

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



**ADSORCIÓN DE CADMIO EN EL SUELO APLICANDO PECTINA DE
CÁSCARA DE *Musa paradisiaca* L. (var. Bellaco) A NIVEL DE
LABORATORIO**

Tesis

Para optar el título de:

INGENIERO AMBIENTAL

PRESENTADO POR:

ARTETA MEDRANO NELL GIOVANNA

Tingo María – Perú.

2023



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

Tingo María – Perú



FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N°019-2023-FRNR-UNAS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 16 de marzo de 2023, a horas 11:00 a.m. de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la Tesis titulada:

“ADSORCIÓN DE CADMIO EN EL SUELO APLICANDO PECTINA DE CÁSCARA DE *Musa paradisiaca* L. (var. Bellaco) A NIVEL DE LABORATORIO”

Presentado por el Bachiller: **ARTETA MEDRANO, Nell Giovanna**, después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de “**MUY BUENO**”

En consecuencia, el sustentante queda apto para optar el Título Profesional de **INGENIERO AMBIENTAL** que será aprobado por el Consejo de Facultad, tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título correspondiente.

Tingo María, 27 de marzo de 2023

Ing. M.Sc. **JOSE DOLORES LEVANO CRISOSTOMO** Ing. M.Sc. **FRANKLIN DIONISIO MONTALVO**
PRESIDENTE MIEMBRO

Blgo. **CESAR AUGUSTO GOZME SULCA**
MIEMBRO



Dr. **VICTOR MANUEL BETETA ALVARADO**
ASESOR



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
REPOSITORIO INSTITUCIONAL DIGITAL
(RIDUNAS)

Correo: repositorio@unas.edu.pe



“Año de la unidad, la paz y el desarrollo”

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 071 - 2023 - CS-RIDUNAS

El Coordinador de la Oficina de Repositorio Institucional Digital de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

CERTIFICA QUE:

El trabajo de investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% (Art. 3° - Resolución N° 466-2019-CU-R-UNAS).

Facultad:

Facultad de Recursos Naturales Renovables

Tipo de documento:

Tesis	X	Trabajo de investigación	
-------	---	--------------------------	--

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE DE SIMILITUD
ADSORCIÓN DE CADMIO EN EL SUELO APLICANDO PECTINA DE CÁSCARA DE <i>Musa paradisiaca</i> L. (var. Bellaco) A NIVEL DE LABORATORIO	ARTETA MEDRANO NELL GIOVANNA	16% Dieciséis

Tingo María, 31 de marzo de 2023


Mg. Ing. García Villegas, Christian
Coordinador del Repositorio Institucional
Digital (RIDUNAS)

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



ADSORCIÓN DE CADMIO EN EL SUELO APLICANDO PECTINA DE CÁSCARA
DE *Musa paradisiaca* L. (var. Bellaco) A NIVEL DE LABORATORIO

Autor	: Arteta Medrano, Nell Giovanna.
Asesor (es)	: Dr. Beteta Alvarado, Victor Manuel.
Programa de investigación	: Tecnologías para reducir la contaminación.
Línea de investigación	: Ciencia y Tecnologías Ambientales.
Eje temático	: Reducción de la contaminación del suelo.
Lugar de ejecución	: Laboratorio de Calidad de suelos UNAS.
Duración del Trabajo	: Seis (06) meses.
Financiamiento	: S/. 7146,40

Tingo María – Perú.

Abril, 2023



**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
OFICINA DE INVESTIGACIÓN**

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

**REGISTRO DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO UNIVERSITARIO, INVESTIGACIÓN DOCENTE
Y TESISISTA**

(Resol. N° 113-2019-CU-R-UNAS)

I. Datos Generales de Pregrado

Universidad	: Universidad Nacional Agraria de la Selva.
Facultad	: Facultad de Recursos Naturales Renovables.
Título de tesis	: Adsorción de cadmio en el suelo aplicando pectina de cáscara de <i>Musa paradisiaca</i> L. (var. Bellaco) a nivel de laboratorio
Autor	: Arteta Medrano, Nell Giovanna.
Asesor(es)	: Dr. Beteta Alvarado, Victor Manuel.
Escuela Profesional	: Ingeniería Ambiental.
Programa de investigación	: Tecnologías para reducir la contaminación.
Línea(s) de investigación	: Ciencia y Tecnologías Ambientales.
Eje Temático	: Reducción de la contaminación del suelo.
Lugar de ejecución	: Laboratorio de Calidad de suelos UNAS.
Duración	: Noviembre 2021 - Abril 2022
Financiamiento	: S/7 146,40

Arteta Medrano Nell Giovanna

Tesista

Beteta Alvarado Víctor Manuel

Asesor

Tingo María, Perú, abril 2023.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

Tingo María – Perú



FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N°019-2023-FRNR-UNAS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 16 de marzo de 2023, a horas 11:00 a.m. de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la Tesis titulada:

“ADSORCIÓN DE CADMIO EN EL SUELO APLICANDO PECTINA DE CÁSCARA DE *Musa paradisiaca* L. (var. Bellaco) A NIVEL DE LABORATORIO”

Presentado por el Bachiller: **ARTETA MEDRANO, Nell Giovanna**, después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de “**MUY BUENO**”

En consecuencia, el sustentante queda apto para optar el Título Profesional de **INGENIERO AMBIENTAL** que será aprobado por el Consejo de Facultad, tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título correspondiente.

Tingo María, 27 de marzo de 2023

Ing. M.Sc. **JOSE DOLORES LEVANO CRISOSTOMO** PRESIDENTE Ing. M.Sc. **FRANKLIN DIONISIO MONTALVO** MIEMBRO

Blgo. **CESAR AUGUSTO GOZME SULCA** MIEMBRO



Dr. **VICTOR MANUEL BETETA ALVARADO** ASESOR

DEDICATORIA

A Dios, por ser mi fuente divina e inspirador en este largo camino para alcanzar mis anhelos.

A mis padres, Yovani Arteta Rodríguez y Elizabeth Medrano Condezo por su apoyo incondicional, amor infinito y motivación para lograr mis ideales.

A mis hermanos Carlos, Diego, Maricielo y Shamil quienes con su presencia, respaldo y cariño me impulsaron para salir adelante.

A mis abuelitas, quien en vida fue Paula Rodríguez Valverde y Toribia Condezo Albornoz, quienes me enseñaron que la perseverancia es suma de esfuerzo y compromiso que orienta hasta mi objetivo.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Agraria de la Selva, mi casa de estudios, por acogerme en sus aulas durante mi formación profesional.

A la Facultad de Recursos Naturales y Renovables, estimados docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, quienes me brindaron sus conocimientos y contribuyeron en mi desarrollo académico universitario.

Al Dr. Víctor Manuel Beteta Alvarado, asesor de la presente investigación, por su valiosa enseñanza, confianza, orientación y paciencia que me impartió durante la ejecución de la investigación.

A los miembros del jurado de tesis: Ing. M. Sc. José Dolores Lévano Crisóstomo, Blgo. Cesar Augusto Gozme Sulca y el Ing. M. Sc. Franklin Dionisio Montalvo; por enriquecer positivamente con sus sabias enseñanzas, sugerencias y oportunos comentarios.

A los técnicos del Laboratorio Central de Investigación, Laboratorio de Calidad de Suelos y Laboratorio de Bioquímica por brindarme su atención, orientación en los métodos y análisis de la presente investigación.

ÍNDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Objetivo general	2
1.2. Objetivos específicos.....	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. Antecedentes.....	3
2.1.1. A nivel internacional.....	3
2.1.2. A nivel nacional.....	6
2.2. Polímeros.....	7
2.2.1. Polímeros naturales.....	7
2.3. Pectina	7
2.3.1. Características fisicoquímicas de la pectina	8
2.3.2. Características estructurales de la pectina	10
2.3.3. Tipos de pectina.....	12
2.3.4. Propiedades de adsorción de la pectina	13
2.4. Cadmio	14
2.5. Cadmio en el suelo	15
2.5.1. Factores que afectan la movilidad y biodisponibilidad del cadmio....	16
2.6. Cadmio en las plantas.....	18
2.6.1. Efectos tóxicos del cadmio sobre las plantas.....	19
2.7. Marco normativo	19
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	20
3.1. Lugar de ejecución	20
3.1.1. Ubicación política.....	20
3.1.2. Ubicación geográfica.....	20
3.1.3. Aspectos ambientales de Tingo María.....	21
3.2. Materiales y equipos.....	21
3.2.1. Materiales biológicos.....	21
3.2.2. Materiales de campo	21
3.2.3. Materiales de laboratorio	21
3.2.4. Reactivos.....	21
3.2.5. Equipos	21

3.2.6. Programas	21
3.3. Metodología.....	22
3.3.1. Tipo y nivel de investigación.....	22
3.3.2. Población y muestra.....	22
3.3.3. Variables de estudio.....	22
3.3.4. Diseño de investigación.....	23
3.3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de información	24
3.3.6. Caracterización de la pectina de las cáscaras de <i>Musa paradisiaca</i> L. (var. Bellaco)	25
3.3.7. Evaluación del efecto de la pectina sobre las características físicoquímicas del suelo con cadmio	29
3.3.8. Determinación del efecto de la pectina sobre el cadmio disponible (Cd ⁺²) en el suelo	30
3.3.9. Determinación del efecto fitotóxico del suelo tratado con pectina en <i>Lactuca sativa</i>	31
3.3.10. Análisis estadístico	33
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	37
4.1. Caracterización de la pectina de las cáscaras de <i>Musa paradisiaca</i> L. (var. Bellaco).....	37
4.1.1. Análisis de las propiedades físicoquímicas de la pectina	37
4.1.2. Análisis de microfotografía electrónica de la pectina.....	39
4.1.3. Análisis del espectro infrarrojo (FTIR) de la pectina	40
4.2. Evaluación del efecto de la pectina sobre las características físicoquímicas del suelo con cadmio	42
4.2.1. Efecto de la pectina sobre el pH del suelo.....	42
4.2.2. Efecto de la pectina sobre la conductividad del suelo	44
4.2.3. Efecto de la pectina sobre los sólidos totales disueltos del suelo	46
4.3. Determinación del efecto de la pectina sobre el cadmio disponible (Cd ⁺²) en el suelo	48
4.4. Determinación del efecto fitotóxico del suelo tratado con pectina en	
<i>Lactuca sativa</i>	52
4.4.1. Índice de germinación.....	52
4.4.2. Biomasa generada.....	54
V. CONCLUSIONES.....	57

VI. PROPUESTAS A FUTURO	58
VII. REFERENCIAS	59
ANEXOS	64
Apéndice 1. Documentos y tablas	65
Apéndice 2. Galería de fotos	96
Apéndice 3. Mapas	109

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Rendimiento de pectina en diferentes frutos	8
2. Grupos funcionales identificados en la pectina.....	12
3. Características generales del cadmio	15
4. Diseño de análisis de varianza de un factor	35
5. Diseño para la prueba de Kruskal-Wallis	35
6. Diseño para la prueba de Tukey HSD.....	36
7. Caracterización fisicoquímica de la pectina de cáscara de plátano.....	37
8. Longitud de onda de los grupos funcionales de la pectina.....	41
9. Registro de comportamiento de las características fisicoquímicas del suelo en tratamiento.....	78
10. Descriptivos del pH del suelo tratado	81
11. Descriptivos de la Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$) del suelo tratado.....	81
12. Descriptivos de los Sólidos Totales Disueltos (ppm) del suelo tratado.....	82
13. Supuestos estadísticos para las características fisicoquímicas del suelo tratado	82
14. Prueba de Kruskal-Wallis para el pH del suelo tratado	82
15. Prueba de Kruskal-Wallis para la conductividad del suelo tratado	82
16. Prueba de Kruskal-Wallis para los Sólidos Totales Disueltos del suelo tratado	83
17. Registro de la eficiencia y capacidad de adsorción.....	84
18. Descriptivos de la Eficiencia (%) de la pectina	84
19. Descriptivos de la Capacidad de adsorción ($\mu\text{g}/\text{g}$) de la pectina	85
20. Supuestos estadísticos para Eficiencia y Capacidad de adsorción de la pectina.....	85
21. ANOVA de la Eficiencia de la pectina	85
22. ANOVA de la Capacidad de adsorción de la pectina	85
23. Registro del Índice de Germinación (%) de <i>Lactuca sativa</i>	86
24. Descriptivos del Índice de Germinación en las diluciones de la pectina	88
25. Descriptivos del Índice de Germinación en las diluciones del tratamiento T ₀	88
26. Descriptivos del Índice de Germinación en las diluciones del tratamiento T ₁	88
27. Descriptivos del Índice de Germinación en las diluciones del tratamiento T ₂	88
28. Descriptivos del Índice de Germinación en las diluciones del tratamiento T ₃	88
29. Descriptivos del Índice de Germinación en las diluciones del tratamiento T ₄	88
30. Descriptivos del Índice de Germinación en las diluciones del tratamiento T ₅	89

31. Supuestos estadísticos para el índice de germinación de <i>Lactuca sativa</i> en diluciones de pectina y suelo tratado	89
32. ANOVA del Índice de Germinación en las diluciones de la pectina.....	89
33. ANOVA del Índice de Germinación en las diluciones del tratamiento T ₀	89
34. ANOVA del Índice de Germinación en las diluciones del tratamiento T ₁	90
35. ANOVA del Índice de Germinación en las diluciones del tratamiento T ₂	90
36. ANOVA del Índice de Germinación en las diluciones del tratamiento T ₃	90
37. ANOVA del Índice de Germinación en las diluciones del tratamiento T ₄	90
38. ANOVA del Índice de Germinación en las diluciones del tratamiento T ₅	90
39. Registro del Biomasa generada (%) de <i>Lactuca sativa</i>	91
40. Descriptivos de la Biomasa generada en las diluciones de la pectina.....	93
41. Descriptivos de la Biomasa generada en las diluciones del tratamiento T ₀	93
42. Descriptivos de la Biomasa generada en las diluciones del tratamiento T ₁	93
43. Descriptivos de la Biomasa generada en las diluciones del tratamiento T ₂	93
44. Descriptivos de la Biomasa generada en las diluciones del tratamiento T ₃	93
45. Descriptivos de la Biomasa generada en las diluciones del tratamiento T ₄	93
46. Descriptivos de la Biomasa generada en las diluciones del tratamiento T ₅	94
47. Supuestos estadísticos para la Biomasa generada de <i>Lactuca sativa</i> en diluciones de pectina y suelo tratado	94
48. ANOVA de la Biomasa generada en las diluciones de la pectina	94
49. ANOVA de la Biomasa generada en las diluciones del tratamiento T ₀	94
50. ANOVA de la Biomasa generada en las diluciones del tratamiento T ₁	95
51. ANOVA de la Biomasa generada en las diluciones del tratamiento T ₂	95
52. ANOVA de la Biomasa generada en las diluciones del tratamiento T ₃	95
53. ANOVA de la Biomasa generada en las diluciones del tratamiento T ₄	95
54. ANOVA de la Biomasa generada en las diluciones del tratamiento T ₅	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Estructura básica de la pectina	10
2. Representación esquemática convencional de la estructura de la pectina	11
3. Pectinas con alto grado de metoxilo	12
4. Pectinas con bajo grado de metoxilo.....	13
5. Mecanismos de adsorción de la pectina	14
6. Fracciones de cadmio en el suelo.....	16
7. Influencia del pH en la concentración de metales en la solución del suelo	17
8. Diagrama Eh-pH para el cadmio.....	18
9. Mapa de ubicación del Laboratorio de Calidad de Suelos UNAS	20
10. Diseño experimental del estudio	23
11. Diagrama de flujo general de la preparación del polímero (pectina).....	25
12. Preparación de las diluciones del suelo tratado con pectina	32
13. Microfotografías MEB a 250X y 600X de la pectina de cáscara de <i>M. paradisiaca</i> L.....	39
14. Microfotografías MEB a 1000X y 2000X de la pectina de cáscara de <i>M. paradisiaca</i> L.....	40
15. Espectro FTIR de la pectina de cáscara de <i>Musa paradisiaca</i> L.	41
16. Comportamiento del pH en el suelo tratado.....	43
17. Efecto de la pectina sobre el pH del suelo con cadmio.....	44
18. Comportamiento de la Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$) en el suelo tratado.....	45
19. Efecto de la pectina sobre la conductividad del suelo con cadmio	46
20. Comportamiento de los Sólidos Totales Disueltos en el suelo tratado	47
21. Efecto de la pectina sobre los sólidos totales disueltos del suelo con cadmio.....	48
22. Eficiencia de la pectina en la adsorción de cadmio en el suelo	49
23. Capacidad de adsorción de la pectina aplicada en suelo con cadmio	50
24. Índice de germinación (%) de <i>Lactuca sativa</i> en diluciones de pectina	52
25. Índice de germinación (%) de <i>Lactuca sativa</i> en diluciones de los tratamientos de suelo con cadmio	53
26. Biomasa generada (%) de <i>Lactuca sativa</i> en diluciones de pectina	55
27. Biomasa generada (%) de <i>Lactuca sativa</i> en diluciones de los tratamientos de suelo con cadmio	56

28. Corte de las cáscaras de plátano en trozos de 1 cm ²	96
29. Hidrólisis ácida (pH = 2,5) con agitación constante de 40 a 60 minutos.....	96
30. Filtrado para separar la solución péctica del bagazo.....	97
31. Precipitación de la solución péctica con alcohol al 96%	97
32. Separación del alcohol restante en la pectina precipitada por centrifugación (6000 rpm).....	98
33. Pectina coagulada después del proceso de centrifugación.....	98
34. Secado de la pectina hasta peso constante	99
35. Pectina parcialmente seca para ser triturada en un mortero.....	99
36. Molienda de la pectina seca	100
37. Determinación del peso equivalente de la pectina	100
38. Determinación de la acidez libre de la pectina.....	101
39. Determinación de los parámetros fisicoquímicos	101
40. Determinación del grado de gelificación de la pectina	102
41. Determinación de cenizas de la pectina	102
42. Georeferenciación de los puntos de muestreo de suelos con cadmio	103
43. Extracción de las submuestras de suelo con cadmio.....	103
44. Pesado del suelo para el acondicionamiento de las unidades experimentales	104
45. Aplicación de la pectina en el suelo con cadmio	104
46. Humedeciendo la mezcla de suelo pectina hasta capacidad de cambio.....	105
47. Instalación del diseño experimental en la cama de germinación	105
48. Evaluación de los parámetros fisicoquímicos de los suelos tratados.....	106
49. Preparación de las soluciones de suelo tratado con pectina para las pruebas de fitotoxicidad	106
50. Instalación de las semillas de <i>Lactuca sativa</i> en la cama de germinación.....	107
51. Crecimiento de las plántulas de <i>Lactuca sativa</i> aplicadas con la solución de suelo-pectina	107
52. Toma de medidas de las plántulas de <i>Lactuca sativa</i> tratadas con la solución de suelo con pectina.....	108
53. Secado de plántulas para determinación de biomasa	108

RESUMEN

El cadmio (Cd) en el suelo es un metal pesado muy pernicioso para la producción agrícola de diferentes cultivos. Una técnica para reducir los niveles de cadmio disponible (Cd^{+2}) en el suelo es emplear la pectina, un polímero obtenido mediante hidrólisis ácida. La investigación consistió en evaluar la adsorción de cadmio en suelo aplicando pectina de cáscara de *Musa paradisiaca* L. (var. Bellaco). Se caracterizó el polímero extraído de cáscara de plátano recolectado de tacacherías; luego, se prepararon barcos de porcelana con suelo agrícola mezclado con pectina en concentraciones de 2%, 4%, 6%, 8% y 10%, mediante un DCA de cinco tratamientos y un control con cinco repeticiones cada uno. El polímero obtenido de cáscaras de *Musa paradisiaca* fue verificado como pectina de calidad con capacidad gelificante, superficie corrugada y porosa, y grupos carboxilo (-COOH) e hidroxilo (-OH). La aplicación de pectina presentó efectos significativos ($p < 0,01$) en el pH, conductividad (uS/cm) y sólidos totales disueltos (ppm) del suelo. En la dosis al 2% se observó la mayor eficiencia y capacidad de adsorción de Cd^{+2} en el suelo con el $34,98 \pm 2,54\%$ y $23,7 \pm 1,72 \mu\text{g/g}$ respectivamente. Además, la aplicación de diluciones de los tratamientos tuvo efectos significativos sobre el Índice de Germinación (IG) e Índice de Biomasa (IB) de *Lactuca sativa*, sugiriendo que la pectina de cáscara de plátano puede reducir significativamente la fitotoxicidad del Cd. Se concluye que la aplicación de pectina de cáscara de *M. paradisiaca* tiene un gran potencial como agente de adsorción del cadmio en el suelo.

Palabras clave: pectina de plátano, cadmio en suelo, capacidad de adsorción, polímero.

ABSTRACT

The cadmium in the soil is a very pernicious heavy metal in the production of different agricultural crops. One technique for reducing the levels of available cadmium (Cd^{+2}) in the soil is to use pectin, a polymer obtained through acidic hydrolysis. The research consisted in an evaluation of the absorption of cadmium in the soil when a polymer (pectin) from *Musa paradisiaca* L. (Bellaco variety) peels was applied. The polymer extracted from the plantain peels collected from tacacho restaurants was characterized; later porcelain boats were prepared with agricultural soil mixed with pectin at concentrations of 2%, 4%, 6%, 8%, and 10%, through a CRD (DCA in Spanish) of five treatments and one control, with five repetitions each. The polymer obtained from the *Musa paradisiaca* peels was verified to be quality pectin with a jellification capacity, corrugated and porous surface, and carboxylic ($-\text{COOH}$) and hydroxylic ($-\text{OH}$) groups. The application of the pectin presented significant effects ($p < 0,01$) on the pH, conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$), and total dissolved solids (ppm) in the soil. For the 2% dose, the greatest efficiency and Cd^{+2} absorption capacity was observed in the soil with $34,98 \pm 2,54\%$ and $23,7 \pm 1,72 \mu\text{g}/\text{g}$, respectively. Moreover, the application of the dilutions of the treatments had significant effect on the germination index (GI; IG in Spanish) and the biomass index (BI; IB in Spanish) for *Lactuca sativa*, suggesting that the plantain peel pectin significantly reduced the phytotoxicity of the Cd. It was concluded that the application of *M. paradisiaca* peel pectin had a great potential to become an absorption agent for cadmium in the soil.

Keywords: plantain pectin, cadmium in the soil, absorption capacity, polymer.

I. INTRODUCCIÓN

El cadmio (Cd) es un metal pesado comúnmente encontrado en el suelo a causa de procesos edáficos o actividades antropogénicas. Aunque no es esencial para las plantas, el cadmio puede ser absorbido y acumulado en sus tejidos vegetales, como las raíces, tallos, hojas, frutos y semillas, convirtiéndolo en un metal altamente perjudicial para la producción agrícola debido a que puede afectar la calidad de los cultivos y la seguridad alimentaria ya que el consumo de estos productos se considera carcinógeno.

En el Perú se han realizado diferentes evaluaciones que indican que la presencia de Cd supera los niveles del Estándar de Calidad Ambiental para suelos agrícolas de $1,4 \text{ mg.kg}^{-1}$ (Ministerio del Ambiente, 2017), los cuales son perjudiciales para la producción de distintos cultivos tropicales como la palta, el arroz, los cítricos y principalmente en el cacao, debido a que son adsorbidos a través de los mismos sistemas que utilizan las plantas para obtener nutrientes, generando efectos fitotóxicos al interactuar en los procesos bioquímicos causando inhibición del crecimiento radicular y la interrupción de la absorción de nutrientes esenciales para las plantas que no toleran la acumulación de Cd.

La pectina se obtiene a partir de hidrólisis ácida de los polímeros que se localiza en la matriz extracelular (pared celular) de los tejidos suaves de la planta, principalmente de las cáscaras de frutas. Consiguiendo un biopolímero compuesto de ácido galacturónico el cual le confiere la capacidad gelificante; sin embargo, dentro de la cadena polimérica también se encuentran grupos funcionales como el carboxilo e hidroxilo que conforman los sitios aniónicos en donde los iones metálicos se unen por interacciones electrostáticas, lo que le atribuyen la capacidad de adsorción de metales pesados en el suelo.

La biomasa residual de las cáscaras de *Musa paradisiaca* tiene potencial como fuente de pectina, aunque su abundancia aún no ha sido estimada. A menudo, estas cáscaras son desechadas después de extraer su pulpa, ignorando su capacidad como materia prima para contribuir a la mitigación de la disponibilidad del Cd en el suelo.

Cabe resaltar, que uno de los problemas ambientales más graves de la provincia de Leoncio Prado son los suelos agrícolas con niveles desde los 0,8 hasta 10,6 ppm de Cd, que debido a su fitotoxicidad es muy pernicioso en la producción agrícola de diferentes cultivos. Por lo tanto, es necesario emplear estrategias para mitigar la biodisponibilidad del Cd. Una técnica a evaluar es la aplicación del polímero pectina que se puede obtener a partir de la biomasa residual del plátano que es utilizado en los restaurantes típicos (tacacherías) de la provincia. Por consiguiente, se planteó la siguiente interrogante ¿Será significativo la adsorción

de cadmio en el suelo aplicando pectina de cáscara de *M. paradisiaca* a nivel de laboratorio?, teniendo como hipótesis que es significativo la adsorción de cadmio en el suelo aplicando pectina de cáscara de *M. paradisiaca* a nivel de laboratorio.

1.1. Objetivo general

Determinar la adsorción de cadmio en el suelo aplicando pectina de cáscara de *Musa paradisiaca* L. (var. Bellaco).

1.2. Objetivos específicos

- Caracterizar la pectina de las cáscaras de *Musa paradisiaca* L. (var. Bellaco).
- Evaluar el efecto de la pectina sobre las características fisicoquímicas del suelo con cadmio.
- Determinar el efecto de la pectina sobre el cadmio disponible (Cd^{+2}) en el suelo.
- Determinar el efecto fitotóxico del suelo tratado con pectina en *Lactuca sativa*.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes

2.1.1. A nivel internacional

Paynel *et al.* (2009), determinaron que los metales pesados con cationes polivalentes se unen fuertemente a las pectinas que poseen carga negativa de manera que reducen el hinchamiento de las paredes celulares de la raíz inducido por el Cd.

Arellanes *et al.* (2011) obtuvieron polímero de cáscara de plátano con un rendimiento entre el 6,64 al 16,1%; asimismo, concluyeron que el polímero extraído fue pectina puesto que la humedad, cenizas, peso equivalente y contenido de metoxilo tuvo valores de 8,5%; 0,91% 9944,3 g/e y 3,23% respectivamente.

Asimismo, Cabarcas *et al.* (2012) extrajeron polímero de cáscara de *Musa paradisiaca* por hidrólisis con ácido clorhídrico el cual tuvo un rendimiento del 7,53 al 23,1%; además luego de su caracterización señalaron que el polímero extraído era pectina debido a que tuvo una humedad, ceniza, peso equivalente, acidez libre, metoxilo y grado de esterificación del 7,53-23,1%; 1-12%; 0,9-3,5%; 510-675 mg/meq; 6,8% y 95,5-76,5%; asimismo identificaron en su estructura los grupos funcionales hidroxilo, alquilo, carboxilo éster, carboxilo ácido, carbonilo y anillos benzoicos en las longitudes de onda de 3300-3500 cm^{-1} , 2900-3000 cm^{-1} , 1700-1800 cm^{-1} , 1500-1700 cm^{-1} , 1000-1200 cm^{-1} y 700-900 cm^{-1} respectivamente.

Al mismo tiempo, Ovando (2012), determinó que la pectina tiene una eficiencia entre el 23,2 y 63,4% para adsorber cadmio con una capacidad de 5,63 a 13,14 mg/g, además el biopolímero provocó la acidificación del medio aplicado debido a la protonación de los grupos carboxilos (-COOH) de la pectina donde su estructura tridimensional formada por grupos hidroxilo (-OH) retienen agua (H_2O) por enlaces de puentes de hidrogeno. Asimismo indicaron que la unión de los iones metálicos ocurren a través de dos mecanismos de adsorción, las interacciones electrostáticas cuando los iones con carga positiva se unen a los grupos funcionales (-COOH y -OH) con carga negativa, y el intercambio iónico entre iones de Cd^{+2} con iones de Ca^{+2} son los más fuertes y estables.

Asimismo, Bello-Lara *et al.* (2014), determinaron que la cáscara de plátano es una opción para obtener pectina, debido a que extrajeron el polímero con un 9,73% de rendimiento.

Por otra parte, Salazar *et al.* (2014), determinaron que el pH tuvo efectos significativos en la remoción de Cd^{+2} , debido a que la pectina mostró una mejor adsorción en

pH ácidos, por el contrario, en pH alcalinos los metales se precipitan, lo que indica que la pectina presentó afinidad por el Cd^{+2} (61%).

Entre tanto, Sánchez *et al.* (2014), determinaron la cinética de adsorción de los iones de Cd señalando que la pectina tiene una capacidad de adsorción de 99,56 mg/g en un pH entre 4,5 y 5,5; donde no ocurre protonación. Asimismo, indicaron que la unión del Cd a la pectina ocurrió probablemente por interacciones electrostáticas.

Bravo y Condo (2015) obtuvieron polímero de cáscara de plátano por hidrólisis ácida de pH 2,5 y temperatura de 60°C con un rendimiento del 2,58% y su estructura presentó carboxilos en las vibraciones 650 y 1750 cm^{-1} , comprobando que el polímero que extrajeron fue pectina de bajo metoxilo y de mayor gelificación en pH ácidos.

Cartaya *et al.* (2016), determinaron que la aplicación de pectina tuvo efectos significativos en la inmovilización de iones metálicos pesados en suelo, atenuando los efectos fitotóxicos en plántulas de tomate como la inhibición de la germinación y el crecimiento radical, el engrosamiento de las raíces, y la absorción de agua y nutrientes del suelo.

Ramos *et al.* (2016), extrajeron pectina de cáscara de *Musa paradisiaca* de diferentes estados de maduración y empleando ácido cítrico y ácido clorhídrico en el proceso de hidrólisis. Concluyendo que la mejor fuente de pectina son las cáscaras verdes del plátano usando el ácido clorhídrico como extractante, debido a que la extracción de pectina tuvo un rendimiento del 3,1 al 7,76%.

Vega (2017) extrajo polímero de cáscara de plátano verde y pintón de dos variedades, concluyendo que de las cáscaras verdes de la variedad Harton o Bellaco se puede extraer polímero con un rendimiento del 13,4%; además de una humedad, ceniza y acidez del 4,38%; 1,24% y 1,98% respectivamente.

Szatanik-Kloc *et al.* (2017) señalaron que los grupos funcionales de la pectina intervienen en la formación de una carga superficial, el cual le da la capacidad de fijación de cationes metálicos. En consecuencia, a menor cantidad del polímero la carga superficial es menor así como la fijación de cationes metálicos.

Khamsucharit *et al.* (2018) caracterizaron el polímero obtenido de cáscaras de plátano con un rendimiento del 15,9 a 24,1%; pH de 1,5 y 80°C en hidrólisis con ácido cítrico. Concluyeron que el polímero que extrajeron era pectina de alto metoxilo (3,86 a 8,46%), alto grado de esterificación (63,15 y 72,03 %) y una estructura que posee una zona de huella digital, grupos carboxilo tanto esterificados como libres entre las vibraciones 800 y 1300 cm^{-1} , 1730-1760 cm^{-1} y 1600-1630 cm^{-1} respectivamente.

Ramos *et al.* (2018), obtuvieron polímero de cáscara de *Musa paradisiaca* con un rendimiento entre el 4,1 a 7,8% utilizando ácido cítrico como extractante, asimismo el contenido de AGA fue del 94,8 – 97,6% concluyendo que el polímero que obtuvieron a 83°C, 60 minutos y 2,5 de pH era pectina de alto metoxilo.

Jia *et al.* (2019), estudiaron la fijación de Cd por pectina, determinando que los –COOH y –OH juegan un papel importante en el proceso de inmovilización de Cd debido a que las bandas de vibración se desplazaron indicando que estos grupos funcionales pueden unirse al Cd en función al contenido de ácido galacturónico (AGA). Además, señalaron que la pectina evita los efectos fitotóxicos del Cd como la reducción de la germinación, inhibición de la elongación radicular y el crecimiento de las plantas, y reducción de la biomasa.

Gutsch *et al.* (2019), determinaron que la pectina encontrada en las paredes celulares con un bajo grado de metilación favorece la unión del Cd a la red del polímero.

Han *et al.*, (2019), establecieron que una alta concentración de polisacáridos solubles como la pectina estuvieron relacionadas a la de acumulación de Cd y Pb. Además, señalaron que están involucrados en la hiper acumulación de Cd.

Valencia (2019) extrajeron polímero de cáscara de *Musa paradisiaca* con un rendimiento del 54%, y al caracterizarlo determinaron que es una pectina de alto grado de esterificación (83%) y su estructura posee los grupos carboxilo libre y esterificados en vibraciones de 1626 cm^{-1} y 1730 cm^{-1} respectivamente.

Wang *et al.* (2019), indicaron que la estructura de la pectina difiere del método de extracción, además la capacidad de unión es mayor en iones metálicos divalente debido a que tienen menos zonas de unión. Además, indicaron que la sensibilidad de la pectina a los enlaces cruzados con iones metálicos depende de factores externos como el efecto del pH y la fuerza iónica, así como de factores internos como los mecanismos de adsorción y el grado de metilación.

Mantilla (2020) señaló que el polímero extraído de residuos de fruta evita el crecimiento de microorganismos con una humedad por debajo del 12%, la formación de geles depende del contenido de cenizas, si tiene grado de esterificación mayor al 50% es una pectina de alto metoxilo y es de bajo metoxilo si su contenido de metoxilo es menor al 7%.

Pilco (2020) determinó que en suelos agrícolas el pH ácido provoca mayor disponibilidad del Cd, mientras que suelos arcillosos con pH alcalino es posible que tengan mayor salinidad lo que retiene los metales causando una menor movilidad de Cd al unirse en carbonatos y sulfatos.

Yu *et al.* (2020), indicaron que la pectina desempeñó un papel importante debido a que es el principal sitio de unión del Cd^{+2} , siendo las pectinas esterificadas con bajo metilo las que inmovilizaron una mayor concentración de Cd^{+2} .

Guo *et al.* (2021), determinaron que el grado de metilación reguló la acumulación de Cd porque observaron que la baja metilación causa la inmovilización del Cd^{+2} reduciendo la hiperacumulación en raíces donde causa engrosamiento, mientras que el polímero con alta metilación tiene una menor fijación de Cd.

Mohd *et al.* (2021), demostraron que el polímero extraído a base de cáscara de *Musa paradisiaca* era pectina de bajo metoxilo ya que identificaron los grupo funcionales carbonilo (-CO), carboxilo éster (-COOH), e hidroxilo (-OH) en las longitudes de onda 1012 cm^{-1} , 1650 cm^{-1} , $2900\text{-}3500\text{ cm}^{-1}$ respectivamente.

Toyo-Díaz *et al.* (2021), determinaron que el polímero extraído de cáscaras de *Musa paradisiaca* con un rendimiento de 13,9% fue una pectina de alto metoxilo y rápida gelificación porque tuvo un contenido de metoxilo del 7 al 12%; 79% de Ácido galacturónico y un grado de esterificación del 89%.

Lai *et al.* (2022) determinaron que las cáscaras de plátano son una buena opción para producir pectina debido a que extrajeron el polímero con un rendimiento del 78,64%; además tuvo un contenido de humedad del 16,1%; un peso equivalente de 462,96 mg/meq; un contenido de metoxilo de 8,68% y el 56,67% de grado de esterificación.

Yang *et al.* (2022), reportaron que la unión entre pectina y el Cd es más fuerte cuando la pectina es esterificada y con menor contenido de metilo, lo que promueve la desmetilesterificación de la pectina para evitar la inhibición del crecimiento radicular que provoca el Cd.

