

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN RECURSOS
NATURALES RENOVABLES**



**EFFECTO DE LA ESCORIA COMO ENMIENDA ENCALANTE PARA EL
CULTIVO DE CEBADA (*Hordeum vulgare*) EN UN SUELO ÁCIDO DEL
DISTRITO DE SINCOS – JUNÍN**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES,
MENCIÓN: CONSERVACIÓN DE SUELOS Y AGUA**

PRESENTADO POR:

DIXIE SZOCHOVA CHUQUIMIA VALDEZ

2020



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María – Perú
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 010-2021-FRNR-UNAS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 10 de setiembre de 2020, a horas 07:00 p.m. en la Sala virtual Microsof Teams de del Escuela Profesional de Ingeniería en Conservación de Suelos y Agua para calificar la Tesis titulada:

“EFECTO DE LA ESCORIA COMO ENMIENDA ENCALANTE PARA EL CULTIVO DE CEBADA (*Hordeum vulgare*) EN UN SUELO ÁCIDO DEL DISTRITO DE SINCOS – JUNÍN”

Presentado por el Bachiller: **CHUQUIMIA VALDEZ, Dixie Szochova**, después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADA** con el calificativo de **“BUENO”**

En consecuencia, el sustentante queda apto para optar el Título de **INGENIERO DE LOS RECURSOS NATURALES RENOVABLES MENCIÓN: CONSERVACIÓN DE SUELOS Y AGUA**, que será aprobado por el Consejo de Facultad, tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título correspondiente.

Tingo María, 16 de Abril de 2021

Dr. LUCIO MANRIQUE DE LARA SUAREZ
PRESIDENTE

Dr. ROBERTO OBREGON PEÑA
MIEMBRO

Ing. M. Sc. ERLE OTTO J. BUSTAMANTE SCAGLIONI
MIEMBRO

Ing. M. Sc. JOSE LEVANO CRISOSTOMO
ASESOR



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA EN RECURSOS NATURALES
RENOVABLES



**EFFECTO DE LA ESCORIA COMO ENMIENDA ENCALANTE PARA EL
CULTIVO DE CEBADA (*Hordeum vulgare*) EN UN SUELO ÁCIDO DEL
DISTRITO DE SINCOS – JUNÍN**

Autor	: CHUQUIMIA VALDEZ, Dixie Szochova		
Asesor	: Ing. M.Sc. LEVANO CRISOSTOMO, José		
Programa de investigación	: Ciencias básicas		
Línea de investigación	: Ecología y conservación de suelos		
Eje temático de investigación	: Manejo de abonos orgánicos		
Lugar de ejecución	: Universidad Nacional Agraria la Molina		
Duración	Fecha de inicio	: 01 de agosto del 2017	
	Termino	: 30 de enero del 2018	
Financiamiento	Otros	: SI	
	Monto	: S/. 5,232.00	

DEDICATORIA

A Dios por darme la oportunidad de vida para lograr todas mis metas día a día. A mis padres Sócrates Pedro Chuquimia Aroquipa y Aleja Soraida Valdez Anchapuri por su amor, apoyo constante e incondicional, y por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo, responsabilidad y valentía

A mis hermanas Carmen y Jeaneth por su apoyo incondicional, gracias por existir y vivir a mi lado, también por su entusiasmo y motivación muestras de cariño hacia mi persona y por sus consejos.

Finalmente quiero dedicar esta tesis a todas mis amistades, por su constante motivación por concluir esta etapa de mi vida.

AGRADECIMIENTO

A mi asesor, Ing. MSc. LEVANO CRISÓSTOMO, José, por su apoyo desinteresado e invaluable durante el desarrollo de la investigación.

A mi coasesor Dr. GARCÍA BENDEZU, Sady; de la presente tesis por brindarme su amistad y asesoramiento en el desarrollo científico y académico del presente trabajo de investigación.

A los docentes de la Facultad de Recursos Naturales Renovables, quienes me formaron con sus enseñanzas teóricas y prácticas a lo largo de mi carrera universitaria.

Al Laboratorio de Análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria la Molina, por brindarme sus instalaciones y el apoyo en la ejecución del trabajo de investigación.

A los miembros del jurado de tesis; Dr. MANRIQUE DE LARA SUARES, Lucio; Dr. OBREGON PEÑA, Roberto y al; Ing. Mg. BUSTAMANTE ESCAGLIONI, Erle; por sus oportunas sugerencias.

A todas mis amistades de la universidad quienes de diferentes maneras contribuyeron en el desarrollo y culminación de la presente investigación: Tulio Olivas Alvarado, Rosmeri Arteaga, Mildred Coronel Leandro y Abigail Gambini.

ÍNDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Objetivo general	2
1.2. Objetivos específicos	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. La acidez del suelo.....	3
2.1.1. Origen de la acidez.....	3
2.1.2. Clasificación de la acidez del suelo	5
2.1.3. Potencial hidrogeno (pH) de los suelos	5
2.1.3.1. El pH y la asimilabilidad de los nutrientes	8
2.1.4. Efecto de la acidificación de suelos	9
2.1.5. Efecto del encalado sobre las propiedades del suelo	10
2.2. Manejo de suelos ácidos.....	11
2.2.1. Encalado.....	11
2.2.1.1. Materiales de encalado y sus reacciones en el suelo	14
2.2.1.1.1. Carbonato de calcio (CaCO_3).....	15
2.2.1.1.2. Óxidos de cal (CaO)	15
2.2.1.1.3. Hidróxido de cal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)	16
2.2.1.1.4. Silicatos de calcio	16
2.2.1.1.5. Escorias industriales	16
2.3. Generalidades de la escoria siderúrgica	17
2.3.1. Escoria y su importancia en la agricultura	18
2.3.1.1. El silicio (Si) en el suelo	20
2.3.1.2. Plomo.....	20
2.3.1.3. Cadmio.....	21
2.3.1.4. Cromo	22

2.4.	Metales pesados en el suelo en relación con el pH	22
2.4.1.	Fitotoxicidad de los metales pesados	24
2.5.	Contenido de metales pesados en la planta y en otros entes	25
2.5.1.	Nutrición vegetal	25
2.5.2.	Nutrición de las plantas	27
2.5.3.	Disponibilidad del nitrógeno en el grano y follaje	27
2.5.3.1.	Calcio en la planta	28
2.5.3.2.	Mg en la planta	29
2.5.4.	Trabajos de investigación	29
2.6.	Estandares de calidad ambiental para el suelo	30
2.7.	Fuente de producción de los metales pesados	30
2.7.1.	Metales pesados y su implicación en la calidad del suelo	31
III.	MATERIALES Y MÉTODOS	33
3.1.	Ubicación del campo experimental	33
3.1.1.	Ubicación geográfica	33
3.2.	Materiales y Equipos	34
3.2.1.	Insumos	34
3.2.2.	Materiales	34
3.2.3.	Equipos	34
3.3.	Método y procedimiento	35
3.3.1.	Muestreo de suelo	35
3.3.2.	Análisis de caracterización	35
3.3.3.	Análisis de la escoria	36
3.3.4.	Material biológico	37
3.3.5.	Fase macetería	37
3.3.6.	Fase de fertilización	38
3.3.7.	Parámetros en evaluación	39
3.3.7.1.	Altura de la planta	40
3.3.7.2.	Peso fresco de la planta (g)	40

3.3.7.3. Rendimiento de la materia seca (parte aérea)	40
3.3.7.4. Determinación del contenido de metales pesados en el suelo.....	40
3.3.8. Diseño Experimental.....	41
3.3.9. Variables investigadas.....	42
3.3.9.1. Variable dependiente	42
3.3.9.2. Variable independiente	42
3.4. Procesamiento de datos.....	42
IV. RESULTADOS	44
4.1. Efecto de la escoria siderúrgica en el pH y en la acidez cambiabile 44	
4.1.1. Efecto de la escoria siderúrgica en el pH	44
4.1.2. Efecto de la escoria en la acidez cambiabile	46
4.2. Efecto de la aplicación de escoria sobre la concentración de metales pesados totales en el suelo	49
4.2.1. Efecto de la escoria en el Pb totales en el suelo	49
4.2.1.1. Efecto de la escoria de Pb totales en el suelo	49
4.2.2. Efecto de la escoria en el Cd total del suelo	51
4.2.2.1. Efecto de la escoria en el Cd total del suelo	51
4.2.3. Efecto de la escoria en el Cr totales del suelo	54
4.2.3.1. Efecto de la escoria en el Cr total del suelo	54
4.3. Efecto de la aplicación de escoria sobre la materia seca de la planta indicadora cebada (<i>Hordeum vulgare</i>)	56
4.3.1. Metales pesados en el grano.....	56
4.3.1.1. Efecto de la escoria con respecto al Pb en el grano 56	
4.3.1.2. Efecto de la escoria con respecto al Cd del grano ...	59
4.3.1.3. Efecto de la escoria con respecto al Cr en el grano 62	
4.3.2. Elementos esenciales en el grano	62

4.3.2.1. Calcio en el grano	62
4.3.2.2. Magnesio en el grano.....	65
4.3.3. Altura de la planta.....	67
4.3.4. Peso fresco del grano.....	70
4.3.5. Peso seco del grano	72
V. DISCUSIÓN.....	75
5.1. Efecto de la escoria siderúrgica en el pH y en la acidez cambiabile 75	
5.2. Efecto de la aplicación de escoria sobre la concentración de metales pesados en el suelo.....	76
5.3. Efecto de la aplicación de escoria sobre la materia seca de la planta indicadora cebada (<i>Hordeum vulgare</i>)	78
VI. CONCLUSIONES.....	84
VII. RECOMENDACIONES.....	88
VIII.ABSTRACT	89
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
ANEXO	97

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
1. Condiciones de pH para el desarrollo de las plantas.	7
2. Composición típica de escorias (%).	19
3. Características del suelo.	36
4. Analisis de la escoria.	37
5. Dosis de escoria y fertilizantes nitrogenados a emplear en los tratamientos.	38
6. Disolución de fertilización por etapa.	39
7. Análisis de varianza.	42
8. Análisis de varianza para la variable pH.	44
9. Prueba de Tuckey al 5% de probabilidad para la dosis de nitrógeno.	45
10. Prueba de Tuckey al 5% en la dosis de escoria.	46
11. Análisis de varianza para la variable acidez cambiabile.	47
12. Prueba de Tuckey al 5% de probabilidad para la dosis de escoria.	47

13. Prueba de Tuckey al 5% en la dosis de escoria en la acidez cambiabile.	48
14. Análisis de varianza para el Pb total del suelo.....	49
15. Prueba de Tuckey al 5% de probabilidad para el Pb total del suelo.	50
16. Prueba de Tuckey al 5% en la dosis de escoria en el Pb total del suelo.	51
17. Análisis de varianza para el Cd total del suelo.....	52
18. Prueba de Tuckey al 5% de probabilidad para el Cd total del suelo.	52
19. Prueba de Tuckey al 5% en la dosis de escoria en el Cd total del suelo.....	53
20. Análisis de varianza para el Cr total del suelo.	54
21. Prueba de Tuckey al 5% de probabilidad para el Cr total del suelo.	55
22. Prueba de Tuckey al 5% en la dosis de escoria en el Cr total del suelo.....	56
23. Análisis de varianza del Pb en el grano.	57
24. Prueba de Tuckey al 5% de probabilidad de Pb en el grano.	57
25. Prueba de Tuckey al 5% en la dosis de escoria en el Pb del grano.	58

26. Análisis de varianza del Cd en el grano.....	60
27. Prueba de Tuckey al 5% de probabilidad de Cd en el grano.	60
28. Prueba de Tuckey al 5% en la dosis de escoria en el Cd del grano.	61
29. Análisis de varianza del Calcio en el grano.....	63
30. Prueba de Tuckey al 5% de probabilidad de Calcio en el grano.....	63
31. Prueba de Tuckey al 5% en la dosis de escoria en el Calcio del grano.....	64
32. Análisis de varianza del Magnesio en el grano.....	65
33. Prueba de Tuckey al 5% de probabilidad de Magnesio en el grano.	66
34. Prueba de Tuckey al 5% en la dosis de escoria en el Magnesio del grano.....	67
35. Análisis de varianza para la altura de la planta.....	68
36. Prueba de Tuckey al 5% de probabilidad para la altura de la planta.	68
37. Prueba de Tuckey al 5% en la dosis de escoria en la altura de la planta.....	69
38. Análisis de varianza para la variable peso fresco del grano.	70

39. Prueba de Tuckey al 5% de probabilidad en el peso fresco del grano. .	70
40. Prueba de Tuckey al 5% en la dosis de escoria en el peso fresco del grano.....	71
41. Análisis de varianza para la variable peso seco del grano.	72
42. Prueba de Tuckey al 5% de probabilidad en el peso seco del grano.....	73
43. Prueba de Tuckey al 5% en la dosis de escoria en el peso seco del grano.....	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Proceso de acidificación del suelo.	4
2. Gama extrema de pH y rangos para la disponibilidad de nutrientes.....	6
3. Influencia del pH sobre la disponibilidad de nutrientes "Diagrama de Trough".	8
4. Reacción de desplazamiento y neutralización del aluminio de intercambio por efecto del encalado.	13
5. Equivalentes químicos y composición química de materiales de encalados puros.....	17
6. Limitaciones legales relativas al contenido en metales pesados para la utilización agrícola de lodos de depuradora.....	23
7. Limitaciones legales relativas al contenido en metales pesados para la utilización agrícola de lodos de depuradora.....	24
8. Contenido de elementos metálicos en el suelo.....	25
9. Resumen de la composición en metales pesados de diferentes entes naturales.	26

10. Alteraciones fisiológicas que producen algunos metales pesados que contaminan las plantas.	26
11. Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para el suelo.....	30
12. Valores promedios de Nitrógeno en el pH del suelo.	44
13. Valores promedios de Escoria en el pH del suelo.....	45
14. Valores promedios de Nitrógeno en la acidez cambiante.	46
15. Valores promedios de Escoria en la acidez cambiante.....	47
16. Valores promedios de Nitrógeno de Pb total del suelo.	50
17. Valores promedios de Escoria de Pb total en el suelo.....	51
18. Valores promedios de Nitrógeno de Cd totales del suelo.....	52
19. Valores promedios de Escoria de Cd en el suelo.	52
20. Valores promedios de Nitrógeno de Cr total del suelo.....	54
21. Valores promedios de Escoria de Cr total en el suelo.	55
22. Valores promedios de Nitrógeno en el Pb del grano.....	57
23. Valores promedios de escoria en el Pb del grano.....	58

24. Valores promedios de Nitrógeno en el Cd del grano.	60
25. Valores promedios de Escoria en el Cd del grano.	62
26. Valores promedios de Nitrógeno en el Calcio del grano.	63
27. Valores promedios de escoria en el Calcio del grano.	64
28. Valores promedios de Nitrógeno en el Magnesio del grano.	65
29. Valores promedios de Escoria en el Magnesio del grano.	66
30. Valores promedios de Nitrógeno en la altura de la planta.	67
31. Valores promedios de escoria en la altura de la planta.	68
32. Valores promedios de Nitrógeno en el peso fresco del grano.....	71
33. Valores promedios de Escoria en el peso fresco del grano.	72
34. Valores promedios de Nitrógeno en el peso seco del grano.....	72
35. Valores promedios de escoria en el peso seco del grano.....	73
36. Análisis físico – químico de las muestras de suelo; desde el T ₁ R ₁ hasta el T ₄ R ₅	98
37. Análisis inicial: físico – químico de las muestras de suelo; desde el T ₅ R ₁ hasta el T ₈ R ₅	99

38. Análisis inicial: físico – químico de las muestras de suelo; desde el T ₉ R ₁ hasta el T ₁₀ R ₅	100
39. Análisis especial de la escoria de siderurgia.....	101
40. Análisis especial química del grano de la planta del T ₁ R ₁ al T ₄ R ₅	102
41. Análisis especial química del grano de la planta del T ₅ R ₁ al T ₈ R ₅	103
42. Análisis especial química del grano de la planta del T ₉ R ₁ al T ₁₀ R ₅	1044
43. Tamizado del suelo en una malla de 2 mm de apertura.	1055
44. Regado del suelo a capacidad de campo.	1055
45. Aplicación de fuentes nitrogenadas.	1066
46. Sembrado de semillas en cada maceta.	106
47. Preparación de las fuentes nitrogenadas.....	107
48. Evaluación de las plantas por fertilización y encalado.	1077
49. Molida de las muestras (follaje y raíz).....	1088
50. Pesado de la materia seca de la planta.	1088

RESUMEN

La presente investigación se realizó en el campo experimental del Laboratorio de Conservación de suelos en el LASPAF de la Universidad Nacional Agraria la Molina, el objetivo fue evaluar el efecto del encalado con la escoria de siderúrgica en un suelo ácido de Jauja, Junín, en cebada (*Hordeum vulgare*).

La fuente de encalante utilizada fue aplicada en dosis crecientes de 0, 1.435, 2.87, 5.74 y 11.48 (mg/100 g suelo) en macetas de 2.500 kilos, para que mas adelante pueda ser incubada al 80% de su capacidad de campo por un espacio de 45 días. Inmediatamente para la fertilización se utilizó el Fosfato monoamónico, Nitrato de potasio, Nitrato de amonio, donde se obtuvieron dosis de N evaluados de 100 y 200 mg/ kg⁻¹ y por último el Sulfato de magnesio, de las cuales la fertirrigación se realizó durante ocho semanas en dos etapas. Se aplicó un diseño experimental completamente al azar con 10 tratamientos y 5 repeticiones, con arreglo factorial de 2 fuentes de N (100 y 200 mg/ kg⁻¹) y cuatro dosis de escoria, en el que se evaluó el pH después de la incubación y cosecha, así también fue evaluada la acidez cambiante, concentración de metales pesados en el suelo y la aplicación de la escoria en la materia seca de la planta indicadora. Los resultados mostraron los efectos del encalado en el suelo, se encontraron que la escoria de siderúrgica aplicada a dosis de 5.74 y 11.48 (mg/100g de suelo) incremento el pH, y como reacción disminuyo la acidez cambiante del suelo. Para el caso de los metales pesados los niveles de Pb y Cr (total), se situó por debajo del límite máximo permisible en la dosis (D0 y D1). Mientras que para el Cd (total), se situó por encima del límite máximo permisible,

en todos los tratamientos. En el caso de el grano de la planta la presencia del Pb y Cd se obtuvieron menos concentración en los tratamientos T1 y T2 a diferencia del Cr de las cuales no se encontraron presencia alguna en ningún tratamiento, y para los elementos Ca y Mg la mayor concentración se encontraron en los tratamientos T9 y T10 respectivamente. Para la variable altura de planta, peso fresco y seco del follaje indico que existen diferencias altamente significativas para los niveles de nitrógeno (N) y para las fuentes de escoria (E), Asimismo se observó que para la interacción de niveles de nitrógeno y fuentes de escoria (N*E) no se presentó diferencias estadísticas. Finalmente con relación a la variable del peso fresco y seco del grano que no existen diferencias significativas para los niveles de nitrógeno (N), fuentes de escoria (E) y para la interacción de los factores en estudio (N*E).

I. INTRODUCCIÓN

La acidez del suelo ha sido tema de numerosas discusiones, ya que plantea un problema de gran importancia en la agricultura, de las cuales puede haber problemas de toxicidad y a la vez repercutir en el desarrollo vegetal. Como ya se conoce los suelos de condiciones desfavorables ácidos no son pertinentes para el desarrollo de los cultivos, por lo que es preciso enmendar su pH tratando de reemplazar los cationes hidrógeno por cationes calcio, esta operación se llama encalado y es una técnica común que se utiliza.

Algunas investigaciones realizadas con escoria como fuente encalante han demostrado el poder de la misma para aumentar el contenido de calcio y magnesio de modo que neutraliza la acidez del suelo. A la vez cabe mencionar que está compuesta principalmente de óxidos, silicatos, hierro, caliza, magnesio y manganeso, y podría ser usado como enmienda agrícola para suelos de la sierra y la selva con problemas de acidez y toxicidad de aluminio. (ZAPATA, 2004).

Actualmente el Perú en el sector siderúrgico incremento su producción en 1,144 millones de toneladas en acero crudo (WORLDSTEEL ASSOCIATION, 2012). Propagando así gran cantidad de residuo intrínseco fundido de metales pesados conocido como la escoria. Esta se genera durante

la etapa de fusión de materia prima (chatarra, metales usados y lingotes de metal) como impureza, además su composición está en función del tipo de materia prima utilizada y del control de variables operacionales.

Siendo así que esta escoria representa una gran alternativa sostenible ya que aportaría a la descontaminación ambiental, por lo que se trataría de determinar. ¿Es la aplicación de escoria como encalante una fuente peligrosa de metales pesados disponibles?, teniendo como hipótesis que la aplicación de escoria es una fuente encalante adecuada y no aporta cantidades significativas de metales pesados al sistema suelo planta.

1.1. Objetivo general

- Efecto de la escoria como enmienda encalante para el cultivo de cebada (*Hordeum vulgare*) en un suelo ácido del distrito de Sincos – Junín.

1.2. Objetivos específicos

- Evaluar el efecto de la escoria de siderurgia en el pH y acidez cambiante.
- Determinar el efecto de la aplicación de escoria sobre la concentración de metales pesados solubles en el suelo.
- Evaluar el efecto de la aplicación de escoria sobre la materia seca de la planta indicadora cebada (*Hordeum vulgare*).

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. La acidez del suelo

Un suelo desfavorable ácido es una sustancia que propende a liberar protones (iones de hidrógeno). Una base es cualquier sustancia que recibe protones.

Las soluciones que contienen PH menor de 5.5 se genera por la actividad de los iones de hidrógeno (H^+). Usando estos principios químicos, la acidez en el suelo se disuelve calibrando la actividad de H^+ en la solución del suelo y se exterioriza en términos de un parámetro llamado potencial de hidrógeno (ESPINOSA Y MOLINA, 1999).

2.1.1. Origen de la acidez

La acidificación es un proceso natural que ocurre por: lixiviación de proporciones considerables de bases cambiables que inicialmente estaban retenidas en la matriz del suelo y son reemplazados por hidrógenos (BRADY y WEIL, 2008) hidrólisis de cationes metálicos (Al^{3+}), CO_2 proveniente de la respiración microbiana que pasa a H_2CO_3 generando hidrogeniones, presencia de grupos ácidos orgánicos provenientes de la materia orgánica que también son

fuentes de H^+ , lluvia ácida (SPOSITO, 2008) y por actividades agrícolas como el uso de fertilizantes amoniacales (Figura 1) (BOHN, 2001).

La acidez no integra un factor limitante para el acrecentamiento de las plantas, sino que en realidad es el efecto tóxico del aluminio en la solución suelo cuando la concentración de éste es mayor a 1 ppm el que ocasiona serios problemas ecológicos (JOHNSON, 2002).

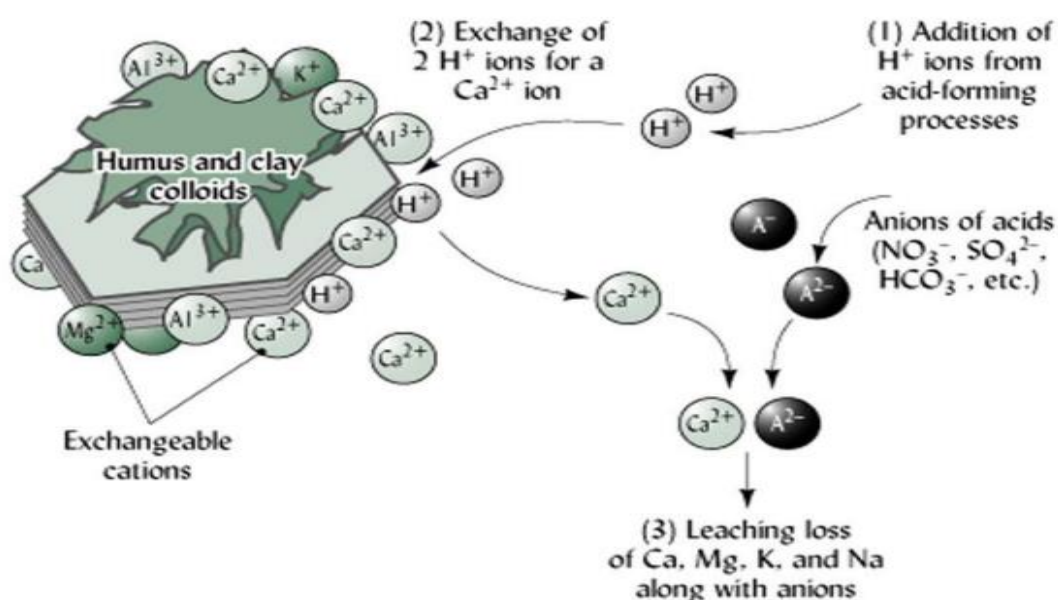


Figura 1. Proceso de acidificación del suelo.

