atrás otros métodos físicos o químicos que aunque produzcan resultados, son más costosos y requieren de mayor conocimiento técnico en comparación. Especialmente en regiones como San Martín, como indica INIA (2021) la acumulación de cadmio (Cd) y otros metales pesados que afectan a los granos de cacao,

la presencia de estos amenaza la sostenibilidad agrícola del cultivo y directamente presiona a la economía rural, razón por la que es debido desarrollar fácilmente accesibles como el uso de nanoburbujas, las cuales no solo pueden mejorar la calidad del producto final, sino que además, al reducir los riesgos para la salud del consumidor, logra proteger el ingreso generado por la comercialización del cacao en condiciones óptimas.

4.2.3 Objetivo General

Evaluar el efecto de las nanoburbujas en la remediación de suelos contaminados por metales pesados en plantaciones de cacao (*Theobroma cacao*) en la región San Martín.

4.2.4 Objetivos Específicos

- 1) Analizar las propiedades físicas del suelo antes y después de la aplicación de nanoburbujas de aire.
- 2) Analizar las propiedades químicas del suelo antes y después de la aplicación de nanoburbujas de aire.
- 3) Analizar las propiedades biológicas del suelo antes y después de la aplicación de nanoburbujas de aire.
- 4) Comparar la eficiencia de las nanoburbujas de aire con el tiempo de aplicación en suelos cultivados con cacao

4.2.5 Hipótesis

El efecto de las nanoburbujas de aire en suelos contaminados por metales pesados en plantaciones de cacao reduce significativamente la concentración de metales pesados.

4.2.6 Variables

Tabla 5
Variables

Variable	Dimensiones	Indicadores	Escala de Medición
Variable Independiente: Nanoburbujas	Nanoburbujas de aire	Temperatura Número de burbujas en una gota Diámetro de la burbuja Presión interna	
	Nanoburbujas de oxígeno	Velocidad de ascenso Presión de aire	
	Nanoburbujas de ozono	Tiempo de tratamiento Temperatura	
Variable Dependiente: Suelos Contaminados	Parámetros físicos	Textura del suelo Humedad gravimétrica Densidad aparente y real Porosidad total	Razón - Intervalo
		Metales pesados pH	
		Conductividad eléctrica Materia orgánica Capacidad de intercambio iónico.	
		Nutrientes disponibles	
	Parámetros químicos	Biomasa microbiana Recuento de microorganismos	
		Diversidad microbiana	
		Enzimas en el suelo.	
	Parámetros biológicos en el suelo		

Nota: Elaboración propia

4.2.6 Diseño de la Investigación

El diseño del presente estudio puede clasificarse como una investigación del tipo aplicada, ya que, su objetivo está en proporcionar una solución práctica al problema de la contaminación por metales pesados en los suelos agrícolas, utilizando las nanoburbujas como la tecnología predilecta para el proceso de remediación (Hernández et al, 1991). Del mismo modo, la investigación emplea un enfoque cuantitativo, lo cual implica que el enfoque estará en la comprobación y cálculo de variables numéricas, incluyendo las concentraciones de metales pesados en el suelo, así como sus diversas propiedades físicas y químicas, haciendo su diseño experimental y comparativo a la hora de manipular la variable independiente vista en la aplicación de nanoburbujas con diferentes tiempos de exposición, evaluando a partir de ello los efectos de esta manipulación respecto a los indicadores relacionados con la contaminación por metales pesados en las plantaciones de cacao.

4.6.7 Procedimiento de Muestreo

Asimismo, en cuanto al muestreo y el área de estudio, este se realizará específicamente en las zonas de plantación agrónoma de cacao ubicadas en la región de San Martín, las cuales fueron previamente registradas e identificadas como zonas altas en presencia de metales pesados, por lo cual, fueron seleccionadas tres parcelas representativas en total, en las cuales se recogerán muestras compuestas de suelos con una profundidad de 0 a 20 cm. Para asegurar que estas muestras sean representativas del área, cada una resultará de la combinación de al menos cinco sub-muestras recolectadas en zigzag, las cuales se depositarán en bolsas de polietileno resistentes y serán rotuladas con un código de identificación, la fecha y el lugar exacto de recolección, las cuales serán transportadas al laboratorio previsto en hieleras, asegurando que su temperatura se mantenga controlada, y donde el procesamiento inicial se realizará en un plazo que no exceda a las 24 horas posteriores a su recolección.

En cuanto a la preparación del suelo, una vez que las muestras llegan al laboratorio se someten a un proceso de preparación:

- 1) El secado de muestras expuestas al ambiente, en un lugar con sombra y sin exposición directa a la luz del sol;
- 2) Tamizado y homogeneización, donde el suelo se pasará por una malla de 2 mm para tamizarlo y mezclarlo por completo, y
- 3) La distribución, donde se pesarán y se distribuirán 2.5 kg de suelo seco en recipientes de plástico, asegurando que todas las unidades experimentales reciban la misma cantidad de suelo para cada tratamiento.