Wang *et al.* (2022), señalaron que la desmetilación de la pectina promueve la unión de Cd a la pectina debido a que la liberación de carboxilos e hidroxilos mejora la unión de pectina-Cd.

2.1.2. A nivel nacional

En el Perú también evaluaron las características de la pectina y su capacidad de adsorción de cadmio, entre los cuales se encuentra los estudios realizados en Arequipa, donde Molina y Tintaya (2018), señalaron que los carboxilos de la cadena polimérica pueden estar esterificados con metilos o en forma de sal como pectatos o pectinatos; además, indicaron que la gelificación iónica de la pectina puede ocurrir de forma interna, donde los iones de Ca^{+2} y carboxilos conforman una estructura tridimensional más agua, y externa donde la

pectina en solución acida libera iones de Ca^{+2} después de su gelificación, convirtiéndose en fuente de iones divalentes.

Asimismo, en Puno, Sanga (2007) determinó que la pectina puede adsorber Cd^{+2} con una eficiencia del 38,9% en un pH de 4,5; sin embargo, obtuvo mayor eficiencia en pH, lo que posiblemente fue provocado por la precipitación del metal. Asimismo, reportó que la pectina empleada tuvo un AGA de 30,1%; indicando que es una pectina de bajo metoxilo lo cual le permite formar complejos con iones metálicos (cationes divalentes) como el Cd^{+2} .

2.2. Polímeros

Los polímeros son macromoléculas de alto peso molecular, conformadas por unidades estructurales simples denominadas monómeros los cuales están unidos mediante enlaces covalentes formando cadenas poliméricas; la síntesis de un polímero mediante monómeros se denomina polimerización (Salazar *et al.*, 2014).

Los polímeros se pueden clasificar por las propiedades fisicoquímicas, estructura, naturaleza química, su peso molecular y otras propiedades físicas de los monómeros; sin embargo la forma más habitual de clasificar un polímero es según su origen como sintéticos o naturales (Mantilla, 2020).

2.2.1. Polímeros naturales

Los polímeros procedentes de las reacciones bioquímicas denominados también como biopolímeros, son macromoléculas de alto peso molecular, de gran tamaño y con forma alargada que se encuentran en las paredes de células vegetales, así como en el exoesqueleto o esqueleto de algunos animales (Valencia, 2019).

Los biopolímeros generalmente son clasificados en proteínas, ácidos nucleicos y polisacáridos; siendo este último los que poseen componentes con propiedades adsorbentes, por lo cual se denominan bioadsorbentes y son empleados para el tratamiento de metales pesados, entre ellos tenemos la carragenina, el alginato, el quitosano, la pectina, entre otros (Sánchez *et al.*, 2014; Valencia, 2019).

2.3. Pectina

La pectina es un biopolímero que se encuentra principalmente en la pared celular de las plantas, especialmente en la cáscara de frutas de las cuales se separa mediante un proceso de extracción acuosa, seguido de una precipitación selectiva empleando sales o alcohol, teniendo como resultado una solución acuosa con características gelificantes y espesantes (Calderon, 2018).

Asimismo, la pectina es uno de los polisacáridos aniónicos debido a que los ácidos carboxílicos que la componen presentan cargas negativas y pueden formar puentes de hidrógeno, lo que confiere propiedades de hidratación y permite la generación de varios estados fisicoquímicos como la capacidad de formar geles, es decir, se inflan en medio ácido y con presencia de azúcar (Valencia, 2019).

2.3.1. Características fisicoquímicas de la pectina

La calidad de la pectina extraída depende de los criterios empleados desde la recolección de la materia prima hasta la obtención del polímero. Asimismo, para que el polímero obtenido pueda ser considerado como una pectina de buena calidad debe cumplir con ciertas características fisicoquímicas como:

a. Rendimiento

La cantidad de pectina que se puede obtener a partir de los residuos de frutas depende de algunas condiciones extracción como el pH, temperatura el tiempo de la hidrólisis ácida. El rendimiento de extracción también dependerá del tipo de fruto que se emplea como materia prima (Tabla 1).

Tabla 1. Rendimiento de pectina en diferentes frutos

Fruto	Pectina extraída (%)
Cítricos	20 - 30%
Manzana	10 - 15%
Girasol	15 - 25%
Remolacha	10 - 25%
Maracuyá	15 - 20%

Fuente: Mantilla (2020)

b. Humedad

El contenido de humedad en la pectina puede variar dependiendo del tipo de pectina y del proceso de extracción empleado; no obstante, la humedad óptima suele estar entre el 10% y el 12% siendo un factor importante para la estabilidad y conservación de la pectina. Si el contenido de humedad supera el rango óptimo, aumenta el riesgo de contaminación microbiana y degradación de la pectina; en cambio, la solubilidad y la capacidad de formar geles puede ser afectada por un contenido de humedad menor (Cabarcas *et al.* 2012; Calderon, 2018).

c. Potencial de hidrógeno

En su estado natural, las pectinas son neutras y no tienen carga; sin embargo, en solución adquieren un carácter ácido debido a la disociación de sus grupos carboxilo. El potencial de hidrógeno (pH) de la pectina en solución varía entre 2,8 y 3,4 en función al grado de esterificación. La disociación de los grupos carboxilo en la pectina o constante de disociación es de $0,1$ a 10×10^{-4} a 19°C , indicando que la pectina es una sustancia poco disociable y con carácter de ácido débil (Valencia, 2019).

d. Cenizas totales

El contenido de cenizas totales es indicador de la cantidad de sólidos solubles o minerales que contiene la pectina. Además, señala la calidad o pureza de la pectina que pueden variar en función a la fuente y proceso de extracción. Habitualmente se considera una pectina de calidad cuando el contenido de cenizas totales no supera el 1% del peso de la muestra (Cabarcas *et al.* 2012).

e. Peso equivalente

Este parámetro está muy relacionado con la acidez, contenido de metoxilo y grado de esterificación de la pectina. Por lo tanto, un alto peso equivalente señalaría acidez débil, bajo contenido de metoxilo y grado de esterificación bajo en la pectina; asimismo, indica también la estabilidad y fuerza de los geles que se forman (Calderon, 2018).

f. Acidez libre

Según Cabarcas *et al.* (2012) la acidez libre tiene relación directamente proporcional con el pH de extracción de la pectina debido a que la naturaleza química de los grupos carboxilos cambian como grupos ácidos disminuyendo las sales indicando además que ocurrieron reacciones de hidrólisis del poligalacturona.

g. Contenido de metoxilo

Es la cantidad de grupos metoxilo presentes en la molécula de pectina, los cuales le permiten formar una red tridimensional capaz de gelificar soluciones. El contenido de metoxilo de una pectina totalmente esterificada puede llegar hasta el 16,32%; sin embargo, solo varían entre los 0,2 y 12%, teniendo como referencia que por debajo del 7% son considerados como pectinas de bajo contenido de metoxilo (Calderon, 2018; Mantilla, 2020).

h. Grado de esterificación

Este parámetro señala la cantidad de grupos ácidos que han sido esterificados en una molécula de pectina, es decir, los ácidos que han reaccionado con un compuesto alcohólico para formar un éster, proceso conocido como esterificación. El grado de esterificación también podría afectar la capacidad de formar geles de la pectina, debido a que

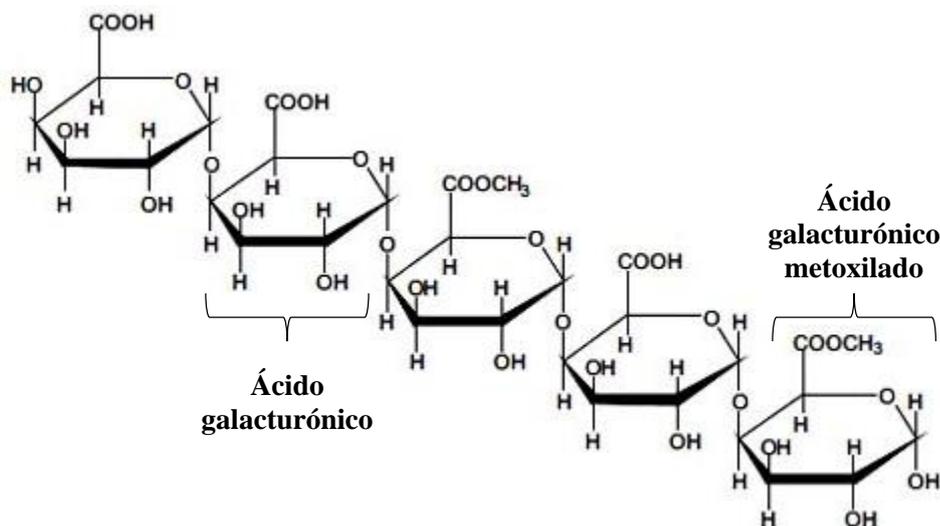
los grupos ácido esterificados tienen menor capacidad para formar enlaces hidrófobos con otros grupos metoxilo y, por lo tanto, la red tridimensional que se forma es menos estable (Bravo y Condo, 2015; Cabarcas *et al.*, 2012; Calderon, 2018).

i. Contenido de ácido galacturónico

El contenido ácido galacturónico (AGA) es la cantidad de ácido poligalacturónico presente en la pectina extraída, lo que determina la pureza del polímero debido a que es su principal componente. Además, es el parámetro más importante para evaluar la calidad de la pectina ya que las moléculas de AGA están unidas a un grupo metoxilo responsable de la formación de la red tridimensional y por ende afecta la capacidad de formar geles (Bravo y Condo, 2015; Calderon, 2018).

2.3.2. Características estructurales de la pectina

La pectina es un polisacárido complejo de alto peso molecular, compuesto por largas cadenas de unidades de ácido D-galacturónico unidas por enlaces glucosídicos α 1-4, interrumpidas por unidades de L-ramnosa unidas mediante enlaces α 1-2; estos ácidos pueden estar libres o formando enlaces metil-éster (esterificados) (Figura 1).

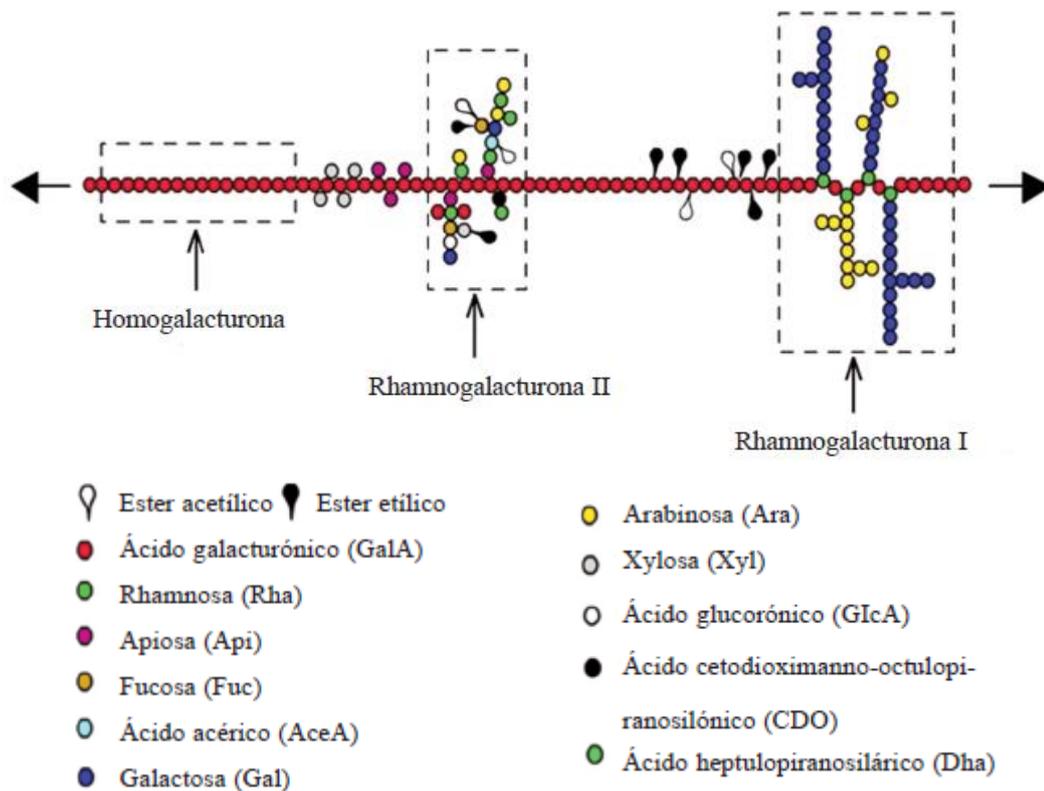


Fuente: Calderon (2018)

Figura 1. Estructura básica de la pectina

Asimismo, la pectina está compuesta por tres estructuras poliméricas que contienen ácido galacturónico en distintas cantidades formando así las principales cadenas de la pectina, estos polisacáridos pécticos son la homogalacturona, rhamnagalacturona-I y rhamnagalacturona-II (Calderon, 2018).

- a) **Homogalaturona:** Es una cadena lineal de ácido galacturónico con algunos grupos carboxílicos metil esterificados que comprenden del 60 al 65% de la pectina (Figura 2).
- b) **Rhamnogalaturona I:** Es un polisacárido con morfología de zig-zag debido a que contiene ramnosa en las cadenas de ácido galacturónico; además, comprende entre el 20 al 35% de la pectina (Figura 2).
- c) **Rhamnogalaturona II:** Está compuesto de ocho unidades de homogalaturona como mínimo, contiene más de 12 tipos de azúcares y representa el 10% de la pectina (Figura 2).



Fuente: Ridley *et al.* (2001)

Figura 2. Representación esquemática convencional de la estructura de la pectina

Por otro lado, cabe resaltar que los principales grupos funcionales encontrados en la estructura de la pectina son los carboxilos; sin embargo, en la cadena del polímero existe la presencia de otros grupos químicos en diferentes longitudes de onda cuando se analiza su espectro infrarrojo (Tabla 2).

Tabla 2. Grupos funcionales identificados en la pectina

Grupo funcional	Longitud de onda (cm ⁻¹)		
	Cabarcas (2012)	Mantilla (2020)	Mohd (2021)
Región de huella digital	450-1200		800-1200
Anillos benzoicos	700-900		
Carbonilo (-CO)	1000-1200	1331	1106
Carboxilo libre (-COOH)	1500-1700	1634	1650
Carboxilo ester (-COOH)	1700-1800	1740	1750
Alquilo (-CH)	2900-3000	2921	
Hidroxilo (-OH)	3300-3500	3429	3500-2900

Adaptado de Cabarcas (2012), Mantilla (2020) y Mohd (2021)

2.3.3. Tipos de pectina

Según el grado de esterificación, o mejor dicho la cantidad de grupos carboxilos esterificados con metanol, se diferencian en pectinas de alto metoxilo y de bajo metoxilo (Lorenzo-Santiago *et al.*, 2020).

2.3.3.1. Pectinas de alto metoxilo (HM)

Son aquellos polímeros que tienen esterificados más del 50% de los grupos carboxilos (Figura 3). En efecto, los grupos ácidos no son aptos para formar enlaces cruzados con iones divalentes; por lo cual, la formación de geles de este tipo de pectinas ocurren en un medio con presencia de sólidos solubles (60-70%) como los azúcares y un pH entre los 2,8 y 3,5 minutos (Cabarcas *et al.* 2012; Calderon, 2018).

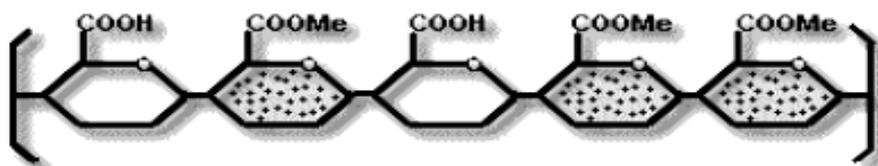


Figura 3. Pectinas con alto grado de metoxilo

Asimismo, este tipo de pectinas se subdividen en dos grupos: pectinas de gelificación rápida o Rapidset, cuando tienen entre el 68 y el 75% de esterificación y gelifican por debajo de los 5 minutos, y las pectinas de gelificación lenta o Slowset; que tienen entre 60 y 68% de esterificación y gelifican luego de 5 minutos (Cabarcas *et al.* 2012; Calderon, 2018).

2.3.3.2. Pectinas de bajo metoxilo (LM)

Son aquellos polímeros que tienen esterificados menos del 50% de los grupos hidroxilo con metanol. Además, se estima que solo entre el 20% y el 40% de los grupos carboxilo están esterificados; es decir, que la mayoría de ellos son aptos para formar enlaces cruzados con iones divalentes como el Ca^{+2} (Figura 4). En efecto, estos enlaces forman una red tridimensional con los grupos carboxilo, permitiendo la formación de geles de pectina. Estos geles se pueden obtener en pH de 1 a 7 y con intervalos de sólidos solubles entre 0 y 80%; sin embargo, la presencia de calcio (entre 40 y 100 mg) es el factor más importante en la formación de geles (Cabarcas *et al.* 2012; Calderon, 2018).

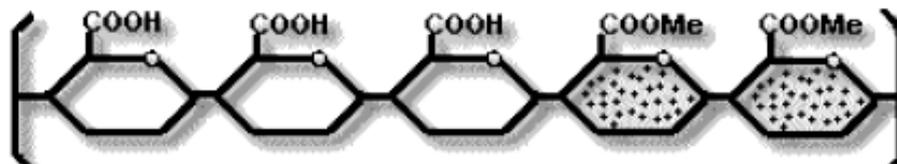


Figura 4. Pectinas con bajo grado de metoxilo

2.3.4. Propiedades de adsorción de la pectina

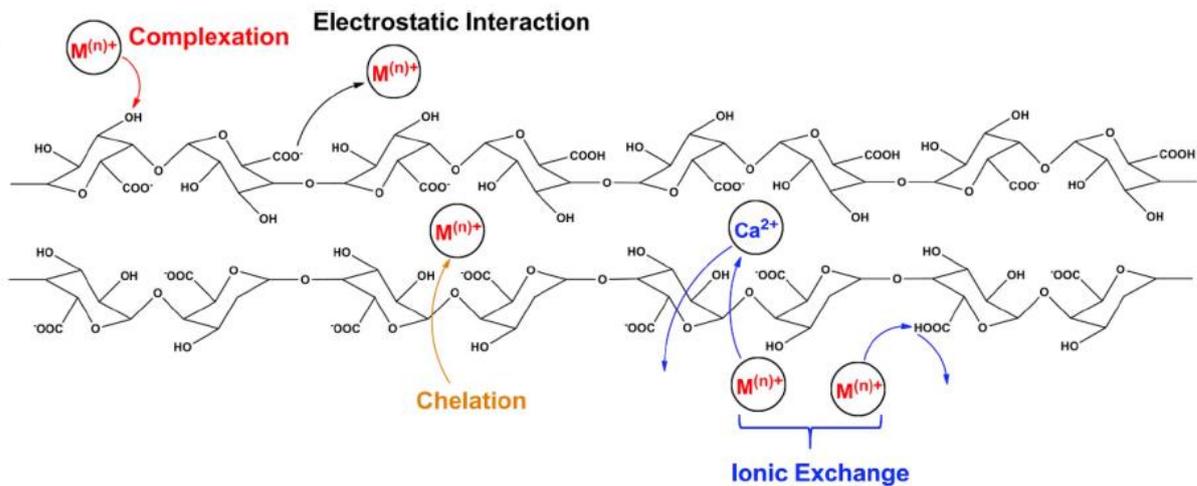
Desde el punto de vista ambiental, una de las propiedades más importantes de la pectina es la capacidad de adsorción de iones metálicos debido a su estructura química compuesta por grupos carboxilo e hidroxilo. La adsorción es un proceso mediante el cual átomos, iones o moléculas se adhieren a la superficie de un material (adsorbente) formando una capa más o menos gruesa. Asimismo, la capacidad de adsorción de iones metálicos de la pectina depende tanto de factores internos como externos (Wang *et al.*, 2019).

2.3.4.1. Factores externos

- a) **Efecto del pH**, sobre el sistema pectina- $\text{M}^{(n)+}$ tiene una fuerte dependencia. Esto se debe a que tanto la carga y el potencial de la pectina como la especiación de los iones metálicos cambian con el pH. En pH ácidos, la protonación de los grupos carboxilos genera una inversión de carga y menor actividad de unión de los iones metálicos (Wang *et al.*, 2019).
- b) **Fuerza iónica**, se eleva cuando los niveles de sodio (Na^+) y calcio (Ca^+) aumentan, causando que la pectina tenga mayor preferencia de unión con estos iones, siendo el Ca^+ el de mayor impacto en la unión metal-pectina (Wang *et al.*, 2019).

2.3.4.2. Factores internos

- a) **Interacciones electrostáticas**, se producen por la carga negativa que poseen los $-\text{COOH}$ y $-\text{OH}$ en forma ionizada conformando los sitios de unión con los iones metálicos de carga positiva a través de complejación y quelación (Figura 5) (Ovando, 2012; Wang *et al.*, 2019).
- b) **Intercambio iónico**, se da entre los iones de calcio (Ca^{+2}) unidos a los hidroxilos de la cadena polimérica, cambiando de lugar con los iones de Cd^{+2} a través de enlaces más estables y fuertes (Figura 5).



Fuente: Wang *et al.* (2019)

Figura 5. Mecanismos de adsorción de la pectina

Nota: $\text{M}^{(n)+}$ representa metal pesado

2.4. Cadmio

Es un metal pesado de número atómico 48, peso atómico $112,4 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$, densidad $8,65 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, símbolo químico Cd, que junto con el mercurio y el zinc pertenecen al grupo IIB de la tabla periódica (Tabla 3). El cadmio es conocido por su resistencia a la corrosión y su buena conductividad eléctrica, así como por tener un punto de ebullición bajo. También se destaca por su resistencia a los compuestos químicos y altas temperaturas (Dionisio, 2020). Algunas de sus características más notables son:

Tabla 3. Características generales del cadmio

Características	Descripción
Símbolo químico	Cd
Forma	Blanco, metal suave
Propiedad física	Maleable, dúctil y flexible
Número químico	48
Peso atómico	112,41 g/mol
Punto de fusión	321 °C
Punto de ebullición	765 °C
Densidad	8,65 g/cm ³

Fuente: Dionisio (2020)

Asimismo, el cadmio (Cd) se encuentra distribuido ampliamente en la corteza terrestre, asociado principalmente con el zinc (Zn), debido a que ambos metales poseen propiedades químicas muy similares; en consecuencia, es un mineral secundario al extraer la esfalerita (ZnS) (Dionisio, 2020).

Por otro lado, el Cd es un elemento traza sin funciones biológicas esenciales, de gran peligro medioambiental debido a su toxicidad en seres humanos, animales y plantas. Las repercusiones de este metal se encuentran tanto en el agua como en el aire; sin embargo, la acumulación de Cd en el suelo es de mayor preocupación ambiental, ya que en este medio tienen alta solubilidad y movilidad, comportándose de manera similar a cationes divalentes como Ca^{+2} , Fe^{+2} , Mn^{+2} y Zn^{+2} , los cuales se transfirieren dependiendo de la planta, tipología uso y manejo del suelo (Huaraca-Fernandez *et al.*, 2020; Pilco, 2020).

2.5. Cadmio en el suelo

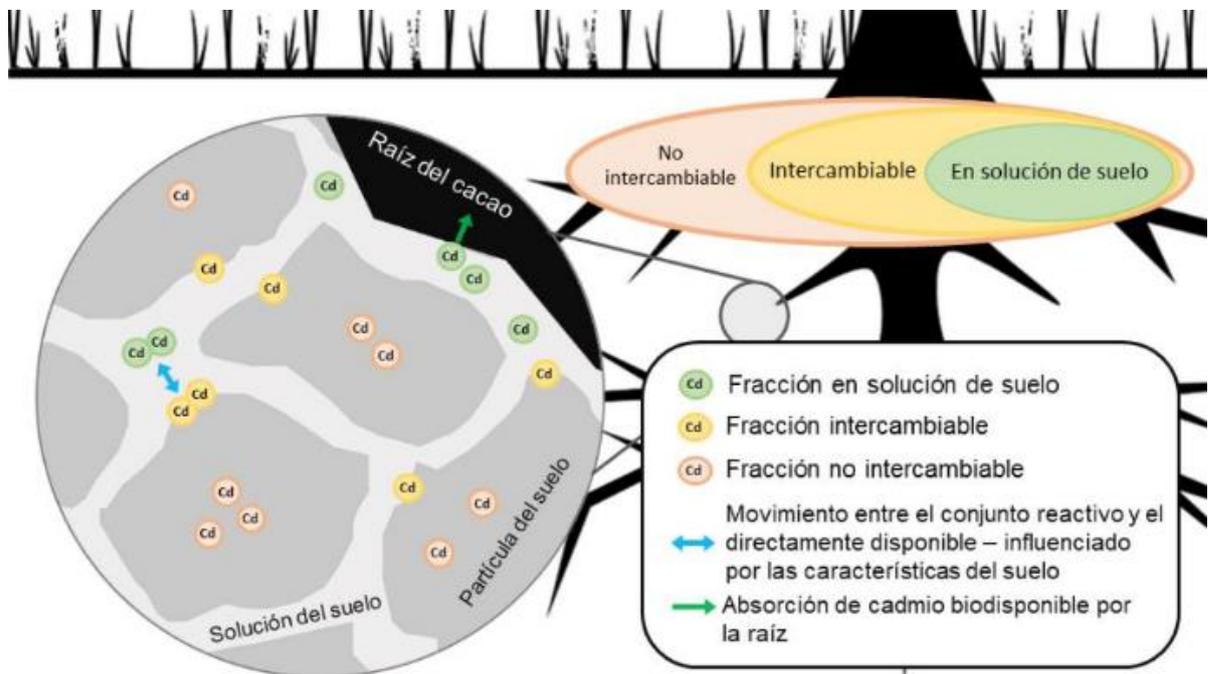
El Cd en el suelo puede provenir principalmente del uso de fertilizantes fosfatados además de los vertidos urbanos y la deposición atmosférica. Generalmente los niveles de Cd en el suelo se encuentran entre 0,07 a 1,1 mg.kg⁻¹; sin embargo, las concentraciones pueden superar estos rango dependiendo de las actividades aledañas a los suelos (Dionisio, 2020).

Por otro lado, según Meter *et al.*, (2019) el contenido de Cd en el suelo se puede dividir en tres fracciones según su biodisponibilidad en plantas:

- a) **Fracción de Cd no intercambiable**, que incluye el cadmio que no está disponible y es poco probable que pueda ser utilizado por las plantas debido a

que está en forma de parte estructural de los minerales o también formando compuestos precipitados (Figura 6).

- b) **Fracción de Cd intercambiable**, que está compuesta por iones de cadmio adheridos a coloides del suelo como materia orgánica, óxidos metálicos hidratados y partículas de arcilla, y que es potencialmente utilizable por las plantas (Figura 6).
- c) **Fracción en la solución del suelo**, que incluye iones de cadmio libres y completamente disueltos (Cd^{+2} , CdCl^+ , CdHO_3^+ , Cd en quelatos orgánicos) y que está lista para ser absorbida por las plantas, de los cuales el Cd^{+2} o Cd disponible es la especie más importante (Figura 6).



Fuente: Meter *et al.* (2019)

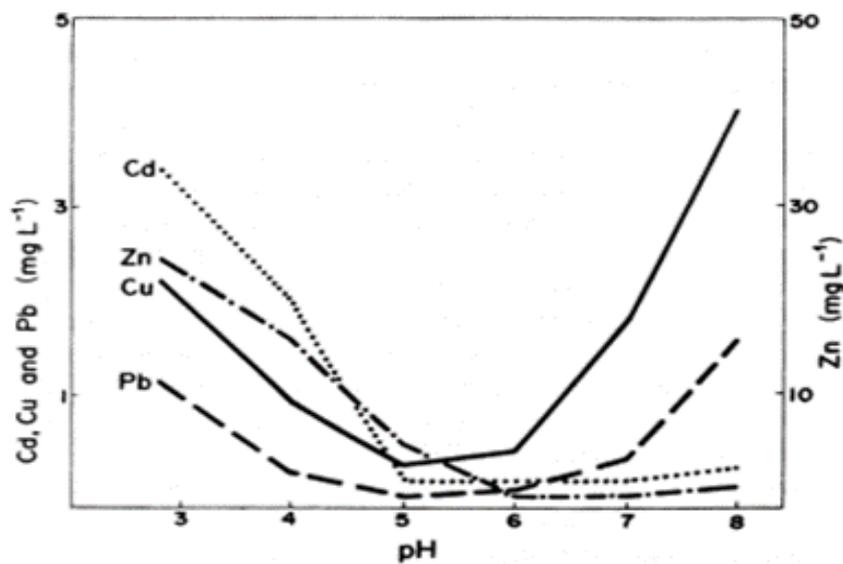
Figura 6. Fracciones de cadmio en el suelo

2.5.1. Factores que afectan la movilidad y biodisponibilidad del cadmio

La forma que puede ser absorbido por las plantas se debe a la dinámica del Cd que a su vez depende de varios factores del suelo, entre los cuales Dionisio (2020) y Huaraca-Fernandez *et al.* (2020) señalaron las siguientes:

- a. **Temperatura del suelo**, cuando el suelo tiene mayor temperatura, las reacciones se aceleran y hay mayor solubilidad provocando una mayor adsorción.

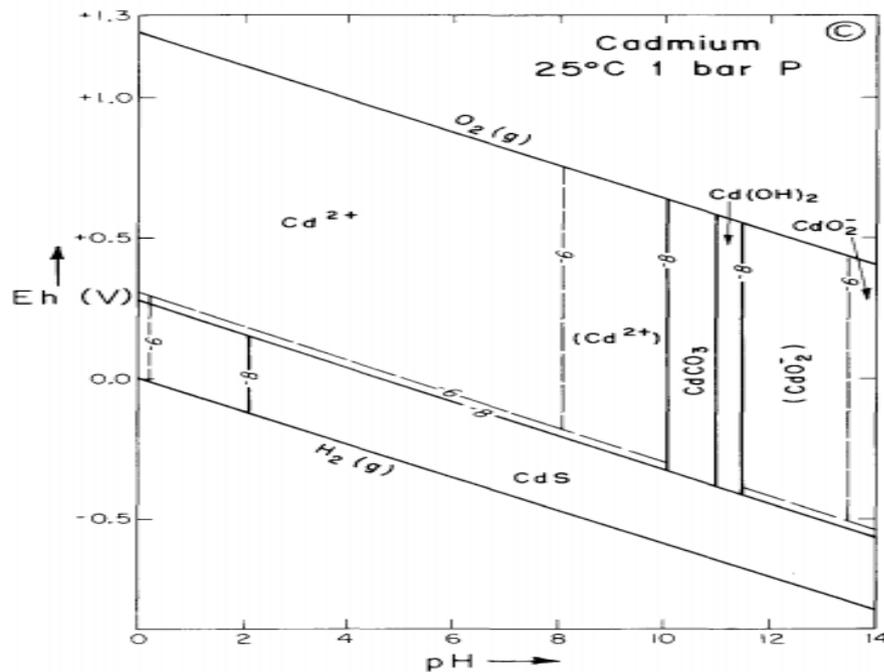
- b. La textura del suelo,** es muy importante para la acumulación y fijación de metales pesados, puesto que en suelos arcillosos una alta capacidad de retención de Cd en el complejo de cambio. Por el contrario, los suelos arenosos carecen de esta capacidad de fijación de los metales pesados como el Cd.
- c. La acidez del suelo,** la dinámica del Cd está fuertemente afectada por el pH; en efecto, en suelos ácidos, el Cd es más soluble y fácilmente intercambiable. Por el contrario, en suelos alcalinos el Cd se precipita en carbonatos y fosfatos insolubles inmovilizándose (Figura 7).



Fuente: Kabata (2000)

Figura 7. Influencia del pH en la concentración de metales en la solución del suelo

- d. Potencial redox del suelo,** la disponibilidad del cadmio puede estar influenciada por el potencial redox (Eh) del suelo; en efecto, si tiene tendencia a reducir compuestos o Eh reductor, entonces el Cd puede convertirse en formas más solubles y tener mayor biodisponibilidad, todo lo contrario sucede en suelos con Eh oxidativo (Figura 8).



Fuente: Brookins (1985)

Figura 8. Diagrama Eh-pH para el cadmio

- e. Conductividad eléctrica**, los suelos con alta conductividad eléctrica (CE), es decir, gran cantidad de cationes enlazados en los sitios de intercambio catiónico que provocan el aumento de la biodisponibilidad del Cd debido a que tienen un exceso de iones de magnesio y sodio.
- f. La capacidad de intercambio catiónico**, la materia orgánica del suelo juega un papel activo en la retención del cadmio en el suelo que depende de su cantidad y composición, siendo los ácidos húmicos los principales componentes en la retención de cadmio. En efecto, cuando aumenta el contenido de materia orgánica se incrementa la capacidad de intercambio catiónico (CIC), lo que permite al suelo una mayor capacidad de fijar metales; por consiguiente, el Cd tendrá menor biodisponibilidad.

Además de los factores mencionados anteriormente, otras características que pueden influir en la movilidad y biodisponibilidad del cadmio en el suelo son la presencia de hidróxidos metálicos, el contenido de macronutrientes y micronutrientes y la presencia de microorganismos (Meter *et al.*, 2019).

2.6. Cadmio en las plantas

El Cd es un metal pesado no esencial para las plantas y que puede estar presente en el suelo debido al uso de fertilizantes fosfatados y a la explotación de cobre y zinc. Las

plantas pueden absorber y acumular cadmio en sus raíces, tallos, hojas, frutos y semillas, y la cantidad de cadmio que absorben puede variar dependiendo de la edad y la especie de la planta (Pilco, 2020; Sánchez *et al.*, 2014).

Las plantas absorben el Cd del suelo a través de los sistemas de transporte utilizados para obtener nutrientes como el magnesio, calcio, hierro, zinc y cobre. La mayoría de las especies de plantas son tolerantes a ciertas cantidades de cadmio, pero pueden ser tóxicas en altas concentraciones. Las plantas llamadas "hiperacumuladores" pueden tolerar niveles más altos de cadmio sin mostrar síntomas de toxicidad. Sin embargo, para la mayoría de las plantas, concentraciones de cadmio por encima de los 5 a 10 $\mu\text{g/g}$ de materia seca, son tóxicas (Dionisio, 2020; Pilco, 2020; Rodríguez-Serrano *et al.*, 2008).

2.6.1. Efectos tóxicos del cadmio sobre las plantas

El Cd en el suelo puede ser absorbido por las raíces y transportado a otras partes de la planta donde interactúan en los procesos bioquímicos afectando su morfología y tasa de crecimiento. El Cd inhibe la fotosíntesis y reduce el peso seco de raíces y brotes, además de causar hinchazón y degeneración de las mitocondrias, necrosis y clorosis. También puede alterar el proceso fisiológico y metabólico y aumentar la producción de especies reactivas de oxígeno, lo que resulta en daños a la membrana (Pilco, 2020; Rodríguez-Serrano *et al.*, 2008).

Además, el Cd reduce la concentración de azúcar soluble total y aumenta la concentración de aminoácidos libres en raíces y brotes. El cadmio también interfiere en la entrada, transporte y utilización de elementos esenciales y del agua, causando desequilibrios nutricionales e hídricos en la planta. Puede modificar la apertura estomática, fotosíntesis y transpiración, y sustituir al ion Mg en la molécula de clorofila, disminuyendo la actividad fotosintética. También reduce la absorción y transporte de nitratos y puede provocar clorosis e hinchazón en algunos órganos debido a una deficiencia en hierro, fosfatos o por la reducción del transporte de Mn. (Huaraca-Fernandez *et al.*, 2020; Pilco, 2020).

