



Universidad
Continental

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental

Tesis

**Aplicación de lodos activados en un suelo
contaminado con arsénico, cultivado con *Avena
sativa* L., en el Distrito de Orcotuna, Concepción
2016**

Evelyn Cindy Valenzuela Casimiro

Huancayo, 2019

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Ambiental



Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Obra protegida bajo la licencia de [Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Perú](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/peru/)

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer infinitamente a las Instituciones que hicieron posible la elaboración y culminación del presente trabajo de investigación, como también a las personas que me guiaron y siempre estuvieron dispuestos a resolver mis dudas a la hora de desarrollar esta tesis. Quiero agradecer, en primer lugar, al Ingeniero Donald E. Berríos Martínez, Gerente de la EPS. Municipal Mantaro S.A., PTAR Doris Mendoza, por su atenta colaboración en el ingreso y disposición de los lodos activados. Al laboratorio de Química y Biología de la Universidad Continental que me brindó los equipos necesarios para realizar las mediciones y, a sus colaboradores, gracias por su ayuda y paciencia. Al laboratorio de la Universidad Agraria la Molina, Laboratorio de Ecología Microbiana y Biotecnología Marina Tabusso, Dra. Doris Zúñiga Dávila por explicarme los análisis microbianos necesarios en mi tesis, gracias por su enseñanza. A la Ing. Elizabeth Cecilia Oré Núñez, directora de la E.A.P. de Ingeniería Ambiental de la Universidad Continental, por brindarme los permisos requeridos, por su tiempo y confianza le estoy eternamente agradecida; también, de modo bastante importante, cabe mencionar a mi asesor de tesis, Mg. Ing. Andrés Alberto Azabache Leytón por depositar su confianza, paciencia, dedicación en cada etapa experimental de mi tesis, gracias por todas las anécdotas vividas, no lo olvidaré, mil gracias.

Al Dr. Magno Arenales Casimiro, docente universitario, por ayudarme en la metodología de mi trabajo de investigación, sin su ayuda no hubiera podido concretar mis ideas. A mis compañeras de profesión Liz Cecilia Huamancaja Palomino y Siderlin Camila Hinostroza por acompañarme en la toma de muestras de lodo activado y muestreo de suelo, gracias.

Por último y no menos importante a todos mis compañeros en FRENO S.A. que me apoyaron y me orientaron en los diferentes temas de mi investigación, sin su aporte no hubiera podido terminar este trabajo, gracias de corazón.

A Dios porque sin él nada es posible.

A mis padres, Maurto y Zulema, mis primeros maestros de vida que hicieron de mí la persona que soy formándome con amor.

A mi tío Magno por enseñarme tanto, sobre todo a ser generosa en la vida.

Y en especial a Víctor Isidro por tener la dicha de conocerlo y formar una bella familia, junto a mi adorada hija, que colman de dicha cada instante de mi vida.

A mis hermanos, David y Enmanuel, mis cómplices de juegos, los amo a todos.

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	ii
Dedicatoria	iii
Índice general	iv
Índice de tablas	viii
Índice de figuras	x
Siglas	xi
Resumen	xii
Abstract	xiii
Introducción	xiv

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1 Planteamiento y formulación del problema	1
1.1.1 Planteamiento del problema	1
1.1.2 Formulación del problema	4
1.1.2.1 Problema general	4
1.1.2.2 Problemas específicos	4
1.2 Objetivos	4
1.2.1 General	4
1.2.2 Específicos	4
1.3 Justificación e importancia	5
1.3.1 Justificación tecnológica	5
1.3.2 Justificación social	5
1.3.3 Justificación académica	5
1.3.4 Importancia de la investigación	5
1.4 Hipótesis	6
1.4.1 General	6
1.4.2 Específicas	6
1.4.3 Hipótesis alternativa	7
1.5 Descripción de variables	7
1.5.1 Variable independiente	7

1.5.2 Variables dependientes	7
------------------------------	---

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes del problema	10
2.2 Base teórica	20
2.2.1 Los lodos activados	20
2.2.1.1 Clasificación de los lodos activados	21
2.2.1.2 Aplicación de lodos activados al suelo	23
2.2.1.3 Efectos de la aplicación de los lodos activados al suelo - propiedades físicas, químicas y biológicas	24
2.2.1.4 Efecto del lodo activado en el rendimiento del cultivo de la <i>Avena sativa</i>	26
2.2.2 Arsénico	27
2.2.2.1 Suelos contaminados con arsénico	28
2.2.3 <i>Avena sativa</i>	31
2.2.3.1 El cultivo de la <i>Avena sativa</i>	33
2.2.3.2 La avena y los metales pesados	34
2.2.4 Marco legal	36
2.2.4.1 Marco legal internacional	36
2.2.4.2 Marco legal nacional	38
2.2.4.3 Constitución Política del Perú	38
2.2.4.4 Ministerio del Ambiente y OEFA	38
2.2.4.5 Normatividad lodos activados - Resolución Ministerial N° 024-2017-	40
VIVIENDA	
2.3 Definición de términos básicos	41
2.3.1 Lodos activados	41
2.3.2 Coliformes totales	41
2.3.3 <i>Escherichia coli</i>	41
2.3.4 <i>Salmonella sp</i>	41
2.3.5 Contaminación	42
2.3.6 Contaminante	42
2.3.7 Materia orgánica del suelo	42
2.3.8 Densidad de volumen del suelo	42

2.3.9 Arsénico	42
2.3.10 Conductividad eléctrica	43
2.3.11 pH del suelo	43
2.3.12 Suelos	43
2.3.13 Contaminación del suelo	43
2.3.14 Caracterización de sitios contaminados	44
2.3.15 Suelo agrícola	44
2.3.16 Absorción	44
2.3.17 Adsorción	44

CAPÍTULO III METODOLOGÍA

3.1 Método y alcance de la investigación	45
3.1.1 Método de la investigación	45
3.1.1.1 Método general o teórico de la investigación	45
3.1.1.2 Método específico de la investigación	46
3.1.2 Alcances de la investigación	67
3.1.2.1 Tipo de investigación	67
3.1.2.2 Nivel de investigación	67
3.2 Diseño de la investigación	68
3.3 Población y muestra	69
3.3.1 Población	69
3.3.2 Muestra	69
3.4 Evaluaciones realizadas	70
3.4.1 Técnicas de análisis de datos	70

CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados del tratamiento y análisis de la información	72
4.1.1 Propiedades físico-químicas del suelo del experimento	73
4.1.2 Propiedades físico-químicas del lodo activado antes del experimento	76

4.1.3 Análisis microbiológico del lodo activado PTAR Concepción “Doris Mendoza”	78
Concepción	
4.1.4 Propiedades físicas del suelo al final del experimento	79
4.1.4.1 Densidad aparente	79
4.1.5 Propiedades químicas del suelo al final del experimento	80
4.1.5.1 pH	80
4.1.5.2 Conductividad eléctrica (CE)	82
4.1.5.3 Carbonato de calcio (CaCO ₃)	84
4.1.5.4 Materia orgánica	87
4.1.5.5 Fósforo disponible	89
4.1.5.6 Potasio disponible	91
4.1.6 Crecimiento de <i>Avena sativa</i>	93
4.1.6.1 Altura de planta	93
4.1.6.2 Evolución del crecimiento de la <i>Avena sativa</i>	93
4.1.6.3 Materia seca (MS) de la parte aérea	95
4.1.6.4 Materia seca de raíz	96
4.2 Discusión de resultados	97
Conclusiones	102
Recomendaciones	104
Referencias bibliográficas	105
Anexos	113

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de las variables en estudio	9
Tabla 2. Valor nutritivo de la <i>Avena Sativa</i> por 100 gr.	31
Tabla 3. Avena forrajera, superficie cosechada, producción, rendimiento y precio al productor	33
Tabla 4. Concentración Máxima de Metales. <i>United States of America</i>	37
Tabla 5. Concentraciones Máximas de metales. Chile en suelo	38
Tabla 6. Recomendaciones acerca de la aplicabilidad de los patrones de muestreo	49
Tabla 7. Número mínimo de puntos de muestreo para el Muestreo de Identificación	50
Tabla 8. Georreferenciación de muestras simples de suelo	51
Tabla 9. Profundidad del muestreo según el uso del suelo	53
Tabla 10. Recipientes, temperatura de preservación y tiempo de conservación de las muestras ambientales	54
Tabla 11. Métodos de análisis de suelo	55
Tabla 12. Métodos de análisis de arsénico en suelo	55
Tabla 13. Aplicación de lodos activados al suelo en porcentajes	59
Tabla 14. Resumen porcentual de aplicación de lodos activados	59
Tabla 15. Croquis experimental	62
Tabla 16. Parámetros de higienización, clasificación de Biosólidos de Clase A y de Clase B	67
Tabla 17. Tratamientos en estudio	68
Tabla 18. Información agrícola de la Avena forrajera en el distrito de Orcotuna Concepción	69
Tabla 19. Resultados del análisis físico-químico del suelo de Orcotuna antes del experimento	73
Tabla 20. Resultados del análisis de metales pesados del suelo de Orcotuna	74
Tabla 21. Resultados del análisis de caracterización del lodo activado	76
Tabla 22. Resultados del análisis de metales pesados del lodo activado	76
Tabla 23. Resultados del análisis microbiológico	78
Tabla 24. Prueba de significación de Duncan para la densidad aparente del suelo al final del experimento	79
Tabla 25. Prueba de significación de Duncan para el pH al final del experimento	80
Tabla 26. Resultado de análisis de suelo, parámetro pH	81
Tabla 27. Prueba de significación de Duncan para la CE del suelo al final del experimento	82
Tabla 28. Resultado de análisis de suelo, parámetro CE	83

Tabla 29. Análisis de varianza del contenido de CaCO ₃ del suelo al final del experimento	84
Tabla 30. Resultado de análisis de suelo, parámetro CaCO ₃	86
Tabla 31. Prueba de significación de Duncan para el contenido de materia orgánica al final del experimento	87
Tabla 32. Resultado de análisis de suelo, parámetro MO	88
Tabla 33. Prueba de significación de Duncan para el contenido de fósforo disponible del suelo al final del experimento	89
Tabla 34. Resultado de análisis de suelo, parámetro P	90
Tabla 35. Prueba de significación de Duncan para el contenido de potasio disponible del suelo al final del experimento	91
Tabla 36. Resultado de análisis de suelo, parámetro K	92
Tabla 37. Prueba de significación de Duncan para altura de planta de <i>Avena sativa</i> al final del experimento	93
Tabla 38. Prueba de significación de Duncan para el peso de materia seca de <i>Avena sativa</i> al final del experimento	95
Tabla 39. Análisis de varianza de peso seco de raíz de <i>Avena sativa</i> al final del experimento	96

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Organigrama de la OEFA	39
Figura 2. Terreno muestreado, Orcotuna 2016	47
Figura 3. Patrones de muestreo	50
Figura 4. Terreno muestreado, Orcotuna. Provincia de Concepción. Región Junín	52
Figura 5. PTAR Concepción “Doris Mendoza”	57
Figura 6. Diagrama de flujo del proceso experimental	71
Figura 7. Cuadro comparativo ECA - Resultados metales pesados	75
Figura 8. Cuadro comparativo de lodo activado - ECA Lodo México	76
Figura 9. Cuadro comparativo de lodo activado - D.S. 015-2017 Vivienda	77
Figura 10. Cuadro comparativo de los cinco tratamientos – Densidad	80
Figura 11. Cuadro comparativo de los cinco tratamientos – pH	81
Figura 12. Cuadro comparativo de los cinco tratamientos – CE	83
Figura 13. Cuadro comparativo de los cinco tratamientos – CaCO ₃	85
Figura 14. Cuadro comparativo de los cinco tratamientos – MO	87
Figura 15. Cuadro comparativo de los cinco tratamientos – P	89
Figura 16. Cuadro comparativo de los cinco tratamientos – K	91
Figura 17. Análisis comparativo del crecimiento de la <i>Avena sativa L</i>	94
Figura 18. Cuadro comparativo de los cinco tratamientos – Parte aérea	95
Figura 19. Cuadro comparativo de los cinco tratamientos – Parte radicular	96

SIGLAS

MO:	Materia orgánica
pH:	Potencial de hidrogeno
CE:	Conductividad eléctrica
CIC:	Capacidad de intercambio catiónico
P:	Fósforo
K:	Potasio
CaCO₃:	Carbonato de calcio
CaCl₂:	Cloruro de calcio
KH₂PO₄:	Fosfato monopotásico
DAP:	Diagnóstico ambiental preliminar
US EPA:	Agencia de protección ambiental estadounidense
COD:	Carbono orgánico disuelto
R.M.:	Región Metropolitana
PTAS:	Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas
INIA:	Instituto de Investigación Agropecuaria
PNNT:	Parque Nacional Nevado de Toluca
CNUMH:	Conferencia de Naciones Unidas sobre el Medio Humano
PNUMA:	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
CNUMD:	Conferencia de Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y Desarrollo
PTAR:	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
MVCS:	Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento

RESUMEN

Durante julio a setiembre del año 2016 se realizó el presente trabajo de investigación con los objetivos de determinar los efectos que produce la aplicación de lodos activados en las propiedades físico-químicas y el crecimiento del cultivo de avena, en un suelo contaminado con arsénico del distrito de Orcotuna, provincia de Concepción. Se utilizó el método general de investigación hipotético-deductivo, el tipo de investigación aplicada, en un nivel explicativo, planteando un diseño experimental completamente aleatorizado, donde se ubicaron cinco tratamientos con las diferentes dosis de lodos activados: 0, 5, 10, 15 y 20 %, con 3 repeticiones en macetas de PVC en 2 kg de suelo, sembrando el cultivo de avena (*Avena sativa*). Los resultados indican que los tratamientos con dosis altas de lodo activado disminuyeron significativamente la densidad aparente del suelo, disminuyeron el pH del suelo, la conductividad eléctrica incrementó significativamente, se incrementó el contenido de fósforo disponible en el suelo y hubo una disminución de potasio disponible en el suelo. Las dosis crecientes de lodos activados aplicados al suelo de Orcotuna, influyeron en la altura de planta, materia seca de la parte aérea y materia seca de raíz, del cultivo de avena. El suelo de Orcotuna, estuvo contaminado de arsénico, cadmio y plomo, y fue calificado como de fertilidad media, debido principalmente al contenido medio de carbono orgánico y potasio. El lodo activado presentó un exceso de sales solubles, bajo contenido de potasio y baja relación C/N. No excedió los límites máximos permisibles de metales pesados.

Palabras clave: lodos activados, contaminación por arsénico, cultivo de avena.

ABSTRACT

During July to September of the year 2016, the present research was carried out with the objectives of determining the effects of the application of activated sludge on the physical properties and the growth of the oat crop in a soil contaminated with arsenic of the district of Orcotuna, province of Concepción. The general method of hypothetic-deductive research, the type of applied research, was used at an explanatory level, presenting a completely randomized experimental design, where 5 treatments were located with the different doses of activated sludge: 0, 5, 10, 15 and 20%, with 3 replicates in PVC pots in 2 kg of soil, planting oats (*Avena sativa*). The results indicate that treatments with high doses of activated sludge significantly increased soil bulk density, decreased soil pH, increased electrical conductivity, increased soil phosphorus content and decreased potassium availability in the soil. The increasing doses of activated sludge applied to the soil of Orcotuna did not influence plant height, shoot dry matter and root dry matter, of the oat crop. Orcotuna soil was contaminated with arsenic, cadmium and lead, and was classified as of medium fertility, mainly due to the average content of organic carbon and potassium. The activated sludge presented an excess of soluble salts, low potassium content and low C/N ratio. It did not exceed the maximum permissible limits of heavy metals.

Key words: *activated sludge, arsenic contamination, oat culture.*

INTRODUCCIÓN

Los lodos activados, resultado del tratamiento biológico de los sólidos en el tratamiento de aguas residuales, deben ser utilizados adecuadamente para lograr un beneficio con estos materiales orgánicos; una alternativa la constituye, su aplicación al suelo, más aún si estos suelos están contaminados.

Los suelos del distrito de Orcotuna están contaminados con metales pesados, y requieren ser mejorados en sus propiedades, para disminuir el potencial contaminante que favorezca el crecimiento de las plantas en términos de acondicionamiento del suelo y el aporte de nutrientes. En este aspecto los lodos activados, serían una buena alternativa.

Las fuentes de lodo de depuradora, al ser aplicados a suelos agrícolas en diferentes dosis, tendrían un efecto benéfico, pues cada vez más, los suelos disminuyen su fertilidad, están contaminados y tienen menos área; sin embargo, se les demanda una mayor productividad. Los reportes del uso de lodos activados en los suelos tienen diferente información, dentro de los cuales resalta el aporte de materia orgánica y nutrientes y el potencial riesgo de incremento de metales pesados al suelo.

En el valle del Mantaro se tiene información de la contaminación de los suelos y es necesario contar con resultados de aplicación de técnicas alternativas del manejo de estos suelos para la mejora de propiedades físico-químicas, con la utilización de insumos que estén al alcance del productor y sean eficientes y económicos, como lo son los lodos de depuradora.

La hipótesis planteada es: la aplicación de lodos activados en un suelo contaminado con arsénico, afecta positivamente sus propiedades físicas (densidad) y químicas (materia orgánica, pH, conductividad eléctrica, carbonato de calcio, fósforo, potasio) de un suelo contaminado con arsénico, distrito de Orcotuna, Concepción.

La investigación se divide en cuatro capítulos. En el capítulo I, se detalla el planteamiento y formulación del problema, los objetivos, justificación e importancia, hipótesis y descripción de variables. El problema general planteado es: ¿Cuáles son los efectos

que produce la aplicación de lodos a un suelo contaminado con arsénico cultivado con *Avena sativa*, distrito de Orcotuna, Concepción, 2016?

El capítulo II, trata del marco teórico y consta de los antecedentes del problema, bases teóricas y definición de términos básicos. El método general de investigación es hipotético-deductivo.

En el capítulo III, se describe la metodología que consiste en el método, y alcance de la investigación, diseño de la investigación, población y muestra, técnicas e instrumentos de recolección de datos. En el método específico de investigación se realizaron los análisis de suelo utilizando metodología estándar para su caracterización y contenido de metales pesados.

En el capítulo IV, se describen los resultados y discusión, que consiste en el resultado del tratamiento y análisis de la información y discusión de resultados. Se presenta el efecto significativo de las dosis de lodos activados en la propiedad física y química del suelo en el crecimiento de la *Avena sativa*.

Los resultados más importantes de la investigación fueron el efecto de los lodos activados en incrementar la densidad aparente, disminuir el pH, incrementar la conductividad eléctrica y el contenido de P y K disponibles del suelo.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1 Planteamiento y formulación del problema

1.1.1 Planteamiento del problema

La tierra constituida en sus cuatro fases, líquida, sólida, gaseosa y el amplio conjunto de microorganismos, se comporta como un ser dinámico, evolucionando como su principal característica, algunas con fines positivos y en otros casos con fines negativos, se ha convertido en el centro del evolucionismo y deterioro, desde la era de la Revolución Industrial, ha llegado a distintas fases productivas para el hombre, logrando que en pocos años disminuya su capacidad regenerativa, propias de las actividades antrópicas (agricultura, industria, minería, ganadería, entre otros) han hecho que el planeta se cuestione si tanto avance tecnológico juega un papel importante en la supervivencia del hombre (1). Estos procesos pueden verse en la degradación de los suelos ya sea física (compactación, endurecimiento, erosión, deterioro de la estructura), química (pérdida de la fertilidad y desequilibrio elemental) y biológica (pérdida de la materia orgánica del suelo y reducción de la flora y fauna del suelo) están siendo cada vez más difíciles recuperarlos incrementándose este problema con el aumento exponencial de la población (2).

La contaminación como impacto negativo hacia el suelo sufre un proceso de disminución de su capacidad de producir bienes, por causas naturales y antrópicas, ahora más humanas que naturales, se hace evidente la falta de alternativas de solución para evitar la rápida degradación y contribuir a su recuperación como fuente principal de supervivencia (2).

Los lodos activados, materiales acondicionadores de suelos ricos en microorganismos y material orgánico, entran como material benéfico, restituyendo propiedades físicas, químicas y biológicas en la dinámica del suelo, su efecto puede también observarse a través de la retención de contaminantes que el suelo contenga, debido al gran poder adsorbente de estos materiales orgánicos generado por la presencia de cargas positivas y negativas en su superficie (3).

Cuando las condiciones del suelo son favorables para el crecimiento de la planta, esta incrementa su crecimiento, como es, la formación de materia seca, crecimiento radicular, y al final se incrementa el rendimiento del cultivo. En cambio, cuando los suelos tienen propiedades limitantes, ya sea de sus propiedades químicas, físicas o biológicas, o problemas de contaminación, la planta se ve afectada en su crecimiento, reduciéndolo o en general alterándolo (4).

El suelo del valle del Mantaro tiene valores medios a bajos de materia orgánica (menores de 3 %). Los suelos del distrito de Orcotuna al ser analizados en su contenido de materia orgánica (MO) fueron calificados como pobres (MO = 0.0 – 1.0 %) en un 36.84 %, moderadamente provistos (MO = 1.0 - 1.5 %) en un 15.79 %, normales (MO = 1.5 – 2.0 %) en un 15.79 %, bien provistos (MO = 2.0 - 3.5 %) en un 21.05 % y ricos (MO = 3.5 – 5.0 %) en un 10.53 %. Estos datos revelan los contenidos bajos (< 2 % MO) y medios (2-4 % MO) de estos suelos (5). Los lodos constituirían una buena alternativa al incrementar materia orgánica y mejorar sus propiedades, como la retención de agua, densidad aparente, porosidad y estructura (propiedades físicas), así como el pH, capacidad de intercambio catiónico, contenido de materia orgánica, contenido de nutrientes (propiedades químicas), así como la biota del suelo y su actividad (propiedades biológicas) (6).

Los reportes del análisis de contaminantes de los suelos del valle del Mantaro, reportaron para Orcotuna, valores promedio de 443.78 mg As/kg de suelo, en su capa arable, que superó el estándar de suelo de Canadá establecido en 12 mg As/kg de suelo, concluyendo de los datos obtenidos, que estos suelos por haber tenido un muestreo superficial pueden estar en contacto directo con personas, animales y plantas, y se puede elevar su disponibilidad cuando se remueven los suelos, atribuyéndose estos altos contenidos al riego con aguas del río Mantaro (6).

Bajo estas premisas los cultivos del valle del Mantaro están siendo disminuidos en su calidad de producción, reflejándose en la pobreza poblacional y la falta de ingresos económicos a consecuencia de una agricultura insostenida, la afectación por los metales pesados es un problema que podría agudizarse si no se plantean soluciones a corto plazo (7)

Estos suelos contaminados, que necesitan materia orgánica, pueden ser mejorados por la aplicación de lodos, tratados biológicamente, que aportan cantidades significativas de materia orgánica y nutrientes, además de influir en la retención de contaminantes del suelo, convirtiéndose el suelo en un filtro, debido a los coloides tanto orgánico como inorgánico que adsorben o retienen elementos contaminantes. (6)

En este contexto se propone evaluar experimentalmente la aplicación de lodos activados en un suelo contaminado con arsénico, del distrito de Orcotuna, provincia de Concepción, región Junín, para medir su efecto en las propiedades físico-químicas del suelo y en el desarrollo de *Avena sativa*.

La mejora de las propiedades del suelo y contenido de nutrientes por efecto de la aplicación de lodos activados, permitirá tener una alternativa para las fuentes de materia orgánica que se pueden agregar a suelos, que a la vez están contaminados y este material orgánico podría retener o adsorber arsénico, disminuyendo su potencial contaminante al agua y otros organismos relacionados al suelo.

1.1.2 Formulación del problema

1.1.2.1 Problema general

¿Cuáles son los efectos de la aplicación de lodos activados en un suelo contaminado con arsénico y cultivado con *Avena sativa*, Orcotuna, Concepción, 2016?

1.1.2.2. Problemas específicos

- a. ¿Qué efecto tiene la aplicación de lodos activados en las propiedades: física (densidad) y químicas (materia orgánica, pH, conductividad eléctrica, carbonato de calcio, fósforo, potasio), de un suelo contaminado con arsénico, en Orcotuna, Concepción, 2016?
- b. ¿Qué efectos tiene la aplicación de lodos activados en el crecimiento de la *Avena sativa*, en un suelo contaminado con arsénico, en Orcotuna, Concepción, 2016?

1.2 Objetivos

1.2.1 General

Determinar cuáles son los efectos de la aplicación de lodos activados en un suelo contaminado con arsénico y cultivado con *Avena sativa*, en Orcotuna, Concepción, 2016.

1.2.2 Específicos

- a. Determinar los efectos de la aplicación de lodos activados en las propiedades: física (densidad) y químicas (materia orgánica, pH, conductividad eléctrica, carbonato de calcio, fósforo, potasio), de un suelo contaminado con arsénico, en Orcotuna, Concepción, 2016.
- b. Determinar los efectos de la aplicación de lodos activados en el crecimiento de la *Avena sativa*, en un suelo contaminado con arsénico, en Orcotuna, Concepción 2016.

1.3 Justificación e importancia

1.3.1 Justificación tecnológica

Los lodos activados, como materiales sólidos orgánicos, son fuente enriquecida de nutrientes, sus procesos tecnológicos de obtención van avanzando año tras año, estos subproductos resultantes del tratamiento de aguas residuales municipales sirven como acondicionadores de la calidad del suelo, mejorando sus propiedades físico-químicas, logrando estabilidad de fertilidad del suelo. El uso racional, metodológicamente controlado de los lodos activados, mejorará ampliamente la aplicación al suelo.

1.3.2 Justificación social

La utilización de lodos activados en los suelos agrícolas es una fuente orgánica directa y económica para los diferentes suelos de los productores agrarios, en la mejora de sus suelos, esto se va a notar en la calidad de su producción, así como en el rendimiento de sus cultivos, evidenciándose económicamente en cada ciclo de cultivo, ahorrando en productos costosos y sintéticos usados en su producción. Los suelos con mejores propiedades redundarán en el incremento del rendimiento de los cultivos.

1.3.3 Justificación académica

El estudio del uso de lodos activados en suelos agrícolas contaminados permitirá evaluar muchas alternativas de optimización para el uso adecuado de fuentes de materia orgánica, viables para pastos, legumbres, tubérculos, reforestaciones, etc., como ya se ha estado dando en otros trabajos de investigación, esta tesis busca la aplicación al suelo, solo pasando por el proceso de deshidratado, como indica la normativa para su uso.

1.3.4 Importancia de la investigación

La utilización de lodos activados para el suelo, constituye una alternativa de disposición final de lodo activados, así como una alternativa para la mejora de las

propiedades de un suelo contaminado con arsénico que, en el valle del Mantaro, y especialmente en Orcotuna, están afectando la cadena alimenticia de los diversos organismos involucrados, resultado de la actividad agrícola. Cuando una cosecha, como la de *Avena sativa*, es utilizada para fines de alimento del ganado, o como alimento de personas, al cosechar sus granos, el arsénico que absorbe la planta del suelo, sigue el ciclo trófico y afectan a los seres vivos (animales y humanos), además de afectar la vida microbial del suelo.

Es preciso mencionar que un suelo contaminado no solo afecta el funcionamiento de este recurso natural, sino también puede afectar al agua, de allí la importancia de ensayar y plantear alternativas de descontaminación de suelos, a través de la mejora de sus principales propiedades físico-químicas en los suelos del distrito de Orcotuna, Concepción.

1.4 Hipótesis

1.4.1 General

Hi: La aplicación de lodos activados, afecta positivamente a un suelo contaminado con arsénico, y cultivado con *Avena sativa*, en Orcotuna, Concepción, 2016.

Ho: La aplicación de lodos activados no afecta positivamente a un suelo contaminado con arsénico, y cultivado con *Avena sativa*, en Orcotuna, Concepción, 2016.

1.4.2 Específicas

H1: La aplicación de lodos activados en un suelo contaminado con arsénico mejora sus propiedades físicas (densidad) y químicas (materia orgánica, pH, conductividad eléctrica, carbonato de calcio, fósforo y potasio).

Ho: La aplicación de lodos activados en un suelo contaminado con arsénico, no mejora sus propiedades físicas (densidad) y químicas (materia orgánica, pH, conductividad eléctrica, carbonato de calcio, fósforo y potasio).

H2: La aplicación de lodos activados en un suelo, del distrito de Orcotuna, incrementa el crecimiento de *Avena sativa*.

Ho: La aplicación de lodos activados en un suelo, del distrito de Orcotuna, no incrementa el crecimiento de *Avena sativa*.

1.4.4 Hipótesis alternativa

La aplicación de lodos activados en un suelo contaminado con arsénico y cultivado con *Avena sativa* no afecta ni positivamente ni negativamente en Orcotuna, Concepción 2016.