Fuente: (BRADY y WEIL, 2008).

Se investigaron las causas de la acidificación natural del suelo, así como los efectos de las influencias antropogénicas, que consisten en la adición de ácidos fuertes al suelo, ya sea a través de la lluvia ácida, a través de la oxidación de la piritita en antiguas minas de carbón, a través de la acidificación de fertilizantes. Procesos que no tienen suficiente capacidad amortiguadora para la degradación de suelos (BREEMEN, 1991).

La acidificación de un suelo se define como una disminución en la capacidad de neutralización del ácido y / o un aumento en la capacidad de neutralización de la base y / o un aumento en la fuerza del ácido (el pH disminuye) (ULRICH Y SUMNER, 1991).

2.1.2. Clasificación de la acidez del suelo

Se clasifica en las siguientes categorías:

Acidez activa: son los iones H^+ presentes en una solución. Se mide con el potenciómetro selectivo de H^+ .

Acidez intercambiable: suma de H^+ y Al^{3+} intercambiables retenidos en los coloides al pH del suelo. Se establece en meq/100g ó cmolc/kg.

Acidez no intercambiable o residual: H^+ y Al^{3+} en enlace covalente en la estructura de los cristales filosilicatos o la materia orgánica.

Acidez titulable: La suma de base fuerte requerida cede para transferir el pH a un valoración determinada. Se mide en meq/100g ó cmolc/kg. La añadidura de la acidez intercambiable y la acidez no intercambiable corresponde a la acidez titulable (ESPINOSA Y MOLINA, 1999; AMABELIA, 2012).

2.1.3. Potencial hidrogeno (pH) de los suelos

El pH del suelo se vincula a la acción de los iones H^+ en la solución suelo. El nivel de pH en la mayoría de suelos minerales va de 3,6 a 10,4 (Figura 2).

El pH del suelo se debe a muchos factores que incluyen, además de los cinco que afectan la estructura del suelo, la temporada del año, las prácticas culturales, el paisaje muestreado, el volumen del agua en el momento del muestreo y la práctica utilizada para encontrar el PH del suelo.

La vegetación afecta el pH del suelo debido a la producción de materia orgánica y también porque interfiere con el proceso de lavado. La agregación de materia orgánica degradable al suelo produce la formación de ácidos orgánicos que aumentan la capacidad y el rendimiento de cationes pero que reducen la proporción de saturación de bases y por tanto el pH.

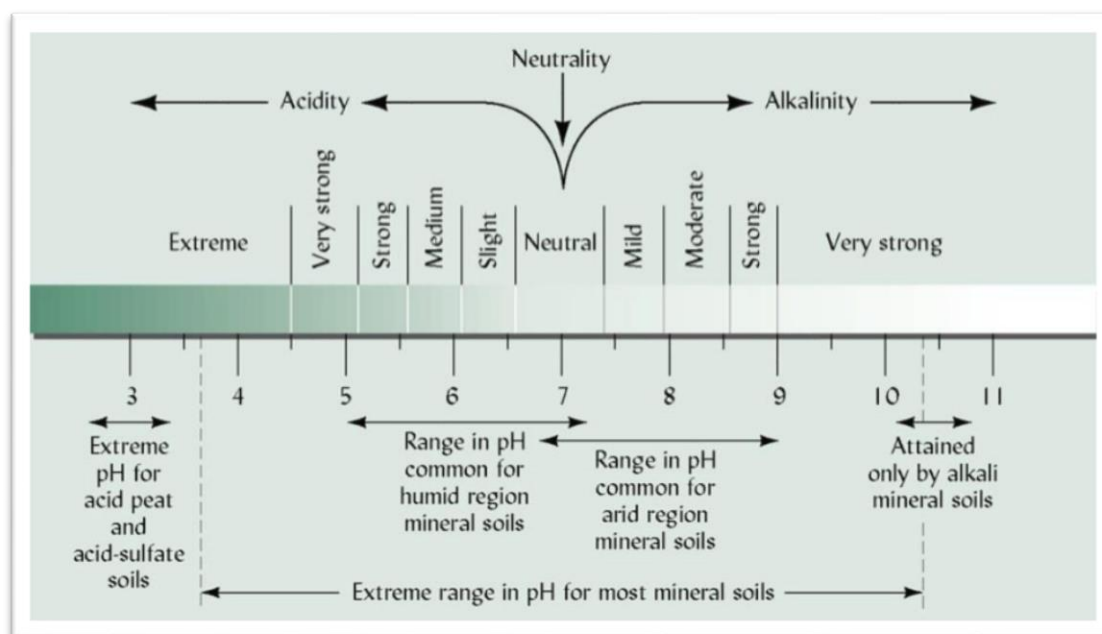


Figura 2. Gama extrema de pH y rangos para la disponibilidad de nutrientes.

Fuente: (BRADY y WEIL, 2008).

El aprovechamiento de nutrientes del suelo está condicionada por el pH, algunos nutrientes se pueden obstaculizar en designadas condiciones de pH y no son asimilables para las plantas. Los valores de pH 6-7,5 son selectas condiciones para el florecimiento de las plantas (Cuadro 1). Cuando el pH de los

suelos ácidos se eleva de 5 hacia la neutralidad, nutrientes como el hierro, manganeso y zinc no están disponibles; mientras que el molibdeno aumento de la disponibilidad. El fósforo tiende a ser deficiente en la mayor parte de suelos, aunque una mayor disponibilidad se observa alrededor de pH 6.5 (BRADY Y WEIL, 2008).

Cuadro 1. Condiciones de pH para el desarrollo de las plantas.

pH	Evaluación	Efectos
Menor de 4,5	Extremadamente ácido	Escenario muy desfavorables
4,5 – 5	Muy fuertemente ácidos	Posible efectos de toxicidad
5,1 – 5,5	Fuertemente ácido	Insuficiente asimilación de algunos elementos
5,6 – 6	Medianamente ácido	Apto para la mayoría de los cultivos
6,1 – 6,5	Ligeramente ácido	Apropiado para la asimilación de nutrientes
6,6 – 7,3	Neutro	Efectos tóxicos mínimos
7,4 – 7,8	Medianamente básico	Presencia de carbonato de calcio
7,9 – 8,4	Básico	Baja asimilación de algunos nutrientes
8,5 – 9	Ligeramente alcalino	Problemas de clorosis
9,1 – 10	Alcalino	Presencia de carbonato sódico
> 10	Fuertemente alcalino	Escasa asimilación de algunos nutrientes

Fuente: USDA (2004), citado por BRADY y WEIL (2008).

En suelos cultivados, cuando existentes condiciones adecuadas para los organismos vivos, el pH disminuye como consecuencia de los ácidos

producidos por microorganismos y los exudados producidos por las plantas (BRADY Y WEIL, 2008).

2.1.3.1. El pH y la asimilabilidad de los nutrientes

FERTIBERIA (2002) señala que el pH del suelo interviene de manera definitiva en forma asimilable en los distintos nutrientes vegetales. Dentro del rango de pH que proporciona buenas condiciones en la fijación de aquellos que se encuentran en un rango pH entre 6 y 7 (Figura 3).

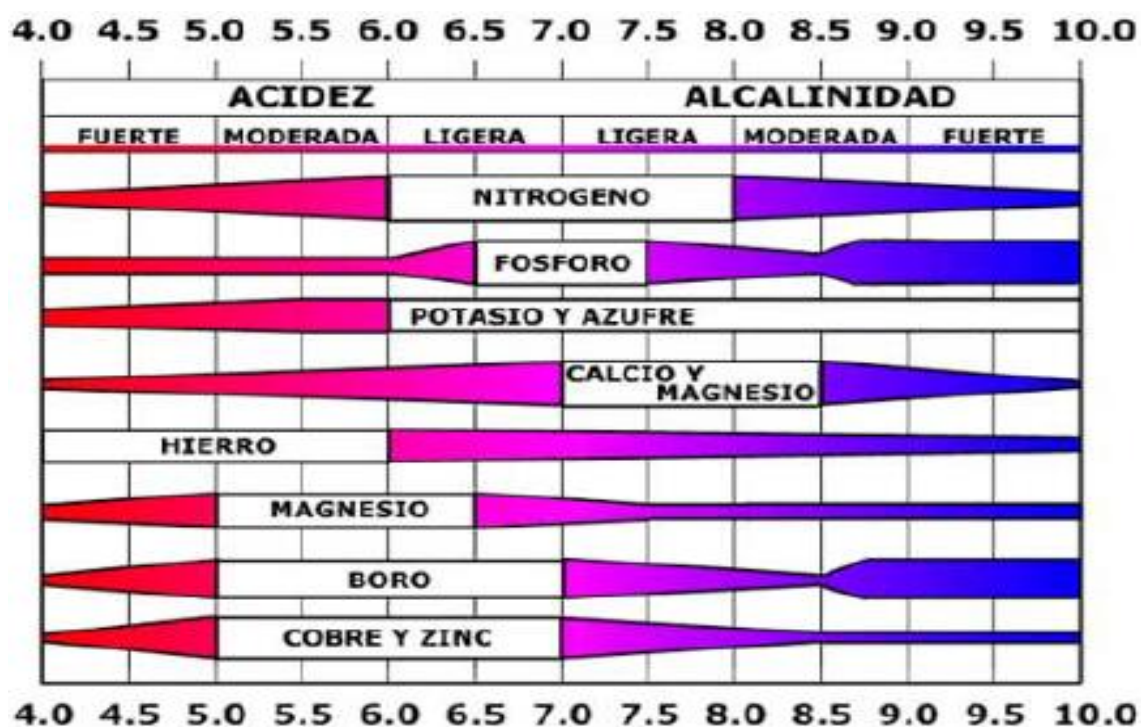


Figura 3. Influencia del pH sobre la disponibilidad de nutrientes "Diagrama de Trough".

Fuente: FERTIBERIA (2002).

Se deben impedir valores de pH inferiores a 5 y (pH 4 se dañaría la raíz de la mayoría de los cultivos). Deben evitarse valores de pH por debajo de 5 y (pH 4, la raíz de muchos cultivos se dañaría). Asimismo, evitar valores

superiores a 6,5 donde la disponibilidad de determinados micronutrientes disminuiría drásticamente.

Se debe tener en cuenta que en suelos o sustratos orgánicos, debido a su capacidad amortiguadora, las alteraciones del pH ocurren a largo plazo, sin embargo, en la mayoría de los sustratos minerales tiene una capacidad amortiguadora muy baja y las alteraciones del pH ocurren rápidamente (FERTIBERIA, 2002) .

2.1.4. Efecto de la acidificación de suelos

El resultado que se originan cuando localizamos un suelo ácido son los siguientes:

- Baja disponibilidad de nutrientes (P^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}) al ser intercambiados por otros cationes como H^+ o Al^{3+} .
- Peligro de hallar proporciones tóxicos de Al^{3+} , Mn^{2+} y algunos metales que en medios ácidos alcanzan a ser muy móviles.
- El Al^{3+} causa un declive en el desarrollo de las plantas actuando a dos niveles: impidiendo el crecimiento y división celular, el Mn^{2+} ocasiona deterioros en las partes aéreas de las plantas: manchas necróticas en los tallos y manchas rodeadas de un halo de necrosis en las hojas, aparte de aparecer arrugadas.
- Debilidad de la condición de debilitamiento del suelo.

- El descenso del crecimiento de plantas y de los procesos microbiológicos, especialmente si el pH es < 4 , perdiendo aporte de materia orgánica (<biomasa y la nitrificación esta desfavorecida), conllevando a una extenuación de la estructura de agregados que beneficiaría la aireación y el movimiento de agua, formando costras superficiales que incrementan la escorrentía y disminuyen la lixiviación (ZAPATA, 2004).

2.1.5. Efecto del encalado sobre las propiedades del suelo

Las causas del encalado en el suelo son ciertos efectos como el aumento del pH; neutralizar Al, Mn y Fe; proporcionar Ca y Mg; optimizar las condiciones biológicas y promover un entorno propicio para el aprovechamiento de los nutrientes por parte de las plantas. BORNEMISZA Y FASSBENDER (1965), describen que el efecto encalado mejora la estructura del suelo y que también afecta muchas propiedades fisicoquímicas y biológicas. Asimismo, el encalado evita la formación de fosfatos de Fe y Al ya que se neutralizan el Fe y Al existentes en el suelo. En suelos donde la formación de fosfatos de Fe o Al es importante, estos pueden incrementar su solubilidad al encalar suelos de pH 5 a 6. Al respecto, SHERMAN (1971), asegura que la disponibilidad de P en suelos tropicales es función de la naturaleza de los fosfatos complejos de aluminio y hierro, que resultan de la reacción del P llevado al suelo con Al y Fe. Si los hidróxidos de Al y Fe están en estados amorfos altamente hidratados, la unión

en formas complejas será más rápida, pero si estos elementos existen en formas de óxido cristalino como gibita y hematita, la unión se reduce considerablemente.

2.2. Manejo de suelos ácidos

Dado que la deposición atmosférica fundamental causa de la acidificación del suelo, una de los sistemas de remediación sería contraer las emisiones de SO₂ y NO₂ acortando el uso y la combustión de los combustibles fósiles que las crean. Naturalmente, se recomienda el uso de cultivos tolerantes y por tanto crecer sin problema en estas tierras, o a su vez corregirlo mediante técnicas como el encalado con enmiendas (AMABELIA, 2012).

Las prácticas de manejo que conducen al mejoramiento químico de estos suelos deben considerar el uso de cal, pruebas de incubación de laboratorio y medición de los parámetros químicos involucrados en el manejo de la acidez para definir las dosis óptimas de neutralización. MUNEVAR, 2013).

2.2.1. Encalado

El encalado se ocupa de la aplicación masiva de sales básicas cuya finalidad es anular la acidez del suelo provocada por el hidrógeno y el aluminio. Los productos que se emplean como correctores de acidez de suelos son esencialmente carbonatos, óxidos, hidróxidos y silicatos de calcio y magnesio.

La divergencia naturaleza química, los materiales presentan una capacidad de neutralización variable (MOLINA, 2008).

La neutralización de los materiales calcáreos no es directamente al calcio y al magnesio, se debe a las bases químicas a las que se unen estos cationes: CO_3^{2-} , OH^- y SiO_3^{2-} . Los cationes sustituyen los iones ácidos en posiciones intercambiables y los disuelven, y cuando la cal entra en contacto con el agua del suelo, estas sales básicas se desvinculan y generan cationes y OH^- (ESPINOSA Y MOLINA, 1999).

Los OH^- creados por carbonatos, hidróxidos y silicatos equilibran la acidez del suelo facilitando la precipitación del aluminio en forma de $\text{Al}(\text{OH})_3$ y la formación de agua, las reacciones de neutralización de la acidez del suelo puede ser ilustrado como el siguiente formulario (Figura 4) (MURILLO, 2010).

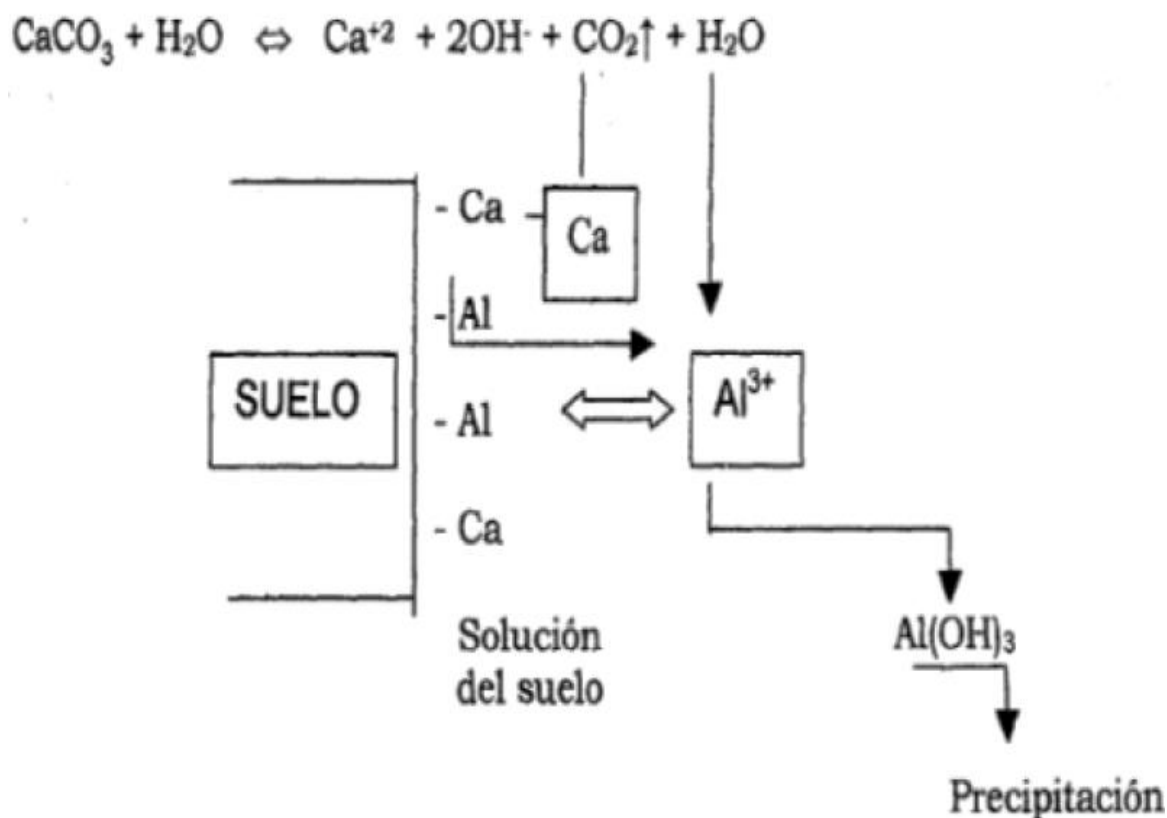


Figura 4. Reacción de desplazamiento y neutralización del aluminio de intercambio por efecto del encalado.

Fuente: (BRADY y WEIL, 2008).

En el diagrama anterior se concluye que el Ca^{2+} en absoluto no interviene en la neutralización de la acidez, todo lo contrario es que el anión CO_3^{2-} es quien al hidrolizarse produce iones OH^- que equilibran los iones H^+ y hidrólisis de Al^{3+} y precipitan (BRADY Y WEIL, 2008). El desarrollo inverso puede ocurrir, ya que los iones básicos como Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ consiguen eliminarse del suelo por absorción en las plantas o por lixiviación, siendo reemplazados por Al^{3+} . En tanto que ocurre este proceso, la actividad de H^+ aumenta y el pH del suelo disminuye. La acidificación gradual del suelo mejora en el momento que se utilizan altas dosis de fuentes nitrogenados o amoniacales (MOLINA, 2008).

Con el incremento de pH algunos iones H^+ que han sido retenidos fuertemente a través del enlace covalente con las arcillas y la materia orgánica pueden ser liberados (BRADY Y WEIL, 2008).

Los resultados directos e indirectos del encalado sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas se detallan a continuación:

- Mejora la agregación de las partículas que inciden en un buen desarrollo de la estructura, permitiendo favorables condiciones de aeración y movimiento del agua, favoreciendo el desarrollo radicular e incrementando la actividad biológica, especialmente bacterias, con lo cual se aumenta la mineralización de la materia orgánica y disponibilidad de nitrógeno, fósforo y azufre.
- Incorpora al suelo Ca^{2+} y Mg^{2+} para neutralizar la acidez, y al mismo tiempo reduce el contenido del Al^{3+} y Mn^{2+} tóxico.
- Aumenta del porcentaje de saturación de bases.
- Influye sobre la efectividad de los fertilizantes, ya que encalando se estabiliza la reacción del suelo (MOLINA, 2008).

2.2.1.1. Materiales de encalado y sus reacciones en el suelo

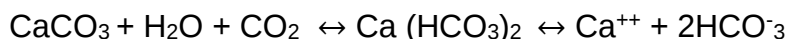
Los productos de refinamiento minerales u orgánicos son productos que, al ser incorporados al suelo, cambian positivamente sus propiedades físicas y / o químicas independientemente de su valor como fertilizante. La palabra cambio incluye el correctivo por la acidez del suelo (MAGRA Y AUSILIO, 2004).

En la agricultura existe una gran cantidad de áridos y materiales encalados (HANS, 1978).

2.2.1.1.1. Carbonato de calcio (CaCO₃)

Forma parte de las rocas calizas con un porcentaje entre el 60 y 96 % (equivalente entre 24 y 38 % de CaO). El resto suele integrarse por carbonato magnésico, arena, bajo condiciones específicas se forman calizas dolomíticas (CaMg (CO₃)₂) que puedan tener hasta 40% de MgCO₃.

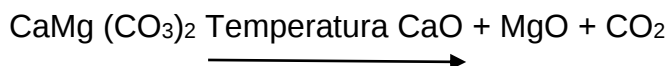
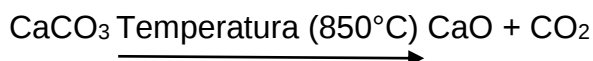
La reacción de disolución del carbonato de calcio sigue la ecuación:



Los iones de calcio y/o magnesios resultantes reemplazan al H⁺ y Al³⁺ del complejo de intercambio, resultando los cambios de pH y las otras características de la tierra.

2.2.1.1.2. Óxidos de cal (CaO)

Se obtienen carbonizando los carbonatos, anteriormente descritos, en hornos intermitentes o continuos. El producto se denomina en lo general, cal viva. La reacción de descarbonatación se representa como sigue:



El contenido de Ca crece bastante mediante este proceso, alcanzando de 82 a 96% CaO. La supremacía del uso de la cal viva se da a la mayor rapidez de la reacción de los gránulos de cal con el complejo coloidal que el carbonato original.

La descarbonatación de la caliza magnésica ocurre a temperaturas más bajas que el carbonato cálcico. La fabricación de las calizas semicalcinadas se basa en decarbonatar la fracción magnésica quedando intacto el carbonato de calcio.

2.2.1.1.3. Hidróxido de cal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)

Se denomina cal apagada y es adquirido hidratando la cal viva. Generalmente tiene incluso hasta de 95% de CaO. Lo demás son suciedad como arena, arcillas y otros óxidos.

2.2.1.1.4. Silicatos de calcio

Algunos silicatos técnicos de calcio, aunque son de baja solubilidad, se usan también como enmienda de encalado.

2.2.1.1.5. Escorias industriales

Estos son subproductos de la elaboración de acero. Están compuestas de forma variable de acuerdo al tipo de proceso del hierro utilizado.

ALCARDE y RODELLA (2003) informan que los materiales de encalado que tengan Mg son más eficaces que los que contengan Ca a pesar

de que el Mg posee un peso molecular más bajo el Ca. Los materiales con menos del 80% de EQ (32% Ca) son de baja calidad según las razones. utilizadas en distintos países. La ley norteamericana, por ejemplo, implanta el siguiente contenido mínimo (Figura 5):

Material	Equivalente Químico (EQ)	Fórmula	Contenido de Ca (%)	Contenido de Mg (%)
Carbonato de Calcio	100	CaCO_3	40	
Dolomita	108	$\text{CaCO}_3 \bullet \text{MgCO}_3$	21.6	13.1
Oxido de calcio	179	CaO	71	
Hidróxido de calcio	138	Ca(OH)_2	54	
Hidróxido de magnesio	172			41
Carbonato de magnesio	119			28.5
Oxido de magnesio	248	MgO		60
Silicato de calcio	86	CaSiO_3	34.4	
Silicato de magnesio	100	MgSiO_3		24

Figura 5. Equivalentes químicos y composición química de materiales de encalados puros.

FUENTE: NICHOLAIDES (1983); ALCARDE y RODELLA (2003).

2.3. Generalidades de la escoria siderúrgica

Los residuos de acero son producto de procesos industriales destinados a obtener, por un lado, arrabio (primer hierro fundido) y, por otro lado, acero. Por tanto, los residuos son un subproducto de la industria siderúrgica constituida principalmente por silicato de calcio, hierro y las reacciones químicas pasan en los métodos de conformación de metales. (IÑIGUEZ, 2001).