2.7. Marco normativo

De acuerdo con el Decreto Supremo N° 011-2017-MINAN que señala los estándares de calidad ambiental (ECA) para suelos, presenta las concentraciones máximas de los contaminantes tanto orgánicos como inorgánicos para suelos comerciales, residenciales y agrícolas. En este reglamento se dispone que los suelos agrícolas deben contener una concentración de cadmio por debajo de $1,4 \text{ mg.kg}^{-1}$ de suelo.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

3.1.1. Ubicación política

El trabajo se desarrolló en el Laboratorio de Calidad de Suelos, de la Facultad de Recursos Naturales Renovables “Universidad Nacional Agraria de la Selva”, ubicado a 1.5km de la carretera Tingo María-Huánuco. Políticamente ubicado en la ciudad de Tingo María, distrito de Rupa Rupa, provincia de Leoncio Prado, Región Huánuco.

3.1.2. Ubicación geográfica

Geográficamente el Laboratorio de Calidad de Suelos está ubicado en las coordenadas UTM 390638 m E y 8970150 m N; a una altitud de 668 m.s.n.m. dentro del empalme Tingo María hoja 19-k de la Carta Nacional del Instituto Geográfico Nacional, correspondiente a la Región Selva (Figura 9).

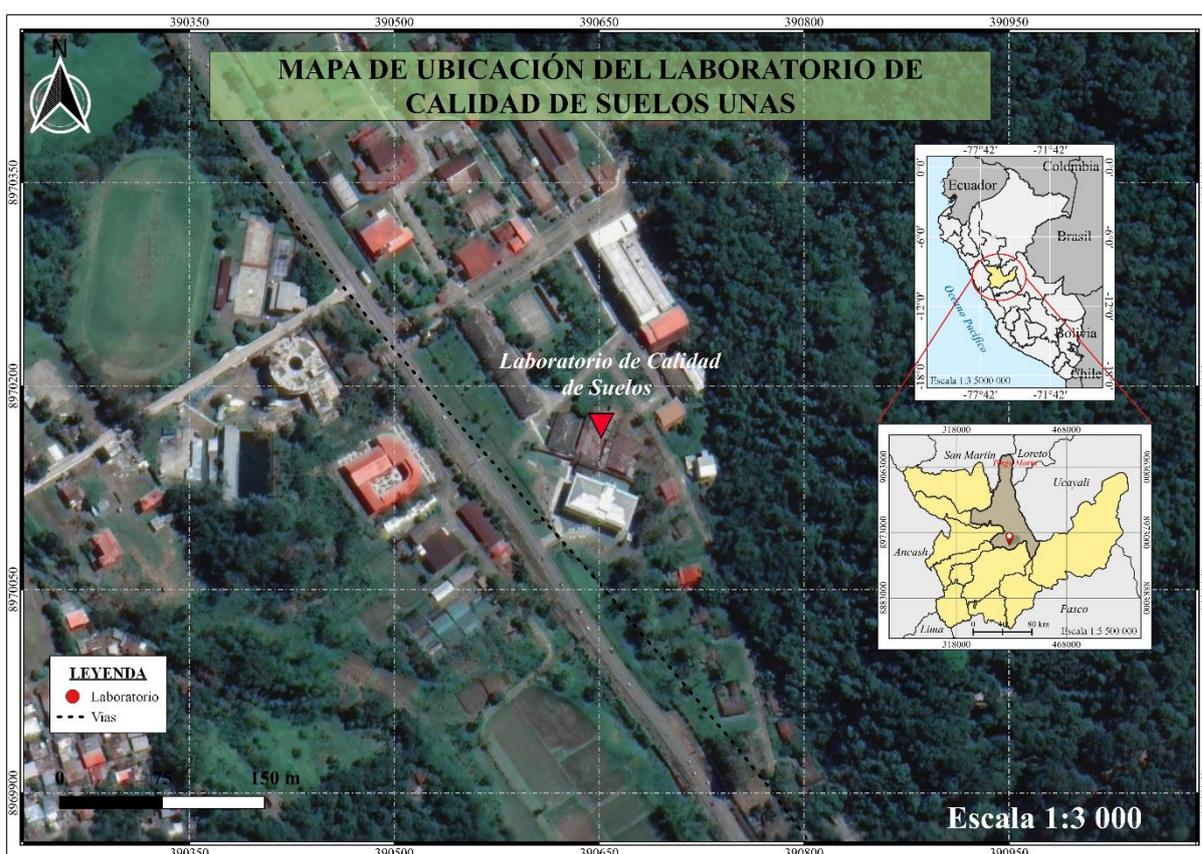


Figura 9. Mapa de ubicación del Laboratorio de Calidad de Suelos UNAS

3.1.3. Aspectos ambientales de Tingo María

Tingo María se encuentra en la formación vegetal bosque muy húmedo Pre-montano Tropical bmh-PT de acuerdo a la clasificación de zonas de vida de Holdridge (1982), y de acuerdo a las regiones naturales del Perú corresponde a Rupa Rupa o Selva Alta. Asimismo, pertenece a la cuenca del río Huallaga; con características climáticas como precipitación pluvial media anual de 3155 mm, temperatura máxima de 30,2°C y mínima de 21°C (Estación Climática Principal Tingo María, 2018).

3.2. Materiales y equipos

3.2.1. Materiales biológicos

Cáscaras de *Musa paradisiaca* L. (var. Bellaco) “plátano”, suelo con alto contenido en cadmio, semillas de *Lactuca sativa* (Lechuga).

3.2.2. Materiales de campo

Botas de jebe, chaleco, guantes de látex, costal, pico, wincha, machete, pala, cubetas de 5 L, GPS y cámara fotográfica.

3.2.3. Materiales de laboratorio

Tela cuadrillé, balde de 25L, matraces de Erlenmeyer, vasos de precipitación, probetas, buretas, embudos de vidrio, piseta, pipeta de 10 mL, pinzas, crisoles, mortero, placas Petri de 150 mm, papel filtro, barcos de porcelana, regla, y guantes de protección térmica, mascarilla de gases y guardapolvo.

3.2.4. Reactivos

Ácido nítrico concentrado (HNO₃), alcohol de 96°, cloruro de calcio, etanol, rojo fenol, hidróxido de sodio al 0,1 y 0,25 N (NaOH), fenolftaleína al 1%, ácido clorhídrico al 0,25 N (HCl).

3.2.5. Equipos

Cocina industrial, termómetro digital tipo k, pH-metro, centrifugadora, molino industrial, estufa, mufla, campana de extracción de gas, balanza analítica, agitador magnético, microscopio electrónico de barrido (MEB) Phenom ProX, Espectrofotómetro de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES)/HORIBA-Ultima Expert.

3.2.6. Programas

Microsoft Office vers. 2017 (Word, Excel y Power Point), RStudio (vers. 2022.07.1) y QGis (vers.3.16.3).

3.3. Metodología

3.3.1. Tipo y nivel de investigación

3.3.1.1. Tipo de investigación

Aplicado, porque se recurrió a las ciencias biológicas y ambientales para solucionar el problema del efecto de la aplicación de la pectina de cáscara de plátano en la adsorción de cadmio en el suelo.

3.3.1.2. Nivel de investigación

Experimental, porque se busca determinar del efecto de la manipulación de la variable independiente (dosis de pectina) sobre la variable dependiente (cadmio en el suelo) en una situación de control (a nivel de laboratorio) (Hernández-Sampieri y Mendoza, 2018).

3.3.2. Población y muestra

3.3.2.1. Población

La población estuvo compuesta por todo el suelo con contenido de cadmio de un fundo cacaotero en Picuruyacu Alto, distrito de Castillo Grande, provincia de Leoncio Prado en el año 2022, ubicado aproximadamente a 387248,2 m E y 8974451,7 m N.

Se tuvo como criterio de inclusión los estudios realizados por C. Silva (2018) y M. Silva (2021), quienes reportaron que estos suelos presentan valores de 2,3 y 2,07 mg.kg⁻¹; así como 1,7 y 0,973 mg.kg⁻¹ de Cd total y Cd disponible respectivamente; valores que superan el ECA en suelos agrícolas de 1,4 mg.kg⁻¹ (MINAM, 2014).

3.3.2.2. Muestra

Se tomó como muestra compuesta, 20 porciones de suelo obtenidos de un fundo cacaotero en Picuruyacu Alto, en el año 2022 (ver Anexo A del Apéndice 3).

Muestreo: El tipo de muestreo es aleatorio simple, recomendado para áreas homogéneas menores a 5 ha (MINAM, 2014), porque cualquiera de los puntos de muestreo de suelo puede ser tomados en la muestra compuesta (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018).

3.3.3. Variables de estudio

a) Variable dependiente:

Y = Cadmio en el suelo

b) Variable independiente:

X = Pectina de cáscara de *Musa paradisiaca*.

3.3.3.1. Indicadores

a) Indicador de la variable dependiente:

Y_1 = Cadmio disponible (mg/kg)

Y_2 = Potencial de hidrógeno (pH)

Y_3 = Conductividad eléctrica en suelo ($\mu\text{S}/\text{cm}$)

Y_4 = Sólidos Totales Disueltos (mg/L)

b) Indicadores de a variable independiente:

X_1 = Pectina al 0% (0 g.kg⁻¹)

X_2 = Pectina al 2% (20 g.kg⁻¹)

X_3 = Pectina al 4% (40 g.kg⁻¹)

X_4 = Pectina al 6% (60 g.kg⁻¹)

X_5 = Pectina al 8% (80 g.kg⁻¹)

X_6 = Pectina al 10% (100 g.kg⁻¹)

3.3.4. Diseño de investigación

3.3.4.1. Tipo de diseño

Se empleó un Diseño Completamente al Azar de estímulo creciente, mediante el cual se realizó comparaciones entre 5 diferentes concentraciones de pectina (T_1 : 20 g/kg, T_2 : 40 g/kg, T_3 : 60 g/kg T_4 : 80 g/kg y T_5 : 100 g/kg) en determinada cantidad de suelo (300g), teniéndose cinco tratamientos, un testigo y en forma seriada (cinco repeticiones). Evaluándose de tal manera la eficiencia de la adsorción (EFA) según el siguiente esquema:

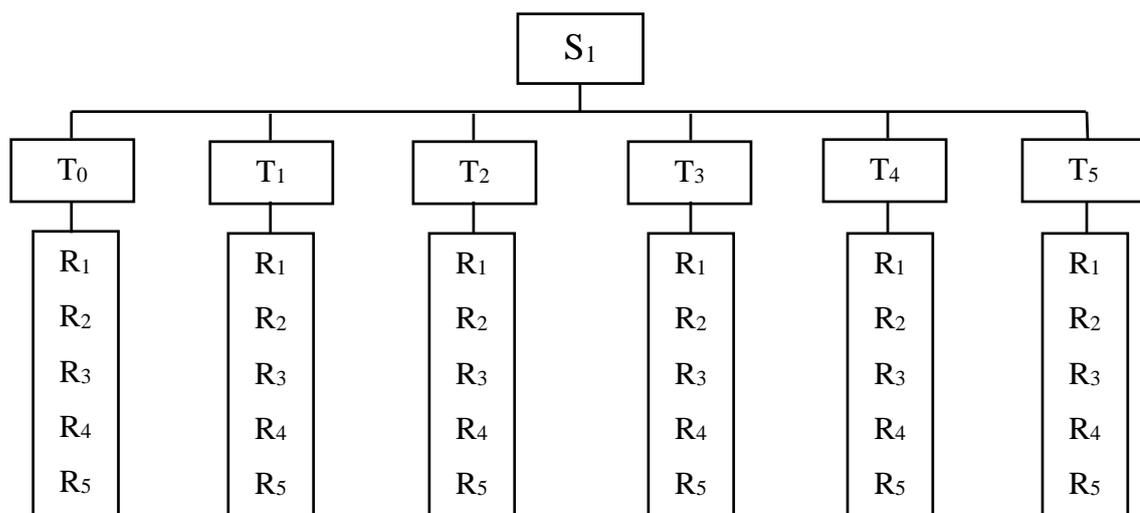


Figura 10. Diseño experimental del estudio

Leyenda:

[S1] : suelo con alto contenido de cadmio,

[T0] : testigo (0%),

[T1] : Concentración de pectina 20 g.kg-1 (2%),

[T2] : Concentración de pectina 40 g.kg-1 (4%),

[T3] : Concentración de pectina 60 g.kg-1 (6%),

[T4] : Concentración de pectina 80 g.kg-1 (8%),

[T5] : Concentración de pectina 100 g.kg-1 (10%),

[R1, R2, R3, R4, R5] : repeticiones

3.3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de información

3.3.5.1. Para la revisión bibliográfica

A. Técnicas bibliográficas

- a) Fichaje para recopilar los elementos bibliográficos (revistas científicas y repositorios).
- b) Análisis de contenidos para elaborar el sustento teórico (bases teóricas).

B. Instrumentos bibliográficos

- a) Fichas de registro: (Autor, año de publicación, título, subtítulo, edición, mención de autor secundario, ciudad de publicación, país de publicación, editorial, paginación, (serie) y notas).
- b) Fichas de documentación e investigación. De resumen, transcripción y comentario.

3.3.5.2. Para las actividades de campo

A. Técnicas de campo

- a) Observación directa e indirecta.
- b) Obtención de submuestras

B. Instrumentos de campo

- a) Libreta de campo
- b) Registro de submuestras

3.3.5.3. Para el análisis estadístico

A. Técnicas estadísticas

Se empleó la estadística descriptiva, la presentación de datos será mediante gráficas, tablas y figuras que muestren la respuesta de la aplicación de pectina sobre el suelo con cadmio.

B. Instrumentos estadísticos

El procesamiento de datos se realizó mediante el software RStudio vers. 2022.07.1, el cual permitió analizar los datos de acuerdo a los objetivos establecidos (ver Anexo B del Apéndice 1).

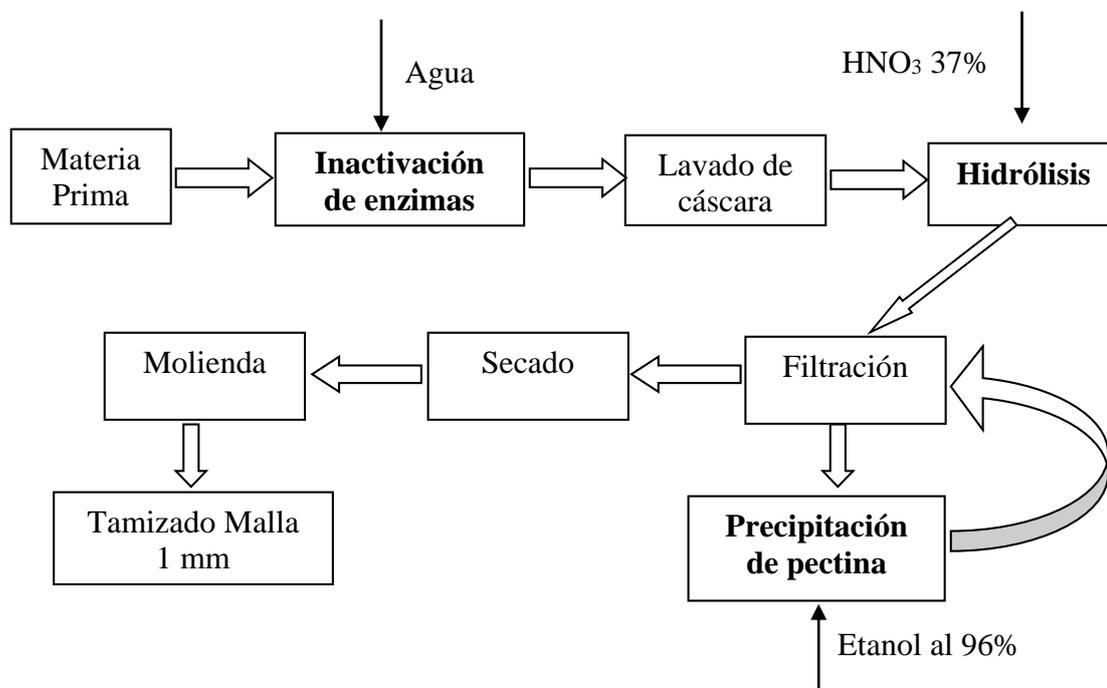
3.3.6. Caracterización de la pectina de las cáscaras de *Musa paradisiaca* L. (var. Bellaco)

A. Recolección de cáscaras de *Musa paradisiaca* L. (var. Bellaco)

Se recolectaron las cáscaras de plátano generadas en los diferentes puntos de venta de las tacacherías de la ciudad de Tingo María, donde se seleccionaron en fresco procedente de los frutos más sanos, sin materias extrañas o presencia de hongos. Se colocaron las cáscaras en costales y luego fueron sellados para prevenir la acción de microorganismos mientras eran transportadas al Laboratorio de Calidad de Suelos de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.

B. Obtención de la pectina

La obtención de la pectina fue realizada siguiendo el procedimiento descrito por Gamboa (2009) en la Figura 11.



Fuente: Calderon (2018)

Figura 11. Diagrama de flujo general de la preparación del polímero (pectina)

a. Inactivación de enzimas pécticas

Las cáscaras de plátano fueron cortadas en trozos de un 1cm² aproximadamente, luego se sumergieron en agua destilada en una relación de 3 L por cada kg de cáscara a una temperatura de 93°C durante 5 minutos; posterior a la ebullición se realizaron lavados sucesivos con agua fría. Al término, se descartó el exceso de agua empleando un colador y luego fueron lavadas con agua destilada decantándose la mayor cantidad de agua.

b. Hidrólisis ácida

A la materia prima cortada se le adicionó agua destilada, previamente acidificada hasta alcanzar un pH de 1,5 con ácido nítrico, mediante la relación de 2L por cada 1kg de cáscara. Dicha mezcla se llevó a una temperatura de 60 a 80°C con agitación constante durante 40 a 60 minutos.

c. Filtrado

La solución hidrolizada se enfrió a 20°C y empleando una tela cuadrillé se filtró el material sólido del líquido separando el bagazo del líquido con pectina.

d. Precipitación de la pectina

A la solución péctica resultante se le incorporó alcohol al 96° en una proporción del 60%, dicha mezcla se dejó en reposo por 24 horas a temperatura ambiente.

e. Secado y molienda

La pectina precipitada fue llevada a una centrifugadora en unos 6000 rpm por 25 minutos para separar el alcohol restante; la pectina coagulada se colocó en una placa petri para su secado en estufa a 45°C por 24 horas aproximadamente, hasta peso constante. La pectina parcialmente seca se trituró en un mortero y luego en un molino industrial, obteniéndose el polímero con partículas de 1 mm de diámetro aproximadamente.

C. Análisis de las propiedades fisicoquímicas de la pectina

Se consideró determinar algunos parámetros físicos y químicos valorados por el Food Chemicals Codex (FCC) para pectinas comerciales (Toyo-Díaz *et al.*, 2021). Posteriormente se evaluó si la calidad de la pectina obtenida está relacionada con los parámetros que se detallan a continuación:

a. Rendimiento

Se determinó el porcentaje de pectina extraída del total de cáscara empleada en el proceso de hidrólisis, para ello se empleó la Ecuación (1):

$$Pectina (\%) = \frac{g \text{ de pectina obtenida}}{g \text{ de cáscara}} \times 100 \quad (1)$$

b. Humedad

Se colocó 5 g de pectina obtenida en un crisol y por el método de estufa a presión atmosférica se llevó a secar a 105°C durante 24 horas o hasta peso constante, luego se registró el peso final y en relación con la sustancia húmeda inicial se determinó el porcentaje de humedad mediante la Ecuación (2):

$$\text{Humedad (\%)} = \frac{\text{Peso inicial} - \text{Peso final}}{\text{Peso inicial}} \times 100 \quad (2)$$

c. Cenizas totales

Según el método propuesto por Hart *et al.* (1984, como se citó en Calderon, 2018) para determinar el contenido de cenizas totales, se pesó 2 g de la muestra de pectina y se colocó en un crisol previamente secado, luego se calentó con mechero y se dejó en una campana desecadora a fin del desprendimiento de humos. Se retiró el crisol y se dejó dentro de la mufla a 550°C durante 6 horas hasta que las cenizas adquirieron un color blanco o grisáceo. Finalizado el tiempo se dejó enfriar por 1 hora en un desecador con cloruro de calcio y se registró el peso final. El porcentaje de cenizas totales se calculó mediante la Ecuación (3):

$$\text{Ceniza (\%)} = \frac{P_f - P_i}{M} \times 100 \quad (3)$$

P_f : Peso del crisol después de 550°C (g)

P_i : Peso del crisol a peso constante (g)

M : Peso de la muestra (g)

d. Peso equivalente

Según el método de valoración ácido-base descrito por Owens *et al.* (1952), se pesó 500 mg de pectina en un matraz de 250 ml, luego se humedeció con 5 ml de etanol absoluto. Posterior a ello se añadió un volumen de 100 ml de agua destilada y 6 gotas del indicador rojo fenol, se agitó y revisó que la pectina se disolvió completamente notándose un color amarillo. La solución obtenida se tituló lentamente con NaOH 0,1 N, hasta virar a púrpura rojizo. Se registra la relación de los miligramos de componente ácido (pectina) y los miliequivalentes de NaOH gastados en la valoración, determinándose el peso equivalente mediante la Ecuación (4):

$$\text{Peso equivalente} = \frac{\text{mg de pectina}}{\text{meq NaOH}} \quad (4)$$

e. Acidez libre

Según el método descrito por Owens *et al.* (1952), se preparó la solución de 0,5 g de pectina extraída, se le agregó 25 ml de agua destilada, se agregó 5 gotas de fenolftaleína al 1% como indicador, luego en una bureta se llenó una solución de hidróxido de sodio a 0,1 N; posteriormente se mezcló esta solución en una plancha de agitación unos 30 minutos y finalmente se tituló gota a gota con el NaOH a 0,1 N, cuando apareció un viraje rosa pálido se cerró la llave de la bureta, para luego tomar la lectura del volumen gastado en la titulación. Se calculó la acidez libre aplicando la Ecuación (5):

$$\text{Acidez libre (\%)} = \frac{\text{meq NaOH}}{\text{g de la muestra}} \times 100 \quad (5)$$

f. Contenido de metoxilo

Se determinó según la técnica sustentado por Owens *et al.* (1952). Se utilizó la solución que quedó de la valoración del peso equivalente, que continua con 500 mg de pectina, se le adicionó 12,5 ml de NaOH 0,25 N, se agitó en la plancha agitadora por 10 minutos y se dejó en reposo por 30 minutos, cubierto y a temperatura ambiente. Se adicionó 12,5 ml de HCl 0,25 N; para luego proceder a la titulación con NaOH 0,1 N, tomando como punto final de la titulación un pH 7.5 o una coloración rojiza. Se empleó la Ecuación (6):

$$\text{Metoxilo (\%)} = \frac{\text{meq} \times 31 \times 100}{\text{mg componente ácido}} \quad (6)$$

g. Grado de esterificación

Se realizó según el método de (Owens et al.1952), donde los meq A equivalen a los miliequivalentes de NaOH consumidos en la determinación de la acidez dividido entre los meq B que son los miliequivalentes de NaOH gastados en la determinación del contenido de metoxilo (Ecuación 7).

$$\text{Grado de esterificación (\%)} = \frac{\text{meq B}}{(\text{meq A} + \text{meq B})} \times 100 \quad (7)$$

h. Contenido de ácido anhidrogalacturónico

Para su determinación se empleó los datos obtenidos del peso equivalente y el contenido de metoxilo, mediante el método de valoración descrito por Owens *et al.* (1952, como se citó en Calderon, 2018) en la Ecuación (8).

$$\% \text{AGA} = \frac{176 \times 100 \times (\text{meq A} + \text{meq B})}{1000} \quad (8)$$

D. Análisis de microfotografía electrónica de la pectina

Se llevaron muestras de pectina para analizarlas en el microscópico electrónico de barrido del Laboratorio Central de Investigación de la UNAS. Donde permitió la observación y caracterización superficial de materiales orgánicos e inorgánicos, detallándose sus características estructurales microscópicas del polímero, el cual consistió en un haz fino de electrones (de hasta 40 kV) que es enfocado y barrido sobre la superficie de la muestra.

E. Análisis del espectro infrarrojo (FTIR) de la pectina

Se llevaron muestras de pectina para analizarlas en el espectrofotómetro de radiación infrarroja del Laboratorio Central de Investigación de la UNAS. Se aplicó para la identificación de grupos funcionales superficiales orgánicos, lo que es importante para conocer de manera general la estructura química del biosorbente. A través de la técnica de reflectancia total atenuada (ATR), se comenzó mezclando la muestra de pectina pulverizada con KBr en un molde para formar unas pastillas translúcidas, que luego se colocaron en el espectrofotómetro marca InfraLUM, de referencia FT-08 (Espectrómetro Infrarrojo por Transformada de Fourier). El espectro que se obtuvo fue de 30 barridos con una ventana espectral entre 550 a 4000 cm^{-1} de longitud de onda y una resolución de 4,00 cm^{-1} .

3.3.7. Evaluación del efecto de la pectina sobre las características fisicoquímicas del suelo con cadmio

A. Recolección de suelo con cadmio

Las muestras de suelos fueron tomadas de un fundo cacaotero ubicada en Picuruyacu Alto, del distrito de Castillo Grande, provincia de Leoncio Prado, región Huánuco, donde se extrajo muestras de suelo con contenido de cadmio de una extensión de 4,5 hectáreas aproximadamente.

La toma de muestras de suelo se realizaron mediante los métodos de campo y procedimientos descritos en la Guía de muestreo de suelos (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2014), en el marco de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelos, el cual señala que al aplicar el muestreo aleatorio simple es apropiado para áreas homogéneas inferiores a cinco hectáreas lo cual garantiza que cada punto tenga la misma probabilidad de ser seleccionado.

Se extrajeron 20 porciones de suelo (submuestras) tomadas al azar, considerando las especificaciones para un suelo agrícola como una determinada distancia; una profundidad de 0 a 30 cm y una trayectoria en zigzag, de tal forma que la muestra superficial sea representativa. Luego las submuestras fueron mezcladas y homogenizadas hasta obtener

una muestra superficial compuesta por el método del cuarteo, al que posteriormente se realizó un análisis fisicoquímico y contenido de cadmio inicial (cadmio disponible y total).

B. Aplicación de la pectina

Cada unidad experimental estuvo compuesta por 300 g de suelo con cadmio a las cuales se aplicaron pectina en porcentajes de 2%, 4%, 6%, 8% y 10% (6 g, 12 g, 18 g, 24 g y 30 g respectivamente) del peso de suelo a tratar, posteriormente fueron mezclados homogéneamente. El suelo con pectina fue acondicionado en vasijas de porcelana, considerando el testigo únicamente con suelo.

Se procedió a humedecer con agua destilada dicha mezcla del sustrato suelo-pectina hasta que el suelo alcance su capacidad de cambio, para ello realizamos la prueba de puño hasta que no exista un excedente de agua.

Todas las unidades experimentales fueron acondicionadas en una cámara de germinación donde se expusieron a fotoperiodos de 12 horas de luz y periodos de riego cada 24 horas durante 4 semanas (30 días).

C. Análisis fisicoquímico

En cada semana se tomaron 10 g de suelo de cada unidad experimental que posteriormente fueron diluidas en 100 ml de agua destilada y reposadas por 10 minutos, finalmente con ayuda de un multiparámetro se midieron los parámetros de pH, conductividad (uS/cm) y sólidos totales disueltos (mg/l).

3.3.8. Determinación del efecto de la pectina sobre el cadmio disponible (Cd^{+2}) en el suelo

Concluido las cuatro semanas de tratamiento se sacaron muestras de suelo de cada tratamiento, 100 gramos de suelo de cada unidad experimental que posteriormente fueron llevadas al Laboratorio de Investigación de la Universidad Nacional Agraria de la Selva para analizar los niveles de cadmio total y cadmio disponible.

A. Eficiencia de la adsorción de cadmio

Se calculó mediante una correlación porcentual entre la concentración inicial y final de Cd presente en cada repetición, según el tratamiento del mismo; mediante la Ecuación (9):

$$E_{rCd} (\%) = \frac{(C_i - C_f)}{C_i} \times 100 \quad (9)$$

Dónde:

E_{rCd} : Eficiencia de la adsorción de cadmio (%)

C_i : Concentración inicial de Cd en el suelo (mg/kg)

C_f : Concentración final de Cd en el suelo (mg/kg)

B. Capacidad de adsorción de cadmio

La capacidad de adsorción se calculará a partir de los datos experimentales en la Ecuación (10):

$$q_e = \frac{(C_i - C_f)}{m} \times M \quad (10)$$

Dónde:

q_e : Capacidad de adsorción de cadmio (%)

C_i : Concentración inicial de Cd ($\mu\text{g}/\text{kg}$)

C_f : Concentración final de Cd ($\mu\text{g}/\text{kg}$)

M : Masa de suelo a tratar (kg)

m : Cantidad de pectina (g)

3.3.9. Determinación del efecto fitotóxico del suelo tratado con pectina en *Lactuca sativa*

Se empleó una prueba de germinación en semillas de *Lactuca sativa* (Lechuga) donde se aplicaron una solución de suelo tratado con pectina, para lo cual se realizó lo siguiente:

a. Acondicionamiento de las semillas

En placas Petri de vidrio de 150 mm de diámetro se colocaron un papel filtro N°40 en cada una de ellas, luego se distribuyeron de manera homogénea 10 semillas de *Lactuca Sativa* (lechuga) sobre cada placa, dejando el espacio suficiente para que las raíces se extiendan.

b. Preparación y aplicación de las diluciones del suelo tratado

Se preparó una muestra compuesta y homogénea por cada tratamiento de suelo, para ello se extrajeron 10 g de suelo de cada repetición, del cual se obtuvo por cuarteo solo 10 g de suelo. Posteriormente se preparó una solución madre con relación 1/10 (10 g de suelo en 100 ml de agua destilada), que luego se agitó por 30 minutos y se filtraron con papel filtro número 40 (Figura 12).

De la solución madre se prepararon soluciones en dosis de 0, 10, 20 y 30%, para luego ser aplicadas con un volumen de 10 ml, sobre las placas previamente acondicionadas con las semillas, en series de tres repeticiones por cada dosis. Asimismo, se

empleó un grupo control con semillas a las que se le aplicaron únicamente agua destilada (Figura 12).

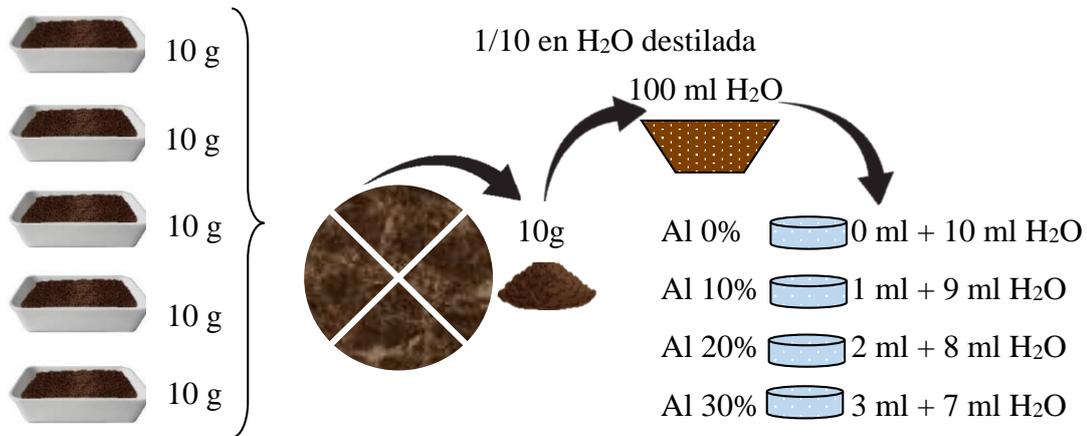


Figura 12. Preparación de las diluciones del suelo tratado con pectina

Las placas aplicadas fueron dispuestas en una cámara de germinación donde se expusieron a fotoperiodos de 12 horas de luz con temperatura de 24 ± 3 °C y de ser necesario se debieron humedecer para que las semillas permanezcan siempre húmedas durante un periodo de evaluación de una semana.

c. Análisis fitotóxico

Se evaluó las características de respuesta de las semillas germinadas frente a las diluciones de suelo tratado, por ende, se determinó el número de semillas germinadas a los dos días y la longitud radicular al completar la semana de evaluación, para obtener el índice de germinación mediante las Ecuación (11), (12) y (13):

$$PGR = \frac{\text{Número de semillas germinadas en el extracto}}{\text{Número de semillas germinadas en el testigo}} \times 100 \quad (11)$$

$$CRR = \frac{\text{Elongación radicular en extracto}}{\text{Elongación de radicular en el testigo}} \times 100 \quad (12)$$

$$IG = \frac{PGR \times CRR}{100} \quad (13)$$

Donde:

PGR : Porcentaje de germinación relativa (%)

CRR : Crecimiento Radicular Relativo (%)

IG : Índice de Germinación (%)

Asimismo, se determinó el peso de las plántulas antes y después de llevarlas a la estufa por 24 horas a 105°C, para obtener porcentaje de biomasa generada empleando la Ecuación (14):

$$B_m = \frac{(P_f - P_s)}{P_c} \times 100 \quad (14)$$

Donde:

B_m : Biomasa generada (%)

P_f : Peso fresco de la muestra (mg)

P_s : Peso seco de la muestra (mg)

P_c : Peso del control (mg)

3.3.10. Análisis estadístico

A. Análisis para la selección de la prueba estadística de comparación de medias

Para elegir la prueba estadística que se empleó en la comparación de medias, primero se comprobó si los residuos de los datos presentaban Normalidad, Homocedasticidad, Independencia y Linealidad mediante los siguientes pasos:

a) Prueba de Normalidad

1) Planteamiento de hipótesis:

H_o : Los residuales de los tratamientos presentan distribución normal

H_a : Los residuales de los tratamientos no presentan distribución normal

2) Establecer el nivel de significancia: 95%; $\alpha = 0,05$

3) Estadístico de prueba: Prueba de Shapiro-Wilk

4) Toma de Decisión:

p-valor $> \alpha$, aceptamos la hipótesis nula (H_o)

p-valor $\leq \alpha$, aceptamos la hipótesis alternante (H_a)

5) Conclusión

b) Prueba de Homocedasticidad

1) Planteamiento de hipótesis

H_o : $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2 = \sigma_4^2 = \sigma_5^2$ (Las varianzas son iguales)

H_a : $\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2 \neq \sigma_3^2 \neq \sigma_4^2 \neq \sigma_5^2$ (Las varianzas no son iguales)

2) Establecer el nivel de significancia: 95%; $\alpha = 0,05$

3) Estadístico de prueba: Prueba de Levene.

4) Toma de Decisión:

p-valor $> \alpha$, aceptamos la hipótesis nula (H_0)

p-valor $\leq \alpha$, aceptamos la hipótesis alternante (H_a)

5) Conclusión**c) Prueba de Independencia****1) Planteamiento de hipótesis**

$H_0: \rho = 0$ (Existe independencia entre las variables)

$H_a: \rho \neq 0$ (No existe independencia entre las variables)

2) Establecer el nivel de significancia: 95%; $\alpha = 0,05$ **3) Estadístico de prueba: Prueba de Durbin-Watson****4) Toma de decisión:**

p-valor $> \alpha$, aceptamos la hipótesis nula (H_0)

p-valor $\leq \alpha$, aceptamos la hipótesis alternante (H_a)

5) Conclusión**d) Prueba de Linealidad****1) Calcular la media de los errores residuales****2) Decisión**

$\mu_e \cong 0$, existe linealidad en los residuos de los tratamientos

$\mu_e \neq 0$, no existe linealidad en los residuos de los tratamientos

3) Conclusión**B. Modelo aditivo lineal (DCA)**

El análisis del efecto en los tratamientos fue mediante el siguiente modelo:

$$Y_{ik} = \mu + S_i + \varepsilon_{ik} \quad (15)$$

Donde:

Y_{ik} : Respuesta obtenida en la k-ésima observación del suelo a la cual se le aplicó el i-ésimo tratamiento

μ : Efecto de la media general

S_i : Efecto del i-ésimo tratamiento de suelo

ε_{ik} : Efecto aleatorio del error experimental

Para:

$i = 0, 1, 2, 3, 4, 5$: Tratamientos al suelo

$k = 1, 2, 3, 4, 5$: Observaciones

C. Análisis para la comparación de medias y contrastes Post-hoc

Posteriormente, se realizó la comparación de medias y mediante pruebas paramétricas o no paramétricas:

a) ANOVA / Kruskal-Wallis

1) Planteamiento de hipótesis

$H_0: T_0 = T_1 = T_2 = T_3 = T_4 = T_5$ (No hay diferencias entre las medias)

$H_a: T_0 \neq T_1 \neq T_2 \neq T_3 \neq T_4 \neq T_5$ (Al menos un par de las medias son diferentes)

2) Establecer el nivel de significancia: 95 y 99%, $\alpha = 0,05$ ó $\alpha = 0,01$.