1.5 Descripción de variables

1.5.1 Variable independiente

X = Lodos activados

Definición: los lodos activados son una mezcla sólida de bacterias, hongos, protozoos y rotíferos mantenidos en suspensión por aireación y mezcla (8).

Dimensiones: aplicación de niveles porcentuales de lodos en suelos contaminados con arsénico para el crecimiento de *Avena sativa*. en condiciones controladas.

Indicador: suelo con diferentes dosis (%) de lodos activados

1.5.2 Variables dependientes

Y1 = Propiedades físico-químicas del suelo

Definición: componentes de la fase sólida y líquida del suelo en permanente interacción: pH, CaCO₃, contenido de materia orgánica y nutrientes (9)

Dimensiones: contenidos altos, medios o bajos de las propiedades físico-químicas del suelo.

Indicadores:

- Materia orgánica (%)
- Calcáreo (%)
- P disponible (ppm)
- K disponible (ppm)
- Densidad aparente (Mg/kg)
- pH
- Conductividad eléctrica (dS/m)

Y2 = Crecimiento de *Avena sativa*

Definición: el crecimiento se refiere a la acumulación de biomasa que puede medirse mediante el área foliar, peso de tallo, raíz, total, o altura de planta (10).

Dimensiones: acumulación de materia seca e incremento de crecimiento.

Indicadores:

- Altura de planta (cm)
- Materia seca parte aérea (kg)
- Materia seca de raíz (kg)

Tabla 1. Operacionalización de las variables en estudio

VARIABLES	DEFINICIÓN	DIMENSIONES	INDICADOR
X = Lodos activados	Los lodos activados son una mezcla de bacterias, hongos, protozoos y rotíferos mantenidos en suspensión por aireación y mezcla. (8)	Aplicación de niveles porcentuales de lodos en suelos contaminados para el crecimiento de <i>Avena sativa</i> en condiciones controladas	Suelo con niveles porcentuales crecientes de lodo
Y1 = Propiedades físico-químicas del suelo	Componentes de la fase sólida y líquida del suelo en permanente interacción: pH, CaCO ₃ , contenido de materia orgánica y nutrientes. (9)	Contenido del componente orgánico del suelo, mediante oxidación húmeda	Contenido de MO (%) Conductividad eléctrica (dS/m)
		Medición electrométrica de la concentración de iones hidrógeno en la solución suelo	pH del suelo
		Medición del contenido de fósforo disponible en el suelo	Contenido de P (ppm)
		Medición del potasio disponible en el suelo	Contenido de K (ppm)
		Medición de la relación masa/volumen del suelo	Dap del suelo
Y2 = Crecimiento de <i>Avena sativa</i>	El crecimiento se refiere a la acumulación de biomasa que puede medirse mediante el área foliar, peso de tallo, raíz, total, o altura de planta. (10)	Crecimiento de la parte aérea de la planta	Altura de planta (cm)
		Acumulación de materia seca vegetal en la parte aérea	Materia seca aérea (g)
		Acumulación de materia seca radicular.	Materia seca raíz (g)

Fuente: elaboración propia

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes del problema

En la tesis titulada “Efectos de aplicación de los lodos provenientes de la planta de tratamiento de aguas residuales sobre el suelo” realizada en la Universidad Nacional Agraria La Molina, cuyo objetivo fue evaluar el efecto del uso de lodos residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales por aireación extendida (lodos activados), como fuente orgánica para el crecimiento de las plantas se analizó cinco tratamientos 0 %, 25 %, 50 %, 75 % y 100 % de lodo residual sobre el suelo realizando cuatro cultivos de: maíz (*Zea mays* L.), frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), lechuga (*Lactuca sativa* L.) y rábano (*Raphanus sativus* L.) en macetas. Se concluyó que en el maíz y frijol se mostraron grandes aportes de crecimiento y desarrollo. Sin embargo, en el cultivo de la lechuga su crecimiento fue inhibido a medida que aumentaba la concentración, esto se podría deber al alto contenido de nutrientes de los lodos, en el caso del rabanito se comprobó que la aplicación de lodos residuales no favoreció para el desarrollo de la planta; a diferencia de otros resultados, plantea que se corrobore por otros estudios más específicos. Con respecto a la bioacumulación del cadmio en los cultivos de maíz y frijol cumplen con el valor establecido en los estándares americanos EPA (1992); con respecto a la cantidad de coliformes fecales que contienen los lodos residuales, presentan restricciones agrícolas, y recomienda tratamientos adicionales para la reducción de patógenos o para usos de revegetación,

finalmente afirma que la aplicación de lodos activos puede ser usado como abono orgánico y que esta dependerá de la concentración de su aplicación ya que se demostraron sus propiedades beneficiosas tanto económicas como para la agricultura. (11)

En la tesis titulada “Comportamiento agronómico de tres variedades de Avena (*Avena sativa* L.) con aplicación de materia orgánica, en la estación experimental de Choquenaira”. Se determinó como objetivo general evaluar el comportamiento agronómico de tres variedades de avena (*Avena sativa*. L.) con aplicación de materia orgánica, en la estación experimental de Choquenaira. El método y diseño fue experimental, utilizado en bloques completos al **azar** con arreglo en **parcelas divididas**, se establecieron los tratamientos tomando en cuenta la existencia de tres variedades de avena (Águila, Gaviota y Texas) y tres niveles de fertilización orgánica dando un total de 9 tratamientos con porcentaje de 0 kg/ha, 15 kg/ha y 30 kg/ha de abono de ovino. Se concluyó que las variables relativas al estado fenomenológico como son: días a emergencia, días a macollamiento, días a floración y días a grano lechoso; no registraron diferencias significativas, con la aplicación, los diferentes niveles de materia orgánica, y tampoco se obtuvieron diferencias significativas entre variedades utilizadas en el ensayo para el tratamiento en 0 t/ha de materia orgánica se tiene mayor porcentaje de emergencia, la mayor producción de materia verde se obtuvo con la aplicación de materia orgánica de 30 t/ha; por otro lado, las variedades de Águila, Gaviota y Texas tuvieron un comportamiento similar en cuanto a la materia orgánica. Para 15 y 30 t/ha de materia orgánica la variedad Gaviota tuvo una mayor cantidad de materia seca en comparación a las variedades Águila y Texas; por último, la relación de costo beneficio del presente estudio realizado sí mostró ingresos rentables de acuerdo a la tasa de retorno marginal de 0.80 Bs/kg de forraje. (12)

En el artículo de investigación titulado “Disponibilidad de nitrógeno y desarrollo de Avena Forrajera (*Avena sativa* L.) con aplicación de Biosólidos en la ciudad de Durango, México” se determinaron los siguientes objetivos: evaluar la respuesta agronómica de la avena forrajera a la aplicación de biosólidos líquidos y estimar el porcentaje de nitrógeno del biosólido que es disponible para un cultivo de avena forrajera. Usó el método de siembra del voleo, con una densidad de siembra de 120 kg ha⁻¹, con los tratamientos en dosis de N y Biosólidos en ambos casos con equivalencias de 67 %, 100 % y 133 % del requerimiento del N del cultivo de avena forrajera; por último, adicionó un testigo sin aplicación de N, el

diseño experimental utilizado fue con bloques al azar con tres repeticiones; la unidad experimental fue de 64 m² (8.9 × 7.2 m). Se concluyó al final del experimento que la altura de la planta no fue estadísticamente diferente entre los tratamientos de biosólidos y fertilizante sintético sin importar la dosis, la altura de la planta fue de 77.66 cm, 73.00 cm y 88.33 respectivamente para la dosis con los biosólidos mientras que para el fertilizante fue de 75.00 cm, 77.66 cm y 83.00 cm, con esto demuestra que es posible sustituir fertilizantes convencionales por el uso de biosólidos. La concentración de N en el forraje cosechado fue menor en los tratamientos con biosólidos, aunque el contenido de proteína fue adecuado para la etapa de corte en la que se evaluó el rendimiento. La aplicación de N por medio de dos fuentes (fertilizante y biosólidos), generó un aumento lineal del rendimiento de MS en función de la dosis de N aplicada, por último se estimó que los contenidos en los biosólidos pueden representar un riesgo de contaminación potencial a los cuerpos de agua superficial o subterránea cuando se aplican en exceso, para lo cual la norma mexicana NOM-004-2001-SEMARNAT no señala ningún criterio para estimar la dosis de la aplicación con base a ningún requerimiento requerido. (13)

En la tesis titulada: “Estudio de viabilidad en la aplicación de lodos activados en suelo para los cultivos de maíz (*Zea mays* L.) y nopal (*Opuntia ficus-indica*)”, realizada en la Universidad Autónoma de Nuevo León, cuyo objetivo de investigación es evaluar diferentes dosis de lodos activados en el crecimiento y la fenología del maíz y nopal y cuantificar la concentración de metales pesados provenientes de los lodos activados utilizando la metodología de diseño de bloques al azar con cinco tratamientos y cinco repeticiones, con un total de 25 unidades experimentales. Los resultados del experimento de maíz, mostraron que el efecto de la adición de lodos al suelo presentó el mejor comportamiento en las etapas de desarrollo de la planta de maíz, presentando un efecto por encima del fertilizante. Las concentraciones de níquel, cadmio y plomo tuvieron una presentación alta en los diferentes órganos de la planta con los tratamientos donde se adicionaron lodos en sus diferentes dosis; sin embargo, respecto al cinc en la raíz el tratamiento con fertilizante mostró la mayor lectura, y en tallos y hojas las mayores lecturas las presentó el testigo. En el experimento con nopal, la adición de los lodos se observó que afectaron significativamente los componentes morfológicos con la dosis de 4 t/ha de lodo deshidratado. Sin embargo, las variables de peso húmedo y peso seco de cladodio hijo se comportaron mejor con el fertilizante comercial para largo y ancho del cladodio madre; así como, en la longitud de

raíz, el testigo mostró la mejor respuesta. En el estudio de los suelos tratados se concluyó que la concentración de metales pesados en los suelos de maíz y nopal, no sobrepasaron los límites permitidos por la EPA, esto pudo ser por que se utilizó lodo de procedencia doméstica, el cual contiene menor concentración de metales pesados. La aplicación de los lodos tanto líquidos como deshidratados, presentaron una mejor respuesta, que la dosis del fertilizante comercial utilizado. (14)

En la tesis titulada “Uso de lodos residuales procedentes de la ciudad de Durango y su efecto en la productividad y concentración de metales pesados de sorgo forrajero (*Sorghum vulgare Pers*), presenta los siguientes objetivos:

- Determinar las características de los lodos residuales municipales de la ciudad de Durango, al momento de la toma de muestras.
- Evaluar el efecto de la aplicación de lodos residuales sobre la producción de forraje en el cultivo de sorgo forrajero.
- Eliminar la concentración de metales pesados en el tejido vegetal de la parte aérea y en la raíz.
- Evaluar el efecto residual de la aplicación de lodo residual en la productividad del sorgo forrajero en base seca.
- Evaluar la concentración de metales pesados en el suelo.

Utilizó cinco tratamientos con cinco repeticiones cada uno, empleando bloques completos al azar, la unidad experimental fue de 38.4 m² con 6 surcos de 4.8x8m utilizando sorgo forrajero (*Sorghum vulgare Pers*), cuatro plantas por muestra, las muestras son las siguientes: T1: Testigo, T2 Lodo residual (4 Mg ha⁻¹), T3: Lodo residual (8 Mg ha⁻¹), T4: Estiércol bovino (4 Mg ha⁻¹), T5: Fertilizante químico (120-60-00). Concluyendo para el T2 que, no existió diferencia para los lodos residuales, fertilizante químico y estiércol por lo que concluye que los lodos residuales pueden sustituir muy bien como aplicación en la agricultura, la concentración de metales pesados se encuentra por debajo de la Norma US-EPA-503, para T3; los abonos orgánicos de lodos residuales y estiércol bovino, mostraron la mayor producción de forraje en base seca que a diferencia de los tratamientos con fertilizante inorgánico y el testigo, los cuales mostraron la menor producción; los metales pesados estuvieron por debajo de los límites que establece la norma, para T4. Los

tratamientos 4, 3, 2 y 5 que contenían abonos orgánicos y fertilizante químico, mostraron una mayor producción de forraje de base seca, comparados con el tratamiento 2, debido al efecto de residualidad, para T5. Los tratamientos 3, 4 y 2 correspondientes a los abonos orgánicos, mostraron la mayor producción de forraje en base seca y los tratamientos con fertilizante químico y el testigo mostraron la menor producción (15)

En la tesis titulada “Análisis y criterios mínimos para la aplicación de lodos tratados proveniente de plantas de tratamiento de aguas servidas en agrosistemas de la provincia de Melipilla, región Metropolitana, Chile” planteó los siguientes objetivos específicos: las expectativas de campo con aplicaciones de lodos en agrosistemas principalmente en las provincias de Melipilla y Maipo, región Metropolitana, las que se contrastan con estudios realizados en el extranjero, la normativa aprobada en Chile y la existente en el extranjero, a fin de determinar criterios técnicos bajo los cuales dicha aplicación sea beneficiosa y no genere efectos adversos para el agrosistema. Se utilizó el análisis descriptivo de los resultados de las investigaciones de aplicación de lodos en agrosistemas durante tres temporadas en las provincias de Melipilla y Maipo, RM; obtenidos tanto en suelo como en los cultivos, a través del análisis técnico-ambiental de la normativa vigente, específicamente del D.S. N°4/2009 y Método de Superposición en SIG/ArcView. Se concluyó que los lodos generados en PTAR pueden aplicarse en agrosistemas sin provocar efectos adversos, siempre y cuando se consideren los requisitos de la normativa vigente y criterios adicionales, La aplicación de lodos tiene efectos positivos en los suelos: disminuye la densidad aparente, aumenta la estabilidad de agregados, incrementa la retención de agua, aporta nutrientes y materia orgánica, y mejora el rendimiento de diferentes cultivos (16).

La tesis titulada “Suelos potencialmente aptos para revegetación o uso agrícola a partir de la utilización de biosólidos provenientes de las plantas de tratamiento de aguas servidas en la provincia de Chacabuco, región Metropolitana” cuyo objetivo fue identificar y evaluar los suelos de la provincia de Chacabuco potencialmente aptos para la revegetación y eventualmente para el uso agrícola, a través de la aplicación de lodos activados, caracterizándolos y estableciendo los parámetros cualitativos y cuantitativos que limitan estos usos. Se hizo uso del método de caracterización físico-natural de los suelos, empleando información base a partir de ortofotos, escala 1: 20.000, digitalizadas a través del software

ArcInfo, además de información obtenida en terreno, para la identificación y la caracterización de las unidades susceptibles a la erosión dentro del área de estudio, se empleó como base conceptual, el método utilizado para el análisis de los recursos hídricos y el pronóstico de escenarios erosivos en dos cuencas semiáridas de África del Sur, pertenecientes a los ríos Mkomazi y Mbuluzi, siendo este acercamiento innovador para caracterizar los procesos causados por la dinámica del agua, utilizando el concepto de Unidades de Respuesta a la Erosión; se concluyó que el pH de las series se ubica por encima del valor 6,6 y solo la serie Chicauma presenta un valor 6,5; por lo tanto, puesto que la aplicabilidad en relación al pH está supeditada a aquellos suelos que posean un valor por sobre 5, todas las series son de posible aplicación según pH. Es decir, existe una homogeneidad espacial en términos de la basicidad de los suelos en la provincia de Chacabuco, transformándose en terrenos aptos para la recepción de lodos activados; se determinó que, como capacidad de uso sobre las imágenes del suelo, no se justifica técnicamente la aplicación de lodos tratados a suelos con buenas características físicas y morfológicas; por lo tanto, los suelos con clase de capacidad de uso I, II y III quedan excluidos de una posible aplicación de lodos activados, pues poseen condiciones naturales aptas para el desarrollo de cultivos agrícolas. Estos suelos abarcan una superficie del área de estudio correspondiente a 40.311,6 ha (23,4 %). Dichas unidades edafológicas se asocian principalmente a paisajes de fondo de valle, es decir a aquellas superficies relativamente planas, ubicadas entre los cordones montañosos. Se habla de aquellas formas aterrazadas de origen fluvial relacionadas con los esteros Lampa, Peldehue, Chacabuco y Til Til, como también al cono aluvial y glacis de ahogamiento del río Colina, donde se desarrollan las actividades de tipo agrícola intensivo y extensivo (17).

En el artículo científico titulado “Posibilidades de aplicación de lodos o lodos activados a los suelos del sector norte de la región Metropolitana de Santiago” cuyo objetivo es analizar suelos que pueden ser receptores de estos lodos sin convertirse en agentes de contaminación, y que a su vez tengan un uso y habitabilidad compatibles. En la parte metodológica se efectuaron tres campañas de terreno logrando así el reconocimiento general de la provincia, apoyado por la información cartográfica, cartas IGM y ortofotos, también se tomaron muestras compuestas de suelos de los primeros 20 cm (capa arable), las que fueron georreferenciadas con el uso de GPS tipo Garmin. Las muestras fueron identificadas y llevadas al laboratorio del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) para su análisis

químico, los análisis efectuados corresponden a pH, conductividad eléctrica (CE), materia orgánica (MO %), N, P, K disponibles y capacidad de intercambio catiónica (CIC). Los resultados fueron los siguientes:

- Los valores de pH, en general se presentan en rangos desde ligeramente ácidos a neutros vale decir, entre 6,1 a 7,8.
- La conductividad eléctrica media demuestra que los suelos se encuentran en condiciones no salinas (0-2 mmhos/cm), por lo cual no tienen ningún grado de limitación y pueden sustentar cualquier tipo de vegetación.
- El contenido de materia orgánica se considera bajo en el 50 % de los suelos muestreados, es decir, en el rango de 1,6 a 2,4 %.
- Con respecto a la cantidad de nitrógeno, fósforo y potasio, todos los análisis muestreados dan como resultado que el suelo presenta mínimas concentraciones de nitrógeno disponible, por lo que se le ha considerado **baja** para su clasificación.
- Los contenidos de potasio en los suelos varían normalmente entre 0,5 a 2,5 % siendo 1,2 % un valor normal, rango en que se encuentran todos los suelos muestreados. En relación al fósforo, se señala que en suelos de la zona central se han determinado valores entre 730 y 1.290 mgkg⁻¹, los resultados analíticos del área de estudio arrojan valores muy bajos.
- El análisis de la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), determinó resultados que establecen que las muestras de suelos tienen alta capacidad, teniendo así relación a un buen índice de fertilidad, pero esto no se corroboró en todos los análisis de las muestras.

Se concluye que la provincia de Chacabuco, de acuerdo a sus características de los suelos presenta buenas condiciones para la recepción de lodos de plantas de tratamiento de aguas servidas; así mismo, la normativa en uso plantea restricciones para la aplicación de consideradas áreas en la provincia de Chacabuco; esto coincide con la hipótesis planteada y presenta un escenario pesimista sobre las reales posibilidades de aplicar los biosólidos en los suelos de la región metropolitana de Santiago (18).

En el artículo científico titulado “Análisis básico del reúso de lodos residuales en una planta de tratamiento de aguas residuales en suelos de pradera del Parque Nacional Nevado de Toluca” cuyo objetivo fue el análisis de la fertilidad de suelos de pradera del Parque Nacional Nevado de Toluca (PNNT) de los suelos; así como el análisis de la reutilización de

lodos residuales estabilizados (alcalinamente) estudiando sus propiedades fisicoquímicas en el aporte a los suelos ya mencionados. Se utilizó muestreo de suelo, método zig-zag, método Reyes-Reyes, fueron colocadas en bolsas y llevadas al laboratorio para su análisis físico-químico, en el caso de los lodos residuales fueron un total de seis muestras en una cantidad de 1 kg se colocaron en envases de 19 L, a temperatura ambiente y fueron llevadas a laboratorio para el análisis de las propiedades físico-químicas. Se concluyó para el suelo de pradera de las tres localidades del Parque Nacional Nevado de Toluca, Rosa Morada, Dilatada y el Capulín, que tienen una disminución considerable de fertilidad, esto se resume en lo siguiente: para el pH, 6.01, 5.45, 5.62, (ácidos) respectivamente, para la materia orgánica 6.21, 4.3, 4.0 (considerados bastante bajos) para la relación carbono/nitrógeno C/N, 7.9(0.3782 % N), 47(0.0553 % N), 42.9(0.0559 % N), respecto a la capacidad de intercambio catiónico, 11.15, 10.34, 10.12 (están por debajo de 25 CmolKg⁻¹, NOM-021-SERNAT-2000. Con respecto a los lodos residuales, estabilizados alcalinamente, presentaron los siguientes valores fisicoquímicos: pH: 9.77, materia orgánica: 31 %, carbono orgánico: 19 %, nitrógeno total: 1.06 %, relación C/N 17.88 %, capacidad de retención de agua: 43.7 %, capacidad de intercambio catiónico: 58 %, coliformes fecales y totales (NMP/g en base seca): < 100 estos rubros de % de materia orgánica, % carbono orgánico, % nitrógeno total; están por arriba de los mostrados en los suelos de pradera del PNNT, esto da pauta a establecer que la incorporación de los lodos a los suelos señalados es una buena opción por la transferencia de nutrientes de los lodos a los suelos; finalmente afirma que, la propuesta de investigación desarrollada, muestra que las actividades antrópicas que realiza el hombre en el PNNT, tienen efectos directos sobre el contenido de micronutrientes en los suelos de dicho parque, de manera específica los de pradera. La reutilización de los lodos residuales incorporados como mejoradores de la fertilidad de suelos es viable, esto se basa en los resultados de los análisis físico-químicos realizados a los mismos y al estudio teórico realizado de la transferencia de nutrientes de dichos lodos a los suelos ya mencionados. (19)

En el artículo científico titulado “*Chemical Characterization of Sewage Sludges in Chile and Their Potential Utilization as Amendment to Reclaim Soils for Forestation Purposes*” se tuvo como objetivos reportar la distribución química de los compuestos de carbono estabilizado, contenidos en lodos de depuradora, generados de diferentes plantas modernas de tratamiento de aguas residuales, localizadas en diferentes ciudades cerca de plantaciones forestales en tres regiones geográficas del centro de Chile; correlacionando los

resultados con los patrones usualmente hallados en el humus del suelo y otros tipos de enmiendas orgánicas del suelo. Los suelos para reforestación en Chile están caracterizados por un contenido de carbono orgánico muy bajo; por lo tanto, las nuevas plantaciones forestales necesarias para restaurar el equilibrio ecológico del suelo se desarrollan escasamente. El lodo estabilizado contiene compuestos orgánicos que se ha demostrado pueden servir como buenas enmiendas del suelo. Para evaluar su uso actual en Chile es necesario caracterizar en patrón de distribución de carbono (C) de tales lodos para prever su contribución potencial en la recuperación del suelo y crecimiento de la planta, actuando como una fuente de reserva de carbono estable y como fuente de carbono fácilmente disponible. La distribución del peso molecular y el balance de carbono en lodos chilenos son algo similares al humus del suelo y algunos subproductos leñosos, como aserrín y polvo de corteza. El C total varía de 30 a 35 %, N de 5 a 9 %, y P de 10000 a 12000 ppm. No se encontraron contenidos significativos de metales pesados. El balance de carbono indicó que casi el 70 % del C total está en formas estabilizadas como huminas y estructuras macromoleculares húmicas. El lodo puede ser considerado como buena enmienda para suelos forestales, especialmente en áreas bastante horadadas y bajas en humus natural. Sus fracciones de C soluble (13 % del C total) servirán como buena fuente energética inicial para favorecer la ecología microbiana indígena del suelo, mientras que sus fracciones de alto peso molecular (macromoléculas similares a la humina y ácidos húmicos) servirán como buena reserva de humus y como estructura de microelementos en suelos tratados con lodos activados. (20)

En el artículo científico titulado: “*Possibilities of using sewage sludge as nitrogen fertilizer for maize*”, cuyo objetivo fue determinar los efectos de fuentes fertilizantes nitrogenadas de sulfato de amonio y lodos municipales sobre el rendimiento, contenido de nitrógeno y absorción por el maíz (*Zea mays* L.), los metales pesados y nutrientes fueron determinados en suelos y plantas. El experimento fue conducido en un suelo franco arcilloso bajo condiciones de riego en la región de Anatolia Este en Turquía, utilizando tres dosis de lodos (256, 513 y 1026 kg N total/ha, o 9.5, 19.0 y 38.1 t/ha de lodos) y dos dosis de nitrógeno (80 y 160 kg N/ha) y un control de N-cero. Los tratamientos fueron dispuestos en un diseño de bloques completamente randomizados con cuatro repeticiones. El rendimiento, contenido de nitrógeno y absorción de N en maíz incrementó significativamente con la aplicación de lodos. Las dosis de 9.5 y 19.0 t/ha de aplicaciones de lodos no incrementaron

significativamente el contenido de metales pesados de la hoja y el grano. Sin embargo, la dosis de 38.1 t/ha de aplicación de lodos incremento el Pb y Zn en las hojas. Las concentraciones en los suelos, de Cd, Cu, Fe, Pb y Zn extractables con DTPA, incrementaron con las aplicaciones de 38.1 t/ha de lodos, mientras que las aplicaciones de 9.5 t y 19.0 t/ha de lodos solo resultaron en elevados niveles de Cu y Zn. Los autores concluyeron que los lodos si son usados en la producción de maíz, deberían aceptarse en dosis de hasta t/ha. Sin embargo, esto significa también que la necesidad de N del cultivo de maíz no está cubierta por el lodo; por lo tanto, el resto de nitrógeno podría ser suministrado como nitrógeno inorgánico (21).

En el artículo científico titulado: “*Effects of sewage-sludge application on soils and sunflower yield: quality and toxic element accumulation*”, el objetivo fue estudiar los efectos de lodos sobre el rendimiento de girasol y la acumulación de nutrientes y elementos traza en suelos y en el cultivo. Se condujeron tres experimentos con girasol en campos de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Los tratamientos fueron: control, 7 t materia seca de lodos/ha, y 14 t materia seca de lodos/ha. Los suelos fueron un *Typic argudolls* y un *Typic Hapludoll*. Se cosechó la biomasa aérea y los granos, a la madurez fisiológica. Se determinó nitrógeno, fósforo y potasio y, después de la digestión con ácidos, se analizó cadmio, cromo, cobre, plomo, níquel y zinc, con espectrometría de emisión de plasma acoplado inductivamente. Se tomaron las muestras de suelo y se analizaron nutrientes y cadmio, cromo, cobre, níquel, plomo y zinc. Solo se incrementaron en el suelo, fósforo disponible y nitrógeno nítrico, después de la aplicación de los lodos. Los rendimientos de girasol incrementaron en granos por cabeza. El peso de granos individuales, contenido de aceite, nutrientes, y concentración de elementos traza no fueron afectados, así como la biomasa aérea y su composición. El autor concluyó que usando lodos según las regulaciones estándar no se afecta la absorción de metales tóxicos o calidad del girasol (22).

2.2 Base teórica

2.2.1 Los lodos activados

Definición

La activación de lodos es un proceso biológico que utiliza microorganismos para convertir materia orgánica y cierta materia inorgánica de aguas residuales en masa celular. Los lodos activados son luego separados del líquido por clarificación. El lodo separado es devuelto o desechado. El lodo activado es comúnmente usado como un proceso de tratamiento de aguas residuales debido a que es un proceso de tratamiento versátil y efectivo, y capaz de un alto grado de efectividad (23). El principal rol que los microorganismos tienen en el proceso de activación de lodos es convertir materia orgánica particulada o disuelta, medida como demanda bioquímica de oxígeno (DBO), en masa celular. En un proceso convencional de lodos activados, los microorganismos usan oxígeno para descomponer la materia orgánica (alimento) para su crecimiento y supervivencia. Conforme avanza el proceso y el agua residual se mueve a través de la cuenca de aireación, el alimento (DBO) disminuye con un incremento resultante en masa celular (8).

El término de lodo activado describe el material sólido producido en diferentes etapas del tratamiento de aguas residuales. El lodo residual deberá ser utilizado conjuntamente con el proceso de tratamiento, el cual genera dicho material. El lodo primario es conocido como los sólidos del agua residual colectados en un tratamiento primario. Cuando el lodo primario es evaluado, tratado y procesado, el material puede reunir los estándares de lodo activado; es un término más preciso, utilizado solamente para describir aquella porción de sólidos del flujo del agua residual que cumple las regulaciones federales y estatales para un beneficio en la aplicación (14).

El término lodo activado se originó dentro de la industria del tratamiento de aguas residuales, tratando de definir la porción descontaminada y agrícolamente viable de los lodos generados por los sistemas de tratamiento de aguas residuales. Sin embargo, el término de lodo difiere de lodo activado, ya que estos últimos se refieren a un producto tratado, que es

cuidadosamente verificado y periódicamente reutilizado a través de aplicaciones innovadoras (24).

