

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE AGRONOMÍA



**“TRES FUENTES DE SILICIO EN LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA
DEL ARROZ (*Oryza sativa* L.) BAJO CONDICIONES CONTROLADAS”**

**TESIS PARA OPTAR TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO**

CESAR FRANCO PADILLA CASTRO

LIMA - PERÚ

2019

**La UNALM es titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación
(Art. 24 – Reglamento de Propiedad Intelectual)**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE AGRONOMÍA

**“TRES FUENTES DE SILICIO EN LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA
DEL ARROZ (*Oryza sativa* L.) BAJO CONDICIONES CONTROLADAS”**

CESAR FRANCO PADILLA CASTRO

**TESIS PARA OPTAR TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO**

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Dra. Luz Gómez Pando
PRESIDENTE

Mg. Sc. Luis Tomassini Vidal
ASESOR

Mg. Sc. Elizabeth Heros Aguilar
CO-ASESORA

Dr. Sady Javier García Bendezú
MIEBRO

Dr. Oscar Loli Figueroa
MIEMBRO

Lima – Perú

2019

DEDICATORIA

*Para mamá Miriam y papá Segundo.
Por todo el punche que le ponen a la vida.
Soy quien soy gracias a ustedes.*

AGRADECIMIENTOS

A mi maestro, el Ing. Mg. Sc. Luis Rodrigo Tomassini Vidal, por haber aceptado patrocinar esta investigación y por compartirme sus conocimientos no solo de la ciencia del suelo, sino también de la vida.

A mi maestra, la Ing. Mg. Sc. Elizabeth Consuelo Heros Aguilar, por haber aceptado ser mi copatrocinadora y porque desde mis inicios en Agronomía me abrió las puertas del cultivo del arroz.

A los miembros de mi jurado: Dr. Luz Gómez Pando, Dr. Oscar Loli Figueroa y Dr. Sady García Bendezú. Por sus aportes y correcciones en la redacción de este trabajo.

A los señores Claudio Correa y Duberlis Correa de la empresa Feedcor EIRL, por haber aceptado auspiciar esta investigación.

A Elvis Ottos, profesor de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, por recibirme en Tingo María y por facilitarme los contactos relacionados al arroz en Aucayacu. A Felicano Solano Limas y a Jean Carlos Ariza, por recibirme en sus parcelas y compartirme sus avances investigativos sobre el silicio.

A Fernando Chung Montoya, por tu amistad. Porque siempre estuviste dispuesto a escucharme y a absolver cualquier duda que se me presentó. Por tanta ayuda con los equipos y materiales de laboratorio. Porque gracias a eso se hizo un DCA y no un DBCA, felizmente te diste cuenta. Por tantas horas de conversaciones agronómicas y no agronómicas. Te debo la mitad de mi tesis.

A Jonathan '*Ermitaño*' Vásquez, por tu amistad. Por venir desde Huarmey e Ica para explicarme lo que necesitaba saber de estadística y diseños experimentales. Te debo la otra mitad de mi tesis.

A Carlos Mestanza Novoa por todas las charlas durante la instalación de mi tesis y las aclaraciones estadísticas.

A Renzo Silva Cano por haberme enseñado todo lo que tenía que saber sobre la cuantificación del silicio.

A Heydi Huarhua por haber realizado el análisis fitopatológico para identificación de hongos en las panículas.

A Giorgio Cruz Fajardo, por toda la ayuda con los análisis de laboratorio y los materiales que necesitaba. A Erick Dionisio Flores, a Yuleysi Aguilar Silva y a Claudia Ramos Dionisio, por las largas horas de conversaciones y discusiones. No hay mejores personas con las que haya podido compartir el laboratorio.

A Alexis Zavaleta Ríos y a Fátima Cotrina Carranza. Por su infinita predisposición para las labores. Porque su ayuda fue clave para la correcta instalación del experimento.

A Yesamin Lavi Inga y a Cristina Vegas Aguinaga. Por tanto corazón y tanta paciencia durante la cosecha y evaluación de las variables morfológicas. A Fabio Pajares, mi ahijado, quien venía desde Chilca a darme una mano.

A mi hermano, Cesar Segundo Padilla Castro, por su ayuda con los análisis de nitrógeno y por haber diseñado el algoritmo en Python para analizar los datos de intensidad luminosa. Me ahorraste muchas horas de cálculos.

A Mario Jiménez Ventura, el encargado del laboratorio de fertilidad de suelos, por haberme aguantado tanto tiempo y por su gran disposición para ayudar en cualquier asunto acontecido.

A Rosmery Arteaga del laboratorio de análisis de suelo, agua, plantas y fertilizantes, por haberse quedado hasta tarde ayudándome a terminar las mediciones de salinidad y pH.

A Gean Carlo Ciprian Salcedo por enseñarme a evaluar la viabilidad del polen.

A Marco Guerra Hinostroza y a José Berrocal Vilcas, porque podía acudir a ustedes para cualquier imprevisto.

A Alessandra Silva, Stef Miraval, Silvana Alcalde, Pamela Loayza y Olenka Kocchiu. A mi primo Gonzalo Morales y a mi prima Yolanda Loayza, porque me alegraban el día cada vez que venían a apoyarme.

A Patricia Manrique, Jeydi Anay, Diego Almeyda, Alondra Quispe, Brando Paredes, Renzo Morales, Brandon Atalaya, Mariangelica Pineda, Hermelinda Ttito, Eyllin Ríos, Zayra Vera,

Jessica Tapia y todas las grandes personas que de alguna u otra forma aportaron su granito de arena en este proyecto.

A Brenda Tubana Ph.D., profesora de la Universidad Estatal de Louisiana, por sus comentarios sobre mis resultados.

A Aleksandra Elbakyan por permitirme acceso a tanta información.

A Ruthy Paucar, del PIPS Cereales y Granos Nativos por todo su apoyo en las gestiones de la sustentación y aprobación de este documento.

Por supuesto, a Miriam Castro Barrios y Segundo Padilla Morales, mis padres, a quienes les debo todo. Son mi ejemplo a seguir. Las palabras se quedan cortas. Gracias por su infinito apoyo en esta travesía llamada Agronomía.

ÍNDICE GENERAL

I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1. El silicio	4
2.1.1. Formas de silicio en el suelo.....	4
2.1.2. Esencialidad para las plantas	10
2.1.3. Metabolismo del silicio en el arroz.....	11
2.1.4. Beneficios reportados	14
2.2. Restitución de si al suelo en agroecosistema arrozero.....	17
2.2.1. Escoria básica de horno cuchara.....	17
2.2.2. Ceniza de cascarilla de arroz	19
2.2.3. Silicato de potasio.....	19
2.3. Características de la producción arrozera en Perú	20
2.4. Importancia del arroz en la alimentación.....	21
III. MATERIALES Y MÉTODOS	23
3.1. Ubicación del campo experimental.....	23
3.2. Materiales y equipos	23
3.2.1. Insumos.....	23
3.2.2. Materiales y herramientas.....	24
3.2.3. Equipos	24
3.3. Diseño experimental	25
3.3.1. Tipo de diseño empleado.....	25
3.3.2. Unidad experimental.....	25
3.3.3. Modelo aditivo lineal.....	26
3.3.4. Esquema del diseño experimental	26
3.3.5. Variables evaluadas	27
3.3.6. Aleatorización de los tratamientos y distribución sobre las mesas	28
3.3.7. Registro de datos	28
3.4. Procedimientos.....	28
3.4.1. Fase preliminar	28
3.4.2. Fase de campo	42
3.4.3. Fase de análisis de parámetros morfológicos	46
3.4.4. Fase de análisis químicos	49
3.4.5. Análisis estadístico	58

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES	60
4.1. Efecto de las enmiendas silicatadas en las propiedades químicas del material de suelo.....	60
4.1.1. Fluctuación en la conductividad eléctrica	63
4.1.2. Fluctuación en el pH de la solución suelo.....	68
4.2. Efecto de las enmiendas silicatadas en la biomasa del arroz	75
4.2.1. Consideraciones e influencia del factor ambiental.....	75
4.2.2. Resultados por cada variable.....	86
4.2.3. Discusiones.....	102
4.3. Observaciones adicionales	114
4.3.1. Resultados de variables complementarias	115
4.3.2. Discusiones de variables complementarias	119
V. CONCLUSIONES	123
VI. RECOMENDACIONES	125
VII. REFERENCIAS	126
VIII. ANEXOS	136

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Listado de variables medidas.	27
Tabla 2: Características físicas y químicas del suelo experimental. Fuente: Laboratorio de suelos, plantas, agua y fertilizantes, UNALM (2017).	30
Tabla 3: Cargas características de algunos coloides representativos del suelo mostrando comparativamente los niveles de carga permanente (constante) y cargas dependientes del pH tanto negativas como positivas. Fuente: Brady & Weil (2008).....	33
Tabla 4: Disponibilidad inicial de silicio para el material de suelo usado en el ensayo. Fuente: Laboratorio de silicio (2018).	37
Tabla 5: Resultados del análisis de silicio disponible en las fuentes de SiA empleadas. Fuente: Laboratorio de silicio (2018)	38
Tabla 6: Resumen de análisis químico completo de enmiendas silicatadas empleadas. Fuente: Laboratorio de suelos, plantas, agua y fertilizantes (2018).	38
Tabla 7: Resultados de análisis de agua 2017 y reajuste a condiciones del 2018. Fuente: Cruz (2019).....	39
Tabla 8: Constantes para transformar unidades de intensidad luminosa a unidades de radiación fotosintéticamente activa. Fuente: McCree (1981).....	45
Tabla 9: Volúmenes de alícuotas tomadas de la solución madre de 1005 ppm para preparación de cada uno de los estándares.	51
Tabla 10: Concentración (ppm) de cada elemento presente en las enmiendas y en la mezcla final del sustrato usado para cada tratamiento. Elaboración propia con datos del análisis realizado por el Laboratorio de suelos, plantas, agua y fertilizantes (2018). Anexos 4,5 y 6.....	62
Tabla 11: Resumen estadístico de la variable conductividad eléctrica (transformación C. E. ds/m + 0.301) al final de la campaña con sus niveles de significancia calculados en base a la prueba de Tukey con un $\alpha = 0.05$	66
Tabla 12: Resumen estadístico de la variable pH al final de la campaña con sus niveles de significancia calculados en base a la prueba Tukey con un $\alpha = 0.05$	74
Tabla 13: Temperaturas máxima, mínima y media durante la fase de campo.	80
Tabla 14: Resumen estadístico de la variable silicio disponible (SiA) al final de la campaña con sus niveles de significancia calculados en base a la prueba de Tukey con un $\alpha = 0.05$	87
Tabla 15: Resumen estadístico de la variable porcentaje de Si en raíz con sus niveles de significancia calculados en base a la prueba de Tukey con un $\alpha = 0.05$	88
Tabla 16: Resumen estadístico de la variable porcentaje Si en órganos aéreos con sus niveles de significancia calculados en base la prueba Tukey con un $\alpha = 0.05$	90
Tabla 17: Resumen estadístico de la variable peso seco (datos transformados usando $\log(\text{peso Seco g} + 9.87)$) con sus niveles de significancia calculados en base a la prueba de Tukey con un $\alpha = 0.05$	91
Tabla 18: Resumen estadístico de la variable porcentaje de materia seca con sus niveles de significancia calculados en base a la prueba Tukey con un $\alpha = 0.05$	93
Tabla 19: Resumen estadístico de la variable número de macollos por planta (transformación $\log(\#\text{Macollos}) + 9$), al final de la campaña con su nivel de significancia calculado en base a la prueba de Tukey con un $\alpha = 0.05$	94

Tabla 20: Resumen estadístico de la variable volumen radicular (transformación $\log(\text{volumen.cm}^3 + 8)$) con sus niveles de significancia calculados en base a la prueba de Tukey con un $\alpha = 0.05$.	96
Tabla 21: Resumen estadístico de la variable número de panículas por planta(transformación $\log(\#\text{panículas} + 100)$) con sus niveles de significancia calculados en base a la prueba de Tukey con un $\alpha = 0.05$.	97
Tabla 22: Resumen estadístico de la variable número de espiguillas por planta con sus niveles de significancia calculados en base la prueba Tukey con un $\alpha= 0.05$.	99
Tabla 23: Resumen estadístico de la variable número de espiguillas por panícula con sus niveles de significancia calculados en base la prueba Tukey con un $\alpha = 0.05$.	100
Tabla 24: Resumen estadístico de la variable rendimiento estimado en gramos de grano producido por planta con sus niveles de significancia calculados en base a la prueba de Tukey con un $\alpha= 0.05$.	102
Tabla 25: Balance de extracción total de silicio.	106
Tabla 26: Porcentajes promedios de formación de panículas respecto del número de macollos con significancia $\alpha=0.05$.	109
Tabla 27: Resumen estadístico de la variable porcentaje de panículas malformadas con sus niveles de significancia calculados en base a la prueba de Tukey con un $\alpha = 0.05$.	116
Tabla 28: Resumen estadístico de la variable porcentaje de espiguillas necróticas con sus niveles de significancia calculados en base a la prueba de Tukey con un $\alpha = 0.05$.	117
Tabla 29: Resumen estadístico de la variable porcentaje de nitrógeno en órganos aéreos con sus niveles de significancia calculados en base la prueba Tukey con un $\alpha= 0.05$.	118
Tabla 30: Resumen estadístico de la variable porcentaje de nitrógeno en raíz con sus niveles de significancia calculados en base la prueba Tukey con un $\alpha= 0.05$.	119

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Especies iónicas en equilibrio con los silicatos del suelo para una concentración de ácido silícico de $10^{-3.10}$ M. Redibujado por Miroslav Nikolic a partir de Elgawhary & Lindsay (1972). Fuente: Liang <i>et al.</i> (2015)	7
Figura 2: Histórico del consumo nacional de arroz. Elaboración propia. Fuente: FAO (2017).....	21
Figura 3: Histórico consumo nacional de arroz per cápita. Elaboración propia. Fuente: FAO (2017).....	22
Figura 4: Esquema del diseño experimental.	26
Figura 5: Aleatorización de los tratamientos y distribución sobre las mesas.....	28
Figura 6: Calendario de labores culturales realizadas durante la fase de campo.	43
Figura 7: Curva de calibración del contenido de silicio en órganos aéreos mostrando ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación en base a lo establecido por Körndorfer <i>et al.</i> (2004).	52
Figura 8: Curva de calibración del contenido de silicio en raíz, mostrando ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación en base a lo establecido por Körndorfer <i>et al.</i> (2004).....	53
Figura 9: Curva de calibración del contenido de silicio disponible en suelo (SiA), mostrando ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación en base a lo establecido por Körndorfer <i>et al.</i> (2004).	55
Figura 10: Cantidades y concentraciones iniciales de silicio disponible (SiA) de cada uno de los tratamientos y testigos.....	61
Figura 11: Fluctuación de la conductividad eléctrica (dS/m) para los tratamientos con escoria durante la fase de campo.	63
Figura 12: Fluctuación de la conductividad eléctrica (dS/m) para los tratamientos con ceniza durante la fase de campo.	64
Figura 13: Fluctuación de la conductividad eléctrica (dS/m) para los tratamientos con silicato de potasio durante la fase de campo.....	64
Figura 14: Interacción concentración - fuentes de silicio para los datos transformados de conductividad eléctrica usando R (RcoreTeam 2014).....	65
Figura 15: Conductividad eléctrica al final de la campaña mostrando los datos originalmente medidos y los niveles de significancia calculados con la transformación $C. E. ds/m + 0.301$. Generado usando el software Yupana (Lozano <i>et al.</i> 2018).	66
Figura 16: Fluctuación en los niveles de pH para los tratamientos con ceniza durante la fase de campo.	68
Figura 17: Fluctuación en los niveles de pH para los tratamientos con escoria durante la fase de campo.	68
Figura 18: Fluctuación de los niveles de pH para los tratamientos con silicato de potasio durante la fase de campo.....	69
Figura 19: Cantidades y concentraciones iniciales de CaO total para cada tratamiento y testigos. Se consideró los aportes de enmiendas, fertilizantes y agua de riego. Datos proporcionados por el Laboratorio de suelo, plantas, agua y fertilizantes (2018). Anexo 4, 5 y 6	70
Figura 20: Cantidades y concentraciones iniciales de MgO total para cada tratamiento y testigo. Se considera los aportes de enmiendas, fertilizantes y agua de riego. Datos	

proporcionados por Laboratorio de suelos, agua, plantas y fertilizantes (2018). Anxo 4, 5 y 6	71
Figura 21: Datos descriptivos del número de hojas a los 21 DDS, graficados usando el software Yupana (Lozano <i>et al.</i> 2018).	72
Figura 22: Datos descriptivos de altura de planta a los 94 DDS graficados usando el software Yupana (Lozano <i>et al.</i> 2018).	73
Figura 23: Interacción concentración- fuentes de SiA para la variable pH graficada usando R (RcoreTeam 2014).....	74
Figura 24: Datos de pH del suelo al final de la campaña graficados usando el software Yupana (Lozano <i>et al.</i> 2018).....	75
Figura 25: Fluctuación de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) y el fotoperiodo durante la fase de campo en base a Torres & López (2012).	78
Figura 26: Fluctuación de la temperatura ambiental durante la fase de campo graficada usando el software del termohigrómetro Elitech.	80
Figura 27: Calendario de labores realizadas durante la fase de campo en relación con la fenología.	82
Figura 28: Fluctuación de la humedad relativa durante la fase de campo graficada con el software del termohigrómetro Elitech.	83
Figura 29: Interacción fuentes de SiA - concentración para la variable silicio disponible (SiA) usando R (RcoreTeam 2014).	86
Figura 30: Interacción fuentes de SiA - concentración para la variable porcentaje de Si en raíz usando R (RcoreTeam 2014).....	87
Figura 31: Interacción fuentes de SiA - concentración para la variable porcentaje de Si en órganos aéreos graficada usando R (RcoreTeam 2014).	89
Figura 32: Interacción fuentes de silicio - concentración para los datos transformados de la variable peso seco, graficada usando R (RcoreTeam 2014).	90
Figura 33: Interacción fuentes de SiA - concentración para la variable porcentaje de materia seca graficada usando R (RcoreTeam 2014).	92
Figura 34: Porcentaje de materia seca graficado usando software Yupana (Lozano <i>et al.</i> 2018).....	92
Figura 35: Interacción fuentes de silicio - concentración para los datos transformados del número de macollos, graficada usando R (RcoreTeam 2014).....	94
Figura 36: Interacción fuentes de silicio - concentración para los datos transformados de la variable volumen radicular graficada usando R (RcoreTeam 2014).	95
Figura 37: Interacción fuentes de silicio - concentración para los datos transformados del número de panículas, graficadas usando R (RcoreTeam 2014).	96
Figura 38: Interacción fuentes de SiA - concentración para la variable número de espiguillas por planta, graficada usando R (RcoreTeam 2014).	98
Figura 39: Interacción fuentes de SiA - concentración para la variable número de espiguillas por panícula graficada usando R (RcoreTeam 2014).	99
Figura 40: Interacción fuentes de SiA - concentración para la variable rendimiento estimado en gramos de grano producido por planta, graficados usando R (RcoreTeam 2014).	101
Figura 41: Disponibilidad de Si en el suelo al final de la campaña graficada usando el software Yupana (Lozano <i>et al.</i> 2018).	102

Figura 42: Volumen radicular mostrando los datos originalmente medidos y los niveles de significancia calculados con la transformación $\log(\text{volumen. cm}^3 + 8)$ generado usando el software Yupana (Lozano <i>et al.</i> 2018).	103
Figura 43: Porcentaje de Si en raíz graficado usando software Yupana (Lozano <i>et al.</i> 2018).	105
Figura 44: Porcentaje de silicio en órganos aéreos graficadas usando software Yupana (Lozano <i>et al.</i> 2018).	106
Figura 45: Número de macollos por planta mostrando los datos originalmente medidos y los niveles de significancia calculados con la transformación $\text{Log}(\#\text{Macollos}) + 9$, generada usando el software Yupana (Lozano <i>et al.</i> 2018).	108
Figura 46: Número de panículas por planta mostrando los datos originalmente medidos y los niveles de significancia calculados con la transformación $\log(\#\text{panículas} + 100)$, generadas usando el software Yupana (Lozano <i>et al.</i> 2018). .	110
Figura 47: Peso seco total mostrando los datos originalmente medidos y los niveles de significancia calculados con la transformación $\log(\text{peso Seco g} + 9.87)$, generado usando el software Yupana (Lozano <i>et al.</i> 2018).	111
Figura 48: Número de espiguillas por panícula graficada usando el software Yupana (Lozano <i>et al.</i> 2018).	112
Figura 49: Rendimiento estimado como gramos de grano producido por planta, graficado usando software Yupana (Lozano <i>et al.</i> 2018).	113
Figura 50: Interacción fuentes de SiA - concentración para la variable porcentaje de panículas malformadas, graficada usando R (RcoreTeam 2014).	115
Figura 51: Interacción fuentes de SiA - concentración para la variable porcentaje de nitrógeno en órganos aéreo graficada usando R (RcoreTeam 2014).	117
Figura 52: Porcentaje de panículas malformadas graficado usando software Yupana (Lozano <i>et al.</i> 2018).	119
Figura 53: Porcentaje de espiguillas necróticas graficado usando software Yupana (Lozano <i>et al.</i> 2018).	120
Figura 54: Porcentaje de nitrógeno en órganos aéreos graficado usando software Yupana (Lozano <i>et al.</i> 2018).	121
Figura 55: Porcentaje de nitrógeno en raíz graficado usando software Yupana (Lozano <i>et al.</i> 2018).	122

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: Ficha técnica de la escoria de horno cuchara.....	136
ANEXO 2: Ficha técnica del silicato de potasio	136
ANEXO 3: Análisis de caracterización de suelos.....	137
ANEXO 4: Análisis químico de la escoria de horno cuchara.....	138
ANEXO 5: Análisis químico de la ceniza de cascarilla de arroz	138
ANEXO 6: Análisis químico del silicato de potasio	139
ANEXO 7: Cálculos para determinar la cantidad de fertilizantes empleados	139
ANEXO 8: Algoritmo en Python para calcular la integral de luz diaria	143
ANEXO 9: Datos del conteo de espiguillas por planta.....	145
ANEXO 10: Datos del conteo de espiguillas necróticas por planta	146
ANEXO 11: Matriz general de datos.....	147
ANEXO 12: Comandos usados para los análisis estadísticos en R.....	148
ANEXO 13: Conductividad eléctrica - comprobación de supuestos estadísticos	148
ANEXO 14: Conductividad eléctrica - análisis de varianza.....	148
ANEXO 15: Conductividad eléctrica - análisis de efectos simples.....	149
ANEXO 16: pH – comprobación de supuestos estadísticos	149
ANEXO 17: pH – análisis de varianza	150
ANEXO 18: pH – análisis de efectos simples	150
ANEXO 19: Fotos que demuestran la presencia de otros cultivares.	150
ANEXO 20: Fotos del daño por frío.....	151
ANEXO 21: Síntomas necróticos en las espiguillas.....	151
ANEXO 22: Informe de análisis fitopatológico en las panículas.....	152
ANEXO 23: Disponibilidad de silicio en suelos – comprobación de supuestos estadísticos.....	152
ANEXO 24: Disponibilidad de silicio en suelo – análisis de varianza.....	153
ANEXO 25: Disponibilidad de silicio en suelo – análisis de efectos simples.....	153
ANEXO 26: Absorción de silicio en raíz – comprobación de supuestos estadísticos....	153
ANEXO 27: Absorción de silicio en raíz – análisis de varianza	154
ANEXO 28: Absorción de silicio en raíz – análisis de efectos simples	154
ANEXO 29: Absorción de silicio en órganos aéreos – comprobación de supuestos estadísticos.....	154
ANEXO 30: Absorción de silicio en órganos aéreos – análisis de varianza	155
ANEXO 31: Absorción de silicio en órganos aéreos – análisis de efectos simples	155
ANEXO 32: Peso seco – comprobación de supuestos estadísticos	155
ANEXO 33: Peso seco – análisis de varianza	156
ANEXO 34: Peso seco – análisis de efectos simples	156
ANEXO 35: Porcentaje de materia seca – comprobación de supuestos estadísticos	156
ANEXO 36: Porcentaje de materia seca – análisis de varianza.....	157
ANEXO 37: Porcentaje de materia seca – análisis de efectos simples.....	157
ANEXO 38: Habilidad de macollamiento – comprobación de supuestos estadísticos ..	157
ANEXO 39: Habilidad de macollamiento – análisis de varianza.....	158
ANEXO 40: Habilidad de macollamiento – análisis de efectos simples.....	158
ANEXO 41: Volumen radicular – comprobación de supuestos estadísticos.....	158
ANEXO 42: Volumen radicular – análisis de varianza	159

ANEXO 43: Volumen radicular – análisis de efectos simples.....	159
ANEXO 44: Número de panícula por planta – comprobación de supuestos estadísticos	159
ANEXO 45: Número de panícula por planta – análisis de varianza.....	160
ANEXO 46: Número de panícula por planta – análisis de efectos simples.....	160
ANEXO 47: Número de espiguillas por planta – comprobación de supuestos estadísticos.....	160
ANEXO 48: Número de espiguillas por planta – análisis de varianza	161
ANEXO 49: Número de espiguillas por planta – análisis de efectos simples	161
ANEXO 50: Número de espiguillas por panícula – comprobación de supuestos estadísticos.....	161
ANEXO 51: Número de espiguillas por panícula – análisis de varianza	162
ANEXO 52: Número de espiguillas por panícula – análisis de efectos simples	162
ANEXO 53: Rendimiento estimado – comprobación de supuestos estadísticos.....	162
ANEXO 54: Rendimiento estimado – análisis de varianza	163
ANEXO 55: Rendimiento estimado – análisis de efectos simples	163
ANEXO 56: Porcentaje de panículas malformadas – comprobación de supuestos estadísticos.....	163
ANEXO 57: Porcentaje de panículas malformadas – análisis de varianza	164
ANEXO 58: Porcentaje de panículas malformadas – análisis de efectos simples	164
ANEXO 59: Porcentaje de espiguillas necróticas – comprobación de los supuestos estadísticos.....	164
ANEXO 60: Porcentaje de espiguillas necróticas – análisis de varianza	165
ANEXO 61: Absorción de nitrógeno en órganos aéreos – comprobación de supuestos estadísticos.....	165
ANEXO 62: Absorción de nitrógeno en órganos aéreos – análisis de variancia.....	165
ANEXO 63: Absorción de nitrógeno en raíz – comprobación de supuestos estadísticos	166
ANEXO 64: Absorción de nitrógeno en raíz – análisis de varianza.....	166

RESUMEN

Un ensayo en macetas fue realizado en el campus de la Universidad Nacional Agraria La Molina, para evaluar el efecto de la ceniza de cascarilla de arroz, escoria básica de horno cuchara y silicato de potasio, en las propiedades químicas del suelo y en la biomasa del arroz (*Oryza sativa* L.) cv. Fedearroz 60, usando material de suelo procedente de un campo arrocero en Aucayacu, Huánuco, Perú. Las dosis fueron calculadas en base a la concentración de silicio biodisponible (SiA) de cada enmienda para lograr 100, 200 y 400 ppm (p/p) de SiA en suelo antes de la siembra, además de testigos sin aplicación de silicio. Se empleó un diseño completo al azar con arreglo factorial de 3x4 en el que se evaluó la absorción de Si en tejidos, disponibilidad de SiA al final de la campaña, volumen radicular, habilidad de macollamiento, panículas por planta, espiguillas por planta, absorción de nitrógeno y malformaciones en panícula por estrés de frío. Se registraron las variaciones semanales de salinidad y pH en el material de suelo empleado como sustrato, así como las variaciones diarias de temperatura, humedad relativa e intensidad luminosa. Se encontró que el silicato de potasio incrementó sostenidamente el SiA en suelos y el Si en tejidos; sin embargo, los componentes del rendimiento no se vieron favorecidos. La escoria básica también incrementó el SiA en suelos y Si en tejidos, pero presentó reacciones tóxicas severas en las dosis de 200 y 400 ppm. La ceniza de cascarilla de arroz no influyó significativamente en los parámetros de silicio, ni en los componentes de rendimiento. Se concluyó que para las condiciones de suelo y clima en la que se desarrolló el experimento, el silicio no influye en los componentes del rendimiento. Pese a ello, la escoria presenta una extraordinaria capacidad encalante y la ceniza una gran cantidad de P, K y micronutrientes.