Para este estudio, las nanoburbujas se generarán utilizando un equipo patentado y diseñado por el Dr. Jhonny Wilfredo Valverde Flores, el cual es capaz de disolver gases en agua a una escala nanométrica, donde el aire atmosférico será la fuente de gas utilizada para producir las nanoburbujas de aire, operando el sistema de producción bajo la funcionalidad de una entrada de gas, una entrada de agua limpia, y una salida para el flujo de agua enriquecida con las nanoburbujas.

La administración de nanoburbujas a las unidades experimentales previamente preparadas se realizará mediante un sistema de goteo que estará conectado a la bomba del reactor generador de nanoburbujas, para lo cual se establecerán tres intervalos de aplicación distintos en las muestras cada 30, 45 y 60 minutos, con una duración de 20 segundos por aplicación a cada unidad. El experimento completo se desarrollará conforme indica el proyecto, durante el lapso total de 3 días consecutivos, con ciclos de aplicación de 5 horas diarias ya definidas, donde el “grupo control” no recibirá el tratamiento con nanoburbujas, para esto, se utilizará entonces un Diseño Completamente Aleatorizado (DCA) que incluirá un total de cuatro tratamientos aplicados en cuatro repeticiones por cada uno, que resultará en unas 20 unidades experimentales, distribuidas por azar en

condiciones de temperatura, iluminación y humedad similares entre todas, expresadas en la Tabla 6.

Tabla 6
Procedimiento de Muestreo

Tratamiento	Descripción	Frecuencia de Aplicación	Repeticiones
T0	Control (sin nanoburbujas)	-	5
T1	Nanoburbujas cada 30 minutos	30 min	5
T2	Nanoburbujas cada 45 minutos	45 min	5
T3	Nanoburbujas cada 60 minutos	60 min	5

Nota: Elaboración propia

Para determinar la eficiencia comparativa de los tratamientos, generalmente es utilizado el porcentaje para medir la capacidad de mejora de un tratamiento respecto al control, la cual se expresa de la siguiente forma:

$$\text{Eficiencia relativa (\%)} = \left(\frac{C_{\text{inicial}} - C_{\text{final}}}{C_{\text{inicial}}} \right) \times 100$$

Pero para compararlo contra el control lo que necesitas es:

$$\text{Eficiencia comparativa (\%)} = \left(\frac{R_T - R_{T0}}{R_{T0}} \right) \times 100$$

Donde:

R_T = Reducción lograda por el tratamiento (T1, T2, T3)

R_{T0} = Reducción (o cambio) en el control

4.2.8 Técnicas de Recolección de Datos

Tabla 7

Técnicas de Recolección de Datos

Parámetro	Técnica de recolección	Instrumento / Método	Frecuencia
Físicos del suelo			
Textura del suelo	Análisis mecánico	Método del hidrómetro o tamizado	Inicial
Humedad gravimétrica	Secado de muestra	Balanza de precisión, estufa a 105 °C	Inicio, mitad, fin
Densidad aparente	Método del cilindro o clod	Cilindro de acero, balanza, estufa	Inicial y final
Densidad real	Picnómetro o método del helio	Pícnometro, balanza	Inicial
Porosidad total	Cálculo indirecto	Porosidad = $1 - (\text{Densidad aparente} / \text{Densidad real})$	Derivado del anterior
Químicos del suelo			
Metales pesados (Cd, Pb, As)	Digestión ácida + análisis instrumental	Espectrofotómetro de absorción atómica (AAS) o ICP-MS	Inicio, mitad, final
pH del suelo	Lectura directa	Potenciómetro digital	Inicial y final
Conductividad eléctrica	Medición en extracto 1:2.5	Conductímetro	

Parámetro	Técnica de recolección	Instrumento / Método	Frecuencia
Químicos del suelo			
Materia orgánica	Oxidación húmeda o método de Walkley-Black	Reactivos químicos, balanza analítica	Inicial y final
Capacidad de intercambio catiónico	Intercambio con acetato de amonio	Espectrofotómetro / titulador automático	
Nutrientes disponibles (N, P, K, etc.)	Extracción química y análisis colorimétrico o AAS	Kits de análisis, espectrofotómetro, conductímetro	
Biológicos del suelo			
Biomasa microbiana	Fumigación-extracción	Método de fumigación con cloroformo y extracción con K ₂ SO ₄	Inicial y final
Recuento de microorganismos	Cultivo en medios selectivos	Placas Petri, estufa de cultivo, cámara de conteo	
Diversidad microbiana	PCR y secuenciación (opcional)	Extracción de ADN, electroforesis, bioinformática	
Actividad enzimática del suelo	Ensayo colorimétrico (ureasa, fosfatasa, etc.)	Kits enzimáticos, espectrofotómetro	