La disposición de lodos producidos por tratamiento de desagües plantea un gran problema, desde que en casi todos los países desarrollados la disposición de este lodo por vertimiento al mar está siendo eliminado y el principal método de disposición está cambiando para ser usado en la tierra. En efecto, el uso de lodos para enmendar los suelos es un proceso ventajoso. Los lodos agregan al suelo materia orgánica, así como elementos nutritivos como fósforo y nitrógeno. A pesar de eso, contaminantes como son los metales pesados, que están normalmente concentrados en los lodos, pueden acumularse dentro del suelo y eventualmente ser absorbidos por los cultivos alimenticios tales como las hortalizas de hoja, que se sabe absorben preferencialmente cadmio, uno de los metales pesados que se presenta abundantemente en los lodos (25).

Los lodos, son el subproducto sólido de plantas de tratamiento de aguas residuales o industriales. Se ha distribuido en el suelo por décadas, y su uso probablemente se incrementará en el futuro. Si los lodos han sido tratados para cumplir con estándares de bajos niveles de contaminante y patógenos, se puede aplicar el término lodo activado. El producto *Milorganita*, un lodo activado (oxigenado), secado, ofertado por la Comisión de Alcantarillado de la Ciudad de Milwaukee, ha sido ampliamente utilizado como un fertilizante de liberación lenta en Norteamérica desde 1927, especialmente en pastos (9).

2.2.1.1. Clasificación de los lodos activados

Los lodos activados no tienen una clasificación específica como tal, pero el D.S. N° 015-2017-VIVIENDA, Decreto Supremo que aprueba el reaprovechamiento de los lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales, presenta dos tipos de clasificación (26).

- a. **Biosólidos de Clase A:** son aquellos aplicables al suelo sin restricciones sanitarias, es decir son utilizados para su reaprovechamiento como acondicionador de suelos en agricultura y/o mejoramiento de suelos (26).

Caracterización de biosólidos Clase A para su aprovechamiento:

- Acondicionamiento de suelos para agricultura, pastos y forrajes excepto aplicación directa a los cultivos vegetales y frutas rastreras de consumo crudo.
- Mejoramiento de suelos y áreas verdes urbanas, con acceso restringido a la población en un periodo no menor a siete (7) días.
- Aplicación en las áreas destinadas para la Clase B.
- Comercialización a empresas productoras de insumos de uso agrícola *humus* debidamente registradas ante Senasa.
- Comercialización a empresas del sector privado que tengan como objeto social la producción, comercialización y disposición final de biosólidos.
- Comercialización a empresas operadoras de residuos sólidos, para los fines que considere pertinente.

b. **Biosólidos de Clase B:** son aquellos aplicables al suelo con restricciones sanitarias según localización de los suelos y/o tipo de cultivo, se asume para suelos que excluyen el riesgo de contacto con la población y actividades ganaderas (26).

Caracterización de Biosólidos Clase B para su aprovechamiento:

- Fines agrícolas y/o forestales para plantas de tallo alto y que son procesados para su comercialización, como cultivo de café, así como cultivos para la producción de fibra y madera.
- Recuperación de áreas degradadas ubicadas a 100 m de distancia de pueblos y viviendas.
- Reforestación de suelos con acceso restringido a la población y/o animales por un periodo mínimo de treinta (30) días a partir de la aplicación del biosólido.
- Material de cobertura final para rellenos sanitarios, rellenos de seguridad o canchas de relaves con fines de reforestación o siembra de otros cultivos.
- Comercialización a empresas que se encarguen de transformar biosólidos Clase B en Clase A, para su venta como *compost*, *humus* u otros acondicionadores de suelos.
- Comercialización a empresas operadoras de residuos sólidos, para los fines que considere pertinente.

2.2.1.2. Aplicación de lodos activados al suelo

Los lodos, debido a sus contenidos benéficos de nitrógeno, P y materia orgánica, son frecuentemente reciclados a tierras agrícolas donde tienen un valor fertilizante significativo. Sin embargo, las concentraciones de metales pesados y metaloides son la principal limitante en las cantidades de lodos que pueden ser aplicadas a los suelos. Los metales y metaloides en los lodos son el resultado de entradas de excreta humana, aguas negras domésticas de baños, duchas y lavaplatos, aguas de esorrentía de techos y carreteras y aguas de desagüe industriales descargadas en alcantarillas y procesadas en plantas de tratamiento de aguas residuales. Los lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales pueden variar considerablemente en composición dependiendo de la fuente de descarga y su área de captación (27). El contenido de metales y metaloides en los lodos puede variar en las plantas de tratamiento individuales, también puede variar significativamente en una semana o, incluso, diariamente como resultado de las diferencias en la composición y volumen de descargas en las alcantarillas. Las regulaciones introducidas en Europa, los Estados Unidos de América, Australia, Nueva Zelanda y muchos otros países desarrollados tecnológicamente en los últimos 20 años han establecido concentraciones máximas de “metales pesados” seleccionados, permitidos en lodos que son aplicados a tierras agrícolas y concentraciones máximas permisibles de “metales pesados” en suelos que reciben lodos. Estas regulaciones están destinadas a evitar la acumulación de concentraciones excesivas de elementos que podrían causar ecotoxicidad en los suelos o efectos fitotóxicos en los cultivos (28).

La composición de los lodos varía entre las plantas de tratamiento, especialmente el grado al cual el material orgánico es digerido. Así como los estiércoles y otras fuentes de nutrientes orgánicos, los lodos contribuyen con macro y micronutrientes. Los niveles de metales micronutrientes de plantas (zinc, cobre, hierro, manganeso y níquel, entre otros), así como otros metales pesados (cadmio, cromo, plomo, etc.), son determinados mayormente por el grado al cual los residuos industriales han sido mezclados con residuos domésticos. En comparación con los fertilizantes inorgánicos, los lodos son generalmente bajos en nutrientes, especialmente potasio (que es soluble y hallado principalmente en el efluente). Niveles representativos de nitrógeno, fósforo y potasio son 4, 2, y 0.3 %, respectivamente. El contenido de fósforo es alto cuando el tratamiento avanzado de lodos es diseñado para

remover fósforo del efluente y depositado en el lodo. Sin embargo, si el tratamiento de aguas residuales precipita fósforo por reacciones con compuestos de hierro o aluminio, el fósforo en el lodo probablemente tendrá una baja disponibilidad para las plantas (9).

Los residuos de aguas residuales que han sido tratados, referidos como lodo activados, son materiales ricos en nutrientes provenientes del tratamiento de aguas residuales municipales y contienen nutrientes benéficos para las plantas y algunos metales pesados que deben ser monitoreados en el suelo y la planta. El interés en la disposición de lodo activado está creciendo debido al incremento de residuos generados por la población, y la necesidad de reciclar estos materiales conforme continúan incrementándose los costos de los fertilizantes y energía. El uso de lodos activados puede beneficiar la producción agrícola debido a la cantidad relativamente alta de materia orgánica y nutrientes y es una alternativa eficiente, comparado a métodos más costosos de disposición como son el quemado o los rellenos sanitarios. Así como los estiércoles, los lodos activados contienen nitrógeno orgánico e inorgánico. Las dosis de aplicación de lodos activados a los cultivos están determinadas por las necesidades de N del cultivo y el contenido de N en los lodos activados. La mayor parte del nitrógeno inorgánico se presenta como amonio disponible para la planta. Durante y después de la aplicación, la cantidad de amoníaco volatilizado depende del método de aplicación. La aplicación subsuperficial o incorporación inmediata minimizará las pérdidas por volatilización del amoníaco e incrementará el nitrógeno disponible por la planta (29).

2.2.1.3. Efectos de la aplicación de los lodos activados al suelo - propiedades físicas, químicas y biológicas

Los lodos activados, constituyen una fuente orgánica que al ser aplicada al suelo tiene numerosos beneficios en las propiedades físicas y químicas. Clásicamente se ha señalado que los principales beneficios de los abonos orgánicos sobre el suelo son de tipo físico. Aunque no existe una cuantificación abundante de los fenómenos, podría decirse que es un criterio mundialmente aceptado. En primer lugar, el efecto floculante y cementante de la materia orgánica no se duda del mejoramiento de la estructura y, por ende, de la disminución de la densidad aparente que puede ocasionarse a un suelo ante el uso abundante y continuo de abonos orgánicos. Los efectos nutricionales de estas condiciones se ven reflejados en la

mayor penetración radical y movimiento de aire, agua y nutrientes. Químicamente, los abonos orgánicos aumentan los niveles nutricionales del suelo, cuya magnitud depende del tipo de abono y de la cantidad aplicada. También el fósforo disponible y el pH se incrementan significativamente (30).

Propiedades físicas

Dentro de las propiedades físicas los lodos van alcanzando valores de acuerdo a la disposición de las aguas de tratamiento que se realice, para las propiedades físicas se determina (31):

- **Densidad aparente (e):** la densidad aparente de los lodos activados varía mucho de la cantidad de materia orgánica, la proporción de los lodos activados es incrementada respecto a la materia orgánica; es decir, a mayor adición de lodos activados la densidad aparente disminuirá generando mayor porosidad y creando mejores condiciones para el desarrollo de las raíces de las plantas.
- **Porosidad total:** en el caso de la porosidad se pudo examinar que los lodos aplicados al suelo aumentan esta propiedad, conforme va aumentando la cantidad de la dosis aplicada favorece la agregación del suelo.
- **Estructura:** en esta propiedad física el lodo activado actúa como un modelador del suelo, adquiriendo la forma granular, que permite la integración del agua y el aire en la dinámica del suelo.
- **Color:** el color varía desde plomos cenizos hasta oscuros, siendo distintos según la cantidad de agua tratada en la planta de tratamiento.

Propiedades químicas

Dentro de las propiedades químicas en la aplicación de los lodos existe un abanico de compuestos analizados desde los macronutrientes hasta los micronutrientes (31), se describirá a los más representativos:

Según Oropeza se tienen las siguientes características:

- **pH:** la clasificación en los lodos primarios es de un rango de (5.5 % – 6.5 %) para los lodos secundarios (mezcla) (6.5 % – 7.5 %) y para los lodos digeridos (6.8 % – 7.6 %).
- **Nitrógeno:** presenta para los lodos primarios (2 % - 5 %), para los lodos secundarios (mezcla) (1 % - 6 %) y para los lodos digeridos (3 % - 7 %).
- **Fósforo:** para lodos primarios (0.5 % -1.5 %) para lodos secundarios (mezcla) (1.5 % - 2.5 %) y para lodos digeridos (%) (0.5 % - 1.5 %).
- **Carbohidratos:** para los lodos primarios (8 % - 10 %), para los lodos secundarios (melaza) (6 % - 8 %) y para los lodos digeridos (5 % - 8 %).
- **Cadmio, cobre, cromo, níquel:** elementos traza, presenta para lodos primarios (0.2 % – 2 %), para lodos secundarios (mezcla) (0.2 % – 29 %) y para lodos digeridos (0.2 % – 2 %).
- **Contenido de agua:** para la cantidad de agua se tienen los valores para los lodos primarios 92 %- 96 %, para los lodos secundarios (mezcla) (97.5 % - 98 %) y para los lodos digeridos (94 % - 97 %).

Propiedades biológicas

El dinamismo propio del suelo se ve incrementada por la gran variedad de microorganismos presentes en los lodos activados, se nombrarán solo algunos y a los más representativos (32):

- Desnitrificación: devuelve el nitrógeno a la atmósfera. Las bacterias anaeróbicas *Achromobacter and Pseudomonas* llevan al proceso la conversión de nitratos y nitritos como óxido de nitrógeno N_2O o N molecular N_2 .
- Microflora: bacterias, actinomicetos, hongos, algas
- Fauna: protozoos

2.2.1.4. Efecto del lodo activado en el rendimiento del cultivo de la *Avena sativa*

Respecto a la calidad de grano y rendimiento de la *Avena sativa*, existen muchos aspectos a considerar como plantea Flores, existe variación significativa respecto al crecimiento desde 57 cm sin uso de los lodos activados hasta de 88 cm cultivados a 120 días,

esto si no se cosecha la Avena, ya que otros estudios demuestran que su crecimiento puede llegar hasta 150 cm con diferentes dosis de lodo activado (33).

2.2.2 Arsénico

Definición

El arsénico es un elemento natural ampliamente distribuido en la corteza terrestre, elemento ubicuo que presenta una clasificación como metaloide presentando propiedades tanto de metal como de elemento no metálico, pero muchos autores lo refieren frecuentemente como un metal.

El arsénico elemental, llamado también arsénico metálico es un material sólido de color gris acero, pero cuando al arsénico se le encuentre combinado con otros elementos como el oxígeno, cloro y azufre se le conoce como arsénico inorgánico (34).

En la naturaleza el arsénico es un elemento distribuido en la corteza terrestre, se combina con oxígeno y azufre para formar compuestos inorgánicos (35).

Clasificación del arsénico

Los compuestos del arsénico pueden clasificarse en tres grandes grupos: inorgánicos, orgánicos, gas arsina (35):

Inorgánicos: compuestos inorgánicos trivalentes, es considerado el más toxico, por su absorción rápida, pero también existen algunas sustancias que por sus características se eliminan con facilidad, tienden a ser menos tóxicas, los arsénicos y los arseniatos son altamente solubles en agua (35).

Orgánicos: aunque los compuestos orgánicos son menos tóxicos que los orgánicos, algunos derivados del arsénico que contienen grupos metilos o fenilos muy usados en la agricultura, causan altamente demanda de afecciones en la salud de animales en experimentación, se podría mencionar algunos compuestos como: ácido monometilarsónico (MMA) y sus sales,

así como el ácido dimetilarsínico (DMA) y sus sales, y el roxarsone (ácido 4-hidroxi-3 nitrobencenoarsónico) (35).

Gas arsina: es considerado el compuesto del arsénico más tóxico de sus variedades por su exposición aguda (35).

2.2.2.1 Suelos contaminados con arsénico

El arsénico en los suelos está mayormente asociado con sus minerales primario derivados de los materiales parentales, minerales secundarios (principalmente sulfuros de Fe oxidados e hidroxidados) formados en el curso de la meteorización de los minerales, y el As adsorbido a superficies de minerales. El arsénico orgánico presente en pisos forestales, turba, y otros materiales de suelos altos en materia orgánica son típicamente derivados de residuos de plantas. La asociación relevante con Ca (minerales) es probable que se presente en ambientes extremadamente alcalinos y ha sido solo inferido de estudios con fases puras como calcita (36).

Debido a que EDTA-NH₄ 0.025 M (pH 4.6) se ha mostrado como el extractante de fracciones de metales asociados con la materia orgánica del suelo, este agente se probó para la extracción de formas orgánicas de As de varios suelos colectados de los Alpes Austriacos (37). Sin embargo, los bajos rendimientos de extracción (2-7 % del As total) y la carencia de correlación con la materia orgánica del suelo sugiere solo una importancia marginal del As enlazado orgánicamente en suelos minerales mayormente aeróbicos. Al estudiar la solubilidad la especiación del As en cuatro suelos sintéticos casi idénticos con contenidos de materia orgánica (mezcla de estiércol de aves de corral y musgo de turba) que variaron entre 0.5 % y 15 %, y el carbono orgánico disuelto correspondiente entre 0.02 y 0.30 g.kg⁻¹. La concentración de As soluble incrementó con la materia orgánica y carbono orgánico disuelto (COD) del suelo, indicando que la movilización del As por el COD fue más efectiva que la adsorción a la materia orgánica en la fase sólida (38). Además, la materia orgánica y el COD han mostrado que disminuyen la adsorción del arseniato a la goetita (39), hematita (40) y suelos (41), (42), (43).

Adsorción del arsénico y materia orgánica

El principal mecanismo de adsorción de arsénico a la materia orgánica sólida y disuelta puede incluir la formación de complejos de esfera interna de As con grupos amino de ácidos húmicos a pH 7 cargados positivamente (44) y complejos ternarios con puentes de cationes metálicos (para ácidos fúlvicos), primariamente con Fe, Al, Mn, Ca y Mg (45). Se sugiere la participación de grupos fenólicos y carboxílicos en la complejación de esfera interna de arsénico por ácidos húmicos y fúlvicos (46).

El pH y el arsénico

La adsorción de arsénico a una variedad de compuestos ha mostrado ser más o menos dependiente del pH del sistema, con una variación menor de la adsorción para As (III) comparado a As (V). La forma de la adsorción dependiente del pH y su correspondiente máximo no solo depende del tipo y naturaleza del adsorbente sino también de las condiciones experimentales tales como fuerza e índice iónico del electrolito y la carga relativa de As comparado a la máxima capacidad de adsorción (47).

El efecto del pH sobre la adsorción de As (V) en los suelos parece ser generalmente pequeña. Sin embargo, la adsorción contrastante de As (V) (disminución constante versus adsorción máxima alrededor de pH 6-7) se ha reportado donde se observaron los efectos del pH. Como se mostró para un suelo, estos patrones pueden ser posteriormente modificados en la presencia de carbonatos con una adsorción creciente hasta pH 10.5 (48); sin embargo, estos hallazgos no han sido confirmados en otros estudios incluyendo suelos calcáreos. Los resultados divergentes pueden ser parcialmente explicados por el uso de diferentes soluciones de electrolitos en términos de catión índice (Ca divalente vs. Na, K monovalente) y fuerza iónica (variando de 0.001 a 0.3 M), como se observó en una disminución constante de adsorción de As (V) con el incremento del pH a fuerzas iónicas moderadas y muy bajas, pero se desarrolló una adsorción parabólica en la presencia de una solución de electrolito de 0.3 M (49). Estudios sobre la adsorción de As (III) en los suelos son generalmente escasos, con solo un artículo que ha desarrollado adsorción de As (III) como una función del pH (50), sugiriendo que la adsorción de As (III) puede incrementarse marcadamente a pH > 5.

El calcio y el arsénico

El calcio presente en una solución de electrolito o solución suelo puede incrementar la adsorción de arseniato en los suelos lo cual ha sido atribuido al incremento de cargas positivas cerca de superficies cargadas negativamente (51). Este efecto fue más pronunciado en la adsorción de As (V) comparado a As (III) y varió con la disponibilidad de sitios de adsorción en el suelo, es decir, el efecto fue mayor donde la capacidad de adsorción fue pequeña o los sitios de adsorción estuvieron ocupados. Además, el efecto del calcio se espera sea más importante donde las fuerzas de Coulomb estén significativamente involucradas en los enlaces de As a la superficie y en suelos variablemente cargados.

– Contaminación antrópica

Desde la antigüedad existieron numerosas fuentes y tipos de contaminación de suelos, dependiendo principalmente de la actividad humana, una de tantas se menciona a las actividades industriales, mineras, urbanas, etc., generadoras de elementos potencialmente tóxicos tales como plomo, níquel, mercurio, cadmio, cobre, zinc, arsénico, etc. (52).

La actividad agrícola también adiciona biocinas, muchos de ellos con algunos compuestos altamente tóxicos para la biota.

Se menciona algunas fuentes de contaminación antropogénica (52):

- a. Eliminación de residuos: almacenamiento inadecuado de residuos incontrolados de origen industrial.
- b. Actividades industriales y comerciales (minería, petróleo y centrales eléctricas): estos derrames pueden ser llevados a situaciones de problemas de transporte como derrames a suelo o fuentes de agua.
- c. Militares y sitios afectados por zonas de guerra: derrames de compuestos volátiles a suelo u otras sustancias peligrosas.
- d. Almacenamientos de petróleo, de metales y productos químicos: surgen explosiones por el inadecuado manejo de sustancias peligrosas.
- e. Actividades nucleares: con vertido o liberación de materiales radiactivos que resultan otras sustancias emitidas a la atmosfera.

– Contaminación natural

En la naturaleza el arsénico presenta compuestos orgánicos volátiles y no volátiles, no puede ser destruido solo intercambiado de forma. El transporte del arsénico se da a través de erosión eólica y por procesos de lixiviación (53).

En el ambiente acuático existen diferentes procesos como oxidación – reducción, intercambio de ligandos, precipitación y biotransformación que dependen del pH, concentración de sulfuros, metales, presencia de agentes quelantes, temperatura, salinidad composición de biota y materia orgánica en general en películas biológicas (53).

2.2.3 *Avena sativa*

Definición

La avena es un cereal perteneciente a la familia de las gramíneas, presenta grasas, proteínas, hidratos de carbono, vitaminas del grupo B1 o tiamina, así dentro de su composición también se encuentran minerales como fósforo, potasio, magnesio, calcio y hierro. A continuación se describe su composición por 100 gramos (54):

Tabla 2. Valor nutritivo de la Avena sativa por 100 g

VALOR NUTRITIVO DE LOS GRANOS DE <i>Avena sativa</i> (por 100 gramos)	
AVENA FORRAJERA	
Calorías (g)	378
Proteínas (g)	14.4
Carbohidratos (g)	66.1
Grasas (g)	6.9
Fibra (g)	6.6
Calcio (mg)	5.2
Hierro (mg)	5.5
Fósforo (mg)	414
Tiamina (mg)	0.61

Fuente: INCAP Valor Nutritivo de Granos y Raíces. Guatemala

Clasificación taxonómica de la *Avena sativa* (55)

- **Reino:** *Plantae*
- **División:** *Magnoliophyta*
- **Clase:** *Liliopsida*
- **Familia:** *Poales*
- **Género:** *Avena*
- **Especie:** *Avena sativa*

Características botánicas de la *Avena sativa* (55):

- **Raíz:** la avena es una planta que presenta raíces reticulares, copiosas muy abundantes con diferencia de los cereales.
- **Tallo:** presenta un tallo recto y firme con poca resistencia al acame o tumbada, su longitud varía desde 50 cm hasta 150 cm de longitud.
- **Hojas:** hojas inferiores planas y lanceoladas (forma de punta de lanza) de hasta 8 mm, limbo de 5-35 cm x 1-10 mm, de color verde brillante y en su mejor estado verde oscura, de hojas anchas ligeramente áspera.
- **Inflorescencia:** de 5-30 cm, con 10 a 200 espiguillas.
- **Flores:** formas panojas (conjunto de espigas o racimos que nacen de un mismo tallo)
- **Semilla:** en número de dos, se producen en forma escalonada y van cayendo a medida que van madurando.
- **Reproducción:** son autofecundables y se reproducen por semillas.

A continuación en la Tabla 2 se tiene la cantidad producida de Avena forrajera, se identifica el departamento de Junín y se detalla el último trimestre del año 2017 (octubre, noviembre y diciembre), respecto a la producción (tn) se observa para octubre-diciembre 570 tn y para noviembre 482 tn, respecto al rendimiento se tiene 16 tn/ha para octubre y 18 tn/ha para noviembre y diciembre (56).

Tabla 3. Avena forrajera, superficie cosechada, producción, rendimiento y precio al productor

C.62 PERÚ: AVENA FORRAJERA POR REGIÓN SEGÚN VARIABLES PRODUCTIVAS,
OCTUBRE-DICIEMBRE 2017

Región	Superficie cosechada (ha)			Producción (t)			Rendimiento (t/ha)			Precio al productor (S/ / t)		
	Oct	Nov	Dic	Oct	Nov	Dic	Oct	Nov	Dic	Oct	Nov	Dic
NACIONAL	138	84	112	1 944	1 514	2 209	14	18	20	270	260	236
Apurímac	0	0	9	0	0	100	-	-	12	-	-	300
Arequipa	14	14	12	251	254	221	18	18	18	130	130	130
Cajamarca	2	0	0	21	0	0	11	-	-	200	-	-
Cusco	0	14	31	0	380	930	-	27	30	-	279	200
Huancavelica	12	0	0	138	0	0	12	-	-	200	-	-
Junín	35	27	32	570	482	570	16	18	18	300	281	282
La Libertad	75	29	29	965	399	388	13	14	14	300	300	300

Fuente: Sistema Integrado de Estadística Agraria. (SIEA). Ministerio de Agricultura y Riego – MINTRA

2.2.3.1. El cultivo de la *Avena sativa*

El cultivo de avena (*Avena sativa*) tiene un ciclo análogo al trigo y cebada, pero más sensible al frío que las dos especies mencionadas y consume más agua por unidad de materia seca. En relación al suelo, es más tolerante a la acidez que otros cultivos. Por otra parte, su sistema radicular es más profundo, siempre que el suelo permita desarrollar esta capacidad. La capacidad de ahijado de la avena es relativamente baja, por lo que es necesario conseguir una buena densidad inicial de plantas, del orden de 200 a 250 por m², utilizando adecuada cantidad de semilla. En general, las bajas producciones que generalmente se obtienen de este cereal se deben a que se considera como un cultivo rústico que se destina a las peores tierras y no se les aporta los elementos necesarios para obtener una producción equivalente a los demás cereales (57).

La avena está bien adaptada a climas fríos y templados en el mundo. En el Perú, se cultiva desde los 1 500 hasta los 4 000 metros de altitud. En los niveles medios a altos de la sierra, se cultiva si hay disponibilidad de riego, desde setiembre y, si es época de la lluvia, desde diciembre. En cambio, en los niveles bajos, generalmente con riego, su siembra se hace preferentemente en los meses de abril hacia adelante, para coincidir con los meses de invierno. La avena produce bien en suelos bien drenados y razonablemente fértiles. Suelos pobremente drenados causan que las plantas de avena se tumben y se infecten por enfermedades como la “roya” y el “mildiu”. En suelos arenosos, donde la retención del agua

es escasa hay que regar frecuentemente. Por ello es muy importante en estos casos aplicar “estiércol” continuamente para mejorar la estructura y capacidad retentiva del suelo (58).

El rendimiento de la avena

El rendimiento de los cultivos se determina por el crecimiento de la planta y la distribución de la biomasa a partes comercializables de las plantas. Tanto el crecimiento como la distribución de biomasa son afectados por los estados de desarrollo del cultivo. El crecimiento se refiere a la acumulación de biomasa y puede ser medido por el área foliar, peso de tallo, peso de raíz y peso total, o altura de planta, y estos pueden ser usados para comparar promedios entre o dentro de cultivares. El término *crecimiento* también se aplica a cambios cuantitativos que ocurren durante el desarrollo y pueden ser definidos como un cambio irreversible en el tamaño de las células, órganos u organismos completos. En agricultura, donde el propósito de la mayoría de empresas es convertir energía solar en materia seca, una definición igualmente útil de crecimiento es el incremento en peso seco. El crecimiento es afectado por factores ambientales tales como clima, suelo, y las plantas en sí (10).

2.2.3.2. La avena y los metales pesados

Los ecosistemas terrestres en el planeta, son sistemas autorregulables, dinámicos, multivariados simultáneamente expuestos a cambios, algunas veces no visibles siendo los estresores acumulativos en su sistema, en su gran mayoría acumulativos, algunas veces perceptibles e imperceptibles a las mediciones y cuantificaciones.

Un Bioindicador es propio y característico de un medio ambiente, cuando es medible cuantifica la magnitud del estrés, las características del hábitat y el grado de exposición del estresor concluyendo con el grado de respuesta ecológica a la exposición.

A continuación se describe algunas plantas que son bioacumuladoras de metales pesados (59).

– *Cistus ladanifer* y *Cytisus scoparius*: especies *pseudometalofitas* que acumulan Zn.

- *Salix viminalis*, acumula altas concentraciones de Cd y Zn.
- *Paspalum conjugatum*: Ag, Cd, Cr, Se, Hg
- *Thelypteris* sp: Ag Cr
- *Cyperus luzulae*: Cd, Cr, Al
- *Zetaria liebmanni* Ag, Cd, Cr
- *Tripogon dreserianus* Ag, Ba
- *Steinchisma laxum*: Se, Si
- *Eleusine indica*: Ag, Cd, Cr
- *Mimosa pudica*: Cd, Cr
- *Oldenlandia* sp: Cr
- *Hyptis alata*: Cd, Co
- *Verbena* sp: Ag, Co, Hg
- *Scoparia dulcis* Cr
- *Solanum torvum*: Cr
- *Echinochloa colona*: Ag, Cd, Cr, Hg, Au
- *Cyperus odoratus*: Ag, Cd, Cr, C, Zn, Al, Au
- *Hedychium coronarium*: Cr, Au
- *Digitaria sanguinalis*: Ag, Cd, Cr, Cu, Se, Zn, Au
- *Chloris radiata*: Cr, Al, Au
- Entre otros más

En estudios realizados en México con altas concentraciones de haba y avena 0, 50, 100, 150 de plomo (Pb) respectivamente, se supo que los efectos tóxicos se centraban en el retardo del crecimiento de la raíz en diferencia con el control, respecto a este metal la planta más tolerante fue el haba y la más sensible fue la cebada. Respecto a la bioacumulación se menciona al trigo, arroz, avena, cebada, maíz y sorgo como plantas bioacumuladoras por su capacidad sensible hacia los metales y en especial al plomo.

Respecto al alojamiento de los metales pesados en los órganos de la planta se ha comprobado que existe una gran afinidad en la parte radicular de ella y menor disponibilidad en la parte aérea, siendo su proporción de 3 a 50 veces más, funcionando como una

alternativa de solución factible para la remediación en suelos impactados con metales pesados (60).