3) Estadístico de prueba: se empleó la prueba estadística F de Fisher en el ANOVA y la prueba H para Kruskal-Wallis (Tabla 4 y 5).

4) Toma de decisión:

p-valor $> \alpha$, aceptamos la hipótesis nula (H_0).

p-valor $\leq \alpha$, aceptamos la hipótesis alternante (H_a).

5) Conclusión

Tabla 4. Diseño de análisis de varianza de un factor

Fuente de variación	SC	GL	CM	Fc	Sig.
Tratamientos	$SCA = \sum_{j=1}^k (X_j - \bar{X}_j)^2$	$GL_A = k - 1$	$CMA = SCA/GL_A$	CMA/CME	
Error	$SCE = \sum_{j=1}^k (X_j - \bar{X})^2$	$GL_E = n - k$	$CME = SCE/GL_E$		
Total	$SCT = \sum_{j=1}^n (X_j - \bar{X})^2$	$GL_T = n - 1$			

Tabla 5. Diseño para la prueba de Kruskal-Wallis

Variable	Tratamientos	n	Medias	DE	GL	H (chi2)	P valor
	T0						
	T1						
	T2						
	T3						
	T4						
	T5						

Asimismo, para saber que medias son diferentes se empleó los contrastes Post-hoc según la prueba empleada:

b) Prueba Post-hoc

1) Planteamiento de hipótesis:

H_o : Las medias de los tratamientos son iguales

H_a : Las medias de los tratamientos son diferentes

2) Establecer el nivel de significancia: 95%, $\alpha = 0,05$.

3) Estadístico de prueba: se empleó la prueba Tukey HSD en el ANOVA y la prueba Mann-Whitney para Kruskal-Wallis (Tabla 6).

4) Toma de decisión:

p-valor $> \alpha$, aceptamos la hipótesis nula (H_o).

p-valor $\leq \alpha$, aceptamos la hipótesis alternante (H_a).

5) Conclusión

Tabla 6. Diseño para la prueba de Tukey HSD

Tratamiento	Diferencias	Límite inferior	Límite superior	p-valor
T1-T0				
T2-T0				
T3-T0				
T4-T0				
T5-T0				

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Caracterización de la pectina de las cáscaras de *Musa paradisiaca* L. (var. Bellaco)

4.1.1. Análisis de las propiedades fisicoquímicas de la pectina

La pectina fue obtenida a partir de cáscaras de *Musa paradisiaca* L. (var. Bellaco) que fueron recolectadas de los restaurantes (tacacherías) de la ciudad de Tingo María; asimismo, se registró el análisis fisicoquímico de tres muestras del polímero para analizar su calidad (Tabla 7).

Tabla 7. Caracterización fisicoquímica de la pectina de cáscara de plátano

Parámetro fisicoquímico	Muestra			Promedio
	MP-1	MP-2	MP-3	
Rendimiento (%)	8,50	7,20	9,40	8,37
Humedad (%)	8,40	11,20	10,10	9,90
Cenizas totales (%)	0,95	1,08	1,03	1,02
pH	3,40	4,20	3,70	3,77
Peso equivalente (mg/meq)	781,3	387,6	561,8	576,9
Acidez libre (meq/g)	1,38	1,52	1,62	1,51
Contenido de metoxilo (%)	7,39	7,15	6,82	7,12
Grado de esterificación (%)	56,3	52,2	51,8	53,4
Ácido Galacturónico (%)	53,9	74,6	62,0	63,5

La obtención del polímero presentó un rendimiento de 8,37%, es decir, por cada kilogramo de cáscara de plátano se obtuvo 83,7 g de pectina (Tabla 7). Este valor es menor a lo reportado por Lai *et al.* (2022), Toyo-Díaz *et al.* (2021), Khamsucharit *et al.* (2018) y Vega (2017) debido a que emplearon otros ácidos como extractantes del polímero; sin embargo, Valencia (2019) a pesar de haber usado ácido nítrico (HNO₃) tuvo un rendimiento del 54% porque aplicaron un menor tiempo en la hidrólisis ácida. Por otro lado, el rendimiento obtenido superó a lo reportado por Ramos *et al.* (2016) y Ramos *et al.* (2018) quienes emplearon ácido cítrico (C₆H₈O₇) como extractante, corroborando que los ácidos inorgánicos aportan un mayor rendimiento. No obstante, el rendimiento obtenido se encuentra dentro del rango señalado por Cabarcas *et al.* (2012) quienes obtuvieron un rendimiento del 7,53 al 23,06% en hidrólisis ácida con pH de 1,5 (HNO₃) y temperatura de 60 a 80°C, condiciones similares a este estudio.

El polímero extraído tuvo un 9,9% de humedad (Tabla 7), similar a las pectinas obtenidas por Vega (2017) y Cabarcas *et al.* (2012) con un 4,38% y 12% respectivamente, encontrándose en el rango aceptable menor al 12% lo cual garantiza su conservación. Por lo tanto, el polímero obtenido fue estable y tuvo una mínima probabilidad tanto del crecimiento de microorganismos como de la producción de enzimas pectinasas que pueden degradar el polímero (Mantilla, 2020).

Las cenizas totales del polímero fueron de 1,02% (Tabla 7), probablemente por la cantidad de minerales que contenían las cáscaras de las que se extrajo el polímero (Cabarcas *et al.*, 2012). Asimismo, este valor es similar a las cenizas totales que reportaron Vega (2017), Cabarcas *et al.* (2012) y Arellanes *et al.* (2011) del 1,24% y 3,5% y 0,91% respectivamente; siendo indicador de que el polímero obtenido puede formar geles.

El peso equivalente del polímero fue de 576,9 mg/meq (Tabla 7), encontrándose dentro del rango de 510-675 mg/meq señalado por Cabarcas *et al.* (2012) y similar a los 462,96 mg/meq encontrados por Lai *et al.* (2022); sin embargo, no concuerda con lo reportado por Arellanes *et al.* (2011) debido a que emplearon ácido cítrico en la hidrólisis ácida, lo cual degrada en menor medida la pectina durante la hidrólisis ácida (Mantilla, 2020).

Además, el polímero presentó una acidez libre de 1,51 meq/g (Tabla 7), concordando con Vega (2017) y Cabarcas *et al.* (2012), quienes obtuvieron acidez libre de 1,98 meq/g y entre 1,74 a 1,96 meq/g respectivamente; estos valores se deben por la naturaleza ácida que tiene el concentrado pectínico resultante de la adición de ácidos inorgánicos como extractantes. Esto explica el pH obtenido de 3,77 similar al rango de 2 a 3 de Arellanes *et al.* (2011), quienes también utilizaron ácido inorgánico como extractante.

El contenido de metoxilo encontrado en el polímero fue de 7,12% (Tabla 7), que al igual de lo reportado por Toyo-Díaz *et al.* (2021) de 7 a 12% y Khamsucharit *et al.* (2018) de 3,86 a 8,46%; indicaron que estas pectinas son consideradas de alto contenido de metoxilo debido a que superan el 7% de contenido de metoxilo, por lo que su gelificación se da en presencia de azúcares. Por el contrario, el contenido de metoxilo obtenido por Arellanes *et al.* (2011) con 3,23% y el rango de 1,79 a 6,88% que obtuvo Cabarcas *et al.* (2012) corresponden a polímeros de bajo metoxilo; por lo que, se pueden gelificar a causa de los grupos carboxílicos libres que pueden formar enlaces con iones divalentes, algo que también podría ocurrir en el polímero obtenido ya que todavía contenían carboxilos libres (Mantilla, 2020).

La cantidad de grupos carboxílicos esterificados o el grado de esterificación del polímero obtenido fue de 53,4% (Tabla 7), resultado que coincide con lo reportado por Lai *et al.* (2022) y Khamsucharit *et al.* (2018) con el 56,7% y 63,2%

respectivamente, valores cercanos al 50% propios de pectinas de alto metoxilo (Calderon, 2018). Asimismo, aunque los valores obtenidos por Cabarcas *et al.* (2012), Ramos *et al.* (2018), Toyo-Díaz *et al.* (2021) y Valencia (2019) entre el 89 al 97,5% sobrepasan en gran medida al 50%, y al igual que la pectina obtenida en este estudio son considerados como polímeros de alto grado de esterificación; no obstante, estos último tendrían una mayor interacción hidrofóbica y rápida gelificación (Toyo-Díaz *et al.* 2021).

La pectina obtenida tuvo un 63,5% de ácido galacturónico (AGA) (Tabla 7) y de la misma forma que lo reportado por Toyo-Díaz *et al.* (2021) con un AGA del 79%, evidencian la pureza y gran capacidad de formar geles de las pectinas extraídas, muy similares a la pectina comercial debido a que el AGA es el principal compuesto de la cadena del polímero (Arellanes *et al.*, 2011).

4.1.2. Análisis de microfotografía electrónica de la pectina

Las características microestructurales de la pectina de cáscara de *Musa paradisiaca* L. se pudieron apreciar en la imagen con ampliación de 250X en la que mostró partículas de diferentes tamaños, de formas tanto alargadas como irregulares y con una distribución aleatoria; mientras que en la ampliación a 600X se pudo observar las rupturas que tiene la superficie del polímero por las aglomeraciones de sus partículas (Figura 13).

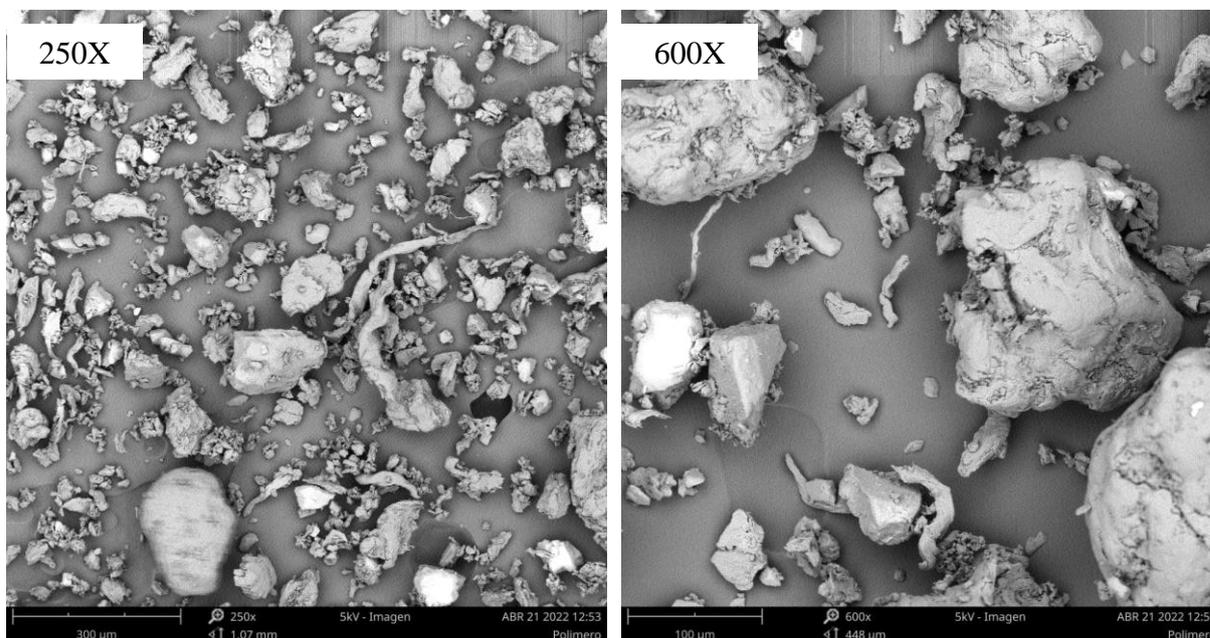


Figura 13. Microfotografías MEB a 250X y 600X de la pectina de cáscara de *M. paradisiaca* L.

Asimismo, las microfotografías con aumento de 1000X evidenció que las partículas del polímero pueden tener menos de 80 μm ; mientras que en la ampliación a 2000X mostró rasgos de porosidad y algunos quiebres en el área superficial del polímero (Figura 14), similares a la caracterización reportada por Lorenzo-Santiago *et al.*, (2020). No obstante, ambas imágenes de 1000X y 2000X (Figura 14) mostraron que el polímero tiene características micro morfológicas de una superficie corrugada y con aglomeraciones sin forma definida (Lorenzo-Santiago *et al.*, 2020). Por lo tanto, las características microestructurales identificadas confirman que el polímero extraído tiene las cualidades de una pectina.

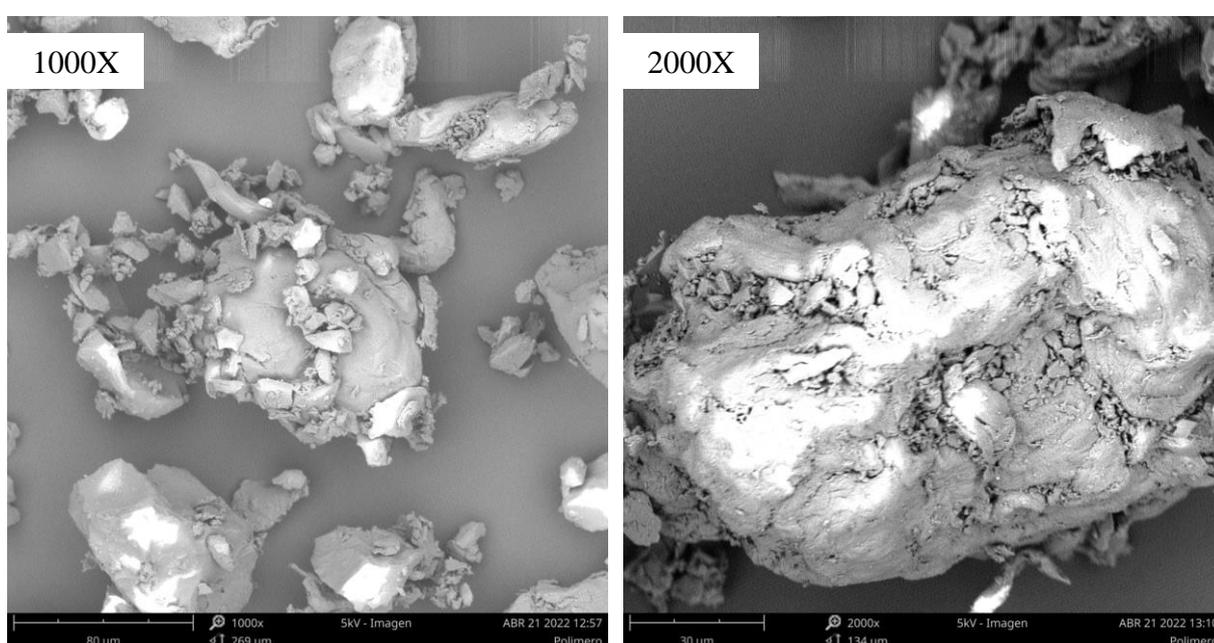


Figura 14. Microfotografías MEB a 1000X y 2000X de la pectina de cáscara de *M. paradisiaca* L.

4.1.3. Análisis del espectro infrarrojo (FTIR) de la pectina

La estructura de la superficie de la pectina de cáscara de *Musa paradisiaca* L. presentó diferentes grupos funcionales como lo evidencian las vibraciones registradas en el espectro infrarrojo por transformada de Fourier (Fourier Transform Infrared o FTIR por sus siglas en inglés) (Figura 15).

En consecuencia; en las longitudes de onda desde los 600 cm^{-1} hasta los 3400 cm^{-1} se identificaron los anillos benzoicos, el grupo carbonilo (-CO), el grupo carboxilo libre o ácido, el grupo carboxilo esterificado (-COOH), el grupo alquilo (-CH) y el grupo hidroxilo (-OH) (Tabla 8).

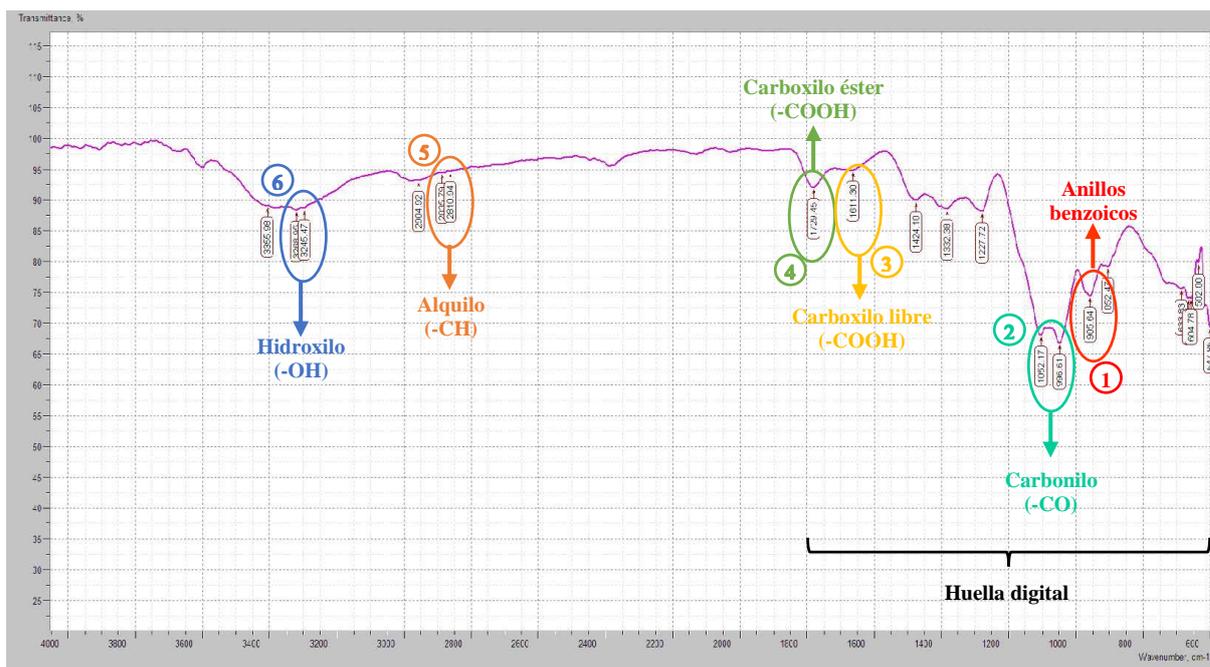


Figura 15. Espectro FTIR de la pectina de cáscara de *Musa paradisiaca* L.

Tabla 8. Longitud de onda de los grupos funcionales de la pectina

N°	Wavenumber (cm ⁻¹)	Transmittance (%)	Grupo funcional
1	905,64	74,51900	Anillos benzoicos
2	1052,17	68,16267	Carbonilo (-CO)
3	1611,30	94,99020	Carboxilo libre (-COOH)
4	1729,45	92,11308	Carboxilo esterificado (-COOH)
5	2904,92	93,24825	Alquilo (-CH)
6	3355,98	89,12067	Hidroxilo (-OH)

La banda 905,64 cm⁻¹ correspondió a los anillos benzoicos (Tabla 8), valor próximo al intervalo de onda de 700-900 cm⁻¹ en el cual Cabarcas *et al.* (2012) identificaron este grupo funcional. Esto se debe probablemente a que se manejaron condiciones semejantes en la extracción del polímero.

Asimismo, en los 1052,17 cm⁻¹ se encontró el grupo carbonilo (-CO) (Tabla 8), el cual está dentro del rango de 1000-1200 cm⁻¹ reportado por Cabarcas *et al.* (2012) y además concuerda con Mohd *et al.* (2021) que identificó el mismo grupo funcional en la banda 1012 cm⁻¹ en el espectro del polímero de *M. paradisiaca*.

El grupo carboxilo libre o ácido (-COOH) se identificó en la banda 1611,30 cm⁻¹ (Tabla 8), mientras que el grupo carboxilo esterificado (-COOH) en la vibración

1729,45 cm^{-1} ; concordando con Valencia (2019) que reportó ambos grupos funcionales en las bandas de vibración 1626 cm^{-1} y 1730 cm^{-1} , por su parte Mohd *et al.* (2021) los encontró en las vibraciones 1650 cm^{-1} y 1750 cm^{-1} ; y ubicándose dentro de lo señalado por Cabarcas *et al.* (2012) y Khamsucharit *et al.* (2018) quienes los identificaron entre los intervalos 1500-1700 cm^{-1} y 1700-1800 cm^{-1} así como en 1600-1630 cm^{-1} y 1730-1760 cm^{-1} respectivamente. Además, se pudo confirmar que el polímero obtenido es de alto grado de esterificación ya que la transmitancia fue más alta a 1611,30 cm^{-1} (94,9%) que a 1729,45 cm^{-1} (92,1%) (Bravo y Condo, 2015; Mantilla, 2020; Mohd *et al.*, 2021).

En la longitud de onda 2904,92 cm^{-1} se encontró el grupo alquilo (-CH) (Tabla 8), como lo reportó Cabarcas *et al.* (2012) en el intervalo de 2900-3000 cm^{-1} . Finalmente, el grupo hidroxilo (-OH) se identificó en la banda 3355,98 cm^{-1} , concordado con lo reportado por Cabarcas *et al.* (2012) y Mohd *et al.* (2021) en los intervalos de 3300-3500 cm^{-1} y 2900-3500 cm^{-1} respectivamente.

Cabe resaltar, que el espectro FTIR del polímero obtenido a base de cáscara de *Musa paradisiaca* L. registró un total de 20 vibraciones que señalaron la presencia de estructuras químicas (Figura 15), de las cuales solo seis correspondieron a los grupos funcionales (Tabla 8) que a pesar de que tuvieron diferentes niveles de transmitancia (ver Anexo A-4), las longitudes de onda fueron similares a los grupos funcionales reportados en estudios previos; de esta manera, se confirmó que la estructura de la superficie del polímero corresponde a una pectina (Khamsucharit *et al.*, 2018; Mantilla, 2020).

4.2. Evaluación del efecto de la pectina sobre las características fisicoquímicas del suelo con cadmio

4.2.1. Efecto de la pectina sobre el pH del suelo

El pH del suelo sin aplicación de la pectina tiende a acidificarse ligeramente desde un pH de 6,36 hasta 5,96 en el transcurso del experimento; sin embargo, inicialmente el suelo se volvió más ácido en función a la cantidad del polímero aplicado (Figura 16) debido a la naturaleza ácida de la pectina (pH = 3,77), característica que fue comprobada por su peso equivalente y acidez libre que obtuvo producto de la hidrólisis ácida donde se empleó ácido nítrico como extractante del polímero (Cabarcas *et al.*, 2012, p. 46).

Posteriormente, durante el transcurso de las semanas de experimentación, se pudo observar un aumento progresivo del pH del suelo con cadmio en todos los tratamientos. En la cuarta semana, se registró valores superiores al pH inicial del suelo sin estímulo, especialmente en los tratamientos que recibieron aplicaciones al 2, 4 y 6% de pectina (T₁, T₂ y T₃). Por otro lado, los tratamientos con aplicaciones al 8 y 10% (T₄ y T₅) no superaron un pH

de 6, probablemente debido a la acidez inicial del suelo que dificultó la variación de la concentración de hidrogeniones en el suelo (Figura 16).

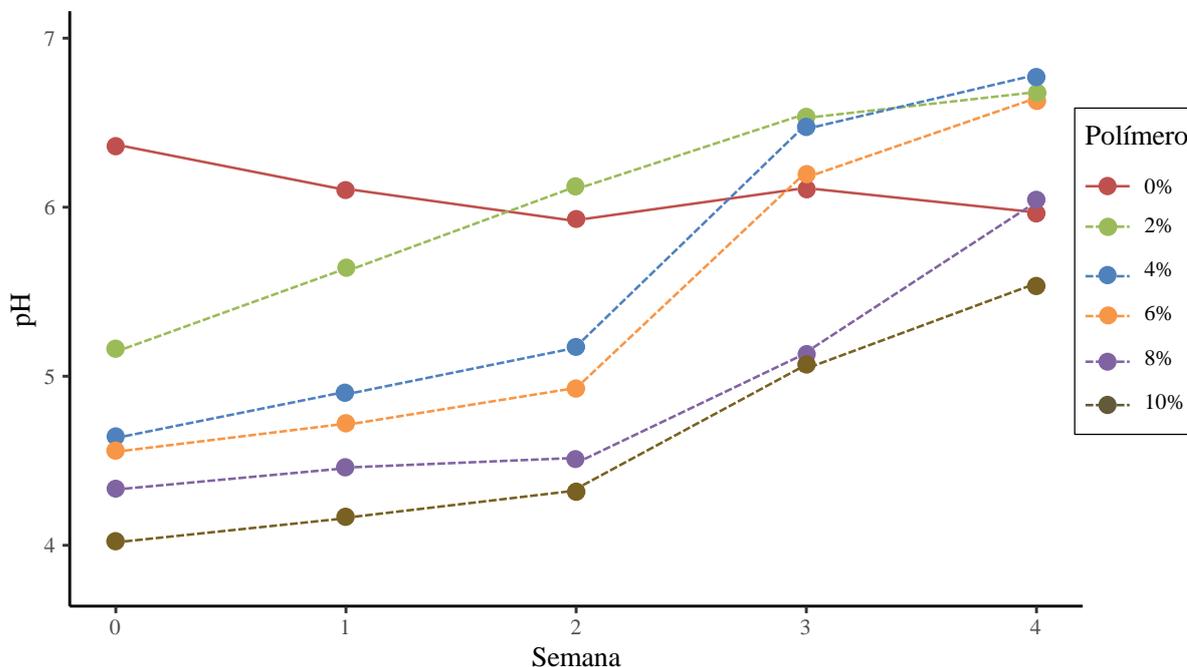


Figura 16. Comportamiento del pH en el suelo tratado

Asimismo, la aplicación de diferentes porcentajes de la pectina de cáscara de plátano tuvo efectos estadísticamente significativos ($p < 0,01$) en el pH del suelo (Figura 17), teniendo un mayor efecto en los tratamientos T₄ y T₅ que tuvieron un pH medio de $4,89 \pm 0,67$ y $4,62 \pm 0,62$ debido a que el polímero aporta un pH ácido por la cantidad de carboxilos libres o ácidos (-COOH) del que estuvo compuesto su estructura (Cabarcas *et al.*, 2012, p. 46). En consecuencia, al presentar el pH más ácido en estos tratamientos pudo ocurrir una mayor gelificación del polímero (Bravo y Condo, 2015) dando paso a una mayor formación de enlaces entre los iones del suelo y los grupos carboxilos de la pectina (Molina y Tintaya, 2018).

Sin embargo, en medios ácidos ($pH > 6,0$) la capacidad de la pectina para absorber metales pesados disminuye debido a que se facilita la protonación de los grupos carboxilo libres, lo que reduce los sitios de aceptación para los iones metálicos (Wang *et al.*, 2019), consecuencia de la formación de estructuras tridimensionales de las cadenas del polímero quedando los grupos hidroxilo para retener agua (Molina y Tintaya, 2018; Ovando, 2012).

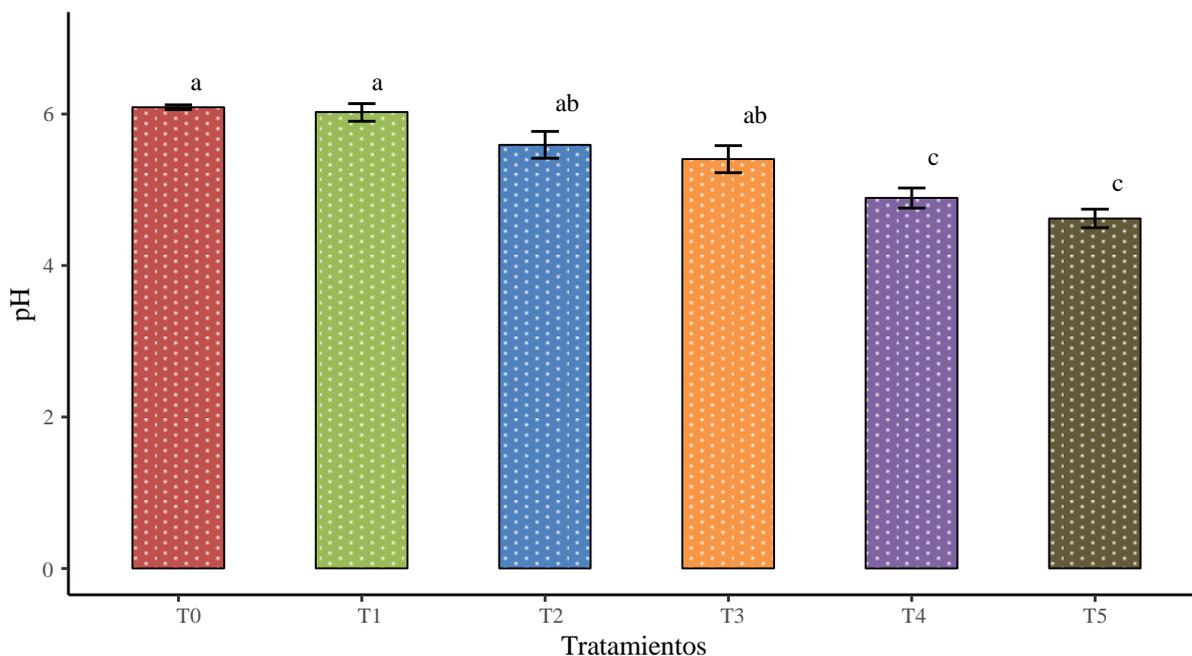


Figura 17. Efecto de la pectina sobre el pH del suelo con cadmio

Por el contrario, hubo efecto nulo en el tratamiento T₁ (2%) con pH medio de $6,02 \pm 0,58$ siendo estadísticamente similar al testigo (T₀) con media de $6,09 \pm 0,16$ en el pH (Figura 17) indicando que en este tratamiento la aplicación de la pectina no afecta al pH del suelo con cadmio.

Cabe resaltar, que en suelos ácidos ($\text{pH} > 6$) ocurre una mayor absorción del cadmio disponible (Cd^{+2}) en las plantas debido a que tiende a ser más soluble y móvil (Dionisio, 2020; Huaraca-Fernandez *et al.*, 2020; Pilco, 2020); por lo tanto, el efecto sobre el pH del suelo indicó que al aplicar la pectina en dosis de 2 y 4%, probablemente la movilidad del Cd disponible en el suelo fue menor en comparación con los demás tratamientos (Figura 17).

4.2.2. Efecto de la pectina sobre la conductividad del suelo

La conductividad del suelo en el grupo control (0%) durante el periodo de estudio tuvo una ligera variación de 49,7 a 84,8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figura 18), señalando que la salinidad del suelo es despreciable a pesar de que se registró la presencia de cationes intercambiables como el Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^{+2} y Na^{+} en concentraciones de 3,45; 0,57; 0,23; y 0,18 $\text{Cmol}^{+}/\text{kg}$ respectivamente; sin embargo, al tener una menor predominancia de cationes de Na estos no influyeron en la conductividad del suelo sin estímulo del polímero (Cortés *et al.*, 2013; Pilco, 2020; Soriano, 2018).

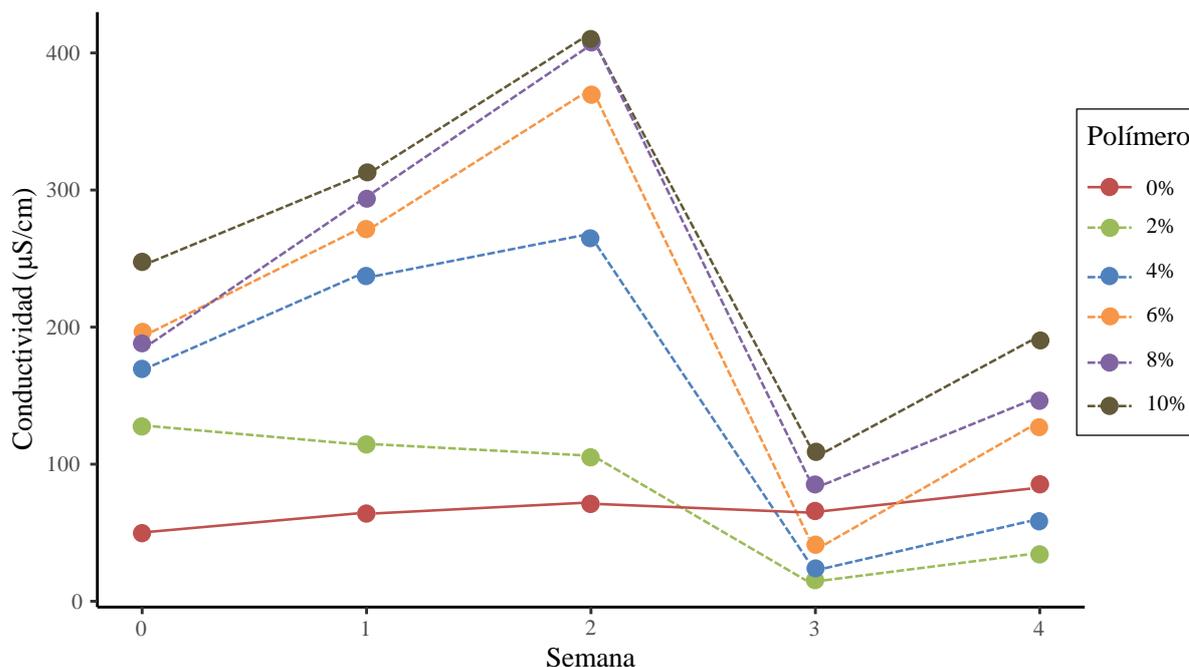


Figura 18. Comportamiento de la Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$) en el suelo tratado

Por el contrario, este parámetro aumenta conforme a la cantidad de pectina aplicada en las dos primeras semanas de tratamiento, señalando que hubo un aumento de la salinidad del suelo ya que este polímero estuvo potencialmente compuesto por carboxilos en forma de sal como los pectatos (Molina y Tintaya, 2018) pudiendo provocar además una mayor movilidad del Cd (Pilco, 2020); sin embargo, en la tercera semana la conductividad del suelo tratado disminuye hasta por debajo del testigo (Figura 18), probablemente por la reducción de iones libres en el suelo, sugiriendo que la pectina tuvo la capacidad de atraer los iones presentes en el suelo al formar geles (Molina y Tintaya, 2018).

Asimismo, la aplicación de la pectina de cáscara de plátano tuvo efectos estadísticamente significativos ($p < 0,01$) en la conductividad del suelo con cadmio, siendo este efecto creciente debido a que se obtuvo un menor efecto al aplicar 4% de pectina (T_2) alcanzando una media de $150,5 \pm 99,1 \mu\text{S}/\text{cm}$ y un mayor efecto en el 10% de pectina (T_5) con una conductividad media de $253,5 \pm 106,51 \mu\text{S}/\text{cm}$ (Figura 19). Señalando que a medida que se aumentó la dosis del polímero la concentración de sales disueltas en el suelo aumentó, debido a la capacidad de gelificación iónica externa que posee la pectina donde aparte de formar geles también libera iones de calcio (Ca^{+2}) en medios ácidos (Molina y Tintaya, 2018). No obstante, no se obtuvo ningún efecto al emplear el 2% de pectina (T_1) porque alcanzó una media de $79,3 \pm 46,8 \mu\text{S}/\text{cm}$ estadísticamente igual que el suelo sin aplicación de pectina (T_0) donde se obtuvo un valor medio de $67,1 \pm 13,1 \mu\text{S}/\text{cm}$ (Figura 19).