Nota: Elaboración propia

4.2.9 Técnicas Estadísticas o de Análisis de Información

Los datos experimentales serán procesados mediante un Análisis de Varianza (ANOVA), seleccionado específicamente para adaptarse al

diseño de bloques utilizado en el estudio, razón por la que, para identificar si existen diferencias que estadísticamente sean consideradas significativas entre los efectos de los distintos tratamientos de nanoburbujas (dada la diferencia de intervalos en su aplicación) se aplicará una prueba de comparación de medidas, como la prueba de Tukey o una alternativa apropiada; adicionalmente, se realizarán análisis de correlación, donde el objetivo de los mismos será comprender y cuantificar la relación que existe entre las diferentes concentraciones de metales que se midan en el suelo.

4.3 Hallazgos y Discusión

Para el desarrollo del presente proyecto experimental que involucra la aplicación de nanotecnología emergente, como son las nanoburbujas en el territorio agrícola del Perú que posee un alto contenido de metales pesados, especialmente en cultivos de cacao, se requiere de una gran consideración sobre los aspectos éticos, regulatorios y administrativos bajo los cuales se trazan las líneas de actividad de la investigación, entendiéndolos todos desde un enfoque en que se destaca la forma en que suman criterio y veracidad al estudio, conforme podrá verse en lo siguiente:

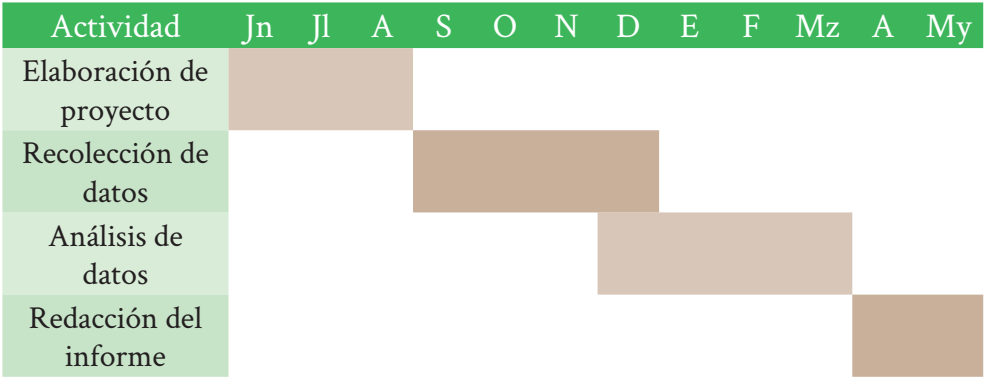
En cuanto al aspecto ético, este no puede girar en torno a otra cosa sino a la responsabilidad científica y el impacto socio-ambiental al que también se ciñe la investigación, comprendiendo que, en el caso de San Martín, donde el proyecto involucra parcelas de agricultores locales, resulta necesario del consentimiento libre, previo e informado públicamente a los productores del cacao, asegurando su total comprensión con el objetivo, la metodología, y los posibles riesgos y beneficios que se esperan abordar, al garantizarles una mejora en la sostenibilidad agrícola, mientras se evalúan a su vez los posibles efectos no deseados de las nanoburbujas o subproductos en la microbiota del suelo, interviniendo e impactando mínimamente al ambiente, haciendo accesibles y equitativos los beneficios de esta tecnología para los pequeños agricultores de la región.

Asimismo, el proyecto debe adherirse a normativas ya existentes de nanorremediación, siendo proactivo en la gestión de los riesgos, por lo que, en el desarrollo de la investigación deben reportarse los resultados que cumplan con los parámetros máximos de metales pesados permitidos en los granos de cacao para la exportación, según la normativa internacional y nacional; en relación a ello, si bien las nanoburbujas de aire son consideradas como una intervención de baja toxicidad ambiental, el proyecto debe contar con la autorización pertinente de las entidades de control de insumos agrícolas o ambientales de Perú (SENASA o MINAM), para asegurar que la tecnología utilizada no sea clasificada como un agente químico no aprobado o un nanomaterial de riesgo para el suelo.