2.2.4 Marco legal

2.2.4.1 Marco legal Internacional

Actualmente, ya no es una novedad conocer que los problemas ambientales son cada vez más preocupantes que años atrás, la sobrepoblación, la tala indiscriminada y el uso indiscriminado de recursos no renovables son algunos ejemplos mencionados que han hecho que líderes de grandes potencias mundiales giren su perspectiva hacia políticas de conservación especiales a tratar estos temas, a continuación un breve resumen (61).

- La **Conferencia de Naciones Unidas sobre el Medio Humano** (CNUMH), realizada en Suecia, del 5 al 16 de junio, en Estocolmo en 1972; llevó a la creación del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), resaltando por primera vez, los principios que abogan por el derecho al desarrollo sostenible o sustentable y a la protección del medio ambiente; la declaración tiene 106 Recomendaciones y 24 Principios a seguir, para la conservación y protección del Medio Ambiente.
- **Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible Río +20**, realizada en Río de Janeiro del 20 al 22 de junio de 2012. El futuro que queremos, aborda las vías hacia un futuro sostenible, un futuro con más empleos, más energía limpia, una mayor seguridad y un nivel de vida digno para todos.
- **Cumbre de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible**, realizada en Nueva York, del 25 al 27 de septiembre de 2015. Transformar nuestro mundo: en la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, se estableció 17 objetivos, se hace hincapié al objetivo 15: proteger, restablecer y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres; efectuar una ordenación sostenible de los bosques; luchar contra la desertificación; detener y revertir la degradación de las tierras y poner freno a la pérdida de la diversidad biológica.

En el extranjero la legislación está dada desde hace muchos años, como es el caso de Estados Unidos, la EPA (Agencia de Protección Ambiental) (62) admite la aplicación de

lodos desde los años 1984, en su informe “Biosólidos, la aplicación al suelo de los biosólidos” informa sobre beneficios de la aplicación de los lodos residuales a los terrenos de cultivo y fija estándares que deben cumplir estos, como se muestra en el cuadro siguiente:

Tabla 4. Concentración Máxima de Metales. United States of America

Metal	Concentración límite (mg/kg)	Tasas acumulativas de carga contaminante (mg/kg)	Concentración del contaminante (mg/kg)
Arsénico	75	41	41
Cadmio	85	39	39
Cobre	4,300	1,500	1,500
Plomo	840	300	300
Mercurio	57	17	17
Molibdeno	75	SL	NL
Níquel	420	420	420
Selenio	100	100	100
Zinc	7,500	2,800	2,800
NL: no contiene límite establecido			

Fuente: US EPA 1993 - 1994

En Chile, existen leyes planteadas desde el 2010 para los lodos activados o biosólidos, pero desde el punto de vista del manejo de lodos generados en Plantas de Tratamiento de aguas servidas; estas leyes son abordadas desde el punto de vista sanitario de los lodos y las exigencias sanitarias mínimas para su manejo, constituyen también las restricciones, requisitos y condiciones técnicas para la aplicación en condiciones adecuadas de los suelos (63).

Tabla 5. Concentraciones Máximas de metales. Chile en suelo (63)

Metal	Concentración máxima en mg/kg suelo (en base materia seca)		
	Macrozona norte		Macrozona Sur
	Ph > 6,5	pH>= 6,5	Ph > 5
Arsénico	20	12,5	10
Cadmio	2	1,25	2
Cobre	150	100	75
Mercurio	1,5	1	1
Níquel	112	50	30
Plomo	75	50	50
Selenio	4	3	4
Zinc	175	120	175

Fuente: ECA Chile, 2012

2.2.4.2 Marco legal nacional

El Marco Legal Nacional está dado desde su inicio por la Constitución Política del Perú, El Consejo de Ministros (PCM), el Ministerio del Ambiente y su ente fiscalizador Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA).

2.2.4.3 Constitución Política del Perú

La Constitución Política del Perú está formulada desde 1993 en el artículo 2, inciso 22, señala que: *“Toda persona tiene derecho a la paz, a la tranquilidad, al disfrute del tiempo libre y al descanso, así como a gozar de un ambiente equilibrado y adecuado al desarrollo de su vida”*.

En el Marco Nacional, la política nacional, es establecida en el artículo 67° que menciona: “El Estado determina la política nacional del ambiente. Promueve el uso sostenible de sus recursos naturales” (64).

2.2.4.4 Ministerio del Ambiente y OEFA

El Ministerio del Ambiente fue creado por el Poder Ejecutivo, mediante Decreto Legislativo N° 1013 y tiene como objetivo *“La conservación del ambiente, de modo tal que se propicie y asegure el uso sostenible, responsable, racional y ético de los recursos*

naturales y del medio que los sustenta, que permita contribuir al desarrollo integral social, económico y cultural de la persona humana, en permanente armonía con su entorno, y así asegurar a las presentes y futuras generaciones el derecho a gozar de un ambiente equilibrado y adecuado para el desarrollo de la vida”, así el Ministerio del Ambiente cumple la función general de diseñar, establecer, ejecutar y supervisar la Política Nacional y sectorial ambiental como persona jurídica de derecho público (65).

El OEFA se creó en el año 2018, es un organismo público técnico especializado, adscrito al Ministerio del Ambiente, que tiene como función principal la fiscalización ambiental y asegurar el adecuado equilibrio entre la inversión en actividades económicas y la protección ambiental. Funciona también como ente rector del Sistema Nacional de Evaluación y Fiscalización Ambiental (Sinefa) (66).

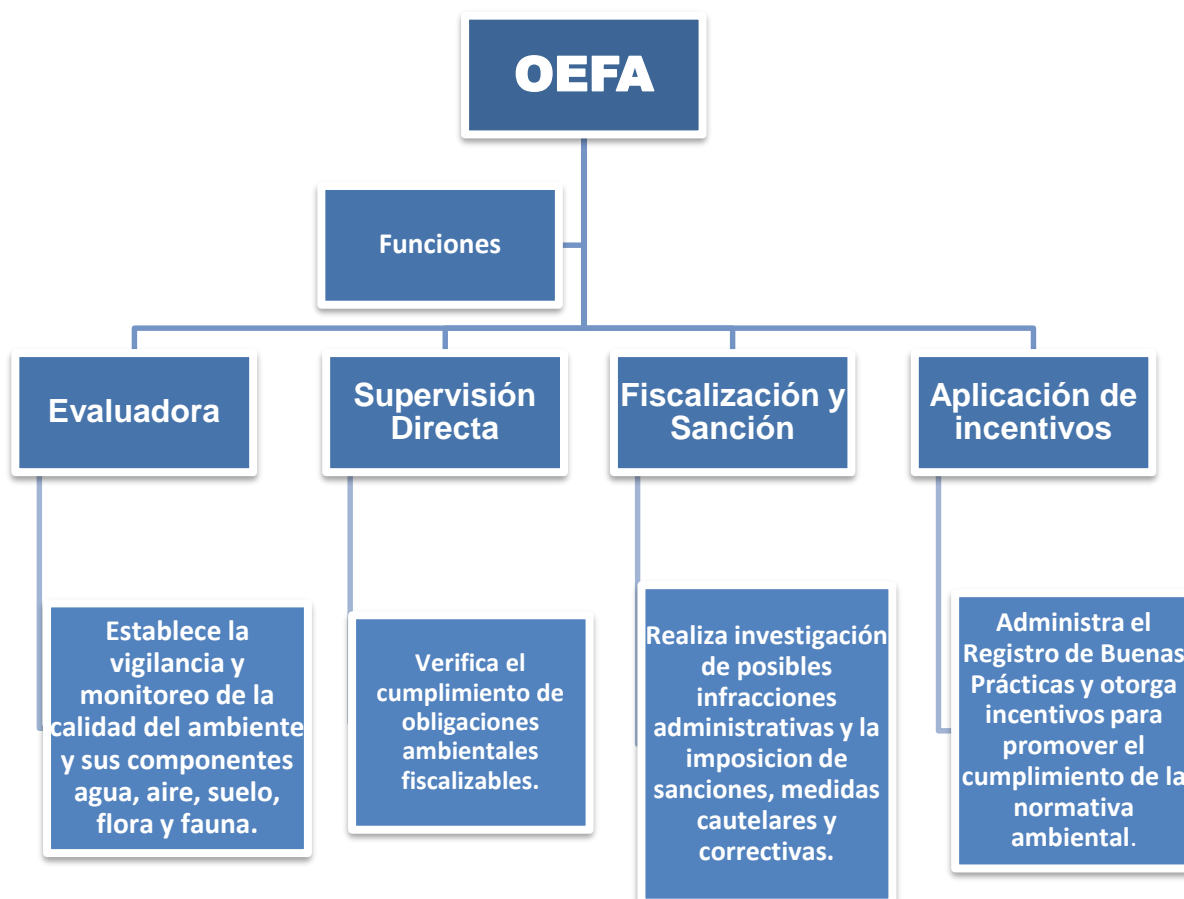


Figura 1. Organigrama de la OEFA
Fuente: www.oefa.gob.pe

2.2.4.5 Normatividad lodos activados - Resolución Ministerial N° 024-2017-VIVIENDA

Hasta inicios del año 2017, el Perú no contaba con un adecuado manejo y reaprovechamiento de los lodos activados generados en las distintas plantas de tratamiento funcionales del país, los lodos activados no contaban con clasificación ni unidades de control aplicables al suelo, estos subproductos de las PTAR eran desperdiciados en su totalidad, produciendo pérdidas y malestar entre las poblaciones aledañas.

Las normas ligadas al aprovechamiento y disposición de los lodos activados fueron estableciéndose a inicios del 2017, (25 de enero) como un previo anticipo de consulta dado por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS), con nombre Resolución Ministerial N°024-2017-VIVIENDA aun en proyecto donde establece entre otras medidas la clasificación y los parámetros para la producción y el control de la aplicación de los lodo activados previamente estabilizados de las plantas de tratamiento de aguas residuales domesticas o municipales con la finalidad de proceder con su reaprovechamiento, también la norma establece responsabilidades entre las empresas o personas involucradas en la generación y producción de los lodos activados generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales (67), (68).

Un aporte importante de esta norma es considerar la clasificación de los lodos activados en Clase A y Clase B, esto se basa en parámetros establecidos por las tecnologías de Higienización de lodos activados utilizadas por las plantas generadoras de lodos residuales y municipales.

Esta norma, salió en vigencia el 22 de junio de 2017, publicado en el diario El Peruano.

Luego, con fecha 6 de abril de 2017, aprueban las Condiciones Mínimas de Manejo de lodos y las Instalaciones para su Disposición Final (67), esta norma complementa lo dispuesto, en la recolección, manejo, instalaciones de disposición, y condiciones mínimas de lodos estabilizados para su reaprovechamiento.

Las normativas del uso de los lodos activados han sido establecidas desde muchos años por diversos países como México, Chile, Brasil y otros más, que han dado una solución adecuada al uso final de estos subproductos de las plantas de tratamiento de aguas residuales y municipales, el Perú aún no cuenta con ECA para los lodos activados, pero con las normas establecidas se puede fijar un gran avance en el uso de ellos.

2.3. Definición de términos básicos

2.3.1 Lodos activados

Lodos que han sido aireados y sujetos a acción bacterial (69).

2.3.2 Coliformes totales

Incluye una amplia variedad de bacilos aerobios y anaerobios facultativos, gramnegativos y no esporulantes capaces de proliferar en presencia de concentraciones relativamente altas de sales biliares fermentando la lactosa y produciendo ácido o aldehído en 24 horas a 35 – 37 °C. (70)

2.3.3 *Escherichia coli*

Es una bacteria que se encuentra normalmente en el intestino del ser humano y de los animales de sangre caliente (71). Bacterias que forman parte del total del grupo *Coliformes*, bacilos gramnegativos, no esporulados que fermentan la lactosa con producción de ácido y gas a 44,5 °C +- 0,2 °C dentro de las 24 horas +- 2 horas (72).

2.3.4 *Salmonella sp*

Es un género de bacilos gramnegativos que pertenece a la familia *Enterobacteriaceae*. Identificado con más de 2500 serotipos o serovares diferentes en dos especies, a saber, *Salmonella bongori* y *Salmonella enterica*. *Salmonella* es una bacteria omnipresente y resistente que puede sobrevivir durante varias semanas en un ambiente seco y varios meses en agua (73).

2.3.5 Contaminación

Es definida como un cambio indeseable en las características físicas, químicas y biológicas del aire, agua y suelo que afecta la vida humana, la vida de los otros organismos relacionados, útiles para la vida de plantas y animales, el progreso industrial, condiciones de vida y aspectos culturales (74).

2.3.6 Contaminante

Un contaminante es algo que interfiere adversamente a la salud, el confort, amenidades, características o ambiente de las personas. Generalmente, muchos contaminantes son introducidos al ambiente como aguas residuales, residuos, descargas accidentales o son subproductos o residuos de la producción de algo útil. También son introducidos al ambiente como compuestos usados para proteger plantas y animales (75).

2.3.7 Materia orgánica del suelo

La materia orgánica del suelo queda definida como la fracción orgánica del suelo que incluye plantas, animales y residuos microbiales en diferentes estados de descomposición, biomasa de microorganismos del suelo, y sustancias producidas por las raíces de las plantas y otros organismos del suelo. Es comúnmente determinada como carbono orgánico total en una muestra de suelo pasada a través de un tamiz de 2 mm (69).

2.3.8 Densidad de volumen del suelo

La densidad de volumen de un suelo que es definida como la masa de suelo seco por unidad de volumen, incluyendo el espacio poroso. El volumen de suelo es determinado secando el suelo hasta un peso constante a 105 °C (69).

2.3.9 Arsénico

El arsénico (As) es un elemento ubicuo conocido por su toxicidad a la biota, se presenta naturalmente en varios estados de oxidación entre -III y +V. La concentración total de

arsénico en la fase sólida del suelo varía entre 0.1 y 55 mg/kg en suelos no contaminados, pero puede ser muy alto, como varios cientos de mg/kg en suelos contaminados por minería, fundiciones y otras actividades industriales (47).

2.3.10 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica se define como la capacidad de una sustancia para conducir o transmitir corriente eléctrica. En suelos o aguas, se mide en siemens/metro (o frecuentemente dS/m), y está relacionado a solutos disueltos (69).

2.3.11 pH del suelo

El pH del suelo viene a ser el logaritmo negativo de la actividad (concentración) de iones hidrógeno de un suelo. El grado de acidez (o alcalinidad) de un suelo es determinado por medio de un electrodo de vidrio o un indicador a un contenido de humedad especificado o relación suelo: agua, y expresado en términos de escala de pH (69).

2.3.12 Suelos

Los suelos son frecuentemente definidos en términos de los factores de formación como un cuerpo dinámico teniendo propiedades derivadas de los efectos combinados del clima y actividades bióticas, modificado por la topografía, actuando sobre los materiales parentales sobre periodos de tiempo (9).

2.3.13 Contaminación del suelo

La contaminación del suelo es usualmente una consecuencia de diferentes prácticas agrícolas inadecuadas y métodos incorrectos de disposición de residuos sólidos y líquidos, pero también puede resultar de la contaminación atmosférica a través de la lluvia (75).

2.3.14 Caracterización de sitios contaminados

Determinación cualitativa y cuantitativa de los contaminantes químicos o biológicos presentes, provenientes de materiales o residuos peligrosos, para estimar la magnitud y tipo de riesgos que conlleva dicha contaminación (75).

2.3.15 Suelo agrícola

Suelo dedicado a la producción de cultivos, forrajes y pastos cultivados. Es también aquel suelo con aptitud para el crecimiento de los cultivos y el desarrollo de la ganadería. Esto incluye tierras clasificadas como agrícolas, que mantienen un hábitat para especies permanentes y transitorias, además de flora y fauna nativa, como es el caso de las áreas naturales protegidas (75).

2.3.16 Absorción

Es la operación unitaria que consiste en la separación de uno o más componentes de una mezcla gaseosa con la ayuda de un solvente líquido, el cual forma solución (un soluto, o varios solutos, se absorben de la fase gaseosa y pasan a la líquida) (76).

2.3.17 Adsorción

La adsorción, se define como la acumulación de material (llamado adsorbato) en una superficie (sólida o líquida). La adsorción física donde la especie adsorbida conserva su naturaleza química y la química la especie adsorbida sufre una transformación dando lugar a una especie nueva (76).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 Método y alcance de la investigación

3.1.1 Método de la investigación

3.1.1.1 Método general o teórico de la investigación

Se plantea el método general hipotético-deductivo, este método tiene como enfoque principal utilizar la investigación empírica y la investigación teórica, siendo llamado como empírico lo real, acumulativo y elaborativo; mientras que, la segunda plantea un concepto de construcción de hipótesis y teorías a partir del material objeto acumulado (77).

Este método es ampliamente usado en la vida real como en la investigación científica. Consiste en generar hipótesis acerca de las posibles soluciones del planteamiento del problema y en su respectiva comprobación de estos a partir de los datos, si estos coinciden con ellos. La generación de las hipótesis plantea dos escenarios, cuando la investigación está más próxima al nivel observacional, que se podría decir, el nivel más simple, se formulan hipótesis, del tipo empírico llevado a la experiencia y; el segundo escenario, cuando el sistema es más teórico se generan hipótesis del tipo abstracto (78).

Esta investigación presenta ambos escenarios, teniendo como premisa que una investigación no siempre es encasillada con un modelo único, sino debe buscar el mejor escenario para su nivel explicativo que pretenda conducirse. En ese ámbito la investigación parte desde un modelo observacional de la problemática de la generación de lodos que pueden ser aptos o no para su uso, planteados desde la agricultura (método observacional) para luego generar conclusiones profundas, teóricas a través de un procedimiento experimental generando posibles hipótesis (método teórico).

Esto no representa que la línea investigativa termine en este sentido, ya que este método tiene como naturaleza, llevar nuevamente a un razonamiento observacional planteando nuevas hipótesis, convirtiéndose así en una siguiente línea de investigación futura, abierta a nuevas hipótesis.

3.1.1.2 Método específico de la investigación

Se utilizó el método de análisis: las muestras de suelo del distrito de Orcotuna fueron analizadas en sus propiedades físico-químicas: densidad aparente, pH, conductividad eléctrica, contenido de nutrientes y materia orgánica. Las técnicas utilizadas son estándar para cada tipo de determinación. Una vez reportados los análisis se interpretaron los datos para determinar sus niveles, según el tipo de análisis.

I. Plan de muestreo

El siguiente plan de muestreo de suelo se llevó a cabo a fecha 13/7/2016 a horas 11:30 am, en el distrito de Orcotuna, provincia de Concepción, tomadas del trabajo de investigación El Mantaro Revive (6).

Tuvo como objetivo extraer una muestra representativa para el cultivo de *Avena sativa* en maceteros proporcionales, con capacidad de 3 kg cada uno aproximadamente.

1: Punto de muestreo de suelo del distrito de Orcotuna. Provincia de Concepción. Región Junín.



Figura 2. Terreno muestreado, Orcotuna 2016
Fuente: elaboración propia

El terreno que se muestreó es un terreno agrícola, usado en cultivos de (79):

- Zanahorias (*Daucus carota*)
- Ajo (*Allium sativum*)
- Alfalfa (*Medicago sativa*)
- Arveja grano seco y verde (*Pisum sativum*)
- Avena (*Avena sativa*)
- Cebada (*Hordeum vulgare*)
- Haba grano seco y verde (*Vicia faba*)
- Linaza (*Linum usitatissimum*)
- Maíz amiláceo y cloclo (*Zea mays*)
- Olluco (*Ullucus tuberosus*)
- Papa (*Solanum tuberosum*)
- Quinoa (*Chenopodium quinoa*)
- Rye grass (*Lolium*)
- Trigo (*Triticum*), etc

Se procedió a la extracción de muestras en el mes de julio, época en que el terreno se encontraba en etapa no extractiva y donde se podía obtener muestras significativas libres de subproductos propios de los sembríos (80).

A) Tipo de muestreo

El tipo de muestreo se identificó según la Guía para muestreo de suelo del Ministerio del Ambiente. En el marco del Decreto Supremo N° 002-2017-MINAM, Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelo, fue el Muestreo de Identificación (81).

El Muestreo de Identificación es uno de los 4 tipos de muestreo dado por el Ministerio del Ambiente, este muestreo se caracteriza por tener como objetivo investigar la existencia de contaminación del suelo para luego comparar con los estándares de Calidad Ambiental, y llegar a la conclusión del trabajo de investigación, se inició con el análisis del arsénico y caracterización de suelo.

Este tipo de muestreo presenta las siguientes consideraciones:

- El área de estudio corresponde a 0.5 ha aproximadamente.
- El tipo de contaminante que se desea conocer es el arsénico.
- Previamente se visitó el terreno y pidió permiso a los propietarios de extraer una pequeña muestra de suelo, a lo que ellos accedieron.

Según la recomendación de la Guía para el muestreo de suelo se determinó el patrón de muestreo siguiente:

Tabla 6. Recomendaciones acerca de la aplicabilidad de los patrones de muestreo

PATRÓN DE MUESTREO	EN IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN	EN REMEDIACIÓN
CON DISTRIBUCIÓN UNIFORME		
Rejillas regulares.	Recomendado ampliamente.	Recomendado ampliamente.
Rejillas triangulares.	Recomendado ampliamente.	Recomendado ampliamente.
Rejillas circulares.	Recomendado en sitios donde hayan ocurrido fugas o derrames puntuales.	Recomendado en sitios donde se aplique una remediación <i>in situ</i> en contaminaciones puntuales.
Sobre una línea.	Recomendado en sitios donde hayan ocurrido fugas a lo largo de ductos.	Recomendado en sitios donde se aplique una remediación <i>in situ</i> a lo largo de ductos.
Diagonales múltiples.	Recomendado sólo si se asegura equidistancia entre los puntos.	Recomendado sólo si se asegura homogeneidad en el suelo y equidistancia entre los puntos.
CON DISTRIBUCIÓN HOMOGÉNEA		
Diagonal cruzadas rotantes.	No recomendado.	Recomendado sólo en aquellos sitios donde la contaminación es uniforme y se va a dar seguimiento a una atenuación natural.

Fuente: Guía para el muestreo de suelos

En la Tabla 6 se asignó la distribución uniforme empleada para los casos en que no se tiene previo conocimiento de la distribución del contaminante, en el patrón del muestreo Rejillas regulares.

B) Técnica de muestreo

En la técnica de muestreo se determinó, mediante análisis, el método aleatorio denominado: Patrones de muestreo para definir la localización de puntos de muestreo en suelos contaminados. Guía para el muestreo de suelos MINAN (81), que se encuentra en el Anexo 2. Esta técnica toma puntos de muestreos completamente al azar, este patrón es muy irregular, los puntos tomados no siguen ninguna lógica, pero se procuró tomar puntos convenientes para el estudio, en el trabajo de investigación se tomaron 13 puntos equidistantes siguiendo estas características de muestreo.

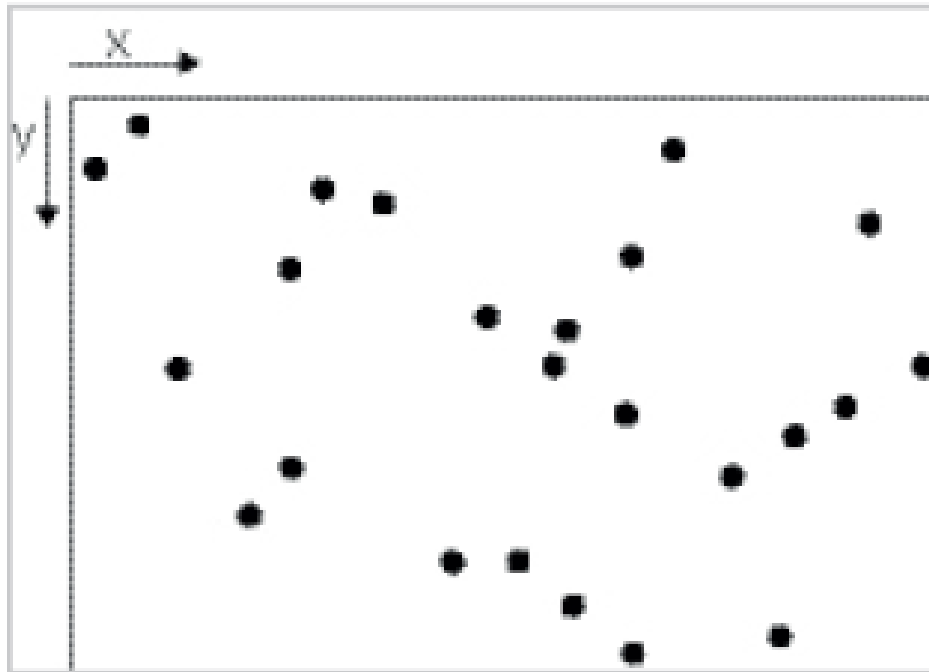


Figura 3. Patrones de muestreo

Fuente: Ministerio del Ambiente-MINAM. Guía para muestreo de suelo. Decreto Supremo N° 002-2013-MINAM, Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelo

Respecto a la cantidad de muestras a extraer, la Guía para el muestreo de suelos recomienda en el siguiente cuadro:

Tabla 7. Número mínimo de puntos de muestreo para el Muestreo de Identificación

ÁREA DE POTENCIAL INTERÉS (HA)	PUNTOS DE MUESTREO EN TOTAL
0,1	4
0,5	6
1	9
2	15
3	19
4	21
5	23
10	30
15	33
20	36
25	38
30	40
40	42
50	44
100	50

Fuente: Ministerio del Ambiente-MINAM. Guía para muestreo de suelo. Decreto Supremo N° 002-2013-MINAM, Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelo

El terreno en estudio presenta 5000 m^2 siendo así 0.5 *ha* de acuerdo a la clasificación, se tomó 13 puntos en el muestreo porque como investigador se calculó mediante la observación tomar más cantidades de muestras para una mejor metodología y precisión en los resultados.

Tabla 8. Georreferenciación de muestras simples de suelo

Núm. Punto	Zona	Este	Norte	m s.n.m.
1	18 L	467530	8678124	3 255
2	18 L	466732	8678133	3 246
3	18 L	467525	8678141	3 250
4	18 L	467535	8678143	3 249
5	18 L	467532	8678155	3 249
6	18 L	467512	8678130	3 247
7	18 L	467501	8678119	3 253
8	18 L	467509	8678112	3 248
9	18 L	467530	8678099	3 250
10	18 L	467540	8678094	3 250
11	18 L	467544	8678110	3 251
12	18 L	467542	8678117	3 253
13	18 L	467507	8678125	3 254

Fuente: elaboración propia

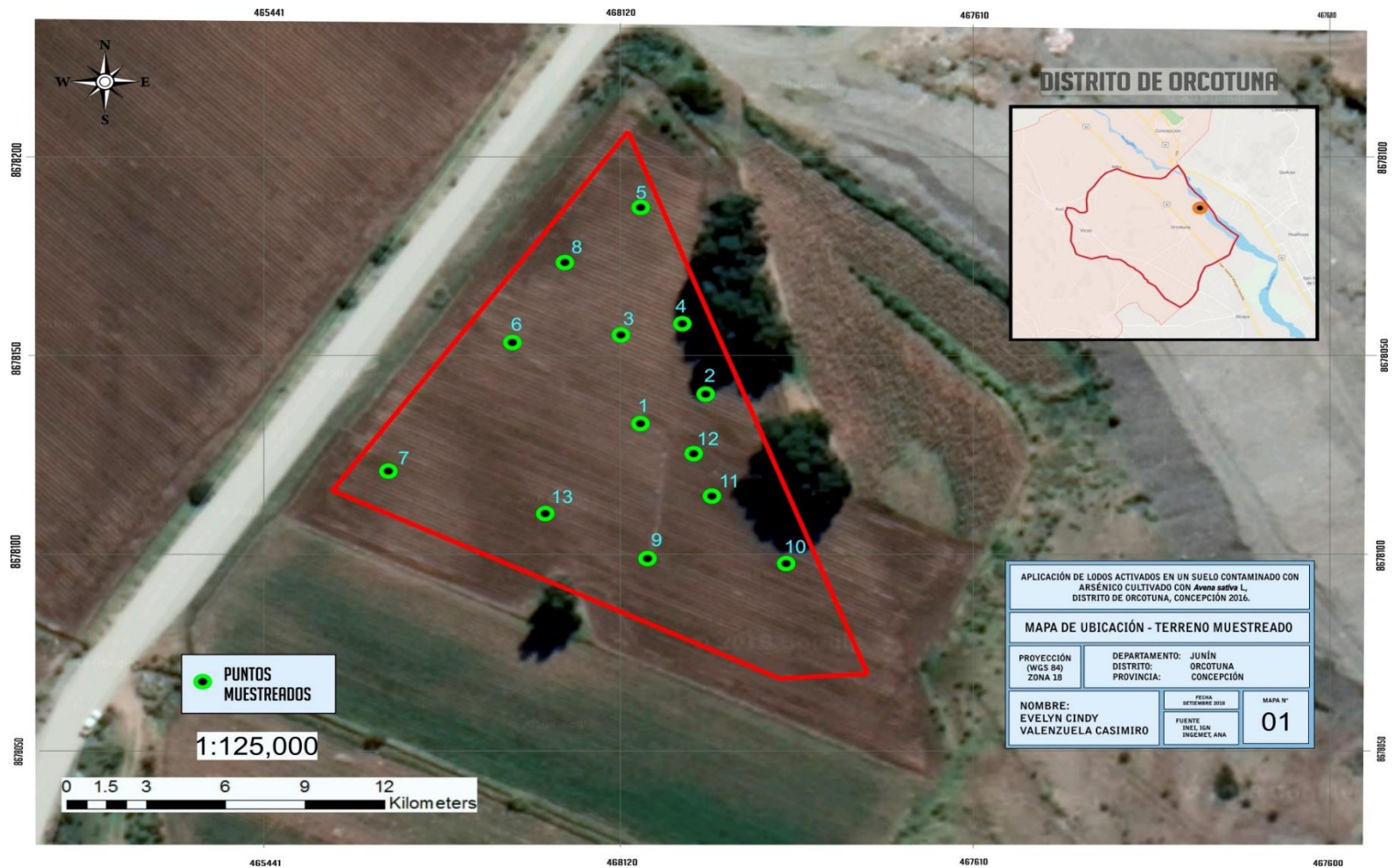


Figura 4. Terreno muestreado, Orcotuna. Provincia de Concepción. Región Junín
Fuente: elaboración propia

En la Figura 4 se determina la profundidad del muestreo que se consideró en el trabajo de investigación:

Para el suelo agrícola se trabaja en una profundidad de 0-30 cm y de 30-60 cm, en la investigación se trabajó en un aproximado de 20 cm de profundidad (81).