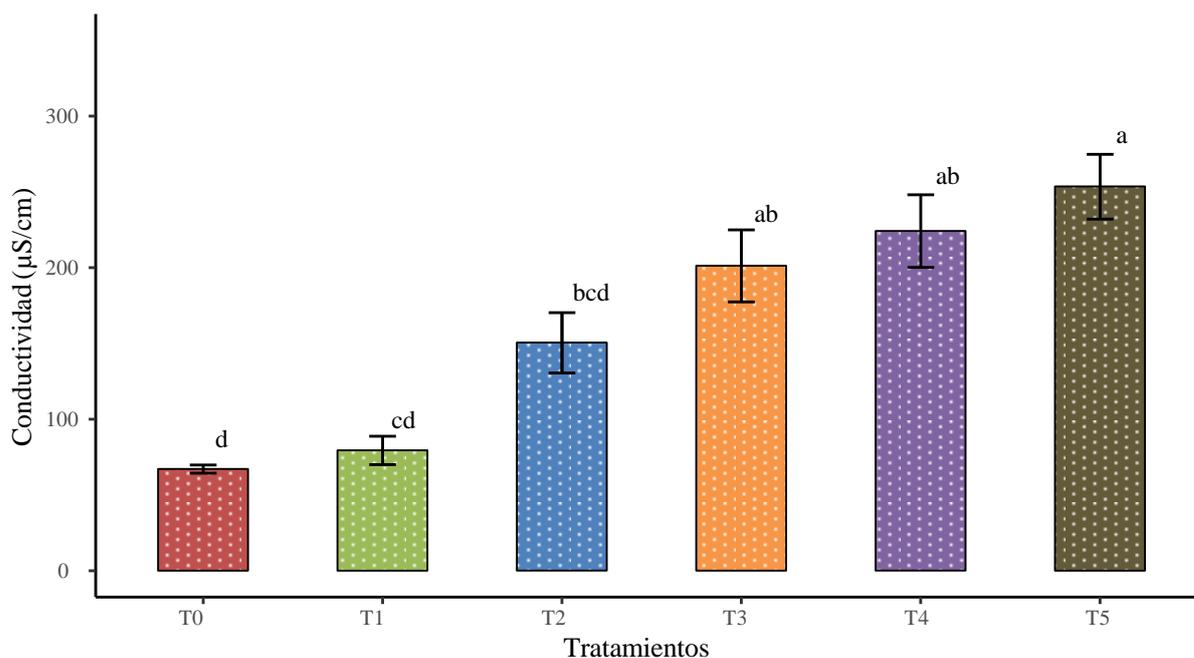


Figura 19. Efecto de la pectina sobre la conductividad del suelo con cadmio

4.2.3. Efecto de la pectina sobre los sólidos totales disueltos del suelo

El comportamiento de los sólidos totales disueltos (TDS) del suelo sin aplicación de pectina (0%) fue constante hasta la segunda semana con valores de 23 a 23,4 ppm, posteriormente tuvo un incremento hasta los 43,6 ppm posiblemente por la adición de agua destilada que se empleó para mantener la humedad constante del suelo (Figura 20).

Por otro lado, cuando se empleó la pectina en concentraciones del 4 al 10% los TDS estuvieron entre los 48,6 y 61,1 ppm valores que aumentaron hasta los 71,6 y 120,6 ppm en las dos primeras semanas, luego empezó a disminuir hasta llegar entre los 25,4 y 80,2 ppm (Figura 20); cabe resaltar, que las fluctuaciones en los TDS concuerdan con el comportamiento que tuvo la conductividad del suelo (Figura 18), con una tendencia creciente en las primeras semanas y su posterior disminución, en vista de que ambos parámetros señalan de forma similar las concentración de sales inorgánicas presentes en el suelo.

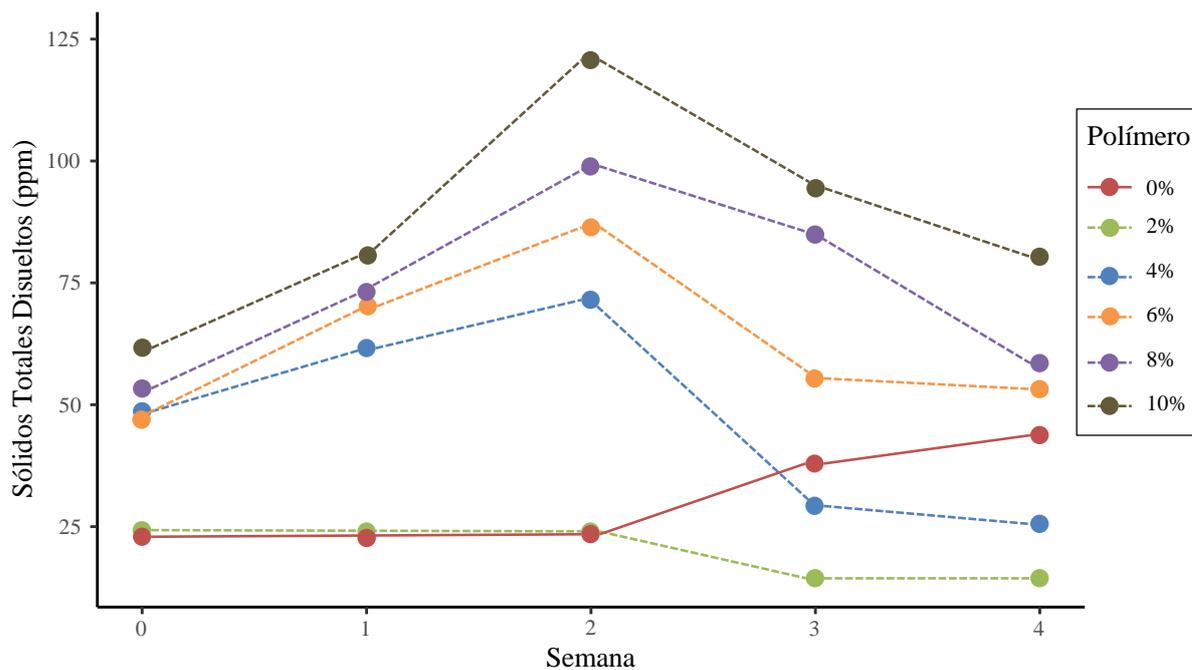


Figura 20. Comportamiento de los Sólidos Totales Disueltos en el suelo tratado

El efecto de la pectina de cáscara de plátano sobre los TDS del suelo con cadmio fue estadísticamente significativo ($p < 0,01$) de manera creciente; es decir, que los TDS del suelo incrementaron a medida que se aumentaron las concentraciones de pectina. Además, las comparaciones múltiples de medias señalaron que el T₅ (10%) es el tratamiento de mayor efecto con un TDS medio de $87,5 \pm 22,7$ ppm sugiriendo que hubo una mayor formación de geles porque hubo una mayor presencia de sólidos solubles (Bravo y Condo, 2015); mientras que el tratamiento T₁ (2%) presentó un menor efecto con un valor medio de $20,2 \pm 4,97$ ppm por debajo del tratamiento T₀ (0%) donde se registró una media de $30,1 \pm 9,43$ ppm (Figura 21).

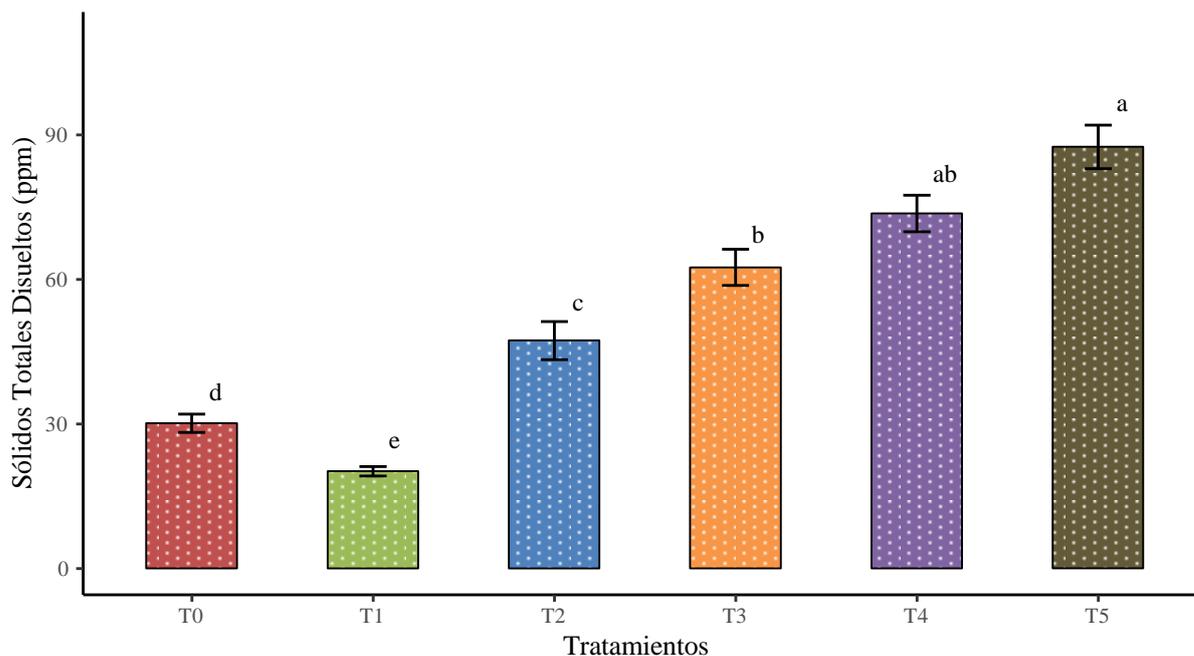


Figura 21. Efecto de la pectina sobre los sólidos totales disueltos del suelo con cadmio

4.3. Determinación del efecto de la pectina sobre el cadmio disponible (Cd^{+2}) en el suelo

La eficiencia de la pectina de cáscara de plátano para adsorber cadmio disponible (Cd^{+2}) en el suelo fue estadísticamente muy significativa ($p < 0,01$); siendo el tratamiento T1 que tuvo la dosis óptima al utilizar el 2% de pectina logrando la mayor eficiencia del $34,98 \pm 2,54\%$; es decir, que el polímero alcanzó a reducir el Cd^{+2} en el suelo de 1,36 a 0,88 mg/kg (Figura 22). Este resultado coincide con precedentes en aplicación de pectina para adsorber Cd^{+2} , como Sanga (2007) que obtuvo una eficiencia de 38,9%, y simultáneamente se encontró dentro del rango de eficiencia de 23,2 a 63,4 % que alcanzó Ovando (2012) sugiriendo que la disminución de la concentración inicial del Cd^{+2} en el suelo se asocia a la aplicación del polímero; sin embargo, discrepa con la eficiencia que logró el estudio de Salazar *et al.* (2014) del 65% en un pH de 4, indicando que la eficiencia de adsorción es mayor en un medio ácido ya que el sistema pectina-ion metálico tiene una fuerte dependencia del pH (Wang *et al.*, 2019).

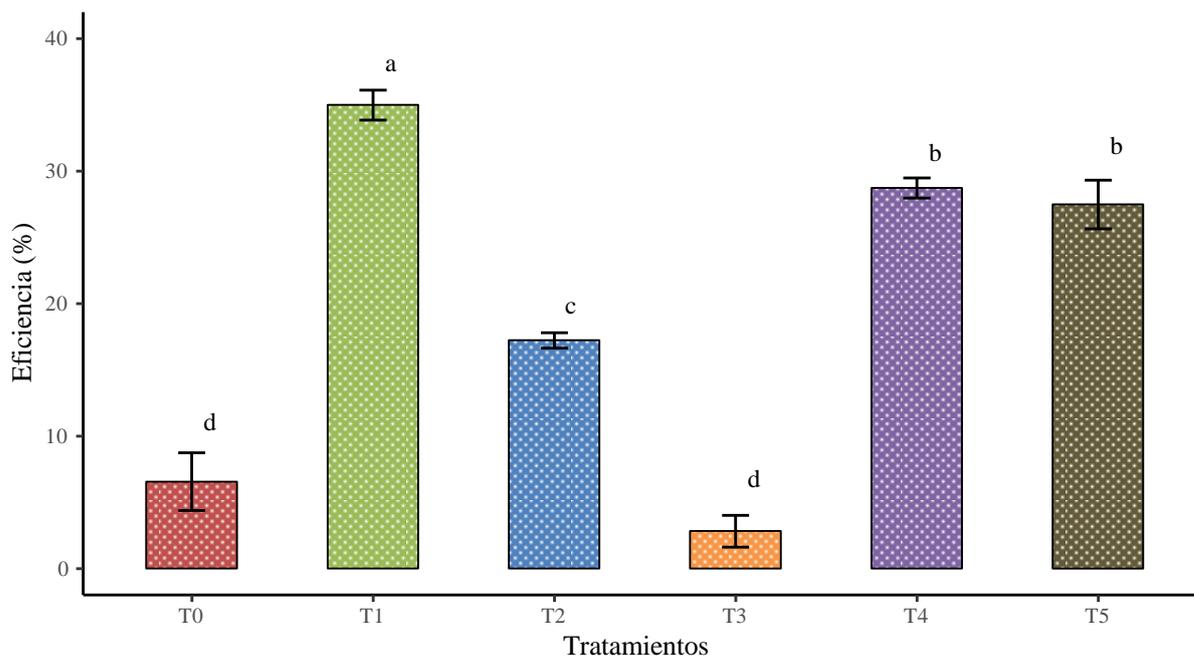


Figura 22. Eficiencia de la pectina en la adsorción de cadmio en el suelo

Por el contrario, las comparaciones múltiples señalaron que la menor eficiencia se obtuvo en el tratamiento T₂ (4%) con un valor medio de $17,23 \pm 1,31\%$, sin embargo, al aplicar un 6% de pectina (T₃) la eficiencia de adsorción de Cd⁺² fue estadísticamente similar al grupo control con medias de $2,82 \pm 2,7$ y $6,55 \pm 4,85\%$ respectivamente, indicando que en esa dosis de aplicación existió un punto de quiebre en la eficiencia del polímero (Figura 22).

Asimismo, la eficiencia de la aplicación del 8 y 10% de pectina (T₄ y T₅) en el suelo presentaron medias estadísticamente similares con valores de $28,71 \pm 1,7\%$ y $27,48 \pm 4,09\%$ respectivamente, indicando que ambos tratamientos resultaron convenientes para la adsorción de Cd⁺² en suelo por debajo del tratamiento T₁ (Figura 22), pero son poco productores ya que como se observó anteriormente (Figura 18) estas concentraciones disminuyen el pH del suelo provocando una mayor solubilidad y movilidad del Cd en el suelo (Huaraca-Fernandez *et al.*, 2020). Las diferencias identificadas en la eficiencia del polímero se debieron probablemente a que tanto la carga eléctrica y el potencial de la pectina como la especiación de los iones del Cd cambiaron simultáneamente con el efecto decreciente en el pH del suelo (Wang *et al.*, 2019).

En cuanto a la capacidad de adsorción del pectina de cáscara de plátano fue estadísticamente significativa ($p < 0,01$) (Figura 23), señalando que el tratamiento T₁ tuvo la mayor capacidad de adsorción de Cd⁺² con un valor de $23,7 \pm 1,72 \mu\text{g/g}$; es decir, que se adsorbieron $23,7 \mu\text{g}$ de Cd disponible por cada gramo de polímero aplicado, esta capacidad se

debe a los sitios de fijación que posee la cadena polimérica así como la preferencia por iones divalentes como el Cd^{+2} porque requieren menos zonas de unión (Wang *et al.*, 2019).

Asimismo, este resultado no coincide con la capacidad de adsorción obtenida por Ovando (2012) de 5,63 a 13,14 mg/g, o por Sánchez *et al.* (2014) de 99,56 mg/g; debido a que a pesar de atribuirle la adsorción del Cd^{+2} a la pectina, el origen de este juega un rol muy importante en el poder de adsorción. Señalando que la capacidad de adsorción depende del origen de la pectina e incluso a pesar de tener el mismo origen tienen diferentes estructuras por el método de extracción empleado (Wang *et al.*, 2019)

Por otro lado, la menor capacidad de adsorción la presentó el tratamiento T5 con un valor medio de $3,72 \pm 0,55 \mu\text{g/g}$; mientras que el tratamiento T3 con un valor medio de $0,64 \pm 0,61 \mu\text{g/g}$ tuvo una capacidad de adsorción nula porque fue estadísticamente similar al grupo control (T0) que no tuvo capacidad de adsorción al no aplicarse polímero en el suelo (Figura 23).

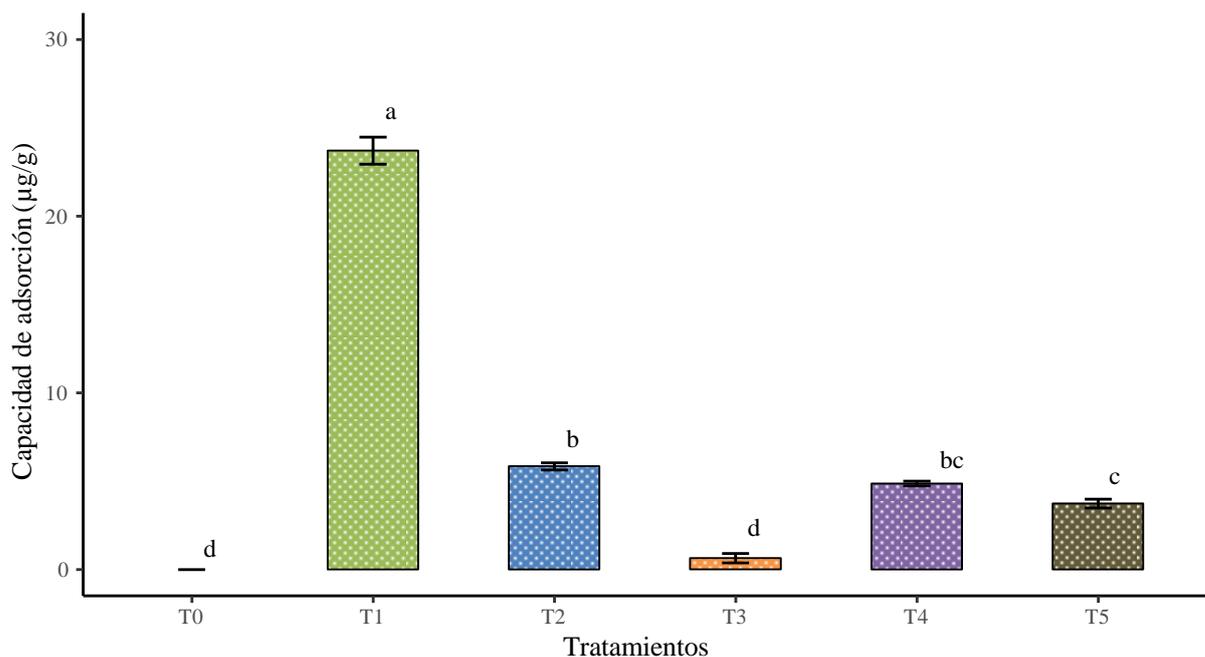


Figura 23. Capacidad de adsorción de la pectina aplicada en suelo con cadmio

Según Wang *et al.* (2019) la variación de la capacidad de adsorción que tuvo la pectina en función a la dosis aplicada puede deberse a factores internos del polímero como los mecanismo de adsorción tanto de interacciones electrostáticas que ocurren por la presencia de los grupos carboxilo ($-\text{COOH}$) e hidroxilo ($-\text{OH}$) que forman zonas de unión denominadas “cajas de huevo” (Wang *et al.*, 2019) donde poseen cargas negativas que inmovilizan el Cd^{+2}

(carga positiva) lo que normalmente puede suceder en medios ligeramente ácidos como en el tratamiento T1 (Bravo y Condo, 2015; Jia *et al.*, 2019; Paynel *et al.*, 2009; Sánchez *et al.*, 2014; Szatanik-Kloc *et al.*, 2017; K. Wang *et al.*, 2022); por el contrario, en pH ácidos como en los tratamientos T4 y T5 el mecanismo que sucedió es de intercambio iónico donde el Ca^{+2} quelado en el polímero es sustituido por los iones Cd^{+2} con enlaces más fuertes y estables (Ovando, 2012; Wang *et al.*, 2019).

La capacidad de adsorción también estuvo influenciada por factores externos como el efecto del pH del suelo ya que se observó una menor actividad de unión del Cd^{+2} al polímero por la protonación de los grupos carboxilo en pH bajos. Asimismo, la fuerza iónica pudo haberse presenciado en los tratamientos con mayor dosis siendo el calcio que se encontró en 3,45 Cmol+/kg el que tuvo un mayor impacto en la unión metal-pectina (Wang *et al.*, 2019)

Se debe recalcar que la capacidad de adsorción de la pectina obtenida es gracias a las características que tuvo el polímero, a pesar de su alta metilación todavía contenía carboxilo libres que favorecen a la unión del Cd a la red de pectina (Gutsch *et al.*, 2019, p.10) con mayor fijación (Guo *et al.*, 2021); el grado de esterificación cerca al 50% que permitió formar complejos con iones metálicos divalentes como el Cd^{+2} (Sanga, 2007; Yang *et al.*, 2022; Yu *et al.*, 2020) y su concentración de ácido galacturónico género que la pectina sea más sensible a los enlaces cruzados con el Cd^{+2} (Wang *et al.*, 2019).

Cabe resaltar que aunque se obtuvo una eficiencia y capacidad de adsorción significativas, más del 50% del Cd^{+2} no fue inmovilizado o fijado por las cadenas del polímero predominando el estado de disponibilidad del Cd en el suelo.

4.4. Determinación del efecto fitotóxico del suelo tratado con pectina en *Lactuca sativa*

4.4.1. Índice de germinación

Las diluciones de la pectina de cáscara de plátano (pectina) tuvo un efecto estadísticamente muy significativo ($p < 0,01$) sobre el índice de germinación de las semillas de *Lactuca sativa*, los valores más altos de germinación se encontraron en la dilución al 10% con una media de $28,1 \pm 6,96^b$; por otro lado, la menor media se encontró en la dilución al 30% con un valor de $5,37 \pm 0,7^c$ (Figura 24). Por lo tanto, la germinación de las semillas de *Lactuca sativa* se ven afectadas al aumentar la aplicación del polímero, sugiriendo que su aplicación debe ser por debajo del 10% debido a que su capacidad de formar geles (Bravo y Condo, 2015; Molina y Tintaya, 2018) causan que la disponibilidad de agua en las semillas disminuya provocando una menor germinación en medios con altas concentraciones del polímero.

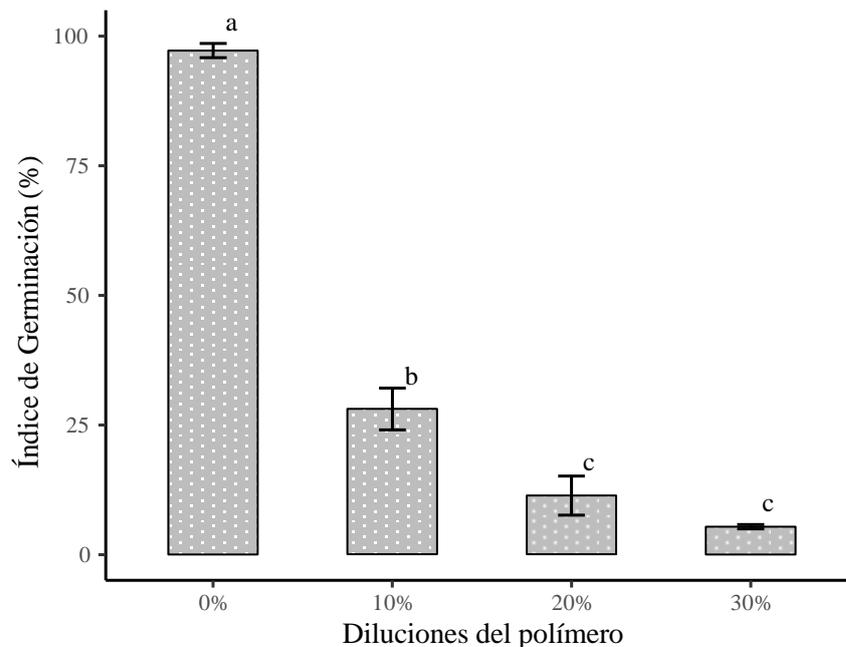


Figura 24. Índice de germinación (%) de *Lactuca sativa* en diluciones de pectina

Por otro lado, las diluciones de los tratamientos de suelo con cadmio tuvieron efectos estadísticamente muy significativos ($p < 0,01$) en el índice de germinación de *Lactuca sativa* (Figuras 25) señalando que el Cd inhibe la germinación de semillas (Cartaya *et al.*, 2016; Jia *et al.*, 2019) en mayor o menor medida según las concentraciones de polímero presentes en las diluciones de los tratamientos.

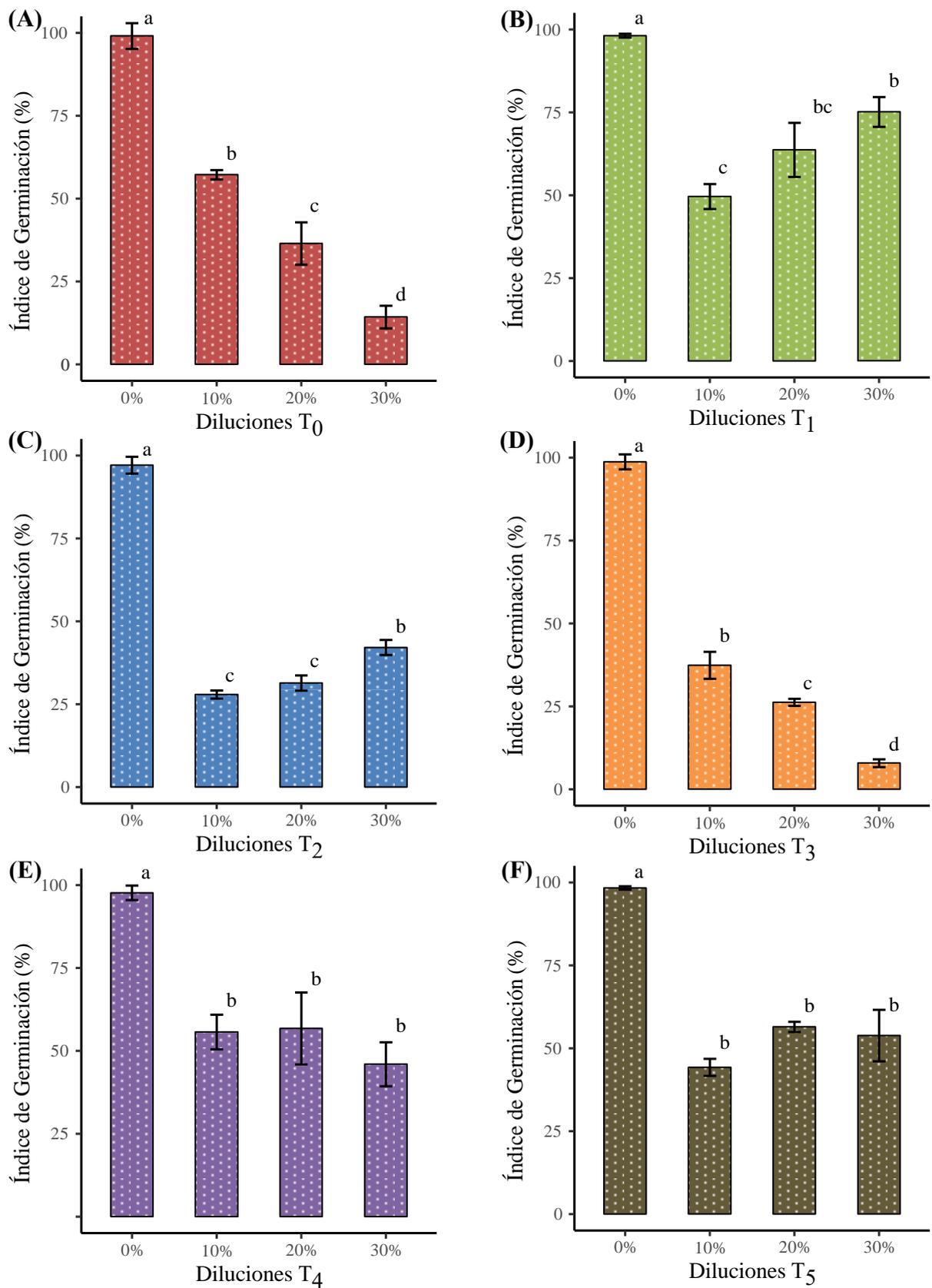


Figura 25. Índice de germinación (%) de *Lactuca sativa* en diluciones de los tratamientos de suelo con cadmio

En efecto, se encontró una tendencia descendente en las diluciones de los tratamientos T₀ y T₃ (Figura 25A y 25D) donde se observó una menor media en diluciones al 30% con valores de $14,2 \pm 5,95$ y $7,87 \pm 2,06$; asimismo las mayores medias se notaron en diluciones al 10% con valores de $57,2 \pm 2,43$ y $37,4 \pm 6,99$ respectivamente, señalando que existió inhibición del crecimiento radicular provocado por el Cd, el cual se manifestó en raíces abultadas y cortas, muy diferentes a las raíces largas y delgadas encontradas en el control (Cartaya *et al.*, 2016; Guo *et al.*, 2021; Jia *et al.*, 2019; Yang *et al.*, 2022).

Además, se observó un aumento del índice de germinación al aumentar la concentración de las diluciones de los tratamientos T₁ y T₂ (Figura 25B y 25C) encontrando una media menor al 10% con valores de $49,6 \pm 6,54$ y $27,9 \pm 2,14$; y una media mayor al 30% con valores de $75,1 \pm 7,79$ y $42,1 \pm 3,91$ respectivamente; esto indicaría que la pectina posiblemente minimizó la toxicidad del cadmio en el suelo, estimulando el crecimiento de las raíces de *L. sativa* (Cartaya *et al.*, 2016).

Por otro lado, en las diluciones de los tratamientos T₄ y T₅ el índice de germinación no presentó diferencias estadísticas significativas entre las medias de las diluciones con valores entre los 45 y 56%; sin embargo, fueron menores a los encontrados en los controles (Figura 25E y 25F). En consecuencia, estos resultados presumen que la pectina presente en las diluciones de los tratamientos T₁, T₂, T₄ y T₅ evita que los iones de Cd intervengan en su metabolismo (Cartaya *et al.*, 2016) y puedan tener un mejor crecimiento radicular entre todas las semillas expuestas a las diluciones (Figura 25B, 25C, 25E y 25F).

4.4.2. Biomasa generada

La biomasa generada de *Lactuca sativa* se vio afectada significativamente ($p < 0,01$) por las diluciones de la pectina de cáscara de plátano (pectina), encontrándose la mayor biomasa promedio en la dilución al 10% con un valor de $50,1 \pm 9,94^b$ y la menor media de $31,8 \pm 1,83^c$ al 30%; no obstante, fueron valores por debajo del control que presentó una biomasa promedio de $99,8 \pm 3,5^a$ (Figura 26). La inhibición del crecimiento de las plántulas se debió probablemente por el estrés hídrico producto de la gelificación del medio teniendo en cuenta que el polímero extraído de la cáscara de plátano tuvo un alto contenido de AGA (Toyo-Díaz *et al.*, 2021).

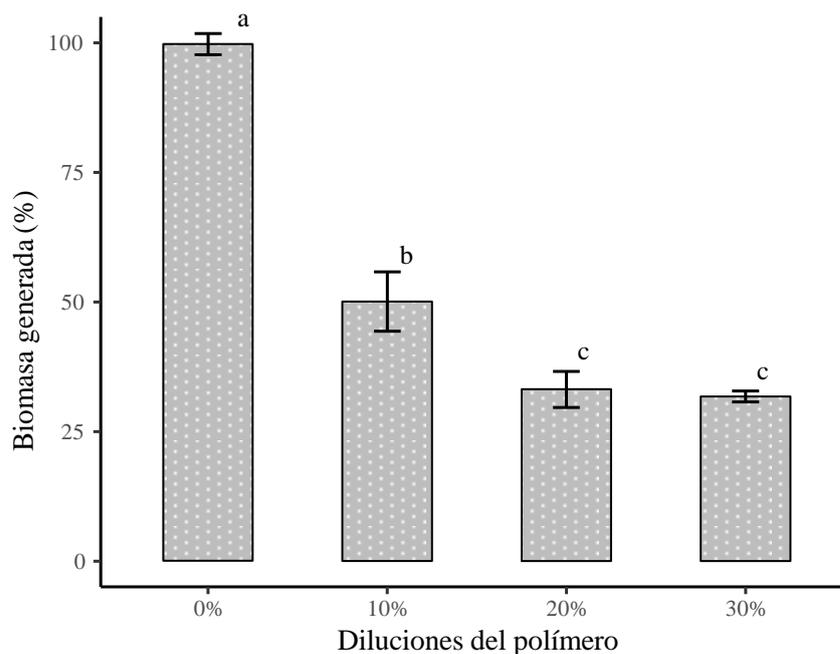


Figura 26. Biomasa generada (%) de *Lactuca sativa* en diluciones de pectina

Por otro lado, las diluciones de los tratamientos de suelo con cadmio como el T₀, T₂, T₃, T₄ y T₅ tuvieron efectos estadísticamente muy significativos ($p < 0,01$) en la biomasa generada de las plántulas de *Lactuca sativa* (Figuras 27A, 27C, 27D, 27E y 27F); encontrándose una tendencia descendente en las diluciones de los tratamientos T₀ y T₃ (Figura 27A y 27D) donde se observó una menor media en diluciones al 30% con valores de $27,81 \pm 2,48$ y $33,33 \pm 5,47$; mientras que las mayores medias se notaron en diluciones al 10% con valores de $70,68 \pm 7,72$ y $66,05 \pm 3,8$ respectivamente, indicando que los iones de Cd afectan la capacidad de adsorción de agua y nutrientes de las plántulas (Cartaya *et al.*, 2016) debido posiblemente a que este metal se acumula en las paredes celulares alterando su metabolismo (Guo *et al.*, 2021; Gutsch *et al.*, 2019; Han *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2016; Yu *et al.*, 2020).

Sin embargo, tanto en las diluciones del tratamiento T₁ donde no existieron diferencias significativas ($p > 0,05$) en la biomasa generada (Figura 19B); como del tratamiento T₂ donde la biomasa fue mayor al 30% con un valor de $88,3 \pm 6,01$ y la menor media se encontró al 20% con un valor $62,4 \pm 4,64$ (Figura 27C); y por último, la generación de biomasa en todas las diluciones de los tratamientos T₄ y T₅ fueron estadísticamente iguales ($p > 0,05$) en las comparaciones múltiples de medias (Figura 27E y 27F); aunque fueron menores a la biomasa de los controles. Son resultados que señalan que el cadmio inhibe en menor medida el crecimiento de las plántulas de *Lactuca sativa* debido a la probable adsorción de los iones de cadmio disponible por las partículas del polímero (Cartaya *et al.*, 2016).