Por último, en cuanto a los aspectos administrativos, estos aseguran la viabilidad, transparencia y gestión eficiente de los recursos, puesto que, se requiere de una planificación rigurosa del presupuesto para cubrir los costos de la tecnología (generador de nanoburbujas), los insumos (el agua, gases, etc), los análisis de laboratorio (no solo respecto a las variables numéricas, sino también a la concentración de metales en el cacao), y la logística de transporte de muestras, hieleras y otros, debiendo ser entre tanto, una investigación económicamente viable, del mismo modo en que el proyecto debe establecer un plan claro para la transferencia de la tecnología a los pequeños productores, buscando que sea una herramienta práctica y accesible para ellos, además de definir la propiedad intelectual sobre el conocimiento generado a partir de la aplicación del equipo patentado en suelos de cacao, para proteger tanto a los investigadores como a la entidad financiadora.

En lo que respecta a los recursos y financiamiento directo de la investigación, la autora de la misma asumirá en su totalidad los gastos del presente proyecto, y se considerarán también el equipo de laboratorio prestado por la Universidad Nacional de San Martín para la ejecución de la presente tesis.

Tabla 8
Cronograma de Trabajo



Nota: Elaboración propia

Tabla 9
Presupuesto

Partida	Código MEF	Descripción	Cantidad	Valor	
				Unitario (S/)	Total (S/)
1	2.3.1.13	Reactivos para análisis de metales pesados (digestión ácida, AAS)	1 lote	1,800	1,800
2		Reactivos para determinación de nutrientes (N, P, K)		900	900
3		Reactivos para análisis de pH, CE, MO y CIC		500	500
4		Reactivos para enzimas antioxidantes (SOD, CAT, POD)		1,200	1,200
5		Medios de cultivo para bacterias del suelo (UFC/g)	5 cajas	80	400

Partida	Código MEF	Descripción	Cantidad	Valor	
				Unitario (S/)	Total (S/)
6	2.3.1.13	Kits para clorofila foliar o medidor SPAD	1 equipo	1,500	1,500
7		Vidriería, balanza, filtros, otros consumibles	1 lote	800	800
8	2.3.2.7	Transporte para toma de muestras (campo-lab-campo)	3 salidas	500	1,500
9	2.3.2.4	Eliminación de residuos de laboratorio y limpieza	1 servicio	600	600
10	2.6.3.2	Alquiler o adquisición parcial de espectrofotómetro AAS o ICP	1 uso	5,000	5,000
11	2.3.1.14	Gas acetileno y oxígeno para AAS	2 balones	300	600
12	2.3.1.13	Material para análisis físicos (textura, humedad, densidad, porosidad)	1 lote	700	700
13	2.3.2.7	Envío de muestras al laboratorio externo (verificación metales)	10 muestras	150	1,500
Total					16,500

Nota: Elaboración propia

4.4 Conclusiones y recomendaciones

La investigación logró anticipar resultados positivos en tres áreas principales tras la aplicación de nanoburbujas en suelos contaminados con

metales pesados, de lo cual se espera que a nivel de impacto químico y físico en el suelo, el tratamiento con nanoburbujas produzca una disminución significativa en la concentración de estos metales en los sembradíos de cacao, lo que bien puede traducirse en un aumento del contenido de materia orgánica en los suelos donde se desarrolla esta actividad agrícola, así como una mayor capacidad en la retención de nutrientes y una estabilidad estructural que se ve reflejada en la porosidad y densidad aparente del suelo, es decir, en una composición más suelta de este. A su vez, logra pronosticarse un incremento en la actividad microbiana beneficiosa para el suelo por medio de un aumento en la población microbiana de la plantación y, por supuesto, una mayor actividad de enzimas clave como signo de recuperación en la calidad biológica del suelo.

Del mismo modo, se espera que con ello las plantas de cacao puedan crecer en suelos tratados con nanoburbujas y consigan exhibir mejores indicadores de salud fisiológica, lo que incluye no solo un contenido superior de clorofilia como síntoma de una mejor eficiencia fotosintética, sino también un aumento en la labor antioxidante de determinadas enzimas en la planta, que como se mencionó, sugieren que las plantas están saludables, porque logran desarrollar mejor capacidad para defenderse y subsistir tras la mitigación del estrés celular que les producía la presencia u absorción de los metales pesados; confirmado esto, conjunto a las hipótesis de la investigación, es posible concluir que la aplicación de las nanoburbujas como una herramienta de ingeniería ambiental es altamente efectiva para la movilización de metales pesados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alexander, M. (1994). *Biodegradation and Bioremediation*. San Diego: Academic Press Inc.

Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (2005). *Agroecology and the search for a truly sustainable agriculture*. United Nations Environment Programme.

Arias, J. (2021). *Diseño y Metodología de la Investigación*. https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w26022w/Arias_S2.pdf

Bernal, M., Clemente, R., Vazquez, S., y Walker, D. (2007). Aplicación de la fitorremediación a los suelos contaminados por metales pesados en Aznalcóllar. *Ecosistemas*, 16(2), 1-14.