Tabla 9. Profundidad del muestreo según el uso del suelo

USOS DEL SUELO	PROFUNDIDAD DEL MUESTREO (CAPAS)
Suelo Agrícola.	0 – 30 cm (1) 30 – 60 cm
Suelo Residencial/Parques	0 – 10 cm (2) 10 – 30 cm (3)
Suelo Comercial/Industrial/Extractivo	0 – 10 cm (2)

Fuente: Ministerio del Ambiente-MINAN. Guía para muestreo de suelo. Decreto Supremo N° 002-2013-MINAM, Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelo.

C) Manejo de muestras

In situ se obtuvo 60 kg de suelo de la parcela de estudio, previamente se limpió superficialmente el suelo eliminando cualquier producto no deseado. Luego se trasladó al lugar de trabajo (casa propia) en bolsa de rafia de polipropileno, se procedió a degradarla y tamizarla usando el cernidor Usa Estándar Test Sieve 10 de 2 mm de rejilla, obteniendo un compuesto uniforme, luego se separó una muestra representativa de aproximadamente medio kilogramo que se colocó en una bolsa de polietileno, según se detalla en la Tabla 9:

Tabla 10. Recipientes, temperatura de preservación y tiempo de conservación de las muestras ambientales

PARÁMETRO	TIPO DE RECIPIENTE	TEMPERATURA DE PRESERVACIÓN	TIEMPO MÁXIMO DE CONSERVACIÓN
Compuestos Orgánicos Volátiles COV's.	Frasco de vidrio boca ancha, con tapa y sello de teflón.	4º C.	14 días.
BTEX.			
Hidrocarburos Fracción Ligera			
Hidrocarburos Fracción Media			
Hidrocarburos Fracción Pesada			
Compuestos Orgánicos Semivolátiles COSV's y Plaguicidas.			
Metales Pesados y Metaloides.	Bolsas de polietileno densa.	Sin restricciones.	Sin restricciones.
Mercurio (Hg).	Frasco de vidrio con tapa de teflón que asegure la integridad de las muestras hasta su análisis.	4º C.	14 días.
PCB.	Viales de vidrio con cierre de Teflón.	4º C.	14 días.
PAH.	Viales de vidrio con cierre de Teflón.	4º C.	14 días.

Fuente: Ministerio del Ambiente-MINAM. Guía para muestreo de suelo. Decreto Supremo N° 002-2013-MINAM, Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelo.

En la tabla se puede observar que el parámetro de clasificación es metales pesados y metaloides, la muestra se etiquetó y guardó en un lugar seco y ventilado, fuera del sol hasta llevarla al Laboratorio de Química Agrícola del Instituto Rural Valle Grande, Cañete.

D) Medidas de seguridad ocupacional durante el muestreo

Al momento de la manipulación del suelo, se usaron los siguientes materiales de laboratorio:

- Guantes de látex
- Mandil de laboratorio
- Tapabocas
- Gorro

El objetivo fue eliminar la inhalación de las partículas sedimentadas (polvo) al momento de la trituración, no requirió mayor manejo de materiales de los mencionados para el preparado de la muestra y la siembra de la *Avena sativa*.

E) Técnicas de recolección de datos

La muestra de suelo fue analizada en el Laboratorio de Química Agrícola del Instituto Rural Valle Grande, Cañete.

Asimismo, se analizó en laboratorio una muestra del lodo activado, que va a ser agregado al suelo, en diferentes dosis.

Tabla 11. Métodos de análisis de suelo

Parámetro	Método	Unidad de expresión
pH	Potenciómetro	Unidad pH
Carbono orgánico	Walkley-Black	g.kg ⁻¹
P disponible	Olsen modificado	mg/kg
K disponible	Espectrofometría	mg/kg
Conductividad eléctrica	Conductómetro	dS/m

Fuente: Laboratorio de Química Agrícola, Instituto Rural Valle Grande, Cañete, Lima

Tabla 12. Métodos de análisis de arsénico en suelo

Parámetro	Método	Unidad de expresión
Arsénico total	EPA 3050-B/EPA3051	mg.kg ⁻¹ MS**

*EPA = Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos)

**MS = Materia seca a 105° C

Fuente: D.S. 002-2013-MINAM, ECA para suelo, Perú. 2013

II. Conducción experimental

A) Obtención de los Biosólidos de la Planta de Tratamiento “Doris Mendoza” Concepción 4/7/2016

- Se dio el ingreso a la PTAR “Doris Mendoza Paredes” Concepción luego de solicitar autorización de ingreso al Ing. Donal Berríos Martínez, gerente EPS Mantaro, con el fin

de obtener 50 kg de lodo activado, de las pozas donde este subproducto estaba puesto a sol aproximadamente 3 semanas luego de su generación, así esta poza de lodo activado estaba estabilizada por secado térmico o solar, reduciéndose su humedad.

- Este lodo activado fue trasladado en un depósito de plástico y llevado al lugar de experimentación.
- La muestra estabilizada es de característica:
 - Grumosa
 - Dura al tacto
 - Color plomo claro
 - Olor ligero de abono orgánico
- La muestra fue guardada en un lugar libre del sol, a temperatura ambiente, hasta ser utilizada para su experimentación.
- Ubicación de PTAR “Doris Mendoza Paredes” Concepción:
 - Departamento: Junín
 - Distrito: Concepción
 - Provincia: Concepción
 - Latitud: 11°55’45.25”S
 - Longitud: 75°19’23.48”O
 - Altitud: 3257 m s.n.m.



Figura 5. PTAR Concepción “Doris Mendoza”
Fuente: elaboración propia

B) Muestreo de suelo Orcotuna – Concepción 13/7/2016

- Se muestreó la parcela de terreno con 0.5 ha según las características de estudio, se empleó el muestreo de suelo de identificación, clasificación de Ministerio del Ambiente. Guía para muestreo de suelo. En el marco del Decreto Supremo N° 002-2013-MINAM, Estándares de Calidad Ambiental (81).
- Se recolectó un total de 50 kg de suelo con un total de 13 puntos.
- Se tomaron los puntos registrándose en el GPS para su registro.
- Se trasladó al lugar de experimentación, guardándose en un lugar seco, sin exposición del sol a temperatura ambiente.
- Se utilizaron los siguientes implementos de seguridad:
 - Guantes de látex
 - Mandil de laboratorio
 - Tapabocas
 - Gorro

C) Preparación de la muestra 23/7/2016

Las muestras de suelo y de lodos activados fueron llevados al lugar de experimentación (propia casa).

- La muestra de suelo se descompactó en pequeños terrones hasta obtener una muestra más fina al tacto.
- Se tamizó el volumen total de la muestra de suelo de Orcotuna, utilizando un tamiz de 2 mm de diámetro promedio de malla.
- Se obtuvo suelo muy fino listo para ser pesado y dividido en las 15 macetas.

D) Unidades experimentales

Las unidades experimentales fueron 15 en total, como se describe a continuación:

Tabla 13. Aplicación de lodos activados al suelo en porcentajes

0 % lodo activado <i>Avena sativa</i>	2 kg de suelo + <i>Avena sativa</i>
5 % lodo activado <i>Avena sativa</i>	$2000gr \times \left(\frac{5}{100}\right) = 100 gr$ 1900 gr de suelo + 100 gr <i>Avena sativa</i>
10 % lodo activado <i>Avena sativa</i>	$2000gr \times \left(\frac{10}{100}\right) = 200 gr$ 1800 gr de suelo + 200 gr <i>Avena sativa</i>
15 % lodo activado <i>Avena sativa</i>	$2000gr \times \left(\frac{15}{100}\right) = 300 gr$ 1700 gr de suelo + 300 gr <i>Avena sativa</i>
20 % lodo activado <i>Avena sativa</i>	$2000gr \times \left(\frac{20}{100}\right) = 400 gr$ 1600 gr de suelo + 400 gr <i>Avena sativa</i>

Fuente: elaboración propia

En el cuadro anterior se presenta el porcentaje de tratamiento a las macetas de *Avena sativa*.

▪ **Descripción de los tratamientos**

Los porcentajes aplicados a cada tratamiento sigue la línea de aplicación de materia orgánica porque en este trabajo de investigación se pretende utilizar dicho subproducto para mejorar las propiedades físicas químicas del suelo y crecimiento de la *Avena sativa*.

Tabla 14. Resumen porcentual de aplicación de lodos activados

		TRATAMIENTOS Porcentaje de lodo activado (2 kg de suelo)				
REPETICIONES		Tratamiento 0 %	Tratamiento 5 %	Tratamiento 10 %	Tratamiento 15 %	Tratamiento 20 %
	I	0 gr	100 gr	200 gr	300 gr	400 gr
	II	0 gr	100 gr	200 gr	300 gr	400 gr
	II I	0 gr	100 gr	200 gr	300 gr	400 gr

Fuente: elaboración propia

El croquis experimental representa el diseño de tratamiento que siguió dicho trabajo de investigación, fue un Diseño Completamente al Azar (DCA), realizando tres repeticiones por cada tratamiento, esto con el objetivo de observar cualquier margen de error en cada tratamiento, anticipándose así cualquier error de experimentación.

– **Tratamiento 1 – Muestra 1I, 1II, 1III (1, 2, 3)**

En el primer tratamiento, el porcentaje de aplicación de lodo activado fue 0 %, siendo considerado como testigo, se pesó 2 *kg* de suelo de Orcotuna y se consideró en la **maceta 1**, esta denominación de las macetas fue solo para la descripción en campo. De la misma manera se trabajó en las **macetas 2 y 3** adquiriendo el número **2 y 3** respectivamente.

– **Tratamiento 2 - Muestra 2I, 2II, 2III (4, 5, 6)**

En el segundo tratamiento, el porcentaje de aplicación de lodo activado fue 5 %, aplicando los cálculos de porcentaje se obtuvo 100 *gr* de lodo activado, se pesó 1900 *gr* de suelo de Orcotuna, se mezcló uniformemente y se depositó en las **macetas 4, 5 y 6**, esta descripción fue solo para la observación de campo.

– **Tratamiento 3 - Muestra 3I, 3II, 3III (7,8,9)**

En el tercer tratamiento, el porcentaje de aplicación fue de 10 % de lodo activado, aplicando los cálculos de porcentaje se obtuvo 200 *gr* de lodo activado, se pesó 1800 *gr* de suelo, se mezcló uniformemente y se etiquetaron las **macetas** como **7, 8 y 9**, esta denominación de las macetas fue solo para la descripción en campo.

– **Tratamiento 4 - Muestra 4I, 4II, 4III (10, 11, 12)**

En el cuarto tratamiento, el porcentaje de aplicación fue de 15 % de lodo activado, aplicando los cálculos de porcentaje se obtuvo 300 *gr* de lodo activado, se pesó 1700 *gr* de suelo, se mezcló uniformemente y se etiquetaron las **macetas** como **10, 11 y 12** esta denominación de las macetas fue solo para la descripción en campo.

– **Tratamiento 5 - Muestra 5I, 5II, 5III (13, 14, 15)**
















En el quinto tratamiento, el porcentaje de aplicación fue de 20 % de lodo activado, aplicando los cálculos de porcentaje se obtuvo 400 *gr* de lodo activado, se pesó 1700 *gr* de suelo, se mezcló uniformemente y se etiquetaron las **macetas** como **13,14, y 15**, esta denominación de las macetas fue solo para la descripción en campo.

Una vez terminada la preparación de las muestras con sus respectivas dosis de lodo activado se procedió a hidratarlas a una capacidad de campo. La capacidad de campo del suelo del experimento, fue 23 % y se utilizó el método gravimétrico.

- Se le agregó 0.560 ml de agua al suelo de Orcotuna para lograr el 23 % de humedad a capacidad de campo.
- Se dejó infiltrar el agua y se procedió a cerrar las bolsas hasta el día siguiente.

Las 15 macetas fueron ubicadas en orden de menor a mayor tratamiento en el lugar de experimentación

Tabla 15. *Croquis experimental*

<p>0 % LODO</p>  <p>1-I 1</p>	<p>0 % LODO</p>  <p>1-II (2) 2</p>	<p>0 % LODO</p>  <p>1-III (3) 3</p>
<p>5 % LODO</p>  <p>2-I 4</p>	<p>5 % LODO</p>  <p>2-II 5</p>	<p>5 % LODO</p>  <p>2-III 6</p>
<p>10 % LODO</p>  <p>3-I 7</p>	<p>10 % LODO</p>  <p>3-II 8</p>	<p>10 % LODO</p>  <p>3-III 9</p>
<p>15 % LODO</p>  <p>4-I 10</p>	<p>15 % LODO</p>  <p>4-II 11</p>	<p>15 % LODO</p>  <p>4-III 12</p>
<p>20 % LODO</p>  <p>5-I 13</p>	<p>20 % LODO</p>  <p>5-II 14</p>	<p>20 % LODO</p>  <p>5-III 15</p>

Fuente: elaboración propia

Materiales e insumos

Para los insumos requeridos se compró:

- 1 kg de “Avena forrajera”
- 15 unid. de macetas núm. 17
- Un cuadernillo de apuntes
- Un reservorio de agua de PVC capacidad 1 l
- Una balanza digital

Características del lugar de experimentación

- Región: Junín
- Provincia: Huancayo
- Distrito: Huancayo
- Latitud: 12°04'40.48”S
- Longitud: 75°19'75.57”O
- Altitud: 3249 m s.n.m.
- Dirección: Pasaje Santa Ángela de Falingo S/N Mz. E Lt. 4

E) Análisis de lodos activados y de la muestra de suelo de Orcotuna

– Muestra de lodo activado 4/7/2016

La muestra de 50 kg de lodo activado fue llevada al lugar de experimentación, una vez ahí se pesó aproximadamente 1 kg, se etiquetó y cerró la muestra, luego fue llevada al Laboratorio de Química Agrícola del Instituto Rural Valle Grande, Cañete.

– Muestra de suelo de Orcotuna 23/7/2016

Se pesó aproximadamente 1kg de suelo tamizado, se procedió a etiquetarla, cerrar la muestra, embalarla y llevarla para análisis de metales pesados y características físico-químicas en el Laboratorio de Química Agrícola del Instituto Rural Valle Grande, Cañete.

F) Siembra de la *Avena sativa* 24/7/2016

- Al día siguiente los tratamientos se ubicaron en el punto llamado capacidad de campo.
- Se procedió a sembrar las semillas de avena (*Avena sativa*), fueron aproximadamente 30 unidades de semillas en cada maceta, sembradas a una distancia prudencial (2 cm), para luego esperar que emerjan y poder escoger las más representativas para el estudio.
- Esto se repitió en las 15 macetas.
- A los 15 días después de la siembra se homogenizó el número de plantas por tratamiento, dejándose solo 15 plantas por cada unidad experimental, esto se hizo para obtener muestras más representativas y aprovechables.

G) Proceso de riego de la *Avena sativa*

El riego que se hizo en el experimento consistió en el método de las pesadas. La maceta se pesaba con un intervalo de 4 días aproximadamente, una maceta llevaba desde un inicio un peso de 2kg, la disminución de este peso era compensado con el riego administrado en cantidad de agua.

El agua que se utilizó fue agua potable de vivienda.

H) Cosecha de la *Avena sativa* 22/9/2016

a. Parte aérea de la *Avena sativa*

- Después de haber transcurrido 65 días de iniciado el experimento, se observó que la planta empezaba a tornarse saturada, es decir a obtener el punto de marchitez irreversible.
- Las unidades experimentales fueron llevadas al Laboratorio de Suelos de la Universidad Continental.
- Se empezó a cortar la parte aérea de la *Avena sativa* al “ras del suelo” se separó cada planta en sus unidades experimentales respectivas, se separó.

b. Parte radicular de la *Avena sativa*

- Luego de haber procedido a cortar la parte aérea de la planta se procedió a separar muy cuidadosamente las raíces del suelo empezando por la unidad experimental 1I y así consecutivamente.
- Se observó que las unidades radiculares no podían ser separadas por cada planta, por su naturaleza de enraizamiento entre ellas, así que se procedió a tratarlas como una unidad cada maceta y así evitar rompimientos de la misma.
- Con respecto a la raíz se obtuvo 15 muestras de los 15 tratamientos realizados.
- Cada unidad experimental de raíz se procedió a lavarla con agua y a clasificarla, luego se colocó dentro de papel graf y llevarla al horno a 60° para luego proceder con el pesado.

I) Proceso de medición de la parte aérea de la *Avena sativa* 24/9/2016

- Una vez obtenida la parte aérea de la *Avena sativa*, se ordenó respectivamente en cada tratamiento y se procedió a medirse cada planta.
- Fueron 15 unidades de plantas por cada maceta.

J) Proceso de secado de la *Avena sativa* 24/9/2016

- Se procedió a orear las raíces por 24 horas, luego se colocó al horno con una temperatura de 60° por 24 horas para obtener el peso real de la raíz, ya que después del lavado esta se encontraba con rezagos de agua.
- Luego de transcurrido este procedimiento se procedió a retirarla y pesarla en la balanza analítica digital.
- Se realizó el mismo procedimiento para la parte aérea de la *Avena sativa*.
- Se anotaron los resultados para su interpretación.

Análisis de Laboratorio en Suelo 8/11/2016

- Finalmente se tomó una muestra del suelo de cada unidad experimental y se envió al laboratorio para el análisis de las propiedades físico-químicas.

- El análisis se realizó en la Universidad Nacional Agraria la Molina (UNALM) Laboratorio de análisis de suelo, plantas, agua y fertilizantes.

K) Análisis de Laboratorio de los lodos activados 14/2/2018

Se realizó el análisis epidemiológico de los lodos activados, la muestra recogida de estos, estuvo guardada en un lugar fresco y seco, sin ser alterada.

La muestra fue llevada al Laboratorio de Ecología Microbiana y Biotecnología "Marino Tabusso", departamento de Biología de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM).

La muestra se cultivó aproximadamente 15 días desde su recepción y se analizaron los siguientes parámetros:

- *Escherichia coli*
- *Salmonella sp*

Se adicionaron los parámetros fecales:

- Coliformes totales
- Coliformes fecales

Tabla 16. Parámetros de higienización, clasificación de Biosólidos de Clase A y de Clase B

Indicador	Clase A	Clase B
Indicadores de contaminación fecal	<i>Escherichia coli</i> < 1000 NMP/ 1g ST o <i>Salmonella sp.</i> < 1 NMP / 10g ST	El nivel de higienización se puede demostrar con el cumplimiento de los procesos previstos en el Anexo I, en su defecto, mediante alguna de las tecnologías indicadas para la higienización, en la Sección B del Anexo N° II.
Indicador de Huevos de Helmintos	Huevos viables de Helmintos < 1 / 4g ST o Prueba de utilización de tecnologías indicadas para la higienización	

Fuente: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, MVCS parámetros para biosólidos

3.1.2 Alcances de la investigación

3.1.2.1 Tipo de investigación

La investigación es aplicada, pues es de naturaleza eminentemente práctica para aplicar las bases teóricas del comportamiento de lodos activados en un suelo contaminado con arsénico, mediante la aplicación de diferentes dosis de lodos y evaluar las propiedades físico-químicas del suelo, así como el crecimiento de *Avena sativa*.

La presente investigación es un estudio de tipo cuantitativo, pues se centra en aspectos observables y susceptibles de cuantificación, como es el crecimiento de la avena y las propiedades del suelo.

3.1.2.2 Nivel de investigación

La investigación es explicativa, porque el interés está en explicar de qué manera la variable independiente (los lodos activados) influye en las variables dependientes

(propiedades del suelo y crecimiento de la *Avena sativa*). Se tratará de explicar cómo los lodos activados afectan las propiedades del suelo, y en las características de la planta.

3.2 Diseño de la investigación

Se planteó un diseño experimental en la presente investigación, planteando 5 tratamientos, con tres repeticiones, haciendo un total de 15 unidades experimentales.

Tabla 17. Tratamientos en estudio

Núm.	TRATAMIENTOS
1	T1 = suelo contaminado (As) sin lodos activados
2	T2 = suelo contaminado (As) con 5 % de lodos activados (masa/masa)
3	T3 = suelo contaminado (As) con 10 % de lodos activados (masa/masa)
4	T4 = suelo contaminado (As) con 15 % de lodos activados (masa/masa)
5	T5 = suelo contaminado (As) con 20 % de lodos activados (masa/masa)

Fuente: elaboración propia

Los tratamientos fueron dispuestos en un Diseño Completamente Aleatorizado (DCA), cuyo modelo aditivo lineal es el siguiente:

$$Y_{ik} = \mu + \tau_i + \epsilon_{ij}$$

Donde:

Y_{ik} = Cualquier observación del experimento

μ = Media poblacional

τ = Efecto del i – ésimo Tratamiento

ϵ_{ij} = Error experimental

Los porcentajes de aplicación para los lodos activados fueron estudiados desde la aplicación de la materia orgánica, ya que se considera desde el punto nutritivo de los lodos; el artículo menciona que, el contenido de materia orgánica varía desde 2 y 8 gramos por kilogramo de suelo, siendo el primero para suelos desérticos y el segundo para turberas, estos

valores varían según la humedad y la temperatura de degradación del lugar de estudio. Esto guio a tener un margen de aplicación para los suelos del valle del Mantaro, la aplicación se consideró desde 5 % hasta 20 % para obtener resultados cercanos recomendados por dicho manual. (53)

3.3. Población y muestra

3.3.1 Población

La población está constituida por los suelos contaminados con arsénico, que presenta una extensión territorial de 44.75 km² (82) Orcotuna, Concepción.

El área total cultivada de avena forrajera es de 33 hectáreas en la campaña agrícola de 2016-2017, el rendimiento de la avena forrajera es 20848.484 kg/ha (79).

Tabla 18. Información agrícola de la Avena forrajera en el distrito de Orcotuna – Concepción

AVENA FORRAJERA	
Siembras (ha)	33
Cosechas (ha)	33
Rendimiento (Kg/ha)	20848,484
Producción (t)	688
Precio Chacra (S/Kg)	0,313

Fuente: Dirección Región de Agricultura Junín 2018

3.3.2 Muestra

La muestra estuvo constituida por la masa de un suelo representativo del distrito de Orcotuna, contaminado con arsénico, del horizonte superficial, hasta una profundidad de 20 cm en promedio, en una cantidad aproximada de 60 kg, obtenida a partir de 13 muestras simples para constituir una muestra compuesta, en un área aproximada de 5 000 m². El número de muestras se basó en la norma peruana de muestreo de suelos contaminados (81).

3.4. Evaluaciones realizadas

Planta:

- Altura de planta (cm)
- Materia seca de la parte aérea (g)
- Materia seca de la parte radicular (g)

Suelo:

- Propiedades físicas:
 - Densidad aparente (Mg/kg)
- Propiedades químicas:
 - pH
 - Carbonato de calcio (%)
 - Materia orgánica (%)
 - P disponible (ppm)
 - K disponible (ppm)
 - Conductividad eléctrica (dS/m)

3.4.1. Técnicas de análisis de datos

Al finalizar el experimento se sistematizaron los datos obtenidos y se analizaron a través del análisis de variancia, aplicando posteriormente la prueba de Duncan ($p=0,05$) para comparar los tratamientos entre medias.

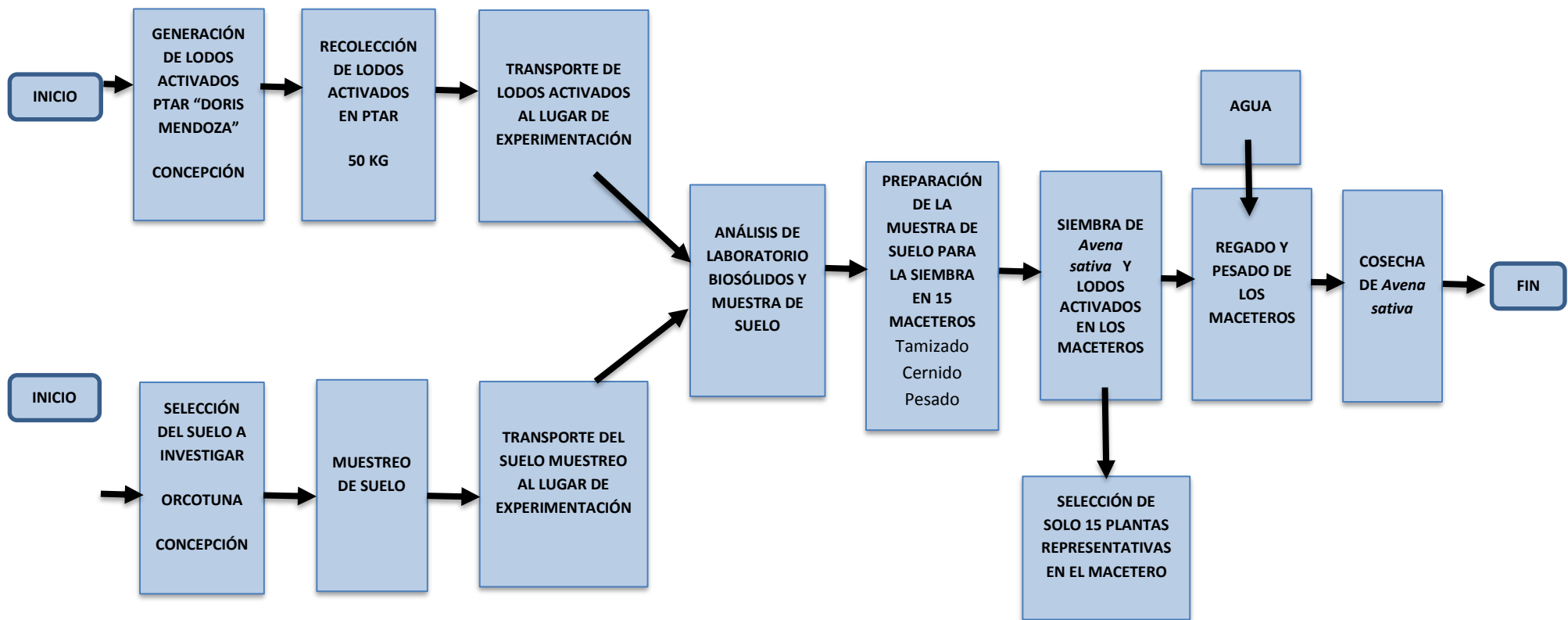


Figura 6. Diagrama de flujo del proceso experimental
 Fuente: elaboración propia

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados del tratamiento y análisis de la información

Se presenta a continuación los resultados del análisis de suelo de Orcotuna, tanto en sus propiedades físicas y químicas, como del contenido de metales pesados antes del experimento. Posteriormente se realizó el análisis microbiológico para clasificar al lodo en Clase A o Clase B (19).

Luego, se presentan los resultados de la evaluación de las propiedades físicas (densidad aparente) y propiedades químicas (pH, conductividad eléctrica, contenido de CaCO_3 , materia orgánica, fósforo disponible, potasio disponible), para evaluar el efecto de la aplicación de los lodos activados en el suelo de Orcotuna, que corresponde al primer objetivo; así como la evaluación de las características de crecimiento de avena (altura de planta, materia seca aérea y materia seca radicular), que corresponde al segundo objetivo del trabajo de investigación.