Palabras clave: arroz, silicio, nutrición mineral, componentes del rendimiento, enmienda silicatada, escoria básica, silicato de potasio, ceniza cascarilla arroz, suelo ácido.

ABSTRACT

A pot experiment was conducted in the campus of La Molina National Agrarian University in order to evaluate the effect of rice husk ash, steel slag and potassium silicate on the soil chemical properties and biomass of rice (*Oryza sativa* L.) cv. Fedearroz 60, using soil material from a commercial paddy field at Aucayacu, Huanuco, Peru. Doses were calculated taking into consideration each product extractable Si (SiA), for reaching concentrations of 100, 200 and 400 mg/kg (p/p) of SiA in soil before sowing. Control pots without any silicon amendment were considered as well. A completely randomized design with factorial arrangement (3x4) was used to assess the Si absorption by plant tissues, final SiA in soils, roots volume, tillering capacity, panicles per plant, spikelets per plant, nitrogen absorption and panicle tip degeneration due to cold stress. Salinity and pH of the growing media were registered weekly. Also were environmental temperature, relative humidity and light intensity on a daily basis. Results showed that potassium silicate sustainably increased SiA in soils and Si in plant tissue, however the yield components were not positively influenced. Steel slag increased those silicon parameters too, nonetheless for doses of 200 and 400 ppm, symptoms of severe toxicity appeared. Rice husk ash did not show statistical significance on SiA in soils and Si in plant tissue nor yield components. It was concluded that for soil and weather conditions involved in this experiment, silicon have no influence on yield components. In spite of this, steel slag exhibited an outstanding liming capacity and rice husk ash, a great amount of P, K and micronutrients.

Keywords: rice, silicon, mineral nutrition, yield components, silicon amendment, steel slag, potassium silicate, rice husk ash, acidic soil.

I. INTRODUCCIÓN

El arroz es uno de los principales cultivos alimenticios en el mundo, en especial para al menos 33 países en vías de desarrollo. Su cultivo permite alimentar a un sector muy importante de la población mundial en Asia, Centro y Sudamérica y África. En el Perú, en el 2014 se alcanzó una producción total de 2 896 613 ton (MINAGRI, 2017). No solo tiene importancia a nivel de seguridad alimentaria, sino que representa una fuente sustancial de ingresos para agricultores de la zona norte y selva de nuestro país. En ese sentido se han desarrollado numerosas investigaciones para incrementar los rendimientos, de tal forma que se pueda satisfacer la demanda nacional, reducir nuestra dependencia a las importaciones e incrementar la rentabilidad de los productores. Tales investigaciones han abarcado áreas que van desde la sanidad del cultivo hasta su mejoramiento genético.

Es en este contexto en el cual se sitúan las investigaciones relacionadas a la nutrición del cultivo. Con un buen manejo nutricional se puede explotar el potencial máximo de producción de cultivares que ya están disponibles en el mercado, así como proveer una fuerte protección contra factores de estrés biótico (plagas y enfermedades) y abiótico (salinidad, sequía, anegamiento, frío, calor, toxicidad-deficiencia nutricional). Todo esto guarda especial relación con las circunstancias actuales, en las que el cambio climático está alterando seriamente los agroecosistemas de todo el mundo, con una repercusión directa sobre los sistemas de abastecimiento alimentario local.

La producción de arroz en el Perú debería darse principalmente en la selva. La razón de esto tiene su origen en dos problemas: los valles costeros peruanos tienen amenaza constante de falta de agua y aparte de eso, la preparación de suelo en los campos arroceros ocasiona degradación física que limita el uso de estas áreas solo al monocultivo de arroz.

Una de las líneas de investigación involucra al silicio. Este elemento, históricamente considerado como “no esencial” dentro de la mayoría de programas nutricionales, ha tomado

importancia en investigaciones recientes que destacan su capacidad para incrementar rendimientos de forma indirecta. En ese sentido era preciso averiguar si tales efectos eran replicables en la producción de arroz de la Amazonía peruana.

Para el caso de este ensayo de macetería en arroz, no sólo se buscó ver si tales efectos se hacían evidentes en un contexto más controlado que en campo; se estableció como objetivo principal evaluar si altas concentraciones disponibles de este elemento tienen algún efecto en los rendimientos de grano y parámetros asociados a este. Para esto, se usaron tres fuentes de silicio: silicato de potasio, ceniza de cascarilla de arroz y escoria de horno cuchara, siendo estas dos últimas enmiendas, materias consideradas como desechos con potencial para ser empleados en agricultura.

Una de las condiciones para que sea económicamente viable la incorporación de estas enmiendas, es procurar, en la medida de lo posible que tales insumos tengan un origen local. Se ha observado que la ceniza de cascarilla de arroz (Della, Kuhn, & Hotza, 2002) y la escoria básica de alto horno (Encina 2017) contienen una gran cantidad de silicio en su composición. 94.95 por ciento y 10-19 por ciento de SiO_2 respectivamente. Por lo que podrían ser buenas fuentes de silicio biodisponible. La cascarilla de arroz es un residuo que se viene usando como medio de cultivo y también como fuente de biomasa para plantas termoeléctricas y que se puede conseguir fácilmente de los molinos de arroz. La escoria básica de horno cuchara, es un subproducto de las plantas siderúrgicas y que ha demostrado tener propiedades encalantes. Esta condición sumada al contenido de silicio que posee, lo convierten en un buen candidato para las condiciones de suelos amazónicos en donde se sabe que las altas precipitaciones lixivian rápidamente el silicio haciéndolo poco disponible.

En base a lo expuesto se plantea la siguiente hipótesis experimental:

La incorporación edáfica de tres enmiendas aportadoras de silicio soluble: escoria de horno cuchara, ceniza de cascarilla de arroz y silicato de potasio, en altas dosis, tendrá influencia en las propiedades químicas del material de suelo, y por consecuencia, en la biomasa del arroz.

Para dar comprobación a esta hipótesis se establecieron los siguientes objetivos:

- 1- Evaluar el efecto de tres enmiendas aportadoras de silicio soluble: escoria de horno cuchara, ceniza de cascarilla de arroz y silicato de potasio sobre la conductividad eléctrica y pH del material de suelo.
- 2- Evaluar el efecto las tres enmiendas aportadoras de silicio soluble anteriormente mencionadas sobre la producción de biomasa por planta de arroz.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. El silicio

2.1.1. Formas de silicio en el suelo

El silicio es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre después del oxígeno, con una concentración de 28.8 por ciento p/p (Wedepohl, 1995). Se encuentran comúnmente en la forma de silicatos, los cuales son sales provenientes del ácido silícico. La unidad fundamental de los silicatos es el tetraedro de silicio, el cual posee cuatro átomos de oxígeno enlazados a uno de silicio (Brady & Weil 2008). Otros estudios señalan contenidos de silicio en la corteza entre 5 - 40 por ciento en forma de dióxido de silicio (sílice) o como aluminosilicatos (Orlov, citado por Matichenkov & Bocharnikova 2001).

En los suelos el silicio se encuentra en tres fracciones, la fracción en solución, fracción débilmente adsorbida y la fase sólida. Las fracciones en solución y la levemente adsorbida involucran a ácidos monosilícicos, ácidos polisilícicos y compuestos organosilicados. Por otro lado, la fracción sólida está compuesta de formas amorfas biogénicas, como los fitolitos; o de formas no biogénicas como la sílice amorfa, así como de formas cristalinas, que pueden ser finamente dispersas (micas, caolinita, ilita, esmectita) o minerales dispersados en trozos grandes como los feldespatos y el cuarzo. (Matichenkov y Bocharnikova, 2001).

a. Formas sólidas de silicio

Según Deer *et al.* (1992) el silicio en formas sólidas puede ser agrupado en dos categorías:

(i) Silicatos con estructura cristalina

- Nesosilicatos: Los cuales son llamados ortosilicatos y están conformados por tetraedros individuales de silicio. Presentan algunas cargas marginales negativas a

las que pueden enlazarse Fe o Mg. Minerales representativos son la forsterita y fayalita, perteneciente al grupo de los olivinos.

- Ciclosilicatos: Llamados silicatos con forma de anillo. Los más comunes son la benitoita (anillo con tres tetraedros conteniendo además bario y titanio) y la axinita (anillo con seis tetraedros conteniendo además Ca, Fe, Mn, Al y B).
- Inosilicatos: Conocidos como “silicatos en cadena”. Pueden estar compuestos por una cadena simple o doble de tetraedros de silicio. La augita (conteniendo Ca, Na, Mg, Fe y Al) es un ejemplo de cadena simple y la hornablenda (conteniendo Ca, Mg, Fe) de cadena doble.
- Tectosilicatos: Son silicatos que poseen una estructura tridimensional formando una red que puede llegar a ser muy extensa. A esta categoría le corresponde el 75 por ciento de los minerales en la corteza terrestre. A este grupo pertenece el cuarzo, el cual es SiO₂ puro o casi puro y también los aluminosilicatos, los cuales son minerales que incluyen Aluminio y/o otros elementos en su composición. A este grupo pertenecen la familia de los feldespatos como la microclina (conteniendo K, Al), ortoclasa (conteniendo K, Al), anortoclasa (conteniendo Na, K y Al), albita blanca (conteniendo Na y Al) y anortita (conteniendo Ca y Al). Esta categoría de minerales es extremadamente resistente a la meteorización.
- Filosilicatos: Conocidos como silicatos laminares. Formados por láminas de tetraedros de silicio y octaedros de aluminio. El grupo de las Micas es el más representativo dentro de los minerales primarios. Incluyen a la biotita (conteniendo K, Mg, Fe, Al), muscovita (conteniendo K, Al), phlogopita (conteniendo K, Mg), lepidolita (conteniendo K, Li, Al), margarita (conteniendo Ca, Al) y clorita (conteniendo Mg, Fe, Al). También hay filosilicatos formados por minerales secundarios, pero estos corresponden al grupo sin estructura cristalina que será discutido a continuación.

Todos los silicatos con estructura cristalina son resistentes a la meteorización. El grado de resistencia depende de la estructura. De menor resistencia a mayor resistencia se ordenan en nesosilicatos, inosilicatos de cadena simple, inosilicatos de cadena doble, filosilicatos, feldespato (tectosilicato), muscovita (filosilicato) y cuarzo (tectosilicato).

(ii) Silicatos sin estructura cristalina

Según Jenny (1980), este grupo está formado por los minerales que forman las arcillas multicapas. La formación de estos minerales por neogénesis implica que los minerales primarios con su respectiva estructura cristalina (especialmente, olivino, augita, hornablenda y feldespatos), son fragmentados por hidrólisis. Posteriormente, los poliedros individuales que son liberados al medio son reensamblados a las arcillas, ya sea internamente o adyacentes a la estructura parental. Son esos poliedros los que son trasladados a otros horizontes y son los que ocasionan la formación de arcillas en horizontes subsuperficiales. En los suelos, los minerales más comunes de las arcillas son filosilicatos secundarios, los cuales se caracterizan por tener una estructura de tetraedros de silicio organizados en capas. Los más típicos son las ilitas, vermiculitas, montmorillonitas y caolinitas.

La formación de cada una de estas arcillas va a depender del material parental, de las condiciones climáticas y de los otros factores de formación de suelos. Por ejemplo: la biotita, en climas áridos se transforma en montmorillonita, en climas templados se convierte en vermiculita, mientras que en climas tropicales húmedos se transforma en caolinita. Por otro lado, la meteorización del feldespato plagioclasa conlleva a la formación de caolinita bajo cualquier régimen climático (Tardy, Bocquier, Paquet, & Millot, 1973).

En este grupo también se encuentran los aluminosilicatos amorfos, cuyo representante más común es el alófano (conteniendo Al). Este es particularmente frecuente en suelos formados con ceniza volcánica en regiones húmedas. También, menos común, es el vidrio, y más común, el ópalo (Jackson, 1958).

Dentro de esta categoría también se encuentran los silicatos amorfos de origen biogénico que son dejados en el suelo luego de la muerte de microorganismos y de la incorporación de rastros vegetales que contienen fitolitos (acumulaciones de óxido de silicio hidratado) en sus tejidos (Haynes, 2017). Se estima que la concentración de silicio biogénico promedio en los suelos está en el rango de 0.1-4 por ciento (Sommer, Kaczorek, Kuzyakov, & Breuer, 2006). Su solubilidad a pH 4-8, se estima de 100 a 10 mil veces mayor a la de los silicatos minerales (Frayse, Pokrovsky, Schott, & Meunier, 2009), por lo que pueden ser considerados como buenas fuentes de Si disponible.

b. Silicio en solución y silicio cambiante

En primer lugar, analizaremos la solubilidad de los minerales silicatados en el suelo. Esta dependerá del tipo de mineral presente en el suelo, las condiciones de temperatura y pH, textura, potencial eléctrico, materia orgánica y uso histórico del suelo (Struyf *et al.*, 2010). Por ejemplo, para el caso del cuarzo, su solubilidad es de 2.8 ppm mientras que para los silicatos amorfos de 51 ppm (Elgawhary & Lindsay, 1972). Iler, citado por Liang *et al.* (2015) menciona que a 0 °C la solubilidad del cuarzo es de cero. En una solución saturada de silicato amorfo puro, las concentraciones de H_4SiO_4 a 25 °C fueron 120-140 ppm de SiO_2 (56 – 65.3 ppm de Si). Esta solubilidad registrada es independiente del pH entre 2 a 9. Pero se incrementa marcadamente a partir de pH 9 porque empiezan a aparecer formas iónicas del ácido silícico (Jones & Handreck, 1967). Soluciones más concentradas de H_4SiO_4 se polimerizan fácilmente y entran a un equilibrio dinámico con los silicatos cristalinos y no cristalinos, silicatos adsorbidos y sesquióxidos-moléculas con tres átomos de oxígeno y dos de hierro o aluminio (Liang *et al.*, 2015). Elgawhary y Lindsay (1972) también estudiaron las relaciones entre la disociación del H_4SiO_4 y la formación de polímeros de silicatos en solución bajo la condición que el ácido silícico provenga de los silicatos del suelo. Estos se muestran en la Figura 1.

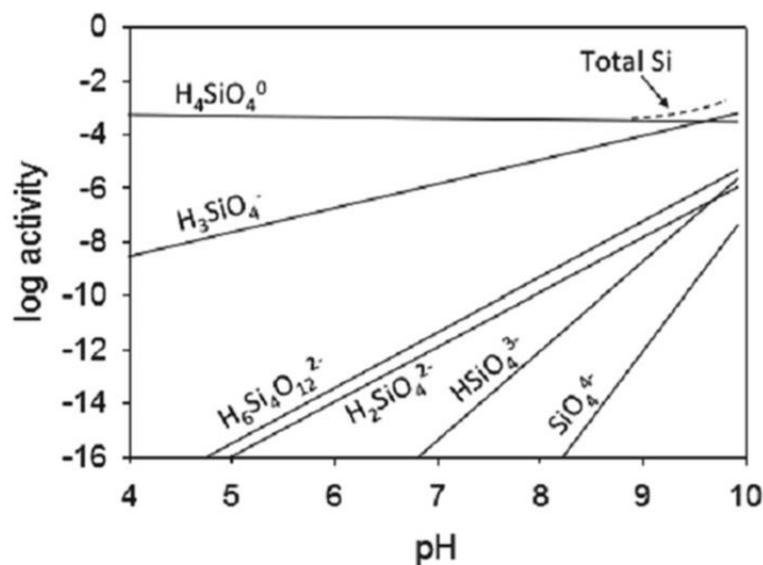


Figura 1: Especies iónicas en equilibrio con los silicatos del suelo para una concentración de ácido silícico de $10^{-3.10}$ M. Redibujado por Miroslav Nikolic a partir de Elgawhary y Lindsay (1972). Fuente: Liang *et al.* (2015)

En este gráfico se muestra que los estados iónicos de los silicatos aparecen en concentraciones de 10^{-8} (más o menos significativas) a partir del pH 8.5. Mientras que, para los pH naturalmente encontrados en suelos, 4.5 a 8, la forma predominante es el H_4SiO_4 .

En la solución de suelo, la concentración de H_4SiO_4 , forma disponible para las plantas, se encuentra en una concentración de 0.1-0.6 mM (9.6-57.6 mg/L de Si) bajo condiciones de un rango de pH fisiológico favorable (Epstein, 1994), la cual es 375 veces mayor a la concentración de fósforo 0.0016 mM (Tisdale, citado por Epstein 1994), lo cual indica que el acercamiento a las raíces se dará por flujo de masa/difusión principalmente.

Los procesos de adsorción y desorción involucran a los óxidos de hierro y aluminio. El tipo de enlace más probable es el de puente de hidrógeno entre un hidrógeno del tetraedro de silicio y un átomo de oxígeno que enlace dos átomos de hierro o dos átomos de aluminio. Estas reacciones son dependientes del pH, por lo tanto, un incremento en la concentración de iones hidrógeno reducirán la adsorción del ácido silícico por competencia de los sitios de adsorción. Por el contrario, medios más básicos favorecerían la adsorción (Jones y Handreck, 1967). Según Elgawhary y Lindsay (1972) las características específicas de sorción y desorción dependerán principalmente del tipo de suelo y el tipo de enmienda silicatada que se use. Esta combinación de factores originará una concentración “equilibrio” de silicio en solución muy específica para cada proporción de suelo y enmienda. Esto fue comprobado a partir de un experimento en el que midieron la dinámica en la adsorción de silicio para un suelo franco limoso sin aporte de silicio, con aporte de silicio soluble y con aporte de silicio amorfo. Encontraron que las muestras sin aporte de silicio tuvieron una concentración de Si en solución de 18 ppm y al cabo de 50 días se incrementó a 25 ppm. Para el caso de las muestras con aporte de 100 ppm de silicio soluble, inicialmente se tuvo 27 ppm y bajó a 25 ppm al cabo de los 50 días. Por último, las muestras a las que se les agregó 10 por ciento de silicio amorfo, mantuvo una concentración de 50 ppm desde el día 30 hasta el día 50. De igual forma estos mismos autores probaron los mismos tratamientos en un suelo arena limosa ácida encontrando que, al cabo de 50 días, las muestras a las que no se les aplicó silicio tuvieron 19 ppm de Si soluble, a las que se les aplicó 100 ppm de silicio soluble, pasaron de tener 32 ppm (día uno) a tener 19 ppm al final y las muestras a las que se les agregó el 10 por ciento de silicio amorfo, alcanzaron un equilibrio a 46 ppm. Se concluyó que para el caso de los suelos los valores de equilibrio van a estar entre los valores de cuarzo y la sílice amorfa, 2.8 y 51 ppm respectivamente. Una forma de elevar el silicio disponible sería

evitando que se lixivie rápidamente, por tanto agregar sustancias húmicas como los ácidos húmicos en medios básicos podría promover una mayor zona de adsorción, lo que repercutiría en una mayor disponibilidad (Quin *et al.* citado por Liang *et al.* 2015).

El *pool* de silicio disponible para las plantas no solo incluye al H_4SiO_4 sino también a los compuestos silicatados que pueden ser fácilmente convertidos en este como el ácido silícico polimerizado, el que se encuentra adsorbido y parte de los silicatos en las arcillas. Cabe resaltar que las formas iónicas solo van a aparecer en concentraciones similares al H_4SiO_4 a partir de pH 9, como se puede observar en la Figura 1 (Liang *et al.*, 2015).

c. Silicio en suelos tropicales

Según Li *et al.* citado por Liang *et al.* (2015) hay tres categorías de suelos en términos de disponibilidad de silicio. La primera agrupa a los suelos derivados del granito, cuarcita, y depósitos aluviales. Estos suelos, debido a su textura arenosa tienen grandes pérdidas por lixiviación, por ende, tienen los promedios más bajos de Si disponible, los cuales van desde 33.3 a 43.3 ppm de SiO_2 (15.5 – 20.2 ppm de Si). La segunda categoría incluye a los suelos derivados de arenisca roja, pelita y depósitos lacustres. Estos suelos presentan rangos de 52.9 a 66.7 ppm de SiO_2 (24.6 – 31.12 ppm de Si), estos valores se explican por procesos de pérdida de silicio. El tercer grupo involucra a suelos derivados de roca púrpura y caliza. Estos suelos tienen concentraciones de Si disponible más elevadas, entre 98 a 125.8 ppm SiO_2 (45.7 – 58.7 ppm de Si), debido a su textura arcillosa. Se ha demostrado que los suelos arcillosos presentan una mayor concentración de Si disponible, debido a la mayor superficie específica, que aumentan los lugares de adsorción (Dai *et al.* citado por Liang *et al.* 2015). Es importante resaltar que según Ma citado por Liang *et al.* (2015), el valor crítico para que un suelo sea considerado deficiente en silicio disponible es de 100 ppm de SiO_2 (46.6 ppm de Si) y severamente deficientes, de 50 ppm de SiO_2 (23.3 ppm de Si).

Los campos arroceros manejados con cultivares de arroz de secano usualmente pertenecen a los órdenes Ultisol y Oxisol, los cuales son suelos muy evolucionados, altamente lixiviados, muy ácidos en áreas con alta precipitación. En estas condiciones las deficiencias de silicio son muy probables, ya que los ensayos realizados han demostrado que el contenido de silicio en tejido, en suelo y agua es mucho más bajo que en arroz sembrado por inundación, cuyos suelos son usualmente Alfisoles, Inceptisoles o Entisoles (Winslow, Okada, & Correa-Victoria, 1997). El ácido silícico puede ser fuertemente adsorbido en las

superficies de las arcillas de sesquióxidos presentes en Ultisoles y Oxisoles. En esas condiciones las concentraciones de Si disponible son de menos de 10 ppm (Fox, Silva, Younge, & Pluncknett, 1967). Para condiciones de inundación, se esperaría que las concentraciones de Si se incrementen debido a que la falta de oxígeno promovería la reducción de óxidos de hierro a los cuales se encontraba adsorbido el ácido silícico, sin embargo, esta bajaría rápidamente ya que se polimerizaría y se juntaría con otros aluminosilicatos (Ponnamperuma citado por Liang *et al.* 2015)

2.1.2. Esencialidad para las plantas

Un elemento es considerado esencial para las plantas siempre y cuando se cumplen tres premisas: (a) que su deficiencia haga imposible que un individuo pueda completar su estadio vegetativo o reproductivo durante su ciclo de vida, (b) que tal deficiencia sea específica al elemento en cuestión y que pueda ser prevenida o corregida al agregar este elemento al medio de cultivo y (c) que el elemento esté directamente involucrado en la nutrición de la planta, sin considerar que su presencia podría corregir alguna característica desfavorable de las propiedades químicas o biológicas del medio de crecimiento (Arnon & Stout, 1939).

El criterio básico para definir la esencialidad de un elemento era, que las plantas sufrirían un colapso en sus funciones metabólicas, si tal elemento no era suministrado en el medio de crecimiento (Epstein, 1999). En ensayos con plantas de tomate, que se hicieron con soluciones supuestamente libres de todo elemento, incluyendo el silicio, las diferencias entre los tratamientos a los que se les aplicó silicio y los que no se les aplicó resultaron ser no significativas (Woolley, 1957); por lo tanto, siguiendo el criterio anteriormente mencionado, se asumió que el silicio era un elemento del cual se podría prescindir en los programas de nutrición (Epstein, 1999).

Sin embargo, en esos mismos ensayos de Woolley (1957) no se logró purificar totalmente el agua de rastros de silicio, ya que al encontrarse en forma de H_4SiO_4 , con carga neutra, logró traspasar los filtros purificadores de intercambio iónico usados rutinariamente en laboratorios para purificar el agua de los ensayos (Epstein, 1994).

Una segunda crítica respecto a la esencialidad de los elementos, haciendo énfasis en el silicio, es que el genotipo de las especies tendría influencia en los requerimientos nutricionales. Por ejemplo, el sodio se considera como micronutriente para las plantas C_4 ,

pero no de forma general para todas las plantas (Brownell & Crossland, 1972), por lo tanto, el nivel de esencialidad del silicio también variará entre diferentes grupos de plantas (Epstein, 1999). Por último, también debe considerarse que hay elementos como el cloro que cumple una función de micronutriente en plantas superiores (Broyer, Carlton, Johnson, & Stout, 1954) y como macronutriente en halófitas (Waisel, citado por Epstein 1999).

El contenido de silicio en las plantas varía en un rango muy amplio que va desde 0.1 por ciento a 10 por ciento del peso seco dependiendo de la especie (Epstein, 1994). Solo dos grupos de plantas son conocidas por los altos requerimientos cuantitativos de silicio, las *Chrysophyceae*, las diatomeas –algas unicelulares- y las *Equisitaceae* – cola de caballo (Simpon y Volcani, citado por Epstein 1999). Para el caso de las plantas superiores, la esencialidad del silicio según los criterios de Arnon y Stout (1939), no ha sido probado (J. F. Ma, Miyake, & Takahashi, 2001). Sin embargo, se registra que dentro de este grupo, las especies con mayor contenido relativo de silicio son las Monocotiledóneas de la familia *Poaceae* (Hodson, White, Mead, & Broadley, 2005). Para Epstein (1999), el silicio es considerado un elemento “cuasi esencial”, lo cual es definido por este autor como un elemento que se encuentra presente en las plantas y si una deficiencia es lo suficientemente severa para presentar anomalías en el crecimiento y desarrollo perjudicará su rendimiento.

2.1.3. Metabolismo del silicio en el arroz

a. Absorción del silicio por el arroz

Tal y como se discutió en el acápite anterior, la forma en la que se encuentra el silicio disponible en suelos, en rangos de pH fisiológico es como H_4SiO_4 , llamado ácido silícico, mono silícico u ortosilícico. Por lo tanto, es entendible que esta sea la forma en la que ingresa a las plantas (Datnoff, Snyder, & Korndörfer, 2001).

Según Takahashi *et al.* citado por Liang *et al.* (2015) el silicio puede ingresar a las plantas a través de la vía pasiva, activa y restrictiva. La primera implica que el ingreso de este elemento se da proporcionalmente al ingreso de agua, la segunda, implica que este elemento ingresa en mayor proporción que el agua con un consiguiente gasto energético, mientras que la tercera implica que puede ingresar incluso en menor proporción que el agua.

El ingreso por vía pasiva (sin gasto de energía) se da por difusión a través de los componentes lipídicos de la membrana celular, ya que el H_4SiO_4 es una molécula neutra y también por difusión facilitada a través de canales proteicos especializados (Raven, 2003). El ingreso por vía activa (con gasto de energía) se hace a través de dos tipos de transportadores: transportador de ingreso, denominado OsLsi-1, perteneciente a la subfamilia de las acuaporinas (Ma *et al.*, 2004) y transportador de salida, denominado OsLsi-2 perteneciente al grupo de los canales de aniones putativos (Ma *et al.*, 2007). Esta es la principal vía de ingreso, la cual no es afectada por el flujo transpiratorio (Nikolic, Nikolic, Liang, Kirkby, & Romheld, 2007).