Los residuos generados mediante el proceso de horno de arco eléctrico en la producción de acero son esencialmente de dos clases: oxidantes

y reductores o en blanco y negro. Esta nomenclatura corresponde a las dos fases que componen este proceso, a saber: fusión (marcha de oxidación) y refinamiento (marcha de reducción) (AMARAL, 1999).

Para tener en cuenta la eficacia, las sustancias calizas contienen óxidos, hidróxidos o silicatos a manera de componentes neutralizantes (ALCARDE y RODELLA, 2003). Los subproductos como los desechos de la industria del acero (principalmente combinados de silicato de Ca y Mg) serían una buena opción para suplir o aumentar el efecto cal de la superficie debido a su mayor solubilidad y alcalinidad comparado con la cal, lo que hace disminuir el tiempo de cal a través de reacciones asociadas en el perfil del suelo (PEREGRINA et al., 2008; OLIVAS, 2014; YI et al., 2012).

2.3.1. Escoria y su importancia en la agricultura

El uso de la escoria es vital aunque es un subproducto de la elaboración de acero esta puede usar en la agricultura para tratamiento de suelos – ácidos. En la reconstrucción tiene usos en explanadas, bases y sub bases de carreteras, en capa de rodadura de asfaltos y como aditivo al Clinker (caliza cocida) en las plantas fabricantes de cemento, entre otras. (IÑIGUEZ, 2001).

La importancia de las propiedades físicas de la escoria de acero para usar como agente de encalado en la agricultura radica en su repartición granulométrica. Cuanto más finas sean las partículas, más reactivo será el material para neutralizar la acidez del suelo.

Además de su textura química, la escoria de acero tiene varios de los mismos compuestos que el cemento Portland, tiene silicato de calcio y algo de CaO y MgO libres. La disposición química de la escoria de acero de solera y la del proceso de oxígeno básico se muestran en la Tabla 2 (FEEDCOR, 2012).

Cuadro 2. Composición típica de escorias (%).

Compuesto	Escoria de Acero %
CaO	40-52
SiO₂	10-19
Al₂O₃	1-3
MgO	5-10
Fe(FeO o Fe₂O₃)	10-40
MnO	5-8
P₂O₅	0.5-1
Ca libre	2.1
Fe metálico	0.5-1

Fuente: FEEDCOR (2012).

2.3.1.1. El silicio (Si) en el suelo

Es el elemento más abundante en la corteza terrestre, junto con algunos otros elementos que no son considerados esenciales, bajo determinadas condiciones agro-climáticas, puede aumentar los rendimientos de los cultivos mediante la promoción de algunos procesos fisiológicos. Un número de estudios de campo y de invernadero han demostrado que el uso de Si enmiendas del suelo aumenta la producción de cultivos y la calidad. Además, la acumulación de Si protege a las plantas de ciertas enfermedades, tales como una resistencia a estreses bióticos y abióticos (SAVANT *et al.*, 1999). El uso de Si en las plantas puede ayudar a los ataques de patógenos (MOTZ y GEISELER, 2001).

2.3.1.2. Plomo

Ya que el plomo es acumulativo, este tiene un movimiento lento dentro de las plantas, pero en altas concentraciones las cuales pueden ser tóxicas para los cultivos, estos pueden presentar un crecimiento lento o no se llegan a desarrollar normalmente (AMERICA, 2004).

El Pb, en el suelo, se halla esencialmente en forma de Pb^{2+} cuyo estado de oxidación se conoce +4, la tasa de oxidación se debe a factores como la humedad, temperatura, Ph, potencial redox, materia orgánica (GUITART *et al.*, 2005). El plomo es absorbido en forma de iones por las plantas mediante su método radicular y es transportado a los sitios metabólicamente activos de la planta donde practican sus efectos tóxicos, por lo que se necesita saber sus

variaciones debido a la reactividad química y movilidad en el suelo y planta (FASSBENDER y BORNEMISZA, 1987).

2.3.1.3. Cadmio

El cadmio está muy extendido en la corteza de la tierra en una concentración media de 0,1 mg / kg, en las rocas sedimentarias las concentraciones son mayores, los medios ambientales como la erosión provocan el transporte de magnas sumas de cadmio hacia los océanos, el contenido de este metal es de aproximadamente 0,1. es μg / kg. En todos los suelos, la dinámica del Cd está potentemente influenciada por el pH.

En suelos ácidos, es fácilmente reemplazable, lo que lo hace económico para las plantas. Se ha observado que la energía de unión al combinar cadmio con material orgánico es mayor con arcillas, pero cabe destacar la alta similitud del cadmio por oxihidróxidos de hierro y silicatos de aluminio a modo de alofano e imogolita. Teniendo esto en consideración, se puede confirmar que la solubilidad del cadmio en ambientes ácidos está afinada por estos compuestos y por sustancias orgánicas.

En suelos alcalinos, el cadmio es inerte porque precipita en modo de carbonatos y fosfatos insolubles y de los cuales también favorece la constitución de especies hidroxilo monovalentes comparativamente el CdOH^+ , que no ocupan sencillamente los sitios de unión en los complejos de intercambio catiónico y de fijación. de Cd es mayor en suelos con mayor contenido de material orgánico,

consistencia más suave, mayor capacidad de intercambio catiónico y menor saturación de aluminio reemplazable. (BAUTISTA, 1999).

2.3.1.4. Cromo

El cromo se encuentra generalmente en un etapa reducido en modo de Cr_2O_3 . En ambientes oxidantes y a niveles de pH superiores a 4, obtenemos como cromo hexavalente en el suelo. En suelos ácidos con mínima materia orgánica como los arenosoles, el Cr (VI) se oxida velozmente a Cr (III), por lo que los suelos básicos (por ejemplo, regosoles) son los más tóxicos. La solubilidad del Cr (III) obedece al valor del pH; a un pH inferior a 4, la solubilidad acorta y precipita a un pH de 5,5 (KOVDA, 1964).

2.4. Metales pesados en el suelo en relación con el pH

Estan en el suelo de forma natural, es decir, a partir de la roca madre, o se le añadieron de forma antrópica, por ejemplo, mediante el uso de fertilizantes y, más recientemente, mediante aditivos orgánicos (MOLINA, 2008).

Este es el factor importante que controla la disposición de metales pesados con las plantas, la mayoría de los metales van a estar más disponibles a pH ácido, porque provocan una disminución en este último, tanto la solubilidad de los metales así que en su absorción son mejoradas por las raíces de las plantas. En algunos casos, se da un aumento del pH del suelo no conduce

esencialmente a una disminución de la disposición de metales como ocurre con As, Mo, Se y Cr. Por tanto, el pH es una medida importante para definir la movilidad del suelo. catión, porque en medios con un pH modestamente alcalino la precipitación ocurre en forma de hidróxidos. No obstante, en un medio muy alcalino, estos hidróxidos logran volver a disolverse en forma de complejos de hidroxilo (Figuras 6 y 7). Por otro lado, unos metales como Se, V, As y Cr logran estar presentes en la disolución del suelo como aniones solubles (MURILLO, 2010).

Elementos	Límite máximo en suelo (mg/Kg m.s)		Límite máximo en lodo (mg/Kg m.s)		Aportación máxima (Kg/ha/año)
	pH _{suelo} < 7	pH _{suelo} > 7	pH _{suelo} < 7	pH _{suelo} > 7	
Cadmio	1	3	20	40	0.15
Cobre	50	210	1000	1750	12
Níquel	30	112	300	400	3
Plomo	50	300	750	1200	15
Zinc	150	450	2500	4000	30
Mercurio	1	1.5	16	25	0.1
Cromo	100	150	1000	1500	3

Figura 6. Limitaciones legales relativas al contenido en metales pesados para la utilización agrícola de todos de depuradora.

Fuente: MURILLO (2010).

Asociaciones geoquímicas en suelos	Prácticamente inmóviles	Moderadamente móviles	Fácilmente móviles
Ácido (pH < 5,5)	Mo	Pb ²⁺ , Cr ³⁻⁶⁺ , Ni ²⁻³⁺ , V ⁵⁺ , As ³⁺ , Co ²⁻³⁺	Sr, Ba, Cu, Zn, Cd, Hg
Neutro o débilmente ácido (pH 5,5-7,5)	Pb	Sr, Ba, Cu, Cd, Cr ³⁻⁶⁺ , Co ²⁻³⁺ , Mo ⁴⁺	Zn, V ⁵⁺ , As ⁵⁺
Alcalino o fuertemente alcalino (pH 7,5-9,5)	Pb, Ba, Co	Zn, Ag, Sr, Cu, Cd	Mo ⁶⁺ , V ⁵⁺ , As ⁵⁺

Figura 7. Limitaciones legales relativas al contenido en metales pesados para la utilización agrícola de lodos de depuradora.

FUENTE: FELIPO (1992).

2.4.1. Fitotoxicidad de los metales pesados

La palabra fitotoxicidad se ha relacionado normalmente con el fenómeno ocasionado por una sustancia altamente dañina en los tejidos vegetales que perjudica su óptimo incremento y avance, la fitotoxicidad en las plantas se da en base a su procedimiento y los signos que exhiben a lo largo de su crecimiento (Figura 8).

Metales	Promedio seleccionado para el suelo (mg kg ⁻¹)	Rango común para el suelo (mg kg ⁻¹)
Al	71,000	10,000 – 30, 000
Fe	38,000	7,000 – 550, 000
Mn	600	20 – 3,000
Cu	30	2 – 100
Cr	100	1 – 1000
Cd	0.06	0.01 – 0.70
Zn	50	10 – 300
As	5	1.0 – 50
Se	0.3	0.1 – 2
Ni	40	5 – 500
Ag	0.05	0.01 – 5
Pb	10	2 – 200
Hg	0.03	0.01 – 0.3

Figura 8. Contenido de elementos metálicos en el suelo.

FUENTE: LINSAY, 1979.

Los oligoelementos, como As, Cd o Talio, no están muy profusas en el agua y el suelo en medios naturales, empero, las actividades industriales y mineras podrían causar contaminación por estos elementos, que pasarían a las plantas y animales donde se encuentran. puede concentrarse y originar efectos tóxicos para los humanos (FERGUSSON, 1990).

2.5. Contenido de metales pesados en la planta y en otros entes

2.5.1. Nutrición vegetal

Existe la nutrición vegetal en algunos oligoelementos principales donde se añaden al estar aptas en el suelo o en el agua y, dependiendo de la especie vegetal (Figuras 9 y 10), se demandan de manera diferente en

determinadas concentraciones, pueda a su carencia. o exedencia, pero si estos elementos son para las plantas son abundantes, son tóxicos y conducen a la carencia de calidad (MCGRATH y SMITH, 1990).

Elemento	Plantas mg kg ⁻¹	Mamíferos mg kg ⁻¹	Peces Marinos mg kg ⁻¹	Aire (Polo Sur) mg kg ⁻¹	Agua marina µg l ⁻¹	Agua Continental µg l ⁻¹	Lluvia µg l ⁻¹
Ag	0.01-0.8	0.01-0.44	0.04-0.1	-	0.04	0.3	0.006
Al	90-530	0.7-28	20	0.67	2	300	2.1-105
As	0.2-7	<1.6	0.2-10	0.006	1.3-2.5	0.5	-
Cd	0.1-2.4	0.1-3.2	0.1-3	<0.4	<0.025	0.1	0.02-0.06
Co	<1	<1	0.02	<0.03	0.02	0.2	0.17-0.95
Cr	0.03-10	0.01-33	0.03-2	<0.03	0.09-0.55	1	-
Cu	5-15	1-26	0.7-15	0.51	0.01	3	0.01-15
Fe	70-700	3-380	1-15	<29	2	500	0.4-84
Hg	<0.02	0.02-0.7	0.4	<0.01	<0.012	0.1	-
Mn	20-700	0.2-14	0.3-4.6	1.2	0.2	8	-
Mo	0.06-3	0.02-0.7	1	<0.2	10	0.5	0.01-12
Ni	1-5	0.7-1.2	0.1-4	<2	0.02-0.2	0.5	-
Pb	1-13	0.2-30	0.01-2	3.6	<0.02	3	-
Se	0.03	0.4-9	0.2	0.005	0.06-0.12	0.2	0.01-0.77
Sn	0.02-2	0.01-2		-	0.004	<0.01	<0.01
Zn	20-400	75-240	10	0.027	<0.6	10	0.05-100

Figura 9. Resumen de la composición en metales pesados de diferentes entes naturales.

FUENTE: MAS y AZCUE (1993).

Metal	Efecto en los vegetales
Aluminio	Inhibición y alteración de las funciones de la membrana celular, a nivel del citoplasma.
Arsénico	Reducción del crecimiento y alteración de la concentración de Ca, K, P y Mn en la planta.
Cadmio	Inhibición de la fotosíntesis y la transpiración. Inhibición de la síntesis de clorofila. Modificación de las concentraciones de Mn, Ca y K.
Cobre	Desbalance iónico, alteración de la permeabilidad de la membrana celular, reducción del crecimiento e inhibición de la fotosíntesis.
Cromo	Degradación de la estructura del cloroplasto, inhibición de la fotosíntesis, alteración de las concentraciones de Fe, Ca, K y Mg.
Mercurio	Alteración de la fotosíntesis, inhibición del crecimiento, alteración de la captación de K.
Plomo	Inhibición de la fotosíntesis, el crecimiento y de la acción enzimática.
Zinc	Alteración de la permeabilidad de la membrana celular, inhibición de la fotosíntesis, alteración en las concentraciones de Cu, Fe y Mg.

Figura 10. Alteraciones fisiológicas que producen algunos metales pesados que contaminan las plantas.

FUENTE: NASTUSH (1997).

Si la planta crece en otro tipo de suelo con la misma concentración de metales, abre claramente el nivel de fitotoxicidad por su capacidad de absorción. Esto está relacionado con el contenido de arcilla, la cantidad de materia orgánica, el pH y la composición de la solución del suelo (NASTUSCH, 1997).

2.5.2. Nutrición de las plantas

La decisión de fertilizar se atribuye a uno de los instrumentos de gestión empresarial que inciden claramente en el precio de producción y la rentabilidad de producir granos a modo del trigo y el maíz. Primordialmente porque el nutrimento más asociado con el rendimiento es el nitrógeno, tiene una analogía lineal con la producción física, en el grado de uso más frecuente. Al mismo tiempo, el suministro de nitrógeno al suelo, que remedia y equilibra la demanda y limita la necesidad de fertilizante, se ve dañado por factores climáticos que ocurren aleatoriamente como la humedad y la temperatura, principios que definen el rendimiento y consiguiente la demanda de N (INPOFOS, 1993).

2.5.3. Disponibilidad del nitrógeno en el grano y follaje

El N está implicado en la utilidad y asimismo en la calidad, ya que de él obedece el contenido de proteína del grano. Cuando la planta necesita N, su vigor reduce, las hojas son pequeñas, las puntas de las hojas son amarillas, que se extiende gradualmente a lo largo de la nervadura central, facilitando a una especie de patrón en forma de V. destacando la falta de N, toda la hoja gira amarillo y gradualmente las hojas por encima de la primera se vuelven amarillas. Cuando el daño es causado por la sequedad, las hojas se vuelven amarillas,

pero el fenómeno ocurre en todas las hojas al mismo tiempo. La impregnación de N se produce principalmente en las cinco semanas que acontecen desde los diez días antes de la floración incluso los veinticinco o treinta días posteriores. Dentro de estas 5 semanas la planta quita el 75% de sus insuficiencias totales. El ácido fosfórico ayuda a la fertilización y al buen progreso del grano. De igual forma promueve el crecimiento de las raíces. (ABC AGRO, s.f.).

El N puede disiparse por lavado, volatilización, erosión y extracción de las cosechas. El nitrógeno presto en el suelo en formas orgánicas está aún menos aprovechable como tal para las plantas, pero al ser absorbido debe pasar en formas inorgánicas. El nitrógeno inorgánico significa el 2% del nitrógeno total del suelo, presente como nitrato (NO_3^-), amonio (NH_4^+) y nitrito (NO_2). Estas formas inorgánicas son momentáneas en el suelo, debido a que las cantidades de N inorgánico en el suelo varían considerablemente, alcanzando existir desde unos escasos gramos hasta más de 100 kg ha⁻¹ (BRADY Y WEIL, 2008).

2.5.3.1. Calcio en la planta

La principal cualidad del calcio es su distanciamiento de la oscilación en la planta a tal lugar que en ésta misma es posible observar simultáneamente hojas viejas que han acumulado altas concentraciones de calcio y hojas frescas que muestran signos de carencia.

Ésta deficiencia se presenta en las hojas, frutos, la mala nutrición de calcio es la causa de enfermedades fisiológicas. Y la toxicidad producirá deficiencia de Mg o K (MOLINA, 2008).

2.5.3.2. Mg en la planta

Es un macronutriente importante para las plantas, que forma parte de la clorofila, a su vez cumple otras funciones (provoca reacciones enzimáticas, regulación del Ph celular, equilibrio de cationes y aniones). La concentración de Mg en el tejido vegetal es generalmente mínima al 0,5%. Si bien la deficiencia está vigente en la falta de color entre las nervaduras, las hojas pueden resultar frágiles y doblarse hacia arriba, puntas y bordes. Si bien su deficiencia se manifiesta en la planta por la apariencia de hojas menos cloróticas, menguando la cosecha y tamaño de los frutos. Un abundancia de este elemento induce a la deficiencia de calcio (RAHMAN, 2007).

2.5.4. Trabajos de investigación

ENCINA (2016), en un trabajo de investigación realizado en la UNALM con suelos derivados de Tingo María halló en su indagación sobre efectos del encalado con escoria y CaCO_3 en el cultivo de maíz, el cual fue ejecutado en macetería, hallando que con el encalado creció de forma significativa.

El uso de escoria alcalina para la modificación de suelo ácido y mejorar el crecimiento de plantas ha sido analizado en un estudio reciente llevado a cabo en Irán (ALI y SHAHRAM, 2007). Después de la aplicación de la creciente cantidad de escoria, el pH del suelo aumenta proporcionalmente. Además, a valores de pH entre 7,4 y 8,5, la disponibilidad Fe disminuye, mientras que a valores de pH más altos que aumenta; Por otro lado, el P y la disponibilidad

Mn aumenta proporcionalmente. Los estudios de invernadero han demostrado que la aplicación de escoria (1% y 2% (w / w)) en el té tierra de jardín y (0,5, 1 y 2%) en las derivaciones suelo de campo de arroz para el aumento de rendimiento de la planta y la P y Mn consumo; un aumento de la absorción de Fe y K se ha detectado en los campos de arroz, se ha observado una disminución de la absorción de K en el jardín de té, mientras que la absorción de Fe no se ha cambiado (AMARAL, 1999).

2.6. Estandares de calidad ambiental para el suelo

Parametros mg/Kg	Suelo Agricola
Cd	1,4
Pb	70

FIGURA 11. Estandares de Calidad ambiental (ECA) para el suelo

FUENTE: MINAM (2017), DECRETO SUPREMO NUMERO 011-2017 MINAM

2.7. Fuente de producción de los metales pesados

Los metales pesados son naturales en la corteza terrestre, en su contenido en rocas, la intemperie y las actividades humanas son responsables del aumento o deducción de los valores normales, así como con el uso de aguas residuales, fertilizantes y mejoradores. En el suelo se dan otras reacciones que determinarán su velocidad y tiempo de resistencia relacionados con su ciclo biogeoquímico (RUBIO et al., 1996).

El origen importante del incremento de metales pesados en el suelo reside en las actividades industriales, estimaron que las agrupaciones de metales contaminantes no está a su máximo nivel y que incrementan con el paso del tiempo por las actividades industriales y la agricultura nueva.

2.7.1. Metales pesados y su implicación en la calidad del suelo

El suelo está compuesto por materia orgánica (arena, partículas de limo y arcilla), material orgánico, agua, gases y entes vivos (gusanos, insectos, algas, bacterias, hongos, etc.), en el que existe una interacción continua de moléculas por procesos físicos, químicos y biológicos. De donde se influye para implementar la calidad del suelo es fundamental la investigación de todo tipo de características (físicas, químicas, biológicas y microbiológicas) (AMARAL, 1999).

DORAN Y PARQKIN (1994) señalan que la calidad del suelo no es sencillo de definir ya que se debe al uso del suelo (agrícola, forestal, urbano, industrial). Una de las probables afirmaciones es de PAPENDICK y PARR (1992), quienes definen la calidad de un suelo como su cualidad para sostener su productividad biológica, su cualidad ambiental y también para promover la salud de los animales, las plantas y los propios humanos.

El pH del suelo está involucrado en la captación de nutrientes mediante las plantas. En absoluto, un pH ácido promueve la solubilidad de carbonatos, fosfatos y sulfatos. Los micronutrientes Fe, Cu, Mn y Zn son adecuados, al tiempo que los macronutrientes como N, K, Mg, Ca pueden ser

insuficiente. A pH básico o alcalino, la precipitación de Fe, Cu, Mn y Zn se produce en modo de óxidos e hidróxidos. La mayor disponibilidad de K, Mg, Ca o P ocurre a pH 6-7. A pH más alto se reduce la presencia de Ca, Mg y P. Las bacterias y actinomicetos prosperan propiciamente a $\text{pH} > 5,5$, inclusive moviendo la población de hongos a pH más altos (JORDÁ et al., 2004).

La adhesión y la disolución de los metales pesados se encuentran fuertemente condicionadas por el pH, los metales son generalmente inestables a pH bajo, en forma de especies iónicas libres o compuestos organometálicos solubles. A pH alcalino, se logran retener en modo de carbonatos o fosfatos minerales insolubles.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación del campo experimental

El ensayo se llevó a cabo en el campo experimental del Laboratorio de Conservación de Suelos y los análisis de suelos y plantas en el laboratorio de LABSPAF del departamento de Suelos de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

3.1.1. Ubicación geográfica

Departamento : Lima

Provincia : Lima

Distrito : La Molina

Coordenadas : 12°4'58" Latitud Sur

76°57'46" Longitud Oeste

Elevación : 244 m.s.n.m.

3.2. Materiales y Equipos

3.2.1. Insumos

- Escoria básica
- Fosfato mono amónico
- Nitrato de potasio
- Nitrato de amonio
- Sulfato de magnesio

3.2.2. Materiales

- Suelo ácido (Jauja – Sincos)
- Macetas
- Balde y recipientes graduados
- Libreta de campo
- Lapiceros
- Stickers
- Computadora
- Cámara fotográfica

3.2.3. Equipos

- Potenciómetro
- Balanza
- Estufa
- Molino

3.3. Método y procedimiento

3.3.1. Muestreo de suelo

El suelo usado en el experimento, fue un suelo ácido colectado de 0 – 20 cm de profundidad, del departamento de Junín, en la provincia de Jauja, distrito de Sincos. Muestra un clima seco durante todo el año la temperatura generalmente varia de 5°C a 20°C y rara vez baja a menos de 2°C o sube a más de 22°C, la precipitación anual es 700 mm y a una altitud que oscila los 3,300 msnm.

3.3.2. Análisis de caracterización

Las características físicas y químicas del suelo fueron definidas según los métodos y procedimientos que se realizaron en el laboratorio de suelos de la UNALM.

El suelo es de textura franco, con un contenido de arena de 34%, limo 43% y arcilla un 23%, pH fuertemente ácido (5.06), nivel bajo de materia orgánica (1.90%), nivel alto de P disponible (15.3 ppm), nivel medio de K (178 ppm), CIC medio (16.00 meq/100 g), porcentaje de saturación de bases bajo (33%) (Cuadro 3).

Cuadro 3. Características del suelo.

Características físico – químicas del suelo analizado	
Análisis granulométrico	
Arena (%)	34
Limo (%)	43
Arcilla (%)	23
Clase textural	Franco
pH H ₂ O 1:1	5.06
CaCO ₃ (%)	0.00
Materia orgánica (%)	1.90
P disponible (ppm)	15.3
K disponible (ppm)	178
C.I.C. (meq/100 gr)	16.00
Ca ²⁺	3.87
Mg ²⁺	0.93
K ⁺	0.44
Na ⁺	0.07
Al ³⁺ + H ⁺	1.00
% SB	33

3.3.3. Análisis de la escoria

La escoria manipulada fue proporcionada por la empresa SIDERPERU cuya planta productora de acero se encuentra ubicada en la ciudad de Chimbote, en el departamento de Ancash. Y a su vez fue mandada a analizar en el LASPAF, de tal manera se pueda conocer el contenido de Ca, Mg y otros componentes encalantes deseados (Cuadro 4).