Boru, G;Vantoai, T.;Alves, J.;Hua, D. and Knee, M. (2003). Responses of Soybean to Oxygen Deficiency and Elevated Root-zone Carbon Dioxide Concentration. *Annals of Botany*, 91,447-453.

Carazo, G. N. (2015). *Oxifertirrigación en cultivo sin suelo de rosa para flor cortada (Rosa sp.) y pimiento (Capsicum annum L.): efectos en desarrollo y producción*. Tesis Doctoral. Lleida. Lleida, España.

- Carpena, R., & Bernal, M. (2007). Claves de la fitorremediación: Fitotecnologías para la recuperación de suelos. *Revista científica y técnica de ecología y medio ambiente*.
- Castañeda-Méndez, A., López, B., & Rodríguez, C. (2025). Evaluación de la Biodisponibilidad de Metales Pesados en Suelos Agrícolas de la Región Andina. *Revista de Contaminación Ambiental y Salud*, 15(2), 45-60.
- Castebianco, J. (2018). Técnicas de Remediación de Metales Pesados con Potencial Aplicación en el Cultivo de Cacao. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. <https://doi.org/10.17163/lgr.n27.2018.02>
- Cayotopa-Torres et al. (2021). *Técnicas para Mitigar y Reducir el Cadmio en Theobroma Cacao L.: Una revisión. Agroindustrial Science*.
- Ceglowski, M. & Schroeder, G. (2015). Remoción de metales pesados por métodos fisicoquímicos presentes en agua proveniente de una industria minera. *Revista Sistemas Ambientales*, 5(1), 27-40.
- Chancay Alcívar, L. F., Delgado Demera, M., & Salas Macías, C. A. (2022). Cadmio en el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) y sus efectos ambientales. *La Técnica. Revista De Las Agrociencias*. ISSN 2477-8982, 91–110. https://doi.org/10.33936/la_tecnica.v0i0.4324
- Charrupi, N; Martínez, D. (2017). *Estudio ambiental del cadmio y su relación con suelos destinados al cultivo de cacao en los departamentos de Arauca y Nariño (en línea)*. Bogotá - Colombia, Universidad de La Salle - Ciencia Unisalle. 132 p. Consultado 6 mar. 2021. https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1717&context=ing_ambiental_sanitaria

- Criollo, K. y Ochoa K. (2022). Las Nanoburbujas: Tecnología que cambia al Mundo. *Revista Juventud y Ciencia Solidaria: En el camino de la Investigación*. https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/22457/1/Rev_Juv_Cie_Sol_1017.pdf
- Delgadillo-López, A. E., González-Ramírez, C. A., Prieto-García, F., Villagómez-Ibarra, J. R., y Acevedo-Sandoval, O. (2011). Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14(2), 597-612.
- Fernández, X. (2021). *Nuevas Propuestas de Remediación de Suelos Contaminados en el Principado de Asturias*. https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/60645/TFM_XurdeFernandezAlvarez.pdf?sequence=4&isAllowed=y
- Fomina, M., & Gadd, G. M. (2014). *Biosorption: current perspectives on concept, definition and application*. Bioresource Technology. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.102>
- Foudas, A. Kosheleva, R. Favvas, E. Kostoglou M. & Mitropoulos, A. (2023). *Fundamentos y Aplicaciones de las Nanoburbujas: Una Revisión*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S026387622200627X>
- Fowler, B., Choe, S., Jones, R., Costa, M., & Chen, C. (2022). *Manual sobre toxicología de los 35 metales (quinta edición)*. Academic Press, 2, 41-89
- Fundación Chile. (2019). *Manual de tecnologías de remediación de sitios contaminados*. https://fch.cl/wp-content/uploads/2019/10/manual-de-tecnologias-de-remediacion-de-sitios-contaminados_baja-1.pdf

- Galán, H. E.; Romero, B. A. (2008). *Contaminación de Suelos por Metales Pesados. Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola*. Facultad de Química. Universidad de Sevilla. Sevilla, España. 13 p.
- Ghosh, U., Ramakrishna, K. (2009). Heavy Metal Contamination and Its Remediation. En *Environmental Management*. Springer.
- Gore San Martín. (2020). *Informe Técnico sobre la Presencia de Cadmio en Suelos de Productores de Cacao en la región San Martín*. Gobierno Regional de San Martín.
- Gracia RC, Snodgrass WR. (2007). *Lead toxicity and chelation therapy*. American Journal of Health-System-Pharmacy.
- Hernández, R. Fernández, C. & Baptista, P. (1991). *Metodología de la Investigación*. [Archivo PDF] https://www.uv.mx/personal/cbustamante/files/2011/06/metodologia-de-la-investigaci%C3%83%C2%B3n_sampieri.pdf
- Huang, M. Hong, N. Wu, Y. He, C. Wang, K. Yang, S. Kurokawa, H. Matsui, H. Dodbiba, G. & Fujita, T. (2022). *Different Nanobubbles Mitigate Cadmium Toxicity and Accumulation of Rice (Oryza sativa L.) Seedlings in Hydroponic Cultures*. Chemosphere.
- Huang, J., Peng, L., Zeng, G., Li, X., Zhao, Y., Liu, L, Chai, Q. (2014). *Evaluation of micellar enhanced ultrafiltration for removing methylene blue and cadmium ion simultaneously with mixed surfactants*. Separation and Purification Technology.
- Ibáñez, J.J. (2008). *Poros del suelo: Tamaños y funciones*. Blogs madri+d Un Universo invisible bajo nuestros pies. <https://www.madrimasd.org/blogs/universo/2007/03/20/61764>