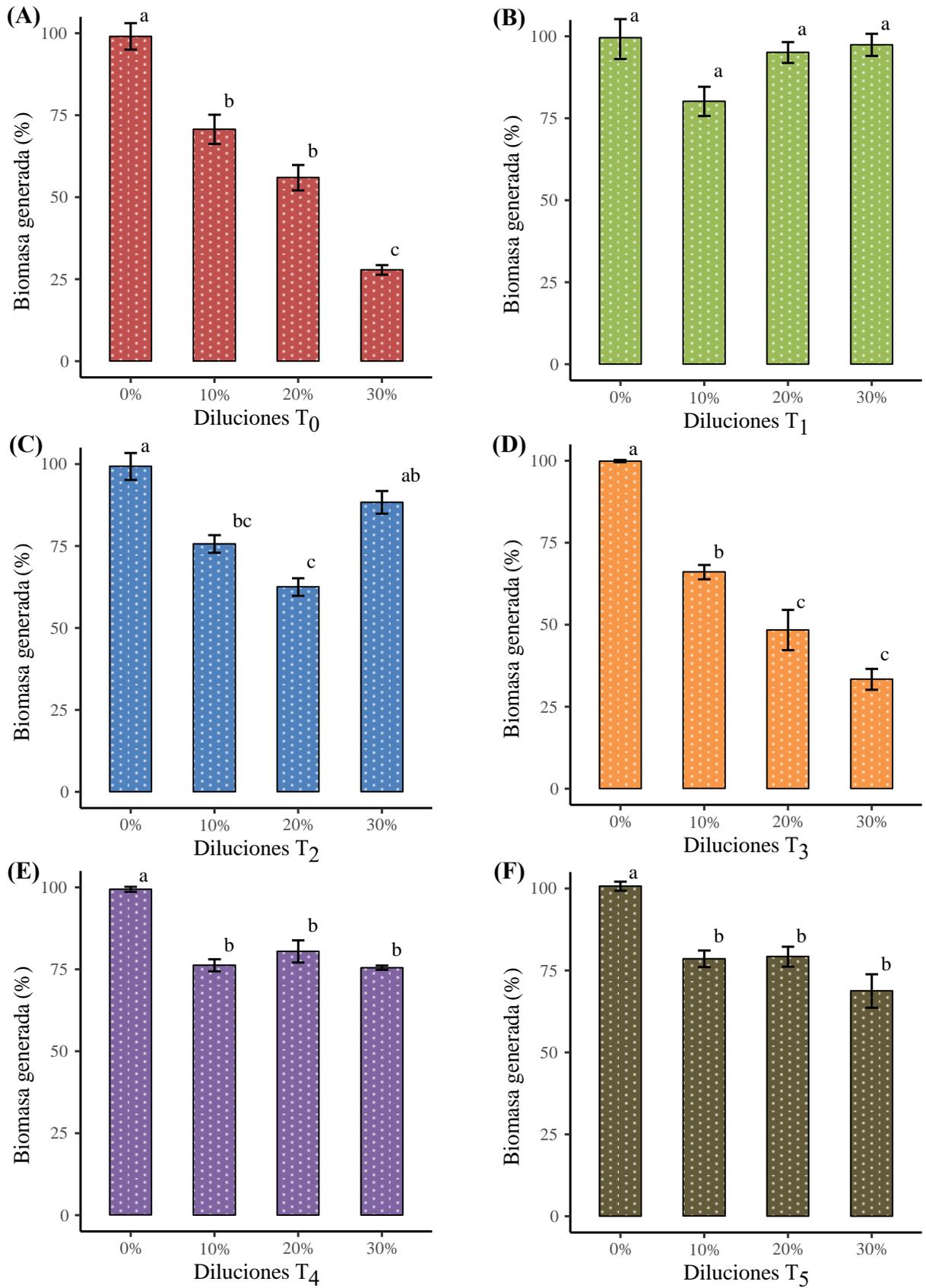


Figura 27. Biomasa generada (%) de *Lactuca sativa* en diluciones de los tratamientos de suelo con cadmio

V. CONCLUSIONES

1. El polímero extraído a partir de cáscaras de *Musa paradisiaca* L. (var. Bellaco) presentó un contenido de metoxilo, grado de esterificación, contenido de ácido galacturónico, forma irregular, superficie corrugada y porosa, y grupos carboxilo e hidroxilo que comprueban que lo extraído fue una pectina de calidad con capacidad de formar geles.
2. La aplicación de la pectina de cáscara de *M. paradisiaca* afectó significativamente el pH, conductividad (uS/cm) y sólidos totales disueltos (ppm) del suelo con cadmio, siendo el tratamiento T₅ (10%) el de mayor efecto para cada uno de estos parámetros, con respuesta decreciente en el pH y creciente para la conductividad y TDS.
3. La aplicación de la pectina de cáscara de *M. paradisiaca* presentó una eficiencia y capacidad de adsorción de Cd disponible (Cd⁺²) estadísticamente muy significativos; siendo el tratamiento T₁, con una concentración del 2%, el de mayor adsorción de Cd⁺² en el suelo.
4. Las diluciones de la pectina así como de los tratamientos tuvieron un efecto fitotóxico significativo sobre el índice de germinación y biomasa generada de *Lactuca sativa*, siendo el primero desfavorable en proporciones mayores al 10%; y el segundo confirma que la pectina de cáscara de plátano tiene el potencial de reducir el efecto fitotóxico del Cd.

VI. PROPUESTAS A FUTURO

1. Se debe optimizar la extracción de pectina empleando diferentes condiciones de extracción para que el polímero elaborado pueda tener mejores resultados en el rendimiento y calidad de la pectina. Asimismo, se debe considerar la extracción del polímero de otras partes del plátano como las hojas.
2. Se debe considerar analizar el comportamiento de las propiedades fisicoquímicas del suelo durante un periodo de experimentación más prolongado, además se deben analizar otros parámetros como la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y el potencial redox (Eh) factores que influyen en la disponibilidad y/o movilidad del cadmio en el suelo.
3. Se sugiere modificar químicamente a la pectina para potenciar los mecanismos de interacciones electrostáticas o intercambio iónico con el propósito de obtener mejores resultados tanto en la eficiencia como en la capacidad de adsorción del polímero.
4. Se recomienda realizar un análisis de las concentraciones de cadmio disponible de las plántulas luego de ser expuestas a las diluciones de los diferentes tratamientos, con la finalidad de determinar el efecto fitotóxico en *Lactuca sativa*. Asimismo, se sugiere aplicar el polímero en el sustrato conteniendo las plántulas en periodos extensos para observar su crecimiento y desarrollo.
5. Se recomienda aplicar la pectina en micropellets con el objetivo de aislar el polímero después del tratamiento y remover totalmente el Cd del suelo.
6. Se sugiere evaluar la viabilidad técnico-económica de la producción a gran escala de la pectina de cáscara de plátano y su aplicación in situ para la reducción de la biodisponibilidad del cadmio en el suelo.

VII. REFERENCIAS

- Arellanes, A., Jaraba, M., Marmol, Z., Paez, G., Mazzarri, C., & Rincon, M. (2011). Obtención y caracterización de pectina de la cáscara del cambur manzano (Musa AAB). *Revista de La Facultad de Agronomía*, 28(4), 523–539. <https://bit.ly/3zmQAWR>
- Bello-Lara, J., Balois-Morales, R., Sumaya-Martínez, M., Juárez-López, P., Rodríguez-Hernández, A., Sánchez-Herrera, L., & Jiménez-Ruíz, E. (2014). Extracción y caracterización reológica de almidón y pectina en frutos de plátano “Pera” (Musa ABB). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(SPE8), 1501–1507. <https://bit.ly/3SLs8oW>
- Bravo, A., & Condo, E. (2015). Comparación de la pectina obtenida a partir del aprovechamiento de las cáscaras de banano y cacao por el método de hidrólisis ácida [Tesis de Pregrado, Universidad de Guayaquil]. In *Repositorio Institucional de la Universidad de Guayaquil*. <https://bit.ly/3gLW7Qv>
- Cabarcas, E., Guerra, A., & Henao, C. (2012). Extracción y caracterización de pectina a partir de cáscaras de plátano para desarrollar un diseño general del proceso de producción [Tesis de Pregrado, Universidad de Cartagena]. In *Repositorio Institucional UC*. <https://hdl.handle.net/11227/109>
- Calderon, K. (2018). Obtención y caracterización de pectina a partir de la cáscara de cacao (*Theobroma cacao* L.) variedad CCN - 51 procedente del distrito de Pajarillo - provincia de Mariscal Cáceres [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de San Martín]. In *Repositorio Institucional UNSM*. <http://hdl.handle.net/11458/3132>
- Cartaya, O., Moreno, A., Hernández, Y., Cabrera, J., & Izquierdo, G. (2016). *Effects of the application an oligogalacturonide mixture on a polluted soil cultivated with tomato seedlings*. 37(4), 160–167. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20663.52642>
- Cortés, D., Pérez, J., & Camacho Tamayo, J. (2013). Relación espacial entre la conductividad eléctrica y algunas propiedades químicas del suelo. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 16(2), 401–408. <https://doi.org/10.31910/rudca.v16.n2.2013.912>
- Dionisio, E. (2020). Impacto de productos biodegradables aplicados al suelo sobre la acumulación de cadmio en cacao [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. In *Repositorio La Molina*. <https://bit.ly/3A6FmpS>
- Guo, X., Luo, J., Du, Y., Li, J., Liu, Y., Liang, Y., & Li, T. (2021). Coordination between root cell wall thickening and pectin modification is involved in cadmium accumulation in *Sedum alfredii*. *Environmental Pollution*, 268, 115665. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115665>

- Gutsch, A., Sergeant, K., Keunen, E., Prinsen, E., Guerriero, G., Renaut, J., Hausman, J. F., & Cuyper, A. (2019). Does long-term cadmium exposure influence the composition of pectic polysaccharides in the cell wall of *Medicago sativa* stems? *BMC Plant Biology*, *19*(1), 1–17. <https://doi.org/10.1186/s12870-019-1859-y>
- Han, R., Dai, H., Zhan, J., & Wei, S. (2019). Clean extracts from accumulator efficiently improved *Solanum nigrum* L. accumulating Cd and Pb in soil. *Journal of Cleaner Production*, *239*, 118055. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118055>
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. P. (2018). Metodología de la investigación: las tres rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. In *Mc Graw Hill* (Vol. 1). McGraw-Hill.
- Huaraca-Fernandez, J. N., Pérez-Sosa, L., Bustinza-Cabala, L. S., & Pampa-Quispe, N. B. (2020). Organic amendments in the immobilization of cadmium in contaminated agricultural soils: A review. *Informacion Tecnologica*, *31*(4), 139–152. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642020000400139>
- Jia, H., Wang, X., Wei, T., Zhou, R., Muhammad, H., Hua, L., Ren, X., Guo, J., & Ding, Y. (2019). Accumulation and fixation of Cd by tomato cell wall pectin under Cd stress. *Environmental and Experimental Botany*, *2019*(176), 103829. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.103829>
- Khamsucharit, P., Laohaphatanalert, K., Gavinlertvatana, P., Sriroth, K., & Sangseethong, K. (2018). Characterization of pectin extracted from banana peels of different varieties. *Food Science and Biotechnology*, *27*(3), 623–629. <https://doi.org/10.1007/s10068-017-0302-0>
- Lai, J. C. H., Mahesan, D., Abdul Samat, N. A. S. binti, & Bains, R. (2022). Characterization and optimization of extracted pectin from unripe banana and mango fruit peels. *Materials Today: Proceedings*, *65*, 3020–3029. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2022.03.580>
- Liu, B., Chen, L., Chen, S., Li, N., Zheng, H., Jin, K., Pang, H., & Ma, Y. (2016). Subcellular Cd accumulation characteristic in root cell wall of rice cultivars with different sensitivities to Cd stress in soil. *Journal of Integrative Agriculture*, *15*(9), 2114–2122. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(15\)61227-8](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(15)61227-8)
- Lorenzo-Santiago, M., Rendón-Villalobos, J., & Olvera-Guerra, R. (2020). Análisis térmico y estructural de pectina aislada de cáscara de mango Ataulfo de desecho. *Journal CIM Revista Digital*, *8*(1), 1582–1588. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6547130>
- Mantilla, M. (2020). Caracterización de pectina extraída a partir de residuos de fruta [Tesis de Pregrado, Universidad de los Andes]. In *Repositorio Institucional UNIANDES*. <http://hdl.handle.net/1992/49095>
- Meter, A., Atkinson, R., & Labiberte, B. (2019). Cadmio en el cacao de América Latina y el

- Caribe: Análisis de la Investigación y Soluciones Potenciales para la Mitigación. In *Bioversity International*. <https://bit.ly/3wfTpY1>
- Ministerio del Ambiente. (2014). Guía para el muestreo de suelos. *Dirección General de Calidad Ambiental*, 64. <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2018/07/GUIA-PARA-EL-MUESTREO-DE-SUELO.pdf>
- Ministerio del Ambiente. (2017). Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM, Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo. *Diario Oficial El Peruano*. <https://bit.ly/3XGo4td>
- Mohd, N., Mad, M., Tokuyama, H., Nagatsu, Y., Mili, N., Zaini, A., Idham, Z., & Che, M. (2021). Subcritical water-based pectin from banana peels (*Musa Paradisiaca* Cv.Tanduk) as a natural gelation agent. *Materials Today: Proceedings*, 47(6), 1329–1335. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.815>
- Molina, N. L., & Tintaya, L. (2018). Extracción y caracterización de pectina de la cascarilla del *Theobroma cacao* Linnaeus (*cacao*) para la inmovilización de *Saccharomyces cerevisiae* y su aplicación en la fermentación del Mosto de Manzana [Tesis de Pregrado, Universidad Católica de Santa María]. In *Repositorio Institucional UCSM*. <https://bit.ly/3TW6OxY>
- Ovando, M. (2012). Modificación de biopolímero extraído de nopal (*Opuntia ficus indica*) y su aplicación para la remoción de metales pesados en agua [Tesis de Maestría, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C.]. In *Repositorio IPICYT*. <https://bit.ly/3T0II4k>
- Paynel, F., Schaumann, A., Arkoun, M., Douchiche, O., & Morvan, C. (2009). Temporal regulation of cell-wall pectin methylesterase and peroxidase isoforms in cadmium-treated flax hypocotyl. *Annals of Botany*, 104(7), 1363–1372. <https://doi.org/10.1093/aob/mcp254>
- Pilco, J. (2020). Determinación de cadmio en suelos agrícolas del cantón Pallatanga, provincia de Chimborazo [Tesis de Pregrado, Universidad de Guayaquil]. In *Repositorio Institucional de la Univerisdad de Guayaquil*. <https://bit.ly/3W87d2f>
- Ramos, V., Aguilera, A., & Ochoa, E. (2016). Residuos de cáscara de plátano (*Musa paradisiaca* L.) para obtener pectinas útiles en la industria alimentaria. *Revista de Simulación y Laboratorio*, 3(9), 22–29. <https://bit.ly/3W9cYwu>
- Ramos, V., Hidalgo, M., & Torres, A. (2018). Obtención de pectina a partir de las cáscaras de plátano para su aprovechamiento. *Revistas Ingeniantes*, 2(2), 52–56. <https://bit.ly/3FlvRq3>
- Rodríguez-Serrano, M., Martínez de la Casa, N., Romero-Puertas, M., del Rio, L., & Sandalio, L. (2008). Toxicidad del Cadmio en Plantas. *Ecosistemas*, 17(3), 139–146. <https://bit.ly/3zNHtPk>

- Salazar, I., Rojas, G., Morales, L., Solís, C., & Arévalo, K. (2014). Evaluación de un polímero natural (pectina), para remover Plomo Cadmio y Zinc en disoluciones a nivel laboratorio. *XII Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería*, 1. <https://bit.ly/3FLNxM0>
- Sánchez, D., García, V., Yipmantin, A., Lezama, G., Ale, N., & Maldonado, H. (2014). Estudio de la cinética de biosorción de iones Cadmio (II) en pectina reticulada proveniente de cáscaras de naranja. *Revista Soc Quím Perú*, 80(4), 298–307. <https://bit.ly/3zLTd4O>
- Sanga, W. (2007). Remoción de metales pesados utilizando la pectina como material biodegradable [Tesis de Maestría, Universidad Nacional del Altiplano]. In *Repositorio Institucional UNAP*. <https://bit.ly/3DZ7Hkj>
- Silva, C. (2018). Remoción de cadmio en suelos mediante lavado vertical con dos extractantes [Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tesis de Pregrado]. In *Repositorio Institucional UNAS*. <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/1461>
- Silva, M. (2021). Efecto del biocarbón obtenido a partir de biomasa residual agrícola en la inmovilización de cadmio en el suelo en fase de laboratorio. *Repositorio Institucional UNAS*, 146. <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/2029>
- Soriano, M. (2018). Conductividad eléctrica del suelo. In *Universidad Politécnica de Valencia* (Vol. 1). <https://bit.ly/3tovKmx>
- Szatanik-Kloc, A., Szerement, J., Cybulska, J., & Jozefaciuk, G. (2017). Input of different kinds of soluble pectin to cation binding properties of roots cell walls. *Plant Physiology and Biochemistry*, 120(August), 194–201. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.10.011>
- Toyo-Díaz, M., Toyo-Fernandez, B., & Moreno, M. (2021). Extracción de pectina mediante hidrólisis ácida de la cáscara de cambur (*Musa paradisiaca*). *Revista Electrónica de Ciencias Del Agro y Mar*, 3(5), 25–45. <http://dx.doi.org/10.35381/a.g.v3i5.1658>
- Valencia, D. (2019). Extracción y caracterización de pectina de cáscara de plátano cultivado en Colombia y de la especie *Musa paradisiaca* para su aplicación en la preparación de nanopartículas [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia]. In *Repositorio UNAD*. <https://bit.ly/3zk86en>
- Vega, L. (2017). Extracción de pectina de la cáscara de plátano de dos variedades con dos índices de madurez [Tesis de Pregrado, Universidad Técnica Estatal de Quevedo]. In *Repositorio digital UTEQ*. <https://bit.ly/3U0676P>
- Wang, K., Yu, H., Zhang, X., Ye, D., Huang, H., Wang, Y., Zheng, Z., & Li, T. (2022). Hydrogen peroxide contributes to cadmium binding on root cell wall pectin of cadmium-safe rice line (*Oryza sativa* L.). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 237(2022), 113526–113531. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113526>

- Wang, R., Liang, R., Dai, T., Chen, J., Shuai, X., & Liu, C. (2019). Pectin-based adsorbents for heavy metal ions: A review. *Trends in Food Science and Technology*, *91*(2019), 319–329. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.07.033>
- Yang, H., Yu, H., Wu, Y., Huang, H., Zhang, X., Ye, D., Wang, Y., Zheng, Z., & Li, T. (2022). Nitric oxide amplifies cadmium binding in root cell wall of a high cadmium-accumulating rice (*Oryza sativa* L.) line by promoting hemicellulose synthesis and pectin demethylesterification. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *234*(2022), 113404. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113404>
- Yu, H., Wu, Y., Huang, H., Zhan, J., Wang, K., & Li, T. (2020). The predominant role of pectin in binding Cd in the root cell wall of a high Cd accumulating rice line (*Oryza sativa* L.). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *206*(June), 111210. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111210>

ANEXOS

Apéndice 1. Documentos y tablas

Anexo A-1. Resultados de la caracterización inicial del suelo.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Carretera Central Km 1.21 - Tingo María - CELULAR 944407531

Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología

analisisdesuelosunas@hotmail.com

ANÁLISIS DE SUELOS

SOLICITANTE: ARTETA MEDRANO NELL GIOVANNA

N°	CODIGO DEL LABORATORIO	DEPARTAMENTO	PROVINCIA	DISTRITO	SECTOR	NOMBRE DE LA PARCELA	AREA (Hbs)	CULTIVO ANTERIOR	CULTIVO ACTUAL	RENDIMIENTO (kg/ha)	PROFUNDIDAD DE MUESTREO (cm)	DENSIDAD DE SIEMBRA	COORDENADAS		ALTITUD (m.s.n.m.)							
													LATITUD	LONGITUD								
1	S0050	HUANUCO	LEONCIO PRADO	CASTILLO GRANDE	PICURU YACU	--	--	--	CAGAO	--	--	--	--	--	--							
N°	CODIGO DEL LABORATORIO	ANÁLISIS MECÁNICO			pH	M.O.	N %	P ppm	K ppm	CIC	CAMBIABLES Cmol(+) / kg											
		Arena %	Acilila %	Limo %							Textura 1:1	Ca	Mg	K	Na	Al	H	Cice	Bas. Camb.	Ac. Camb.	Sat. Al	
1	S0050	M1	31	28	41	Franco Arcillo Limoso	5.36	2.70	0.14	6.56	78.62	5.14	3.45	0.57	0.23	0.18	0.50	0.21	5.14	78	14	10

MUESTREADO POR EL SOLICITANTE

RECIBO 001-0641829
TINGO MARIA, 31 DE ENERO

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

Tingo María

[Handwritten Signature]

Dr. HUGO ALFREDO HUAMAN YUPANQUI
Jefe (e) Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología

Anexo A-2. Resultados del análisis inicial de Espectroscopía de Plasma (ICP-OES) del suelo y polímero de cáscara de plátano.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
TINGO MARIA
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
LABORATORIO CENTRAL DE INVESTIGACIÓN



LABORATORIO CENTRAL DE INVESTIGACIÓN

ANÁLISIS

SOLICITANTE Arteta Medrano, Nell Giovanna **DEPARTAMENTO:** Huanuco **PROVINCIA:** L. Prado **DISTRITO:** Castillo Grande

TESIS Remoción de cadmio del suelo con polímero de cáscara de *Musa paradisiaca* L. (var. Bellaco) aplicado a nivel de laboratorio **SECTOR:** Picuruyacu

N°	COD. LAB		DATOS DE LA MUESTRA		Cd Total	Cd Disp.
	Área	Año	Muestra		mg/kg	mg/kg
1	ICP 002	2022	Suelo inicial		2.205	1.355
2	ICP 002-1	2022	Polímero de <i>Musa paradisiaca</i> L. (Var. Bellaco)		0.025	----

Metodo: Digestión ácida con ácido nítrico-perclórico/relación 4:1
Equipo: Espectrofotometro de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP OES) /HORIBA-Ultima expert
Recibo N°: 0645655 **Fecha:** 31/01/2022


UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
LABORATORIO CENTRAL DE INVESTIGACIÓN
Director


Ing. Sánchez Rodríguez Miguel
ESPECIALISTA AREA ICP OES

Anexo A-3. Resultados del análisis de micro fotogrametría en Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) de la pectina de cáscara de plátano.



Universidad Nacional Agraria de la Selva
Vicerrectorado de Investigación
Laboratorio Central de Investigación



RESULTADOS DE ANÁLISIS

Fecha: 26 de abril de 2022

Nombre del cliente: Arteta Medrano Nell Giovana

Email: artetamedranonell@gmail.com

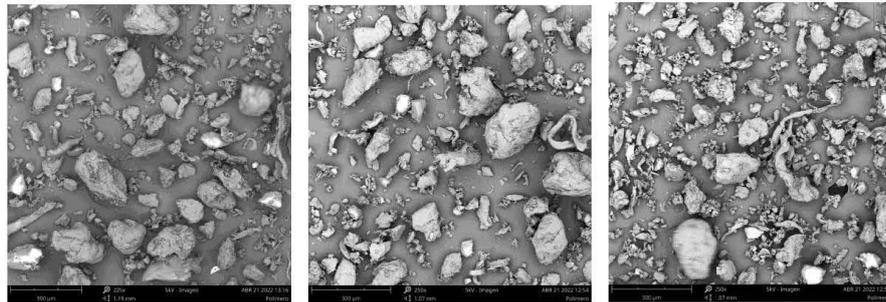
Muestra analizada: Polímero (Pectina de cáscara de plátano)

Análisis solicitado: Microfotografías en Microscopio Electrónico de Barrido (MEB)

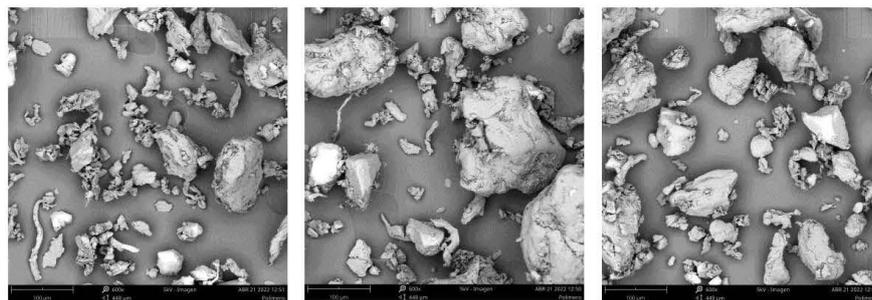
RESULTADOS

Las microfotografías se realizaron en un microscopio electrónico de barrido (MEB) de escritorio Phenom ProX, con portamuestras de reducción de carga, 5 kV de energía y en modo imagen con ampliaciones de 225x, 600x, 1000x, 1500x y 2000x.

Microfotografías 225X



Microfotografías 600X

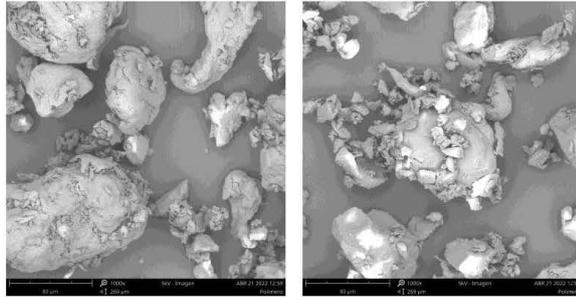




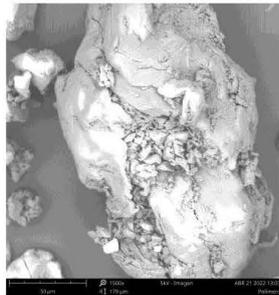
Universidad Nacional Agraria de la Selva
Vicerrectorado de Investigación
Laboratorio Central de Investigación



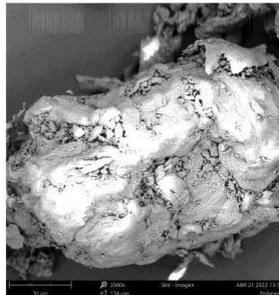
Microfotografías 1000X

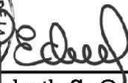


Microfotografías 1500X



Microfotografías 2000X




Dra. Elizabeth S. Ordoñez Gómez
Directora Laboratorio Central de Investigación


Ing. Darlym Reátegui Díaz
Responsable del análisis

Anexo A-4. Resultados de la espectrometría infrarroja por transformada de Fourier con reflectancia total atenuada (FTIR-ATR) de la pectina de cáscara de plátano.



“UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA”

“VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN”
LABORATORIO CENTRAL DE INVESTIGACIÓN



**RESULTADOS DE ESPECTROMETRÍA INFRARROJA POR
TRANSFORMADA DE FOURIER CON REFLECTANCIA TOTAL ATENUADA
(FTIR - ATR)**

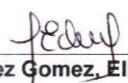
1. Descripción de la muestra

Fecha de recepción	28/03/2022 Hora: 11:00 a.m.
Solicitante	Arteta Medrano Nell Giovana
Tipo de muestra	Polímero (harina)
Cantidad muestra	5.0 g.
Humedad referencial	No especificada
N° de Recibo	01-0646930
Observaciones	Análisis interno UNAS (Tesisista) N° resolución: 105-20222-D-FRNR-UNAS

2. Programación del experimento

Aparato (Marca)	Espectrómetro Infrarrojo – Transformado Fourier (LUMEX)
Modelo (País)	InfraLUM FT-08 (Canadá)
Modo	ATR
Rango de Espectro (cm⁻¹)	550 - 4000
Resolución (cm⁻¹)	4.00
N° Barridos	30


Trujillo Ccanahuire, José L.
Tec. Área de Calorimetría


Dra. Ordoñez Gomez, Elizabeth S.
Directora del Laboratorio Central de
Investigación UNAS



“UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA”

“VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN”
LABORATORIO CENTRAL DE INVESTIGACIÓN



3. Picos detectados:

N°	Wavenumber (cm ⁻¹)	Transmittance (%)
1	547.85	69.45790
2	582.80	79.85401
3	604.78	74.15402
4	613.76	74.15530
5	633.83	75.68581
6	852.47	79.28519
7	905.64	74.51900
8	996.61	66.87957
9	1052.17	68.16267
10	1227.72	88.22717
11	1332.38	88.63218
12	1424.18	90.01215
13	1611.30	94.99020
14	1729.45	92.11308
15	2810.94	94.81564
16	2835.79	94.55996
17	2904.92	93.24825
18	3245.47	88.70550
19	3268.95	88.42106
20	3355.98	89.12067



4. Espectro FTIR.

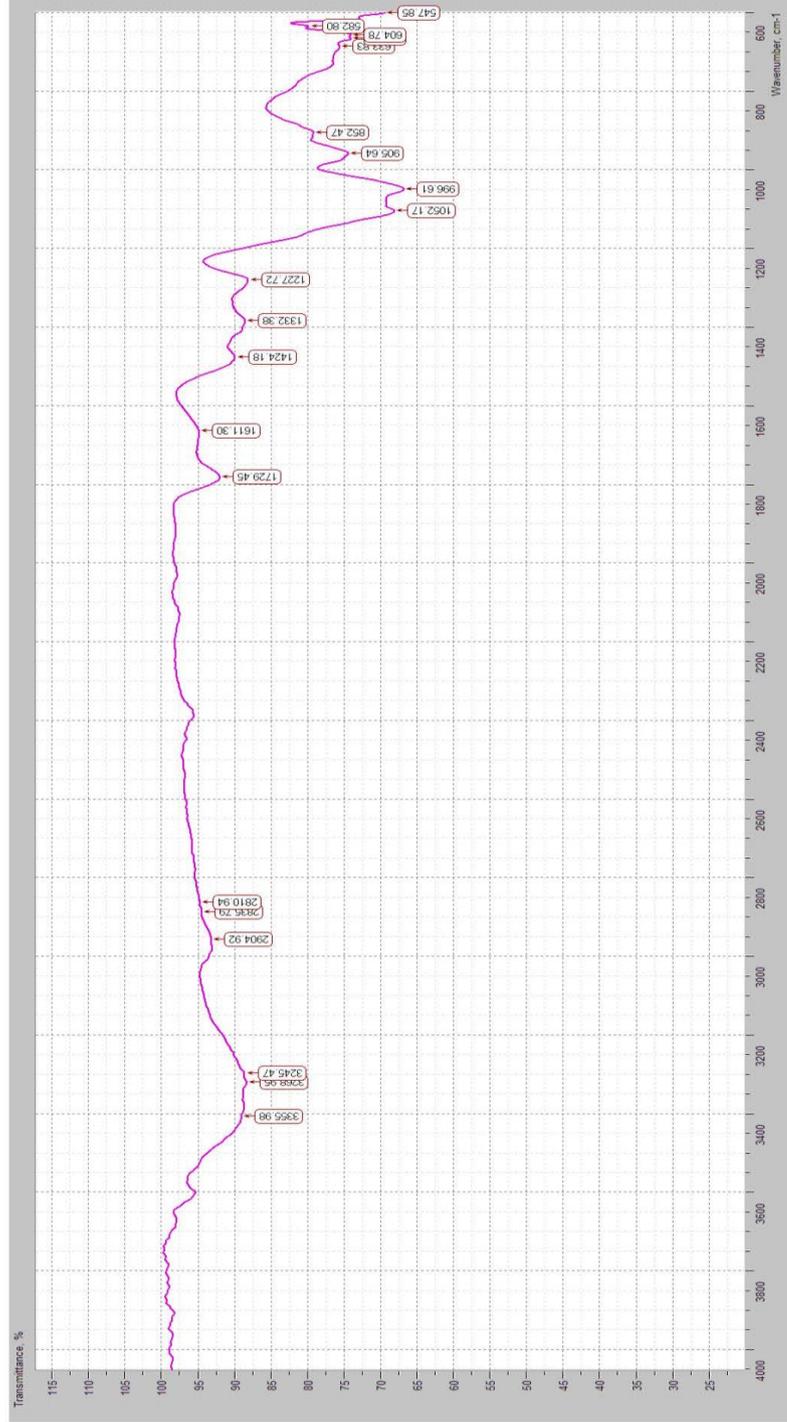


Figura 1. Espectro FTIR en Polímero

Anexo A-5. Resultados de Espectroscopía de Plasma (ICP-OES) del suelo tratado.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

TINGO MARIA

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

LABORATORIO CENTRAL DE INVESTIGACIÓN



ANALISIS

SOLICITANTE Arteta Medrano, Nell Giovanna **DEPARTAMENTO:** Huánuco **PROVINCIA:** L. Prado **DISTRITO** Castillo Grande
TESIS Remoción de cadmio del suelo con polímero de cascara de *Musa paradisiaca* L. (var. *Bellaco*) aplicado a nivel de laboratorio

N°	CODIGO		DATOS DE LA MUESTRA			Cd Total	Cd Disp.
	Área	Año	Muestra	Tratamiento	Repetición	mg/kg	mg/kg
1	ICP 248	2022	Suelo	T0	R 1	2.210	1.176
2	ICP 249	2022	Suelo	T0	R 2	2.204	1.226
3	ICP 250	2022	Suelo	T0	R 3	2.185	1.336
4	ICP 251	2022	Suelo	T0	R 4	2.201	1.275
5	ICP 252	2022	Suelo	T0	R 5	2.195	1.318
6	ICP 253	2022	Suelo	T1	R 1	2.175	0.861
7	ICP 254	2022	Suelo	T1	R 2	2.204	0.849
8	ICP 255	2022	Suelo	T1	R 3	2.135	0.859
9	ICP 256	2022	Suelo	T1	R 4	2.180	0.911
10	ICP 257	2022	Suelo	T1	R 5	2.175	0.925
11	ICP 258	2022	Suelo	T2	R 1	2.235	1.107
12	ICP 259	2022	Suelo	T2	R 2	2.205	1.102
13	ICP 260	2022	Suelo	T2	R 3	2.165	1.144
14	ICP 261	2022	Suelo	T2	R 4	2.165	1.134
15	ICP 262	2022	Suelo	T2	R 5	2.105	1.121
16	ICP 263	2022	Suelo	T3	R 1	2.080	1.304
17	ICP 264	2022	Suelo	T3	R 2	2.120	1.285
18	ICP 265	2022	Suelo	T3	R 3	2.020	1.285
19	ICP 266	2022	Suelo	T3	R 4	2.195	1.366
20	ICP 267	2022	Suelo	T3	R 5	2.125	1.344
21	ICP 268	2022	Suelo	T4	R 1	2.170	0.954
22	ICP 269	2022	Suelo	T4	R 2	2.165	0.951
23	ICP 270	2022	Suelo	T4	R 3	2.125	0.951
24	ICP 271	2022	Suelo	T4	R 4	2.175	0.969
25	ICP 272	2022	Suelo	T4	R 5	2.190	1.005
26	ICP 273	2022	Suelo	T5	R 1	2.205	0.987
27	ICP 274	2022	Suelo	T5	R 2	2.180	1.060
28	ICP 275	2022	Suelo	T5	R 3	2.190	0.917
29	ICP 276	2022	Suelo	T5	R 4	2.200	0.944
30	ICP 277	2022	Suelo	T5	R 5	2.185	1.005

Método: Digestión ácida con ácido nítrico-perclórico/relación 4:1

Equipo: Espectrofotómetro de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP OES) /HORIBA-Ultima expert

Recibo N°: 0646929

Fecha: 27/05/2022

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
 LABORATORIO CENTRAL DE INVESTIGACIÓN
 Dra. Elizabeth Ordóñez Gómez
 DIRECTORA