Los datos del análisis de suelo para cada tratamiento y repetición, fueron procesados a través del análisis de varianza, cuyos resultados se presentan en anexos, y la prueba de comparación múltiple de Duncan, para determinar la significación estadística a un nivel de significancia del 0.05.

4.1.1 Propiedades físico-químicas del suelo del experimento

Tabla 19. Resultados del análisis físico-químico del suelo de Orcotuna antes del experimento

Parámetro	Resultado
Textura	
- Arena	52.56 %
- Limo	32.00 %
- Arcilla	15.44 %
Clase textural	Franco arenoso
Carbonato de calcio total	13.39 %
Conductividad eléctrica	1.26 dS/m
pH	7.68
Fósforo disponible	57.82 ppm
Materia orgánica	2.07 %
Nitrógeno total	0.12 %
Potasio disponible	102.40 ppm
Cationes cambiables	
- Calcio	10.55 meq/100 g
- Magnesio	1.99 meq/100 g
- Sodio	0.10 meq/100 g
- Potasio	0.25 meq/100 g
Porcentaje de sodio intercambiable	0.81
Capacidad de intercambio catiónico efectiva	12.88

Fuente: Laboratorio de Química Agrícola Valle Grande, Cañete, Perú

Los resultados del análisis físico-químico del suelo de Orcotuna antes del experimento, muestra una textura Franco Arenosa esto debido a 52.56 % de arena, 32.0 % de limo y 15.44 % de arcilla, esto significa una textura moderadamente gruesa, predispuesta a tener poca retención de moléculas de agua en su estructura.

El porcentaje de saturación de agua en 37.79 % con respecto al carbonato de calcio total 13.39.

Para los siguientes parámetros se analizaron según la tabla de interpretación de la Universidad Nacional Agraria La Molina (83), Conductividad Eléctrica a 25 °C, 1.26 dS/m muy ligeramente salino, pH 7.68 considerado ligeramente salino, fósforo disponible en 57.83 ppm alto, materia orgánica con valor de 2.07 % dentro de los valores de intermedio, nitrógeno total en 0.12 % poca capacidad en el suelo, potasio disponible 102.40 medio, para los cationes cambiabiles calcio 81.84 % (10.55 mEq/100g) elevado, para el magnesio 15.44 % (1.99 mEq/100g) dentro de los valores apreciables, para el sodio 0.78 % (0.10 mEq/100g) normal y potasio 1.94 % (0.25 mEq/100g) deficiente.

Tabla 20. Resultados del análisis de metales pesados del suelo de Orcotuna

Parámetro	Resultado	ECA-Suelos Perú	ECA-Suelos Canadá
Plomo total	395.83 (mg/kg)	70	70
Cadmio total	48.92 (mg/kg)	1.4	1.4
Cromo total	9.82 (mg/kg)	-	64
Arsénico total	17.92 (mg/kg)	50	12
Mercurio total	2.52 (mg/kg)	6.6	6.6

Fuente: Laboratorio de Química Agrícola Valle Grande, Cañete, Perú

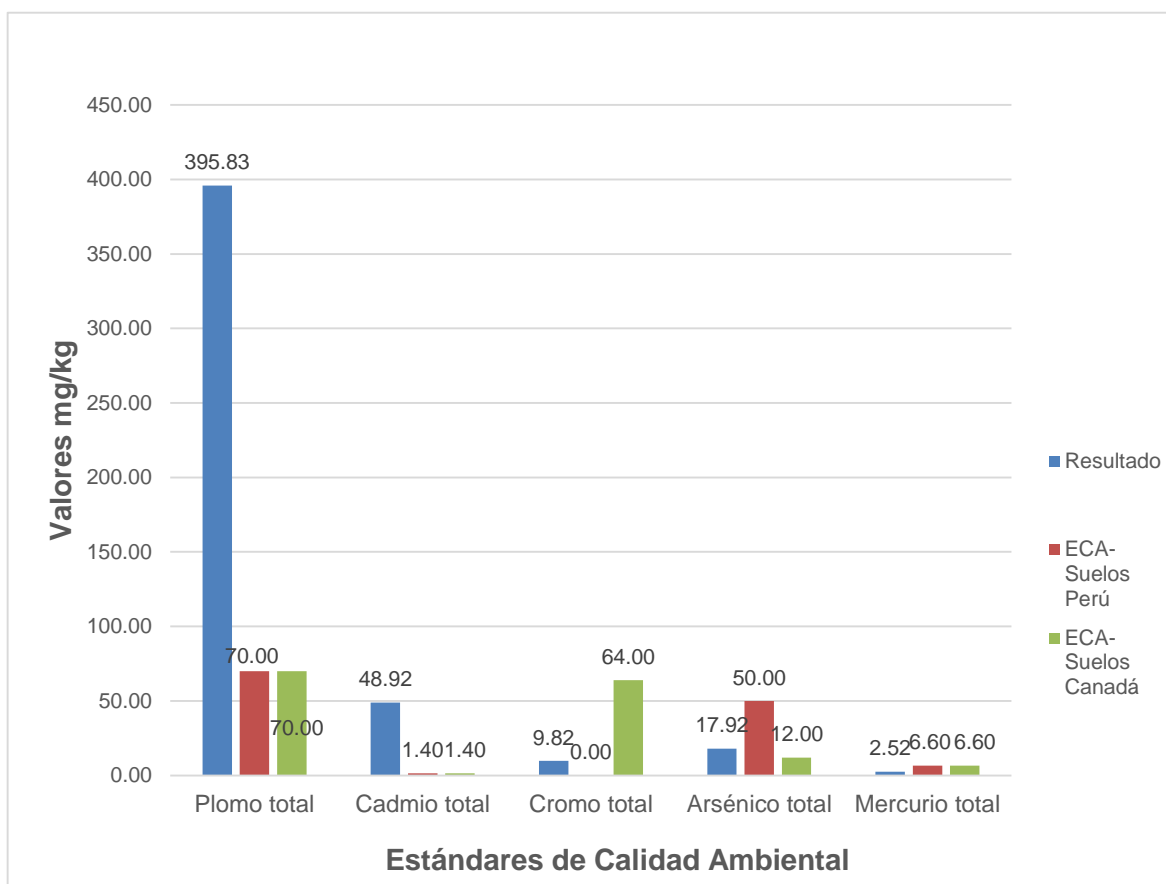


Figura 7. Cuadro comparativo ECA - Resultados metales pesados
Fuente: elaboración propia

Los resultados obtenidos en la muestra de suelo de Orcotuna, para el metal plomo muestra 395.83 mg/kg, excediendo los valores de los ECA suelo Perú y ECA suelo Canadá, para cadmio la muestra obtuvo un valor de 48.92 sobrepasando los ECAS mencionados, para cromo el valor de 9.82 no sobrepasa los ECAS de Perú y Canadá, para el caso del arsénico que es el metal de estudio de esta tesis muestra 17.92 sobrepasando el ECA de Canadá pero no para Perú, para el mercurio el resultado obtenido es de 2.52, este valor no sobrepasa ningún ECA de Perú y Canadá.

4.1.2 Propiedades físico-químicas del lodo activado antes del experimento

Tabla 21. Resultados del análisis de caracterización del lodo activado

Parámetro	Resultado
pH	6.51
Conductividad eléctrica	5.97 dS/m
Carbono orgánico	14.13 %
Nitrógeno total	1.74 %
Fósforo total	0.77 %
Potasio total	0.24 %

Fuente: Laboratorio de Química Agrícola Valle Grande, Cañete, Perú

Los siguientes parámetros físico-químicos, obtenidos en los lodos residuales distan de ser comparados con una normativa vigente específica para lodos residuales, las normativas extranjeras centran su interés en las cantidades de metales que deben tener estos y no en sus propiedades físico-químicas.

Tabla 22. Resultados del análisis de metales pesados del lodo activado

Parámetro	Resultado	Excelentes (México)	Buenos (México)
Plomo total	210.83 (mg/kg)	300 (mg/kg)	840 (mg/kg)
Cadmio total	2.18 (mg/kg)	39 (mg/kg)	85 (mg/kg)
Cromo total	18.30 (mg/kg)	1 200 (mg/kg)	3 000 (mg/kg)
Arsénico total	0.82 (mg/kg)	41 (mg/kg)	75 (mg/kg)
Mercurio total	11.92 (mg/kg)	17 (mg/kg)	57 (mg/kg)

Fuente: Laboratorio de Química Agrícola Valle Grande, Cañete, Perú

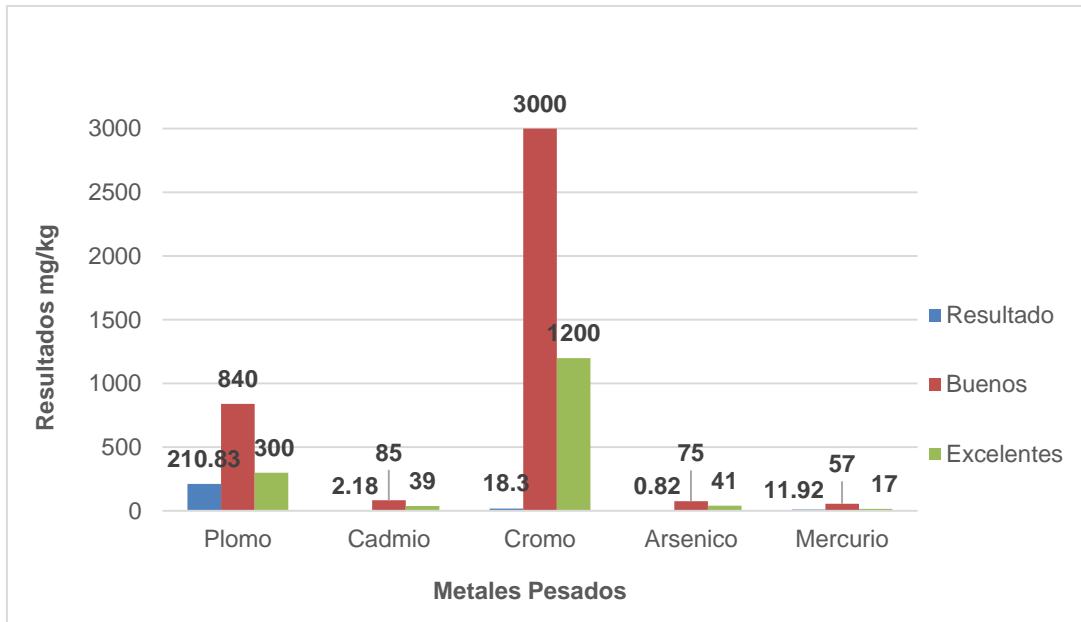


Figura 8. Cuadro comparativo lodo activado - ECA Lodo México
Fuente: elaboración propia

En el Figura 8 se pueden observar los resultados obtenidos en el lodo para parámetros **metales pesados**, comparados con ECA México, que clasifica los rangos en Buenos (no debe sobrepasar el análisis) y Excelentes (puede ser hasta menores), para el Plomo la cantidad presente en el lodo es de 210.83 estando en el rango dado; para el cadmio de igual manera se mantiene por debajo de lo permitido, para el cromo no excede, está muy por debajo; para el Arsénico está muy por debajo de los valores máximos y para el mercurio el lodo no excede ningún rango, clasificándolo como buenos y excelentes para la aplicación.

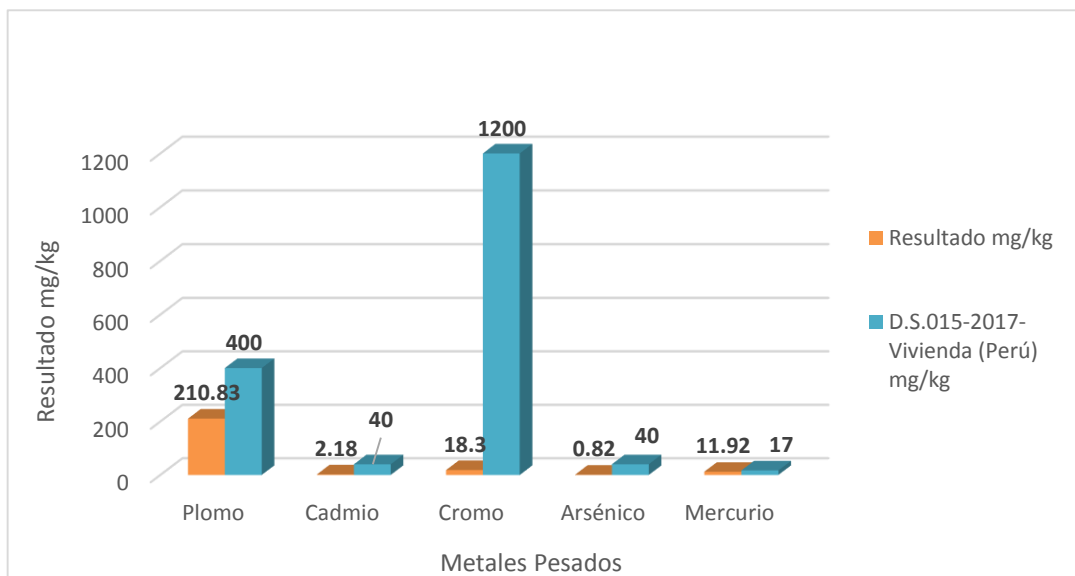


Figura 9. Cuadro Comparativo Lodo activado - D.S. 015-2017 Vivienda
Fuente: elaboración propia

En la Figura 9 se observan los resultados de los lodos activados comparados con la normativa peruana (D.S. 015-2017 Vivienda), para plomo se tiene un valor de 210.83 mg/kg siendo el rango máximo de 400 mg/kg, para cadmio 2.18 cuyo límite máximo es 40 mg/kg, para cromo 18.3 mg/kg cuyo máximo valor es 1200 mg/kg, para arsénico 0.82 mg/kg su valor máximo admisible es 40 mg/kg, y mercurio 11.92 mg/kg en el lodo cuyo valor máximo admisible es de 17 mg/kg. Esto indica que los lodos activados de la PTAR “Doris Mendoza” Concepción son aptos para la aplicación en la agricultura, en parámetros de toxicidad química.

4.1.3 Análisis microbiológico del lodo activado PTAR Concepción “Doris Mendoza” Concepción

Se realizó el análisis microbiológico al lodo activado recolectado en la Planta de tratamiento Doris Mendoza-Concepción, se tomaron los parámetros del Decreto Supremo N° 015-2017 Vivienda, que clasifica al lodo en Clase A y Clase B (19). Se analizó la muestra en la Universidad Nacional Agraria la Molina, en el Laboratorio de Ecología Microbiana y Biotecnología “Marino Tabusso”.

Tabla 23. Resultados del análisis microbiológico

Análisis microbiológico	Resultados NMP/ml	D.S. N° 015-2017 Vivienda NMP/ml
Enumeración de Coliformes totales	<3	<1000
Enumeración de Coliformes fecales	<3	
Enumeración de <i>Escherichia coli</i>	<3	
Detección de <i>Salmonella sp</i>	Ausencia	<1 NMP

Fuente: Laboratorio UNAL, Ecología y Biotecnología “Marino Tabusso”

La muestra de lodos activados de la PTAR Concepción “Doris Mendoza”, según los resultados de la UNALM, arrojan parámetros de higienización aceptados para su uso en la agricultura, siendo clasificados como lodos de Clase A, es decir que de acuerdo a las condiciones que se encontraron los lodos, almacenados en posas expuestas al sol, se producen condiciones favorables para su estabilización, esta técnica es llamada Secado

Térmico Solar, se realiza a través de la energía solar, se reduce la humedad a un 10 % como máximo (26).

4.1.4 Propiedades físicas del suelo al final del experimento

4.1.4.1 Densidad aparente

Tabla 24. Prueba de significación de Duncan para la densidad aparente del suelo al final del experimento

Orden de Mérito	Tratamiento	Promedio (Mg/m ³)	Significación	Variación (%)
1	5 (20 % lodos activados)	1.167	a	-7.820
2	4 (15 % lodos activados)	1.206	a b	-4.739
3	3 (10 % lodos activados)	1.245	b c	-1.659
4	1 (0 % lodos activados)	1.266	c	-
5	2 (5 % lodos activados)	1.271	c	+0.395

ALS(D)_{0.05} = 0.0407, 0.0426, 0.0435, 0.0443

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 24 se observa que, la densidad aparente, del tratamiento 2 (5 %) y 5 (20 %) son significativamente diferentes respecto al testigo. En comparación con los demás tratamientos 4 (15 %), 3 (10 %) respecto al testigo.



Figura 10. Cuadro comparativo de los 5 Tratamientos – Densidad aparente
Fuente: elaboración propia

En la Figura 10, se muestran los valores desde el testigo hasta la **maceta 15**, se distingue la disminución de la propiedad física conforme se ha aumentado la dosis de la aplicación de lodo activado; es decir, conforme disminuye la densidad aparente, el suelo se vuelve más aprovechable para el cultivo.

4.1.5 Propiedades químicas del suelo al final del experimento

4.1.5.1 pH

Tabla 25. Prueba de significación de Duncan para el pH al final del experimento

Orden de Mérito	Tratamiento	pH	Significación	Variación (%)
1	1 (0 % lodos activados)	7.7500	a	-
2	2 (5 % lodos activados)	7.6633	a	-1.12
3	3 (10 % lodos activados)	7.4833	b	-3.44
4	4 (15 % lodos activados)	7.3700	b c	-4.90
5	5 (20 % lodos activados)	7.2367	c	-6.62

ALS (D)_{0.05} = 0.1409, 0.1476, 0.1507, 0.1534

Fuente: elaboración propia

En la prueba de significación de Duncan, con base en los resultados se observa el pH, el tratamiento 5 (20 %) y tratamiento 2 (5 %) son significativamente diferentes respecto al testigo. En comparación con los tratamientos 3 (10 %) y 4 (15 %) respecto al testigo.

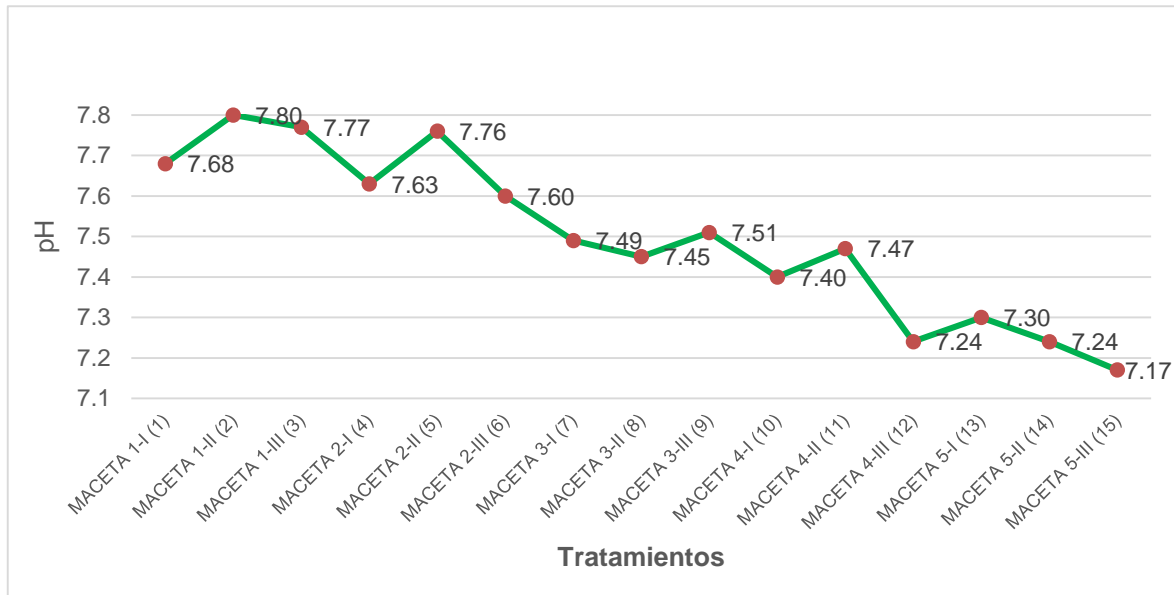


Figura 11. Cuadro comparativo de los 5 Tratamientos – pH
Fuente: elaboración propia

En la Figura 11 se muestran los valores desde el testigo hasta la **maceta 15**, se distingue la disminución de la propiedad química conforme se aumenta el tratamiento de la aplicación de lodo activado, esto genera que el pH se estabilice para los cultivos.

Tabla 26. Resultado de análisis de suelo, parámetro pH

	TRATAMIENTO	PH
0 %	Muestra 1	7,68
	Muestra 2	7,80
	Muestra 3	7,77
	\bar{X}	7,75
5 %	Muestra 4	7,63
	Muestra 5	7,76
	Muestra 6	7,60
	\bar{X}	7,66
10 %	Muestra 7	7,49
	Muestra 8	7,45
	Muestra 9	7,51
	\bar{X}	7,48
15 %	Muestra 10	7,40
	Muestra 11	7,47
	Muestra 12	7,24
	\bar{X}	7,37

20%	Muestra 13	7,30
	Muestra 14	7,24
	Muestra 15	7,17
		7,24

Fuente: Laboratorio de Suelos, UNALM

En el caso del pH el suelo inicial fue de 7.68 y el promedio del testigo fue de 7.75 este incremento podría deberse a la adición del agua de riego que en este caso fue de grifo o a la asimilación e interacción de las raíces de la *Avena sativa*. Conforme va aumentando las dosis el pH va disminuyendo, esta variación se debe a la capacidad tampón del suelo de Orcotuna y a la ligera acidez del lodo.

4.1.5.2 Conductividad eléctrica (CE)

Tabla 27. Prueba de significación de Duncan para la CE del suelo al final del experimento

Orden de Mérito	Tratamiento	CE (dS/m)	Significación	Variación (%)
1	5 (20 % lodos activados)	1.7167	a	+133.02
2	4 (15 % lodos activados)	1.5133	a	+105.42
3	3 (10 % lodos activados)	1.3433	a	+82.34
4	2 (5 % lodos activados)	0.8433	b	+14.47
5	1 (0 % lodos activados)	0.7367	b	-

ALS (D)_{0.05} = 0.4368, 0.4576, 0.4674, 0.4757

Fuente: elaboración propia

Para la prueba de significación de Duncan con base a los resultados para conductividad eléctrica se observa que el tratamiento 2 (5 %) es significativamente igual frente al testigo, el tratamiento 3 (10 %), 4 (15 %) y 5 (20 %) son significativamente iguales.

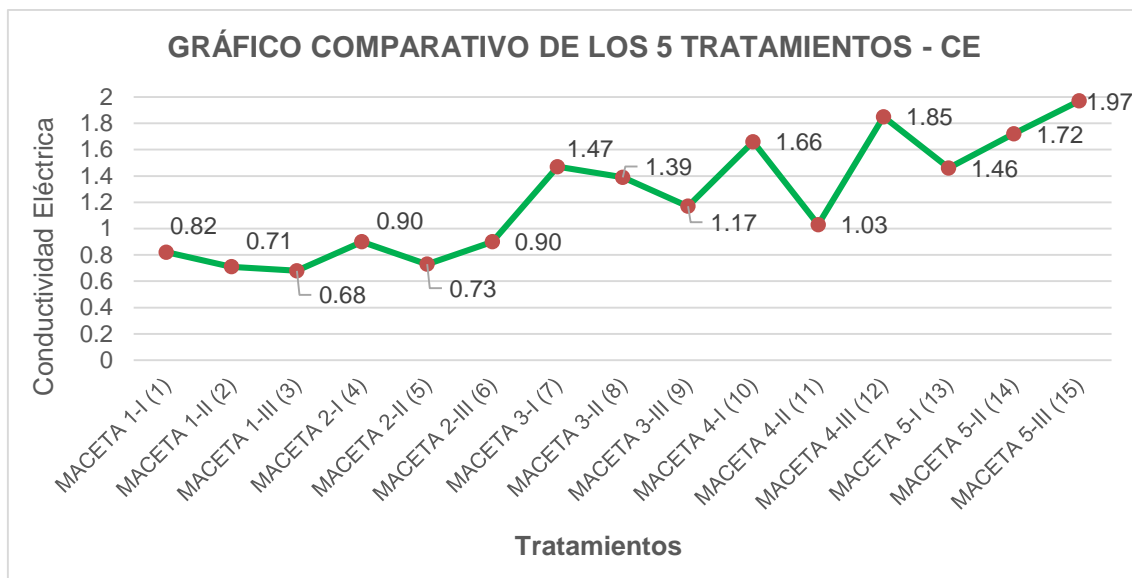


Figura 12. Cuadro comparativo de los cinco tratamientos – CE
Fuente: elaboración propia

En la Figura 12 se muestran los valores desde el testigo hasta la **maceta 15**, se distingue el aumento de la propiedad química conforme se aumenta el tratamiento en la aplicación de lodo activado, esto lleva a un mayor dinamismo de los cationes y aniones en el suelo.

Tabla 28. Resultado de análisis de suelo, parámetro CE

	TRATAMIENTO	CE
0 %	Muestra 1	0,82
	Muestra 2	0,71
	Muestra 3	0,68
	\bar{X}	0,74
5 %	Muestra 4	0,90
	Muestra 5	0,73
	Muestra 6	0,90
	\bar{X}	0,84
10 %	Muestra 7	1,47
	Muestra 8	1,39
	Muestra 9	1,17
	\bar{X}	1,34
15 %	Muestra 10	1,66
	Muestra 11	1,03
	Muestra 12	1,85
	\bar{X}	1,51
20 %	Muestra 13	1,46
	Muestra 14	1,72
	Muestra 15	1,97
	\bar{X}	1,72

Fuente: Laboratorio de Suelos, UNALM

La conductividad eléctrica del suelo inicial fue de 1.26 ds/m y del testigo fue de 0.75 ds/m; este resultado refleja la necesidad, al final del testigo, de adicionar algún material orgánico, en comparación con los tratamientos, adicionados de lodo activado pudiéndose observar un aumento progresivo, ya que buenos valores de CE reflejan buena disponibilidad de reacción, de asimilación de los nutrientes en la capa arable del suelo.

4.1.5.3 Carbonato de calcio (CaCO₃)

Para el carbonato de calcio (CaCO₃), el análisis de ANOVA muestra que el valor p-valor es 0.3611, mayor a 0.05, aceptando la hipótesis $H_0 = \text{Todas las medias son iguales}$, por consiguiente no es necesario realizar la Prueba de Duncan.

Tabla 29. Análisis de varianza del contenido de CaCO₃ del suelo al final del experimento

Fuentes de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F calculada	p-valor
Tratamientos	4	0.7333	0.1833	1.2222	0.3611
Error Experimental	10	1.5000	0.1500		
Total	14	2.2333			

S = 0.3873

X = 12.0333

CV = 3.2186 %

Fuente: elaboración propia

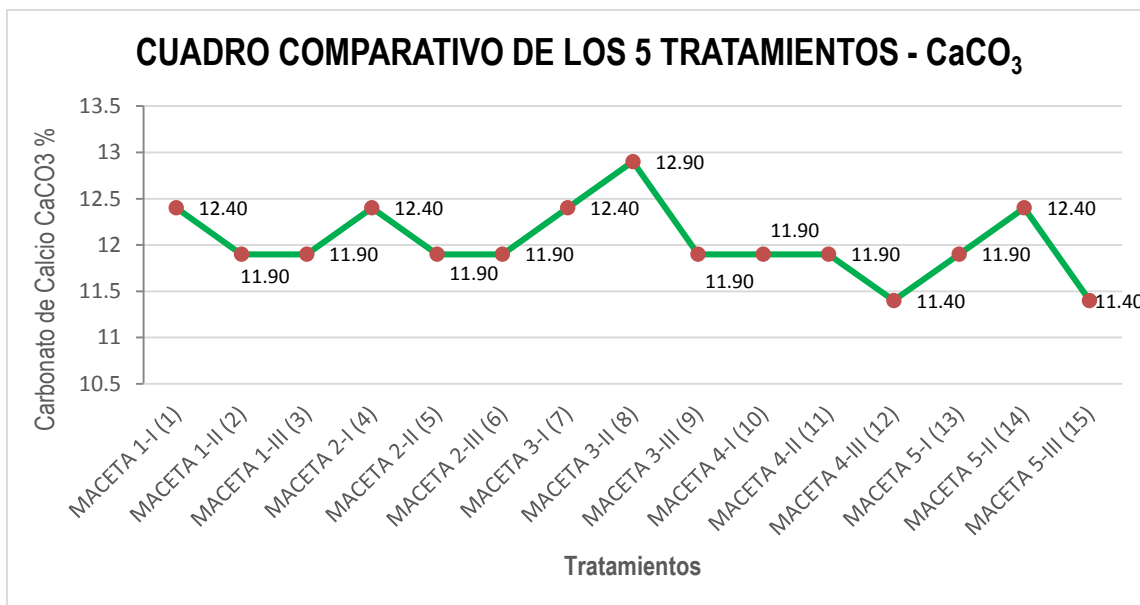


Figura 13. Cuadro comparativo de los cinco tratamientos – CaCO₃

Fuente: elaboración propia

En la Figura 13 se muestran los valores desde el testigo hasta la **maceta 15**, se distingue una mínima disminución desde el testigo hasta el último tratamiento que no es distinguido por la Prueba de Duncan.