- Instituto Nacional Investigación Agraria. (2021). *Diagnóstico del Contenido de Cadmio en Suelos y Granos de Cacao en Regiones Productoras del Perú*. Instituto Nacional de Innovación Agraria. <https://www.inia.gob.pe>
- Jiménez, D. (2015). Contenido máximo de cadmio en productos de cacao y chocolate (Reglamento UE 488/2014). *Revista Española de Nutrición Humana y Dietética*.
- Jin-Liu, L. Xue, Y. Yan-Ming, T. & Xue-Qing, C. (2020). *Effects of Ozone Nanobubbles on Heavy Metal Removal from Contaminated Water and Soil. Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07187-7>
- Jun-Lei, H. Wang, W. Liang, Y. Xiao, Z. Pan, H. Wang, L. & Du, M. (2023). *Efecto del Riego con Nanoburbujas en el Rendimiento y el Potencial de Calentamiento de los Gases de Efecto Invernadero de los Tomates de Invernadero*. [Archivo PDF] <https://www.mdpi.com/2073-4395/13/12/2917>
- Karn B., T, Kuiken, M. Otto. 2009. *Environ. Health Perspectives*, Doi:10.1289/ehp0900793.
- Lahmod, N. & Altaee, R. *Intelligent, Nano-fertilizers: A New Technology for Improvement Nutrient Use Efficiency*. https://www.researchgate.net/publication/350990328_Intelligent_Nano-fertilizers_A_New_Technology_for_Improvement_Nutrient_Use_Efficiency_Article_Review
- Liao, C. T. and Lin, C. H. (2001). Physiological adaptation of crop plants to flooding stress. *Proceedings of the National Science Council, Republic of China. Part B, Life sciences*, 25(3):148-157.

- Liu, H., Zhang, G., Chen, Y., Yu, X., & Li, R. (2020). Enhancing plant growth and health by application of nanobubble water: A review. *Science of The Total Environment*, 717, 137021.
- Liu, J., Xu, J., Fan, Y., Song, Y., Zeng, J., & Li, L. (2024). Multiple-pathway exposure risks and driving factors of heavy metals in agricultural soil and crops near a metal smelting area. *Journal of Cleaner Production*, 459, 142523. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142523>
- Lloyd, J. R., and Macaskie, L. E. (2000). *Bioremediation of Radionuclide-Containing Wastewaters*. En: Lovley, D. R., (Ed.), *Environmental Microbe-Metal Interactions*. American Society for Microbiology, Washington, pp. 277-327.
- Lopez, J. (2024). *Aplicaciones de las Nanoburbujas en la Productividad, Calidad y Sostenibilidad Agrícola: Un Estudio Bibliométrico*. <http://repositorio.unemi.edu.ec/bitstream/123456789/7418/1/Jocelyne%20Vanessa%20L%C3%B3pez%20Almeida.pdf>
- Lopez, J. (2024). *Aplicaciones de las Nanoburbujas en la Productividad, Calidad y Sostenibilidad Agrícola: Un Estudio Bibliométrico*. [Archivo PDF] <http://repositorio.unemi.edu.ec/bitstream/123456789/7418/1/Jocelyne%20Vanessa%20L%C3%B3pez%20Almeida.pdf>
- Macassi, G. (2017), *Comportamiento en el Sistema de Nanoburbujeo para Reducir los Niveles de Contaminación de Aguas Residuales Domesticas de la Provincia. Concepción*. [Archivo PDF] <https://repositorio.uncp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/c77c7ca4-2223-4e80-bf23-6253a6199274/content>
- Macías, F. (1993). *Contaminación de Suelos: Algunos Hechos y Perspectivas*. En: Ortiz Silla, R. (Ed.), *Problemática Geoambiental y Desarrollo*, Tomo I,

pp. 53-74. V Reunión Nacional de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio. Murcia.