Cuadro 4. Analisis de la escoria.

pH al 5%	C.E. al 5% ds/cm	Ca %	Mg %	K ppm	Na ppm	Pb ppm	Cd ppm	Cr ppm
11.31	0.99	12.38	3.03	482.42	1,010.62	1,406.1	5.87	340.89

3.3.4. Material biológico

- Semillas de cebada variedad centenario.

3.3.5. Fase macetería

En cada maceta se colocaron 2,500 gr de suelo seco y posteriormente tamizadas. En cada unidad (maceta) del tratamiento correspondiente, se utilizó las respectivas dosis de escoria finamente pulverizada (Cuadro 5), siendo mezclado homogéneamente con el suelo. Posteriormente se incubo y rego por un espacio de 45 días hasta llevarlo a una humedad constante del 80% de la capacidad de campo. Finalizado los 45 días, se efectuó la siembra. Después de la siembra, se realizó el riego de las plantas según sus propias necesidades, hasta el final del cultivo.

Cuadro 5. Dosis de escoria y fertilizantes nitrogenados a emplear en los tratamientos.

Tratamiento	Material encalante	Fertilizante Nitrogenado	Niveles de N (mg/Kg)	Dosis de escoria (g)
T1	Escoria	N1D0	100	0
T2	Escoria	N2D0	200	0
T3	Escoria	N1D1	100	1.435
T4	Escoria	N2D1	200	1.435
T5	Escoria	N1D2	100	2.87
T6	Escoria	N2D2	200	2.87
T7	Escoria	N1D3	100	5.74
T8	Escoria	N2D3	200	5.74
T9	Escoria	N1D4	100	11.48
T10	Escoria	N2D4	200	11.48

3.3.6. Fase de fertilización

La fertiirrigación se realizó durante ocho semanas en dos etapas (Cuadro 6), donde la etapa 1 comprende las primeras cuatro semanas y la etapa 2 las siguientes cuatro semanas.

Las fuentes fertilizantes utilizados son: fosfato monoamónico, nitrato de potasio, nitrato de amonio de donde se obtienen las dosis de N evaluados a 100 y 200 mg kg⁻¹ y sulfato de magnesio.

Se preparó disoluciones disolviendo las siguientes cantidades de fertilizantes en 200 mL de agua destilada.

Cuadro 6. Disolución de fertilización por etapa.

Fertilizante	Etapla 1 (semana 1 a 4)	Etapla 2 (semana 5 a 8)
Fosfato monoamónico	32.8	0.0
Nitrato de potasio	0.0	88.9
Nitrato de amonio	13.1	0.0
Sulfato de magnesio*	0.0	50.0

Cada semana, se tomó 50 ml de cada botella de acuerdo a la etapa correspondiente, y se colocó en una botella de 1,000 ml de capacidad y se enrasó con agua.

Se aplicó 20 ml de la solución de fertilizantes a cada maceta.

Adicionalmente, se preparó una solución disolviendo 32.3 g de nitrato de amonio en 200 ml de agua.

Cada semana, se tomó 25 ml de la solución y se llevó a un volumen de 250 ml.

Se aplicó 10 ml de esta solución sólo a las macetas que recibirán 200 ppm de N. Esta fertilización se recibirá durante las ocho semanas.

3.3.7. Parámetros en evaluación

Luego de la cosecha, a los tres meses después de la siembra, se evaluaron los siguientes parámetros:

3.3.7.1. Altura de la planta

Este parámetro fue medido a partir de la base de la planta hasta el ápice de la hoja más distante extendida. Se midió con una cinta métrica todas las plantas de las macetas.

3.3.7.2. Peso fresco de la planta (g)

En este caso las plantas de cada maceta estuvieron cercenadas al nivel del suelo, e inmediatamente pesadas en una balanza de precisión, en el que se obtuvo la materia fresca o biomasa por planta, para luego fueron puestas en una bolsa de papel debidamente identificadas.

3.3.7.3. Rendimiento de la materia seca (parte aérea)

Para el rendimiento de la materia seca las plantas fueron secadas en una estufa a 65°C por 24 horas, inclusive lograr un peso constante, que a continuación fue pesado en una balanza en cada una de las repeticiones.

3.3.7.4. Determinación del contenido de metales pesados en el suelo

Se determinó el contenido de metales pesados (Pb, Cd y Cr) en el suelo.

3.3.8. Diseño Experimental

El diseño experimental usado fue el Diseño Completo al Azar, con 10 tratamientos y 5 repeticiones, con arreglo factorial de 2 fuentes de N (100 y 200 mg kg⁻¹) y cuatro dosis de escoria. El modelo aditivo lineal usado es:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha \beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}; \quad i = 1, 2; \quad j = 1, 2, 3, 4; \quad k = 1, 2, 3, 4, 5$$

Donde:

Y_{ijk} = k-ésima maceta recibiendo la i-ésima dosis de N y la j-ésima dosis de escoria (respuesta)

μ = estima la media general

α_i = efecto que produce la i-ésima dosis de N aplicada al suelo

β_j = efecto debido a la j-ésima dosis de escoria aplicada al suelo

$(\alpha \beta)_{ij}$ = efecto de la interacción entre la dosis de N y la dosis de escoria aplicada al suelo

ε_{ijk} = efecto aleatorio de variación en la k-ésima maceta recibiendo la i-ésima dosis de N y la j-ésima dosis de escoria (error experimental).

3.3.9. Variables investigadas

3.3.9.1. Variable dependiente

Propiedades del suelo, altura de la planta, peso fresco de la planta, así como también materia seca.

3.3.9.2. Variable independiente

Dosis de nitrógeno y escoria

Cuadro 7. Análisis de varianza.

Fuente de Variabilidad	SC	gl	CM	Fcal	Fcal		Signif.
					0.05	0.01	
Tratamiento	SCTrat	9	SCTrat/9	CMTrat/CME	-	-	-
Dosis de nitrógeno (N)	SCN	1	SCN/1	CMN/CME	-	-	-
Dosis de escoria (E)	SCE	4	SCE/4	CME/CME	-	-	-
Error	SCE	41	SCE/41	-	-	-	-
TOTAL	SCT	50	-	-	-	-	-

3.4. Procesamiento de datos

Los datos obtenidos de pesos frescos y secos de plantas, así como la extracción de metales pesados, fueron sometidos a análisis de varianza (ANVA) con un nivel de significancia de 0.05. Los promedios se combinaron utilizando la prueba de comparación de medias de Tukey HSD. Para el análisis

estadístico se utilizó el paquete Agricolae del entorno de procesamiento estadístico R, versión 3.3.2 (R Core Team, 2016).

IV. RESULTADOS

4.1. Efecto de la escoria siderúrgica en el pH y en la acidez cambiante

4.1.1. Efecto de la escoria siderúrgica en el pH

En el pH, el análisis de variancia realizado indicó que tienen diferencias significativas para los niveles de nitrógeno, mientras que para las fuentes de escoria se observó diferencias altamente significativas. Asimismo, se visualizó que para la interacción de los factores en estudio N*E (Nitrógeno x Escoria) no existieron diferencias significativas. El coeficiente de variabilidad presentado fue de 3.81% y el promedio general del pH en relación al experimento fue de 6.062 (Cuadro 8).

Cuadro 8. Análisis de varianza para la variable pH.

Fuente de Variación	Gl	SC	CM	F-calculado	p-value
N	1	0.286	0.286	5.33	0.0262 *
E	4	12.912	3.228	60.23	<.0001 **
N*E	4	0.368	0.0919	1.72	0.165
Error	40	2.144	0.0536		
Total	49	15.709			
C.V. = 3.81%				Promedio general = 6.062	

Al realizar la prueba de cotejo de medias Tukey al 5% de probabilidad para los niveles de nitrógeno, indico que el N1 le corresponde la agrupación “A” con un promedio de pH de 6.138 y es estadísticamente superior a N2 que le corresponde la letra “B” correspondiéndole un promedio de pH de 5.987 (Cuadro 9 y Figura 12).

Cuadro 9. Prueba de Tukey al 5% de probabilidad para la dosis de nitrógeno.

	Niveles de Nitrógeno	pH	Agrupación
1	N1	6.138	A
2	N2	5.987	B

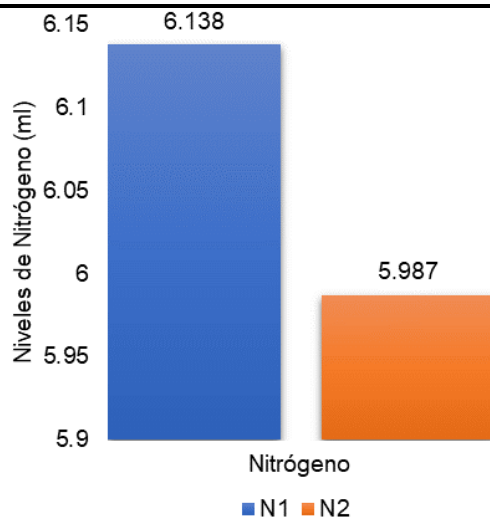


Figura 112. Valores promedios de Nitrógeno en el pH del suelo.

Para las fuentes de Escoria, la prueba de cotejo de medias Tukey al 5% de probabilidad mostro que la fuente E4 le corresponde la agrupación “A” con un promedio de pH de 6.976 y es estadísticamente superior a E3 que le corresponde la letra “B” correspondiéndole un promedio de pH de 6.174, asimismo mostro que la fuente E3 es estadísticamente superior a E2 y E1 a quienes le corresponde la agrupación “C” y finalmente se pudo visualizar que E0 es estadísticamente inferior a todas las fuentes, correspondiéndole la letra “D” (Cuadro 10 y Figura 13).

Cuadro 10. Prueba de Tukey al 5% en la dosis de escoria.

	Fuentes de Escoria	pH	Agrupación
1	E4	6.976	A
2	E3	6.174	B
3	E2	5.874	C
4	E1	5.815	C
5	E0	5.473	D

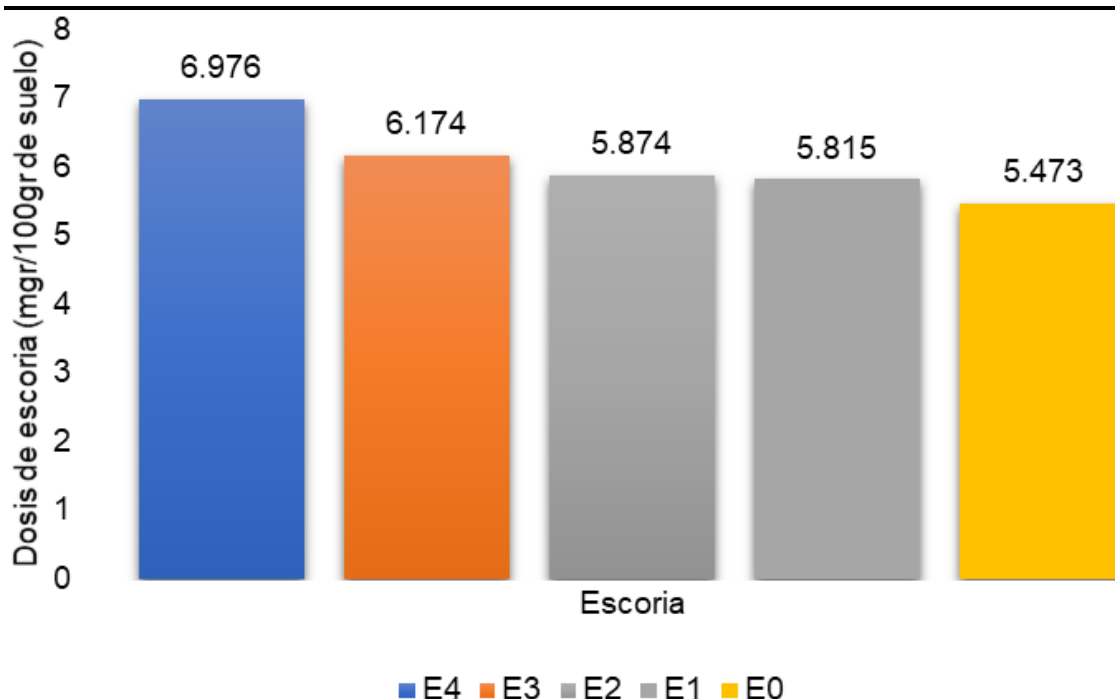


Figura 123. Valores promedios de Escoria en el pH del suelo.

4.1.2. Efecto de la escoria en la acidez cambiabile

El análisis de variancia realizado para la acidez cambiabile mostro que existen diferencias altamente significativas para las fuentes de escoria, mientras que para los niveles de nitrógeno y para la interacción de los factores en estudio N*E (Nitrógeno x Escoria) no existo diferencias significativas. El coeficiente de variabilidad presentado fue de 2.12% y el promedio general de la acidez cambiabile en relación al experimento fue de 0.06 (Cuadro 11).

Cuadro 11. Análisis de varianza para la variable acidez cambiabile.

Fuente de Variación	g.l	SC	CM	F-calculado	p-value
N	1	0.0008	0.0008	1.68	0.202
E	4	0.0335	0.00838	17.63	<.0001 **
N*E	4	0.0017	0.00043	0.89	0.476
Error	40	0.0190	0.00048		
Total	49	0.0550			
C.V. = 2.12%				Promedio general = 0.06	

Al realizar la prueba de cotejo de medias Tukey al 5% de probabilidad para los niveles de nitrógeno, confirmo que no existe diferencias entre los niveles, presentando para ambos niveles la agrupación “A” (Cuadro 12 y Figura 14).

Cuadro 12. Prueba de Tukey al 5% de probabilidad para la dosis de escoria.

Niveles de Nitrógeno		AC	Agrupación
1	N2	0.0692	A
2	N1	0.0527	A

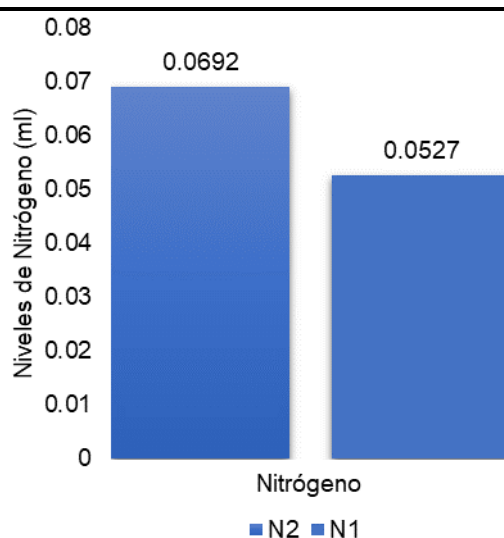


Figura 14. Valores promedios de Nitrógeno en la acidez cambiabile.

Para las fuentes de Escoria, el experimento de cotejo de medias Tukey al 5% de probabilidad mostro que la fuente E0 y E2 le corresponde la agrupación “A” con un promedio de acidez de 0.145 y 0.092, respectivamente. E1 es estadísticamente diferente a E0, pero similar a E2. Mientras que E3 es estadísticamente similar E1 y a E4. Se puede observar claramente que la fuente E0 presento el mayor promedio de acidez cambiante (Cuadro 13 y Figura 15).

Cuadro 13. Prueba de Tukey al 5% en la dosis de escoria en la acidez cambiante.

	Fuentes de Escoria	AC	Agrupación
1	E0	0.145	A
2	E2	0.092	A B
3	E1	0.061	B C
4	E3	0.010	C D
5	E4	0.000	D

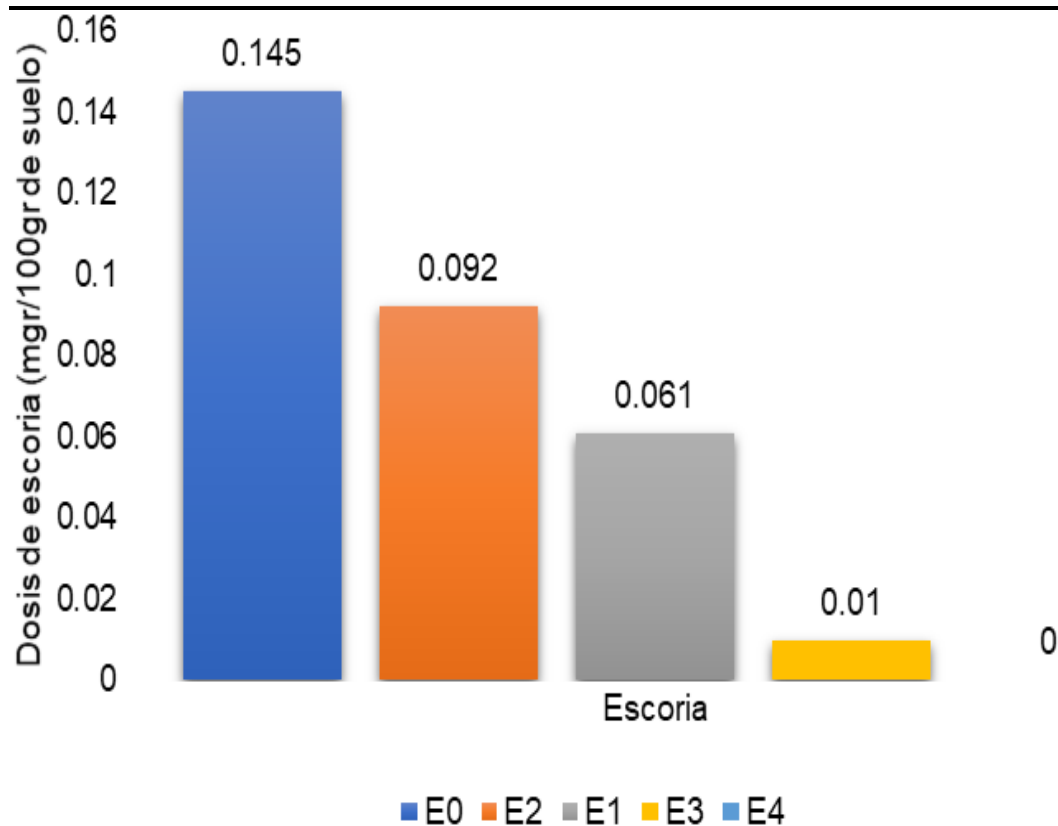


Figura 135. Valores promedios de Escoria en la acidez cambiante.

4.2. Efecto de la aplicación de escoria sobre la concentración de metales pesados totales en el suelo

4.2.1. Efecto de la escoria en el Pb totales en el suelo

4.2.1.1. Efecto de la escoria de Pb totales en el suelo

Para el caso del Pb total en el suelo, el análisis de variancia indico que no hay diferencias significativas para los niveles de nitrógeno (N), mientras que para las fuentes de escoria (E) existen diferencias altamente significativas y para la interacción de los factores en estudio N*E (Nitrógeno x Escoria) no se presentó diferencias estadísticas. El coeficiente de variabilidad presentado fue de 8.267% y el promedio general de la concentración del Pb total en el suelo en relación al experimento fue de 30.12 (Cuadro 14).

Cuadro 14. Análisis de varianza para el Pb total del suelo.

Fuente de Variación	g.l	SC	CM	F-calculado	p-value
N	1	0.3715	0.3715	0.06	0.8079
E	4	174.388	43.597	7.03	0.0002**
N*E	4	106.790	26.697	4.30	0.0055
Error	40	248.089	6.2022		
Total	49	529.639			
C.V. = 8.267 %				Promedio general = 30.12	

Al realizar la prueba de cotejo de medias Tukey al 5% de posibilidad para los niveles de nitrógeno, confirmo que no existen diferencias entre los niveles, presentado para ambos niveles de la agrupación “A” (Cuadro 15 y Figura 16).

Cuadro 15. Prueba de Tukey al 5% de probabilidad para el Pb total del suelo.

	Niveles de Nitrógeno	Pb total en el suelo	Agrupación
1	N1	30.2088	A
2	N2	30.0364	A

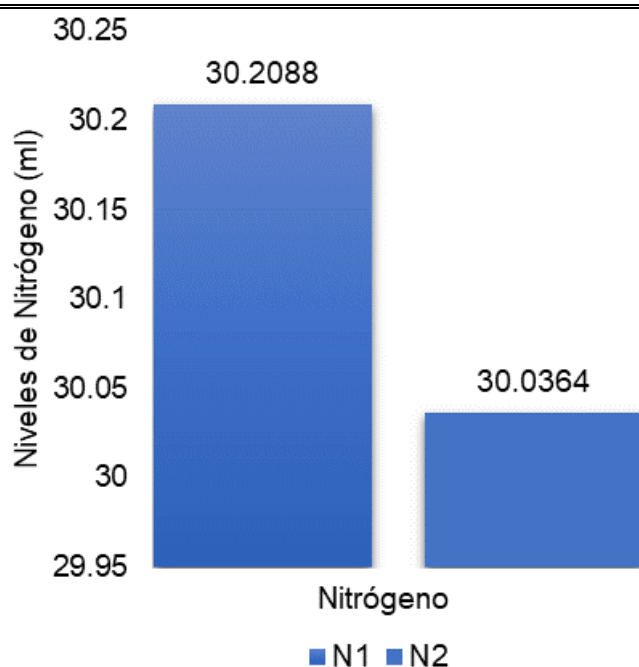


Figura 16. Valores promedios de Nitrógeno de Pb total del suelo.

Para las fuentes de Escoria, la prueba de cotejo de medias Tukey al 5% de posibilidad mostro que las fuentes de escoria E4, E3, E2 y E1 corresponden a la agrupación “A” con un promedio de 32.227, 30.857, 30.785 y 30.090 respectivamente de Pb total en el suelo. Asimismo, se observó que la fuente E0 estadísticamente corresponde al grupo “B” con un promedio de 26.654, observando también que tiene menor concentración de Pb en el suelo (Cuadro 16 y Figura 17).

Cuadro 16. Prueba de Tukey al 5% en la dosis de escoria en el Pb total del suelo.

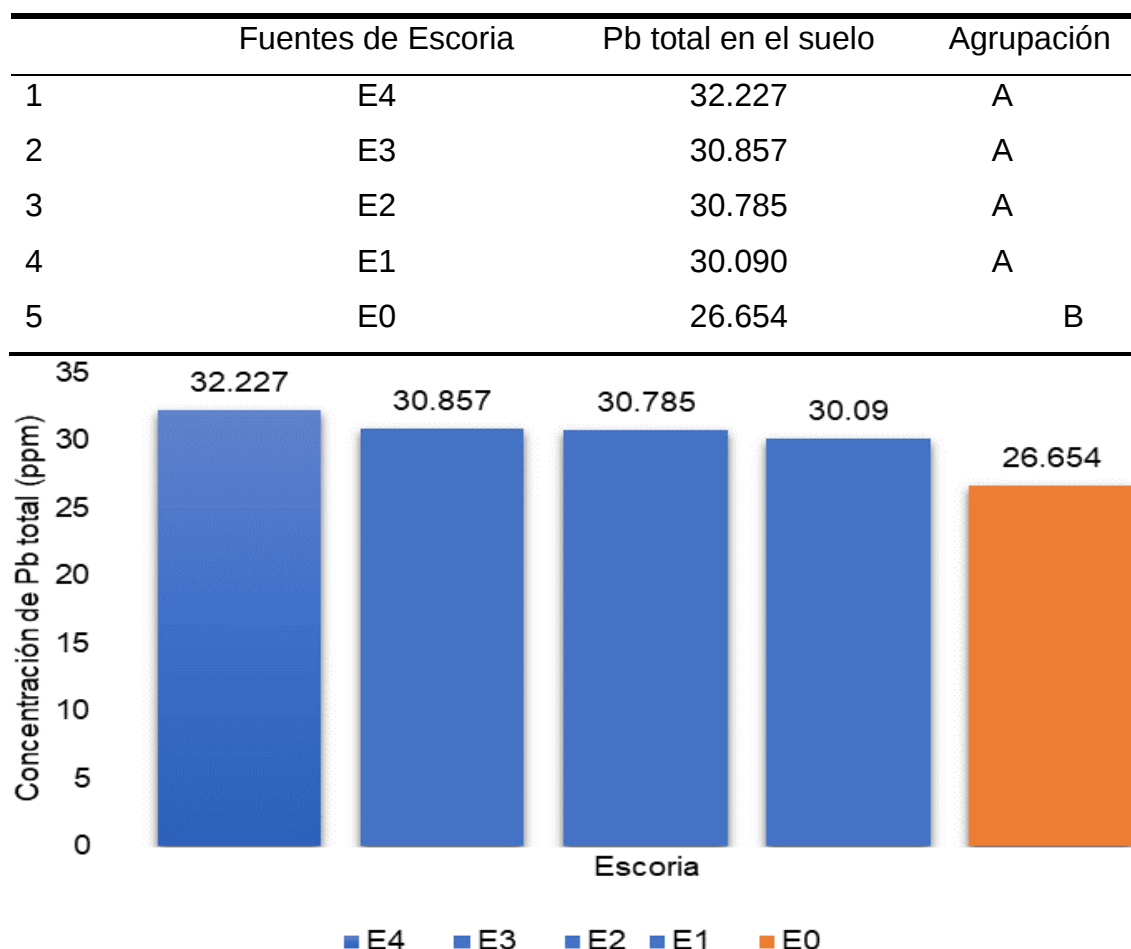


Figura 17. Valores promedios de Escoria de Pb total en el suelo.