Anatómicamente, el tejido más externo en las raíces del arroz es la epidermis, en donde se encuentran los pelos radiculares. A continuación, sigue la exodermis, un conjunto de células especializadas cuyas paredes contienen suberina (polímero orgánico impermeable), cuya función es limitar el ingreso de iones y otras sustancias por vía apoplástica. Posteriormente sigue una capa de esclerénquima, tejido lignificado. A continuación, el córtex, tejido parenquimático con grandes espacios vacíos por donde circula el aire y le da la posibilidad a esta especie de poder prosperar en suelos saturados. Después viene la endodermis, segundo conjunto de células con suberina a manera de filtro y por último el cilindro vascular, con los haces del xilema y floema (Hoshikawa citado por Yoshida 1981). El silicio puede ingresar de forma pasiva por difusión transmembranal a través de los pelos radiculares. Sin embargo, el ingreso activo, el cual es el más importante, ocurre a través del transportador OsLsi-1. El silicio principalmente difunde vía apoplasto a través de la epidermis, sin embargo, cuando llega a la exodermis se detiene y es ese transportador el que le permite ingresar a la vía simplástica. Estos transportadores se expresan principalmente en las raíces maduras en donde hay formación de exodermis, por lo que en ellas ocurre la mayor cantidad de transporte (Yamaji & Ma, 2007). Seguidamente, el ácido silícico sale a la vía apoplástica, a través del transportador OsLsi-2 y cruza así el córtex parenquimático. Este transportador es afectado por las bajas temperaturas y con valores altos de pH (Ma *et al.*, 2007). Por lo tanto, es el que consume energía, ya que se encuentra asociado a un antiportador de $\text{H}_4\text{SiO}_4/\text{H}^+$ y una ATPasa que gasta energía para bombear H^+ contra la gradiente de concentración lo que impulsa la salida del H_4SiO_4 a través del transportador OsLsi-2 incluso contra la gradiente, facilitando el paso del silicio desde la endodermis hacia el xilema. Luego que el silicio cruza el córtex vía apoplasto y llega a la endodermis, éste tendrá que ingresar de nuevo al simplasto

en esa zona, en donde actúa el OsLsi-1 nuevamente y posteriormente el OsLsi2 para ser transferido al xilema (Ma, Yamaji, & Mitani, 2011).

b. Movilización al interior de la planta y acumulación en órganos

Una vez que el silicio cruza la endodermis hacia el xilema, sigue el flujo transpiratorio ascendente hacia los órganos aéreos. La razón por la cual algunas variedades de arroz acumulan más silicio que otras depende de la expresión de los genes de los transportadores (Ma, Yamaji, Tamai, & Mitani, 2007). En el xilema, la savia bruta alcanza concentraciones de ácido silícico tan altas como de 20 mM (1920 ppm), 36 veces mayor a la concentración en la solución suelo (Nikolic *et al.*, 2007), pero esto ocurre por un periodo muy breve de tiempo, ya que a partir de 2 mM (192 ppm) el silicio empieza a polimerizarse (Mitani, Jian, & Iwashita, 2005). Una gran parte se deposita en los vasos xilemáticos en donde ayuda a que los vasos se mantengan rígidos cuando empiezan a darse las altas tasas transpiratorias (Balasta *et al.*, 1989).

El silicio sale de los vasos xilemáticos a través de otro transportador, el OsLsi-6. Este transfiere al H_4SiO_4 vía simplasto, hacia dentro del parénquima asociado al xilema. Este es un transportador de flujo de ingreso similar al OsLsi-1, pero que se expresa también en hojas y tallos y en las puntas de las raíces (Yamaji, Mitatni, & Ma, 2008). El silicio que sigue esa ruta termina depositándose al interior de células especializadas que almacenan silicio como fitolitos. También, el silicio puede salir de los vasos xilemáticos por vía apoplástica, en tal caso, el silicio termina depositándose en las paredes celulares de la epidermis enlazándose con la hemicelulosa, como un polímero amorfo hidratado (ópalo), formando una asociación de doble capa silicato-cutícula. El excedente puede salir incluso por gutación hacia afuera de las hojas (Ma *et al.*, 2011).

El arroz es capaz de acumular hasta 10 por ciento del peso seco en los órganos aéreos. Esta concentración es considerada mucho mayor que de la mayoría de macronutrientes como N, P o K. (Ma y Takahashi citado por Liang *et al.* 2015). Esto llevó a Savant *et al.* (1997) a deducir que se requerían grandes cantidades de Si para una producción sustentable de arroz. Según Desplanques *et al.* (2006) la extracción promedio de silicio es de 270 kg/ha/año.

2.1.4. Beneficios reportados

Los beneficios del silicio han sido observados fundamentalmente cuando se encuentran bajo algún tipo de estrés biótico o abiótico y han sido demostrados por varios estudios en soluciones hidropónicas (Epstein, 1994) o con ensayos en campo (Savant *et al.*, 1997). Esto posiblemente se deba a que el silicio funciona en varios niveles del funcionamiento interno de la planta, así como en el suelo (Guntzer, Keller, & Meunier, 2012).

a. Beneficios bajo estrés biótico

En el caso de estrés por factores bióticos, siendo más específico, el caso de patógenos, los beneficios de la aplicación de silicio frente al ataque de patógenos en muchas especies de plantas se basan en enfoques empíricos y los mecanismos de cómo actúa el silicio son poco conocidos (Guntzer *et al.*, 2012). En el cultivo de arroz, hay reportes que han demostrado que el silicio tiene un efecto de reducción de severidad frente al ataque de los siguientes patógenos: *Leptosphaeria salvinii* causante de la pudrición de tallo, *Magnaporthe grisea*, causante del quemado; *Fusarium sp*, causante de la fusariosis; *Cochliobolus miyabeanus*, causante de la mancha marrón; *Monographella albescens*, causante de la escaldadura de la hoja (Savant *et al.* 1997, Ma y Takahashi citado por Guntzer *et al.* 2012). Se cree que en parte, este efecto de protección se debe a que sílice amorfo precipita en las células haciendo más difícil el avance infeccioso, ya que actúa como barrera mecánica (Cheng, 1982). Este sílice se acumula en paredes celulares (Jones y Handreck, 1967). Adicionalmente, el silicio aparentemente induce la activación de mecanismos de defensa como la acumulación de lignina (Jian Feng Ma & Yamaji, 2006), compuestos fenólicos y fitoalexinas (Epstein, 1999). Hay otros autores que señalan que la resistencia al ataque de patógenos que ofrece el silicio no se debe a que se acumula en las paredes sino al efecto en la activación de defensas ya que al dejar de suplementar silicio la enfermedad se manifestaba aun encontrándose los depósitos de sílice (fitolitos) en las paredes (Fauteux, Rémus-Borel, Menzies, & Bélanger, 2005).

Aparte de eso se ha observado un efecto positivo al reducir el daño de comedores, perforadores y raspadores de hojas (Savant *et al.*, 1997). Se ha reportado una reducción significativa en el ataque de áfidos en plantas de trigo al aplicar silicio. Esto no se atribuye a una barrera mecánica creada por el sílice en las paredes celulares, sino a que los áfidos retiran su estilete, absorbiendo menos savia probablemente debido a un cambio en las sustancias químicas de esta, sugiriendo que el silicio ocasionó un cambio en el metabolismo

(Goussain, Prado, & Moraes, 2005). Van Bockhaven *et al.* (2013) señala que el efecto del silicio en la disminución de ataques de insectos gira en torno a tres ejes: la mejora de la condición física de las hojas si es que son comidas o colonizadas, la menor digestibilidad de las hojas ya que su contenido de macronutrientes disminuye, y un retraso en el ciclo de vida de los insectos volviéndolos más susceptibles a predadores.

Se han encontrado solo dos investigaciones en las que se mencionan influencias del silicio en rutas metabólicas para aliviar el estrés biótico. La primera es de Van Bockhaven *et al.* (2015) en la que se indica que el silicio tuvo influencia en la regulación de la resistencia a *Cochliobolus miyabeanus* (estado sexual de *Bipolaris oryzae*), mediante la regulación del etileno. La segunda investigación realizada por Ye *et al.* (2013), indica que hay una fuerte correlación entre el silicio y la ruta de inducción defensiva del jasmonato. Según ellos, los tratamientos con silicio incrementaron los niveles de jasmonato, incrementando la expresión de una serie de genes de resistencia a los insectos enrolladores de las hojas.

b. Beneficios bajo estrés abiótico

Uno de los problemas más severos que afronta el arroz es el acame o tumbado de tallos. La acumulación de silicio en las paredes celulares confiere a los tallos una mayor flexibilidad al doblado, por lo tanto, el acame se reduce (Lian *et al.* citado por Meharg y Meharg 2015). También se encontró que la fertilización silicatada incrementa la tolerancia a los rayos UV debido a los cuerpos de silicio en la epidermis de las hojas (Goto *et al.*, 2003), así como una mejora en la tasa fotosintética por aumento en la conductancia mesofílica (Detmann *et al.*, 2012).

Un experimento realizado Nolla *et al.* citado por Meharg y Meharg (2015) usando un cultivar de secano mantenido a tres niveles hídricos (6, 70 y 80 por ciento de la capacidad de campo) con dosis de 0, 200, 400 y 600 kg de silicato de calcio, mejoró la tolerancia al estrés hídrico con un aumento en la dosis de silicio.

Uno de los primeros registros de la influencia del silicio en el alivio de estreses de tipo abiótico lo registraron Williams y Vlamis (1957). En su ensayo, experimentaron con una concentración alta de Mn – 9.1 μM - en la solución nutritiva en un cultivo de cebada. Frente a esto, las plantas manifestaron manchas necróticas como síntoma de toxicidad de este elemento. Esto se logró solucionar al agregar 357 μM de silicio -34 ppm- a esa solución. En su análisis ellos no encontraron que el agregar silicio al medio se haya reducido la

concentración de manganeso, sino que, en lugar de eso, este elemento se redistribuía de forma más pareja en la planta, por lo que ya no se acumulaba en ciertas zonas formando tales manchas necróticas.

Este descubrimiento llevó a otras investigaciones en las que también se demostraba que el silicio podía ayudar a conferir cierta protección a la planta, frente a toxicidades de otros iones metálicos, en especial el aluminio. Este elemento es altamente tóxico en elevadas concentraciones en suelos ácidos (Epstein, 1999). La forma como el silicio alivia tales toxicidades no ha llegado a un consenso. Algunas posibles explicaciones es que el silicio puede interactuar con los iones metálicos en el medio de crecimiento, reduciendo su efecto fitotóxico (Hiradate, Taniguchi, & Sakurai, 1998). Sin embargo, queda claro en las discusiones que ocurren procesos tanto a nivel de medio de crecimiento como en el interior de la planta (Epstein, 1999). Para el caso específico del aluminio, se hace mención de que un posible mecanismo de aliviación de la toxicidad ocurre a nivel de solución suelo, el cual consiste en la formación de aluminosilicatos o hidroxialuminosilicatos de baja solubilidad, a nivel de las paredes celulares de la raíz, reduciendo la concentración de iones tóxicos Al^{3+} (Cocker, Evans, & Hodson, 1998). Otro posible mecanismo es que el silicio estimula la exudación de compuestos fenólicos por la raíz en maíz, por lo tanto, ocurren reacciones de quelatación que disminuyen la concentración de la forma tóxica de aluminio mencionada anteriormente (Kidd, Llugany, Poschenrieder, Gunsé, & Barceló, 2001).

Para el caso del arroz, se encontró que la toxicidad por Mn disminuye en soluciones hidropónicas a las que se le agrega silicio (Li, Song, Li, Fan, & Liang, 2012) y también ocurre con la toxicidad por Zn (Gu *et al.*, 2012). Los mecanismos son similares. El silicio restringió el transporte hacia los órganos aéreos en un cultivar y disminuyó la asimilación radicular en otro. Las plantas saturadas con silicio en sus tejidos evitaron que estos metales lleguen en cantidades que puedan causar estrés oxidativo en las células. Gu *et al.* (2011) también indica que la aplicación de escoria de acero y ceniza en suelos contaminados con metales pesados originaron que menores cantidades de Cd, Pb, Cu y Zn fueran absorbidas en las raíces y traslocadas a los tallos. Esto debido a las altas concentraciones de Si en las hojas que evitan que se trasloquen estos metales. Del mismo modo se encontró que hubo una mayor precipitación de estos metales en la rizósfera, transformándose en silicatos, fosfatos e hidróxidos respectivos de cada metal.

Hay evidencia que la fertilización con silicio disminuye la toxicidad por Fe^{2+} , la forma reducida de hierro encontrada en ambientes anaeróbicos. En un experimento hidropónico, el incremento de silicio en solución disminuyó la formación de la plaqueta de hierro en el rizoplano e incrementó su transporte hacia los órganos aéreos; sin embargo, tales mecanismos no fueron clarificados (Fu, Shen, Wu, & Cai, 2012).

2.2. Restitución de si al suelo en agroecosistema arrocero

Las pérdidas de Si en el suelo se dan principalmente por lixiviación a horizontes más profundos, escorrentía superficial y la extracción de los cultivos. La restitución de Si a los suelos en donde se produce arroz se puede dar por varios medios: a través de procesos de arrastre de partículas en las inundaciones, de la precipitación acarreado polvo y otros componentes silicatados, mediante el silicio disuelto en el agua de riego y a través de la incorporación al suelo de rastrojos, estiércoles compostados y no compostados y otras enmiendas y fertilizantes silicatados (Meharg & Meharg, 2015).

El reciclaje del silicio en los campos arroceros se da por la reincorporación de los rastrojos compostados o como estiércol luego de haberlos usado como alimento para animales. El 90 por ciento del silicio en los rastrojos de arroz se da como fitolitos. Estos se disuelven relativamente rápido siendo clave para mantener la fertilidad de este Agroecosistema. Su solubilidad se estima de 100 a 10 mil veces más soluble que los silicatos minerales (Frayse *et al.*, 2009). Esto fue demostrado por Seyfferth *et al.* (2013) quien identificó que las concentraciones de Si en suelos se incrementaban en invierno luego de la incorporación de rastrojos. Ma y Takahashi citado por Meharg y Meharg (2015) indican que en Japón, la incorporación de rastrojos compostados de regreso a los campos implica la adición de 300 a 1000 kg de SiO_2 por ha por año (140 a 466 kg de Si), por lo que representan una buena práctica de conservación de la fertilidad. Para efectos de este ensayo se emplearon las siguientes fuentes de silicio:

2.2.1. Escoria básica de horno cuchara

La palabra escoria es un término que aglomera a todos los subproductos no metálicos generados de la purificación de los metales a partir de sus minerales originales en la industria

metalúrgica. Su química y morfología depende del proceso específico para extracción de un determinado metal, así como de la forma en la que lo dejan solidificar. En términos generales pueden clasificarse en dos grupos escorias férricas y escorias no férricas. Las primeras surgen de los procesos de preparación de hierro y acero, mientras que las segundas, de los procesos de purificación de otros metales como cobre, zinc o plomo. En agricultura solo se emplean las escorias del primer grupo. (NSA, 2019).

El proceso de fabricación del acero tiene dos pasos clave: el primero involucra la fundición de materias ricas en hierro, carbono y caliza en un horno eléctrico y el segundo involucra una fundición de purificación en un horno cuchara. En este último proceso es en donde se alcanza la composición final deseada del acero. En cada uno de estas dos etapas se producen dos tipos de escoria diferente: la escoria producida en la primera fase es aún rica en metales, por lo que puede entrar a un segundo proceso de extracción metálica. (Aceros Arequipa, 2019). Sin embargo, puede ser usada directamente como material de construcción. La escoria producida en la segunda fase tiene una menor cantidad de metales, por lo que puede ser usada como enmienda agrícola (NSA, 2019).

Históricamente, estas escorias han sido usadas en agricultura por los monasterios en Europa durante toda la edad media (siglo V – XV) como material encalante, sin embargo no fue hasta 1881 cuando se obtuvo la primera patente como fertilizante agrícola en Estados Unidos y hasta 1955, en Japón, en donde empezó a venderse como fertilizante comercial luego de probarse exitoso en la recuperación de campos de arroz posterior a la segunda guerra mundial (Liang *et al.*, 2015).

Durante el proceso de fundición, los compuestos silicatados fuertemente enlazados en los minerales férricos, reaccionan con los compuestos en la piedra caliza por efecto de las altas temperaturas, formándose silicatos de calcio y magnesio, los cuales son mucho más solubles. Por otra parte, el hierro y otros metales siguen un proceso de reducción formando una fase separada de la escoria, por diferencia de densidades, por lo tanto, pueden ser separadas. Los componentes principales de las escorias de acero son calcio, magnesio, aluminio y hierro, con trazas de manganeso, cromo y níquel. Dada la diversidad de procesos en la industria metalúrgica, los contenidos de cada elemento son muy variados (Ma y Takahashi citado por Liang *et al.* 2015). Esto se confirma con los datos en la ficha técnica del producto empleado para este ensayo con los datos del análisis de laboratorio, estos se encuentran en el ANEXO 1.

Una de las principales preocupaciones con respecto a esta enmienda es su alto contenido de metales pesados, los que podrían ocasionar problemas ambientales (Datnoff *et al.*, 2001). Estos autores encontraron altas concentraciones de Cr, As y Pb en las escorias australianas. Sin embargo, una investigación realizada por Zhou & Haynes (2011) demostró que la cantidad disponible de estos elementos estaban por debajo de los estándares mínimos de calidad ambiental. A pesar de esto, algunos países como China, han puesto límites más estrictos para el contenido de Cr, Hg, As, Cd, y Pb (50, 5, 10, 10 y 50 mg/kg respectivamente).

2.2.2. Ceniza de cascarilla de arroz

La ceniza de cascarilla de arroz es un producto obtenido a partir de la quema de la cascarilla de arroz. En promedio la cascarilla de arroz posee 72 por ciento de SiO₂ y luego de la calcinación a 700 °C por seis horas, este porcentaje se incrementa a 94.95 por ciento (Della *et al.*, 2002). Por lo que representa una importante fuente de silicio. Sin embargo, según Le Blond *et al.* (2010) calentar los silicatos amorfos a temperaturas entre 700 y 800 °C podría llevar a la formación de cristales estables como la tridimita o la cristobalita. Debido a que los silicatos cristalizados son mucho menos solubles que los silicatos amorfos, una transformación de esa naturaleza podría reducir la disponibilidad del silicio para las plantas. A pesar de eso, según Nguyen *et al.* citado por (Haynes, 2017) los rastrojos de arroz cuando son quemados al aire libre solo alcanzan temperaturas entre 300 y 400 °C, por lo que no sería suficiente para alcanzar las temperaturas de cristalización. Es más, este autor señala que la quema a temperaturas entre 400 y 500 °C aumentan la solubilidad de los fitolitos.

2.2.3. Silicato de potasio

El silicato de potasio surgió como fertilizante de lenta liberación en Japón en 1978. Se producía a partir de las cenizas del carbón procedentes de las plantas termoeléctricas. Este era calcinado junto con carbonato de potasio, hidróxido de potasio e hidróxido de magnesio en un horno a 900 °C. En el año 2000, la demanda de este fertilizante alcanzó las 50 mil toneladas en Japón, de las cuales el 90 por ciento fueron usadas en la producción de arroz. En 1986, un silicato de potasio líquido apareció en Japón, el cual garantizaba 12 por ciento de SiO₂ y 6 por ciento de potasio soluble en agua. Se produjo al diluir silicato de potasio y carbonato de potasio en agua (Ma y Takahashi citado por Liang *et al.* 2015). Las

características del producto empleado para este ensayo son muy similares y pueden observarse en el ANEXO 2.

2.3. Características de la producción arrocerá en Perú

En cuanto a datos de producción del Perú, el MINAGRI (2017) brinda los siguientes datos para las series productivas comprendidas entre 2004 y 2014. En un lapso de 10 años, la producción nacional pasó de 1 844 896 ton a 2 896 613 ton. Esto quiere decir que existe un incremento en la producción de 1.05 millones de toneladas en una década. Se evidencia una tasa de crecimiento del 4.61 por ciento anual. Sin embargo, en algunas regiones de la selva, no se ha evidenciado una tasa de crecimiento tan alta en donde solo se ha llegado a 2.01 por ciento en la última década.

Con respecto a la superficie cosechada de arroz en el Perú, esta ha pasado de 286468 ha a 381 368 ha en ese mismo plazo, lo cual representa un incremento de casi 95 mil ha sembradas por campaña. La tasa de crecimiento a nivel nacional fue de 2.9 por ciento, lo cual respalda el incremento en el hectareaje. Siete de las doce regiones con territorio en la selva, han registrado incrementos en su tasa de crecimiento de área sembrada con arroz.

En el caso del rendimiento, podemos ver que, en el 2004, los rendimientos nacionales eran de 6440 kg/ha, mientras que en el 2014 estos alcanzaron la cifra de 7595 kg/ha. Lo cual representa un incremento de 1155 kg/ha en promedio nacional. Cabe mencionar que la Región con los mejores rendimientos es Arequipa con valores que alcanzaron en el 2014 a 13 256 kg/ha, seguida por La Libertad, que alcanzó 10809 kg/ha. Analizando los datos de la selva podemos ver que quien tiene los más altos rendimientos es Cajamarca con 7817 kg/ha, mientras que la menor es Cusco con 1713 kg/ha. En líneas generales se puede apreciar un incremento de las productividades en la selva, aunque tales rendimientos no son comparables con los máximos rendimientos en la costa.

En cuanto al precio del arroz en chacra, podemos ver que los datos nacionales han pasado de 0.97 soles/kg en el 2004 a 1.09 soles/kg en el 2014. Un incremento de 12 céntimos/kg en promedio a nivel nacional. Las regiones en las que el precio en chacra para el 2014 eran los más altos son Puno con 2.3 soles/kg, seguida de Pasco con 1.37 soles/kg. En la mayoría de

las regiones puede observarse un incremento sucesivo en el precio, sin embargo, este siempre mantuvo fluctuaciones periódicas en ese lapso de 10 años.

Los incrementos en la producción responden al crecimiento demográfico de las últimas décadas y la introducción de tecnologías recientes en el ámbito del manejo integrado de plagas-enfermedades-malezas, así como de nuevos cultivares producto del mejoramiento genético. Es clara la relevancia que tiene el cultivo de arroz para nuestro país, se podría decir inclusive que la dependencia a este cereal es un asunto de seguridad alimentaria nacional. Cabe destacar la gran demanda que hay en la selva, siendo el arroz la principal fuente de carbohidratos de consumo humano. Este hecho de por sí, ya amerita continuar con estudios que permitan mejorar rendimientos en esta parte del país. Aparte de eso, el incremento progresivo del precio, está convirtiéndose en una alternativa económica cada vez más rentable a los agricultores.

2.4. Importancia del arroz en la alimentación

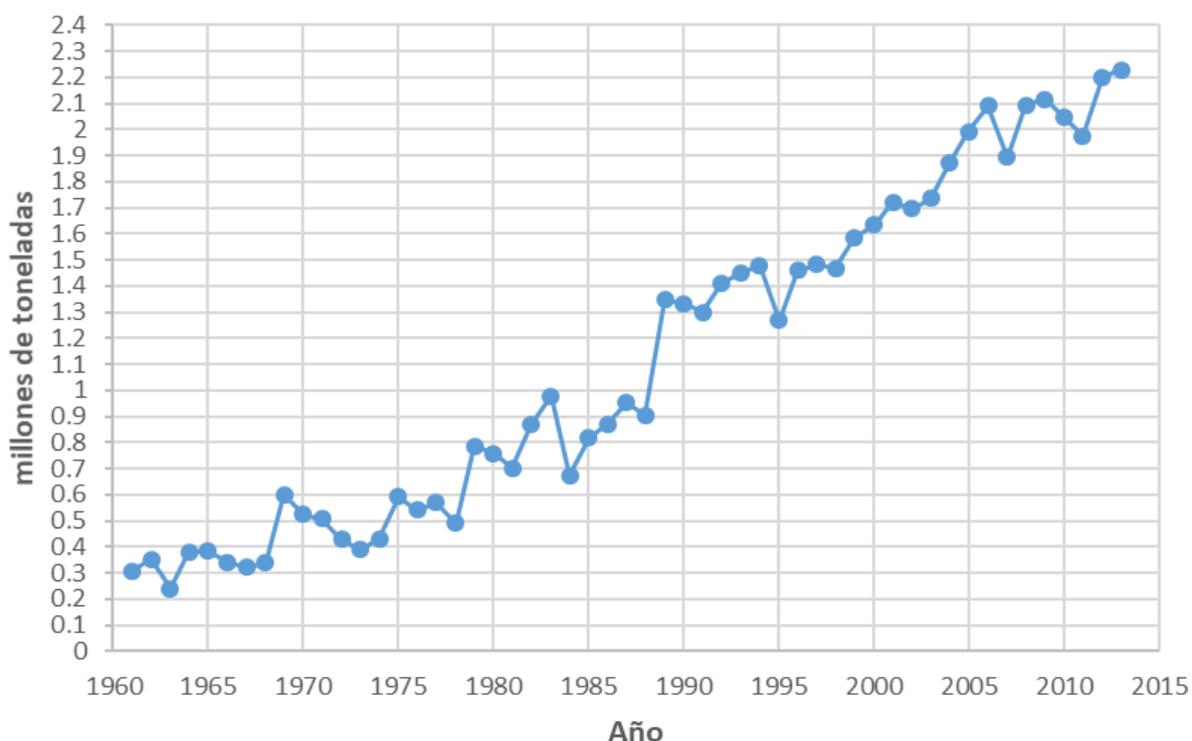


Figura 2: Histórico del consumo nacional de arroz
Fuente: FAO (2017)

El arroz es uno de los cultivos más importantes para la alimentación de al menos 33 países en vías de desarrollo. En promedio aporta el 27 por ciento del suministro energético, 20 por ciento del proteico y 3 por ciento de las grasas en la dieta de dichos países. Adicionalmente contribuye con cantidades significativas de tiamina, riboflavina, niacina y zinc en la dieta. Según FAO (2017), el consumo de arroz en el Perú se ha ido incrementando de manera sostenida de 306 mil toneladas en el año 1961, hasta aproximadamente 2.2 millones de toneladas en el año 2013 (FAO, 2017). Esta situación queda expresada en la Figura 2.

El consumo per cápita del arroz se ha incrementado también, demostrando que los peruanos consumimos cada vez más arroz. Este indicador también presenta un crecimiento sostenido. En 1961 el valor era de 30.1 kg /persona/año, mientras que para el 2014 se registró en está en 73.35 kg arroz/persona/año (FAO, 2017). Esto queda reflejado en la Figura 3.

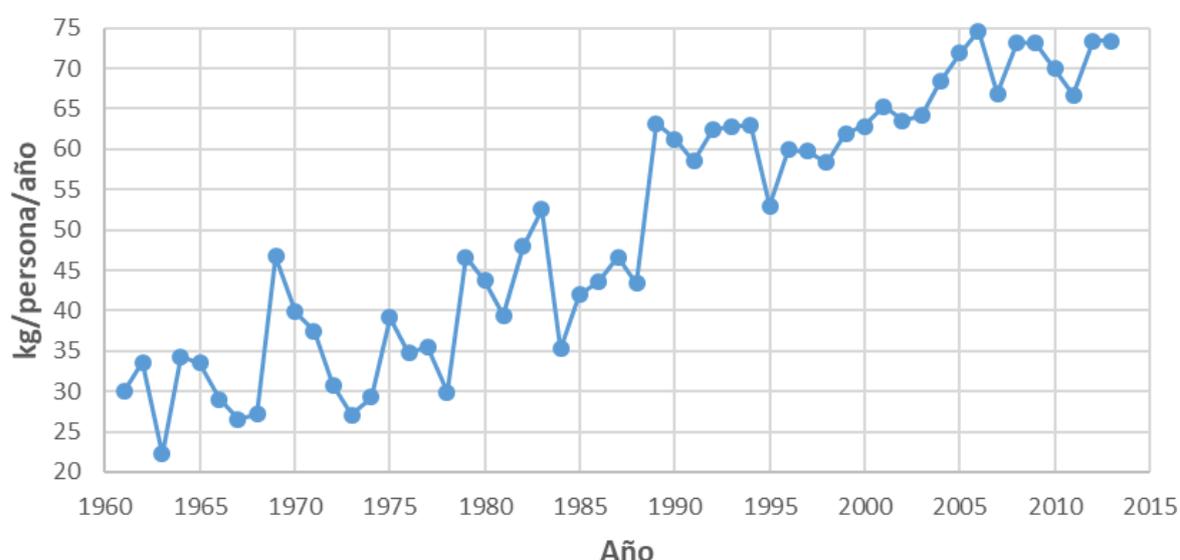


Figura 3: Histórico consumo nacional de arroz per cápita
Fuente: FAO (2017)

Según el INEI (2009), en Lima Metropolitana el consumo alcanza 46.6 kg/año, en la costa peruana, el promedio es de 51.6 kg/año, en la sierra 36.2 kg/año y en la selva 58.1 kg/año. En ciudades como Puerto Maldonado se registra hasta 72.1 kg/año. Esta misma entidad menciona que el arroz es el principal cereal consumido en nuestro país superando al maíz (5.1 kg/año/persona) y al trigo (4.2 kg/persona/año-considerando la harina también). Solamente la papa, supera en consumo per cápita al arroz. Esta presenta un consumo promedio nacional de 63.5 kg/año.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación del campo experimental

El ensayo se llevó a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Fertilidad del Suelo, en el campus de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

Departamento: Lima

Provincia: Lima

Distrito: La Molina

Coordenadas: 12° 04' 46" S / 76° 56' 45" O

Elevación: 243 m.s.n.m.