Tabla 30. Resultado de análisis de suelo, parámetro CaCO_3

	TRATAMIENTOS	CaCO_3
0 %	Muestra 1	12,40
	Muestra 2	11,90
	Muestra 3	11,90
	\bar{X}	12,07
5 %	Muestra 4	12,40
	Muestra 5	11,90
	Muestra 6	11,90
	\bar{X}	12,07
10 %	Muestra 7	12,40
	Muestra 8	12,90
	Muestra 9	11,90
	\bar{X}	12,40
15 %	Muestra 10	11,90
	Muestra 11	11,90
	Muestra 12	11,40
	\bar{X}	11,73
20 %	Muestra 13	11,90
	Muestra 14	12,40
	Muestra 15	11,40
	\bar{X}	11,90

Fuente: Laboratorio de Suelos, UNALM

Para el carbonato de calcio el análisis inicial fue de 13.39 %, mientras que para el testigo fue de 12.07 %, para el tratamiento al 5 % de 12.07 %, para el tratamiento al 10 % de 12.40 %, para el tratamiento al 15 % de 11.73 % y, para el tratamiento al 20 % de 11.90 %; este parámetro químico nos indica al igual que el pH la capacidad de intercambio catiónico, como el lodo es ligeramente ácido puede reflejarse en el resultado obtenido de las muestras. Para este parámetro no se encontró una tesis para poder compararla.

4.1.5.4 Materia orgánica

Tabla 31. Prueba de significación de Duncan para el contenido de materia orgánica al final del experimento

Orden de Mérito	Tratamiento	MO (%)	Significación	Variación (%)
1	4 (15 % lodos activados)	2.6167	a	+13.018
2	3 (20 % lodos activados)	2.2933	a b	+11.409
3	5 (10 % lodos activados)	2.2133	a b	+11.011
4	2 (5 % lodos activados)	2.1867	a b	+10.879
5	1 (0 % lodos activados)	2.01	b	-

ALS (D)_{0.05} = 0.4760, 0.4986, 0.5092, 0.5183

Fuente: elaboración propia

La prueba de significación de Duncan muestra para materia orgánica el tratamiento 4 (15 %) y los tratamientos 3 (20 %), 5 (10 %) y 5 (5 %) significativamente diferentes frente al testigo.

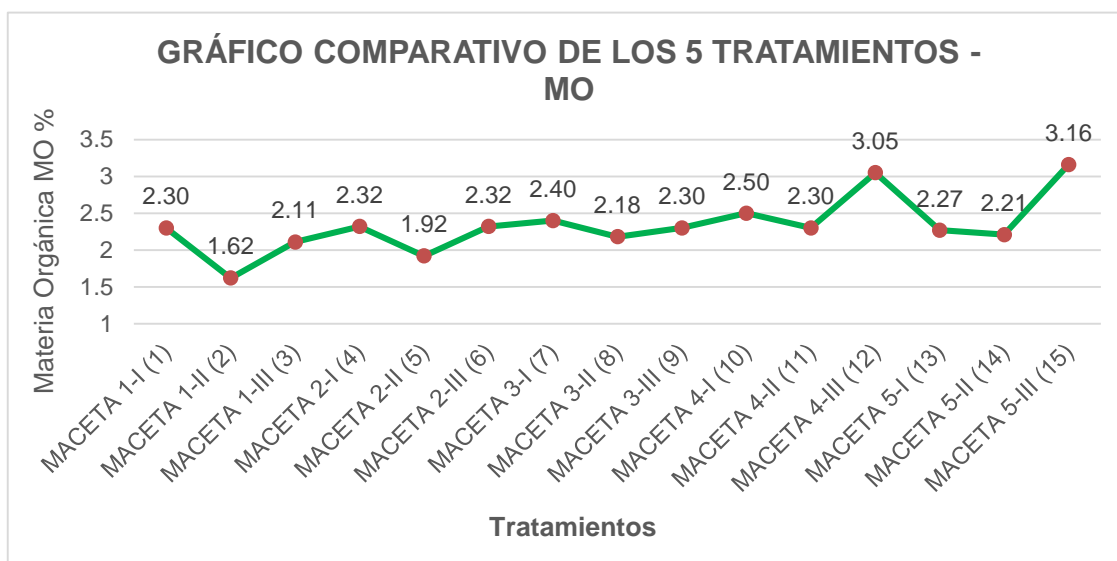


Figura 14. Cuadro comparativo de los cinco tratamientos – MO

Fuente: elaboración propia

En la Figura 14 se muestran los valores desde el testigo hasta la **maceta 15**, se distingue un aumento desde la **maceta 1** hasta la **maceta 15**, es decir aumenta el contenido de nutrientes al suelo para la siembra.

Tabla 32. Resultado de análisis de suelo, parámetro MO

	TRATAMIENTOS	MO
0 %	Muestra 1	2,30
	Muestra 2	1,62
	Muestra 3	2,11
	\bar{X}	2,01
5 %	Muestra 4	2,32
	Muestra 5	1,92
	Muestra 6	2,32
	\bar{X}	2,19
10 %	Muestra 7	2,40
	Muestra 8	2,18
	Muestra 9	2,30
	\bar{X}	2,29
15 %	Muestra 10	2,50
	Muestra 11	2,30
	Muestra 12	3,05
	\bar{X}	2,62
20 %	Muestra 13	2,27
	Muestra 14	2,21
	Muestra 15	3,16
	\bar{X}	2,55

Fuente: Laboratorio de Suelos, UNALM

Para la materia orgánica el análisis inicial del suelo es de 2.07 %, para el testigo de 2.01 %, esto refleja disminución de producto de este elemento al final de un sembrío, pero para el tratamiento al 5 % MO es de 2.19 %, para el tratamiento al 10 % de 2.29 %, para el tratamiento al 15 % es de 2.62 % y para el tratamiento al 20 % de 2.55 %; es decir, hay un aumento significativo en laboratorio.

4.1.5.5 Fósforo disponible

Tabla 33. Prueba de significación de Duncan para el contenido de fósforo disponible del suelo al final del experimento

Orden de Mérito	Tratamiento	P (ppm)	Significación	Variación (%)
1	2 (5 % lodos activados)	62.7667	a	+30.85
2	4 (15 % lodos activados)	57.5333	a b	+19.94
3	3 (10 % lodos activados)	57.4333	a b	+19.74
4	5 (20 % lodos activados)	51.3333	b c	+7.02
5	1 (0 % lodos activados)	47.9667	c	-

ALS (D)_{0.05} = 18.3891, 19.2647, 19.6734, 20.0237

Fuente: elaboración propia

En la prueba de significación de Duncan el tratamiento para fósforo disponible el 5 (20 %), 3 (10 %) y 4 (15 %) significativamente distinto al tratamiento 2 (5 %) respecto al testigo.

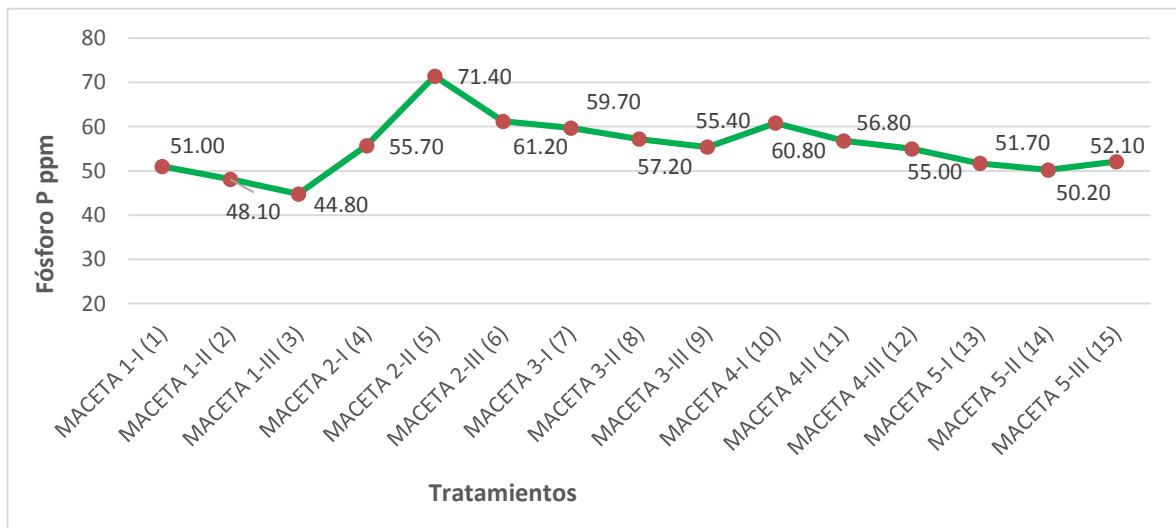


Figura 15. Cuadro comparativo de los cinco tratamientos – P
Fuente: elaboración propia

En la Figura 15 se muestran los valores desde el testigo hasta la **maceta 15**, se distingue aumento desde la **maceta 1** hasta la **maceta 15**, con picos distinguidos como en la **maceta 5** que presentó 71.40 %, esto podría deberse a error de cálculo de laboratorio, ya que los demás resultados se mantienen constantes.

Tabla 34. Resultado de análisis de suelo, parámetro P

	TRATAMIENTOS	P
0 %	Muestra 1	51,00
	Muestra 2	48,10
	Muestra 3	44,80
	\bar{X}	47,97
5 %	Muestra 4	55,70
	Muestra 5	71,40
	Muestra 6	61,20
		62,77
10 %	Muestra 7	59,70
	Muestra 8	57,20
	Muestra 9	55,40
	\bar{X}	57,43
15 %	Muestra 10	60,80
	Muestra 11	56,80
	Muestra 12	55,00
	\bar{X}	57,53
20 %	Muestra 13	51,70
	Muestra 14	50,20
	Muestra 15	52,10
	\bar{X}	51,33

Fuente: Laboratorio de Suelos, UNALM

Para el fósforo el análisis inicial en suelo fue de 57.82 ppm, en el testigo el resultado fue de 47.97 ppm, en el tratamiento al 5 % el resultado fue de 62,77ppm, para el tratamiento al 10 % fue de 57.43 ppm, para el tratamiento al 15 % fue de 57.53 ppm y para el tratamiento al 20 % fue de 51.33 ppm; entonces, se observa una disminución de este mineral, esto se debería a la alta asimilación de la *Avena sativa* para el fósforo, demostrándose en el testigo con un valor de los más bajos.

4.1.5.6 Potasio disponible

Tabla 35. Prueba de significación de Duncan para el contenido de potasio disponible del suelo al final del experimento

Orden de Mérito	Tratamiento	K (ppm)	Significación	Variación (%)
1	5 (20 % lodos activados)	104.0000	a	+15.56
2	4 (15 % lodos activados)	91.3333	a b	+1.48
3	1 (0 % lodos activados)	90.0000	a b	-
4	3 (10 % lodos activados)	86.0000	a b	- 4.44
5	2 (5 % lodos activados)	79.3333	b	-11.85

ALS (D)_{0.05} = 17.4186, 18.2480, 18.6351, 18.9669

Fuente: elaboración propia

En la prueba de significancia de Duncan para potasio disponible a los tratamientos 2 (5 %) y 5 (20 %) son significativamente diferentes en contraste con los tratamientos 4 (15 %) y 3 (10 %) que son iguales frente al testigo.

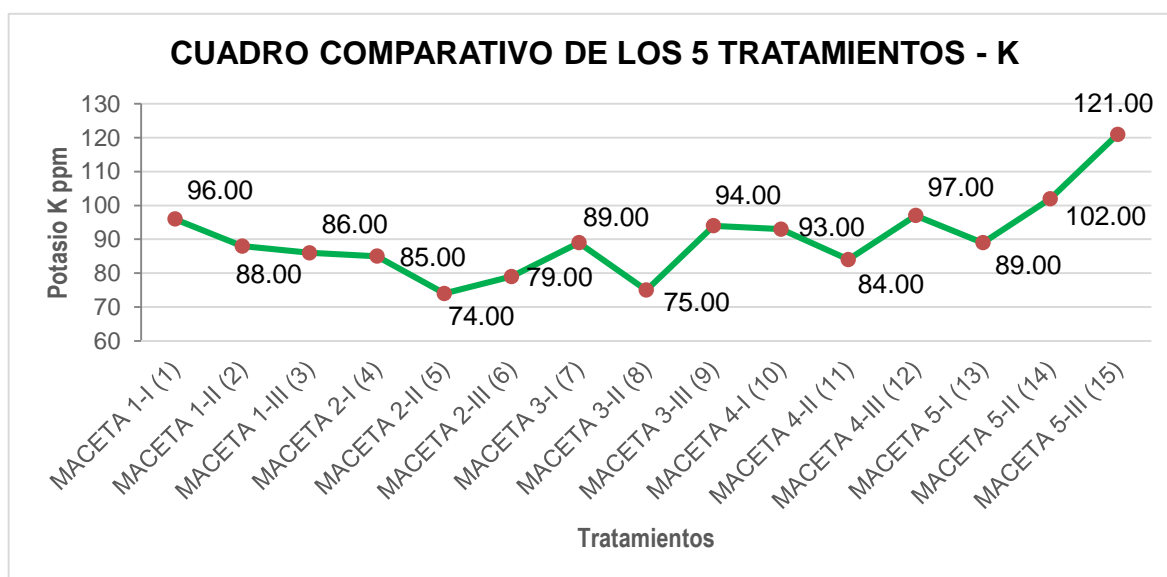


Figura 16. Cuadro comparativo de los cinco tratamientos – K

Fuente: elaboración propia

En la Figura 16 se muestran los valores desde el testigo hasta la **maceta 15**, se distingue aumento desde la **maceta 1** hasta la **maceta 15**, esto proporciona mayores nutrientes al suelo en dinámica con otros parámetros químicos como el pH y MO.

Tabla 36. Resultado de análisis de suelo, parámetro K

	TRATAMIENTOS	K
0 %	Muestra 1	96,00
	Muestra 2	88,00
	Muestra 3	86,00
	\bar{X}	90,00
5 %	Muestra 4	85,00
	Muestra 5	74,00
	Muestra 6	79,00
	\bar{X}	79,33
10 %	Muestra 7	89,00
	Muestra 8	75,00
	Muestra 9	94,00
	\bar{X}	86,00
15 %	Muestra 10	93,00
	Muestra 11	84,00
	Muestra 12	97,00
	\bar{X}	91,33
20 %	Muestra 13	89,00
	Muestra 14	102,00
	Muestra 15	121,00
	\bar{X}	104,00

Fuente: Laboratorio de Suelos, UNALM

Para el potasio en el suelo inicial presenta un resultado de 102.40 ppm, mientras que para el testigo fue de 90 ppm, para el tratamiento al 5 % fue de 79.33 ppm, para el tratamiento al 10 % fue de 86 ppm, para el tratamiento al 15 % fue de 91.33 ppm y para el tratamiento al 20 % fue de 104 ppm, esta disminución en los tratamientos se debería a que el potasio es otro de los minerales altamente asimilables por las plantas, en este caso por la *Avena sativa*, a excepción del tratamiento al 20 % que, por su mayor cantidad, representa mayor cantidad en el análisis de laboratorio, mientras para los demás tratamientos su asimilación fue aceptable.

4.1.6 Crecimiento de *Avena sativa*

4.1.6.1 Altura de planta

Tabla 37. Prueba de significación de Duncan para altura de planta de *Avena sativa* al final del experimento

Orden de Mérito	Tratamiento	MS (g)	Significación	Variación (%)
1	5 (20 % lodos activados)	32.86	a	+18.088
2	4 (15 % lodos activados)	32.6067	a	+17.178
3	2 (5 % lodos activados)	32.3467	a	+16.243
4	3 (15 % lodos activados)	32.0867	a	+15.309
5	1 (0 % lodos activados)	27.8267	b	-

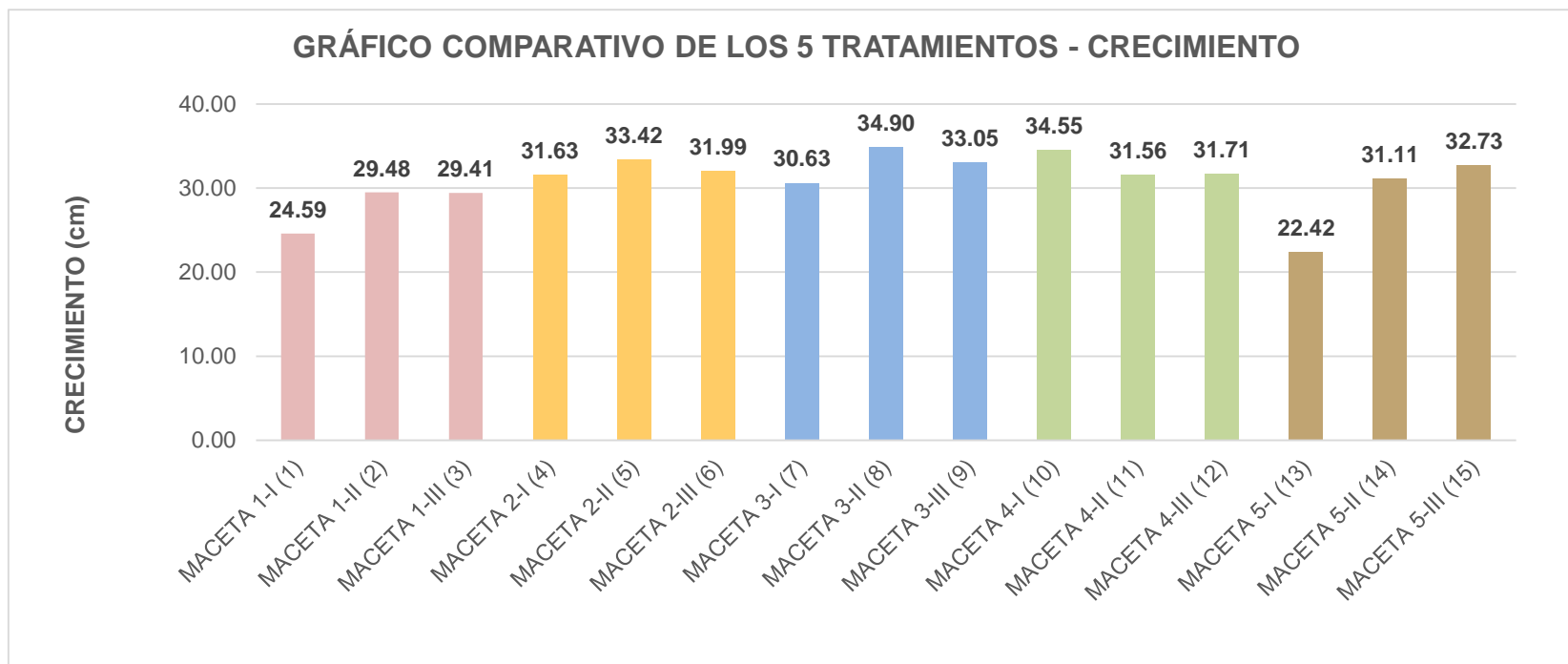
ALS (D)_{0.05} = 5.5711, 5.8364, 5.9602, 6.0663

Fuente: elaboración propia

En la prueba de significancia de Duncan para la altura de la planta el testigo (0 % de lodo activado) es significativamente diferente a los tratamientos 2 (5 %), 3 (10 %), 4 (15 %) y 5 (20 %).

4.1.6.2 Evolución del crecimiento de la *Avena sativa*

En el gráfico se observa el comportamiento de la *Avena sativa*, a los 65 días de experimento, para el testigo el rango máximo es de 29.48 cm, mientras que para el tratamiento al 5 % el valor máximo fue de 33.42 cm, para el tratamiento al 10 % el valor máximo fue de 34.90 cm, para el tratamiento al 15 % el valor máximo fue de 34.55 cm y para el tratamiento al 20 %, el valor máximo fue de 32.73. Se observan buenos niveles alcanzados para los tratamientos al 5 %, 10 % y 15 % y disminución en comparación con el tratamiento al 20 %, podría deberse a la alta dosis de lodo para este último.



	MACETA 1-I (1)	MACETA 1-II (2)	MACETA 1-III (3)	MACETA 2-I (4)	MACETA 2-II (5)	MACETA 2-III (6)	MACETA 3-I (7)	MACETA 3-II (8)	MACETA 3-III (9)	MACETA 4-I (10)	MACETA 4-II (11)	MACETA 4-III (12)	MACETA 5-I (13)	MACETA 5-II (14)	MACETA 5-III (15)
PROMEDIO TRATAMIENTOS \bar{X}	24,59	29,48	29,41	31,63	33,42	31,99	30,63	34,90	33,05	34,55	31,56	31,71	22,42	31,11	32,73

Figura 17. Análisis comparativo del crecimiento de la *Avena sativa L*
Fuente: elaboración propia

4.1.6.3 Materia seca (MS) de la parte aérea

Tabla 38. Prueba de significación de Duncan para el peso de materia seca de Avena sativa al final del experimento

Orden de Mérito	Tratamiento	MS (g)	Significación	Variación (%)
1	4 (15 % lodos activados)	3.4294	a	+236.843
2	3 (10 % lodos activados)	2.5088	b	+146.420
3	5 (20 % lodos activados)	2.4799	b	+143.581
4	2 (5 % lodos activados)	1.6886	c	+65.858
5	1 (0 % lodos activados)	1.0181	d	-

ALS (D)_{0.05} = 1.4077, 1.4748, 1.5061, 1.5329

Fuente: elaboración propia

La prueba de comparación múltiple de Duncan muestra mayor diferenciación respecto al testigo en el caso del tratamiento al 15 % de lodo activado, mientras los tratamientos al 10 % y 20 % presentaron igual sección de significancia, el tratamiento al 5 % de lodo obtuvo una comparación aislada respecto al testigo, y este se diferenció notoriamente en el contraste con los demás tratamientos.

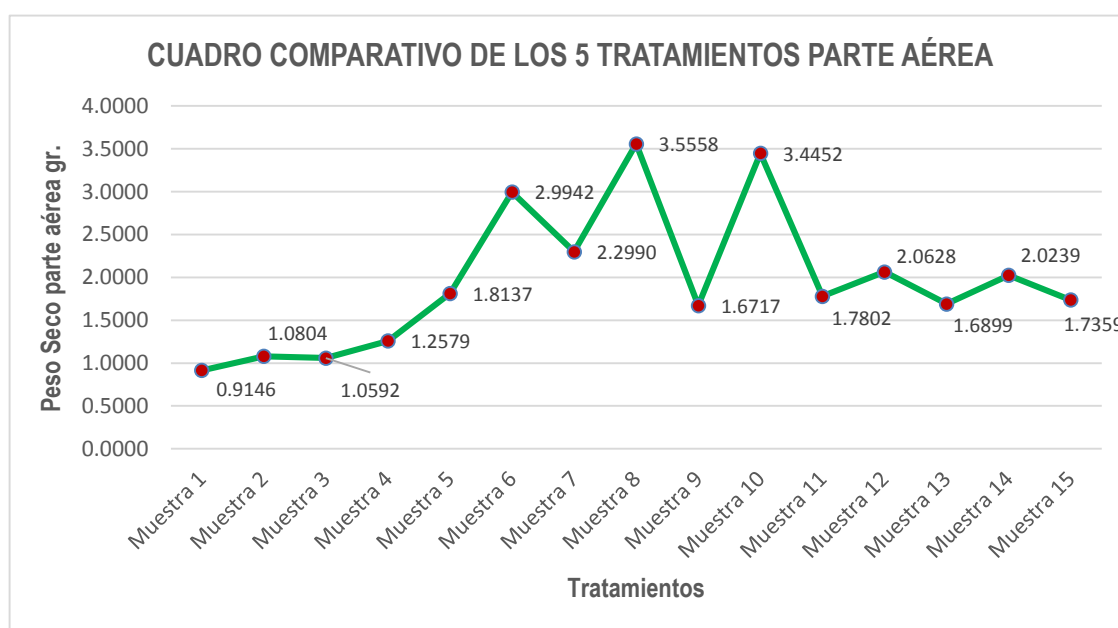


Figura 18. Cuadro comparativo de los cinco tratamientos – Parte aérea

Fuente: elaboración propia

En la Figura 18 se muestran las mediciones en cm, solo de la parte aérea de la *Avena sativa*, se distingue aumento en los valores desde el testigo hasta la **maceta 15**, con picos muy diferenciados para las **muestras 8 y 10**, siendo los más representativos en calidad para esta investigación.

4.1.6.4 Materia seca de raíz

Para la materia seca de raíz, el análisis de ANOVA muestra que el valor p-valor es 0.4875, mayor a 0.05; aceptando la hipótesis $H_0 = \text{Todas las medias son iguales}$, por consiguiente no es necesario realizar la Prueba de Duncan.

Tabla 39. Análisis de varianza de peso seco de raíz de *Avena sativa* al final del experimento

Fuentes de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F calculada	p-valor
Tratamientos	4	0.2298	0.0575	0.9240	0.4875
Error Experimental	10	0.6218	0.0622		
Total	14	0.8517			

S = 0.2494

X = 0.6235

CV = 39.9999%

Fuente: elaboración propia

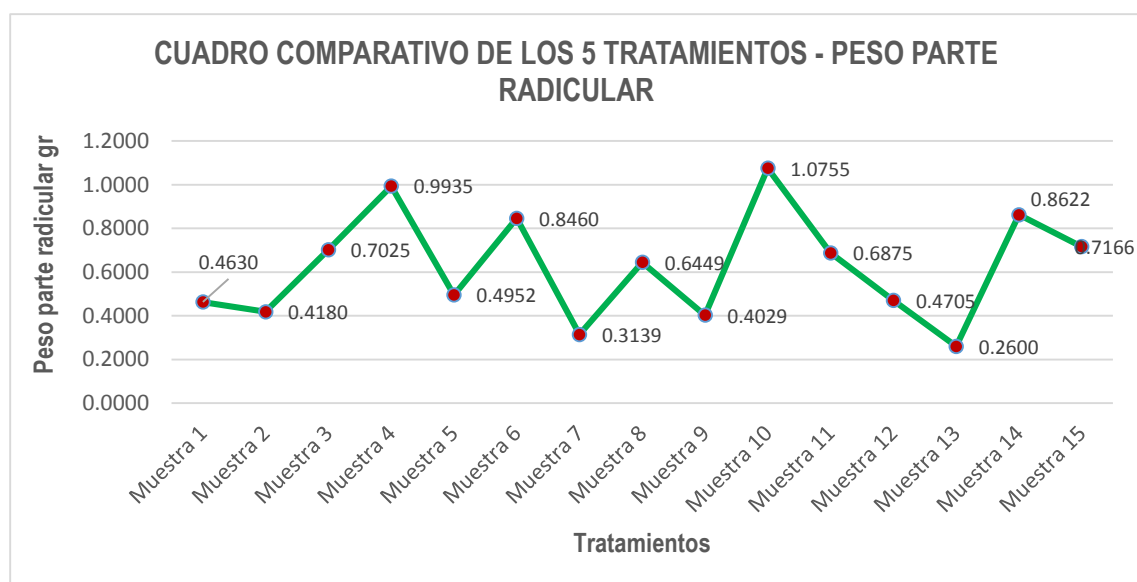


Figura 19. Cuadro comparativo de los cinco tratamientos – Parte radicular

Fuente: elaboración propia

En la Figura 19 se muestran las mediciones en gramos, de la parte radicular de la *Avena sativa*, se distingue aumento en los valores desde el testigo hasta la **maceta 15**, con picos diferenciados para las **muestras 4, 10 y 14**, el tamaño de la maceta fue determinante para el crecimiento de la raíz de la *Avena sativa*.

4.2 Discusión de resultados

El suelo de Orcotuna, según los datos reportados en la Tabla 19, tiene una textura moderadamente gruesa, un alto contenido de carbonato de calcio total, libre de exceso de sales, un pH moderadamente alcalino, contenido medio de materia orgánica, alto fósforo disponible, contenido medio de nitrógeno total y potasio disponible, una capacidad de intercambio moderadamente alta, siendo el ion calcio el catión predominante en el complejo de cambio, según las normas vigentes en el Perú (84). Esto lo califica como un suelo de fertilidad media, que requiere aporte de potasio, y materia orgánica, principalmente, para el buen desarrollo de las plantas.

La presencia de metales pesados en el suelo de Orcotuna (Tabla 20), tiene valores de plomo total y cadmio total que superan los Límites Máximos Permisibles del ECA de suelos del Perú (75) y de Canadá (6). El contenido de arsénico total supera los Límites Máximos Permisibles del ECA de suelos de Canadá. Esto está indicando que los suelos de Orcotuna, utilizados en esta investigación están contaminados por plomo, cadmio y arsénico.