4.2.2. Efecto de la escoria en el Cd total del suelo

4.2.2.1. Efecto de la escoria en el Cd total del suelo

El análisis de variancia para el Cd total en el suelo indico que no existen diferencias significativas para los niveles de nitrógeno (N), fuentes de escoria (E) y para la interacción de los factores en estudio N*E (Nitrógeno x Escoria). El coeficiente de variabilidad presentado fue de 7.16% y el promedio general de la concentración del Cd total en el suelo en relación al experimento fue de 1.67 (Cuadro 17).

Cuadro 17. Análisis de varianza para el Cd total del suelo.

Fuente de Variación	g.l	SC	CM	F-calculado	p-value
N	1	0.0015	0.0015	0.11	0.7437
E	4	0.1071	0.0267	1.85	0.1379
N*E	4	0.0648	0.0162	1.12	0.3603
Error	40	0.5784	0.0144		
Total	49	0.7519			
C.V. = 7.16 %				Promedio general = 1.67	

Al realizar la prueba de cotejo de medias Tukey al 5% de posibilidad para los niveles de nitrógeno, confirmo que no existen diferencias entre los niveles, presentado para ambos niveles de la agrupación “A” (Cuadro 18 y Figura 18).

Cuadro 18. Prueba de Tukey al 5% de probabilidad para el Cd total del suelo.

	Niveles de Nitrógeno	Cd total en el suelo	Agrupación
1	N2	1.68480	A
2	N1	1.67360	A

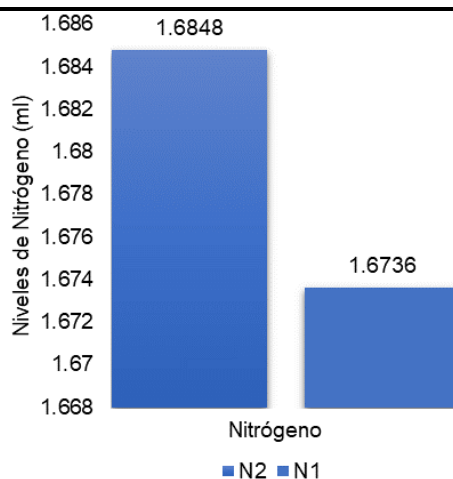


Figura18. Valores promedios de Nitrógeno de Cd totales del suelo.

Para las fuentes de Escoria, la prueba de cotejo de medias Tukey al 5% de posibilidad mostro que las fuentes de escoria E4, E3, E2, E1 y E0 corresponden a la agrupación "A". Y la fuente de escoria que presento menor promedio fue el E0 quien obtuvo un promedio de 1.59900 (Cuadro 19 y Figura 19).

Cuadro 19. Prueba de Tukey al 5% en la dosis de escoria en el Cd total del suelo.

	Fuentes de Escoria	Cd total en el suelo	Agrupación
1	E4	1.739	A
2	E3	1.705	A
3	E2	1.680	A
4	E1	1.673	A
5	E0	1.599	A

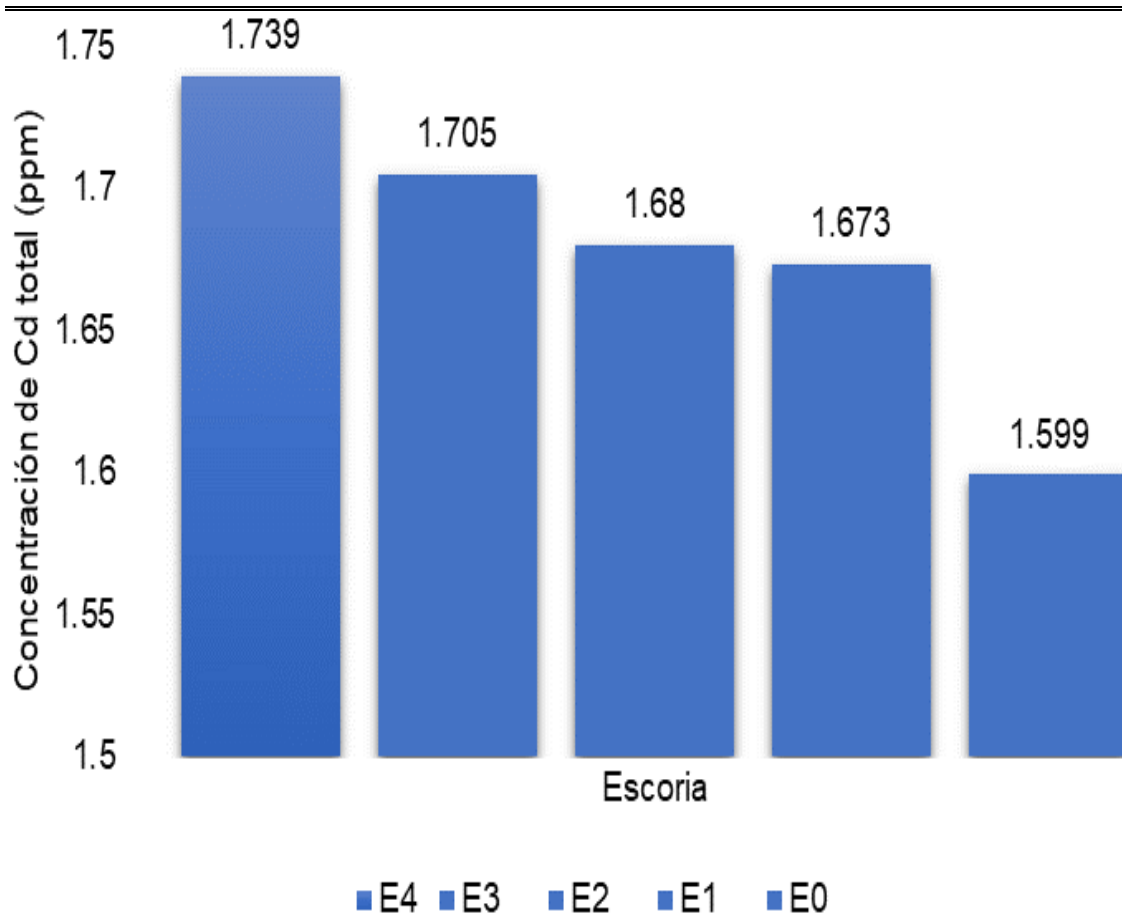


Figura 19. Valores promedios de Escoria de Cd en el suelo.

4.2.3. Efecto de la escoria en el Cr totales del suelo

4.2.3.1. Efecto de la escoria en el Cr total del suelo

El análisis de variancia para el Cr total en el suelo indico que no existen diferencias significativas para los niveles de nitrógeno (N), mientras que para las fuentes de escoria (E) existen diferencias altamente significativas y para la interacción de los factores en estudio N*E (Nitrógeno x Escoria) no se presentó diferencias estadísticas. El coeficiente de variabilidad presentado fue de 15.05% y el promedio general de la concentración del Cr total en el suelo en relación al experimento fue de 13.08 (Cuadro 20).

Cuadro 20. Análisis de variancia para el Cr total del suelo.

Fuente de Variación	g.l	SC	CM	F-calculado	p-value
N	1	32.594	32.594	8.40	0.0061
E	4	700.83	175.20	45.17	<.0001**
N*E	4	66.576	16.644	4.29	0.0055
Error	40	155.13	3.8784		
Total	49	955.14			
C.V. = 15.05 %				Promedio general = 13.08	

Al realizar la prueba de cotejo de medias Tukey al 5% de posibilidad para los niveles de nitrógeno, confirmo que el N1 le corresponde la agrupación “A” y es estadísticamente diferente al N2 quien presenta la agrupación “B” (Cuadro 21 y Figura 20).

Cuadro 21. Prueba de Tukey al 5% de probabilidad para el Cr total del suelo.

	Niveles de Nitrógeno	Cr total en el suelo	Agrupación
1	N1	13.8920	A
2	N2	12.2772	B

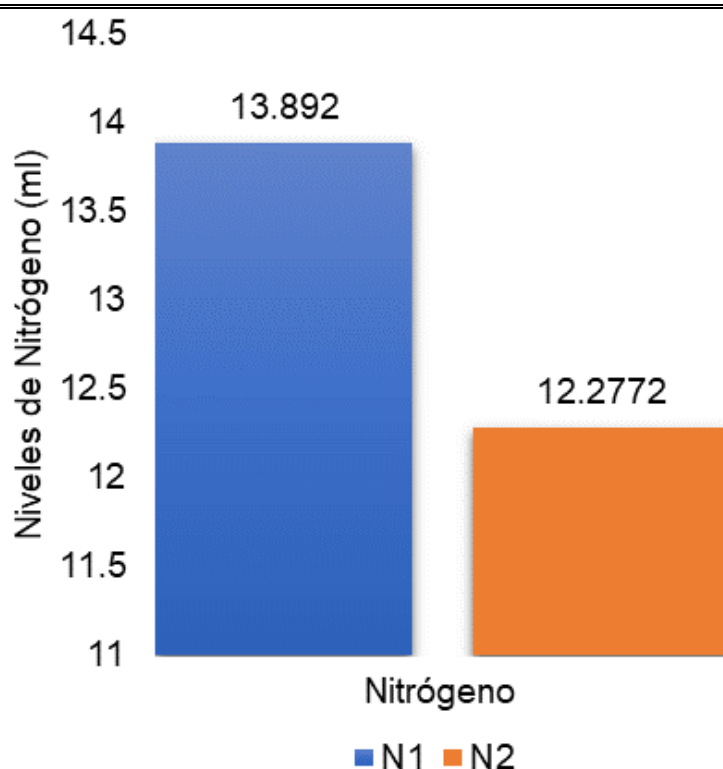


Figura 20. Valores promedios de Nitrógeno de Cr total del suelo.

Para las fuentes de Escoria, la prueba de cotejo de medias Tukey al 5% de posibilidad mostro que las fuentes de escoria E4, E3 y E2 corresponden a la agrupación "A" con un promedio de 17.0850, 15.6800 y 14.7750 respectivamente, y a su vez se observa que presentan mayor promedio de Cr total en el suelo. Asimismo, se observó que la fuente E1 estadísticamente corresponde al grupo "B" con un promedio de 11.1950 y por último la fuente E0 corresponde estadísticamente al grupo "C", siendo este, el que presenta menor

promedio de Cr total en el suelo, a diferencia de las otras fuentes. (Cuadro 22 y Figura 21).

Cuadro 22. Prueba de Tukey al 5% en la dosis de escoria en el Cr total del suelo.

	Fuentes de Escoria	Cr total en el suelo	Agrupación
1	E4	17.085	A
2	E3	15.680	A
3	E2	14.775	A
4	E1	11.195	B
5	E0	6.688	C

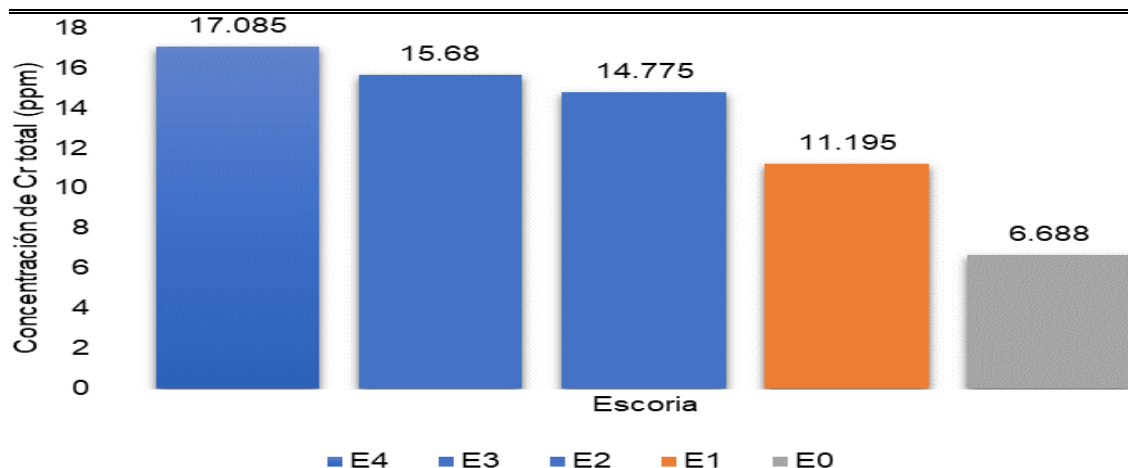


Figura 21. Valores promedios de Escoria de Cr total en el suelo.

4.3. Efecto de la aplicación de escoria sobre la materia seca de la planta indicadora cebada (*Hordeum vulgare*)

4.3.1. Metales pesados en el grano

4.3.1.1. Efecto de la escoria con respecto al Pb en el grano

Para la concentración de Pb (ppm) en el grano el análisis de variancia indico que no hay diferencias significativas para los niveles de nitrógeno (N), fuentes de escoria (E) y para la interacción de los factores en estudio N*E (Nitrógeno x Escoria). El coeficiente de variabilidad presentado fue

de 18.34 % y el promedio general de la concentración de Pb (ppm) – grano en relación al experimento fue de 8.32 (Cuadro 23).

Cuadro 23. Análisis de varianza del Pb en el grano.

Fuente de Variación	g.l	SC	CM	F-calculado	p-value
N	1	0.0933	0.0933	0.33	0.5669
E	4	0.5152	0.1288	0.46	0.7644
N*E	4	1.3350	0.3337	1.19	0.3290
Error	40	11.1960	0.2799		
Total	49	13.1396			
C.V. = 18.34 %				Promedio general = 8.32	

Al realizar la prueba de cotejo de medias Tukey al 5% de posibilidad para los niveles de nitrógeno, confirmo que no existen diferencias entre los niveles, presentado para ambos niveles de la agrupación “A” (Cuadro 24 y Figura 22).

Cuadro 24. Prueba de Tukey al 5% de probabilidad de Pb en el grano.

	Niveles de Nitrógeno	Concentración de Pb (ppm) en el grano	Agrupación
1	N1	8.5731	A
2	N2	8.0746	A

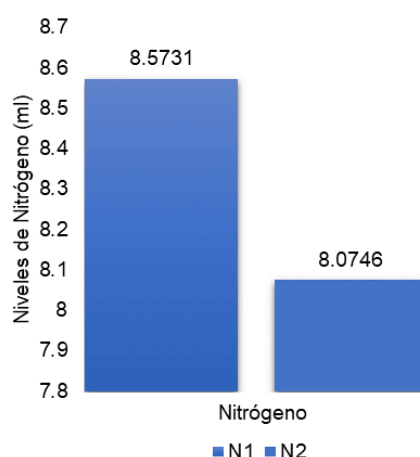


Figura 142. Valores promedios de Nitrógeno en el Pb del grano.

Para las fuentes de Escoria, la prueba de cotejo de medias Tukey al 5% de posibilidad mostro que no existe diferencias entre las fuentes presentando para las cinco fuentes la agrupación “A”. Ahora la fuente de escoria que presento menor respuesta a su promedio de concentración de Pb (ppm) en el grano es E0 quien obtuvo un promedio de 7.711. (Cuadro 25 y Figura 23).

Cuadro 25. Prueba de Tuckey al 5% en la dosis de escoria en el Pb del grano.

	Fuentes de Escoria	Concentración de Pb (ppm) en el grano	Agrupación
1	E4	9.381	A
2	E3	8.514	A
3	E2	8.191	A
4	E1	7.862	A
5	E0	7.711	A

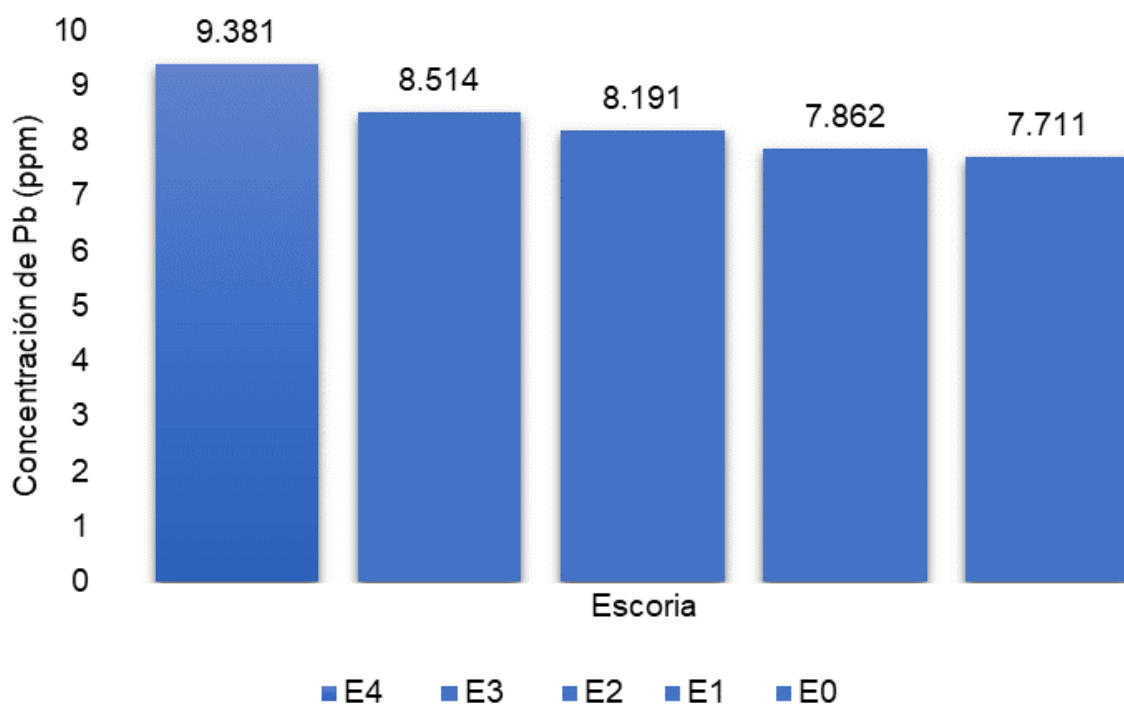


Figura 23. Valores promedios de escoria en el Pb del grano.

4.3.1.2. Efecto de la escoria con respecto al Cd del grano

Para la concentración de Cd (ppm) en el grano el análisis de variancia indico que no hay diferencias significativas para los niveles de nitrógeno (N) y para la interacción de los factores en estudio N*E (Nitrógeno x Escoria). Mientras que para la fuentes de escoria (E) se observa que diferencias altamente significativas. El coeficiente de variabilidad presentado fue de 14.32 % y el promedio general de la concentración de Cd (ppm) – follaje en relación al experimento fue de 0.47. (Cuadro 26).

Cuadro 26. Análisis de varianza del Cd en el grano.

Fuente de Variación	g.l	SC	CM	F-calculado	p-value
N	1	0.0018	0.0018	0.19	0.6673
E	4	0.5670	0.1417	14.77	0.0001**
N*E	4	0.0362	0.0090	0.95	0.4480
Error	40	0.3838	0.0095		
Total	49	0.9890			
C.V. = 14.32 %				Promedio general = 0.47	

Al realizar la prueba de cotejo de medias Tukey al 5% de posibilidad para los niveles de nitrógeno, confirmo que no existen diferencias entre los niveles, presentado para ambos niveles de la agrupación “A” (Cuadro 27 y Figura 24).

Cuadro 27. Prueba de Tuckey al 5% de probabilidad de Cd en el grano.

Niveles de Nitrógeno		Concentración de Cd (ppm) en el grano	Agrupación
1	N2	0.4761	A
2	N1	0.4596	A

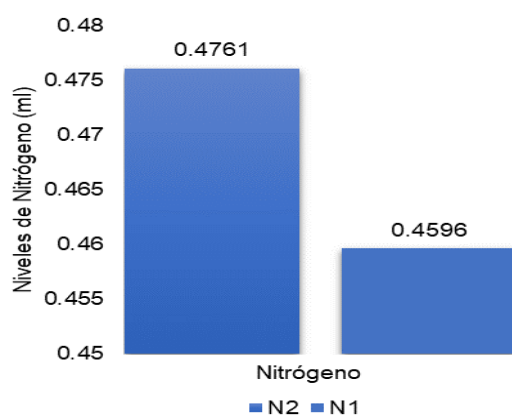


Figura 24. Valores promedios de Nitrógeno en el Cd del grano.

Para las fuentes de Escoria, la prueba de cotejo de medias Tukey al 5% de posibilidad mostró que las fuentes de escoria E0 y E1 presentan las menores concentraciones de Cd, siendo estadísticamente similares entre ellos ya que comparten el GRUPO "C". Asimismo la fuente de escoria E1 es estadísticamente similar a E2, ya que pertenecen al GRUPO "B". También se observó que la fuente de escoria E2 comparte con las fuentes de escoria E4 y E3 el GRUPO "A". Finalmente la fuente de escoria E3 presento mayor concentración de Cd en el grano y a la vez es estadísticamente diferente a las fuentes de escoria E1 Y E0. (Cuadro 28 y Figura 25).

Cuadro 28. Prueba de Tuckey al 5% en la dosis de escoria en el Cd del grano.

	Fuentes de Escoria	Concentración de Cd (ppm) en el grano	Agrupación
1	E4	0.616	A
2	E3	0.588	A
3	E2	0.552	A B
4	E1	0.384	B C
5	E0	0.255	C

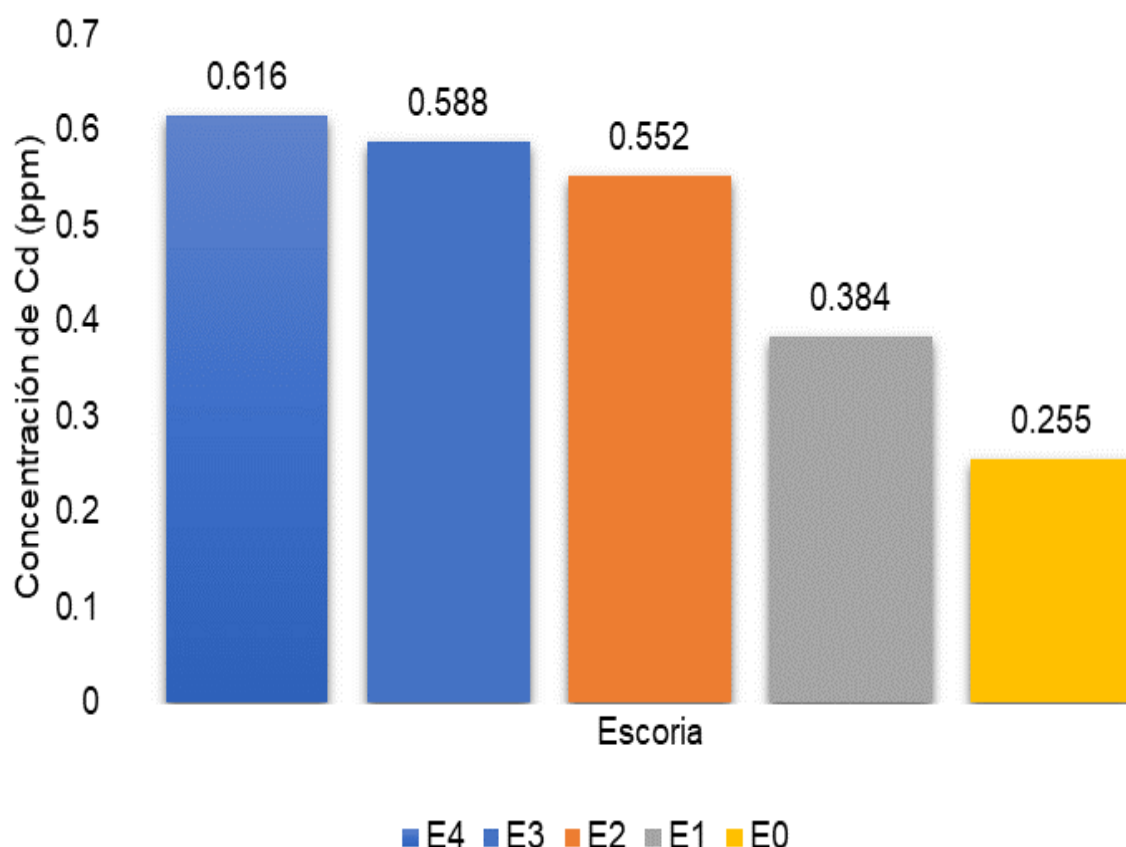


Figura 25. Valores promedios de Escoria en el Cd del grano.