Ing. Sánchez Rodríguez Miguel
 ESPECIALISTA AREA ICP OES

Anexo B. Algoritmos usados en R Studio

Anexo B-1. Algoritmo para el análisis de los efectos en los parámetros fisicoquímicos del suelo.

```
#####
### EFECTOS EN PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS ###
#####

#I. Instalación de paquetes
library(datasets)
library(ggplot2)
library(multcompView)
library(dplyr)

#II. Cargar y comprobar datos
data <- read.table(file = "C:\\Users\\Obj 1.txt", header = T)
data

str(data)
attach(data)
names(data)

class(Trat)
Trat = factor(Trat, levels = c(1:6), labels = c("T0", "T1", "T2", "T3", "T4",
"T5"))
class(Trat)
head(Trat)

tabla = data.frame(Trat, Obs, pH, Cond, Tem, TDS)
str(tabla)
View(tabla)
#write.csv(x = tabla, file="Data_new.csv")
attach(tabla)

#III. Descriptivos de los parámetros Fisicoquímicos
library(report)
FSA::Summarize(pH ~ Trat,
               data=tabla,
               digits=2)

FSA::Summarize(Cond ~ Trat,
               data=tabla,
               digits=2)

FSA::Summarize(Tem ~ Trat,
               data=tabla,
               digits=2)

FSA::Summarize(TDS ~ Trat,
               data=tabla,
               digits=2)

#3.1. Media de los parámetros Fisicoquímicos
library(doBy)
tab1 <- summaryBy(pH ~ Trat + Obs, data = tabla,
                  FUN = function(x) {c(Media = mean(x, na.rm = T),
                                       Md = median(x, na.rm = T),
                                       Desv = sd(x, na.rm = T),
                                       Rg = range(x, na.rm = T))})

tab1

tab2 <- summaryBy(Cond ~ Trat + Obs, data = tabla,
```

```

      FUN = function(x) {c(Media = mean(x, na.rm = T),
                           Md = median(x, na.rm = T),
                           Desv = sd(x, na.rm = T),
                           Rg = range(x, na.rm = T))})
tab2

tab3 <- summaryBy(Tem ~ Trat + Obs, data = tabla,
                  FUN = function(x) {c(Media = mean(x, na.rm = T),
                                       Md = median(x, na.rm = T),
                                       Desv = sd(x, na.rm = T),
                                       Rg = range(x, na.rm = T))})
tab3

tab4 <- summaryBy(TDS ~ Trat + Obs, data = tabla,
                  FUN = function(x) {c(Media = mean(x, na.rm = T),
                                       Md = median(x, na.rm = T),
                                       Desv = sd(x, na.rm = T),
                                       Rg = range(x, na.rm = T))})
tab4

```

#IV. Gráfico del comportamiento de los parámetros Fisicoquímicos

```

ggplot(tab1, aes(x=Obs, y=pH.Media, shape=Trat, linetype = Trat)) +
  geom_point(size = 3) + ylim(3.8, 7) +
  xlab("Semana") + ylab("pH") +
  theme_classic()

ggplot(tab2, aes(x=Obs, y=Cond.Media, shape=Trat, linetype = Trat)) +
  geom_point(size = 3) + ylim(15.5, 410) +
  xlab("Semana") + ylab("Conductividad (us/cm)") +
  theme_classic()

ggplot(tab3, aes(x=Obs, y=Tem.Media, shape=Trat, linetype = Trat)) +
  geom_point(size = 3) + ylim(25, 26.1) +
  xlab("Semana") + ylab("Temperatura (°C)") +
  theme_classic()

ggplot(tab4, aes(x=Obs, y=TDS.Media, shape=Trat, linetype = Trat)) +
  geom_point(size = 3) + ylim(14, 125) +
  xlab("Semana") + ylab("Sólidos Totales Disueltos") +
  theme_classic()

```

Anexo B-2. Algoritmo para el análisis de la comparación de medias y pruebas Post-Hoc.

```
#####
### COMPARACIÓN DE MEDIAS Y POST-HOC ###
#####

#I.Instalación de paquetes
library(datasets)
library(ggplot2)
library(multcompView)
library(dplyr)
library(DescTools)
library(rstatix)
library(apaTables)

#II.Cargar y comprobar datos
data <- read.table(file = "C:\\Users\\Obj 3.txt", header = T)
data

str(data)
attach(data)
names(data)

class(Trat)
Trat = factor(Trat, levels = c(1:6), labels = c("T0", "T1", "T2", "T3", "T4",
"T5"))
class(Trat)
head(Trat)

tabla = data.frame(Trat,Rep, Efic, Cap)
str(tabla)
View(tabla)
#write.csv(x = tabla,file="Data_new.csv")
attach(tabla)

#III. Descriptivos de la Eficiencia y Capacidad de adsorción
library(report)
FSA::Summarize(Efic ~ Trat,
               data=tabla,
               digits=2)

FSA::Summarize(Cap ~ Trat,
               data=tabla,
               digits=2)

#IV. Eficiencia de la pectina

# 4.1. Verificación de los supuestos

# A. Regresión Lineal Simple
M1 <-lm(Efic ~ Trat)
M1
summary(M1)

# B. Cálculo del error
e_M1 <- residuals(M1)
e_M1

# C. Pruebas de significación del modelo
anova(M1)
```

```

# D. Método grafico
par(mfrow = c(2,2))
plot(M1)

# E. Supuestos estadísticos
# a) Normalidad
library(nortest)

# Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk
shapiro.test(e_M1)

# b) Homocedasticidad
library(car)
library(lmtest)

# Prueba de igualdad de varianzas
leveneTest(Efic ~ Trat, data = tabla)

# c) Independencia
# Prueba de Durbin-Watson
dwtest(M1)
durbinWatsonTest(M1)

# d) Linealidad
mean(e_M1)

# e) Valores atípicos extremos
library(rstatix)
tabla %>%
  select(Trat, Efic) %>%
  group_by(Trat) %>%
  identify_outliers(Efic)

# 4.2. Análisis de Varianza
# a) ANOVA
anova <- aov(Efic ~ Trat, data = tabla)
summary(anova)

report(anova)
apa.aov.table(anova, filename="tabla5.doc", table.number = 4)

# b) Test de Kruskal-wallis
kruskal.test(Bm ~ Trat, data = tabla)

# c) Test de Welch
oneway.test(Bm ~ Trat)

# 4.3. Comparaciones Post-Hoc

# Prueba de Tukey
tukey <- TukeyHSD(anova)
print(tukey)

# Prueba de Dunnett's
DunnnettTest(Efic ~ Trat)

# b) Prueba de Mann-Whitney
pairwise.wilcox.test(Bm, Trat)
pairwise.wilcox.test(tabla$Bm, tabla$Trat, p.adjust.method = "bonferroni")

```

```

pairwise.wilcox.test(tabla$Bm, tabla$Trat, p.adjust.method = "BH")

# Prueba de Dunn
FSA::dunnTest(Bm ~ Trat, data = tabla, method = 'bh')

# c) Prueba de Games-Howell
games_howell_test(tabla, Bm ~ Trat, conf.level = 0.95, detailed = FALSE)
games.howell(Trat, Bm)

# 4.4. Visualización de letras compacto
cld <- multcompLetters4(anova, tukey)
print(cld)

# 4.5. Tabla con factores y 3er cuantil
Tk <- group_by(tabla, Trat) %>%
  summarise(mean=mean(Efic), quant = quantile(Efic, probs = 0.75)) %>%
  arrange(desc(mean))

# 4.6. Extraer la visualización de letras compactas y añadirla a la tabla Tk
cld <- as.data.frame.list(cld$Trat)
Tk$cld <- cld$Letters

print(Tk)

# 4.7. Gráfico con barras de error

# a. Tipo de fuente
windowsFonts(A = windowsFont("Times New Roman"))

# b. Gráfico boxplot

p <- ggplot(tabla, aes(Trat, Efic))
p <- p + stat_summary(fun = mean, geom = "bar", fill="gray", alpha=1, width = .5)
p <- p + stat_summary(fun.data = mean_se, geom = "errorbar", width = 0.15, position = "dodge")
p <- p + theme_classic()
p <- p + theme(text = element_text(family = "A"))
p <- p + xlab("Tratamientos") + ylab("Rendimiento (%)")
p <- p + coord_cartesian(ylim = c(0, 40))
p <- p + theme(panel.grid.major = element_blank(), panel.grid.minor = element_blank())
p <- p + geom_text(data = Tk, aes(x = Trat, y = quant, label = cld), size = 3, vjust=-1, hjust =-1)
p

```

Anexo C. Análisis estadístico de las características fisicoquímicas del suelo tratado.

Tabla 9. Registro de comportamiento de las características fisicoquímicas del suelo en tratamiento

Tratamiento	Semana	pH	Cond. ($\mu\text{S/cm}$)	Tem. ($^{\circ}\text{C}$)	TDS (ppm)
0	0	6,36	68,19	25,6	31
0	0	6,35	41,67	25,4	20
0	0	6,35	56,85	25,5	25
0	0	6,32	43,42	25,6	19
0	0	6,42	38,60	25,6	20
0	1	6,12	67,51	25,4	25
0	1	6,08	62,35	25,5	21
0	1	6,06	67,62	25,4	26
0	1	6,08	58,74	25,6	22
0	1	6,15	65,46	25,5	20
0	2	5,95	66,81	25,5	21
0	2	5,94	71,46	25,4	23
0	2	5,91	73,64	25,6	25
0	2	5,95	69,76	25,6	23
0	2	5,91	73,19	25,7	25
0	3	6,27	56,78	25,5	35
0	3	6,14	62,92	25,5	38
0	3	6,07	68,40	25,6	39
0	3	6,01	73,17	25,5	40
0	3	6,02	66,15	25,7	37
0	4	5,95	86,53	25,9	48
0	4	5,98	81,55	25,9	42
0	4	5,99	82,45	26	41
0	4	5,96	89,07	25,7	44
0	4	5,93	84,52	25,9	43
1	0	5,18	126,0	25,7	23
1	0	5,22	116,0	25,7	26
1	0	5,10	138,1	25,7	24
1	0	5,20	133,9	25,7	23
1	0	5,09	125,9	25,7	25
1	1	5,76	116,3	25,7	25
1	1	5,64	108,4	25,7	26
1	1	5,81	119,7	25,7	24
1	1	5,42	121,1	25,7	21
1	1	5,56	106,9	25,7	24
1	2	6,14	105,2	25,7	23
1	2	6,07	103,1	25,7	25
1	2	6,29	101,0	25,7	23
1	2	6,08	118,5	25,7	26
1	2	6,01	96,41	25,7	22

Continuación Tabla 9

Tratamiento	Semana	pH	Cond. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Tem. ($^{\circ}\text{C}$)	TDS (ppm)
1	3	6,59	15,57	25,7	15
1	3	6,54	17,21	25,7	14
1	3	6,61	15,12	25,7	14
1	3	6,49	13,98	25,6	13
1	3	6,44	16,41	25,3	16
1	4	6,71	33,54	25,9	14
1	4	6,6	33,37	26	15
1	4	6,7	34,53	26	15
1	4	6,68	34,09	26	13
1	4	6,69	33,27	26	15
2	0	4,43	173,7	23,5	66
2	0	4,75	163,6	25,7	44
2	0	4,68	162,3	25,7	40
2	0	4,66	182,8	25,7	48
2	0	4,70	164,3	25,7	45
2	1	4,98	186,2	25,7	72
2	1	5,02	214,6	25,4	53
2	1	4,84	273,1	25,7	57
2	1	4,99	245,7	25,6	65
2	1	4,71	264,2	25,7	61
2	2	5,12	266,30	25,8	79
2	2	5,35	238,30	25,7	60
2	2	5,39	246,60	25,7	58
2	2	5,13	310,50	25,7	85
2	2	4,86	261,20	25,7	76
2	3	6,48	22,22	25,5	29
2	3	6,47	22,0	25,5	27
2	3	6,58	24,33	25,4	35
2	3	6,52	28,64	25,4	33
2	3	6,35	21,72	25,5	22
2	4	6,80	56,39	26	24
2	4	6,70	50,90	26	23
2	4	6,83	65,20	26,1	27
2	4	6,79	66,83	26,2	29
2	4	6,71	51,99	26,1	24
3	0	4,54	208,5	25,7	59
3	0	4,45	200,4	25,7	47
3	0	4,65	197,5	25,7	33
3	0	4,58	189,1	25,8	45
3	0	4,59	186,1	25,7	51
3	1	4,65	284,4	25,7	62
3	1	4,72	263,7	25,7	74
3	1	4,97	271,2	25,7	63
3	1	4,64	259,5	25,7	86

Continuación Tabla 9

Tratamiento	Semana	pH	Cond. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Tem. ($^{\circ}\text{C}$)	TDS (ppm)
3	1	4,61	278,1	25,7	67
3	1	4,71	358,6	25,7	101
3	2	4,86	393,4	25,7	92
3	2	5,03	397,5	25,7	87
3	2	5,01	369,3	25,6	77
3	2	4,98	333,6	25,7	76
3	2	5,69	48,05	25,6	71
3	3	6,12	41,35	25,5	49
3	3	6,01	35,76	25,5	50
3	3	6,15	37,05	25,6	56
3	3	6,98	43,21	25,7	50
3	3	6,22	216,3	26	91
3	4	6,71	120,6	26	50
3	4	6,84	109,0	26,1	44
3	4	6,81	98,44	26,1	41
3	4	6,63	90,17	26,2	40
4	0	4,38	178,7	25,7	46
4	0	4,20	198,9	25,7	67
4	0	4,29	178,3	25,7	53
4	0	4,41	183,4	25,7	49
4	0	4,37	200,9	26,0	51
4	1	4,46	256,4	26,0	71
4	1	4,51	318,9	25,7	84
4	1	4,46	274,3	25,7	64
4	1	4,43	356,7	25,4	86
4	1	4,42	259,1	25,7	61
4	2	4,53	412,1	25,7	99
4	2	4,55	471,4	25,7	106
4	2	4,50	373,2	25,5	97
4	2	4,50	413,8	25,6	102
4	2	4,45	371,0	25,7	90
4	3	5,25	64,633	26,0	73
4	3	5,63	72,93	25,8	77
4	3	4,93	96,89	25,6	93
4	3	4,91	89,43	26	94
4	3	4,92	102,7	26,2	87
4	4	6,08	141,9	26,1	60
4	4	6,19	196,5	26,1	70
4	4	5,86	146,5	26,2	59
4	4	6,16	126,1	26,2	50
4	4	5,93	120,7	26,1	53
5	0	4,08	256,5	25,7	64
5	0	4,00	235,8	25,7	70
5	0	4,03	247,7	25,7	54

Continuación Tabla 9

Tratamiento	Semana	pH	Cond. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Tem. ($^{\circ}\text{C}$)	TDS (ppm)
5	0	4,00	246,9	25,7	60
5	0	4,01	252,6	25,7	60
5	1	4,12	278,1	25,7	76
5	1	4,08	315,7	25,7	84
5	1	4,26	298,6	25,7	68
5	1	4,17	324,4	25,7	81
5	1	4,18	347,1	25,7	95
5	2	4,24	399,5	25,7	152
5	2	4,31	430,6	25,6	118
5	2	4,40	421,5	25,6	104
5	2	4,34	430,0	25,6	117
5	2	4,24	359,8	25,7	112
5	3	4,85	124,4	24,7	103,2
5	3	4,86	114,4	24,7	102,0
5	3	5,49	88,6	24,7	79
5	3	5,05	104,5	25,8	97
5	3	5,15	110,2	25,8	90
5	4	5,16	197,7	26,2	94
5	4	5,56	168,5	26,2	72
5	4	5,61	210,1	26,2	83
5	4	5,79	162,4	26,1	66
5	4	5,56	211,9	26,1	86

Tabla 10. Descriptivos del pH del suelo tratado

Tratamiento	n	Media	DE	Mín.	Q ₁	Mediana	Q ₃	Máx.
T0	25	6,09	0,16	5,91	5,95	6,06	6,15	6,42
T1	25	6,02	0,58	5,09	5,56	6,08	6,59	6,71
T2	25	5,59	0,89	4,43	4,84	5,13	6,52	6,83
T3	25	5,41	0,89	4,45	4,65	4,98	6,15	6,98
T4	25	4,89	0,67	4,2	4,43	4,51	5,25	6,19
T5	25	4,62	0,62	4	4,12	4,31	5,15	5,79

Tabla 11. Descriptivos de la Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$) del suelo tratado

Tratamiento	n	Media	DE	Mín.	Q ₁	Mediana	Q ₃	Máx.
T0	25	67,07	13,07	38,6	62,35	67,62	73,19	89,07
T1	25	79,34	46,84	13,98	33,37	103,1	118,5	138,1
T2	25	150,54	99,12	21,72	51,99	164,3	245,7	310,5
T3	25	201,23	118,66	35,76	98,44	200,4	278,1	397,5
T4	25	224,22	120,04	64,63	126,1	196,5	318,9	471,4
T5	25	253,5	106,51	88,6	168,5	247,7	324,4	430,6

Tabla 12. Descriptivos de los Sólidos Totales Disueltos (ppm) del suelo tratado

Tratamiento	n	Media	DE	Mín.	Q ₁	Mediana	Q ₃	Máx.
T0	25	30,12	9,43	19	22	25	39	48
T1	25	20,16	4,97	13	15	23	24	26
T2	25	47,28	19,74	22	29	45	61	85
T3	25	62,48	18,82	33	49	59	76	101
T4	25	73,68	18,89	46	59	71	90	106
T5	25	87,49	22,68	54	70	84	102	152

Tabla 13. Supuestos estadísticos para las características fisicoquímicas del suelo tratado

Parámetro Fisicoquímico	Normalidad (Shapiro-Wilk)	Homocedasticidad (Levene)	Independencia (Durbin-Watson)	Linealidad (Media residual)
pH	8,52E-06	1,98E-04	2,20E-16	2,07E-17
Conductividad (uS/cm)	0,017	3,14E-09	2,20E-16	1,26E-15
Temperatura (°C)	3,20E-14	0,147	9,61E-08	-5,93E-18
Sólidos Totales Disueltos (ppm)	0,013	9,81E-07	2,20E-16	5,58E-16

Tabla 14. Prueba de Kruskal-Wallis para el pH del suelo tratado

Variable	Tratamientos	n	Medias	DE	Mediana	H	P valor
pH	T0	25	6,09	0,16	6,06	59,833	1,316E-11
	T1	25	6,02	0,58	6,08		
	T2	25	5,59	0,89	5,13		
	T3	25	5,41	0,89	4,98		
	T4	25	4,89	0,67	4,51		
	T5	25	4,62	0,62	4,31		

CV: 15,8%.

Tabla 15. Prueba de Kruskal-Wallis para la conductividad del suelo tratado

Variable	Tratamientos	n	Medias	DE	Mediana	H	P valor
Conductividad	T0	25	67,07	13,07	67,62	57,902	3,295E-11
	T1	25	79,34	46,84	103,1		
	T2	25	150,54	99,12	164,3		
	T3	25	201,23	118,66	200,4		
	T4	25	224,22	120,04	196,5		
	T5	25	253,5	106,51	247,7		

CV: 71,1%.

Tabla 16. Prueba de Kruskal-Wallis para los Sólidos Totales Disueltos del suelo tratado

Variable	Tratamientos	n	Medias	DE	Mediana	H	P valor
Sólidos Totales Disueltos(ppm)	T0	25	30,12	9,43	25	57,902	3,295E-11
	T1	25	20,16	4,97	23		
	T2	25	47,28	19,74	45		
	T3	25	62,48	18,82	59		
	T4	25	73,68	18,89	71		
	T5	25	87,49	22,68	84		

CV: 54,1%.

Anexo D. Análisis estadístico de la eficiencia y capacidad de adsorción de la pectina**Tabla 17.** Registro de la eficiencia y capacidad de adsorción

Trat.	Rep.	Cd Total	Cd ⁺² inicial	Cd ⁺² final	Eficiencia (%)	Cap. (µg/g)
0	1	2,21	1,355	1,176	13,21	0,00
0	2	2,204	1,355	1,226	9,52	0,00
0	3	2,185	1,355	1,336	1,40	0,00
0	4	2,201	1,355	1,275	5,90	0,00
0	5	2,195	1,355	1,318	2,73	0,00
1	1	2,175	1,355	0,861	36,46	24,70
1	2	2,204	1,355	0,849	37,34	25,30
1	3	2,135	1,355	0,859	36,61	24,80
1	4	2,18	1,355	0,911	32,77	22,20
1	5	2,175	1,355	0,925	31,73	21,50
2	1	2,235	1,355	1,107	18,30	6,20
2	2	2,205	1,355	1,102	18,67	6,33
2	3	2,165	1,355	1,144	15,57	5,28
2	4	2,165	1,355	1,134	16,31	5,53
2	5	2,105	1,355	1,121	17,27	5,85
3	1	2,08	1,355	1,304	3,76	0,85
3	2	2,12	1,355	1,285	5,17	1,17
3	3	2,02	1,355	1,285	5,17	1,17
3	4	2,195	1,355	1,366	-0,81	-0,18
3	5	2,125	1,355	1,344	0,81	0,18
4	1	2,17	1,355	0,954	29,59	5,01
4	2	2,165	1,355	0,951	29,82	5,05
4	3	2,125	1,355	0,951	29,82	5,05
4	4	2,175	1,355	0,969	28,49	4,83
4	5	2,19	1,355	1,005	25,83	4,38
5	1	2,205	1,355	0,987	27,16	3,68
5	2	2,18	1,355	1,06	21,77	2,95
5	3	2,19	1,355	0,917	32,32	4,38
5	4	2,2	1,355	0,944	30,33	4,11
5	5	2,185	1,355	1,005	25,83	3,50

Tabla 18. Descriptivos de la Eficiencia (%) de la pectina

Tratamiento	n	mean	sd	min	Q1	median	Q3	max
T0	5	6,55	4,87	1,4	2,73	5,9	9,52	13,21
T1	5	34,98	2,54	31,73	32,77	36,46	36,6	37,34
T2	5	17,23	1,31	15,57	16,31	17,27	18,3	18,67
T3	5	2,82	2,7	-0,81	0,81	3,76	5,17	5,17
T4	5	28,71	1,7	25,83	28,49	29,59	29,82	29,82
T5	5	27,48	4,09	21,77	25,83	27,16	30,33	32,33

Tabla 19. Descriptivos de la Capacidad de adsorción ($\mu\text{g/g}$) de la pectina

Tratamiento	n	mean	sd	min	Q1	median	Q3	max
T0	5	0	0	0	0	0	0	0
T1	5	23,7	1,72	21,5	22,2	24,7	24,8	25,3
T2	5	5,84	0,44	5,28	5,53	5,85	6,2	6,32
T3	5	0,64	0,61	-0,18	0,18	0,85	1,17	1,17
T4	5	4,86	0,29	4,38	4,82	5,01	5,05	5,05
T5	5	3,72	0,55	2,95	3,5	3,68	4,11	4,38

Tabla 20. Supuestos estadísticos para Eficiencia y Capacidad de adsorción de la pectina

Parámetro Físicoquímico	Normalidad (Shapiro - Wilk)	Homocedasticidad (Levene)	Independencia (Durbin-Watson)	Linealidad (Media residual)
Eficiencia (%)	0,88	0,06	0,09	1,15E-16
Capacidad de adsorción ($\mu\text{g/g}$)	0,09	0,08	0,00	1,31E-18

Tabla 21. ANOVA de la Eficiencia de la pectina

Fuente de variación	SC	GL	CM	Fc	Pr(>F)	Sig.
(Intercepto)	214,74	1	214,74	21,92	0	
Eficiencia	4195,72	5	839,14	85,68	1,67E-14	***
Residuals	235,06	24	9,79			
Total	4430,78	29				

Poco significativo (*), Significativo (**), Muy significativo (***), No significativo (ns).

Tabla 22. ANOVA de la Capacidad de adsorción de la pectina

Fuente de variación	SC	GL	CM	Fc	Pr(>F)	Sig.
(Intercepto)	0	1	0	0	0	
Capacidad de adsorción	1916,43	5	383,29	586,23	2,20E-16	***
Residuals	15,69	24	0,65			
Total	1932,12	29				

Poco significativo (*), Significativo (**), Muy significativo (***), No significativo (ns).

Anexo E. Análisis estadístico del Índice de germinación de *Lactuca sativa*

Tabla 23. Registro del Índice de Germinación (%) de *Lactuca sativa*

Dilución	Rep.	Gx	Gt	PGR	Rx	Rt	CRR	IG
Pectina-0%	1	10	10	100,0	3,760	3,800	98,9	98,9
Pectina-0%	2	10	10	100,0	3,730	3,800	98,2	98,2
Pectina-0%	3	10	10	100,0	3,590	3,800	94,5	94,5
Pectina-10%	1	7	10	70,0	1,314	3,800	34,6	24,2
Pectina-10%	2	9	10	90,0	1,011	3,800	26,6	23,9
Pectina-10%	3	8	10	80,0	1,713	3,800	45,1	36,1
Pectina-20%	1	7	10	70,0	1,029	3,800	27,1	18,9
Pectina-20%	2	4	10	40,0	0,800	3,800	21,1	8,4
Pectina-20%	3	4	10	40,0	0,650	3,800	17,1	6,8
Pectina-30%	1	4	10	40,0	0,450	3,800	11,8	4,7
Pectina-30%	2	4	10	40,0	0,500	3,800	13,2	5,3
Pectina-30%	3	4	10	40,0	0,575	3,800	15,1	6,1
T0-0%	1	10	10	100,0	3,890	3,800	102,4	102,4
T0-0%	2	10	10	100,0	3,470	3,800	91,3	91,3
T0-0%	3	10	10	100,0	3,930	3,800	103,4	103,4
T0-10%	1	7	10	70,0	2,957	3,800	77,8	54,5
T0-10%	2	8	10	80,0	2,750	3,800	72,4	57,9
T0-10%	3	7	10	70,0	3,214	3,800	84,6	59,2
T0-20%	1	6	10	60,0	1,500	3,800	39,5	23,7
T0-20%	2	6	10	60,0	2,733	3,800	71,9	43,2
T0-20%	3	7	10	70,0	2,300	3,800	60,5	42,4
T0-30%	1	4	10	40,0	1,050	3,800	27,6	11,1
T0-30%	2	3	10	30,0	1,333	3,800	35,1	10,5
T0-30%	3	5	10	50,0	1,600	3,800	42,1	21,1
T1-0%	1	10	10	100,0	3,820	3,920	97,4	97,4
T1-0%	2	10	10	100,0	3,830	3,920	97,7	97,7
T1-0%	3	10	10	100,0	3,890	3,920	99,2	99,2
T1-10%	1	7	10	70,0	3,029	3,920	77,3	54,1
T1-10%	2	7	10	70,0	2,943	3,920	75,1	52,6
T1-10%	3	6	10	60,0	2,750	3,920	70,2	42,1
T1-20%	1	7	10	70,0	2,657	3,920	67,8	47,4
T1-20%	2	8	10	80,0	3,488	3,920	89,0	71,2
T1-20%	3	8	10	80,0	3,550	3,920	90,6	72,4
T1-30%	1	8	10	80,0	3,238	3,920	82,6	66,1
T1-30%	2	8	10	80,0	3,900	3,920	99,5	79,6
T1-30%	3	8	10	80,0	3,900	3,920	99,5	79,6
T2-0%	1	10	10	100,0	3,580	3,890	92,0	92,0
T2-0%	2	10	10	100,0	3,880	3,890	99,7	99,7
T2-0%	3	10	10	100,0	3,870	3,890	99,5	99,5
T2-10%	1	7	10	70,0	1,686	3,890	43,3	30,3
T2-10%	2	6	10	60,0	1,767	3,890	45,4	27,2
T2-10%	3	7	10	70,0	1,457	3,890	37,5	26,2

Continuación Tabla 23

Dilución	Rep.	Gx	Gt	PGR	Rx	Rt	CRR	IG
T2-20%	1	6	10	60,0	1,983	3,890	51,0	30,6
T2-20%	2	8	10	80,0	1,738	3,890	44,7	35,7
T2-20%	3	7	10	70,0	1,543	3,890	39,7	27,8
T2-30%	1	8	10	80,0	2,263	3,890	58,2	46,5
T2-30%	2	8	10	80,0	1,975	3,890	50,8	40,6
T2-30%	3	8	10	80,0	1,900	3,890	48,8	39,1
T3-0%	1	10	10	100,0	3,610	3,810	94,8	94,8
T3-0%	2	10	10	100,0	3,760	3,810	98,7	98,7
T3-0%	3	10	10	100,0	3,910	3,810	102,6	102,6
T3-10%	1	5	10	50,0	2,240	3,810	58,8	29,4
T3-10%	2	6	10	60,0	2,700	3,810	70,9	42,5
T3-10%	3	5	10	50,0	3,060	3,810	80,3	40,2
T3-20%	1	5	10	50,0	2,140	3,810	56,2	28,1
T3-20%	2	4	10	40,0	2,325	3,810	61,0	24,4
T3-20%	3	5	10	50,0	2,000	3,810	52,5	26,2
T3-30%	1	4	10	40,0	0,975	3,810	25,6	10,2
T3-30%	2	4	10	40,0	0,675	3,810	17,7	7,1
T3-30%	3	3	10	30,0	0,800	3,810	21,0	6,3
T4-0%	1	10	10	100,0	3,890	3,850	101,0	101,0
T4-0%	2	10	10	100,0	3,600	3,850	93,5	93,5
T4-0%	3	10	10	100,0	3,790	3,850	98,4	98,4
T4-10%	1	7	10	70,0	3,071	3,850	79,8	55,8
T4-10%	2	7	10	70,0	3,557	3,850	92,4	64,7
T4-10%	3	7	10	70,0	2,557	3,850	66,4	46,5
T4-20%	1	9	10	90,0	3,178	3,850	82,5	74,3
T4-20%	2	7	10	70,0	2,029	3,850	52,7	36,9
T4-20%	3	9	10	90,0	2,522	3,850	65,5	59,0
T4-30%	1	7	10	70,0	1,800	3,850	46,8	32,7
T4-30%	2	7	10	70,0	2,886	3,850	75,0	52,5
T4-30%	3	8	10	80,0	2,538	3,850	65,9	52,7
T5-0%	1	10	10	100,0	3,760	3,790	99,2	99,2
T5-0%	2	10	10	100,0	3,690	3,790	97,4	97,4
T5-0%	3	10	10	100,0	3,730	3,790	98,4	98,4
T5-10%	1	9	10	90,0	1,956	3,790	51,6	46,4
T5-10%	2	9	10	90,0	1,989	3,790	52,5	47,2
T5-10%	3	9	10	90,0	1,644	3,790	43,4	39,1
T5-20%	1	10	10	100,0	2,140	3,790	56,5	56,5
T5-20%	2	9	10	90,0	2,267	3,790	59,8	53,8
T5-20%	3	10	10	100,0	2,240	3,790	59,1	59,1
T5-30%	1	7	10	70,0	2,529	3,790	66,7	46,7
T5-30%	2	8	10	80,0	2,150	3,790	56,7	45,4
T5-30%	3	10	10	100,0	2,630	3,790	69,4	69,4

Tabla 24. Descriptivos del Índice de Germinación en las diluciones de la pectina

Disoluciones	n	mean	sd	min	Q1	median	Q3	max
0%	3	97,2	2,36	94,5	96,35	98,2	98,55	98,9
10%	3	28,07	6,96	23,9	24,05	24,2	30,15	36,1
20%	3	11,37	6,57	6,8	7,6	8,4	13,65	18,9
30%	3	5,37	0,7	4,7	5	5,3	5,7	6,1

Tabla 25. Descriptivos del Índice de Germinación en las diluciones del tratamiento T₀

Disoluciones	n	mean	sd	min	Q1	median	Q3	max
0%	3	99,03	6,72	91,3	96,85	102,4	102,9	103,4
10%	3	57,2	2,43	54,5	56,2	57,9	58,55	59,2
20%	3	36,43	11,03	23,7	33,05	42,4	42,8	43,2
30%	3	14,23	5,95	10,5	10,8	11,1	16,1	21,1

Tabla 26. Descriptivos del Índice de Germinación en las diluciones del tratamiento T₁

Disoluciones	n	mean	sd	min	Q1	median	Q3	max
0%	3	98,1	0,96	97,4	97,55	97,7	98,45	99,2
10%	3	49,6	6,54	42,1	47,35	52,6	53,35	54,1
20%	3	63,67	14,1	47,4	59,3	71,2	71,8	72,4
30%	3	75,1	7,79	66,1	72,85	79,6	79,6	79,6

Tabla 27. Descriptivos del Índice de Germinación en las diluciones del tratamiento T₂

Disoluciones	n	mean	sd	min	Q1	median	Q3	max
0%	3	97,07	4,39	92	95,75	99,5	99,6	99,7
10%	3	27,9	2,14	26,2	26,7	27,2	28,75	30,3
20%	3	31,37	4,01	27,8	29,2	30,6	33,15	35,7
30%	3	42,07	3,91	39,1	39,85	40,6	43,55	46,5

Tabla 28. Descriptivos del Índice de Germinación en las diluciones del tratamiento T₃

Disoluciones	n	mean	sd	min	Q1	median	Q3	max
0%	3	98,7	3,9	94,8	96,75	98,7	100,65	102,6
10%	3	37,37	6,99	29,4	34,8	40,2	41,35	42,5
20%	3	26,23	1,85	24,4	25,3	26,2	27,15	28,1
30%	3	7,87	2,06	6,3	6,7	7,1	8,65	10,2

Tabla 29. Descriptivos del Índice de Germinación en las diluciones del tratamiento T₄

Disoluciones	n	mean	sd	min	Q1	median	Q3	max
0%	3	97,63	3,81	93,5	95,95	98,4	99,7	101
10%	3	55,67	9,1	46,5	51,15	55,8	60,25	64,7
20%	3	56,73	18,8	36,9	47,95	59	66,65	74,3
30%	3	45,97	11,49	32,7	42,6	52,5	52,6	52,7

Tabla 30. Descriptivos del Índice de Germinación en las diluciones del tratamiento T₅

Disoluciones	n	mean	sd	min	Q1	median	Q3	max
0%	3	98,33	0,9	97,4	97,9	98,4	98,8	99,2
10%	3	44,23	4,46	39,1	42,75	46,4	46,8	47,2
20%	3	56,47	2,65	53,8	55,15	56,5	57,8	59,1
30%	3	53,83	13,5	45,4	46,05	46,7	58,05	69,4

Tabla 31. Supuestos estadísticos para el índice de germinación de *Lactuca sativa* en diluciones de pectina y suelo tratado

Tratamiento	Normalidad (Shapiro - Wilk)	Homocedasticidad (Levene)	Independencia (Durbin-Watson)	Linealidad (Media residual)
Pectina	0,07	0,70	0,01	1,85E-17
T0	0,32	0,85	0,65	6,48E-17
T1	0,1489	0,731	0,19	-7,87E-17
T2	0,43	0,95	0,37	-3,89E-16
T3	0,74	0,62	0,61	-4,44E-16
T4	0,93	0,58	0,95	-5,55E-17
T5	0,10	0,57	0,11	2,78E-17

Tabla 32. ANOVA del Índice de Germinación en las diluciones de la pectina

Fuente de variación	SC	GL	CM	Fc	Pr(>F)	Sig.
(Intercepto)	28343,52	1	28343,52	1160,31	0	
Dilusiones	16057,74	3	5352,58	219,12	5,12E-08	***
Residuals	195,42	8	24,43			
Total	16253,16	11				

Tabla 33. ANOVA del Índice de Germinación en las diluciones del tratamiento T₀

Fuente de variación	SC	GL	CM	Fc	Pr(>F)	Sig.
(Intercepto)	29422,8	1	29422,8	565,25	0	
Dilusiones	11722,54	3	3907,51	75,07	0,000	***
Residuals	416,42	8	52,05			
Total	12138,96	11				

Tabla 34. ANOVA del Índice de Germinación en las diluciones del tratamiento T₁

Fuente de variación	SC	GL	CM	Fc	Pr(>F)	Sig.
(Intercepto)	28870,83	1	28870,83	380,83	0	
Dilusiones	3784,31	3	1261,44	16,640	0,001	***
Residuals	606,49	8	75,81			
Total	4390,8	11				