3.2. Materiales y equipos

3.2.1. Insumos

- Suelo ácido: 421 kg = 311.9 L. Considerando Da: 1.35 g/cm³ (suelo de textura franca según análisis)
- Escoria de horno cuchara (6248 ppm SiA) - 4.9 kg
- Ceniza de cáscara de arroz (5802 ppm de SiA) - 4.7 kg
- Silicato de potasio (36130 ppm) - 0.8 kg
- Sulfato de amonio (21 % N – 24 % S) - 239.12 g
- Sulfato de potasio (50 % K₂O – 18 % S) - 70.44 g
- Fosfato diamónico (18 % N – 46 % P₂O₅) - 43.48 g
- Agua de riego procedente de pozo en Huachipa - 57 L por maceta

- Agua destilada
- Semillas de arroz variedad Fedearroz 60
- Reactivos para análisis de silicio

3.2.2. Materiales y herramientas

- Macetas (90 unidades) MCI 26-Maruplast (26 cm de diámetro, 21.1 cm de altura y 7.5 L de capacidad). Cada maceta contuvo 5.8 kg o su equivalente a 4.3 L.
- Palas
- Costales
- Regla de 1 m
- Vernier
- Lapiceros
- Gigantografía para etiquetas
- Plumón indeleble
- Cinta de embalaje
- Cinta Ducktape
- Film de plástico
- Manta plástica
- Pavilo
- Matraces, probetas, *beakers*, pipetas
- Pipetas automáticas

3.2.3. Equipos

- Computadora
- Cámara fotográfica
- Balanza de 30 kg
- Estufa
- Balanza analítica
- Potenciómetro y conductivímetro
- Termohigrómetro con registrador automático

- Luxómetro
- Plancha térmica
- Mufla
- Espectrofotómetro UV

3.3. Diseño experimental

3.3.1. Tipo de diseño empleado

Se empleó un diseño completo al azar (DCA) con arreglo factorial (3x4). Seis repeticiones por tratamiento.

a. Factor 1: fuentes de silicio soluble

- Nivel 1: escoria básica de horno cuchara
- Nivel 2: ceniza de cascarilla de arroz
- Nivel 3: silicato de potasio

b. Factor 2: concentraciones

- Nivel 1: 0 ppm de SiA (silicio activo)
- Nivel 2: 100 ppm de SiA (silicio activo)
- Nivel 3: 200 ppm de SiA (silicio activo)
- Nivel 4: 400 ppm de SiA (silicio activo)

3.3.2. Unidad experimental

Una maceta con una planta de arroz con 5.8 kg de material de suelo previamente tamizado, homogeneizado y fertilizado parcialmente. Total: 72 unidades experimentales.

3.3.3. Modelo aditivo lineal

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ij}$$

- Y_{ij} : Valor de la variable medida con la fuente de SiA i , en la concentración j
 μ : Efecto de la media general en la variable medida
 α_i : Efecto de la fuente de SiA i
 β_j : Efecto de la concentración j
 $(\alpha\beta)_{ij}$: Efecto de la interacción de la fuente de SiA i con la concentración j
 ε_{ij} : Efecto del error experimental obtenido con la fuente de SiA i y concentración j .

3.3.4. Esquema del diseño experimental

TRATAMIENTOS	Factor 1: Fuente de silicio	Ceniza de cascarilla de arroz				Escoria de horno cuchara				Silicato de potasio			
	Factor 2: Concentración	0 ppm	100 ppm	200 pm	400 ppm	0 ppm	100 ppm	200 pm	400 ppm	0 ppm	100 ppm	200 pm	400 ppm
REPETICIONES	1	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
	2	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
	3	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
	4	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
	5	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
	6	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE

Figura 4: Esquema del diseño experimental.
 Fuente: Elaboración propia

3.3.5. Variables evaluadas

Tabla 1: Listado de variables medidas.

Nro.	VARIABLES	UNIDAD/ CLASE	OBJETIVO
<u>Variables cuantitativas referenciales</u>			
1	Número de hojas	unidad	Determinar vigor vegetativo
2	Altura de planta	cm	Determinar vigor vegetativo
<u>Variables cuantitativas directas</u>			
3	Macollos/planta	unidad	Determinar habilidad de macollamiento
4	Panículas/planta	unidad	Asociar al estimado de rendimiento de grano
5	Espiguillas/planta	unidad	Asociar al estimado de rendimiento de grano
6	Panículas malformadas/planta	unidad	Asociar con tolerancia a estrés por frío
7	Espiguillas necrosadas/planta	unidad	Asociar con tolerancia a estrés biótico
8	Peso fresco/planta	g	Determinar porcentaje de materia seca
9	Peso seco/planta	g	Determinar porcentaje de materia seca
10	Volumen de raíz	cm ³	Asociar al estimado de rendimiento de grano
11	Concentración de Si en tejido	%	Evaluar el contenido de Si incorporado
12	Concentración de Si disp en suelo	ppm	Evaluar variación en disponibilidad de Si
13	Concentración de N en tejido	%	Asociar al estimado de rendimiento de grano
<u>Variables cuantitativas derivadas</u>			
14	Número de espiguillas/panículas	unidad	Asociar al estimado de rendimiento de grano
15	Materia seca	%	Asociar al estimado de rendimiento de grano
<u>Variables cuantitativas estimadas</u>			
16	Rendimiento	g	Evaluar el efecto de las enmiendas
<u>Variables edafoclimáticas</u>			
17	Conductividad eléctrica del suelo	dS/m	Registrado durante la fase de campo
18	pH del suelo	unidad pH	Determinar la variación del pH del suelo
19	Temperatura ambiental	°C	Determinar la variación de la temperatura
20	Humedad relativa	%	Determinar la variación de la HR %
21	Intensidad luminosa	Lux	Estimar la radiación PAR

Fuente: Elaboración propia

3.3.6. Aleatorización de los tratamientos y distribución sobre las mesas

MESA 1				MESA 2				MESA 3			
COD	REPETICION	FUENTE SIA	CONCENTRACION	COD	REPETICION	FUENTE SIA	CONCENTRACION	COD	REPETICION	FUENTE SIA	CONCENTRACION
U101	r1	Escoria	100ppm	U125	r3	Ceniza	400ppm	U149	r5	Silicato	200ppm
U102	r1	Escoria	400ppm	U126	r3	Silicato	100ppm	U150	r3	Escoria	200ppm
U103	r1	Silicato	0ppm	U127	r3	Ceniza	200ppm	U151	r4	Silicato	0ppm
U104	r1	Escoria	0ppm	U128	r4	Silicato	400ppm	U152	r4	Silicato	100ppm
U105	r2	Escoria	0ppm	U129	r2	Escoria	400ppm	U153	r6	Ceniza	200ppm
U106	r3	Escoria	0ppm	U130	r3	Ceniza	100ppm	U154	r5	Silicato	0ppm
U107	r1	Ceniza	100ppm	U131	r4	Ceniza	200ppm	U155	r4	Escoria	200ppm
U108	r1	Silicato	400ppm	U132	r3	Escoria	100ppm	U156	r4	Ceniza	100ppm
U109	r1	Ceniza	0ppm	U133	r2	Silicato	200ppm	U157	r6	Silicato	200ppm
U110	r1	Silicato	200ppm	U134	r3	Silicato	200ppm	U158	r5	Escoria	200ppm
U111	r2	Escoria	100ppm	U135	r5	Silicato	400ppm	U159	r5	Escoria	100ppm
U112	r1	Silicato	100ppm	U136	r4	Silicato	200ppm	U160	r5	Ceniza	100ppm
U113	r1	Ceniza	400ppm	U137	r5	Escoria	0ppm	U161	r6	Escoria	400ppm
U114	r2	Ceniza	400ppm	U138	r2	Silicato	0ppm	U162	r5	Ceniza	0ppm
U115	r2	Silicato	400ppm	U139	r2	Escoria	200ppm	U163	r6	Silicato	400ppm
U116	r3	Silicato	400ppm	U140	r5	Ceniza	200ppm	U164	r6	Ceniza	100ppm
U117	r2	Ceniza	0ppm	U141	r3	Escoria	400ppm	U165	r6	Silicato	0ppm
U118	r4	Escoria	0ppm	U142	r4	Escoria	400ppm	U166	r5	Ceniza	400ppm
U119	r1	Ceniza	200ppm	U143	r4	Escoria	100ppm	U167	r6	Escoria	100ppm
U120	r2	Ceniza	200ppm	U144	r5	Escoria	400ppm	U168	r6	Ceniza	400ppm
U121	r3	Ceniza	0ppm	U145	r4	Ceniza	0ppm	U169	r5	Silicato	100ppm
U122	r2	Ceniza	100ppm	U146	r6	Escoria	0ppm	U170	r6	Escoria	200ppm
U123	r2	Silicato	100ppm	U147	r4	Ceniza	400ppm	U171	r6	Ceniza	0ppm
U124	r1	Escoria	200ppm	U148	r3	Silicato	0ppm	U172	r6	Silicato	100ppm

Figura 5: Aleatorización de los tratamientos y distribución sobre las mesas.

Fuente: Elaboración propia

3.3.7. Registro de datos

Se empleó la plataforma virtual Yupana (Lozano *et al.* 2018) para el registro y procesamiento parcial de datos y generación de gráficas.

3.4. Procedimientos

3.4.1. Fase preliminar

a. Colecta del material de suelo y reconocimiento fisiográfico

El material de suelo que se usó para el ensayo fue colectado en el distrito de José Crespo y Castillo, provincia de Leoncio Prado, Región Huánuco en febrero del 2017. Esta zona se caracteriza por tener clima cálido húmedo, con temperatura media anual de 24.67 °C, precipitación anual promedio de 2866 mm y altitud de 586 m.s.n.m. (SENAMHI, 2018). La colecta estuvo a cargo del Ing. Elvis Ottos de la Universidad Nacional Agraria de la Selva quien eligió un campo comercial de arroz para tomar las muestras. En una visita posterior a la zona se constató la fisiografía de la zona, la cual consistía en planicies fluviales en los márgenes del río Huallaga, asociadas con planicies aluviales contiguas. La mayor parte de

los campos de arroz se encontraban en terrazas medias inundables y no inundables. Según información del gobierno regional de Huánuco, en el mapa de suelos de la provincia de Leoncio Prado, encontrado en la Zonificación Ecológica-Económica (Albornoz *et al.*, 2016), los suelos de esta zona corresponden a Typic Dystrudepts, Typic Udifluvents y Typic Udorthents; siendo los Typic Dystrudepts los de mayor predominancia. Estos son Inceptisoles (caracterizados por tener un horizonte (B) cámbico, de formación incipiente, con régimen de humedad údico (buen suministro de humedad para las plantas a lo largo del año) y de baja saturación de bases (indicado por el prefijo Dystr-). Los Typic Udifluvents corresponden a Entisoles (suelos jóvenes que no han experimentado procesos de formación de suelo intenso), de origen fluvial (afijo -flu-) es decir por la acumulación de sedimentos provenientes de los ciclos de subidas y bajadas del río Huallaga, con régimen údico (buen suministro de humedad para las plantas a lo largo del año). Por último, se tienen Typic Udorthents, los cuales también son Entisoles comunes (indicado por el afijo -orth-) con régimen údico (buen suministro de humedad para las plantas a lo largo del año)(USDA, 2014).

b. Análisis de caracterización

El material de suelo secado al sol se mandó vía encomienda al Laboratorio de Fertilidad de Suelos en donde se procedió con el mullido de los terrones. Para esto se usó un rodillo de cemento y unos costales de plástico. El procedimiento se realizó de forma manual, repetidas veces hasta conseguir que todo el material de suelo logre pasar por un tamiz de 2 mm. Una vez conseguido un mullido uniforme se procedió a separar toda la cantidad en tres porciones relativamente iguales. Con la ayuda de una palana, cada uno de estos tres bloques, de aproximadamente 140 kg cada uno, se homogeneizaron individualmente sobre una manta plástica. Este procedimiento se hizo según lo detallado en el Manual de prácticas de edafología (2012). Una vez logrado esto, se procedió a regresar tres cuartos de la mezcla total de vuelta a los costales. La cuarta parte restante se continuó homogeneizando. Luego se volvió a separar tres cuartos, los que se regresaron a los costales. El cuarto restante se continuó mezclando. Se realizó este procedimiento cuatro veces con cada uno de los tres bloques hasta lograr 1 kg de muestra de material de suelo. Al final se obtuvieron 3 kg de material de suelo que fueron enviados rotulados en tres bloques al Laboratorio de agua, suelo, plantas y fertilizantes para la realización del análisis de caracterización. Los resultados se muestran en la Tabla 2 y el documento oficial se encuentra en el ANEXO 3.

Tabla 2: Características físicas y químicas del suelo experimental

PARÁMETRO		BLOQUE I	BLOQUE II	BLOQUE III	PROMEDIO	Desviación Estándar
Análisis granulométrico	Arena (%)	40	42	40	40.67	1.15
	Limo (%)	43	39	41	41	2
	Arcilla (%)	17	19	19	18.33	1.15
Clase textural		Franco	Franco	Franco		
pH (1:1)		5.04	5.15	5.23	5.14	0.1
CaCO ₃ (%)		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C.E. (1:1) (dS/m)		0.25	0.26	0.24	0.25	0.01
Materia orgánica (%)		1.97	1.95	2.02	1.98	0.04
P disponible (ppm)		5.60	5.40	5.80	5.60	0.20
K disponible (ppm)		105	116	111	110.67	5.51
CIC total (cmol _c /kg)		11.2	10.4	12.72	11.44	1.18
Cationes cambiables (cmol _c /kg)	Ca ²⁺	5.51	4.17	4.35	4.68	0.73
	Mg ²⁺	0.85	0.78	0.87	0.83	0.05
	K ⁺	0.15	0.29	0.3	0.25	0.08
	Na ⁺	0.12	0.15	0.12	0.13	0.02
	Al ³⁺ + H ⁺	0.10	0.10	0.10	0.10	0.00
CIC efectiva (cmol _c /kg)		6.73	5.49	5.74	5.99	0.66
% Acidez cambiable		1.49	1.82	1.74	1.68	0.17
% Saturación de bases		98.51	98.18	98.26	98.32	0.17
% Saturación de sodio		1.78	2.73	2.09	2.2	0.48

Fuente: Laboratorio de Suelos, Plantas, Agua y Fertilizantes, UNALM (2017)

c. Interpretación del análisis de caracterización de suelos:

Al haber sido una tercera persona la encargada de la extracción del material de suelo, se desconocía qué tan uniforme era el campo del cual fue obtenido. Por lo tanto, con el objetivo de lograr una correcta homogenización de todo el material de suelo, se decidió dividir el total de 420 kg, en tres bloques de 140 kg cada uno. Las muestras representativas fueron obtenidas según se detalla en la sección anterior y fueron mandadas al laboratorio siguiendo el patrón de tres bloques para corroborar si hubo diferencias entre los bloques.

Al observar los resultados independientes para cada uno de los bloques, es posible apreciar que los datos son muy similares entre sí. Las desviaciones estándar muestrales son pequeñas en todos los parámetros medidos, indicando que la variabilidad entre los tres bloques es muy baja. Este es uno de los fundamentos por los cuales el ensayo se planteó como un diseño completo al azar.

A continuación se da la interpretación de los parámetros obtenidos, en base a lo expuesto por Brady & Weils (2008) y el Soil Survey Staff (2018)

Textura

La textura se define como la proporción relativa en peso de arena, limo y arcilla de la fracción mineral del suelo. El análisis arroja textura franca, con 40 por ciento de arena, 41 por ciento de limo, y 19 por ciento de arcilla. Se considera como textura media. Esto corresponde a lo esperado según el análisis fisiográfico de la zona expuesto en un acápite anterior. Tanto los Entisoles como los Inceptisoles encontrados en la zona pueden presentar textura franca en los epipedones, más aún considerando que los procesos de labranza en estos campos han mezclado los horizontes a una profundidad de hasta 50 cm. Por tanto, es usual encontrar una textura de esa naturaleza. El contenido de arcilla (19 por ciento) se explica por el clima tropical y los procesos intensos de meteorización a los que se encuentra sometidos. Adicionalmente al arrastre de sedimentos por el agua de riego usada para inundar los campos de arroz. El contenido de limo (41 por ciento) puede tener su origen, también en el arrastre de sedimentos. Con ese porcentaje de limo, es posible encontrarse con problemas en la infiltración, sin embargo, por tratarse de un campo de arroz, es ideal, ya que favorece el empozamiento del agua. Los suelos francos en general tienen buena fertilidad física, ya que la distribución de macro y micro poros favorece un balance entre agua y aire del suelo, pero en este caso en particular, es probable que las labores de preparación del suelo, en especial el “batido”, hayan destruido la estructura nativa, justamente para evitar que el agua percole rápidamente.

Materia orgánica (M.O.)

La materia orgánica del suelo es la fracción orgánica que excluye la biota del suelo, los residuos orgánicos frescos y parcialmente descompuestos y que han tenido que pasar por un proceso de resíntesis para formar los ácidos húmicos, ácidos fúlvicos y las huminas. El valor obtenido fue de 1.98 por ciento, considerado como bajo contenido de materia orgánica. Este dato está íntimamente relacionado con el porcentaje de arcillas, debido a que su forma laminar protege a estas macromoléculas orgánicas de ser degradadas fácilmente por los microorganismos del suelo. Un suelo considerado como “saludable”, debería contener hasta un 2 por ciento de M.O. para un 30 por ciento de arcillas; mientras un 0.2 por ciento de M.O. para un contenido de arcillas de 10 por ciento (Loli, 2018). En este caso observamos un 1.98 por ciento de materia orgánica para un 19 por ciento de arcillas. Éste es un contenido bastante elevado, lo cual nos indica que hay una acumulación de M.O. en el suelo. Esto podría considerarse como un indicador de que algún fenómeno desfavorable está ocurriendo en este

campo, como el tener un pH demasiado ácido (que evita la proliferación de bacterias principales descomponedores del suelo) o un pobre drenaje (lo que disminuye el aprovisionamiento de oxígeno. A pesar de esto, debido a que las muestras provienen de un campo arrocero, manejado con riego por melgas en condiciones de saturación de suelo durante gran parte de la campaña, este valor adquiere más sentido.

Reacción del suelo (pH de la solución suelo)

Expresa la concentración de iones hidrógeno en la solución suelo. Su importancia radica en que es la referencia más importante para comprender el potencial nutricional del suelo, desde el punto de vista de la fertilidad química. Para este caso el valor del pH medido en agua en proporción 1:1 (peso/peso) fue de 5.14. Este valor se considera como “fuertemente ácido”. Para las condiciones de selva baja de donde fueron extraídas las muestras, los principales factores que pueden haber tenido influencia en este dato son las precipitaciones (2866 mm/año) y la temperatura (media anual de 24.7 °C). Al ser un clima tropical, se espera que los procesos de meteorización sean bastante intensos, lo que conlleva a tener una concentración elevada de iones hidrógeno en la solución. A pesar de esto, se observa que el porcentaje de acidez cambiante es de 1.68 por ciento, siendo la cantidad de aluminio más hidrógeno de 0.1 cmol_c/kg. Esto nos indica que existe una relativa facilidad para elevar el pH en caso se requiera, ya que la presencia de cationes ácidos respecto de la CIC efectiva es baja. Al tener un pH ácido, esperaríamos que haya una buena disponibilidad de micronutrientes y una limitada disponibilidad de macronutrientes. Adicionalmente a eso, este nivel de pH favorece una lenta descomposición de materia orgánica.

Porcentaje de carbonato de calcio

Este dato posee un valor de cero por ciento debido a que nos encontramos en suelos con pH ácido. Esta condición impide la precipitación del CaCO₃ y favorece la disociación de estas moléculas que puedan llegar por arrastre de agua o por aplicación de enmiendas encalantes.

Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

CIC real = 11.44 cmol_c/kg - valor medio

CIC efectiva = 5.99 cmol_c/kg - valor bajo

La capacidad de intercambio catiónico es un parámetro que nos indica la cantidad de cationes que pueden ser adsorbidos en la doble capa eléctrica difusa de los coloides del suelo (arcillas y sustancias húmicas), por lo tanto, está relacionado con la fertilidad química. El parámetro de la CIC efectiva indica la cantidad de cargas presentes en los coloides del suelo para el pH nativo al cual fue extraída la muestra, por lo tanto, se puede considerar como el valor más cercano a lo que realmente está presente. El parámetro de la CIC real, nos indica el valor máximo al cual la CIC de la muestra puede llegar en caso se incremente el pH. Debido a que se emplea acetato de amonio tamponado a pH 7 para medir este parámetro, comienzan a aparecer cargas por efecto de la desprotonación de los grupos -OH en las moléculas orgánicas, en las arcillas 1:1 y en los bordes quebrados de las arcillas 2:1. Con el dato de la CIC real y el porcentaje de materia orgánica, es posible estimar el tipo de arcilla presente en el suelo. Si el suelo tiene 1.98 por ciento de materia orgánica según el análisis, en 1000 kg de material de suelo se tendría 19.8 kg de sustancias húmicas. Por lo tanto, si sustraemos esta cantidad del bloque inicial de 1000 kg, se tendrá que hay 980.2 kg de una mezcla de arena, limo y arcilla. Se sabe que 19 por ciento de este total son arcillas, lo cual representa 186.23 kg de arcilla. Ahora, el dato de la CIC real es de 11.44 cmol_c/kg (tamponado a pH 7 como se explicó más arriba), por lo tanto, en 1000 kg, se tendrá un total de 11440 cmol de cargas. A un pH de 7 se estima que 1 kg de materia orgánica posee 200 cmol de carga (Tabla 3), por lo tanto, en los 19.8 kg calculados inicialmente se tendrá un total de 3960 cmol de carga provenientes de las sustancias húmicas.

Tabla 3: Cargas características de algunos coloides representativos del suelo mostrando comparativamente los niveles de carga permanente (constante) y cargas dependientes del pH tanto negativas como positivas

TIPO DE COLOIDE	CARGA NEGATIVA			CARGA POSITIVA cmol _c /kg
	Total a pH 7 cmol _c /kg	Permanente %	Dependiente del pH %	
Orgánico	200	10	90	0
Esmectita	100	95	5	0
Vermiculita	150	95	5	0
Mica de grano fino	30	80	20	0
Clorita	30	80	20	0
Caolinita	8	5	95	2
Gibbsita (Al)	4	0	100	5
Goethita (Fe)	4	0	100	5
Alofano	30	10	90	15

Fuente: Brady & Weil (2008)

Esa cantidad debe ser sustraída de los 11440 cmol del total del suelo para hallar la cantidad de cargas aportadas por las arcillas (se asume que los limos y las arenas no aportan carga). Al hacer ese cálculo se obtiene que 7480 cmol deben de ser producidas por los 186.23 kg de arcillas presentes en este bloque, por lo tanto, en 1 kg de estas arcillas habrán 40.16 cmol de carga. Este valor corresponde teóricamente a arcillas de tipo cloritas o ilitas según puede observarse en la Tabla 3. Esto adquiere sentido considerando que son arcillas 2:1 de reciente formación ya que nos encontramos en suelos poco evolucionados como son los Entisoles y algunos Inceptisoles.

Acidez cambiabile y “bases” cambiabiles:

Debido a que el presente estudio no se encuentra en el ámbito de la clasificación de suelos sino relacionado a su fertilidad, en otras palabras, a la capacidad que tiene este suelo para nutrir a las plantas, se tomará el dato de la CIC efectiva para hacer los cálculos de la acidez cambiabile y las “bases cambiabiles”, ya que este dato expresa más verídicamente la condición química a la que se encuentra este material de suelo en su forma nativa.

La CIC efectiva tiene un valor de 5.99 cmol_c/kg, mientras que el valor de $Al^{3+} + H^{+}$ es de 0.1 cmol_c/kg. Por lo tanto, el porcentaje de acidez cambiabile es de 1.68 por ciento. Este valor tiene relación con el pH de 5.14; como se indicó en un acápite anterior se espera tener aluminio cambiabile a pH de 5.5 o menos. Sin embargo, la cantidad de aluminio en la zona de intercambio es muy baja, lo cual queda expresado por el valor del porcentaje de acidez cambiabile. Esto es un indicador que la capacidad buffer para amortiguar subidas en el pH es precaria. Es decir, resultaría relativamente sencillo reducir la acidez mediante la adición de enmiendas encalantes. Adicionalmente a eso, no se encontrarán problemas de toxicidad por aluminio, ya que estos problemas se presentan cuando la acidez cambiabile sobrepasa el 20 por ciento.

De forma complementaria, se puede observar que la sumatoria de las cantidades de carga provenientes de los cationes calcio, magnesio, potasio y sodio es de 5.89 cmol_c/kg. Esto corresponde a un 98.31 por ciento de saturación de “bases”. Este dato es lo que le falta a la acidez cambiabile para ser 100 por ciento. Por lo tanto, es posible observar que los cationes predominantes son considerados como “no ácidos”.

Relaciones catiónicas:

$\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$: 5.63 (óptimo)

$\text{Ca}^{2+}/\text{K}^{+}$: 18.72 (bajo en potasio)

$\text{Mg}^{2+}/\text{K}^{+}$: 3.32 (bajo en potasio)

$\text{K}^{+}/\text{Na}^{+}$: 1.92 (óptimo)

Durante el proceso de medición de la CIC real se usa acetato de amonio para reemplazar todos los cationes en la zona de intercambio. La solución desplazada de la muestra de suelo, en consecuencia, contiene los cationes nativos del suelo. A partir de acá, se miden las concentraciones de cada uno de los elementos de interés, los cuales quedan registrados en la tabla como cationes cambiabiles del suelo. Esta información resulta importante ya que las proporciones en la que se encuentran estos cationes en la zona de intercambio será la misma que para la solución de suelo. Es necesario resaltar que los cationes en solución de suelo estarán en mucha menor cantidad que en la zona de intercambio, por lo que es incorrecto suponer que todas las cantidades expresadas son de elementos inmediatamente disponibles. A pesar de esto, las proporciones obtenidas son suficientes para tomar decisiones en cuanto a la adición de fertilizantes u otras enmiendas.

La relación calcio/magnesio podría considerarse como una de las más importantes, ya que el calcio es el elemento estructurador por excelencia. Óptimos niveles favorecen buen nivel de cohesión entre partículas favoreciendo la correcta distribución de macro y micro poros del suelo, lo que repercute en la relación agua-aire del suelo. Los valores óptimos deben estar entre 5-8. Es decir 5 u 8 miliequivalentes de calcio por cada miliequivalente de magnesio. Valores superiores indican la necesidad de agregar magnesio, y valores inferiores, indican la necesidad de agregar calcio. En este caso se encuentra en 5.6, lo cual indica que se encuentra en el rango óptimo.

La relación calcio/potasio tiene un nivel óptimo de 14-16. Es decir, 14 a 16 miliequivalentes de calcio por cada miliequivalente de potasio. Valores por encima indican necesidad de agregar potasio, valores por debajo indican necesidad de incorporar calcio. En este caso, la relación se encuentra en 18.7, lo cual indica que el potasio está en bajo nivel. Una posible explicación de esto es que las arcillas, según lo discutido anteriormente, podrían corresponder a ilitas, las cuales son micas finas y pueden secuestrar iones potasio en los espacios interlaminares.

La relación magnesio/potasio tiene un nivel óptimo de 1.8-2.5. Valores por encima de este rango indican que es necesario agregar potasio. Valores por debajo indican que es necesario agregar magnesio. En este caso, el valor obtenido es 3.3, lo cual también indica un bajo nivel de potasio respecto del magnesio. Esta información en conjunto con la relación anterior indica la necesidad de realizar un abonamiento con alguna fuente de potasio.

La relación potasio/sodio debe indicar valores superiores o iguales a 1.5; valores inferiores podrían indicar riesgo de sodicidad en los suelos. En este caso se encuentra en 1.9, valor óptimo. A parte de eso, la cantidad de sodio es de 0.13 cmol_e/kg, lo cual representa solo un 2.17 por ciento de sodio respecto de la CIC efectiva (porcentaje sodio intercambiable-PSI). Lo cual corrobora que no es un suelo sódico, los cuales deben tener más de 15 por ciento de PSI.