Medina, G. (2024). *Efecto de las Nanoburbujas Producidas por Electrólisis en la Productividad y Calidad de los Cultivos de Arroz: Una Perspectiva hacia la Mejora Sostenible de la Agricultura*. <https://www.studocu.com/ec/document/universidad-estatal-de-milagro/biotecnologia-ambiental/ensayo-academico-componente-practico-delexamen-complexivo-galo-medina/104268262>

Méndez et al. (2024). *Procesos de Eliminación de Metales Pesado*. Plata: Puerto Madero Editorial. doi:<https://doi.org/10.55204/pmea.88>

Méndez Zambrano P. V., Flores Orozco A. P., Melendres Medina E. M., Tierra Pérez L. P. (2024). *Procesos de Eliminación de Metales Pesados*. 1era Ed. Puerto Madera Editorial. ISBN: 978-631-6557-38-4.

Meter, A., Atkinson, R. J., & 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.

Meza Pérez, E., & Geissert Kientz, D. (2011). Estructura, agregación y porosidad en suelos forestales y cultivados de origen volcánico del Cofre De Perote, Veracruz, México. *Foresta Veracruzana*, 13(2), 27-34. (Disponible en el portal de Redalyc: <https://www.redalyc.org/pdf/497/49750209.pdf>)

Mite, F., Carrillo, M., y Durango, W. (2010). *Avances del monitoreo de Presencia de cadmio en almendras de cacao, suelo y agua en Ecuador*. XII Congreso Ecuatoriano de La Ciencia Del Suelo XII Congreso Ecuatoriano de La Ciencia Del Suelo, 17-19.

- Moleaer. (2023). *La Importancia de la Estructura del Suelo para la Resiliencia de las Plantas*. Recuperado de: <https://www.moleaer.com/hubfs/Moleaer%20-%20Nanoburbujas%20Suelo%20Ebook%20-%20Berries%20-%20Web.pdf?hsLang=es-es>
- Morard, P.; Lacoste, L. and Silvestre, J. (1995). *Effect of oxygen deficiency on uptake of water and mineral nutrients by tomato plants in soilless culture*. J. Plant Nutr. 23:1063-1078.
- Morishita, R., Onishi, A., Oya, M., Karashima, H., Mori, M., Kawatani, Y., Kamei, N., & Takeda-Morishita, M. (2024). *The Impact of Nanobubble Gases in Enhancing Soil Moisture, Nutrient Uptake Efficiency and Plant Growth: A Review*. 16(21)
- Mulligan, C.N., Yong, R. N., and Gibbs, B. F. (2001). Surfactant-enhanced remediation of contaminated soil: a review. *Engineering Geology*, 60: 371-380.
- Napte, N. & Biradar, S. (2024). *Nanobubble Technology: The Next Frontier in Agriculture*. https://www.researchgate.net/publication/387088792_Nanobub
- Oliva-Cruz, M., Salazar Hinostroza, J. M., Mendoza Galo, J. A., Arévalo Payahua, L. D., & Meza Pérez, G. (2021). Nano fertirrigación de cacao en campo incluyendo análisis de eficiencia de aplicación del sistema. *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable*, 3(2), 1-13. <https://doi.org/10.25127/aps.20213.820>.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, FAO. (2021). *Estructura del suelo*. <http://www.fao.org/tempref/FI/>

CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s07.
htm#top

- Osuna Ceja, E. S., Figueroa Sandoval, B., Oleschko, K., Flores Delgadillo, M. de L., Martínez Menes, M. R., & González Cossío, F. V. (2006). Efecto de la estructura del suelo sobre el desarrollo radical del maíz con dos sistemas de labranza. *Agrociencia*, 40(1), 1-11.
- Pandit, A. B., & Sripati, N. (2016). Aqueous Dispersions of Nanobubbles: Generation, Properties and Features. *Minerals Engineering*, 94, 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.05.008>
- Paredes, D. (2021). *Conocimiento y prácticas agrícolas frente al cadmio en zonas cacaoteras del Perú*. Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana (IIAP).
- Parmar, R. and Majumder, S. K. (2013). Microbubble generation and microbubble-aided transport process intensification-A state-of-the-art report. *Chemical Engineering and Processing*, Vol. 64, pp. 79–97, DOI: 10.1016/j.cep.2012.12.002.
- Pérez, J. (2020). *La degradación de los suelos: contaminación por cadmio*. Ciencia y Tecnología. <https://www.revistalacomuna.com/ciencia-y-tecnologia/la-degradacion-de-los-sueloscontaminacion-por-cadmio/>
- Pintado Paltán, K. E. (2018). *Comparación de la biosorción y desorción de metales pesados mediante el uso de marlo de maíz (Zea mays) en aguas contaminadas*. [Tesis de Grado]. Universidad Politécnica Salesiana. Cuenca, Ecuador. Consultado en dspace.ups.edu.ec.