Tabla 35. ANOVA del Índice de Germinación en las diluciones del tratamiento T₂

Fuente de variación	SC	GL	CM	Fc	Pr(>F)	Sig.
(Intercepto)	28265,81	1	28265,81	2048,99	0	
Dilusiones	9339,54	3	3113,18	225,67	0,000	***
Residuals	110,36	8	13,79			
Total	9449,9	11				

Tabla 36. ANOVA del Índice de Germinación en las diluciones del tratamiento T₃

Fuente de variación	SC	GL	CM	Fc	Pr(>F)	Sig.
(Intercepto)	29225,07	1	29225,07	1628,14	0	
Dilusiones	13946,57	3	4648,86	258,990	0,000	***
Residuals	143,6	8	17,95			
Total	14090,17	11				

Tabla 37. ANOVA del Índice de Germinación en las diluciones del tratamiento T₄

Fuente de variación	SC	GL	CM	Fc	Pr(>F)	Sig.
(Intercepto)	28596,8	1	28596,8	196,24	0	
Dilusiones	4735,95	3	1578,65	10,83	0,003	**
Residuals	1165,77	8	145,72			
Total	5901,72	11				

Tabla 38. ANOVA del Índice de Germinación en las diluciones del tratamiento T₅

Fuente de variación	SC	GL	CM	Fc	Pr(>F)	Sig.
(Intercepto)	29008,33	1	29008,33	552,74	0	
Dilusiones	5181,47	3	1727,16	32,91	0,000	***
Residuals	419,85	8	52,48			
Total	5601,32	11				

Anexo F. Análisis estadístico de la Biomasa generada de *Lactuca sativa*

Tabla 39. Registro del Biomasa generada (%) de *Lactuca sativa*

Dilución	Rep	PF	PS	PF-PS	PC	Bm
Pectina-0%	1	1,130	0,8856	0,2444	0,2385	102,474
Pectina-0%	2	1,120	0,8792	0,2408	0,2385	100,964
Pectina-0%	3	1,110	0,8815	0,2285	0,2385	95,807
Pectina-10%	1	0,990	0,8723	0,1177	0,2385	49,350
Pectina-10%	2	0,980	0,8834	0,0966	0,2385	40,503
Pectina-10%	3	1,010	0,8661	0,1439	0,2385	60,335
Pectina-20%	1	0,960	0,8683	0,0917	0,2385	38,449
Pectina-20%	2	0,930	0,8665	0,0635	0,2385	26,625
Pectina-20%	3	0,960	0,8783	0,0817	0,2385	34,256
Pectina-30%	1	0,950	0,8695	0,0805	0,2385	33,753
Pectina-30%	2	0,970	0,8981	0,0719	0,2385	30,147
Pectina-30%	3	0,960	0,8852	0,0748	0,2385	31,363
T0-0%	1	1,050	0,8249	0,2251	0,2385	94,382
T0-0%	2	1,140	0,8848	0,2552	0,2385	107,002
T0-0%	3	1,100	0,8718	0,2282	0,2385	95,681
T0-10%	1	1,050	0,8832	0,1668	0,2385	69,937
T0-10%	2	1,070	0,8822	0,1878	0,2385	78,742
T0-10%	3	1,030	0,8789	0,1511	0,2385	63,354
T0-20%	1	1,040	0,8900	0,15	0,2385	62,893
T0-20%	2	1,020	0,8879	0,1321	0,2385	55,388
T0-20%	3	1,010	0,8918	0,1182	0,2385	49,560
T0-30%	1	0,941	0,8693	0,0717	0,2385	30,063
T0-30%	2	0,953	0,8930	0,06	0,2385	25,157
T0-30%	3	0,938	0,8707	0,0673	0,2385	28,218
T1-0%	1	1,110	0,8970	0,213	0,2215	96,163
T1-0%	2	1,130	0,8819	0,2481	0,2215	112,009
T1-0%	3	1,100	0,8998	0,2002	0,2215	90,384
T1-10%	1	1,050	0,8914	0,1586	0,2215	71,603
T1-10%	2	1,040	0,8481	0,1919	0,2215	86,637
T1-10%	3	1,070	0,8879	0,1821	0,2215	82,212
T1-20%	1	1,110	0,8858	0,2242	0,2215	101,219
T1-20%	2	1,090	0,8834	0,2066	0,2215	93,273
T1-20%	3	1,100	0,8993	0,2007	0,2215	90,609
T1-30%	1	1,090	0,8843	0,2057	0,2215	92,867
T1-30%	2	1,110	0,8989	0,2111	0,2215	95,305
T1-30%	3	1,120	0,8898	0,2302	0,2215	103,928
T2-0%	1	1,060	0,8140	0,246	0,2401	102,457
T2-0%	2	1,100	0,8812	0,2188	0,2401	91,129
T2-0%	3	1,130	0,8797	0,2503	0,2401	104,248
T2-10%	1	1,060	0,8887	0,1713	0,2401	71,345
T2-10%	2	1,070	0,8901	0,1799	0,2401	74,927
T2-10%	3	1,060	0,8666	0,1934	0,2401	80,550

Continuación Tabla 39

Dilución	Rep	PF	PS	PF-PS	PC	Bm
T2-20%	1	1,020	0,8828	0,1372	0,2401	57,143
T2-20%	2	1,050	0,8927	0,1573	0,2401	65,514
T2-20%	3	1,030	0,8744	0,1556	0,2401	64,806
T2-30%	1	1,090	0,8939	0,1961	0,2401	81,674
T2-30%	2	1,100	0,8842	0,2158	0,2401	89,879
T2-30%	3	1,100	0,8758	0,2242	0,2401	93,378
T3-0%	1	1,090	0,8484	0,2416	0,2431	99,383
T3-0%	2	1,050	0,8059	0,2441	0,2431	100,411
T3-0%	3	1,120	0,8778	0,2422	0,2431	99,630
T3-10%	1	1,030	0,8754	0,1546	0,2431	63,595
T3-10%	2	1,030	0,8741	0,1559	0,2431	64,130
T3-10%	3	1,040	0,8688	0,1712	0,2431	70,424
T3-20%	1	0,980	0,8746	0,1054	0,2431	43,357
T3-20%	2	0,970	0,8700	0,1	0,2431	41,135
T3-20%	3	1,020	0,8726	0,1474	0,2431	60,633
T3-30%	1	0,970	0,8893	0,0807	0,2431	33,196
T3-30%	2	0,980	0,8855	0,0945	0,2431	38,873
T3-30%	3	0,960	0,8921	0,0679	0,2431	27,931
T4-0%	1	1,080	0,8535	0,2265	0,227	99,780
T4-0%	2	1,120	0,8978	0,2222	0,227	97,885
T4-0%	3	1,060	0,8319	0,2281	0,227	100,485
T4-10%	1	1,050	0,8823	0,1677	0,227	73,877
T4-10%	2	1,050	0,8687	0,1813	0,227	79,868
T4-10%	3	1,050	0,8801	0,1699	0,227	74,846
T4-20%	1	1,060	0,8773	0,1827	0,227	80,485
T4-20%	2	1,070	0,8742	0,1958	0,227	86,256
T4-20%	3	1,060	0,8907	0,1693	0,227	74,581
T4-30%	1	1,040	0,8657	0,1743	0,227	76,784
T4-30%	2	1,040	0,8698	0,1702	0,227	74,978
T4-30%	3	1,050	0,8805	0,1695	0,227	74,670
T5-0%	1	1,050	0,8468	0,2032	0,2001	101,549
T5-0%	2	1,060	0,8639	0,1961	0,2001	98,001
T5-0%	3	1,050	0,8449	0,2051	0,2001	102,499
T5-10%	1	1,050	0,8832	0,1668	0,2001	83,358
T5-10%	2	1,040	0,8851	0,1549	0,2001	77,411
T5-10%	3	1,010	0,8604	0,1496	0,2001	74,763
T5-20%	1	1,050	0,8794	0,1706	0,2001	85,257
T5-20%	2	1,040	0,8867	0,1533	0,2001	76,612
T5-20%	3	1,020	0,8685	0,1515	0,2001	75,712
T5-30%	1	1,000	0,8825	0,1175	0,2001	58,721
T5-30%	2	1,020	0,8761	0,1439	0,2001	71,914
T5-30%	3	1,030	0,8789	0,1511	0,2001	75,512

Tabla 40. Descriptivos de la Biomasa generada en las diluciones de la pectina

Disoluciones	n	mean	sd	min	Q1	median	Q3	max
0%	3	99,75	3,5	95,81	98,39	100,96	101,72	102,47
10%	3	50,06	9,94	40,5	44,93	49,35	54,84	60,34
20%	3	33,11	5,99	26,62	30,44	34,26	36,35	38,45
30%	3	31,75	1,83	30,15	30,75	31,36	32,56	33,75

Tabla 41. Descriptivos de la Biomasa generada en las diluciones del tratamiento T₀

Disoluciones	n	mean	sd	min	Q1	median	Q3	max
0%	3	99,02	6,94	94,38	95,03	95,68	101,34	107
10%	3	70,68	7,72	63,35	66,65	69,94	74,34	78,74
20%	3	55,95	6,68	49,56	52,47	55,39	59,14	62,89
30%	3	27,81	2,48	25,16	26,69	28,22	29,14	30,06

Tabla 42. Descriptivos de la Biomasa generada en las diluciones del tratamiento T₁

Disoluciones	n	mean	sd	min	Q1	median	Q3	max
0%	3	99,52	11,2	90,38	93,27	96,16	104,09	112,01
10%	3	80,15	7,73	71,6	76,91	82,21	84,42	86,64
20%	3	95,03	5,52	90,61	91,94	93,27	97,25	101,22
30%	3	97,37	5,81	92,87	94,09	95,31	99,62	103,93

Tabla 43. Descriptivos de la Biomasa generada en las diluciones del tratamiento T₂

Disoluciones	n	mean	sd	min	Q1	median	Q3	max
0%	3	99,28	7,11	91,13	96,79	102,46	103,35	104,25
10%	3	75,61	4,64	71,34	73,14	74,93	77,74	80,55
20%	3	62,49	4,64	57,14	60,97	64,81	65,16	65,51
30%	3	88,31	6,01	81,67	85,78	89,88	91,63	93,38

Tabla 44. Descriptivos de la Biomasa generada en las diluciones del tratamiento T₃

Disoluciones	n	mean	sd	min	Q1	median	Q3	max
0%	3	99,81	0,54	99,38	99,51	99,63	100,02	100,41
10%	3	66,05	3,8	63,59	63,86	64,13	67,28	70,42
20%	3	48,38	10,67	41,13	42,25	43,36	51,99	60,63
30%	3	33,33	5,47	27,93	30,56	33,2	36,03	38,87

Tabla 45. Descriptivos de la Biomasa generada en las diluciones del tratamiento T₄

Disoluciones	n	mean	sd	min	Q1	median	Q3	max
0%	3	99,38	1,34	97,89	98,83	99,78	100,13	100,48
10%	3	76,2	3,22	73,88	74,36	74,85	77,36	79,87
20%	3	80,44	5,84	74,58	77,53	80,48	83,37	86,26
30%	3	75,48	1,14	74,67	74,82	74,98	75,88	76,78

Tabla 46. Descriptivos de la Biomasa generada en las diluciones del tratamiento T₅

Disoluciones	n	mean	sd	min	Q1	median	Q3	max
0%	3	100,68	2,37	98	99,78	101,55	102,02	102,5
10%	3	78,51	4,4	74,76	76,09	77,41	80,38	83,36
20%	3	79,19	5,27	75,71	76,16	76,61	80,93	85,26
30%	3	68,72	8,84	58,72	65,32	71,91	73,71	75,51

Tabla 47. Supuestos estadísticos para la Biomasa generada de *Lactuca sativa* en diluciones de pectina y suelo tratado

Parámetro Físicoquímico	Normalidad (Shapiro - Wilk)	Homocedasticidad (Levene)	Independencia (Durbin-Watson)	Linealidad (Media residual)
Pectina	0,98	0,38	0,47	1,67E-16
T0	0,30	0,78	0,95	5,55E-17
T1	0,4829	0,846	0,30	-4,44E-16
T2	0,07	0,97	0,83	2,50E-16
T3	0,38	0,56	0,57	9,95E-17
T4	0,80	0,35	0,97	-1,15E-17
T5	0,70	0,74	0,08	9,26E-17

Tabla 48. ANOVA de la Biomasa generada en las diluciones de la pectina

Fuente de variación	SC	GL	CM	Fc	Pr(>F)	Sig.
(Intercepto)	29849,19	1	29849,19	794,75	0	
Dilusiones	9117,71	3	3039,24	80,92	0,00000252	***
Residuals	300,46	8	37,56			
Total	9418,17	11				

Tabla 49. ANOVA de la Biomasa generada en las diluciones del tratamiento T₀

Fuente de variación	SC	GL	CM	Fc	Pr(>F)	Sig.
(Intercepto)	29415,87	1	29415,87	741,83	0	
Dilusiones	7931,6	3	2643,87	66,68	0,000	***
Residuals	317,22	8	39,65			
Total	8248,82	11				

Tabla 50. ANOVA de la Biomasa generada en las diluciones del tratamiento T₁

Fuente de variación	SC	GL	CM	Fc	Pr(>F)	Sig.
(Intercepto)	29711,9	1	29711,9	476,74	0	
Dilusiones	692,4	3	230,8	3,700	0,062	.
Residuals	498,58	8	62,32			
Total	1190,98	11				

Tabla 51. ANOVA de la Biomasa generada en las diluciones del tratamiento T₂

Fuente de variación	SC	GL	CM	Fc	Pr(>F)	Sig.
(Intercepto)	29568,36	1	29568,36	911,36	0	
Dilusiones	2275,82	3	758,61	23,38	0,000	***
Residuals	259,56	8	32,45			
Total	2535,38	11				

Tabla 52. ANOVA de la Biomasa generada en las diluciones del tratamiento T₃

Fuente de variación	SC	GL	CM	Fc	Pr(>F)	Sig.
(Intercepto)	29884,91	1	29884,91	753,79	0	
Dilusiones	7359,65	3	2453,22	61,880	0,000	***
Residuals	317,17	8	39,65			
Total	7676,82	11				

Tabla 53. ANOVA de la Biomasa generada en las diluciones del tratamiento T₄

Fuente de variación	SC	GL	CM	Fc	Pr(>F)	Sig.
(Intercepto)	29631,14	1	29631,14	2493,57	0	
Dilusiones	1133,32	3	377,77	31,79	0,000	***
Residuals	95,06	8	11,88			
Total	1228,38	11				

Tabla 54. ANOVA de la Biomasa generada en las diluciones del tratamiento T₅

Fuente de variación	SC	GL	CM	Fc	Pr(>F)	Sig.
(Intercepto)	30411,2	1	30411,2	929,1	0	
Dilusiones	1636,13	3	545,38	16,66	0,001	***
Residuals	261,86	8	32,73			
Total	1897,99	11				

Apéndice 2. Galería de fotos

Figura 28. Corte de las cáscaras de plátano en trozos de 1 cm²



Figura 29. Hidrólisis ácida (pH = 2,5) con agitación constante de 40 a 60 minutos



Figura 30. Filtrado para separar la solución péctica del bagazo

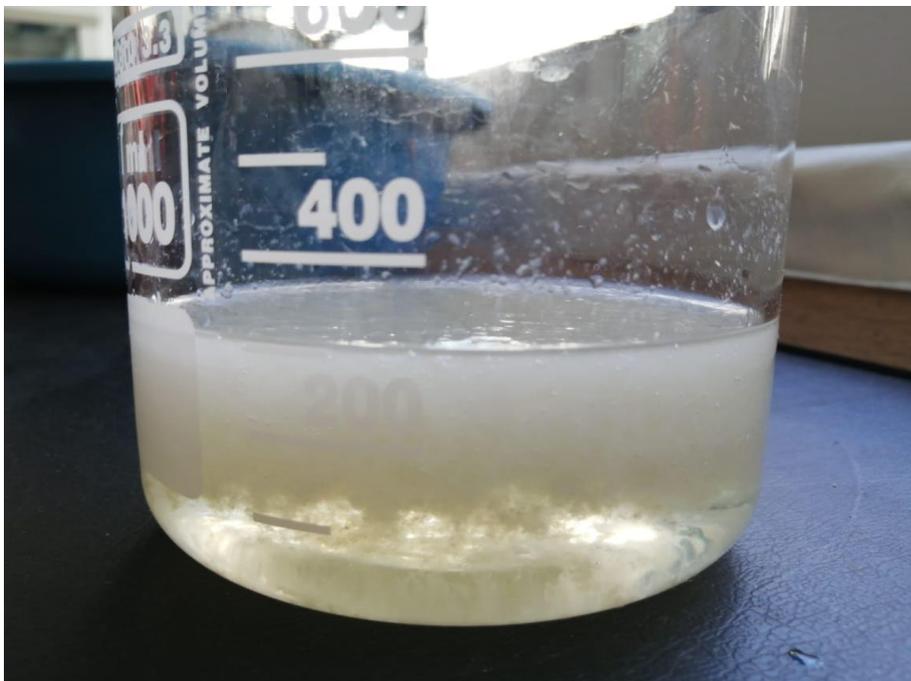


Figura 31. Precipitación de la solución péctica con alcohol al 96%



Figura 32. Separación del alcohol restante en la pectina precipitada por centrifugación (6000 rpm)



Figura 33. Pectina coagulada después del proceso de centrifugación



Figura 34. Secado de la pectina hasta peso constante



Figura 35. Pectina parcialmente seca para ser triturada en un mortero



Figura 36. Molienda de la pectina seca



Figura 37. Determinación del peso equivalente de la pectina



Figura 38. Determinación de la acidez libre de la pectina



Figura 39. Determinación de los parámetros fisicoquímicos



Figura 40. Determinación del grado de gelificación de la pectina



Figura 41. Determinación de cenizas de la pectina



Figura 42. Georeferenciación de los puntos de muestreo de suelos con cadmio



Figura 43. Extracción de las submuestras de suelo con cadmio



Figura 44. Pesado del suelo para el acondicionamiento de las unidades experimentales



Figura 45. Aplicación de la pectina en el suelo con cadmio



Figura 46. Humedeciendo la mezcla de suelo pectina hasta capacidad de cambio



Figura 47. Instalación del diseño experimental en la cama de germinación



Figura 48. Evaluación de los parámetros fisicoquímicos de los suelos tratados



Figura 49. Preparación de las soluciones de suelo tratado con pectina para las pruebas de fitotoxicidad



Figura 50. Instalación de las semillas de *Lactuca sativa* en la cama de germinación

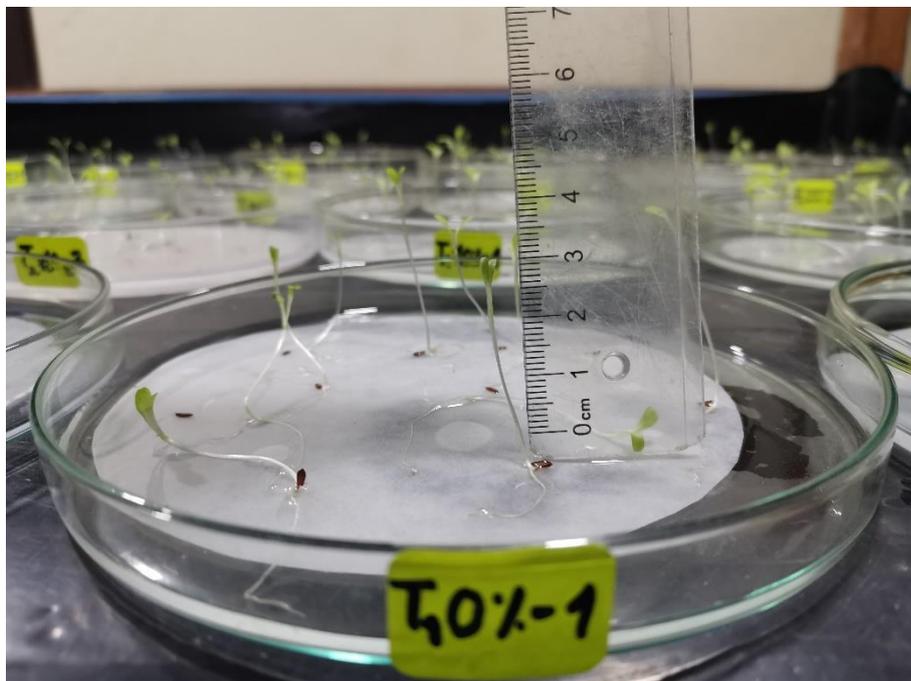


Figura 51. Crecimiento de las plántulas de *Lactuca sativa* aplicadas con la solución de suelo-pectina

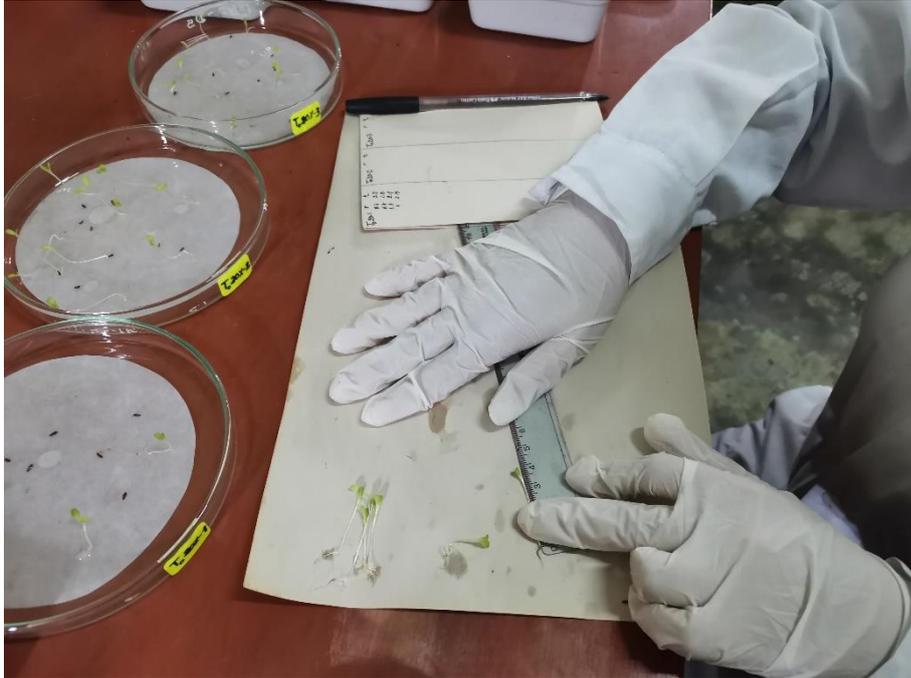
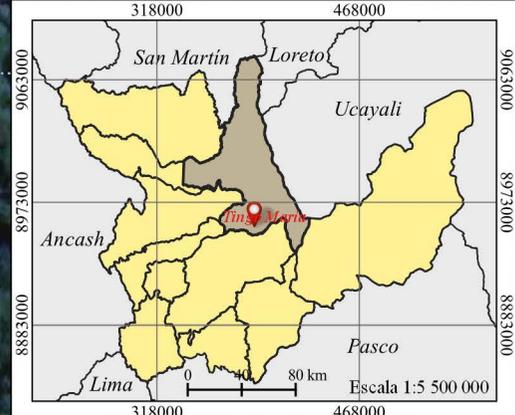
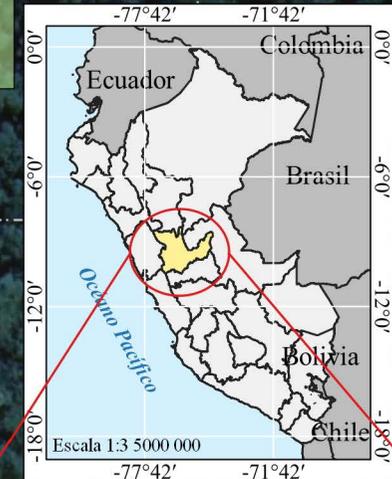
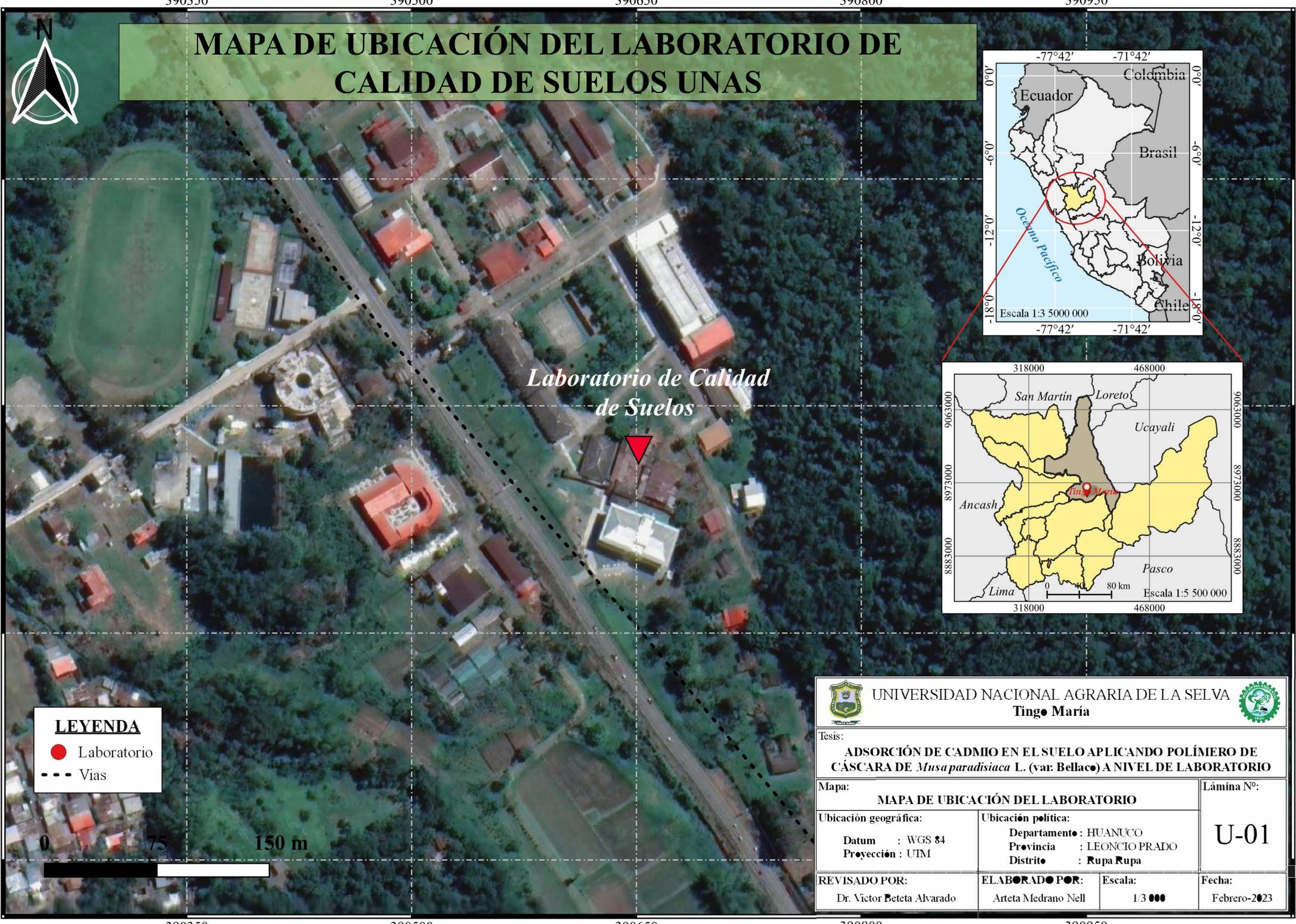


Figura 52. Toma de medidas de las plántulas de *Lactuca sativa* tratadas con la solución de suelo con pectina



Figura 53. Secado de plántulas para determinación de biomasa

MAPA DE UBICACIÓN DEL LABORATORIO DE CALIDAD DE SUELOS UNAS



LEYENDA

- Laboratorio
- - - Vías

 UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA Tingo María 	
Tesis: ADSORCIÓN DE CADMIO EN EL SUELO APLICANDO POLÍMERO DE CÁSCARA DE <i>Musa paradisiaca</i> L. (var: Bellaco) A NIVEL DE LABORATORIO	
Mapa: MAPA DE UBICACIÓN DEL LABORATORIO	
Ubicación geográfica: Datum : WGS 84 Proyección : UTM	
Ubicación política: Departamento : HUANUCO Provincia : LEONCIO PRADO Distrito : Rupa Rupa	
REVISADO POR: Dr. Victor Beteta Alvarado	
ELABORADO POR: Arteta Medrano Nell	
Escala: 1/3 000	
Fecha: Febrero-2023	

Lámina N°:
U-01

387150

387200

387250

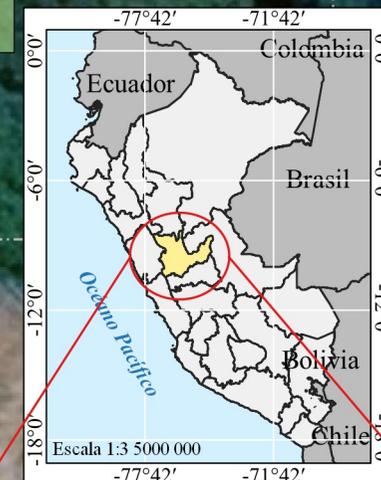
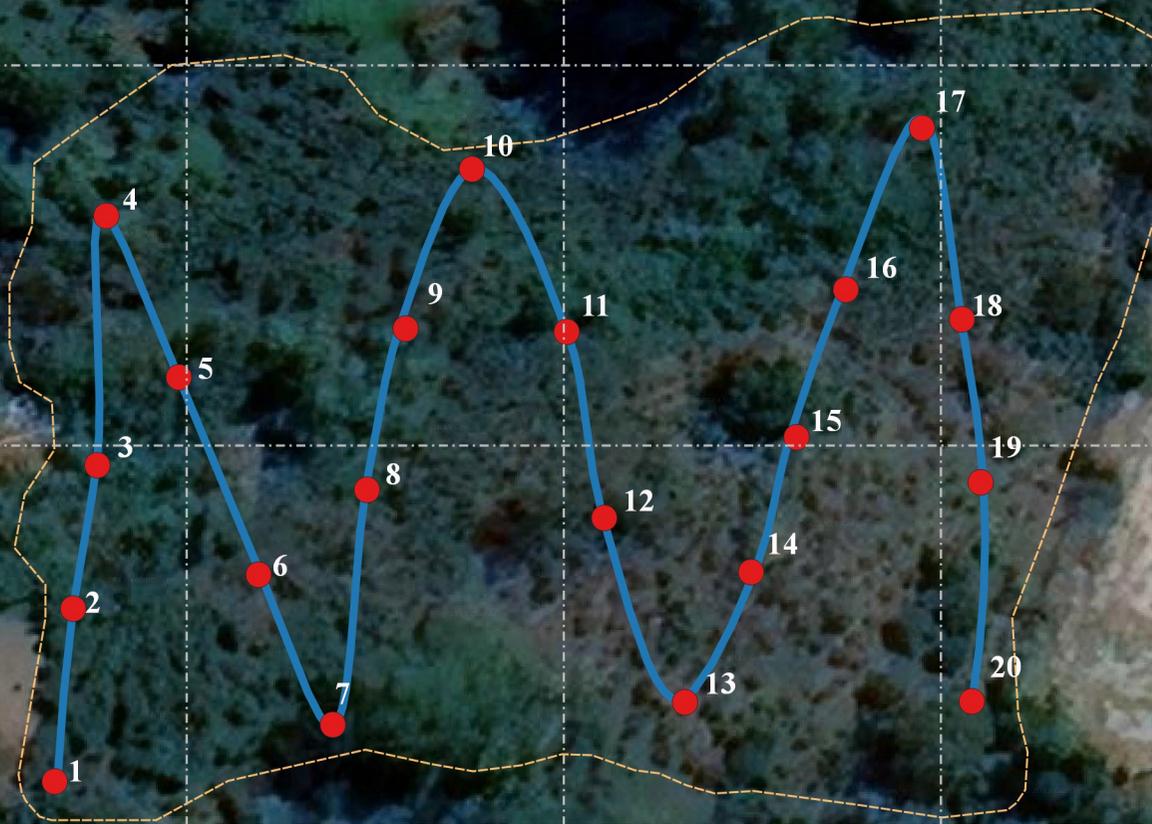
387300

387350

387400



MAPA DE UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO



LEYENDA

- Puntos de muestreo
- Perímetro del Fundo
- Forma Zig Zag

N°	E	N	N°	E	N
1	8974406	387182	11	8974465	387250
2	8974447	387188	12	8974440	387255
3	8974444	387224	13	8974416	387266
4	8974413	387219	14	8974433	387275
5	8974433	387210	15	8974451	387281
6	8974480	387189	16	8974471	387287
7	8974459	387199	17	8974492	387297
8	8974429	387185	18	8974467	387303
9	8974465	387229	19	8974445	387305
10	8974486	387238	20	8974416	387304



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María



Tesis:

ADSORCIÓN DE CADMIO EN EL SUELO APLICANDO POLÍMERO DE CÁSCARA DE *Musa paradisiaca* L. (var. Bellaco) A NIVEL DE LABORATORIO

Mapa: **MAPA DE UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO**

Lámina N°:

Ubicación geográfica:

Ubicación política:

Datum : WGS 84
Proyección : UTM

Departamento : HUANUCO
Provincia : LEONCIO PRADO
Distrito : Castillo Grande

U-02

REVISADO POR:

Dr. Victor Beteta Alvarado

ELABORADO POR:

Arteta Medrano Nell

Escala:

1/3 000

Fecha:

Febrero-2023

0 25 50 m

387150

387200

387250

387300

387350

387400

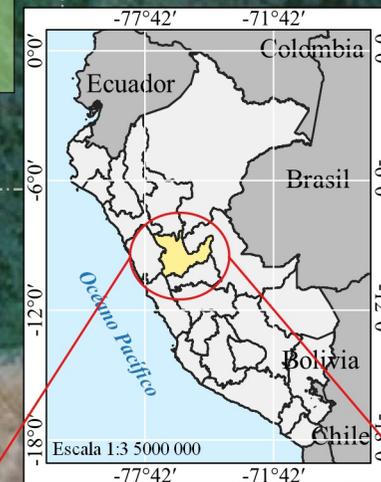
8974500

8974450

8974400

8974350

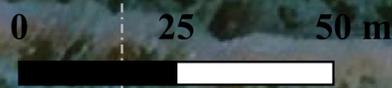
MAPA DE UBICACIÓN DE PUNTOS DE MUESTREO DE ESTUDIOS PREVIOS



LEYENDA

- ◆ Puntos de muestreo
- Perímetro del Fundo

N°	Norte (m)	Este (m)	Autor
1	8974408	387292	C. Silva (2018)
2	8974447	387276	M. Silva (2021)
3	8974452	387248	Arteta (2023)



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María

Tesis:
ADSORCIÓN DE CADMIO EN EL SUELO APLICANDO POLÍMERO DE CÁSCARA DE *Musa paradisiaca* L. (var. Bellaco) A NIVEL DE LABORATORIO

Mapa: MAPA DE UBICACIÓN DE OTROS PUNTOS DE MUESTREO		Lámina N°:	
Ubicación geográfica: Datum : WGS 84 Proyección : UTM		U-03	
Ubicación política: Departamento : HUANUCO Provincia : LEONCIO PRADO Distrito : Castillo Grande			
REVISADO POR: Dr. Victor Beteta Alvarado	ELABORADO POR: Arteta Medrano Nell	Escala: 1/2 000	Fecha: Febrero-2023

8974520
8974460
8974400
8974340

8974520
8974460
8974400
8974340

387140 387200 387260 387320 387380 387440