Fósforo y potasio disponibles:

P disponible: 5.6 ppm - bajo

K disponible: 110.7 ppm - medio

La disponibilidad de los elementos va a estar supeditada a la presencia del elemento en la solución de suelo y que se encuentre en la forma química adecuada para que pueda ingresar a las plantas. Uno de los factores que influyen directamente la disponibilidad es el pH de la solución suelo. Se podría afirmar que esta es una variable maestra que determinará en primera instancia qué elementos estarán más disponibles que otros. Sin embargo, estos valores son influenciados por los exudados radiculares de las especies vegetales presentes. Estos tienen el poder de solubilizar minerales, precipitar, quelatar sustancias, entre otros, favoreciendo su proceso de absorción de nutrientes. El valor de fósforo disponible fue hallado en base al método de Olsen modificado, el cual emula los exudados radiculares del maíz. Es por eso que es incorrecto asumir que el valor obtenido en este parámetro es lo que verdaderamente se tiene disponible, ya que cada especie vegetal tendrá diferentes propiedades en los exudados radiculares que generen. En el caso del potasio disponible ocurre una situación parecida. Es por eso que para ambos casos se recomienda asumir que solo el 30 por ciento de los valores obtenidos en el análisis va a ser efectivamente disponibles (Loli, 2018). A pesar de esto, los cálculos de fertilización de esta tesis fueron calculados en base a los valores que aparecen en el análisis. Estos valores bajos también son indicadores que las prácticas de abonamiento no han sido las adecuadas o que no se hubiese abonado hace bastante tiempo.

Salinidad

$CE_{1:1(p/p)} - 25\text{ }^{\circ}\text{C} = 0.25\text{ dS/m}$ - suelo no salino

La salinidad es la medida del contenido de sales solubles en la solución de suelo. Su importancia radica en que la concentración de sales del medio influye en la facilidad o dificultad del ingreso de agua a las plantas. La explicación se encuentra en las fuerzas osmóticas que generan los iones en solución. Estos tienden a limitar el movimiento libre de las moléculas de agua, reduciendo su energía, haciendo difícil su ingreso a través de las membranas vegetales. En este caso, el dato de 0.25 dS/m indica que el suelo es no salino. Esto es un indicador que, a pesar de ser un campo agrícola comercial, el efecto salinizante del agua y de la adición de fertilizantes no ha sido intensa, ya sea por la buena calidad del agua o por la poca adición de fertilizantes salinizantes.

d. Análisis de silicio activo en suelos

Una muestra de cada uno de los tres bloques homogeneizados fue enviado al Laboratorio de silicio para el análisis de silicio activo en suelos. Éste se realizó usando el método de extracción con CaCl_2 adaptado de Pereira *et al.* (2007). Este método se detallará en la sección de análisis químicos posteriormente. Los datos obtenidos se detallan en la Tabla 4.

Tabla 4: Disponibilidad inicial de silicio para el material de suelo usado en el ensayo

MUESTRA	SiA (ppm)
I	11.19
II	10.85
III	13.29
Promedio	11.78

Fuente: Laboratorio de silicio, UNALM (2018).

e. Análisis de silicio activo en las enmiendas

Muestras de escoria de horno cuchara, silicato de potasio y ceniza de cascarilla de arroz fueron llevadas al Laboratorio de silicio para realizar los análisis de silicio activo. La metodología usada se basó en los estudios de Korndörfer *et al.* (2004) cuyo fin es hacer lecturas colorimétricas en un espectrofotómetro UV. Los resultados se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5: Resultados del análisis de silicio disponible en las fuentes de SiA empleadas

FUENTES DE SiA	SiA ppm
Ceniza de cascarilla de arroz	5802
Escoria básica de horno cuchara	6248
Silicato de potasio	36130

Fuente: Laboratorio de silicio, UNALM (2018)

f. Análisis de perfil químico completo de las enmiendas a usar

Tabla 6: Resumen de análisis químico completo de enmiendas silicatadas empleadas

ELEMENTO (ppm)	ENMIENDA		
	Escoria básica	Ceniza cascarilla de arroz	Silicato de potasio
P ₂ O ₅	1100	2000	100
K ₂ O	32300	22900	170000
CaO	340200	45600	224
MgO	79900	9800	42
S	10700	0	0
Fe	50000	2450	31
Cu	224	90	2
Zn	401	290	3
Mn	13950	1200	3
Pb	1551	2	26
Cd	10	8	1
Cr	862	3	18
SiA*	6248	5802	36130

*Reportado como silicio disponible (SiA)

Fuente: Laboratorio de Suelos, Plantas, Agua y Fertilizantes, UNALM (2018)

Las mismas muestras fueron llevadas al Laboratorio de Suelo, Agua, Plantas y Fertilizantes de la Facultad de Agronomía para determinar el perfil químico completo de estas enmiendas. Los datos expresan la cantidad total de cada elemento. La metodología empleada para medir K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, Mn, Pb, Cd y Cr fue espectrofotometría de absorción atómica. Para P, se empleó el método de vanadato/molibdato y para S, Gravimetría con cloruro de bario. Los resultados se encuentran en los ANEXO 4, ANEXO 5 y ANEXO 6. El resumen se muestra en la Tabla 6.

g. Análisis de agua de riego

Los datos del análisis de agua fueron tomados de Cruz (2019), quien realizó un ensayo en las mismas instalaciones, usando la misma fuente de agua. Esta es traída de un pozo de agua dulce en Huachipa. Los datos registrados por este autor para concentración de sales marca 1 dS/m, mientras que, para el caso de este ensayo, las mediciones de las cinco primeras semanas en promedio marcan 0.5 dS/m. Por lo tanto, la cantidad de cationes y aniones se estimó de forma proporcional. Los resultados se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7: Resultados de análisis de agua 2017 y reajuste a condiciones del 2018

PARÁMETRO	UNIDADES	AÑO	
		2017*	2018**
pH		8.01	7.83
C.E.	dS/m	1.01	0.5
RAS		0.81	0.57
Boro	ppm	0.31	0.155
Calcio	meq/L	7.5	3.75
Magnesio	meq/L	1.22	0.61
Potasio	meq/L	0.1	0.05
Sodio	meq/L	1.7	0.85
Suma de cationes	meq/L	10.52	5.26
Nitratos	meq/L	0.12	0.06
Carbonatos	meq/L	0	0
Bicarbonatos	meq/L	3.54	1.77
Sulfatos	meq/L	3.7	1.85
Cloruros	meq/L	3.2	1.6
Suma de aniones	meq/L	10.56	5.28

* Fuente: Cruz (2019)

** Los datos de pH y CE corresponden a un promedio obtenido de las 5 primeras semanas del cultivo. La cantidad de cada catión y anión se calculó en forma proporcional a los datos de Cruz (2019)

h. Cálculos de dosis de enmiendas silicatadas

Consideraciones

Cada maceta tuvo 5.8 kg de material de suelo. El segundo nivel de los tratamientos incluyó concentraciones de 100 ppm, 200 ppm y 400 ppm de SiA. Por lo tanto:

- 100 ppm SiA: 100 mg SiA-----1 kg material de suelo
x mg ----- 5.8 kg
x= 580 mg de SiA /maceta
- 200 ppm SiA: 200 mg SiA -----1 kg material de suelo
x mg ----- 5.8 kg
x= 1160 mg de SiA /maceta
- 400 ppm SiA: 400 mg SiA -----1 kg material de suelo
x mg ----- 5.8 kg
x= 2320 mg de SiA /maceta

Tratamiento 1: Escoria de horno cuchara (6248 ppm)

- 100 ppm SiA: 6248 mg de SiA -----1 000 000 mg de escoria
580 mg de SiA ----- x mg de escoria
X= 92.82 g escoria/maceta
Para 6 macetas= 556.96 g de escoria
- 200 ppm SiA: 6248 mg de SiA -----1 000 000 mg de escoria
160 mg de SiA ----- x mg de escoria
X=185.65 escoria/maceta
Para 6 macetas=1113.93 g de escoria
- 400 ppm SiA: 6248 mg de SiA -----1 000 000 mg de escoria
2320 mg de SiA ----- x mg de escoria
X= de 371.3 g escoria/maceta
Para 6 macetas= 2227.86 g de escoria

TOTAL: 556.96 g +1113.93 g + 2227.86 g = **3898.75 g de escoria**

Tratamiento 2: Ceniza de cascarilla de arroz (5802 ppm de SiA)

- 100 ppm SiA: 5802 mg de SiA -----1 000 000 mg de ceniza
580 mg de SiA ----- x mg de ceniza
X= 99.95 g de ceniza/maceta
Para 6 macetas= 599.76 g de ceniza
- 200 ppm SiA: 5802 mg de SiA -----1 000 000 mg de ceniza
1160 mg de SiA ----- x mg de ceniza

X= 199.92 g de ceniza/maceta
Para 6 macetas=1199.51 g de ceniza

- 400 ppm SiA: 5802 mg de SiA -----1 000 000 mg de ceniza
2320 mg de SiA ----- x mg de ceniza
X= 399.83 g de ceniza/maceta
Para 6 macetas= 2399.04 g de ceniza

TOTAL: 599.76 g + 1199.51 g + 2399.04 g = **4193.31 g de ceniza**

Tratamiento 3: Silicato de potasio (36 130 ppm)

- 100 ppm SiA: 36 130 mg de SiA -----1 000 000 mg de K₂SiO₄
580 mg de SiA ----- x mg de K₂SiO₄
X=16.05 g de silicato/maceta
Para 6 macetas= 96.32 g de silicato de potasio
- 200 ppm SiA: 36 130 mg de SiA -----1 000 000 mg de K₂SiO₄
1160 mg de SiA ----- x mg de K₂SiO₄
X= 32.1 g de silicato/maceta
Para 6 macetas= 192.63 g de silicato de potasio
- 400 ppm SiA: 36 130 mg de SiA -----1 000 000 mg de K₂SiO₄
2320 mg de SiA ----- x mg de K₂SiO₄
X= 64.21 g de silicato/maceta
Para 6 macetas= 385.27 g de silicato de potasio

TOTAL: 96.32 g + 192.63 g + 385.27 g = **674.22 g de silicato de potasio**

i. Cálculo de dosis de fertilizantes

La cantidad de fertilizantes empleada fue calculada en base a la cantidad extraída de cada elemento indicada por Bertsch (2009) y al análisis de caracterización de suelos. Los cálculos se explican en el ANEXO 7.

j. Tratamiento de semillas

Las semillas de arroz fueron traídas desde Aucayacu, Huánuco. Se hizo una prueba de germinación en la que se encontró solo un 8 por ciento de germinación, razón por la cual se

procedió a llevar a las semillas a una estufa a 40 °C por 48 horas. Luego de este proceso, se procedió a realizar otra prueba de germinación en la que se encontró un incremento en el porcentaje de germinación a 45 por ciento. Estas semillas fueron desinfectadas un día antes de la siembra con una solución de hipoclorito de sodio al 1.5 por ciento p/p por 2 horas y luego fueron lavadas y guardadas hasta el momento de la siembra.

3.4.2. Fase de campo

a. Acondicionamiento de macetas

Las macetas fueron acondicionadas para mantener condiciones de saturación hídrica. Para esto, se usó cinta Ducktape para sellar los agujeros de drenaje que vinieron de fábrica. Esta cinta se caracteriza por haber sido fabricada en tela y con un pegamento impermeable al agua. Aparte de eso, cada maceta fue rotulada con el código asignado aleatoriamente según lo detallado en el croquis experimental, impreso en material de gigantografía.

b. Pesado de enmiendas y fertilizantes

Las enmiendas y los fertilizantes fueron separados en bolsas de plástico según las cantidades determinadas en los cálculos mostrados anteriormente. Se usó una balanza para este fin. Previamente, la escoria y la ceniza de cascarilla de arroz fueron pasadas por un tamiz de 1 mm para homogeneizar el tamaño de partícula.

c. Siembra en macetas

El material de suelo fue distribuido en cada maceta, usando una balanza, colocando 5.75 kg en cada contenedor. Las macetas fueron colocadas sobre las mesas y ordenadas según sus códigos. Luego de eso, cada una de las macetas recibió la dosis de la enmienda asignada según su código, así como la dosis completa de la fertilización fosfatada. Para esto, el contenido completo de cada maceta fue vaciado sobre una bandeja de plástico, en donde se agregó el fertilizante fosfatado y la enmienda asignada. Todo fue mezclado hasta obtener una apariencia uniforme. Sin embargo, es importante resaltar que los tratamientos con silicato de potasio no recibieron su enmienda en ese momento, sino al momento del primer riego, ya que la formulación acuosa de la enmienda dificultaba una correcta homogenización del sustrato. Se realizó el primer riego con un litro de agua. Teóricamente con esta cantidad se alcanzaba la capacidad de campo. Luego de dos días se realizó siembra. Las semillas que

habían recibido el tratamiento térmico y desinfectante mencionadas en el acápite anterior fueron sembradas a una densidad de 30 semillas por maceta. Esto debido al bajo porcentaje de germinación encontrado. La profundidad de siembra fue aproximadamente 1.5 cm, espaciadas uniformemente en orificios perforados sobre el sustrato. Luego de haber sido tapadas se procedió con el riego, un litro en cada maceta.

d. Labores culturales realizadas:

Las labores culturales realizadas se resumen en el siguiente gráfico.

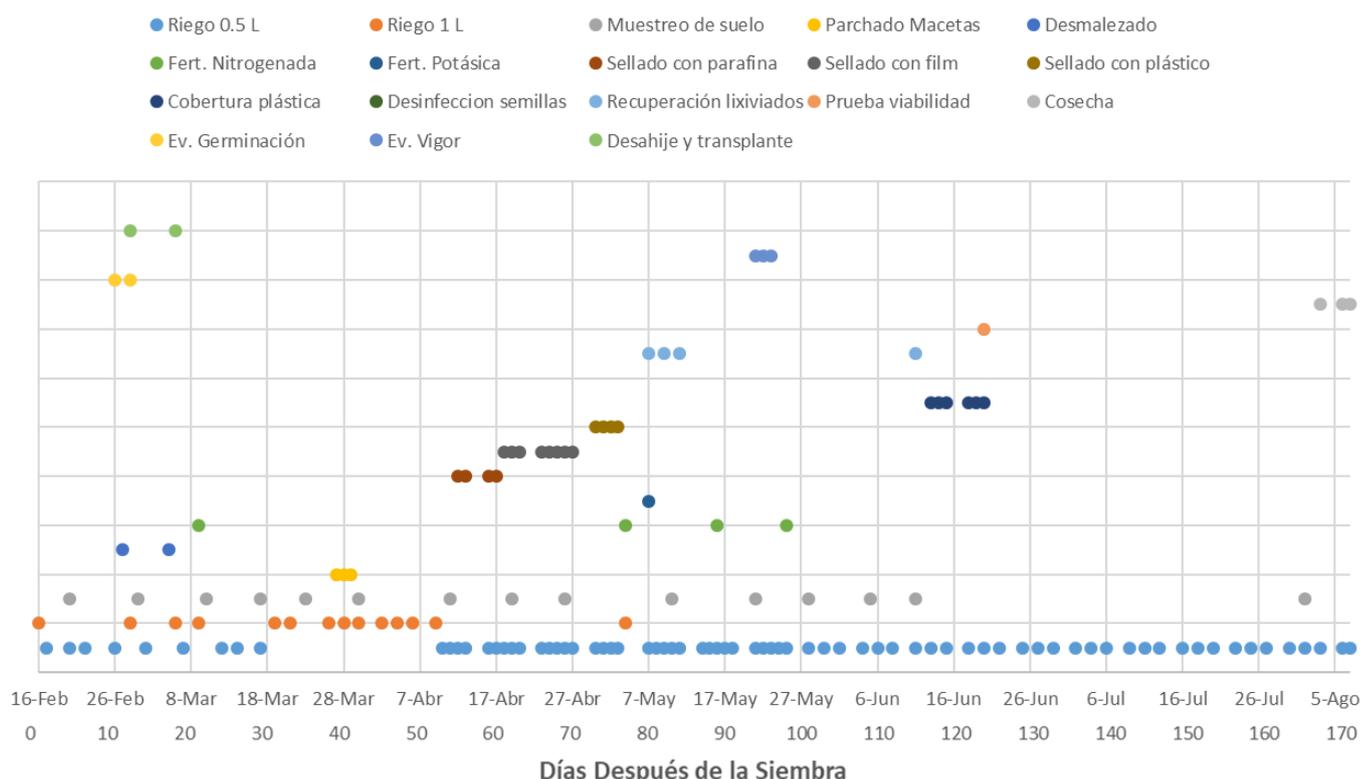


Figura 6: Calendario de labores culturales realizadas durante la fase de campo
Fuente: Elaboración propia

e. Variables evaluadas previas a la cosecha

Número de Hojas: se evaluó el número de hojas a los 21 días después de la siembra. Se contaron todas las hojas de todos los macollos presentes en cada unidad experimental.

Altura de planta: se evaluó la altura de planta a los 94 días después de la siembra, coincidiendo con el final del estadio de elongación de tallos. Se usó una regla de un metro con graduación en centímetros para tomar las mediciones. Se consideró como referencia

inicial la parte superior del material de suelo en la maceta. Se registró los datos en centímetros enteros. Según lo establecido en el manual del IRRI (2013), los decimales fueron aproximados al número entero inferior más cercano.

f. Registro de variables edafoclimáticas:

Temperatura ambiental y humedad relativa

Se usó un termohigrómetro con registrador automático de la marca Elitech modelo RC-4HC para registrar estas variables. El dispositivo fue ubicado en el centro de la mesa 2 a una altura de un metro respecto del nivel del suelo y al mismo nivel de las macetas. Se configuró para que registre la temperatura y la humedad relativa cada 15 min. Las mediciones empezaron el día 15/02/18 a las 8:45 horas (un día antes de la siembra) y terminaron el día 01/08/18 a las 00:30 (a los 166 días después de la siembra y cinco días antes de la cosecha, debido a que los registros de la memoria se completaron ese día). Los datos recopilados fueron descargados usando el software Logger Data Management V3.0 de la misma empresa. Este software generó los gráficos de resumen de estas dos variables, los cuales serán presentados en las discusiones.

Intensidad luminosa

Se usó un luxómetro de la marca Benetech modelo GM1010 para registrar los valores de intensidad luminosa. Las mediciones se realizaron a una altura de 0.6 m del nivel del suelo de forma manual en las horas sinópticas 9:00, 12:00 y 15:00 (± 0.5 h). Los registros que no fueron tomados fueron dejados en blanco. Los datos fueron medidos en Lux y posteriormente fueron convertidos a $\mu\text{mol/s/m}^2$ de radiación fotosintéticamente activa (PAR-por sus siglas en inglés) con la Tabla 8 de conversiones proporcionada por McCree (1981).

A partir de estos datos se elaboró una curva de acumulación lumínica teniendo como base el concepto de integral de luz diaria (Torres & Lopez, 2012). Con la ayuda de un algoritmo matemático programado en Python (ANEXO 8), se calculó ecuaciones lineales que relacionaban los tres puntos medidos usando al tiempo (en segundos) como variable dependiente y la intensidad luminosa como variable independiente. A partir de las ecuaciones se calcularon los flujos de fotones por cada segundo del día, asumiendo que la

duración del día era de 12 horas durante toda la fase de campo. Por último, se sumaron todos los datos por cada día para obtener la integral de luz diaria.

Tabla 8: Constantes para transformar unidades de intensidad luminosa a unidades de radiación fotosintéticamente activa

Para convertir	FUENTE DE LUZ					
	Luz sol	Lámpara haluro metálico	Lámpara alta presión sodio	Lámpara Mercurio	Fluorescente blanco	Lámpara incandescente
	Multiplicar por					
W/m ² (PAR) a μmol/m ² /s (PAR)	4.6	4.6	5	4.7	4.6	5
klx a μmol/m ² /s (PAR)	18	14	14	14	12	20
klx a W/m ² (PAR)	4	3.1	2.8	3	2.7	4

Fuente: McCree (1981)

Conductividad eléctrica/pH del suelo:

Una repetición por cada tratamiento fue seleccionada al azar para hacer un seguimiento de la variación de conductividad eléctrica y pH del suelo a lo largo de toda la campaña. En total, doce unidades experimentales fueron marcadas con cintas distintivas. Una vez a la semana, se colectaron muestras de aproximadamente 20 g de material de suelo de cada maceta, usando un tubo muestreador de PVC (Ø3/4") a una profundidad aproximada de 10 cm. La muestra correspondiente a la semana era obtenida de una zona previamente no muestreada en la misma maceta. Los materiales de colecta eran lavados con el agua de riego por cada muestra. Estas fueron colocadas en bandejas de aluminio rotuladas según el tratamiento respectivo y secadas en estufa a 105 °C por 24 horas. Las muestras secas fueron almacenadas en bolsas de polietileno para ser evaluadas al final de la campaña. Los procedimientos de medición serán explicados posteriormente en la sección de análisis de laboratorio.

3.4.3. Fase de análisis de parámetros morfológicos

Todos los parámetros morfológicos fueron analizados después de la cosecha. Todas las plantas detuvieron su desarrollo en el estadio de *antesis*, ya que no hubo formación de grano.

a. Cosecha:

Previamente a la cosecha se realizó una sesión de fotos en donde se registró gráficamente todas las repeticiones correspondientes a un mismo tratamiento. A la par se realizó una última colecta de material de suelo de todas las macetas siguiendo el mismo procedimiento descrito anteriormente.

La cosecha se realizó del 6 al 17 de agosto del 2018 (del día 171 al 182 después de la siembra). Se procedió a extraer las plantas de sus macetas, con todo y material de suelo y a llevarlas a baldes de 20 L con agua. Una vez colocadas acá, se procedió a masajear progresivamente la parte radicular para ir desprendiendo las raíces con cuidado. Luego de esto, todo este contenido fue pasado por un tamiz de 5 mm colectando la planta con su cabellera radicular principal y las raicillas que se pudieron haber desprendido durante el proceso. Se lavaron las raíces con el agua de riego hasta eliminar todo el material de suelo posible. Finalmente, la parte aérea y la raíz fueron separadas usando una hoja de cierra a nivel de la base de la planta. Cada una de estas secciones fue lavada una vez más para eliminar los restos de suelo que pudieron haberse quedado atrapado cerca al interior de la planta.

b. Evaluación del peso fresco:

Inmediatamente después de haber recibido el segundo lavado indicado anteriormente, la raíz y la parte aérea fueron pesadas usando una balanza marca Kern PCB con precisión de una centésima de gramo. Se usó un *beaker* de vidrio de 500 ml como apoyo para mantener la parte aérea erguida y a las raíces dentro de la plataforma de pesado. Este era tarado a cero en cada medición. Luego de haber registrado los pesos, las partes aéreas fueron transferidas a bolsas de papel rotuladas con los códigos correspondientes. Las unidades experimentales que no macollaron fueron pesadas directamente sobre la balanza. Es importante resaltar que los datos de raíz y parte aérea se registraron de forma independiente, sin embargo, al final se sumaron para obtener el peso fresco total de la planta.

c. Evaluación de volumen de raíz:

La cabellera radicular principal y las raicillas desprendidas fueron juntadas para la evaluación del volumen radicular usando el método de desplazamiento de agua. Para esto, se empleó una bandeja de 45 x 30 x 5 cm, un trípode metálico, un *beaker* de vidrio de un litro de capacidad, una probeta de 100 ml, una piseta, un embudo y agua de riego. El procedimiento fue el siguiente: la bandeja fue colocada sobre una mesa y sobre este, se colocó el trípode. El *beaker* era llenado con agua casi al tope y luego era colocado sobre el trípode. Una vez en esa posición, se enrasaba con agua usando la piseta hasta observar que se formaba un menisco de agua en el pico del vaso. Seguidamente se procedía a introducir lentamente toda la masa de raíces. El agua desplazada iba saliendo del *beaker* y para evitar que salpique fuera de la bandeja, se usó el embudo para que tenga un contacto sutil. Las raíces se sumergieron hasta que las puntas de los dedos del evaluador toquen el agua. Por último, el volumen de agua colectada en la bandeja fue medida usando la probeta. Los datos fueron registrados en mililitros de agua desplazada, el cual se asumió que es análogo al volumen de las raíces según el principio de Arquímedes. Las raíces de las unidades experimentales que no macollaron fueron medidas usando una probeta de 20 ml, registrado directamente el desplazamiento de agua al interior de la probeta cuando eran introducidas. Posteriormente, las raíces fueron guardadas en bolsas de papel rotuladas según su código.

d. Evaluación de la habilidad de macollamiento

Se realizó un conteo del número total de macollos producidos por una planta (la unidad experimental estuvo conformada por una maceta con una planta). Se considera como macollos a todos los tallos que surgen a partir de los nudos inferiores del tallo principal. Estos a su vez generan otros tallos a medida que van creciendo. Para este conteo se consideró a todos los macollos con más de 5 mm de longitud aproximadamente.

e. Evaluación del número de panículas por planta

Se realizó un conteo del número de panículas por planta. Se consideró en el conteo incluso las panículas que se quedaron en estadio de bota que no lograron desplegarse.

f. Evaluación del número de panículas malformadas por daño de frío

Se realizó un conteo del número de panículas por planta que presentaron deformaciones en los ápices de los raquis producto de las bajas temperaturas registradas durante la transición

a la etapa reproductiva. También se consideraron en el conteo las panículas en el estadio de bota que no lograron desplegarse.

g. Evaluación del número de espiguillas por planta

Se realizó un conteo manual del número de espiguillas por planta. Para esto se registró de forma individual el número de espiguillas correspondientes a cada panícula de cada planta y luego se sumaron para obtener el total. Los datos fueron registrados en una matriz que se muestra en el ANEXO 9.

h. Evaluación del número de espiguillas necróticas por planta

Las bajas temperaturas ocasionaron la aparición de zonas necróticas en las espiguillas causadas por *Alternaria alternata*. Se realizó un conteo manual del número de espiguillas con manchas necróticas por planta. Para esto se registró de forma individual el número de espiguillas dañadas correspondientes a cada panícula de cada planta. Se consideró a una espiguilla como dañada cuando presentaba alguna mancha necrótica mayor de 1 mm de diámetro aproximadamente. Finalmente se sumó la cantidad de espiguillas necrosadas en cada panícula para obtener el dato total. Los datos registrados se muestran en el ANEXO 10.

i. Evaluación del peso seco:

Tanto la parte aérea (hojas, tallos y panículas) como la raíz fueron almacenadas por cuatro semanas sobre una de las mesas metálicas del patio del Laboratorio de Fertilidad de Suelos. La mesa fue techada con una lámina de polipropileno de tal forma que las muestras queden bajo sombra y sobre todo eso, se colocó una malla raschel que envolvía completamente la mesa, de tal forma que servía como cortina de separación para evitar la entrada de aves o personas. El ambiente estuvo bien ventilado y al cabo de este tiempo las muestras se habían secado considerablemente. Luego, las muestras fueron lavadas una vez más con agua de riego y con agua desionizada en preparación para los análisis químicos posteriores. Seguidamente, se ingresaron las muestras a dos estufas eléctricas a 65 °C por 72 horas. Cumplido este tiempo, las muestras fueron retiradas e inmediatamente fueron pesadas con todo y bolsa usando una balanza marca Kern PCB con precisión de una centésima de gramo. Las plantas que no macollaron fueron sacadas de sus bolsas y pesadas directamente sobre la balanza. Posteriormente se pesaron las bolsas de forma individual para sustraer esos valores a los datos tomados inicialmente con excepción de las plantas que no macollaron. Es

importante resaltar que los datos de raíz y parte aérea se registraron de forma independiente, sin embargo, al final se sumaron para obtener el peso seco total de la planta.

j. Cálculo de la materia seca:

A partir de los datos de peso fresco y peso seco se realizaron los cálculos del porcentaje de materia seca se la parte aéreas, de la raíz y del promedio total de la planta. Se usó la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Materia seca} = \frac{\text{Peso seco}}{\text{Peso fresco}} \times 100$$

k. Estimación del rendimiento en grano por planta:

A partir de los datos del número de espiguillas por planta y del peso de 1000 granos registrados para la variedad Fedearroz 60 (Abad, 2017), se estimó el rendimiento potencial alcanzado. Se asumió un 10 por ciento de granos no cuajados según comunicación personal con Heros (2018).