- Porterfield, D. M. and Musgrave, M. E. (1998). *The tropic response of plant root to oxygen: oxitropism in Pisum Sativum L.* Planta. 206:1-6.
- Praveen, K., Amain, J., Shruti, D. (2012). Micro y Agua Nanobubble, *International Journal of Engineering Science and Technology* (ijest), vol. 4, núm.
- Revilla Flores, E. M. (2021). Especies Reactivas De Oxígeno, Importancia E Implicación Patológica. *Revista Científica Ciencia Médica*, 24(2), 125-132. <https://doi.org/10.51581/rccm.v24i2.400>
- Reyes, Y. C.; Vergara, I.; Torres, O. E.; Díaz, M.; González, E. E. (2016). Contaminación por Metales Pesados: Implicaciones en la Salud, Ambiente y Seguridad Alimentaria. *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, Vol. 16 N° 2, pp. 66-77.
- Rodríguez-Eugenio, N., McLaughlin, M. y Pennock, D. (2019). *La contaminación del suelo: una realidad oculta*. Roma, FAO.
- Romero R. Jairo, (2009). *Calidad de Agua*. Tercera Edición, Escuela Colombiana de Ingeniería, p. 54,55.
- Santos Ruiz, A. (1959). *El Fenómeno De Quelación En La Bioquímica De Los Oligoelementos*. <https://www.ranf.com/wp-content/uploads/academicos/ina/1959.pdf>
- Silva, V. Silva A.S. & Reis, M. (2022). *Uso de Biocarbón Derivado de la Corteza de Theobroma Cacao L. para Reducir el Contenido de Cadmio en Cultivos*. Revista Brasileña de Ingeniería Agrícola y Ambiental.
- Sparks, D. L. (2003). *Environmental Soil Chemistry* (2nd ed.). Academic Press.

- Suslow V. Trevor. (2004). *Oxidation-Reduction Potential (ORP) for Water Disinfection Monitoring, Control, and Documentation, Department of Vegetable Crops, University of California, Davis*. Publication 8149, 2004. p. 1-3
- Van Dongen,T. J and Licausi,F. 2015. Oxygen sensing and signaling. *Ann. Rev. Plant Biol.* 66:345-36
- Volke Sepúlveda, T., Velasco Trejo, J., & De La Rosa Pérez, D. (2005). *Suelos contaminados por metales y metaloides: Muestreo y alternativas para su remediación. México D. F., México: Instituto Nacional de ecología.*
- Wang, C. C., Li, M. Y., Yan, C. A., Tian, W., Deng, Z. H., Wang, Z. X., y Xiang, P. (2023). Heavy metal (loid)s in agricultural soil from main grain production regions of China: bioaccessibility and health risks to humans. *Science of The Total Environment*, 858, 159819. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.1598191>
- Wu, P., Wang, J., Guo, Z., Cheng, Y., y Wu, J. (2024). Heavy metals and bacterial community determine resistance gene profiles in agricultural soils around mining area. *Applied Soil Ecology*, 202, 105581. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.1055811>
- Zhou, W., Yu, R., Guo, F., Shen, C., Liu, Y. & Huang, Y. (2024). Source apportionment and risk assessment of soil heavy metals in the Huangshui River Basin using a hybrid model. *Ecological Indicators*, 160, 111906. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111906>



EDITORIAL
NAVEGANTE

En la obra *Nanoburbujas de Aire y la Remediación de Suelos Contaminados por Metales Pesados en Plantaciones de Cacao*, los autores Ana Noemi Sandoval, José Bladimir Sánchez y Ludwig Nicolás Villanueva presentan una investigación integral sobre una de las crisis agroambientales más urgentes: la contaminación por cadmio (Cd) y otros metales pesados en los cultivos de cacao.

El libro articula meticulosamente la nanotecnología como una solución de vanguardia con un potente doble mecanismo de acción. Por un lado, detalla cómo la "superoxigenación" del agua de riego mediante nanoburbujas optimiza la fisiología del cultivo, mejorando la sanidad de la raíz y la absorción de nutrientes.

Por otro lado, y de forma crucial, la obra explora los principios fisicoquímicos que permiten a las nanoburbujas actuar como un agente de remediación in situ, alterando el potencial de óxido-reducción (ORP) del suelo para facilitar la desorción e inmovilización de los contaminantes, reduciendo así su biodisponibilidad.

Al culminar con un diseño metodológico específico aplicado a la problemática en la región de San Martín, el texto se consolida como una guía esencial que conecta la teoría científica fundamental con una aplicación práctica y sostenible.



EDITORIAL
NAVEGANTE