4.3.1.3. Efecto de la escoria con respecto al Cr en el grano

En la variable de metales pesados, en este caso del Cromo (Cr), no se encontraron presencia alguna en ninguno de los tratamientos.

4.3.2. Elementos esenciales en el grano

4.3.2.1. Calcio en el grano

Para la concentración del porcentaje de Calcio en el grano, el análisis de variancia indico que no hay diferencias significativas para los niveles de nitrógeno (N), fuentes de escoria (E) y para la interacción de los factores en estudio N*E (Nitrógeno x Escoria). El coeficiente de variabilidad presentado fue

de 17.17 % y el promedio general del porcentaje de Ca en el grano en relación al experimento fue de 0.042 (Cuadro 29).

Cuadro 29. Análisis de varianza del Calcio en el grano.

Fuente de Variación	g.l	SC	CM	F-calculado	p-value
N	1	0.0000	0.0000	0.00	1.0000
E	4	0.0003	0.000078	1.47	0.2289
N*E	4	0.0002	0.000070	1.32	0.2789
Error	40	0.0021	0.000053		
Total	49	0.0027			
C.V. = 17.17 %				Promedio general = 0.042	

Al realizar la prueba de cotejo de medias Tukey al 5% de posibilidad para los niveles de nitrógeno, confirmo que no existen diferencias entre los niveles, presentado para ambos niveles de la agrupación “A”. (Cuadro 30 y Figura 26).

Cuadro 30. Prueba de Tukey al 5% de probabilidad de Calcio en el grano.

	Niveles de Nitrógeno	% Calcio en el grano	Agrupación
1	N1	0.0424	A
2	N2	0.0424	A

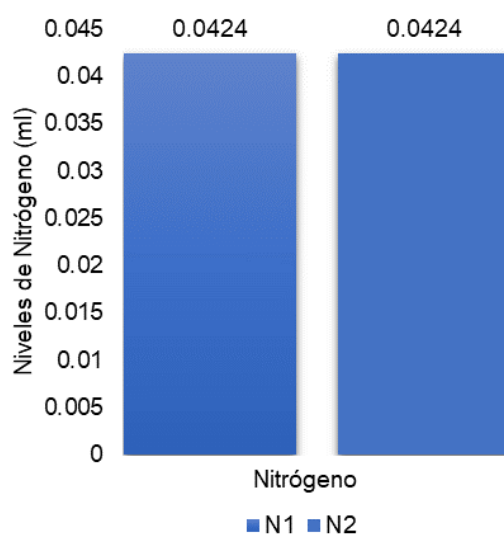


Figura 156. Valores promedios de Nitrógeno en el Calcio del grano.

Para las fuentes de Escoria, la prueba de cotejo de medias Tukey al 5% de posibilidad mostró que no existe diferencias entre las fuentes presentando para las cinco fuentes la agrupación “A”. Ahora las fuentes de escoria que presentaron mayor respuesta a su promedio del porcentaje de Ca en el grano fueron las fuentes de escoria E4 y E3 quien obtuvo un promedio de 0.0450 (Cuadro 31 y Figura 30).

Cuadro 31. Prueba de Tukey al 5% en la dosis de escoria en el Calcio del grano.

	Fuentes de Escoria	% Calcio en el grano	Agrupación
1	E4	0.045	A
2	E3	0.045	A
3	E2	0.043	A
4	E1	0.040	A
5	E0	0.039	A

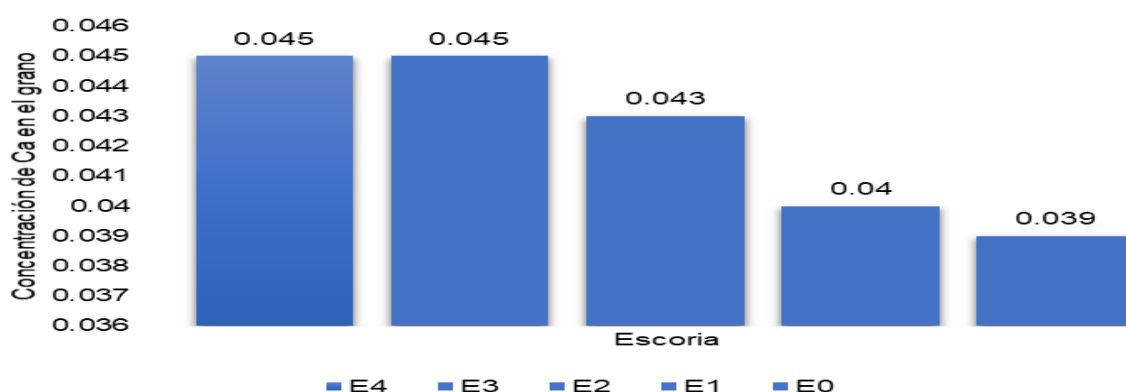


Figura 27. Valores promedios de escoria en el Calcio del grano.

4.3.2.2. Magnesio en el grano

El análisis de variancia realizado para la concentración de Mg en el grano indicó que existen diferencias significativas para los niveles de nitrógeno (N), mientras que para las fuentes de escoria (E) y para la interacción de los factores en estudio N*E (Nitrógeno x Escoria) no existe diferencias significativas. El coeficiente de variabilidad presentado fue de 12.03% y el promedio general de la concentración del Mg en el grano en relación al experimento fue de 0.1418 (Cuadro 32).

Cuadro 32. Análisis de variancia del Magnesio en el grano.

Fuente de Variación	g.l	SC	CM	F-calculado	p-value
N	1	0.0016	0.0016	5.78	0.0209*
E	4	0.0004	0.0001	0.37	0.8302
N*E	4	0.0001	0.00004	0.16	0.9566
Error	40	0.0116	0.0002		
Total	49	0.0139			
C.V. = 12.03 %				Promedio general = 0.1418	

Al realizar la prueba de cotejo de medias Tukey al 5% de posibilidad para los niveles de nitrógeno, mostro que el nivel de N1 le corresponde la agrupación “A” y es estadísticamente diferente al nivel N2 quien presenta la agrupación “B” (Cuadro 33 y Figura 28).

Cuadro 33. Prueba de Tukey al 5% de probabilidad de Magnesio en el grano.

	Niveles de Nitrógeno	% Mg en el grano	Agrupación
1	N1	0.1476	A
2	N2	0.1360	B

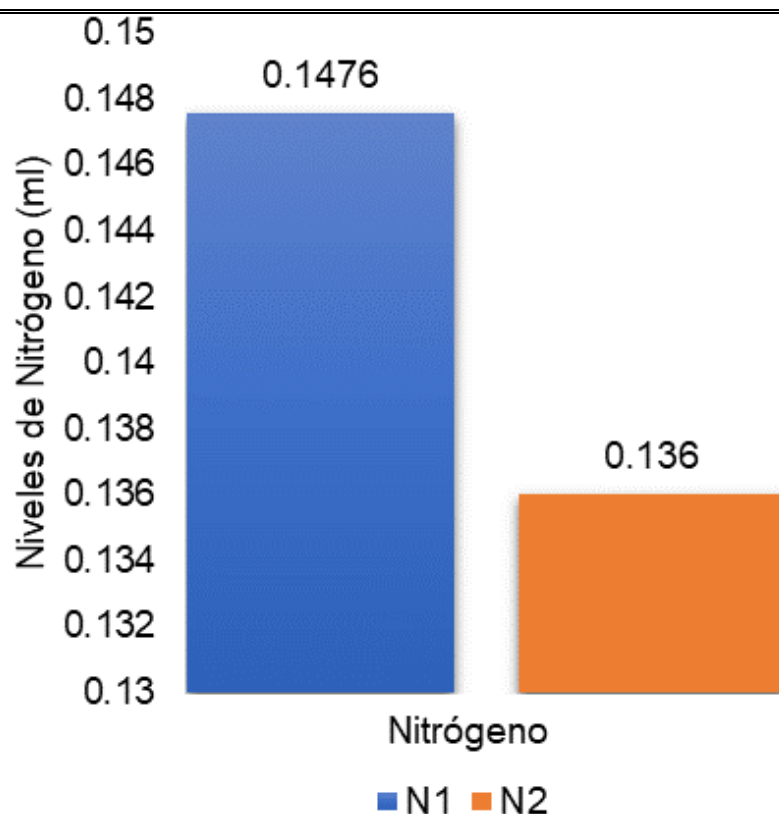


Figura 28. Valores promedios de Nitrógeno en el Magnesio del grano.

Para las fuentes de Escoria, la prueba de comparación de medias Tukey al 5% de probabilidad mostro que no existe diferencias entre las fuentes, presentando para las cinco fuentes la agrupación “A”. Ahora la fuente de escoria que presento mayor respuesta a su promedio del % Mg en el grano es E4 quien obtuvo un promedio de 0.1460 (Cuadro 34 y Figura 29).

Cuadro 34. Prueba de Tukey al 5% en la dosis de escoria en el Magnesio del grano.

	Fuentes de Escoria	% Mg en el grano	Agrupación
1	E4	0.146	A
2	E3	0.143	A
3	E2	0.143	A
4	E1	0.139	A
5	E0	0.138	A

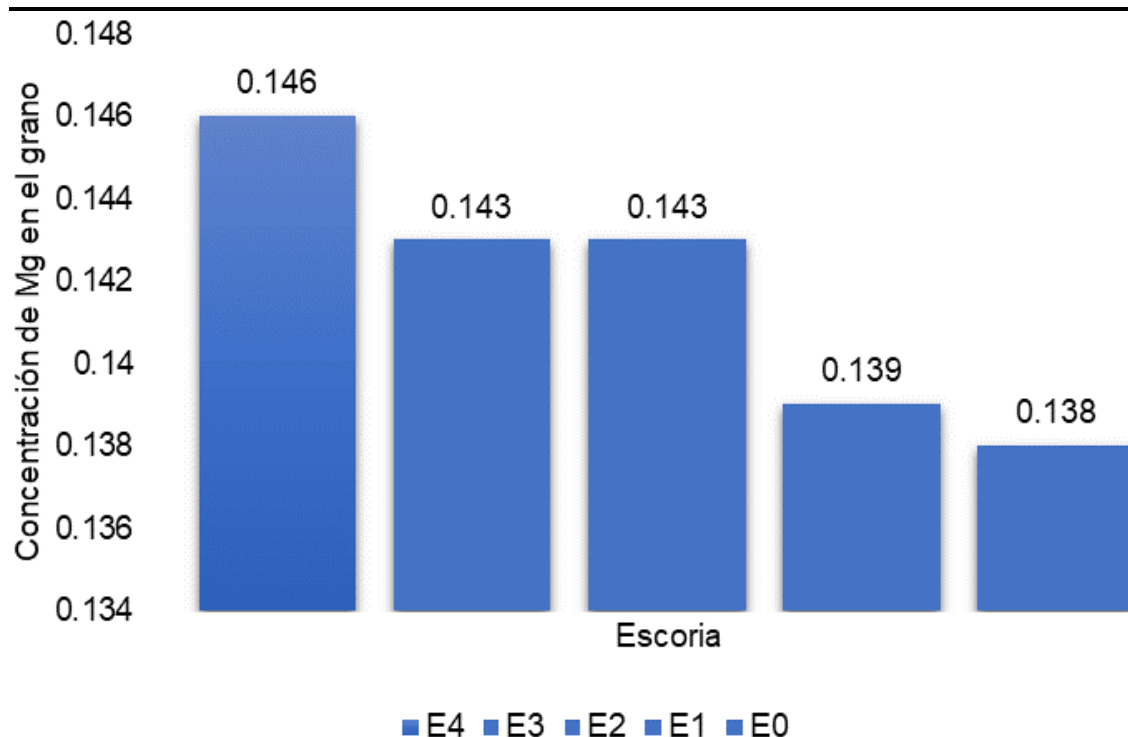


Figura 29. Valores promedios de Escoria en el Magnesio del grano.

4.3.3. Altura de la planta

Según el análisis de variancia realizado para la variable altura de planta indico que existen diferencias altamente significativas para los niveles de nitrógeno (N) y para las fuentes de escoria (E). Asimismo, se observó que para la interacción de niveles de nitrógeno y fuentes de escoria (N*E) no se presentó diferencias estadísticas. El coeficiente de variabilidad presentado fue de 6.57% y el promedio general de la altura de planta del experimento fue de 73.426 cm (Cuadro 35).

Cuadro 35. Análisis de varianza para la altura de la planta.

Fuente de Variación	g.l	SC	CM	F-calculado	p-value
N	1	1051.5698	1051.5698	45.14	<.0001**
E	4	416.7092	104.1773	4.47	0.0044**
N*E	4	118.4372	29.6093	1.27	0.2974
Error	40	931.7800	23.2945		
Total	49	2518.4962			
C.V. = 6.57%				Promedio general = 73.426	

Al realizar la prueba de comparación de medias Tukey al 5% de probabilidad para los niveles de nitrógeno, mostro que el nivel N1 le corresponde la agrupación “A” y es estadísticamente diferente al nivel N2 quien presenta la agrupación “B” (Cuadro 36 y Figura 30).

Cuadro 36. Prueba de Tukey al 5% de probabilidad para la altura de la planta.

	Niveles de Nitrógeno	Altura de planta	Agrupación
1	N1	78.012	A
2	N2	68.840	B

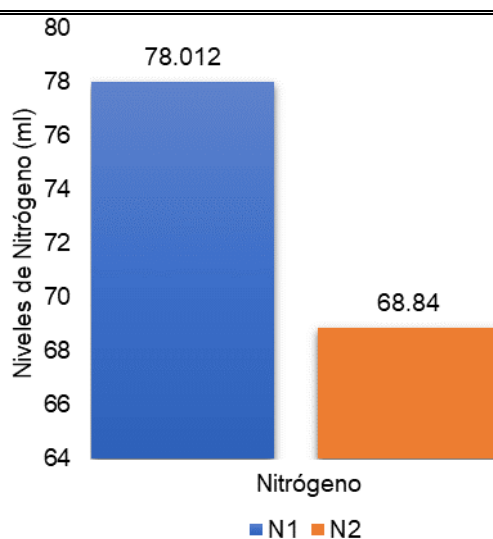


Figura 160. Valores promedios de Nitrógeno en la altura de la planta.

Para las fuentes de Escoria, la prueba de cotejo de medias Tukey al 5% de posibilidad mostro que las fuentes de escoria E0, E1 y E2, son estadísticamente similares, correspondiéndole la agrupación “A”. Asimismo, se observó que la fuente E0 es estadísticamente diferente a E4 y E3 a quienes les corresponde la agrupación “B”. También se puede distinguir que la fuente E3 y E4 son estadísticamente similares a E1 y E2. La fuente de escoria que presento mayor respuesta en relación a su promedio de altura de planta es E0 quien obtuvo un promedio de 78.660 cm (Cuadro 37 y Figura 31).

Cuadro 37. Prueba de Tukey al 5% en la dosis de escoria en la altura de la planta.

	Fuentes de Escoria	Altura de planta	Agrupación
1	E0	78.660	A
2	E1	73.550	A B
3	E2	73.130	A B
4	E4	71.720	B
5	E3	70.070	B

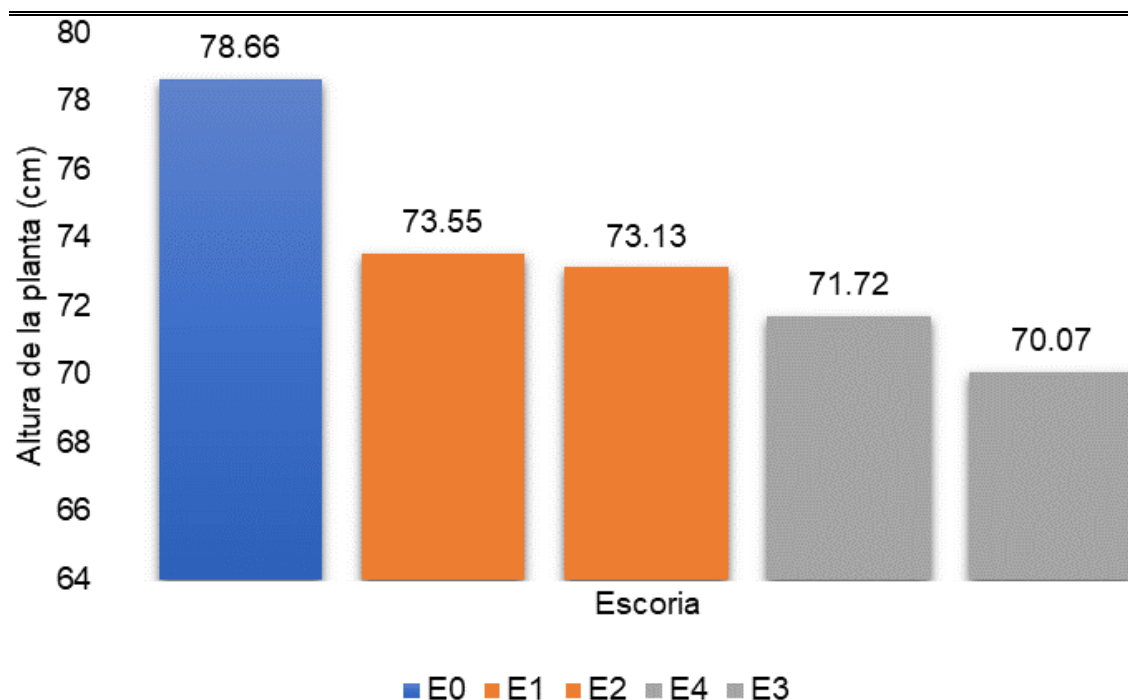


Figura 171. Valores promedios de escoria en la altura de la planta.

4.3.4. Peso fresco del grano

Con relación a la variable del peso fresco del grano, el análisis de variancia realizado indico que no hay diferencias significativas para los niveles de nitrógeno (N), fuentes de escoria (E) y para la interacción de los factores en estudio N*E (Nitrógeno x Escoria). El coeficiente de variabilidad presentado fue de 28.76 % y el promedio general del peso fresco del grano en relación al experimento fue de 13.13 gr (Cuadro 38).

Cuadro 38. Análisis de varianza para la variable peso fresco del grano.

Fuente de Variación	g.l	SC	CM	F-calculado	p-value
N	1	12.2809	12.2809	0.86	0.3591
E	4	30.3418	7.5854	0.53	0.7131
N*E	4	25.1502	6.2875	0.44	0.7784
Error	40	570.6913	14.2672		
Total	49	638.4644			
C.V. = 28.76 %				Promedio general = 13.13	

Al realizar la prueba de cotejo de medias Tukey al 5% de posibilidad para los niveles de nitrógeno, confirmo que no existen diferencias entre los niveles, presentando para ambos niveles de la agrupación “A” (Cuadro 39 y Figura 32).

Cuadro 39. Prueba de Tukey al 5% de probabilidad en el peso fresco del grano.

	Niveles de Nitrógeno	Peso fresco del grano	Agrupación
1	N1	13.628	A
2	N2	12.636	A

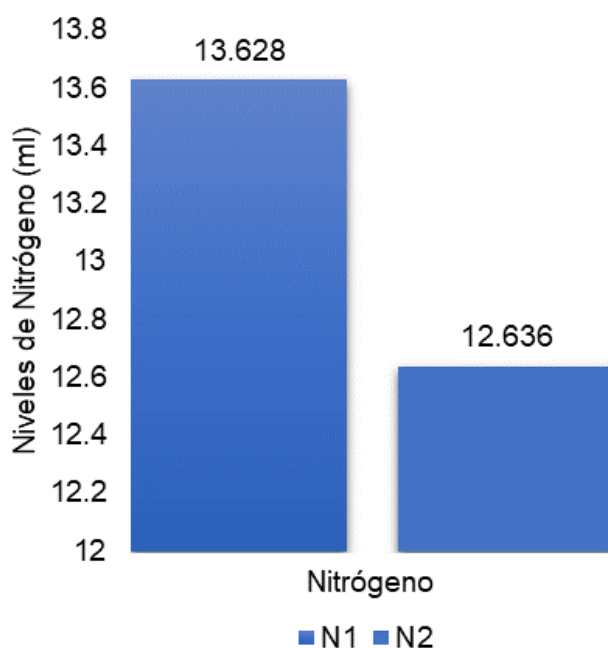


Figura 182. Valores promedios de Nitrógeno en el peso fresco del grano.

Para las fuentes de Escoria, la prueba de cotejo de medias Tukey al 5% de posibilidad mostro que las fuentes de escoria E0, E4, E1 y E3 y E2 corresponden a la agrupación “A” con un promedio de peso fresco del grano 13.967, 13.860, 13.413, 12.328 y 12.092 gr respectivamente (Cuadro 40 y Figura 33).

Cuadro 40. Prueba de Tukey al 5% en la dosis de escoria en el peso fresco del grano.

	Fuentes de Escoria	Peso fresco del grano	Agrupación
1	E0	13.967	A
2	E4	13.860	A
3	E1	13.413	A
4	E3	12.328	A
5	E2	12.092	A

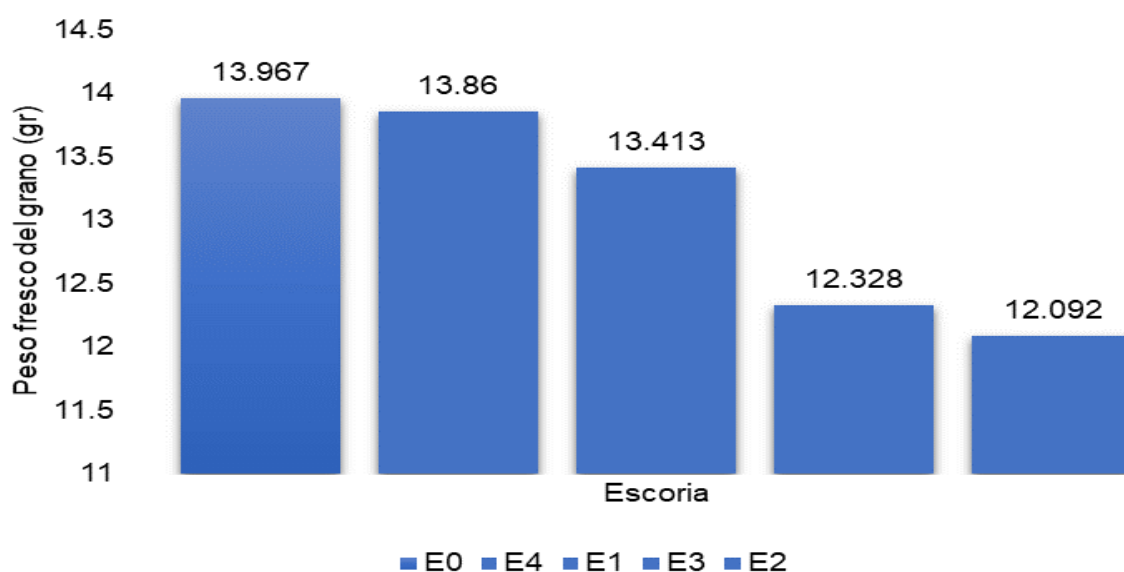


Figura 193. Valores promedios de Escoria en el peso fresco del grano.

4.3.5. Peso seco del grano

En el caso del peso seco del grano, el análisis de variancia realizado indico que no hay diferencias significativas para los niveles de nitrógeno (N), fuentes de escoria (E) y para la interacción de los factores en estudio N*E (Nitrógeno x Escoria). El coeficiente de variabilidad presentado fue de 28.77 % y el promedio general del peso seco del grano en relación al experimento fue de 12.09 gr (Cuadro 41).

Cuadro 41. Análisis de varianza para la variable peso seco del grano.