3.4.4. Fase de análisis químicos

a. Preparación de las muestras

Luego de haber registrado el peso seco de las muestras, se procedió a trasladarlas al Laboratorio de suelo, agua, plantas y fertilizantes para ser trituradas. Se usó un molino eléctrico de laboratorio de la marca Thomas-Wiley modelo 4 con un tamiz acoplado de 1 mm. Tanto la parte aérea como la raíz fueron molidas de forma separada, colocando el material ya tamizado en bolsas ziploc de polietileno previamente rotuladas. Para el caso de las plantas que no macollaron, debido a su tamaño pequeño se usó un molino eléctrico para triturar hojas. Las muestras pasaron por un tamiz de 1 mm, sin embargo, debido al poco material disponible también se adicionó los restos vegetales que no pasaron el tamiz. Este material también se almacenó en bolsas ziploc rotuladas.

b. Análisis de silicio en tejido vegetal

El análisis de silicio en tejido vegetal se realizó tomando como referencia el método de Fusión con NaOH detallado por Parra *et al.* (2004). Para esto, se pesó 0.1 g de tejido vegetal

en una balanza analítica y se los colocó en crisoles de níquel. Se buscó que los pesos sean precisos hasta una centésima de gramo. El peso exacto de cada muestra se registró, ya que la balanza analítica tenía una precisión de 0.1 mg. Los crisoles rotulados fueron llevados a una mufla a 300 °C por treinta minutos, seguidamente se elevó la temperatura a 550 °C por treinta minutos más. Es importante recalcar que el tiempo que tarda en elevar la temperatura de 0 a 300 °C es de aproximadamente quince minutos, mientras que para elevarse de 300 a 550 °C es de casi diez minutos. Al culminar los últimos treinta minutos, se permitió que enfríe por media hora con la puerta entreabierta. El total de tiempo de este proceso es de casi dos horas. La mufla tenía capacidad para 24 crisoles de níquel; sin embargo, solo se colocaron grupos de 22 crisoles a la vez. A continuación, se extrajeron los crisoles de la mufla y se les agregó 4.5 g de una solución de NaOH al 50 por ciento (p/v). Después fueron llevados a una plancha a 300 °C para evaporar el agua de la solución y que solo quede el NaOH cristalizado. Este proceso duró aproximadamente dos horas.

Seguidamente, los crisoles fueron calentados en un mechero a fuego lento con la finalidad de alcanzar el punto de fusión del hidróxido de sodio. Este proceso tomó diez minutos por cada crisol. Ya que solo se disponía de un mechero, este proceso tomó quince horas para un total de 90 muestras.

Se dejaron enfriar los crisoles y luego de eso se les agregó 25 ml de agua desionizada. Se los dejó reposar toda una noche. Al día siguiente, el contenido de los crisoles fue vaciado en fiolas de 50 ml. Se usó agua desionizada para lavar el interior de los crisoles, agregando esa misma solución a las fiolas hasta enrasar a 50 ml. Todo este contenido fue transferido a vasos de policarbonato previamente rotulados según el código. Se colocó una tapa a cada vaso y se almacenó las soluciones por un lapso de siete días. Tiempo en el que se completó la preparación de las 90 muestras hasta este punto.

Seguidamente se procedió a hacer una dilución de las muestras. Se extrajo 3 ml de cada vasito, se llevó a fiolas de 25 ml y se enrasó con agua desionizada. El contenido fue transferido a otro vasito de policarbonato rotulado con el código respectivo. A partir de esta dilución, se extrajo 5 ml que fueron pasados a un tercer vasito de policarbonato también rotulado que es donde ocurrirán las reacciones químicas que permitirán tomar las mediciones.

Se prepararon las siguientes soluciones para este análisis y para el de silicio disponible en suelos: tres litros de solución de ácido acético al 20 por ciento (v/v), un litro de solución de ácido sulfúrico 0.5 M (28 ml de H₂SO₄ concentrado por litro), dos litros de solución de molibdato de amonio (54 g/l) a pH 7 (se usó NaOH cristalizado para subir el pH hasta 7), un litro de solución de ácido tartárico al 20 por ciento (p/v) y 250 ml de solución reductora formada por la mezcla de Solución A (2 g de Na₂SO₃ y 0.4 g de 1-amino-2-naftol-4-ácido sulfónico aforados a 25 ml con agua desionizada) y solución B (25 g de NaHSO₃ disueltos en 200 ml de agua desionizada). Las sales químicamente puras fueron pesadas en balanza analítica considerando una exactitud de una milésima de gramo. Los líquidos fueron medidos usando pipetas o fiolas. Las mezclas se realizaron en *beakers* usando un agitador magnético para la homogenización de las mezclas y trasvasados a fiolas correspondientes al volumen final requerido. Las soluciones fueron transferidas a contenedores rotulados de polietileno de alta densidad y almacenadas en el refrigerador a 7 °C. Se procedió a preparar 6 soluciones estándar para realizar la curva de calibración. A partir del estándar original de 1005 ppm de silicio se calculó el volumen necesario a tomar para alcanzar concentraciones de 0, 2, 4, 8, 16 y 32 ppm en fiolas de 100 ml. Se empleó la siguiente fórmula para el cálculo:

$$\text{Concentración 1} \times \text{Volumen 1} = \text{Concentración 2} \times \text{Volumen 2}$$

$$1005 \text{ ppm} \times \text{Volumen1 } \mu\text{l} = 2 \text{ ppm} \times 100000 \mu\text{l}$$

Este cálculo se repitió para cada una de las concentraciones arriba mencionadas obteniéndose las siguientes alícuotas a tomar expresadas en la Tabla 9.

Tabla 9: Volúmenes de alícuotas tomadas de la solución madre de 1005 ppm para preparación de cada uno de los estándares

ESTÁNDAR (ppm)	VOLUMEN (μl)
0	0
2	199
4	398
8	796
16	1592
32	3184

Fuente: Elaboración propia

Se usó una micropipeta automática de 100-1000 μl previamente calibrada. Se tomó las alícuotas lo más próximas al cálculo teórico y fueron depositadas en fiolas de 100 ml que

fueron posteriormente enrasadas cuidadosamente con agua desionizada. El contenido de las fioas fue agitado por cinco minutos de forma manual para extraer una alícuota de 5 ml que se usará para realizar las reacciones. Estas fueron depositadas en vasos de policarbonato rotuladas según el estándar correspondiente. Se dividió las 90 muestras en dos bloques de 45 muestras cada uno a ser trabajadas en dos días, debido a la disponibilidad de los equipos. A cada uno de los vasitos conteniendo los 5 ml de muestra, incluyendo los estándares, se les fue agregados los siguientes reactivos preparados en el paso anterior: 29 ml de la solución de ácido acético, 10 ml de solución de molibdato de amonio, 5 ml de solución de ácido tartárico, y por último 1 ml de solución reductora. Aproximadamente tomó una hora en agregar el ácido acético al bloque de 45 vasitos, 45 min en agregar el molibdato de amonio, 30 min en agregar el ácido tartárico y 15 min en agregar la solución reductora. Ese fue el tiempo de espera entre la adición de cada reactivo. Se usaron pipetas de 25 ml, 5 ml y la micropipeta automática programada en un volumen de 1 ml para la adición de estos reactivos. A continuación, se leyeron las muestras en un espectrofotómetro UV a 650 nm. Se usó agua destilada como “cero”. Se registró la absorbancia de cada una de las muestras. A partir de los datos de absorbancia obtenidos de los estándares, se construyeron las siguientes curvas de calibración (Figura 7 y Figura 8) una por cada día, que correlacionaban estos datos con la concentración teórica corregida por la adición de reactivos.

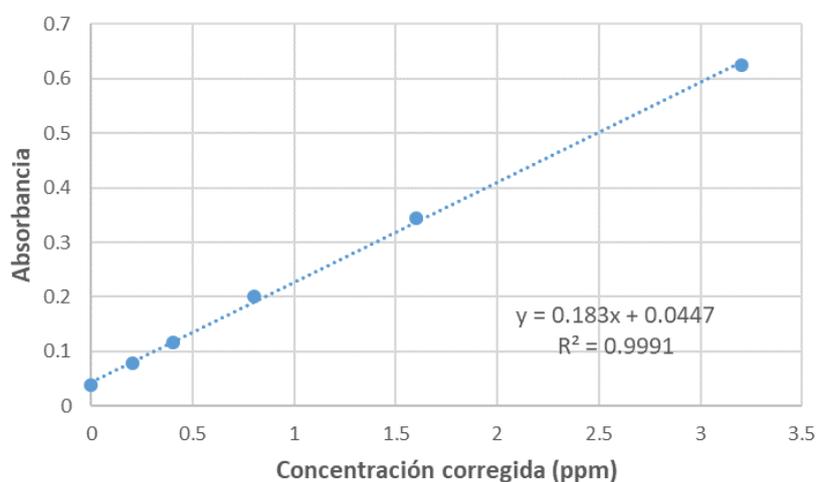


Figura 7: Curva de calibración del contenido de silicio en órganos aéreos mostrando ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación en base a lo establecido por Körndorfer *et al.* (2004)
Fuente: Elaboración propia

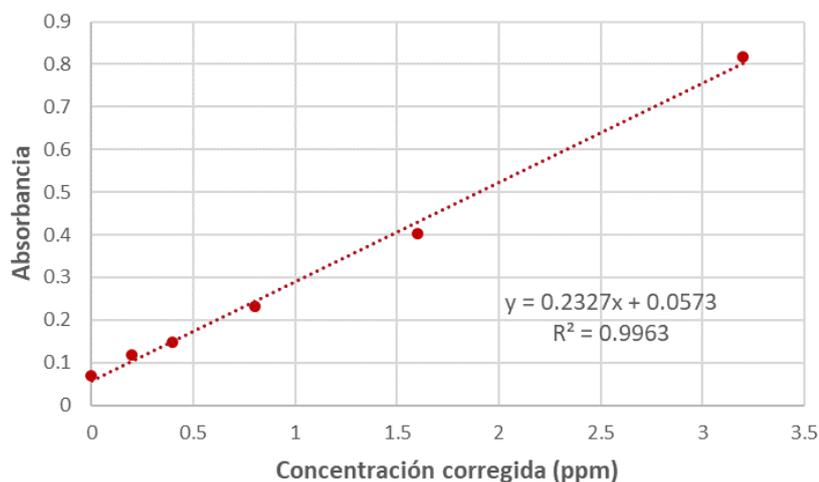


Figura 8: Curva de calibración del contenido de silicio en raíz, mostrando ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación en base a lo establecido por Körndorfer *et al.* (2004)
Fuente: Elaboración propia

Se obtuvo una ecuación de regresión lineal por cada gráfico, para estas dos variables y un coeficiente de determinación (R^2) que debía ser mayor a 0.99. Luego de haber corroborado el cumplimiento de estas condiciones, se procedió a ordenar los datos de absorbancia en una hoja de cálculo de Excel y a aplicar estas ecuaciones para obtener los datos de concentración de silicio en la solución analizada a partir de la absorbancia medida. Estas concentraciones recientemente calculadas corresponden al volumen de 50 ml obtenidos por la adición de los 5 ml de la muestra a analizar, 29 ml de ácido acético, 10 ml de molibdato de amonio, 5 ml de ácido tartárico y 1 ml de solución reductora. Por lo tanto, con el dato de la concentración en ppm y el volumen de 50 ml, se puede calcular cuántos miligramos de silicio estuvieron presentes en esa mezcla.

Ahora, esa cantidad de silicio tuvo que provenir de 5 ml de la disolución de 25 ml. Por lo tanto, se pudo calcular el total de silicio que hubo en ese volumen. Sin embargo, aquella cantidad tuvo su origen en los 3 ml que se colectaron de la muestra inicial de 50 ml. Y, por último, lo que había disuelto en este último volumen provino de las muestras de 0.1 gramos de tejido vegetal seco y molido. A partir de este último cálculo, se puede determinar la concentración en ppm (p/p) de silicio en tejido vegetal.

c. **Análisis de silicio disponible en suelos:**

El análisis de silicio disponible en suelos se realizó tomando como referencia el método de extracción con CaCl_2 0.01 M detallado por Pereira *et al.* (2007). Se emplearon las muestras

de suelo obtenidas previas a la cosecha para este análisis. Las muestras fueron molidas y pasadas por un tamiz de 1 mm. Seguidamente, se pesó 2 g de material de suelo usando una balanza analítica con precisión de 0.1 mg. Se logró precisión de hasta una milésima de gramo. Los pesos exactos de cada muestra fueron registrados. Las muestras fueron colocadas en contenedores rotulados de polietileno de alta densidad con capacidad para 250 ml.

Se procedió a preparar una solución de CaCl_2 0.01 M. Para esto, se pesó 2.94 de CaCl_2 químicamente puro en la balanza analítica, se disolvió en un *beaker* de vidrio para posteriormente ser transferido a una fiola de dos litros. Se enrasó usando agua desionizada.

A cada uno de los contenedores de polietileno se les agregó 20 ml de esa solución recién preparada, se los selló con su tapa y se los colocó en un agitador horizontal a 20 rpm por 17 horas. Culinado ese tiempo se incrementó la velocidad de agitación a 80 rpm por 5 horas más. Al cabo de esto, las muestras fueron extraídas del agitador y se las dejó reposar sobre una mesa por una hora para que el material de suelo sedimente.

A continuación, se tomó 6 ml del sobrenadante y se los hizo pasar por un papel filtro de tránsito lento. Se procuró no tomar partículas de suelo. La solución fue colectada en vasitos de policarbonato rotulados con su respectivo código. Se tomó 2 ml de la solución filtrada y se los transfirió a otro vasito de policarbonato rotulado con el mismo código. Se cubrió las muestras con una tapa y se los dejó reposar una noche.

Al día siguiente se realizó la preparación de los estándares. Estos fueron preparados siguiendo los mismos lineamientos detallados en la sección de análisis de silicio en tejido vegetal, con la única diferencia que las fiolas fueron enrasadas con la solución de CaCl_2 0.01 M y no con agua desionizada. Se tomó 2 ml de cada estándar y se los pasó a vasitos de policarbonato rotulados con el nombre de cada estándar.

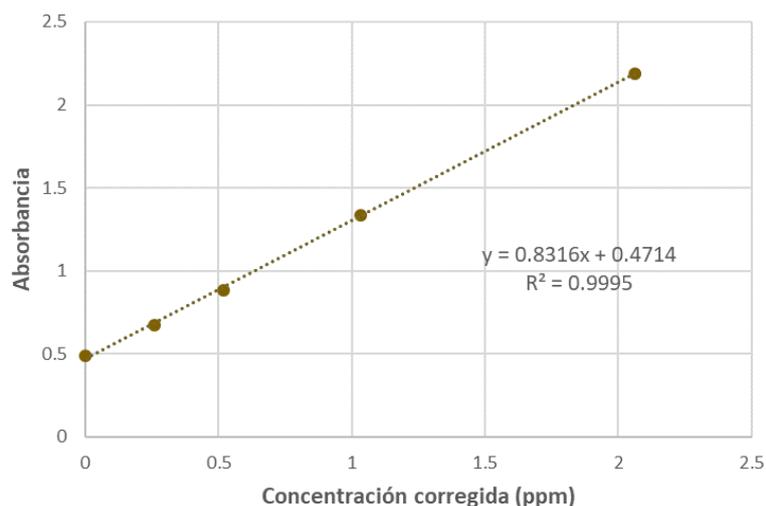


Figura 9: Curva de calibración del contenido de silicio disponible en suelo (SiA), mostrando ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación en base a lo establecido por Körndorfer *et al.* (2004).

Fuente: Elaboración propia

Seguidamente se procedió a agregar los reactivos. A cada uno de los vasitos conteniendo los 2 ml de muestra, incluyendo los estándares, se les fue agregados las siguientes soluciones preparadas durante el análisis de tejido vegetal: 5 ml de solución de ácido sulfúrico, 5 ml de solución de molibdato de amonio, 3 ml de solución de ácido tartárico, y por último 0.5 ml de solución reductora. Aproximadamente tomó 45 min en agregar el ácido sulfúrico a las 45 muestras, 45 min en agregar el molibdato de amonio, 30 min en agregar el ácido tartárico y 15 min en agregar la solución reductora. Ese fue el tiempo de espera entre la adición de cada reactivo. Se usaron pipetas de 20 ml, 5 ml y la micropipeta automática programada en 0.5 ml para la adición de estos reactivos. A continuación, se leyeron las muestras en un espectrofotómetro UV a 820 nm. Se usó la solución de CaCl_2 0.01 M como “cero”. Se registró la absorbancia de cada una de las muestras. A partir de los datos de absorbancia de los estándares, se elaboró la curva de calibración mostrada en la Figura 9 que correlacionaba estos datos con sus concentraciones teóricas. Se descartó el estándar 32 ppm, puesto que sobrepasaba el rango máximo de lectura de absorbancia del espectrofotómetro. Por lo que, para la elaboración de la curva solo se consideraron los estándares 0, 2, 4, 8 y 16 ppm. Las concentraciones fueron corregidas según las diluciones por los reactivos.

A partir de estas dos variables se elaboró una ecuación de regresión lineal y se verificó que el coeficiente de determinación (R^2) sea mayor a 0.99. Una vez corroborada esta condición se procedió a ordenar los datos en una hoja de cálculo. Usando la ecuación hallada en el paso

anterior se obtuvo los datos de las concentraciones de silicio en las mezclas reactantes a partir de las absorbancias medidas.

Estas concentraciones corresponden al volumen de 15.5 ml obtenidos por la adición de los 2 ml de la muestra a analizar, 5 ml de ácido sulfúrico, 5 ml de molibdato de amonio, 3 ml de ácido tartárico y 0.5 ml de solución reductora. Por lo tanto, con el dato de la concentración en ppm y el volumen de 15.5 ml, se puede calcular cuántos miligramos de silicio estuvieron presentes en esa mezcla.

Ahora, esa cantidad de silicio tuvo que provenir de 2 ml de la disolución de 20 ml de CaCl_2 0.01 M adicionada inicialmente. Por lo tanto, se pudo calcular el total de silicio que hubo en ese volumen. Para finalizar, la cantidad de Silicio en esos 20 ml tuvieron su origen en las muestras de 2 gramos de material de suelo seco tamizado. A partir de este último cálculo, se puede determinar la concentración en ppm (p/p) de silicio disponible en suelo.

d. Análisis de nitrógeno en tejido vegetal:

La determinación de nitrógeno en tejido vegetal se realizó en base al método Kjeldahl modificado. Para la realización de este análisis se usó el material vegetal seco y molido tanto de la raíz como de la parte aérea. Se pesó 0.1 g por cada muestra en una balanza analítica con una precisión de 1 milésima de gramos. Esta cantidad fue transferida a balones de vidrio borosilicatado.

Se preparó el catalizador a base de sulfato de cobre pentahidratado y sulfato de potasio químicamente puro a una relación de 1:9. Las cantidades fueron preparadas en tandas de 20 g. Fueron mezcladas y molidas en un mortero de cerámica. A cada muestra se le asignó 1 g de catalizador, que por lo tanto estuvo conformado por 0.1 g de sulfato de cobre pentahidratado y 0.9 gramos de sulfato de potasio.

Seguidamente a cada muestra se le agregó 3 ml de ácido sulfúrico químicamente puro, se les dejó digerir en frío por una hora y seguidamente se los llevó a una hornilla eléctrica para continuar con la digestión por aproximadamente 3 horas cada muestra. No se tenía registro de la temperatura de trabajo, pero se estima que se mantuvo entre 320 - 370 °C. El indicador usado para saber que la muestra había terminado de digerir era el cambio de color. Pasaba de un color negro oscuro cuando entraba en contacto con el ácido sulfúrico por primera vez, a un color blanco lechoso cuando la digestión terminaba.

Las muestras se fueron almacenando por aproximadamente dos días, hasta culminar el proceso de digestión de todas las muestras. En ese tiempo se preparó la solución de ácido bórico a una concentración de 40 g/L más 3 ml de rojo-azul de metilo. Después se prosiguió con el proceso de destilación.

Para esto se empleó un equipo de destilación Kjeldahl configurado para trabajar dos muestras a la vez. Este consistía en un balón de vidrio borosilicatado con capacidad para seis litros de agua desionizada. Una resistencia eléctrica sumergida en el agua conectado a un transformador de 12 v para calentar el agua. Mangueras para la transmisión de vapores, 2 tubos de vidrio con tapón de caucho para acoplar los balones y una ranura modificada para permitir la salida de los gases de amoníaco. Incluía también dos reservorios para la colocación de NaOH 1 N con fenolftaleina. Por último, se contó con dos destiladores tipo serpentín refrigerados mediante una conexión de agua de caño.

En primer lugar, se dejaba calentar el agua hasta que empieza la ebullición. Mientras tanto, se medía 20 ml de la solución de ácido bórico y se colocaron en matraces de 100 ml. Estos eran colocados en las mangueras de salida de los destiladores, asegurándose que tales mangueras queden sumergidas en la solución de ácido bórico. Cuando se observaba la salida de vapor desde las puntas de los tubos de vidrio, se colocaban los dos balones, a los que previamente se les había agregado una pequeña cantidad de agua desionizada. Los balones eran manipulados con cuidado ya que se calentaban rápidamente por efecto del vapor de agua y se sellaron usando los taponos de caucho.

Una vez colocados en esa posición, se iba liberando lentamente y con mucho cuidado el hidróxido de sodio, el cual reaccionaba violentamente con la mezcla de ácido sulfúrico al interior del balón. La adición de este reactivo se detenía cuando se alcanzaba un color marrón uniforme. Si la mezcla regresaba a ser transparente, se debía agregar más NaOH. Entretanto se debía revisar que el ácido bórico en los matraces inicialmente de color morado, cambie de color a verde. Al observarse que el color verde era uniforme en todo el matraz, se contabilizaban 3 minutos. Cumplido este tiempo, los balones eran desacoplados del sistema y por último se extraían los matraces. Se realizó el mismo procedimiento con dos balones que solo contenían catalizador, ya que estos contienen trazas de nitrógeno para ser usados como “blancos”.

Seguidamente, los matraces eran llevados a titular usando una solución de ácido sulfúrico 0.01 N y se registró el gasto de ácido por cada muestra. Se registró el gasto de los “blancos” y se descontó de los gastos de cada muestra. Por último, los valores hallados fueron multiplicados por el factor 0.28 para obtener los datos expresados en porcentaje de nitrógeno.

e. Análisis de conductividad eléctrica y pH del suelo

Los análisis de conductividad eléctrica y pH del suelo se realizaron en base a la metodología de dilución 1:1 (p/p).

Todas las muestras de suelo fueron sacadas del almacén, mullidas en un mortero de cerámica y pasadas por un tamiz de 1 mm. Seguidamente, se pesaron 15 g de cada muestra en una balanza digital con precisión de 1 centésima de gramo. Las muestras fueron transferidas a vasos de agitación en tiras de tecnopor que habían sido previamente rotuladas con los códigos respectivos. Se agregó 15 ml de agua desionizada (correspondiente a 15 g, asumiendo una densidad de 1 g/cm³). Las muestras se llevaron a un agitador eléctrico con capacidad para 30 muestras a la vez. Cada muestra se agitó por 15 minutos y se dejó reposar 1 hora aproximadamente. Seguidamente, se realizaron las mediciones de conductividad eléctrica y pH usando un equipo marca Consort modelo C860 previamente calibrado con estándares de 4 y 7 para pH y 0.01 M KCl para conductividad eléctrica. Para cada medición, el electrodo fue lavado con agua desionizada y luego secado con papel toalla.

La matriz general de datos recolectados se adjunta en el ANEXO 11.

3.4.5. Análisis estadístico

Los datos colectados fueron analizados usando los softwares libres, Yupana (Lozano-Isla *et al.* 2018) y R (RcoreTeam 2014). Las variables cuantitativas fueron sometidas, en primer lugar, a la prueba de Shapiro-Wilk para comprobar el supuesto de distribución normal de los residuos. Nivel de significancia 5 por ciento. Las hipótesis del modelo son las siguientes:

Ho: Los residuos del modelo tienen distribución normal.

Ha: Los residuos del modelo no tienen distribución normal

Se acepta la hipótesis nula cuando el p-valor es mayor a 5 por ciento.

También se realizó la prueba Breusch-Pagan para corroborar el supuesto de homogeneidad de varianzas en los residuos. Nivel de significancia 5 por ciento. Las hipótesis del modelo son las siguientes:

Ho: Los residuos de los tratamientos tienen homogeneidad de varianzas.

Ha: Los residuos de los tratamientos no tienen homogeneidad de varianzas.

Se acepta la hipótesis nula cuando el p-valor es mayor a 5 por ciento.

En caso de incumplimiento de alguno de los supuestos se procedió a realizar transformaciones matemáticas específicas para cada variable. Éstas serán indicadas de forma individual en las discusiones. Como último recurso se usó la eliminación de datos. La cantidad de datos eliminados se indicaron junto con los cuadros ANVA. Después de haber encajado los datos en los supuestos se realizaron los Análisis de Varianza. En caso de encontrarse diferencias significativas solo a nivel de los factores, se procedió a hacer un análisis de efectos principales. Sin embargo, si se encontró diferencias significativas a nivel de la interacción, se procedió a hacer un análisis de los efectos simples.

Posteriormente se realizó una prueba de Tukey, con un nivel de significancia de 5 por ciento, en el que se contrastaron todos los tratamientos. Sin embargo, para el análisis, solo se consideraron los tratamientos que resultaron significativos en el análisis de efectos simples. Por último, se elaboraron gráficos de barras indicando los niveles de significancia. Los comandos empleados en R se muestran en el ANEXO 12.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Efecto de las enmiendas silicatadas en las propiedades químicas del material de suelo

Las modificaciones en el factor suelo representan el eje central de esta investigación. La adición de las enmiendas silicatadas en las tres concentraciones establecidas alteraron las condiciones físico-químicas de suelo de una forma muy marcada. El objetivo fue elevar las concentraciones de silicio disponible hasta 100, 200 y 400 ppm, para observar las reacciones en las plantas de arroz y corroborar si existía o no algún impacto directo o indirecto en la biomasa de este cereal al ser sometidas a altas dosis de este elemento. Sin embargo, es necesario precisar que las cantidades fueron muy altas para ser consideradas como comercialmente aplicables. Por ejemplo, si trasladamos la dosis de escoria - 100 ppm SiA a un campo de 1 ha, de textura franco ($D_a=1.35 \text{ g/cm}^3$), labrado a una profundidad de 10 cm, se necesitaría 21.6 t de este producto para lograr las mismas condiciones del ensayo en maceta., Del mismo modo, se necesitarían 43.2 y 86.4 t/ha para lograr concentraciones de 200 y 400 ppm de SiA respectivamente. Para el caso de la ceniza de cascarilla de arroz se requeriría, 23.2 t/ha (100 ppm SiA), 46.4 t/ha (200 ppm SiA) y 92.8 t/ha (400 ppm SiA). Por último, se necesitarían las siguientes cantidades de silicato de potasio: 3.73 t/ha (100 ppm SiA), 7.46 t/ha (200 ppm SiA) y 14.92 t/ha (400 ppm SiA). Como puede notarse, sería demasiado costoso y logísticamente desafiante incorporar estas dosis en campo.

Solano (2018) realizó un experimento en campo usando una dispersión de ceniza de arroz a razón de 360, 720 y 1080 kg/ha. También empleó escoria a razón de 740, 1480 y 2220 kg/ha. Ambos fueron aplicados de forma superficial sobre el campo previo al trasplante del arroz. Sus resultados indican un incremento de casi dos toneladas respecto al testigo con la aplicación de la dispersión de ceniza a 720 kg/ha, mientras que la escoria a razón de 2220 presentó un incremento de 1.5 t. A pesar de esto, al analizar muestras de silicio disponible

en suelos y silicio en tejido vegetal, tal incremento en el rendimiento no guarda correlación con los datos medidos en suelo y planta. Esta experiencia preliminar elevó aún más las dudas del efecto del silicio para estas condiciones, ya que estos incrementos registrados pudieron haberse ocasionado por otros componentes de los productos. Es por eso que se prefirió usar macetas para este ensayo. Además del hecho de tener más control sobre el ingreso y salidas de nutrientes. Por lo tanto, cada uno de los tratamientos empezó con una concentración y una cantidad de silicio establecida tal y como lo muestra la Figura 10.