El análisis químico del lodo activado (Tabla 21), presenta un pH ligeramente ácido, ligeramente afectado por exceso de sales con un contenido de carbono orgánico, nitrógeno total y fósforo dentro de los rangos aceptables, pero bajo contenido de potasio, y una relación C/N de 8.12, que califica al material orgánico de baja calidad (80), debido a la baja cantidad de nutrientes, baja relación C/N, causado por el alto contenido de nitrógeno y exceso de sales.

El análisis de metales pesados en el lodo activado, aplicado al suelo de Orcotuna, es calificado como excelente (Tabla 22), pues no supera los Límites Máximos Permisibles establecidos en México (23) ni por el D.S. N°015-2017 Vivienda (26). Esto indica que el

aporte del lodo activado en el presente experimento no incrementa el contenido de plomo, cadmio, cromo, arsénico o mercurio al suelo.

El análisis microbiológico a los lodos activados dio como resultado condiciones para la enumeración de Coliformes totales <3 y de Detección de *Salmonella sp* en ausencia (Tabla 23) esto significa que los lodos de la Ptar Concepción Doris Mendoza son aptos para agriculturas con Caracterización de Clase A, según D.S. N° 015-2017-VIVIENDA.

El efecto de la aplicación de lodos activados en las propiedades físicas del suelo (Tabla 24), presenta diferencias estadísticas significativas ($\alpha = 0.05$) para la densidad aparente en los cinco tratamientos de lodos activados, disminuyeron la densidad aparente en los tratamientos 5 (20 % lodos activados) y 4 (15 % lodos activados), con valores de 7.820 y 4.739 respectivamente, respecto al testigo. Esto se atribuye al efecto del lodo activado que disminuye la densidad aparente del suelo conforme se incrementaron las dosis. Estos datos son similares a las evidencias de investigación anteriores utilizando lodos activados. El efecto floculante y cementante de la materia orgánica mejora la estructura, y por ende la disminución de la densidad aparente, que puede ocasionarse ante un uso abundante y continuo de abonos orgánicos (24).

En las propiedades químicas, como el pH, el lodo activado aplicado al suelo en diferentes dosis tuvo diferencias estadísticas significativas en el suelo (Tabla 25). Las dosis altas de lodos activados, como fueron los tratamientos 3 (10 % de lodos activados), 4 (15 % de lodos activados) y 5 (20 % de lodos activados), disminuyeron el pH del suelo en forma significativa, superando a los tratamientos 1 (0 % de lodos activados) y 2 (5 % de lodos activados). Los incrementos porcentuales en el pH observado en los tratamientos 3, 4, 5 fueron de 3.44, 4.90 y 6.62, respectivamente. Esto se atribuye al pH del lodo activado que fue de 6.51 (Tabla 21) y que disminuyó el pH del suelo, que inicialmente fue 7.68 (Tabla 19). Estos resultados se deben a la naturaleza alcalina del suelo del experimento y la acidez del lodo activado, lo cual es contrario a lo reportado por investigadores anteriores, que afirman que el pH se incrementa en el suelo (24). Esto permite inferir que el efecto de los lodos sobre el pH del suelo, depende de las propiedades del suelo donde se va a utilizar.

La conductividad eléctrica del suelo, propiedad química evaluada al final del experimento, presenta diferencias estadísticas significativas ($\alpha = 0.05$) para los tratamientos aplicados al suelo de Orcotuna, siendo los tratamientos 5 (20 % de lodos activados), 4 (15 % de lodos activados) y 3 (10 % de lodos activados), los que superaron a los tratamientos 2 (5 % de lodos activados) y 1 (0 % de lodos activados). Los incrementos porcentuales de CE, respecto al tratamiento 1, fueron de 133.02, 105.42 y 82.34 para los tratamientos 5, 4 y 3, respectivamente (Tabla 27). Esto se atribuye a la presencia de sales en el lodo activado aplicado al suelo, cuyo valor fue de 5.97 dS/m (Tabla 21), calificado como ligeramente afectado por exceso de sales; esto contribuyó en la concentración inicial baja de sales del suelo. Aun así, los valores encontrados no afectan al suelo de Orcotuna, pues son calificados con bajo contenido de sales (72). Cuando los suelos tienen exceso de sales limitan la absorción de agua y nutrientes por las plantas (49); en este caso no es de esperar este efecto del suelo, por el bajo contenido final de sales encontrado.

El contenido de carbonato de calcio en el suelo al final del experimento no tuvo diferencias estadísticas significativas, atribuibles a las dosis de lodos activados aplicados al suelo, con un nivel de significación de $\alpha = 0.05$ (Tabla 29). Esto se atribuye al alto contenido de carbonato de calcio inicialmente encontrado en el suelo de Orcotuna (13.39 %, Tabla 19), que explica su alto pH y predominancia del calcio en el complejo de cambio.

El contenido de materia orgánica en el suelo de Orcotuna varió significativamente ($\alpha = 0.05$) debido a la aplicación de lodos activados al suelo (Tabla 31), encontrándose valores entre 2.0100 % a 2.6167 %, siendo los mayores valores los de mayor proporción de lodos activados (tratamiento 4: 15 % de lodos activados), esto se presentó debido al contenido medio de carbono orgánico del lodo aplicado al suelo (14.13 %), pero con un suelo de contenido medio de materia orgánica (Tabla 21). Estos datos muestran un incremento significativo de materia orgánica en el suelo con la aplicación del lodo activado. Los datos de anteriores investigaciones reportan el beneficio de la aplicación de lodos activados debido a la cantidad relativamente alta de materia orgánica que contiene (22) y (21), lo cual fue corroborado con la presente investigación.

El fósforo disponible en el suelo al final del experimento fue afectado significativamente por las dosis de lodos activados aplicados, con incrementos porcentuales de 30.85, 19.94 y 19.74 para los tratamientos 2 (5 % de lodos activados), 4 (15 % de lodos activados) y 3 (10 % de lodos activados), respecto al testigo (Tabla 33). Los valores encontrados están calificados como altos (41). Esto se atribuye al alto contenido de fósforo presente en el lodo activado (68). Los datos corroboran lo reportado por otros investigadores (16) y (24) y es probable que el tratamiento de los lodos también haya contribuido a la mayor presencia de P en el lodo, que ha incrementado el nivel de P disponible en el suelo, debido al proceso de remover fósforo del efluente y depositarlo en el lodo (9).

El potasio disponible en el suelo de Orcotuna, fue afectado significativamente ($\alpha = 0.05$) por la aplicación de dosis crecientes de lodos activados, siendo el tratamiento 5 (20 % de lodos activados) el que sobresalió con un valor promedio de 104 ppm de K (Tabla 35). El incremento porcentual observado para potasio en el suelo, debido a la aplicación de lodos activados en el tratamiento 5 fue de 15.56 %, un valor relativamente bajo si lo comparamos con lo hallado para fósforo. Esto se debe a que el K generalmente no está disponible en forma abundante en el lodo (Tabla 21). Estos datos están corroborados por otros reportes, que indican que los lodos son generalmente bajos en nutrientes, especialmente potasio (9) y (16). Los datos encontrados en el trabajo de investigación muestran un aporte de potasio del lodo activado a pesar de tener bajo contenido, pero complementado con el contenido medio de K del suelo.

El efecto de los lodos activados en los parámetros evaluados del crecimiento de la *Avena sativa*, presentó diferencias estadísticas significativas ($\alpha = 0.05$), en la evaluación de materia seca de la parte aérea (Tabla 38), y altura de planta (Tabla 31), pero no para el peso seco de raíz (Tabla 39), estos indicadores de crecimiento de la avena que se refieren a la acumulación de biomasa (10), han sido afectados por la aplicación de lodos activados, debido principalmente al aporte de materia orgánica, que mantuvo los niveles del componente orgánico en el suelo en niveles medios (68). Este cereal tiene buena producción en suelos bien drenados y razonablemente fértiles (35); pero en el caso de los suelos de Orcotuna se calificaron como de fertilidad media, requiriendo aportes de potasio y materia orgánica, que a través del lodo activado mostró diferencias en su crecimiento por la adición de lodos activados.

Por lo tanto, respecto al crecimiento de la parte aérea (Tabla 38) sí se observó diferencia de la aplicación del lodo activado, pero no para el peso seco de la raíz (Tabla 39) esto podría atribuirse al espacio reducido de las raíces en las macetas, en los 65 días de crecimiento aproximado de la *Avena sativa*.

CONCLUSIONES

1. La aplicación de lodos activados al suelo contaminado de Orcotuna afectó positivamente a las propiedades físico-químicas de la siguiente manera:
 - 1.1 Los tratamientos 4 (15 % de lodos activados), 5 (20 % de lodos activados) y 3 (10 % de lodos activados) disminuyeron la densidad aparente del suelo, respecto al testigo (tratamiento 1 = 0 % de lodos activados), debido al incremento de materia orgánica.
 - 1.2 El pH del suelo de Orcotuna disminuyó significativamente por la aplicación de lodos activados, siendo los tratamientos 3 (10 % de lodos activados), 4 (15 % de lodos activados) y 5 (20 % de lodos activados), los que tuvieron menor pH, atribuible al pH del lodo activado.
 - 1.3 La conductividad eléctrica incrementó significativamente, en los tratamientos 5 (20 % de lodos activados), 4 (15 % de lodos activados) y 3 (10 % de lodos activados), atribuible al alto contenido de sales en el lodo activado.
 - 1.4 Los tratamientos 2 (5 % de lodos activados), 4 (15 % de lodos activados) y 3 (10 % de lodos activados) incrementaron significativamente el contenido de fósforo disponible en el suelo.
 - 1.5 El tratamiento 5 (20 % de lodos activados) sobresalió en el incremento de potasio disponible en el suelo, con un incremento del 15.56 % respecto al testigo (Tratamiento 1 = 0 % de lodo activado).
 - 1.6 El contenido de carbonato de calcio no varió significativamente debido a la aplicación de dosis crecientes de lodos activados.
 - 1.7 El contenido de materia orgánica del suelo fue afectado significativamente por la aplicación de lodos activados, sobresaliendo el tratamiento 4, con 2.6167 % de materia orgánica, mientras que el testigo solo alcanzó 2,01 % de materia orgánica.

2. Las dosis crecientes de lodos activados aplicados al suelo de Orcotuna, incrementaron la altura de planta a excepción del tratamiento 5 (20 % de lodo activado) y materia seca de la parte aérea, pero no afectaron significativamente la materia seca de raíz, del cultivo de avena, esto puede deberse a la capacidad de las macetas.
3. El análisis bacteriológico de los Coliformes fecales en los lodos residuales en la PTAR Concepción muestran que son aprovechables para el uso agrícola, según las normas peruanas, estas son <3 para Coliformes fecales y totales, de igual manera para *Salmonella sp.*
4. Por lo tanto, la aplicación de lodos activados de la PTAR Concepción es considerada como buen acondicionador de suelo por sus propiedades anteriormente demostradas, siendo los tratamientos 3 (10 % de lodos activados) y 4 (15 % de lodos activados), las que en este trabajo de investigación se recomiendan para la aplicación al suelo, ya que el tratamiento 5 (20 % de lodo activado) presenta características de saturación y descenso en el crecimiento y propiedades físico-químicas.

RECOMENDACIONES

1. Analizar previamente el suelo al cual se va a aplicar el lodo activado, ya que esta enmienda orgánica varía en propiedades físicas y químicas distintas a la de los abonos convencionales.
2. Analizar el suelo en fracciones y especies iónicas de metales pesados antes de aplicar los lodos activados.
3. Analizar al lodo activado en sus propiedades bacteriológicas en aplicaciones seguidas por años futuros.
4. Al utilizar los lodos activados deben pasar previamente por un proceso de trituración ya que facilitará su manipulación, estos en su estado natural presentan un grado de dureza.
5. Comparar diferentes fuentes de materiales orgánicos, además de los lodos activados, para evaluar su efecto en las propiedades de suelos contaminados con metales pesados, utilizando otras especies vegetales como plantas indicadoras.
6. Utilizar correctamente los equipos de protección personal al momento de manipular las diferentes enmiendas, ya que hasta su análisis no se conoce si hay contaminación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. LOVELOCK, James. La tierra se Agota. Cali Colombia: Editorial Planeta Colombia S.A., 2009.
2. JIMÉNEZ, Raimundo y NAVARRO, José. Introducción a la Contaminación de suelos. España: Imprenta Graficas Eujoa, 2017.
3. SEOÁNEZ, Mariano y otros. Contaminación del suelo: estudios, tratamiento y gestión. Madrid: Mundi-Prensa, 1998.
4. CALDERA, Yaxcelys, GUTIÉRREZ, Edixon y BLANCO, Edith. Caracterización físicoquímica y microbiológica de lodo residual como acondicionador de suelo durante el crecimiento de un cultivo de Cebollin (*Allium fistulosum* L.). Maracaibo: s.n., 2007. Vol. 15, 3.
5. GARAY, Óscar y OCHOA, Álex. Primera aproximación para la identificación de los diferentes tipos de suelo agrícola en el Valle del Río Mantaro. [ed.] Instituto Geofísico del Perú. Pronóstico estacional de lluvias y temperaturas en la Cuenca del río Mantaro para su aplicación en la agricultura. Lima: s.n., 2010.
6. REVIVE, Caritas Huancayo, El mantaro. Avance de resultados de la Evaluación de Calidad Ambiental de los recursos agua y suelo. Huancayo: s.n., 2007.
7. NOTICIA, Agencia Peruana de. Relaves mineros en río Mantaro afectan más de 20 mil hectáreas de cultivos en Junín. Andina. Fin de semana, 2008, Vol. II.
8. WISCONSIN Department of Natural Resource. Introduction to active sludge study guide. Wastewater operator certification. USA: s.n., 2010.
9. WEIL, Raymond y BRADY, Nyle. The nature and Properties of Soils. New York, Usa: Pearson, 2016. 15.
10. FAGERIA, Nand, BALIGAR, Virupax y CLARK, Ralp. Physiology of crop production. USA: Food Products Press, 2006.
11. GÁLVEZ, Sandra. Efecto de la aplicación de los lodos provenientes de la planta de tratamiento de aguas residuales sobre el suelo. Lima, Perú: Universidad Agraria la Molina, 2014.
12. ADUVIRI, Lidia. Comportamiento agronomico de tres variedades de Avena (*Avena sativa* L.) con aplicación de materia orgánica en la estación experimental de Choquenaira. La Paz, Bolivia: Universidad Autónoma de Nuevo León, 2014.

13. FLORES, Edgar, MORENO, Hector, y FIGUEROA, Uriel. Disponibilidad de nitrógeno y desarrollo de avena forrajera (*Avena sativa* L.) con aplicación de biosólidos. Chapingo, Mexico: Terra Latinoam, 2014. Vol. 32, II.
14. WOO, Jose. Estudio de la viabilidad en la aplicación de lodos activados en suelo para los cultivos de maíz (*Zea mays* L.) y nopal (*Opuntia ficus-indica*). Nuevo Leon, México: Universidad Autónoma de Nuevo León, 2003.
15. HERNÁNDEZ, Jose Maria. Uso de lodos residuales procedentes de la ciudad de Durango y su efecto en la productividad y concentración de metales en Sorgo forrajero. Marín, México: Universidad de Nuevo León, 2004.
16. HENRÍQUEZ, Olivia. Análisis y criterios mínimos para la aplicación de lodos tratados provenientes de plantas de tratamiento de aguas servidas en agrosistemas de la provincia de Melipilla. Melipilla, Chile: s.n., 2011.
17. RUGIERO, Vanessa. Suelos potencialmente aptos para revegetación o uso agrícola a partir de la utilización de biosólidos provenientes de las plantas de tratamiento de aguas servidas. Chacabuco, Chile: s.n., 2006.
18. PAZ, Carmen., HENRÍQUEZ, Olivia, y FRERES, Rodolfo. Posibilidades de aplicación de lodos o biosólidos a los suelos del sector norte de la región Metropolitana de Santiago. Santiago, Chile: Revista de Geografía Norte Grande, 2007. 37. 35-45.
19. CAMPOS, Medina, GARCÍA, Norma, y VELÁSQUEZ, Alma. Análisis básico del reuso de lodos residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales en suelos de pradera del Parque Nacional Nevado de Toluca. Toluca, Mexico: Quivera, 2009. Vol. 2, 35-51.
20. AGUILERA, Maria, BORIE, Gilda y PEIRANO, Pedro. Chemical Characterization of Sewage Sludges in Chile and Their Potential Utilization as Amendment to Reclaim Soils for Forestation Purposes. USA: Journal of Plant Nutrition, 2007. 30.
21. BOZKURT, Aehmet, AKDENIZ, Hakki y KESKIN, Ibrahim. Possibilities of using sewage sludge as nitrogen fertilizer for maize. USA: Acta agriculture Scandinavica Section B-Soil and Plant Science, 2006. 56. 143-149.
22. LAVADO, Raúl. Effects of sewage-sludge application on soils and sunflower yield: quality and toxic element accumulatio. Journal of Plant Nitrition. Buenos Aires, Argentina: s.n., 2006. 29. 275-984.

23. NORMA OFICIAL MEXICANA. Protección ambiental. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. NOM-004-SEMARNAT. México: s.n., 2002.
24. SORBER, Charles. Biosolis, a blue print for public acceptance. Water Environment and Technology. s.l.: Water Environment Federation. 6:5:6:1.
25. MIRSAL, Ibrahim. Soil Pollution. Origin, Monitoring & Remediation. s.l.: Springer, 2010. Vol. II edition.
26. MINISTERIO DE VIVIENDA Y SANEAMIENTO. Decreto Supremo que aprueba el Reaprovechamiento de los Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales. D.S. N° 015-2017-VIVIENDA. Lima Perú: s.n., 2017.
27. ARAGON, Cruz. Optimización del proceso de lodos activos para producir la generacion de fangos residuales. Cádiz, España: Universidad de Cádiz, 2009.
28. MILIEU Ltd., WRc, & RPA. Environmental, economic and social impacts of the use of sewage sludge on land (Final report for the European Commission. s.l.: DG Environment under Study Contract DG ENV, 2008. Vol. G.4. ETU.
29. HAVLIN, John, TISDALE, Samuel, WERNER Nelson and BEATON James. Soil Fertility and Fertilizers. An Introduction to Nutrient Management. New York, USA: Pearson. , 2014. Eighth edition.
30. BERTSCH, Floria. La Fertilidad de los Suelos y su Manejo. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. San José, Costa Rica: s.n., 1998.
31. OROPEZA, Norma. Lodos residuales: Estabilización y manejo. Universidad de Quintana, Departamento de Ingeniería. Roo, México: s.n., 2006.
32. Organizacion de las Naciones Unidas para la Alimentacion y la Agricultura. Propiedades Biológicas. Suelos de la FAO. USA: s.n., 2017.
33. FLORES, Edgar y MORENO Hector. Disponibilidad del Nitrógeno y Desarrollo de Avena Forrajera (Avena sativa L.) con aplicación de Biosolidos. Durango, Mexico: s.n., 2014.
34. Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EEUU. Resumen de Salud Pública Arsénico (CAS # 7440-389-2). USA: s.n., 2007. 1-3.
35. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR). La toxicidad del arsénico: Estudios de Caso en Medicina Ambiental (CSEM). Estados Unidos: s.n., 2013. 01. 11-17.

36. BOTLE, James y BROWN, Paul. Arsenic immobilization by calcium arsenate formation. *Environmental Science and Technology*. Pennsylvania: s.n., 1999. Vol. 33, 21. 3806-3811.
37. WENZEL, Walter, KIRCHBAUMER, Natalie, PROHASKA, Thomas, STINGEDER, Gerhard, LOMBI, Enzo, & ADRIANO, Domy. Arsenic fractionation in soils using an improved sequential extraction procedure. *Analytica Chimica Acta*. 2001. Vol. 436, 2. 309-323.
38. DOBRAN, Simona, & ZAGURY, Gerald. Arsenic speciation and mobilization in CCA-contaminated soils: Influence of organic matter content. *Science of the Total Environment*. Montréal, Canada: s.n., 2006. Vol. 365, 3. 239-250.
39. GRAFE, Markus y EICK, Matthew Adsorption of arsenate (V) and arsenite (III) on goethite in the presence and absence of dissolved organic carbon. *Soil Science Society of American Journal*,. USA: s.n., 2001. Vol. 65, 6. 1980-1687.
40. REDMAN, Aaron, MACALADY, Donald, & AHMANN, Dianne. Natural organic matter affects arsenic speciation and sorption onto hematite. *Environmental Science and Technology*. 2002. Vol. 36, 13. 2889-2896..
41. JIANG, Wei, ZHANG, Shuzhen, SHAN, Xiao-Quan y FENG, Muhua, Adsorption of arsenate on soils. Part 1: Laboratory batch experiments using 16 Chinese soils with different physicochemical properties. *Environmental Pollution*. 2005. Vol. 2, 138. 285-289.
42. LIU, Fang, DE CRISTÓFARO, Alessio & VIOLANTE, Antonio. Effect of pH, phosphate and oxalate on the adsorption/desorption of arsenate on/from goethite. *Soil Science*,. 2001. Vol. 3, 166. 197-208.
43. VIOLANTE, Antonio, & PIGNA, Massimo. Competitive sorption of arsenate and phosphate on different clay minerals and soils. *Soil Science Society of American Journal*. 2002. Vol. 6, 66. 1788-1796.
44. SAADA, Alain, BREEZE, Dominique, CROUZET Catherine, CORNU, Sophie, & BARANGER, Philippe. Adsorption of arsenic (V) on kaolinite and on kaolinite-humic acid complexes role of humic acid nitrogen groups. *Chemosphere*. 2003. Vol. 8, 5. 757-763.
45. LIN, Haw-Tarn, WANG, Minchao & LI, Gwochen. Complexation of arsenate with humic substance in water extract of compost. *Chemosphere*. 2004. Vol. 11, 56. 1105-1112.

46. MUKHOPADHYAY Sanyal, MANI, Pabitra and SANYAL, Saroj. Effect of phosphorus, arsenic and farmyard manure on arsenic availability in some soils of west Bengal. *Journal of the Indian Society of Soil Science*. 2002. Vol. 50, 1. 56-61.
47. ALLOWAY, Brian. *Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability*. Environmental Pollution. s.l.: Springer Science+Business Media Dordrecht. 22.
48. GOLDBERG, Sabine & SUÁREZ, Donald. Anion sorption on a calcareous, montmorillonitic soil-Arsenic. *Soil Science Society of American Journal*. 1988. Vol. 5, 52. 1297-1300..
49. SMITH, Euan y NAIDU, Ravi. Chemistry of arsenic in soils: I. Sorption of arsenate and arsenite by four Australian soils. *Journal of Environmental Quality*. 1999. Vol. 6, 28. 1719-1726.
50. GOLDBERG, Sabine & GLAUBIG, Reim. Anion sorption on a calcareous, montmorillonitic soil-Arsenic. *Soil Science Society of American Journal*. 1988. Vol. 5, 52. 1297-1300.
51. SMITH, Erwin y NAIDU, Ravi. Chemistry of inorganic arsenic in soils: II. Effect of phosphorus, sodium, and calcium on arsenic sorption. *Journal of Environmental Quality*. 2002. Vol. 2, 31. 557-563.
52. JIMÉNEZ, Raimundo. *Introducción a la Contaminación de los suelos, España, (Meres, Asturias)*. Asturias, España: Imprenta Graficas Eujoa, 2017.
53. *Toxicological Profile for Arsenic*. U.S. Health Service Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Department of Health and Human Services. Atlanta, Estados Unidos: s.n., 2007. ATSDR.
54. Instituto de nutrición de Centro America y Panama INCAP/OPS. *Selección preparación y conservación de alimentos*. s.l.: Cadena, 2000. Vol. II, 6.
55. GUERRERO, Juan Miguel. *Asistencia médica dirigida en Análisis de Suelo y fertilización en el cultivo de Avena forrajera*. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Peru: s.n., 2012. 4-6.
56. Ministerio de Agricultura y Riego-MINTRA. *Sistema Integrado de Estadística Agraria*. Dirección de Información Agraria. Junin, Perú: s.n., 2018. II.

57. DOMÍNGUEZ, Alonso. Tratado de Fertilización. Madrid, España: Mundi Prensa, 1997. Vol. III. ISBN: 84-7114-622.
58. FLORES, Arturo. Manual de pastos y forrajes altoandinos. Lima, Perú: OIKOS, 1985. Vol. Serie Manuales 28.
59. MENDIETA, Carla y TAISIGUE, Katerine. Acumulación y traslocación de metales, metaloides y no metaloides en plantas nativas de la zona de Chontales: Implicaciones para el potencial de fito-remediación. Managua, Nicaragua: APPEAR, 2014.
60. GARCÍA, Elizabeth y HERNÁNDEZ, Elizabeth. Contenido y Translocación de plomo en avena (*Avena sativa* sp, L.) y haba (*Vicia faba*, L.) de un suelo contaminado. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Hidalgo, México: s.n., 2010.
61. NACIONES UNIDAS. Recuperado de <http://research.un.org/es/docs/environment/conferences>. Documentación de la ONU: Medio Ambiente. [En línea] Mayo de 2018.
62. EPA United States Environmental Protection Agency. Oficina del agua. Washington, EE. UU.: s.n., 2000.
63. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. Reglamento para el Manejo de Lodos Generados en Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas. Santiago de Chile, Chile: s.n., 2010.
64. Gobierno Democrático Peruano. Constitución Política del Perú. Congreso Constituyente Democrático. Lima, Perú: s.n., 1933.
65. Ministerio del Ambiente. Decreto Legislativo N° 1013 Aprueba la Ley de Creación, Organización y Funciones del Ministerio del Ambiente. Lima Perú: El Peruano, 2008.
66. Gobierno Democrático del Perú. www.oefa.gob.pe. Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental. [En línea] Abril de 2018.
67. Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento, Condiciones Mínimas de Manejo de Lodos y las Instalaciones para su disposición final, R.M. N° 128-2017-Vivienda. Lima Perú: El Peruano, 2017.
68. Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento. General de asuntos Ambientales y Oficina General de Asesoría Jurídica del Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento. R.M. N°128-2017-Vivienda. Lima, Perú: El Peruano, 2017.

69. Soil Science Society American SSSA. Glossary of Soil Science Terms. Wisconsin, USA: Madison, 2015.
70. Organización Mundial de la Salud. Guías para la calidad del agua potable. Nueva York, Peru: s.n., 2006. Vol. III, 244 - 246.
71. Organización de las Naciones Unidas, Recuperado de <http://who.int/mediacentre/factsheets/fs125/es/> . Centro de Prensa Escherichia coli. [En línea] Mayo de 2018.
72. Dirección General de Salud Ambiental - Ministerio de Salud. R.M. 553-2010-MINSA. Guía Técnica: Procedimiento de Toma de Muestra del Agua de Mar en Playas de Baño y Recreación. [En línea] 2010.
73. Organización de las Naciones Unidas. Recuperado de <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs139/es/>. Centro de Prensa Salmonella (no tifoidea) . [En línea] Mayo de 2011.
74. MANI Dinesh. Soil Pollution. New Delhi: APH Publishing Corporation, 2012.
75. Ministerio del Ambiente-MINAM. Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelo. D.S. N° 011-2017-MINAM. s.l.: Diario Oficial El Peruano, 2017. 491497-491500.
76. BARIRD, Colin. Química Ambiental. Madrid, España: Reverte S.A., 2001.
77. NUNEZ, Tenorio. Metodología de las Ciencias Sociales. Barcelona, España: Editorial Laia S.A., 1989.
78. CERRAGA, Jose. Metodología de la Investigación Científica y Tecnológica. Madrid, España: Editorial Díaz de Santos, 2012.
79. Dirección Regional de Agricultura Junín-DRAJ. Resultado de la encuesta de intención de siembra en la región Junín, campaña agrícola 2018-2019. Huancayo, Perú: s.n., 2018.
80. FAO-Oficina Regional para América Latina y el Caribe. Manual del compostaje del agricultor. Experiencias en América Latina. Santiago de Chile, Peru: s.n., 2013.
81. Ministerio del Ambiente-MINAM. Guía para muestreo de suelo. Decreto Supremo N° 002-2013-MINAM. Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelo. Lima, Perú: El Peruano, 2013.
82. Municipalidad de Concepción. Distrito de Orcotuna. Recuperado de http://municoncepcion.gob.pe/nuestra_ciudad/lugares_turisticos/distrito-de-orcotuna-lugares-turisticos/). Junin, Perú: s.n., 2018.

83. Universidad Agraria la Molina UNALM. Laboratorio de análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes. Tabla de interpretación. La Molina, Perú: s.n., 2016.
84. Ministerio de Agricultura y Riego-MINAGRI. Reglamento de Clasificación de Tierras según su Capacidad de Uso Mayor. Lima, Perú: s.n., 2009.