Fuente de Variación	g.l	SC	CM	F-calculado	p-value
N	1	9.27081	9.2708	0.77	0.3867
E	4	23.5120	5.8780	0.49	0.7461
N*E	4	21.8952	5.4738	0.45	0.7701
Error	40	484.1325	12.1033		
Total	49	538.8106			
C.V. = 28.77 %				Promedio general = 12.09	

Al realizar la prueba de cotejo de medias Tukey al 5% de posibilidad para los niveles de nitrógeno, confirmo que no existen diferencias entre los niveles, presentando para ambos niveles de la agrupación “A” (Cuadro 42 y Figura 34).

Cuadro 42. Prueba de Tukey al 5% de probabilidad en el peso seco del grano.

	Niveles de Nitrógeno	Peso seco del grano	Agrupación
1	N1	12.5216	A
2	N2	11.6604	A

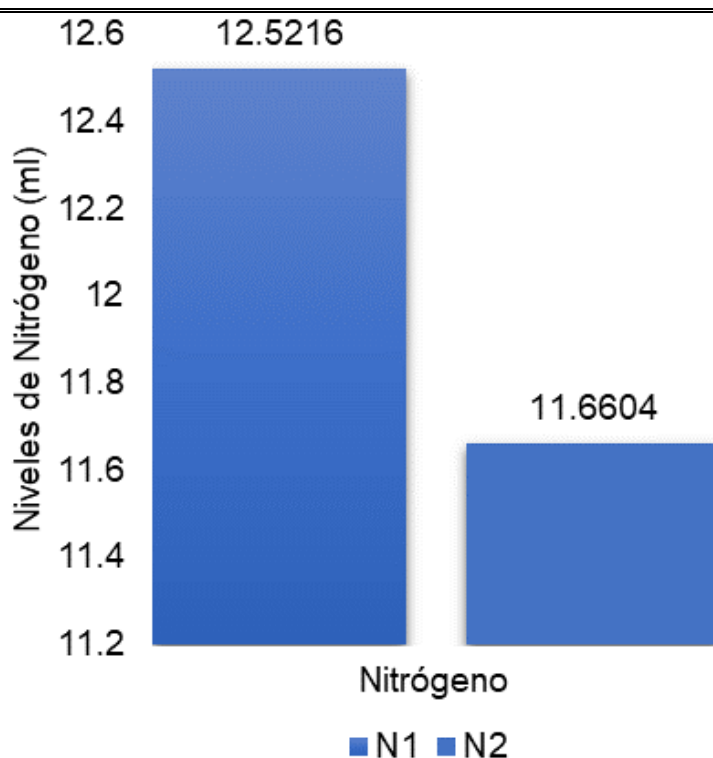


Figura 34. Valores promedios de Nitrógeno en el peso seco del grano.

Para las fuentes de Escoria, la prueba de cotejo de medias Tukey al 5% de probabilidad mostro que las fuentes de escoria E0, E4, E1, E3 y E2 corresponden a la agrupación “A” con un promedio de peso fresco del grano 12.828, 12.717, 12.347, 11.423 y 11.140 gr respectivamente (Cuadro 43 y 35 Figura).

Cuadro 43. Prueba de Tukey al 5% en la dosis de escoria en el peso seco del grano.

	Fuentes de Escoria	Peso seco del grano	Agrupación
1	E0	12.828	A
2	E4	12.717	A
3	E1	12.347	A
4	E3	11.423	A
5	E2	11.140	A

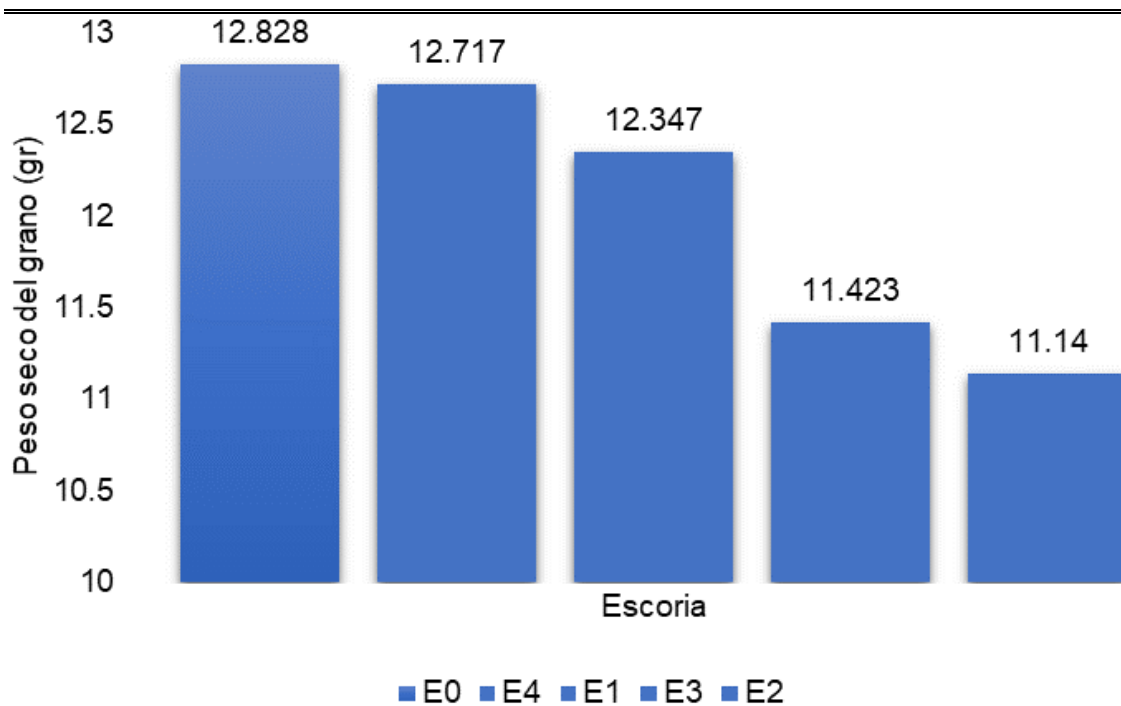


Figura 205. Valores promedios de escoria en el peso seco del grano.

V. DISCUSIÓN

5.1. Efecto de la escoria siderúrgica en el pH y en la acidez cambiante

Los resultados sobre el efecto de la escoria sobre el pH del suelo muestran que el pH del suelo aumenta con diferentes dosis de escoria, por lo que E4 tiene el pH más alto con 6.976, mientras que E0 tiene el pH más bajo con 5.473 alcanzado; en cierta medida coincide con los hallazgos de PEREGRINA (2008) que subproductos a modo que las escorias de la industria siderúrgica (principalmente compuestos de silicato de Ca y Mg) serían una buena opción para sustituir o amplificar el efecto cal de la superficie más soluble y alcalinidad.

Mientras que BRADY Y WEIL (2008), manifiestan que cuando existen buenas condiciones para los organismos vivos, el pH disminuye como consecuencia de los ácidos producidos por microorganismos y los exudados producidos por las plantas.

Los resultados logrados del efecto de la escoria siderúrgica en la acidez del suelo, nos evidencia que E₀ es la más ácida, mientras que la E₄ es la que consiguió el menor valor, indicándonos así que mientras se aplica enmienda o algún otro producto, la acidez va a disminuir, todo esto no coincide con lo establecido por BREEMEN (1991) que señala que en diferentes estudios las causas de la acidificación del suelo, consistente en incrementar ácidos fuertes,

mediante lluvias ácidas, por fertilizantes acidificantes u otros métodos que pueden originar a la degradación de los suelos.

Mientras que AMARAL (1999) menciona que después de la aplicación de la creciente cantidad de escoria, el pH del suelo acrecienta proporcionalmente. Además, a valores de pH entre 7,4 y 8,5, la disponibilidad Fe se reduce, mientras que a valores de pH más altos que aumenta; Por otro lado, el P y la disponibilidad Mn aumenta proporcionalmente.

Asimismo, JOHNSON (2002) menciona que la acidez por si sola, no compone un factor limitante para la planta, sino que en realidad es el efecto tóxico en la solución del suelo debido la aglomeración tiende a ser mayor a 1 ppm en el que se ocasiona serios problemas ecológicos. Mientras que ULRICH Y SUMNER (1991) mencionan que la acidificación de un suelo precisa como una disminución en la capacidad de neutralización de ácido, y/o un aumento en la capacidad de neutralización de bases.

5.2. Efecto de la aplicación de escoria sobre la concentración de metales pesados en el suelo.

De la presente investigación de tesis se obtuvo los siguientes resultados:

Con respecto al efecto de la escoria en la concentración del Pb total en el suelo se obtiene que es mucho mayor en la dosis E₄ (32.227ppm), así mismo el efecto de la escoria es totalmente desigual en la dosis E₀ (26.654 ppm) ya que es el que obtuvo el menor valor en comparación a los demás, por eso

cabe mencionar que se encuentran dentro del parámetro establecido por los Estandares de Calidad Ambiental (ECA) para el suelo. Mientras que para el caso del Cd total tenemos que todos los tratamientos son similares entre sí, pero teniendo en cuenta que la dosis E₀ es quien obtuvo la menor concentración con (1.599 ppm) y la dosis de E₄ la mayor concentración con (1.739 ppm). Sin embargo estos resultados no fueron los esperados ya que no se encuentran dentro del parámetro establecido por los Estandares de Calidad Ambiental (ECA) además se observa que el efecto de la escoria en el Cr total, nos muestra que los mayores valores se encuentran en la E₄ (17.085 ppm), E₃ (15.680 ppm), E₂ (14.775 ppm) y E₁ (11.195 ppm) con características similares, mientras que el menor lo obtuvo la dosis E₀ (6.688 ppm) considerándose aceptable en un rango común para el suelo citado por LINSAY (1979).

Cabe mencionar que IÑIGUEZ (2001) en el cual indica que el uso de escoria es de crucial importancia porque, si bien es un remanente de la producción de acero, sería utilizado en la agricultura para el tratamiento de suelos. Además de la escoria, es un subproducto de la industria del acero compuesto principalmente por silicato de calcio, hierro y magnesio, obtenido por las reacciones químicas que dan lugar en los procesos de conformación de metales.

Los resultados alcanzados concuerdan con lo establecido por MOLINA (2008) que señala que los metales pesados se hallarían en el suelo tanto de carácter natural, es decir, originarios de la roca madre, o bien haber sido incorporados al mismo de forma antropogénicas, por ejemplo gracias al uso de abonos, y más nuevamente, por enmiendas orgánicas.

Por otro lado, el presente estudio de investigación concuerda con lo establecido por RUBIO et al. (1996) en el que se dan distintas reacciones en el suelo que determinarán su velocidad y tiempo de resistencia ligados a su ciclo biogeoquímico. El principal origen del incremento de metales pesados en el suelo reside en las actividades industriales, consideraron que las concentraciones de metales contaminantes no alcanzaron su valor superior y que aumentan con el período debido a las actividades industriales y la agricultura moderna. También concuerda con lo dicho por AMARAL (1999) que menciona que el suelo está constituido por materia orgánica (arena, partículas de limo y arcilla), materia orgánica, agua, gases y organismos vivos (gusanos), Insectos, algas, bacterias, hongos, etc.), entre los cuales existe un intercambio continuo de moléculas a través de cambios físicos, químicos y biológicos. De ello se desprende que para instaurar la calidad de un suelo es fundamental el estudio de todo tipo de propiedades (físicas, químicas, biológicas y microbiológicas).

Mientras que DORAN Y PARQKIN (1994) subrayan que la calidad del suelo no es sencilla de definir, ya que depende del uso que se le dé a dicho suelo (agrícola, forestal, urbano, industrial); De la misma manera PAPENDICK y PARR (1992), apoyan la calidad de un suelo como su capacidad para preservar su productividad biológica, su calidad ambiental, mejorando también la salud de los animales, plantas y del propio ser humano.

5.3. Efecto de la aplicación de escoria sobre la materia seca de la planta indicadora cebada (*Hordeum vulgare*)

FERGUSSON (1990), menciona que los oligoelementos, como As, Cd o Talio, son escasos en el agua y el suelo en circunstancias naturales, sin embargo, las actividades industriales y mineras podrían causar contaminación. En base a estos elementos irían a plantas y animales donde puede concentrarse y causar efectos tóxicos para los humanos. También afirma que el término fitotoxicidad se ha asociado normalmente al fenómeno originado por una sustancia potencialmente nociva en el tejido vegetal que altera su óptimo crecimiento y desarrollo.

Asimismo, MCGRATH y SMITH (1990) indican que en el contexto de la nutrición vegetal, existen oligoelementos obligatorios que se agregan cuando están aprovechables en el suelo o el agua y dependiendo de la especie vegetal (Figura 9 y 10); también se requieren en determinadas concentraciones, procedente de diferentes formas; ya sea por su carencia o por su exceso, pero cuando estos elementos son numerosos para las plantas, se vuelven tóxicos y provocan una falta de calidad.

De la presente investigación de tesis se obtuvo los siguientes resultados:

Los metales pesados encontrados en el grano tenemos: Que en el efecto de la escoria con respecto al metal pesado Pb, nos muestra que todos los tratamientos presentan valores similares y no son diferentes entre sí. A diferencia

de la concentración del Cd ya que son diferentes entre si; por lo que el tratamiento que obtuvo mayor contenido de Cd en el grano fue la E₄ (0.616 ppm) y la E₃ (0.588 ppm), seguido de la E₂ (0.552 ppm), la E₁ (0.384 ppm), mientras que la E₀ (0.255 ppm) es el que obtuvo el menor efecto. Asimismo para la concentración del Cr en el grano no se registro respuesta alguna, ya que no se llegó a realizar la prueba para determinar el contenido de Cr en el grano.

MURILLO (2010) señala que el pH es la causa importante que controla la disponibilidad de metales pesados para las plantas, una gran parte de los metales tienden a estar más aprovechables al pH ácido, pues al provocar una disminución en el mismo, progresa tanto la solubilidad de los metales y su absorción por las raíces de las plantas.

Ya que el plomo es acumulativo, este tiene un movimiento lento dentro de las plantas, pero en altas concentraciones las cuales serían tóxicas para los cultivos, estos pueden presentar un crecimiento lento o no se llegan a desarrollar normalmente (AMERICA, 2004). El plomo es absorbido en forma de iones por las plantas mediante su sistema radicular y es transportado a las zonas metabólicamente activas de la planta en el que ejercen sus productos tóxicos, por lo que se necesita saber sus variaciones en cuanto a su reactividad química y de su oscilación. en el suelo y la planta (FASSBENDER y BORNEMISZA, 1987).

Los resultados obtenidos acerca de los elementos esenciales en el grano tenemos: que el efecto de la escoria con respecto al Calcio y el Magnesio presentan valores similares y no son diferentes entre sí. Asimismo todo esto

coincide con lo establecido por IÑIGUEZ (2001) que menciona de manera general el calcio, magnesio son lixiviados en suelos ácidos, especialmente en aquellos de pH menor a 5,0, alto contenido de materia orgánica y textura arenosa. Generalmente se dan suficientes cantidades de potasio, calcio y magnesio entre pH 6,0 y 8,5. Por encima de pH 8,5 la alcalinidad del sodio disminuye la solubilidad. Con porcentajes de sodio progresivamente elevados, la disponibilidad de calcio decrece para las plantas; los porcentajes de calcio decrecen en forma menos notoria que el magnesio.

La cebada (*Hordeum vulgare*) que obtuvo mayor altura fue la E₀ (78.66 cm), seguido de la E₁ (73.55 cm) y E₂ (73.13 cm), mientras que la E₄ (71.72 cm) y E₃ (70.07 cm) obtuvieron los menores valores respectivamente. Asimismo INPOFOS (1993) La medida de fertilizar es una de las herramientas de gestión empresarial que inciden claramente en el costo de producción y la rentabilidad de producir cereales ya sea trigo y el maíz. Especialmente porque el nutriente más relacionado con el rendimiento es el nitrógeno, tiene una relación lineal con la producción física, en el valor de uso más frecuente. Al mismo tiempo, el aporte de nitrógeno del suelo, que suple y equilibra la demanda y puntualiza la escasez de fertilizante, se ve afectado por causas climáticas de ocurrencia aleatoria como la humedad y la temperatura, causas que precisan el rendimiento y por ende la demanda de N.

En cuanto al peso fresco y seco de la cebada (*Hordeum vulgare*), con mayor respuesta se observa en la dosis E₀ y menor en la dosis E₂ pero similares entre si.

Todos estos aspectos de los resultados coinciden con lo establecido con ABC AGRO s.f. En lo que indica que el N está involucrado en el rendimiento y también en la calidad, ya que se debe al contenido proteico del grano. Cuando la planta carece de N, el vigor disminuye, las hojas son chicas, las puntas de las hojas se vuelven amarillas, que se extiende gradualmente a lo extenso de la nervadura central, creando una especie de patrón en forma de V. Cuando se corrige la deficiencia de N, toda la hoja se vuelve amarilla, y gradualmente las hojas por encima de la primera se vuelven amarillas. Cuando el daño se debe a la sequía, las hojas se tornan amarillas, pero entonces el fenómeno ocurre en todas las hojas al mismo tiempo. La absorción de N se produce principalmente en las cinco semanas que acontecen desde los diez días previamente de la floración hasta los veinticinco o treinta días posteriores. En el periodo de estas 5 semanas la planta obtiene el 75% de sus necesidades totales. El ácido fosfórico favorece la fertilización y el buen desarrollo del grano. Igualmente beneficia el desarrollo de las raíces.

La principal característica del calcio se debe a la falta de movilidad en la planta a tal medida que en la misma planta es viable ver simultáneamente hojas antiguas que han acumulado altas concentraciones de calcio y hojas jóvenes que muestran signos de carencia. Asimismo, la deficiencia se muestra en las hojas, frutos, la mala nutrición de calcio es la causa de enfermedades fisiológicas. Y la toxicidad conducirá a una deficiencia de Mg o K (MOLINA, 2008).

Mientras que en el caso del magnesio, los resultados coinciden con lo establecido por RAHMAN (2007) quien menciona al magnesio como

macronutriente esencial para las plantas, el cual forma parte de la clorofila, pero también realiza otras funciones (promueve reacciones enzimáticas, regulación del Ph celular, cationes y equilibrio aniónico). La concentración de Mg en los tejidos vegetales es generalmente inferior al 0,5%. Como la ausencia está vigente en la falta de color entre las nervaduras, las hojas se volverían quebradizas y curvarse, puntas y bordes. Si bien su deficiencia se presenta en la planta por la apariencia de hojas menos cloróticas, reduciendo la cosecha y tamaño de los frutos. Una profusión de este elemento provoca deficiencia de calcio.

Los resultados obtenidos en esta tesis coinciden con los establecidos por NASTUSH (1997) en la figura 10; el cual menciona lo siguiente: Que el efecto del vegetal sobre el Plomo (Pb) produce la abstención de fotosíntesis, crecimiento y acción enzimática. Mientras que en cadmio (Cd) hay abstención de fotosíntesis y transpiración. Inhibición de la síntesis de clorofila. Alteración de las concentraciones de Fe, Ca, K y Mg; También tenemos que en el Cromo (Cr) se provoca la degradación de la estructura del cloroplasto, inhibición de la fotosíntesis, modificación de las concentraciones de Fe, Ca, K y Mg. También podemos mencionar que los resultados obtenidos en esta investigación de tesis coinciden en cierto modo con la investigación realizada por ENCINA (2016), en la cual, gracias a su investigación realizada en la UNALM (Universidad Nacional Agraria La Molina), con los suelos de Tingo María determinó en su investigación sobre los resultados del encalado con escoria y CaCO_3 en el cultivo de maíz, que se llevó a cabo en macetas, encontrando que el encalado aumentó significativamente.

VI. CONCLUSIONES

1. En el presente experimento el uso de la escoria de siderúrgica alcalina para la modificación de suelo ácido y el crecimiento de plantas fue positiva ya que se ha analizado y se ha comprobado que mediante la aplicación de manera creciente de la escoria fue efectiva en el pH del suelo ya que aumento proporcionalmente.
2. Se logró el incremento del pH al aplicar las diferentes dosis de escoria de siderúrgica a medida que aumentaron las dosis se produjeron mayor el cambio de las cuales las más resaltantes fueron en los tratamientos T7, T8, T9 y T10 con valores promedio de (6.976 y 5.987) correspondientes a las dosis de D3 y D4 (5.74 y 11.48 mg/100g suelo) respectivamente, de las cuales fueron los tratamientos que obtuvieron un mayor incremento. Seguidamente los niveles de N fueron estadísticamente diferentes ya que el nivel de N1 fue superior con un promedio de 6.138 a diferencia del nivel de nitrógeno N2 de las cuales se obtuvo 5,987 en el pH del suelo. El aumento de las dosis de escoria de siderúrgica tuvo efecto en la disminución de la acidez cambiante y los promedios más resaltantes se encuentran en los tratamientos T7, T8, T9 y T10 con valores promedio de (0.010 y 0.00 meq/100g.) correspondientes a las dosis de (D3 y D4) respectivamente, en tanto para los niveles de N no existe diferencias

estadísticas obteniendo así valores promedio de acidez cambiante para el nivel de N2 (0.0692) y para el nivel de N1 fue de (0.0527).

3. El estudio realizado para determinar el efecto de la aplicación de la escoria sobre la concentración de metales pesados en el suelo prueba que:

- La cuantificación de los valores de Pb y Cr (total), se ubicó por debajo del límite máximo permisible y de la localización del espectrofotómetro de absorción atómica, siendo para el caso del Pb los tratamientos T1, T2, T3 y T4 con dosis (D0 y D1), (26.6 y 30.0 ppm) respectivamente, quienes presentaron promedios con menor concentración a diferencia de los demás tratamientos. Para los niveles de nitrógeno, confirmo que no existen diferencias entre los niveles, presentado para ambos niveles con valores promedio de 30.2088 y 30.0364 ppm (N1 y N2) respectivamente. Asimismo es el caso del Cr, se puede observar que también en los tratamientos T1, T2, T3 y T4 con dosis (D0 y D1), (6.6880 y 11.1950 ppm) respectivamente, presentaron promedios de menor concentración a diferencia de los demás tratamientos, pero sus niveles de N son estadísticamente diferentes ya que el N1 se observa que obtuvo una mayor concentración de Cr total con 13.8920 ppm a diferencia del nivel de N2 quien presenta 12.2772 ppm de Cr total en el suelo. Mientras que para el Cd (total), se situó por encima del límite máximo permisible, en todos los tratamientos y los niveles de N indicaron que no existe diferencias estadísticas ya que ambos

obtuvieron una concentración promedio de 1.68480 ppm para el nivel de nitrógeno N2 y para el nivel de nitrógeno N1 fue de 1.67360 ppm en el suelo. Por tanto, en base a estos resultados podemos decir que el suelo no presentan problemas de contaminación con respecto al Pb y Cr (total), a diferencia del Cd (total), quien presento promedios con mayores niveles en todos los tratamientos.

4. Para el estudio realizado en el efecto de la aplicación de escoria sobre la materia seca muestra que:

- En el parámetro de la concentración de metales pesados en el grano, los tratamientos que no presentaron presencia de Cr fueron en todos. A diferencia de lo que ocurrió en la concentración promedio del Pb sobre la materia seca del grano, la dosis de escoria D0 quien presento menor promedio de concentración con 7.711 de Pb y D4 con mayor concentración promedio de 9.381 respectivamente. Mientras tanto en los niveles de Nitrogeno la concentración promedio de Pb fue mayor en N1 con 8.5731 y menor en N2 con 8.0746 respectivamente. Para la concentración promedio de Cd fue lo contrario ya que la mayor concentración se encontró en N2 con 0.4761 y la menor fue en N1 con 0.4596 respectivamente.
- En el parámetro altura de planta, los tratamientos que obtuvieron un mayor promedio fueron T1 y T2 (78.660 cm) con dosis D0 (0.00 mg/100g suelo) de la escoria de siderúrgica, seguido por

los niveles de N1 (100 ppm) de nitrógeno en el suelo (78.012 cm). Por lo tanto no hubo aparentes efectos negativos a diferencia del nivel N2 de (200 ppm) de nitrógeno (68.840 cm).

- Por otro lado el peso fresco del grano, los tratamientos que obtuvieron mayor valor promedio fueron T1 y T2 (13.967g) con dosis D0 (0.00 mg/100g suelo) de la escoria de siderúrgica, seguido de los niveles de nitrógeno quien resalta más fue el nivel de nitrógeno N1 con (13.967 g), a diferencia del nivel de nitrógeno N2.
- Finalmente para el caso de del peso seco del grano, los tratamientos que obtuvieron un mayor promedio fueron T1 y T2 (12.828g) con dosis D0 (0.00 mg/100g suelo) de la escoria de siderúrgica, asimismo los niveles de nitrógeno que predominó más fue el nivel de nitrógeno N1 con un promedio de 12.5216 g a diferencia del N2.