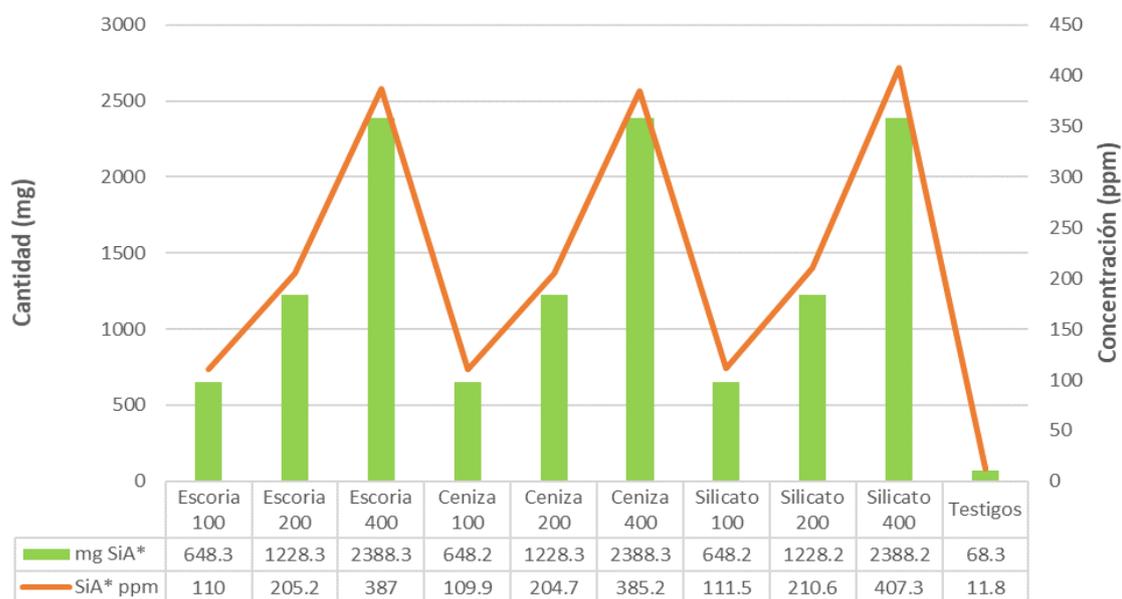


Figura 10: Cantidades y concentraciones iniciales de silicio disponible (SiA) de cada uno de los tratamientos y testigos

Fuente: Elaboración propia

Puede observarse que cada una de las tres enmiendas, para las tres concentraciones asignadas (100, 200 y 400 ppm) recibieron igual cantidad de silicio disponible (SiA). También es posible observar que las concentraciones reales en suelo variaron ligeramente por efecto de la naturaleza de la fuente. El silicato de potasio era prácticamente seis veces más concentrado que la escoria y la ceniza, por lo tanto, para alcanzar las mismas concentraciones debía agregarse una mayor cantidad de producto. Sin embargo, por el efecto mismo de los otros componentes de la escoria y la ceniza, la concentración final real de los tratamientos de escoria y ceniza estuvieron ligeramente por debajo que los de silicato de potasio. El efecto más marcado ocurrió con las dosis de 400 ppm: para los tratamientos con escoria se logró 387 ppm, para los de ceniza 385.2 ppm y para los de silicato de potasio 407.3 ppm. Esto puede observar con mayor detalle en la Tabla 10.

Tabla 10: Concentración (ppm) de cada elemento presente en las enmiendas y en la mezcla final del sustrato usado para cada tratamiento

ELEMENTO (ppm)	ENMIENDA ($\times 10^2$)			MEZCLA MATERIAL DE SUELO + ENMIENDAS + FERTILIZANTES+APORTE AGUA									
	Escoria básica	Ceniza cascarilla arroz	Silicato potasio	Escoria 100	Escoria 200	Escoria 400	Ceniza 100	Ceniza 200	Ceniza 400	Silicato 100	Silicato 200	Silicato 400	Testigos**
P ₂ O ₅	11	20	1	64	81	111	81	113	174	48	48	48	48
K ₂ O	323	229	1700	613	1104	2043	492	865	1576	575	1041	1966	106
CaO	3402	456	2.24	6303	11482	21371	1716	2447	3838	957	955	951	959
MgO	799	98	0.42	1369	2587	4913	276	435	737	112	112	112	112
S	107	0	0	600	757	1056	431	424	410	437	436	433	438
Fe	500	24.5	0.31	788	1551	3008	42	82	158	0	0	0	0
Cu	2.24	0.9	0.02	4	7	13	2	3	6	0	0	0	0
Zn	4.01	2.9	0.03	6	12	24	5	10	19	0	0	0	0
Mn	139.5	12	0.03	220	433	839	20	40	77	0	0	0	0
Pb	15.51	0.02	0.26	24	48	93	0	0	0	0	0	0	0
Cd	0.1	0.08	0.01	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
Cr	8.62	0.03	0.18	14	27	52	0	0	0	0	0	0	0
SiA*	62.48	58.02	361.3	110	205	387	110	205	385	111	211	407	12

*Reportado como silicio disponible

** Testigos solo se les aplicó la fertilización convencional, es por eso que la mayoría de registros aparecen con valor cero.

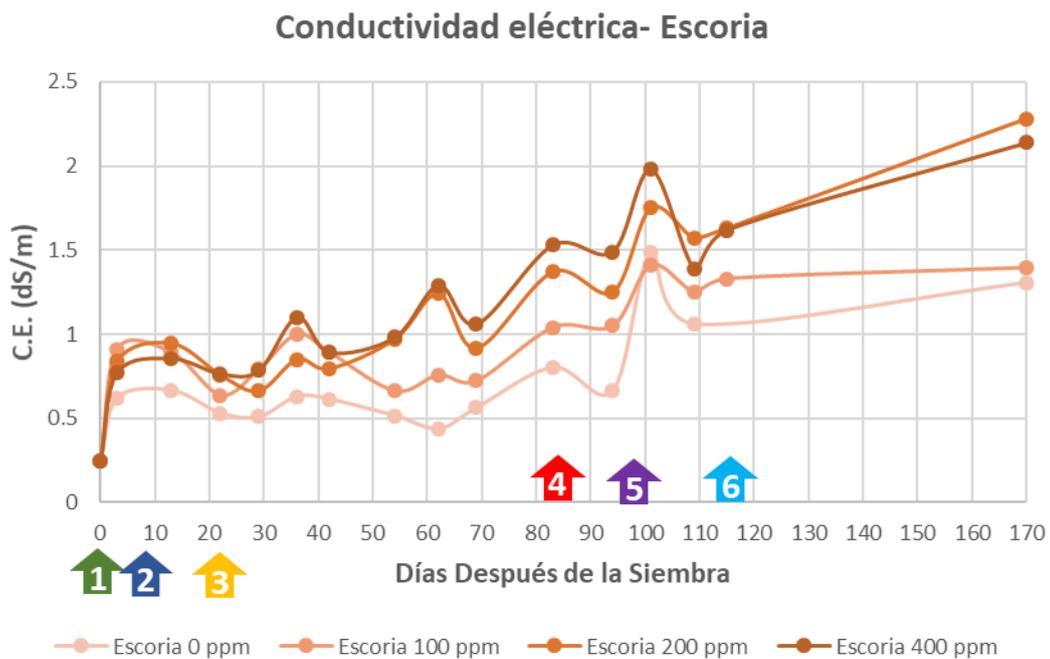
Fuente: Elaboración propia con datos del análisis realizado por el Laboratorio de Suelos, Plantas, Agua y Fertilizantes (2018). Anexos 4,5 y 6

En ella se muestra las *concentraciones* de cada elemento en las enmiendas, así como las concentraciones en el suelo, originadas luego de la incorporación de cada uno de los tratamientos. También se considera el aporte total de los fertilizantes y del agua de riego. Por lo tanto, con esto se puede visualizar las condiciones químicas en las que se desarrollaron las plantas para cada tratamiento.

Los efectos observados de manera inmediata fueron en la C.E. y el pH. Los siguientes gráficos muestran estos datos colectados a lo largo de 15 colectas. Cada colecta está graficada en columnas de cuatro puntos. Cada concentración tiene un color característico, el cual es más intenso para las concentraciones mayores. Cada cuadro tiene un tratamiento testigo representado por la línea con el color más claro de cada grupo.

4.1.1. Fluctuación en la conductividad eléctrica

Las Figura 11, Figura 12 y Figura 13 muestran que, al inicio de la campaña, la conductividad eléctrica se encontraba en 0.25 dS/m para todos los tratamientos. Este es el dato nativo del suelo. Inmediatamente luego de la aplicación, observamos que los tratamientos de escoria y ceniza, alcanzaron un máximo de 1 dS/m y los tratamientos con silicato de potasio 1.5 dS/m. Mientras que todos los testigos se ubicaron ligeramente por encima de 0.5 dS/m. Esta variación de los testigos pudo haberse debido a la incorporación del fosfato diamónico, además de algunas otras sales que pudieron haberse sumado durante el proceso de manipulación del material. El silicato de potasio, al ser un fertilizante concentrado, era de esperarse que eleve marcadamente el contenido de sales. En la segunda colecta, los datos permanecieron altos para las tres enmiendas, muy cercanos a los de la primera colecta, sin embargo, para la tercera colecta bajaron. Esto debido a que se cambió la metodología de muestreo. A partir de ese momento se usó un tubo muestreador, que ayudó a extraer una muestra cilíndrica hasta una profundidad de aproximadamente 10 cm. Antes de eso, se tomaba una cucharada de muestra de la superficie y como bien se sabe, el efecto de la evaporación, acumula las sales en la superficie.



FENOLOGÍA: 1- Germinación 2- Plántula 3- Macolllos 4-Elongación de tallos 5- Estadío de bota 6- Espigado

Figura 11: Fluctuación de la conductividad eléctrica (dS/m) para los tratamientos con escoria durante la fase de campo

Fuente: Elaboración propia

Conductividad eléctrica - Silicato de potasio

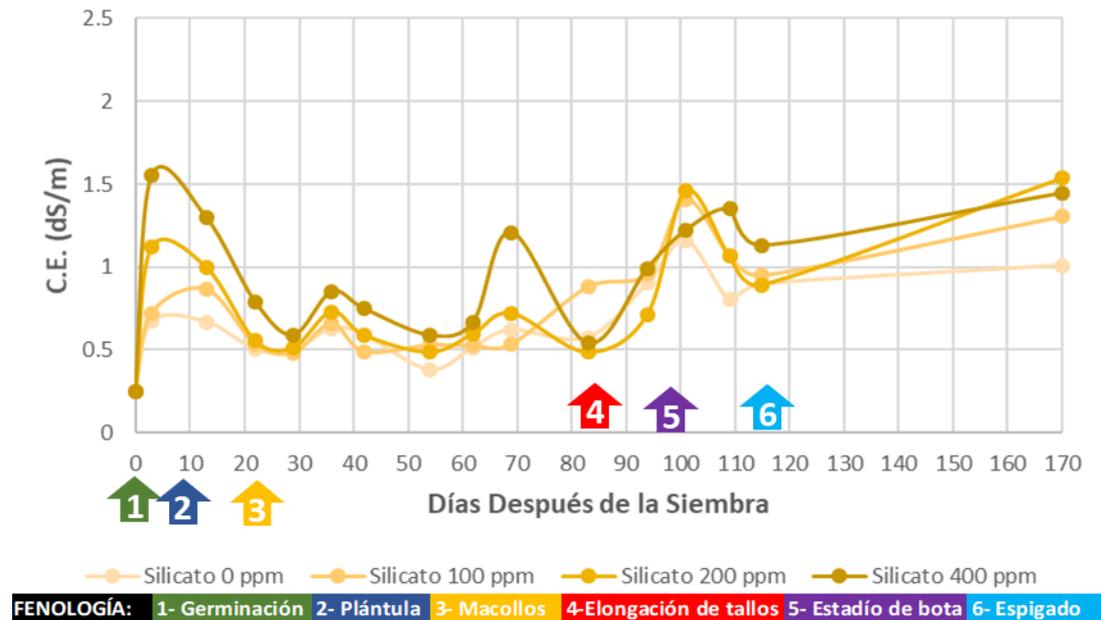


Figura 13: Fluctuación de la conductividad eléctrica (dS/m) para los tratamientos con silicato de potasio durante la fase de campo
Fuente: Elaboración propia

Conductividad eléctrica - Ceniza

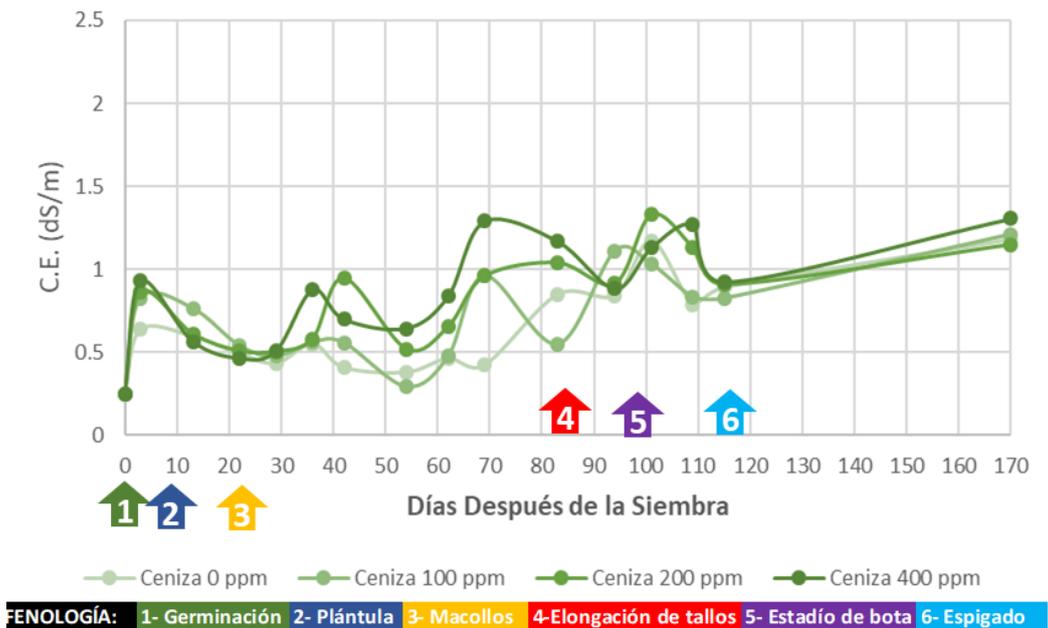


Figura 12: Fluctuación de la conductividad eléctrica (dS/m) para los tratamientos con ceniza durante la fase de campo
Fuente: Elaboración propia

Al final de la campaña se realizó una colecta final de suelos para evaluar cómo cambió el contenido de sales con la aplicación de las enmiendas. Con la finalidad de lograr el ajuste a

los supuestos estadísticos mencionados en la metodología, el análisis de esta variable empleó la transformación $\sqrt{C.E. ds/m + 0.301}$. Los resultados de las pruebas de Shapiro-Wilk y Breusch-Pagan, así como sus comprobaciones gráficas pueden encontrarse en el ANEXO 13. El análisis de varianza ubicado en el ANEXO 14 indica diferencias significativas a nivel de la interacción. Este resultado se logra apreciar en la Figura 14 mostrada a continuación.

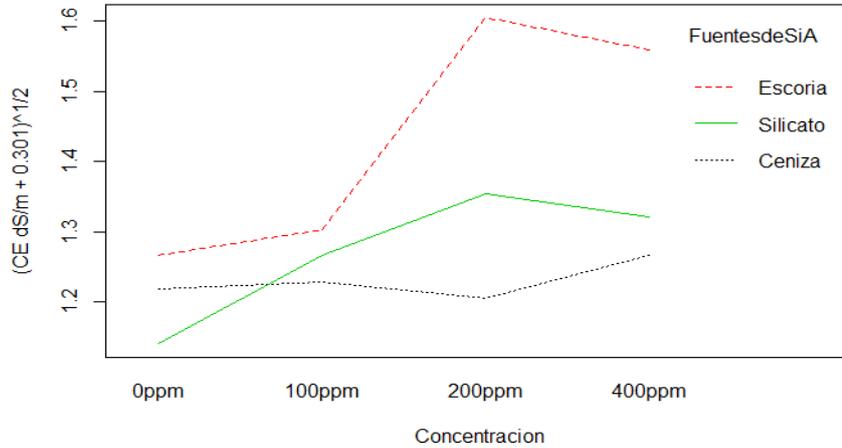


Figura 14: Interacción concentración - fuentes de silicio para los datos transformados de conductividad eléctrica usando R (RcoreTeam 2014)

Fuente: Elaboración propia

Es posible ver que, dependiendo de la enmienda, el efecto ocasionado en el incremento del parámetro medido fue diferente. Para la escoria se incrementó marcadamente, seguido por los tratamientos con silicato. Se logra identificar múltiples intersecciones. Esto se verá más claramente con el análisis de efectos simples. Este se encuentra en el ANEXO 15. Seguidamente se realizó las pruebas de Tukey para comparar los tratamientos destacados en el análisis de efectos simples. Los resultados se visualizan en la Tabla 11.

Tabla 11: Resumen estadístico de la variable conductividad eléctrica (transformación $\sqrt{C.E. ds/m + 0.301}$) al final de la campaña con sus niveles de significancia calculados en base a la prueba de Tukey con un $\alpha = 0.05$

Fuentes de SiA	Concentración (ppm)	Media	Mínimo	Máximo	Repeticiones	Desviación estándar ($\times 10^{-2}$)	Error estándar ($\times 10^{-2}$)	Sig.
Escoria	200	1.60	1.51	1.71	3	10.15	5.86	a
Escoria	400	1.56	1.44	1.70	5	11.18	5	a
Silicato	200	1.35	1.32	1.42	4	4.42	2.21	b
Silicato	400	1.32	1.28	1.36	2	6.16	4.35	bc
Escoria	100	1.30	1.28	1.32	2	2.99	2.11	bc
Ceniza	400	1.27	1.18	1.31	5	5.43	2.43	bc
Silicato	100	1.27	1.24	1.29	4	2.05	1.03	bc
Escoria	0	1.27	1.18	1.34	5	6.6	2.95	bc
Ceniza	100	1.23	1.20	1.27	4	3.2	1.6	bc
Ceniza	0	1.22	1.15	1.28	5	5.8	2.59	bc
Ceniza	200	1.21	1.15	1.26	2	7.92	5.6	bc
Silicato	0ppm	1.14	1.00	1.29	4	0.1164	0.0582	c

Fuente: Elaboración propia

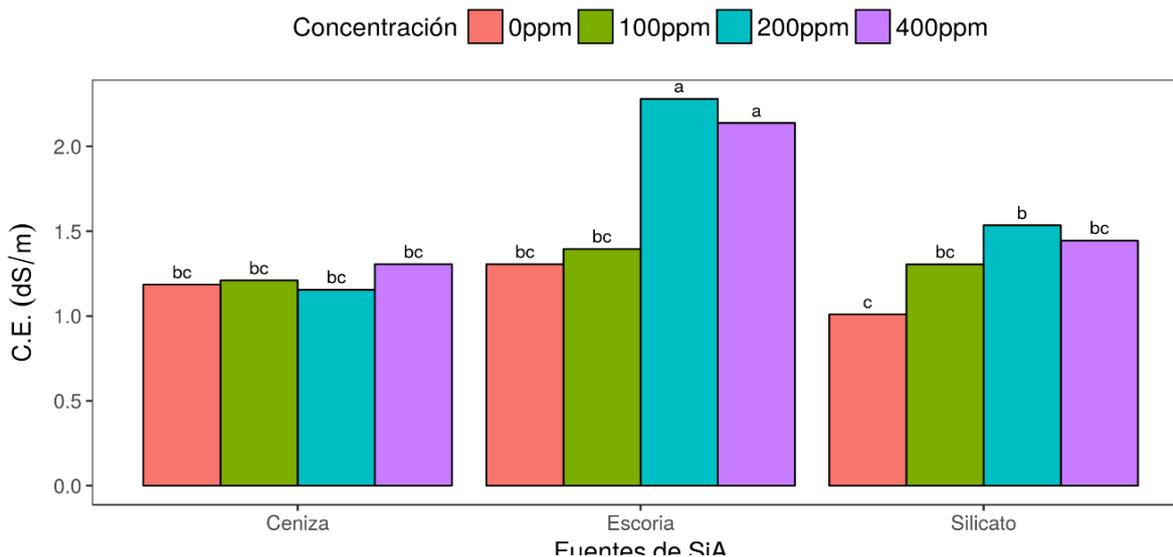


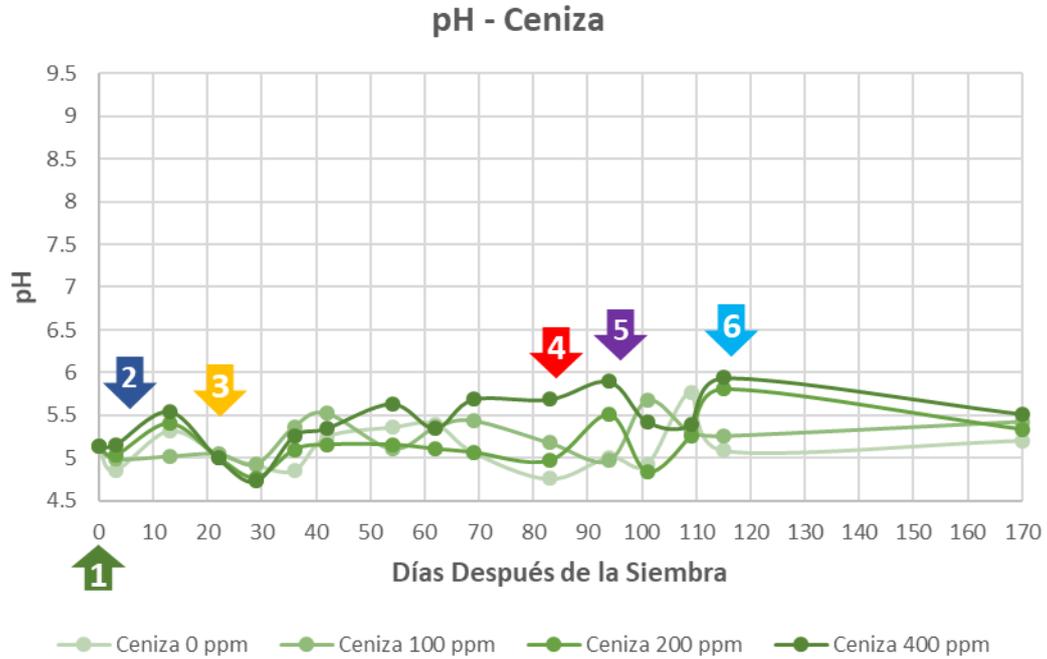
Figura 15: Conductividad eléctrica al final de la campaña mostrando los datos originalmente medidos y los niveles de significancia calculados con la transformación $\sqrt{C.E. ds/m + 0.301}$. Generado usando el software Yupana (Lozano *et al.* 2018).

Fuente: Elaboración propia

La Figura 15 muestra los datos expresados como originalmente se tomaron, pero los valores de significancia fueron calculados en base a las transformaciones. Se logra visualizar claramente que, dentro de los tratamientos con escoria, los de 200 y 400 ppm incrementaron

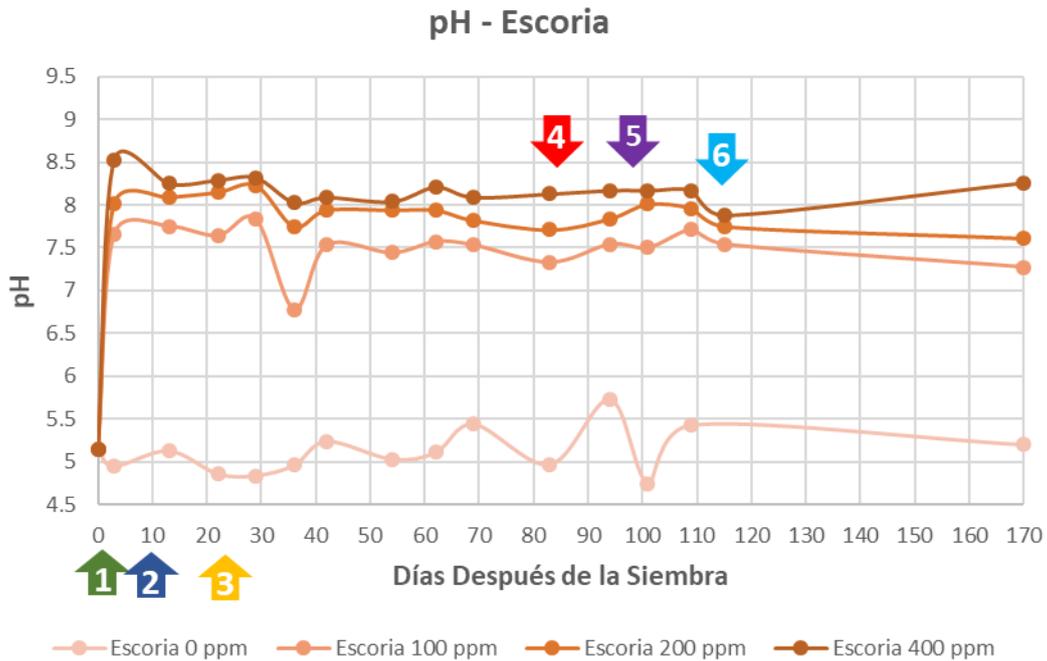
más la salinidad de sus suelos incluso mucho más que de los de silicato de potasio a la misma dosis. Esto se debe principalmente a que las plantas se quedaron pequeñas en comparación del resto de tratamientos. Por lo tanto, la absorción de nutrientes no fue tan alta ocasionando la acumulación de sales en el suelo. Aparte de eso, estos fueron los únicos tratamientos que no presentaron fugas de agua, ya que el desarrollo radicular también se truncó. El resto de tratamientos permaneció estadísticamente similar a los testigos. Por lo tanto, se concluye que los tratamientos con ceniza a cualquier dosis, no va a elevar la C.E. de una forma muy marcada, lo mismo que para los tratamientos con silicato. Aunque se ve que hay una diferencia entre el testigo y el tratamiento con 200 ppm, este resulta similar a los otros dos testigos por lo que eso puede atribuirse a un error en la medición. Es más, si trasladamos estos hallazgos a condiciones de campo, lo más probable es que la adición de estas enmiendas, incluso a dosis tan elevadas no eleven la salinidad al punto de ocasionar problemas osmóticos en el arroz cuya tolerancia máxima es de 4.5 dS/m en extracto de saturación (Yoshida, 1981) ya que en ese caso, los sistemas son abiertos y la salida de sales es proporcional al ingreso y si el agua es de buena calidad, este exceso fácilmente será eliminado del campo. Por lo tanto, el grado de salinidad depende principalmente de la calidad del agua de riego.