VII. RECOMENDACIONES

1. Realizar ensayos con respecto al encalado utilizando la escoria de siderúrgica en diferentes suelos a largo plazo y además realizar estudios microbiológicos.
2. La homogeneidad del material encalante (escoria de siderúrgica) en el suelo es clave e importante para la elaboración de trabajos experimentales en este caso para corregir el pH y a la vez disminuir la acidez de los suelos ácidos.
3. Llevar a cabo más investigaciones con respecto al comportamiento de los metales pesados en el suelo con el fin de comprender los efectos del uso a largo plazo de las escorias de siderúrgica en la agricultura.
4. Seguir evaluando estudios del efecto de la escoria de siderúrgica con respecto a la materia seca de las cuales requiere una evaluación más completa con las distintas plantas a utilizar para el experimento.

**EFFECT OF SLAG AS AN ENHANCING AMENDMENT FOR THE
CULTIVATION OF BARLEY (*Hordeum vulgare*) ON AN ACID SOIL OF THE
DISTRICT OF SINCOS - JUNÍN**

VIII. ABSTRACT

The present investigation was carried out in the experimental field of the Soil Conservation Laboratory at LASPAF of the National Agrarian University of La Molina, the objective was to evaluate the effect of liming with iron and steel slag on an acid soil from Jauja, Junín, on barley (*Hordeum vulgare*).

The encalante source used was applied in increasing doses of 0, 1,435, 2.87, 5.74 and 11.48 (mg / 100 g soil) in 2,500-kg pots, to be subsequently incubated at 80% of its field capacity for a space of 45 days. Regarding fertilization, monoammonium phosphate, potassium nitrate, ammonium nitrate were used as fertilizers, where evaluated N doses of 100 and 200 mg / kg-1 were obtained, and finally magnesium sulfate, from which fertigation it was carried out for eight weeks in two stages. A completely randomized experimental design with 10 treatments and 5 replications was used, with a factorial arrangement of 2 sources of N (100 and 200 mg / kg-1) and four doses of slag, in which the pH was evaluated after incubation and harvest, thus the changeable acidity, concentration of heavy metals in the soil and the application of the slag in the dry

matter of the indicator plant were also evaluated. The results obtained showed us the effects of liming in the soil, it was found that the slag from the steel mill applied at doses of 5.74 and 11.48 (mg / 100gr of soil) increased the pH, and as a reaction decreased the changeable acidity of the soil. In the case of heavy metals, the levels of Pb and Cr (total) were below the maximum allowable dose limit (D0 and D1). While for Cd (total), it was above the maximum permissible limit, in all treatments. In the case of the grain of the plant, the presence of Pb and Cd obtained less concentration in treatments T1 and T2, unlike Cr, of which no presence was found in any treatment, and for the elements Ca and Mg the highest concentration were found in treatments T9 and T10 respectively. For the variable plant height, fresh and dry weight of the foliage I indicate that there are highly significant differences for nitrogen levels (N) and for slag sources (E), It was also observed that for the interaction of nitrogen levels and sources slag (N * E) statistical differences were not presented. Finally, in relation to the variable of the fresh and dry weight of the grain, there are no significant differences for the levels of nitrogen (N), sources of slag (E) and for the interaction of the factors under study (N * E).

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABC AGRO, s.f. El cultivo de maíz [En línea]: (<http://www.abcagro.com/herbaceos/cereales/maiz.asp>, documento, 10 de Noviembre del 2017).

ALCARDE, J., RODELLA, A. 2003. Quality and legislations of fertilizer and acidity correction sources. In: Curi, N; Marques, JJ; Guilherme, LRG; Lima, JM; Lopes, AS; Álvares, VH. (Eds.). Topics in Soil Science. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, pp. 291–334 (in Portuguese).

ALI, M., SHAHRAM, S. 2007. Escoria de convertidor como un agente de encalado en la mejora de suelos ácidos. Revista Internacional de Agricultura y Biología, Vol. 9, No. 5, (2007), pp. (715-720), ISSN 1560-8530.

AMABELIA, P. 2012. Acidez del suelo. [En línea]: (http://www.fagro.edu.uy/~fertilidad/curso/docs/acidez_encalado_impr.pdf, documento, 1 de Agosto del 2017).

AMARAL, L. 1999. Hormigones con escorias de horno eléctrico como áridos. 2da edición. Editorial Cosmos. Quito, Ecuador. 35 p.

- AMERICA A. L. 2004, Consultora en toxicología ambiental y evaluación de riesgos, Mexico, [En línea]: (<http://www.sertox.com.ar/retel/n04/002.pdf>, documento, 1 de Octubre 2019).
- BARBER, S. 1995. Soil bioavailability: s mechanistic approach. 2nd ed. New York: Jonh Wilwy. 414 p.
- BAUTISTA, F. 1999. Introducción al estudio de la contaminación del suelo por metales. Vol.1. UADY, 1999.
- BOHN, H. 2001. Soil chemistry. Third edition, New York, United States. 57 p.
- BORNEMISZA, E., FASSBENDER, W. (1965). Química de Suelos con énfasis en suelos de América Latina. Instituto Interamericano de Cooperación para la agricultura, EDITORIAL IICA, San José, Costa Rica.1987. Pág.161-175, 389 – 397.
- BRADY, C., WEIL. R., 2008. The Nature and Properties of Soils. 14th edition, California, United States. 30 p.
- BREEMEN, N. 1991. Soil Acidification and alkalinization. Third edition, New York, United States. 39 p.
- CASTRO, H., MUNEVAR, O. 2013. Chemical improvement of acidic soils through the use of combined liming materials. [En línea]: (<http://www.scielo.org.co/scielo>., documento, 1 de Agosto del 2017).

EL PERUANO (2017). Normas Legales – Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo. Diario Oficial del Bicentenario El Peruano. Requisitos para publicación de Normas Legales y Sentencia. Lima, Perú. Sábado 2 de Diciembre del 2017.

ENCINA, K. 2017. Escoria básica y carbonato de calcio en la recuperación de un suelo ácido de Tingo María, en maíz (*Zea mays*) PM 231 en invernadero. Tesis Ingeniero Agrónomo. Lima, Perú. Universidad Nacional Agraria la Molina. 56 p.

ESPINOSA, J., MOLINA, E. 1999. Acidez y encalado de suelos. 1ª Edición. International Plant Nutrition Institute. Costa Rica. 70 p.

FASSBENDER, W., BORNEMISZA, E., 1987. Química de suelos con énfasis en suelos en América Latina. Instituto interamericano de cooperación para la agricultura. San José, Costa Rica.

FEEDCOR, E.I.R.L., 2012. Guía para el uso de la escoria de acero en agricultura y recuperación de suelos ácidos. 84 p.

FELIPO, T. 1992. Contaminación del suelo e impacto ambiental. Seminario “contaminación, protección y saneamiento de suelos” UIMP, Valencia.

FERTIBERIA S.A. 2002. Incidencia de los fertilizantes sobre el pH del suelo. [En línea]: (http://oa.upm.es/3176/2/MARISCAL_MONO_2002_01.pdf, documento, 10 de Noviembre del 2017).

GUITART, R., VERNON, G., THOMAS F., 2005. Revista española de salud pública V79 No 6 Madrid Nov. ISSN 1135-5727.

HANS, F. 1978. Química de suelos. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas, 380 pg.

INPOFOS, 1993. Diagnóstico del estado nutricional de los cultivos. Quito.

IÑIGUEZ, M. 2001. Manejo y Conservación de Suelos y Aguas. ed. Cosmos. Loja, Ecuador. p. 129-130-136.

JOHNSON, E. 2002. Cation exchange properties of acid forest soils of the northeastern United States of America. 84 p.

KOVDA, A., 1964. Microelements of the soils in the Union Sovietic Socialist Republics. UNESCO/NR/NS/49.

LINDSAY, W. 1979. Chemical Equilibria in Soils. Wiley. 449 p.

MAGRA, G., AUSILIO, A. 2004. Corrección de la acidez de los suelos. [En línea]:(Disponible.<http://www.fcagr.unr.edu.ar/Extension/Agromensajes/13/9AM13.htm>., documento, 2 de agosto del 2017).

MAS, A., AZCUE, M. 1993. Metales en sistemas biológicos, Barcelona, 1ª Ed. PPU. S.A. 340 pg.

MCGRATH, S., SMITH. S. 1990. Chromium and nickel. 137 pg. En B.J. Alloway (ed) Heavy metal and soils.

- MOLINA, C. 2008. Manual agrícola. Centro de Investigaciones Agronómicas. Universidad de Costa Rica. 89 p.
- MOTZ, H., GEISELER, J. 2001. Artículos de la escoria de acero una oportunidad de ahorrar recursos naturales. Residuos. Administración. Vol. 21, No. 3, (2001), pp. (285 a 293), ISSN 0956-053X.
- MURILLO, U. 2010. Tecnología de suelos: estudio de casos (Vol. 179).
- NASTUSCH, J. 1997. Application and development of cotaminated site remediation technologies in Australia. ANZAC Fllowship report to department of internal affairs, Wellington, New Zealand and department of foreign Affairs and trade, Canberra, Australia.
- NICHOLAIDES, J. 1993. Liming materials: origin, compositions, use and effects. In CRC Handbook of nutritional supplements, Vol. II. Ed. Por M. Recheigl, Florida. P 337 – 336.
- OLIVAS, T. 2014. Efecto de fuentes nitrogenadas y fosforados en el rendimiento de papa (*Solanum tuberosum* L.) en el valle de Barranca. [En línea]: (<https://es.slideshare.net/TULIO19/efecto-de-fuentes-nitrogenadas-y-fosforados-en-el-rendimiento-de-papa-solanum-tuberosum-l-en-el-valle-de-barranca-40224174>, documento, 10 de Noviembre del 2017).
- PEREGRINA, F., MARISCAL, I., ORDÓÑEZ, R., GONZÁLES, P., TEREFE, T., ESPEJO, R. 2008. Agronomic implications of converter basic slag as a magnesium source on acid soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 72, 402–411.

- RAHMAN, M. 2007. Calcium and plant disease. En: DatnoffLE, ElmerWH, HuberDM. (eds) Mineral Nutrition and Plant Disease. St Paul, MN, USA, APS Press, pp 79–93.
- SAVANT, N., KORNDÖRFER, G., DATNOFF, L., SNYDER, G. (1999). La nutrición de silicio y caña de azúcar producción: una revisión. Journal of Plant Nutrition, Vol. 22, No. 12 (1999), pp. (1853-1903), ISSN 0190 hasta 4,167 mil.
- SHERMAN, G. 1971. Phosphorus availability in tropical soils. Agricultura! Digest. No 23:18-20.
- SPOSITO, G. 2008. Chemistry of soils. Second edition. Editorial Oxford. University Press. United States 321 p.
- ULRICH, B., SUMNER, E. 1991. Soil Acidity. Springer – Verlag. Third edition, Texas, United States. 217 pg.
- WIETHÖLTER, S. 1996. Adubação nitrogenada no sistema plantio direto. EMBRAPA-CNPT, Passo Fundo. 44 p.
- WORLD STEEL ASSOCIATION. 2012. Crude Steel Production. New York, United States. [En línea]: (<http://www.worldstee.org>., 2 de agosto del 2017).
- ZAPATA, R. 2004. Química de la acidez del suelo. Medellín, Colombia. Universidad de Zaragoza. 110 p.

ANEXO

ANEXO I: Resultado de laboratorio de los análisis de suelo.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE AGRONOMIA
LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN SUELO

SOLICITANTE : DIXIE SZOCHOVA CHUQUIMIA VALDEZ/ RAQUEL ZEA LOAIZA

PROCEDENCIA : JUNÍN/ JAUJA/ SINCOS

REFERENCIA : H.R. 58234

FECHA : 08/05/2017

Número Muestra		pH	Al ⁺³ + H ⁺¹ meq/100 g	Pb ppm	Cd ppm	Cr ppm
Lab	Claves					
2843	T1R1	5.42	0.1	30.42	0.13	10.69
2844	T1R2	5.46	0.2	20.39	0.12	6.94
2845	T1R3	5.72	0.1	22.39	0.14	7.91
2846	T1R4	5.88	0.2	28.29	0.29	7.52
2847	T1R5	5.92	0.1	28.14	0.33	6.12
2848	T2R1	5.16	0.2	25.91	0.15	6.36
2849	T2R2	5.29	0.1	28.36	0.15	7.58
2850	T2R3	5.40	0.1	26.89	0.26	5.86
2851	T2R4	5.50	0.1	33.59	0.19	4.85
2852	T2R5	4.98	0.2	22.16	0.23	3.05
2853	T3R1	5.70	0.1	31.17	0.23	14.89
2854	T3R2	6.01	0.0	34.06	0.15	16.78
2855	T3R3	5.75	0.1	33.31	0.16	13.85
2856	T3R4	5.56	0.1	36.19	0.23	15.09
2857	T3R5	6.02	0.0	30.33	0.22	8.57
2858	T4R1	5.65	0.1	28.64	0.16	6.97
2859	T4R2	5.59	0.1	24.90	0.19	10.35
2860	T4R3	6.04	0.0	30.77	0.23	9.17
2861	T4R4	6.16	0.0	27.36	0.24	7.34
2862	T4R5	5.67	0.1	24.17	0.24	8.94



Dr. Sady García Bendezu
Jefe del Laboratorio

Figura 21. Análisis físico – químico de las muestras de suelo; desde el T₁R₁ hasta el T₄R₅.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
 FACULTAD DE AGRONOMIA
 LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN SUELO

SOLICITANTE : DIXIE SZOCHOVA CHUQUIMIA VALDEZ/ RAQUEL ZEA LOAIZA

PROCEDENCIA : JUNÍN/ JAUJA/ SINCOS

REFERENCIA : H.R. 58234

FECHA : 08/05/2017

Número Muestra		pH	Al ³⁺ + H ⁺ meq/100 g	Pb ppm	Cd ppm	Cr ppm
Lab	Claves					
2863	T5R1	6.23	0.0	29.80	0.20	15.00
2864	T5R2	5.65	0.1	28.67	0.24	15.26
2865	T5R3	6.15	0.0	27.07	0.15	15.96
2866	T5R4	5.56	0.1	30.38	0.33	15.28
2867	T5R5	5.95	0.1	31.90	0.21	12.80
2868	T6R1	5.97	0.1	31.20	0.25	15.34
2869	T6R2	5.83	0.1	31.78	0.25	15.28
2870	T6R3	5.71	0.2	31.59	0.19	14.73
2871	T6R4	5.92	0.1	33.33	0.32	15.64
2872	T6R5	5.77	0.1	32.13	0.41	12.46
2873	T7R1	6.13	0.0	30.88	0.48	17.12
2874	T7R2	6.52	0.0	30.23	0.26	11.50
2875	T7R3	6.31	0.0	27.57	0.27	11.73
2876	T7R4	6.21	0.0	32.61	0.24	17.20
2877	T7R5	6.43	0.0	31.28	0.27	16.78
2878	T8R1	6.29	0.0	33.36	0.29	17.11
2879	T8R2	6.14	0.0	31.76	0.31	14.39
2880	T8R3	6.01	0.0	29.90	0.36	14.88
2881	T8R4	5.34	0.1	29.84	0.30	18.64
2882	T8R5	6.36	0.0	31.14	0.19	17.45



Sady García Bendezu
 Jefe del Laboratorio

Figura 22. Análisis inicial: físico – químico de las muestras de suelo; desde el T5R1 hasta el T8R5.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
 FACULTAD DE AGRONOMIA
 LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN SUELO

SOLICITANTE : DIXIE SZOCHOVA CHUQUIMIA VALDEZ/ RAQUEL ZEA LOAIZA

PROCEDENCIA : JUNIN/ JAUJA/ SINCOS

REFERENCIA : H.R. 58234

FECHA : 08/05/2017

Número Muestra		pH	Al ³⁺ + H ⁺ meq/100 g	Pb ppm	Cd ppm	Cr ppm
Lab	Claves					
2883	T9R1	7.04	0.0	32.61	0.43	21.29
2884	T9R2	7.12	0.0	31.29	0.35	19.38
2885	T9R3	6.98	0.0	32.35	0.40	16.34
2886	T9R4	6.82	0.0	30.39	0.31	18.07
2887	T9R5	6.91	0.0	33.50	0.30	15.23
2888	T10R1	6.71	0.0	32.92	0.34	16.58
2889	T10R2	7.08	0.0	34.68	0.35	16.43
2890	T10R3	7.16	0.0	30.42	0.29	16.01
2891	T10R4	6.96	0.0	32.38	0.35	16.11
2892	T10R5	6.98	0.0	31.73	0.31	15.41



Dr. Sady García Bendezu
Dr. Sady García Bendezu
 Jefe del Laboratorio

Figura 23. Análisis inicial: físico – químico de las muestras de suelo; desde el T₉R₁ hasta el T₁₀R₅.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE AGRONOMIA
 LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



INFORME DE ANALISIS ESPECIAL

SOLICITANTE : DIXIE SZOCHOVA CHUQUIMIA VALDEZ/
RICARDO MACIEL ESCARRACHI CRUZADO

PROCEDENCIA : ANCASH/ CHIMBOTE

MUESTRA DE : ESCORIA

REFERENCIA : H.R. 51341

FECHA : 25/09/15

Nº LAB	CLAVES	pH al 5%	C.E. al 5% dS/m	Ca %	Mg %	K ppm
4122		11.31	0.99	12.38	3.03	482.42

Nº LAB	CLAVES	Na ppm	Pb ppm	Cd ppm	Cr ppm
4122		1010.62	1406.10	5.87	340.89



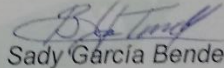

Sady García Bendezi
 Jefe de Laboratorio

Figura 24. Análisis especial de la escoria de siderurgia.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
 FACULTAD DE AGRONOMIA
 LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES

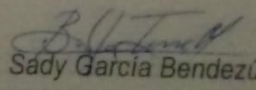


INFORME DE ANALISIS ESPECIAL

SOLICITANTE : DIXIE SZOCHOVA CHUQUIMIA VALDEZ/ RAQUEL ZEA LOAIZA
 PROCEDENCIA : JUNIN/ JAUJA/ SINCOS
 MUESTRA DE : EXTRACTOS DEL GRANO
 REFERENCIA : H.R. 58235
 FECHA : 24/05/17

Nº LAB	CLAVES	Ca %	Mg %	Pb ppm	Cd ppm	Cr ppm
2893	T1R1	0.04	0.14	7.00	0.31	0.00
2894	T1R2	0.04	0.14	16.20	0.58	<0.01
2895	T1R3	0.04	0.14	7.60	0.28	<0.01
2896	T1R4	0.04	0.14	6.80	0.17	<0.01
2897	T1R5	0.03	0.14	9.40	0.14	<0.01
2898	T2R1	0.04	0.13	7.20	0.33	<0.01
2899	T2R2	0.04	0.15	11.40	0.09	<0.01
2900	T2R3	0.05	0.12	3.20	0.24	<0.01
2901	T2R4	0.04	0.12	6.40	0.25	<0.01
2902	T2R5	0.03	0.16	5.20	0.30	<0.01
2903	T3R1	0.04	0.18	6.80	0.20	0.00
2904	T3R2	0.04	0.11	9.60	0.46	<0.01
2905	T3R3	0.04	0.15	7.80	0.51	<0.01
2906	T3R4	0.04	0.14	12.40	0.41	0.08
2907	T3R5	0.06	0.15	3.80	0.38	<0.01
2908	T4R1	0.04	0.11	8.60	0.49	<0.01
2909	T4R2	0.03	0.13	10.20	0.46	<0.01
2910	T4R3	0.03	0.15	5.80	0.31	<0.01
2911	T4R4	0.04	0.13	5.20	0.55	<0.01
2912	T4R5	0.04	0.14	10.60	0.19	<0.01




Dr. Sady García Bendejú
 Jefe de Laboratorio

Av. La Molina s/n Campus UNALM
Tel. 844 7800 Anexo 229 Teléfono Directo 843 8888

Figura 25. Análisis especial química del grano de la planta del T₁R₁ al T₄R₅.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE AGRONOMIA
LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



INFORME DE ANALISIS ESPECIAL

SOLICITANTE : DIXIE SZOCHOVA CHUQUIMIA VALDEZ/ RAQUEL ZEA LOAIZA

PROCEDENCIA : JUNIN/ JAUJA/ SINCOS

MUESTRA DE : EXTRACTOS DEL GRANO

REFERENCIA : H.R. 58235

FECHA : 24/05/17

N° LAB	CLAVES	Ca %	Mg %	Pb ppm	Cd ppm	Cr ppm
2913	T5R1	0.04	0.14	7.00	0.29	0.00
2914	T5R2	0.04	0.14	8.60	0.46	<0.01
2915	T5R3	0.04	0.15	16.20	<0.01	<0.01
2916	T5R4	0.05	0.17	11.80	0.58	<0.01
2917	T5R5	0.04	0.15	5.80	0.63	<0.01
2918	T6R1	0.04	0.15	7.00	0.58	<0.01
2919	T6R2	0.04	0.14	4.80	0.61	<0.01
2920	T6R3	0.05	0.14	8.60	0.80	<0.01
2921	T6R4	0.05	0.12	7.40	0.53	<0.01
2922	T6R5	0.04	0.13	7.20	0.62	<0.01
2923	T7R1	0.04	0.13	7.20	0.54	0.00
2924	T7R2	0.04	0.16	7.20	0.61	<0.01
2925	T7R3	0.04	0.15	13.20	0.84	<0.01
2926	T7R4	0.05	0.16	5.20	0.84	<0.01
2927	T7R5	0.04	0.15	7.00	0.49	<0.01
2928	T8R1	0.04	0.16	11.20	0.45	<0.01
2929	T8R2	0.07	0.17	7.80	0.60	<0.01
2930	T8R3	0.04	0.14	7.40	0.76	<0.01
2931	T8R4	0.04	0.12	6.40	0.54	<0.01
2932	T8R5	0.05	0.09	15.00	0.58	<0.01



B. Sady García Bendejú
Dr. Sady García Bendejú
Jefe de Laboratorio

Av. La Molina s/n Campus UNALM
 Telf. 614-7800 Anexo 222 Teléfono Directo 349-5622

Figura 26. Análisis especial química del grano de la planta del T5R1 al T8R5.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
 FACULTAD DE AGRONOMIA
 LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



INFORME DE ANALISIS ESPECIAL

SOLICITANTE : DIXIE SZOCHOVA CHUQUIMIA VALDEZ/ RAQUEL ZEA LOAIZA

PROCEDENCIA : JUNIN/ JAUJA/ SINCOS

MUESTRA DE : EXTRACTOS DEL GRANO

REFERENCIA : H.R. 58235

FECHA : 24/05/17

N° LAB	CLAVES	Ca %	Mg %	Pb ppm	Cd ppm	Cr ppm
2933	T9R1	0.06	0.16	9.80	0.65	0.00
2934	T9R2	0.04	0.14	8.00	0.54	<0.01
2935	T9R3	0.04	0.16	9.20	0.46	<0.01
2936	T9R4	0.05	0.14	8.60	0.69	<0.01
2937	T9R5	0.04	0.16	8.00	0.43	<0.01
2938	T10R1	0.04	0.15	14.00	0.64	<0.01
2939	T10R2	0.05	0.12	4.60	0.57	<0.01
2940	T10R3	0.04	0.15	8.20	0.69	<0.01
2941	T10R4	0.05	0.14	15.40	0.57	<0.01
2942	T10R5	0.04	0.14	10.40	1.96	<0.01



Sady García Bendezu
Sady García Bendezu
 Jefe de Laboratorio

Figura 27. Análisis especial química del grano de la planta del T₉R₁ al T₁₀R₅.

ANEXO II: Panel fotográfico.



Figura 28. Tamizado del suelo en una malla de 2 mm de apertura.



Figura 29. Regado del suelo a capacidad de campo.



Figura 30. Aplicación de fuentes nitrogenadas.



Figura 31. Sembrado de semillas en cada maceta.



Figura 32. Preparación de las fuentes nitrogenadas.



Figura 33. Evaluación de las plantas por fertilización y encalado.



Figura 34. Molida de las muestras (follaje y raíz).



Figura 35. Pesado de la materia seca de la planta.