4.1.2. Fluctuación en el pH de la solución suelo



FENOLOGÍA: 1- Germinación 2- Plántula 3- Macollos 4-Elongación de tallos 5- Estadío de bota 6- Espigado

Figura 16: Fluctuación en los niveles de pH para los tratamientos con ceniza durante la fase de campo
Fuente: Elaboración propia



FENOLOGÍA: 1- Germinación 2- Plántula 3- Macollos 4-Elongación de tallos 5- Estadío de bota 6- Espigado

Figura 17: Fluctuación en los niveles de pH para los tratamientos con escoria durante la fase de campo.
Fuente: Elaboración propia

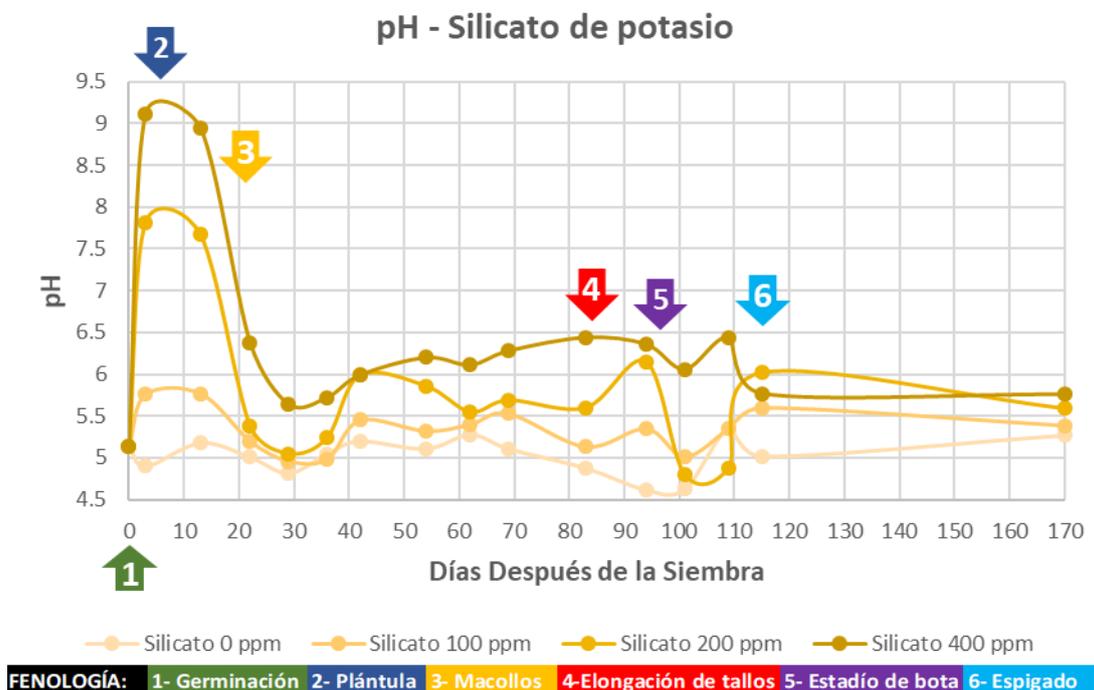


Figura 18: Fluctuación de los niveles de pH para los tratamientos con silicato de potasio durante la fase de campo.

Fuente: Elaboración propia

De un modo parecido ocurrió con el pH. Aunque esta propiedad química no es afectada por la evaporación, podemos observar en las Figura 17, Figura 16 y Figura 18, que el pH del silicato de potasio durante las dos primeras semanas sobrepasó el valor de 9 para el de 400 ppm. Esto se debió a que este producto fue incorporado disuelto en el primer riego, porque su formulación como suspensión acuosa, dificultaba la homogenización del producto en el suelo, como se hizo con la escoria y la ceniza. Se esperaba que después de los primeros riegos el producto se distribuya en toda la maceta, sin embargo, los datos indican que la mayor concentración se quedó en la superficie, en donde incrementó 4 unidades el pH respecto del pH nativo. Una medición del pH del producto, lo sitúa en 12. Esto concuerda con lo mencionado por Elgawhary y Lindsay (1972): para que el ácido silícico (H_2SiO_4) sufra desprotonaciones considerables, el pH debe ser mayor a 8.5. Por lo tanto, todas las sales fertilizantes como silicato de calcio o potasio, deberían prepararse a esos niveles de alcalinidad, pero al ser incorporado en medios ácidos como el caso de nuestro suelo, la disociación de esta sal liberaría los aniones silicatos a la solución, y reestablecerían

inmediatamente sus hidrógenos faltantes, bajando la concentración de H⁺ en el medio. Esto sería lo que en última instancia ocasionaría el incremento en el pH luego de incorporarlo. Fue después de la tercera colecta en la que se ve una bajada drástica, pero esto debido al cambio en la metodología de muestreo.

En el caso de los tratamientos con escoria y ceniza, la metodología de muestreo no alteró mucho los datos debido a la homogenización total de los productos en el suelo de la maceta completa. Sin embargo, es importante resaltar el marcado incremento que se dio en las macetas que recibieron escoria, registrándose pH de hasta 8.5 para la concentración de 400 ppm. Estos nuevos valores para las tres concentraciones se sostuvieron de forma casi invariable a lo largo de toda la campaña, lo que demuestra una capacidad de tamponamiento muy elevada. Hay varios autores que han estudiado a la escoria como material encalante. Encina (2017), estudió su uso en comparación con el carbonato de calcio para un suelo de Tingo María, encontrando que poseen un efecto muy similar en el aumento de pH. Sin embargo, el mecanismo de acción no se deja totalmente claro. Ma y Takahashi citado por Liang *et al.* (2015) mencionan que principalmente, el efecto se debe a la presencia de altas cantidades de silicato de calcio y silicato de magnesio que se han formado por los elevados pH a los que se someten a las muestras. También se habla de formas de calcio, magnesio y potasio más sencillas: óxidos e hidróxidos. Esto guardaría especial relación con las

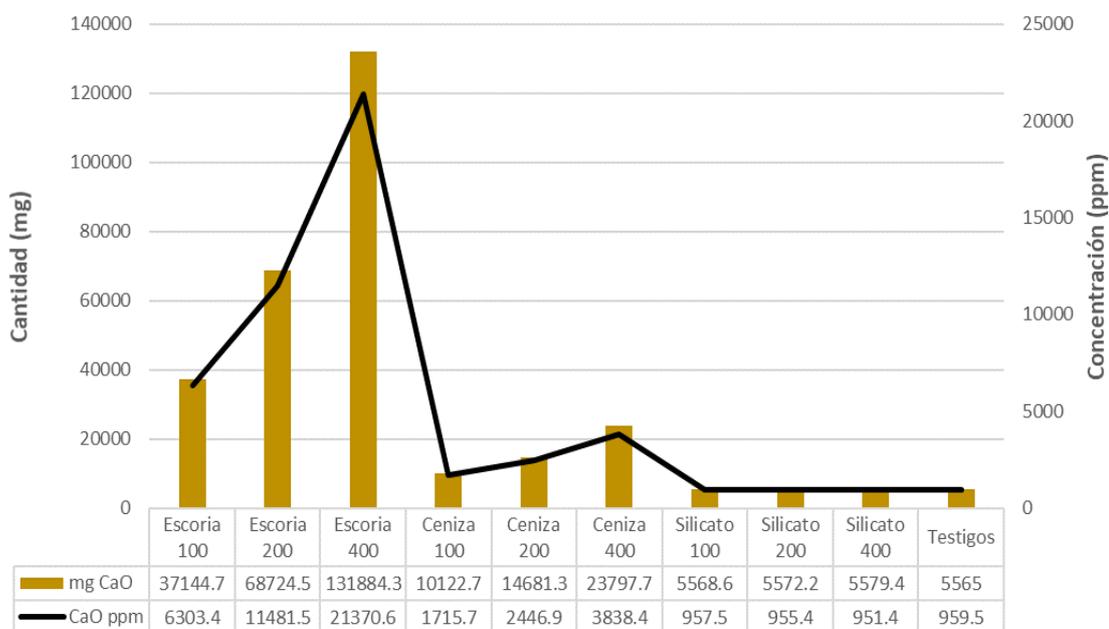


Figura 19: Cantidades y concentraciones iniciales de CaO total para cada tratamiento y testigos considerando los aportes de enmiendas, fertilizantes y agua de riego

Fuente: Elaboración propia con datos del Laboratorio de suelo, plantas, agua y fertilizantes (2018) anexo 4, 5 y 6

cantidades encontradas en los análisis químicos de las enmiendas presentado en las Figura 19 y Figura 20:

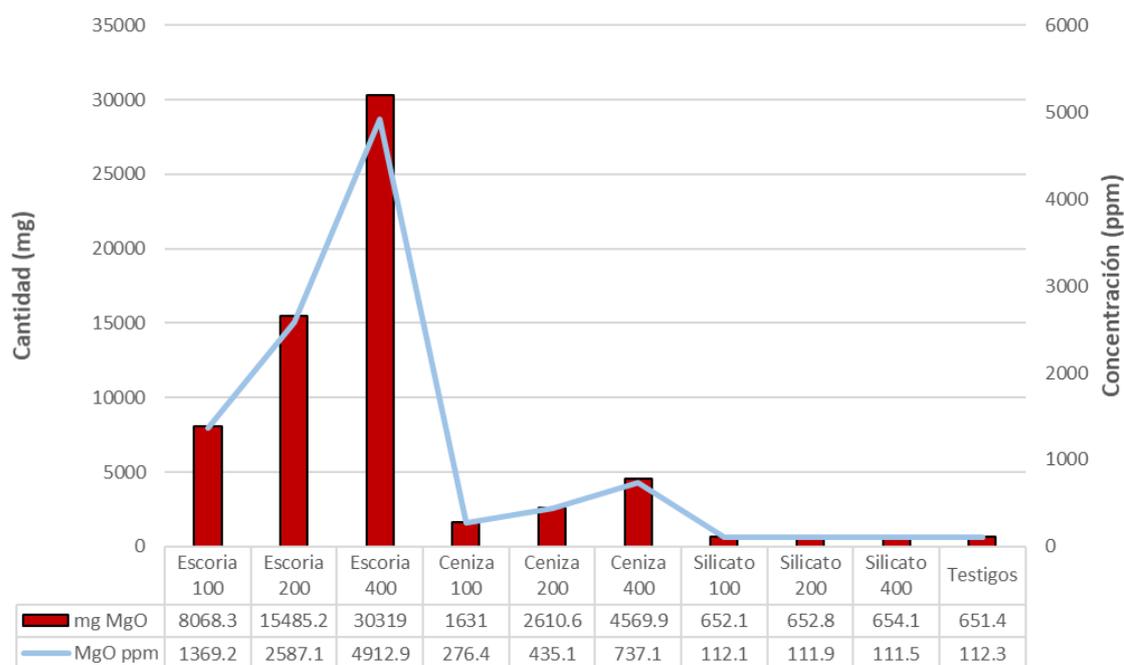


Figura 20: Cantidades y concentraciones iniciales de MgO total para cada tratamiento y testigo considerando los aportes de enmiendas, fertilizantes y agua de riego

Fuente: Elaboración propia con datos del Laboratorio de suelo, plantas, agua y fertilizantes (2018) anexo 4, 5 y 6

En estas gráficas se puede ver las cantidades totales de calcio y magnesio como sus óxidos respectivos. Aclarando: no significa que esta sea la forma medida, solo es la notación usada para expresar sus cantidades. Podemos ver claramente que los tratamientos que recibieron escoria alcanzaron cantidades increíblemente altas de calcio. El tratamiento de escoria 400, recibió 131 884 mg de CaO (concentración total de 21 370 ppm), mientras que el testigo 5565 mg (959 ppm), es decir 23.6 veces menos. El silicato 400 recibió solo 5579 mg (951 ppm), prácticamente la misma cantidad que el testigo. Por último, el tratamiento de ceniza 400 recibió 23797 mg (3838 ppm), es decir unas 4.27 veces más que el testigo. Nuevamente recalamos que estas cantidades son totales. Las cantidades disponibles de este elemento no fueron medidas, pero son mucho menores y en este sentido juega un papel importante el pH. Para el caso de los tratamientos con escoria, los pH para todos los tratamientos, se mantuvieron por encima de 7.5 durante casi toda la campaña. Incluso en el tratamiento de escoria 400 se llegó hasta 8.2. Estas condiciones favorecen la poca solubilidad de las sales de calcio, por efecto de la precipitación con carbonatos. Incluso en condiciones tan alcalinas

se podría hablar de deficiencias de este elemento que deberían ser corroboradas con análisis de tejidos. Tal situación no se dio con los tratamientos de ceniza o silicato de potasio, ya que el incremento máximo en el pH fue hasta 6 y 6.5 respectivamente.

Una situación parecida ocurrió con el magnesio. Se alcanzó cantidades de 30319 mg de MgO (4912 ppm) para los tratamientos de escoria 400. El testigo alcanzó un total de 651 mg (112.3 ppm) es decir 46.5 veces menos. Los tratamientos con ceniza 400 alcanzaron 4569 mg (737 ppm), es decir 7 veces más que el testigo. Por último, las macetas correspondientes a silicato 400, recibieron 654 mg (111.5 ppm), una cantidad prácticamente igual al testigo. Este elemento también es susceptible a los elevados pH.

Esas alteraciones en las condiciones químicas del suelo influyeron marcadamente en el desarrollo del cultivo. A continuación, se muestran datos descriptivos en las Figura 21 y Figura 22 representando los promedios por tratamiento del número de hojas registrados a los 21 DDS y de altura de planta a los 94 DDS. Estos datos tienen la intención de graficar qué tan vigorosas estaban las plantas en estos dos momentos.

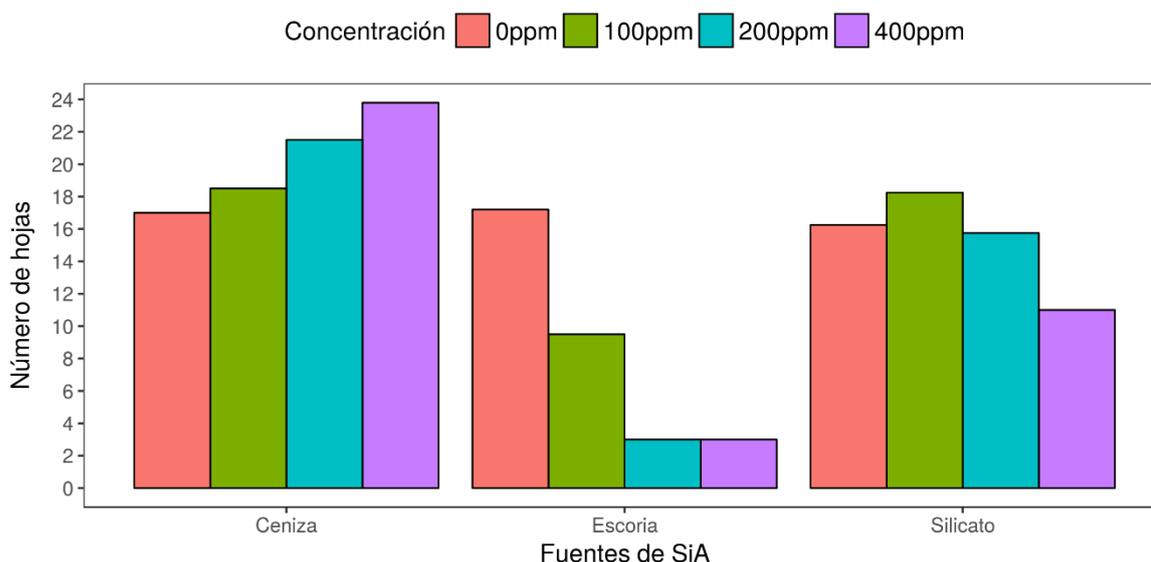


Figura 21: Datos descriptivos del número de hojas a los 21 DDS, graficados usando el software Yupana (Lozano *et al.* 2018).

Fuente: Elaboración propia

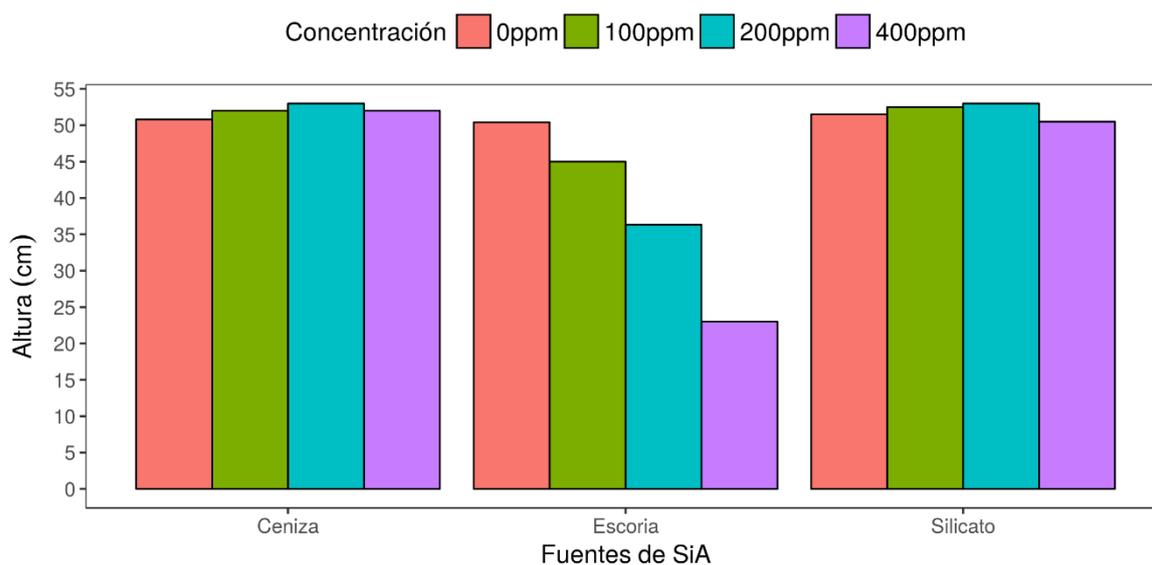


Figura 22: Datos descriptivos de altura de planta a los 94 DDS graficados usando el software Yupana (Lozano *et al.* 2018).

Fuente: Elaboración propia

En ellas se puede observar que, en cuanto al número de hojas a los 21 días, los tratamientos con escoria se encontraban retrasados en comparación con los testigos, mientras que los tratamientos con ceniza, estaban por encima de los testigos. En el caso de las macetas con silicato, las dosis de 200 y 400 tenían menos hojas que el testigo. Por otro lado, los datos de altura medidos a los 94 días, indican que los tratamientos con ceniza se encontraban prácticamente igualados. Esta condición se repite para los tratamientos con silicato. Sin embargo, para los tratamientos con escoria, a medida que se incrementó la concentración, la altura disminuyó. Claramente el factor pH es el que ha influenciado en estas características.

Al final de la campaña se evaluó la variación en el pH ocasionada por la adición de las enmiendas. Los valores medidos cumplen los supuestos estadísticos mencionados en la metodología. Los resultados de las pruebas de Shapiro-Wilk y Breusch-Pagan, así como sus comprobaciones gráficas pueden encontrarse en el ANEXO 16. El análisis de varianza ubicado en el ANEXO 17, indica diferencias significativas a nivel de la interacción. Este resultado se logra apreciar en la Figura 23 mostrada a continuación:

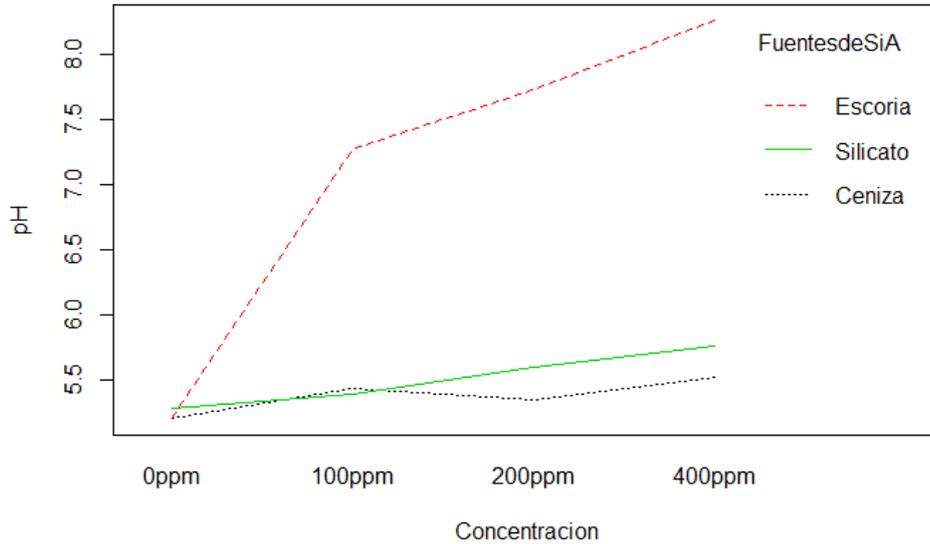


Figura 23: Interacción concentración- fuentes de SiA para la variable pH graficada usando R (RcoreTeam 2014)

Fuente: Elaboración propia

En ella se observan que la escoria ha ocasionado las variaciones más drásticas en el pH en comparación de la ceniza y el silicato. Es posible ver que el incremento en el pH a medida que aumentan las concentraciones son proporcionales para la ceniza y el silicato y estos no han sido cambios muy marcados respecto al testigo. Si bien es cierto, solo hay tres intersecciones, las diversas inclinaciones ya son indicio de interacción. Estas fueron comprobadas con el análisis de efectos simples ANEXO 18 seguida de la prueba de Tukey para contrastar todos los tratamientos mostrada en la Tabla 12.

Tabla 12: Resumen estadístico de la variable pH al final de la campaña con sus niveles de significancia calculados en base a la prueba Tukey con un $\alpha= 0.05$.

Fuentes de SiA	Concentración (ppm)	Media	Mínimo	Máximo	Repeticiones	Desviación estándar	Error estándar	Sig.
Escoria	400	8.26	7.86	8.40	5	0.23	0.10	a
Escoria	200	7.73	7.61	7.87	3	0.13	0.08	b
Escoria	100	7.28	7.07	7.48	2	0.29	0.21	b
Silicato	400	5.76	5.49	6.03	2	0.38	0.27	c
Silicato	200	5.59	5.36	5.82	4	0.22	0.11	c
Ceniza	400	5.52	5.32	5.66	5	0.13	0.06	c
Ceniza	100	5.44	5.20	5.57	4	0.16	0.08	c
Silicato	100	5.39	5.24	5.45	4	0.10	0.05	c
Ceniza	200	5.34	5.24	5.44	2	0.14	0.10	c
Silicato	0	5.28	4.99	5.60	4	0.26	0.13	c
Ceniza	0	5.21	4.99	5.40	5	0.15	0.07	c
Escoria	0	5.20	5.07	5.45	5	0.15	0.07	c

Fuente: Elaboración propia

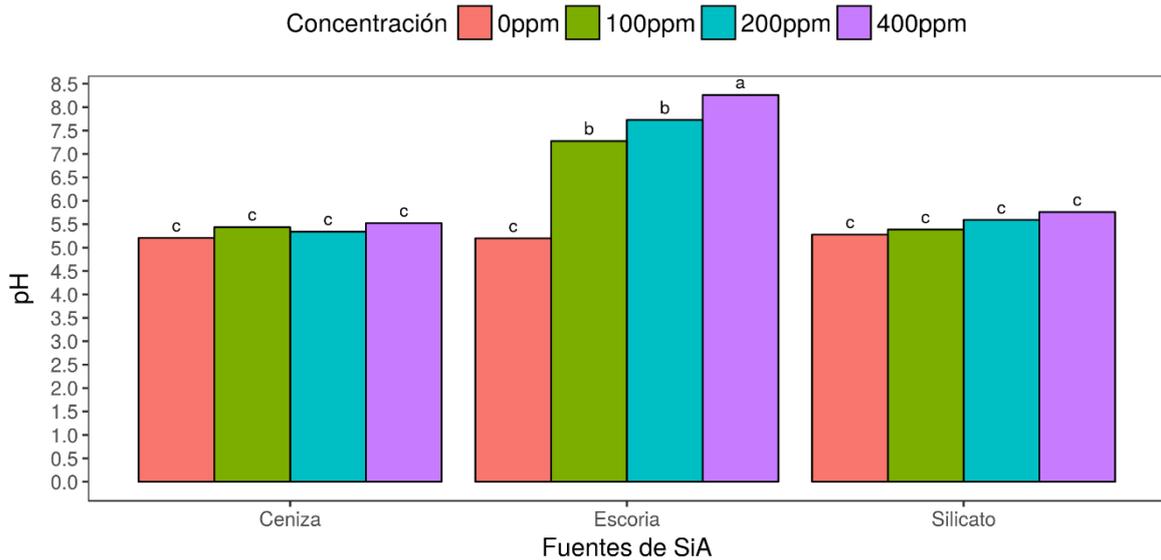


Figura 24: Datos de pH del suelo al final de la campaña graficados usando el software Yupana (Lozano *et al.* 2018)

Fuente: Elaboración propia

Como se puede ver, en líneas generales, tanto los tratamientos con ceniza y silicato no variaron su pH respecto del testigo, mientras que los de escoria sí. Esto sumado al hecho de las grandes cantidades de los otros elementos que fueron incorporados pueden haber conllevado a alguna toxicidad lo que se vio repercutido en la biomasa producida como se verá en el acápite del peso seco. Incluso considerando altas dosis de estos productos aplicados en campo, el riesgo de un incremento desmesurado del pH es mínimo.

4.2. Efecto de las enmiendas silicatadas en la biomasa del arroz

4.2.1. Consideraciones e influencia del factor ambiental

Antes de analizar los datos que relacionan directamente la influencia del silicio en el rendimiento del arroz, es necesario dejar en claro las premisas en las que se basó el ensayo. Como se mencionó en la introducción, debido a que la Amazonía registra los rendimientos más bajos del país, el objetivo de este experimento fue ver la influencia que tenían las enmiendas silicatadas en su cultivo, para condiciones de suelos ácidos de selva.

La pregunta que surge a continuación es: ¿cómo un ensayo dirigido para condiciones de selva puede tener validez, si se está realizando en la costa? La respuesta a esta pregunta se

fundamenta en el hecho que el cultivo fue realizado en macetas, usando material de suelo procedente de Aucayacu-Huánuco, con un cultivar usado en la zona y con un programa de fertilización y manejo agronómico análogo al que usan allá. El único factor que ha diferido de forma muy marcada es el clima. Tal y como se detallará más adelante, las condiciones de temperatura, humedad relativa e intensidad luminosa fueron muy diferentes a las selváticas, incluso cuando se planificó que la fase de macetería coincidiera con los meses más cálidos, en los que teóricamente las condiciones serían favorables para el desarrollo de las plantas.

Lo anteriormente detallado puede relacionarse con lo manifestado por (Vallejo & Estrada, 2002) en donde se establece que la interacción entre el factor genético y los factores ambientales, son los que, en última instancia, determinarán la magnitud de expresión de las características fenotípicas en las plantas. Algunas de estas fueron tomadas como variables de estudio para evaluar el efecto de la aplicación de enmiendas en las plantas de arroz. Para efectos de este ensayo, se ha tratado de controlar el factor genético y una parte del factor ambiental como se explicará a continuación.

Se trató de controlar el factor genético con la adquisición de semillas de arroz de un solo cultivar. El elegido fue Fedearroz 60, conocido como “Ferón” en el valle del Alto Huallaga. En un viaje realizado a la zona el 7 de enero del 2018, se constató que este cultivar se está popularizando como reemplazo de “La Conquista”. Ambos cultivares son considerados como de “calidad extra”, por lo que el precio del costal de 50 kg, luego del pilado era de 95 soles en ese entonces, mientras que el precio de “La Esperanza”, considerado como arroz hogareño, de menor calidad culinaria, tenía un precio de 85 soles.

El cultivar “Conquista” estaba siendo desplazado por Fedearroz 60 porque el primero lleva ya muchos años en el mercado y su pureza varietal ha sufrido degeneración. Aparte de eso se volvió muy susceptible a factores de estrés biótico, en especial el ocasionado por *Burkholderia glumae*, agente causal del añublo bacteriano del arroz. Esta enfermedad viene afectando la producción de arroz en la zona nororiental del Perú desde el año 2012 (Agraria, 2016) habiéndose registrado disminuciones en los rendimientos de hasta un 45 por ciento en Tumbes, 20 por ciento en San Martín y 5 por ciento en Amazonas. Frente a esta situación, el cambio de cultivar surgió como una alternativa viable ya que Fedearroz 60 es un poco más tolerante a este patógeno. Aun así, en los tres años de presencia en el mercado, había registrado reducciones en los rendimientos de 9 t/ha a 6 t/ha por culpa de esta enfermedad.

Pero a pesar de esto, seguía siendo la mejor alternativa para la producción de arroz de alta calidad culinaria.

Las semillas fueron adquiridas en la piladora “El Pescadito” de Aucayacu-Huánuco debido a que fue imposible conseguir semillas certificadas durante la visita. Esto terminó siendo un gran problema, ya que, al terminar el ensayo, se constató que 27 de las 72 unidades experimentales contenían plantas de arroz que no correspondían al cultivar. Por lo que solo se trabajó con datos provenientes de 45 unidades experimentales. La verificación se realizó en base a caracteres morfológicos como la arquitectura de la planta y el tamaño de la panícula. Estas observaciones pueden ser revisadas gráficamente en el ANEXO 19.

Habiendo mencionado el contexto en las que se desarrolló el ensayo, ahora se detallará las variables climáticas medidas para entender el comportamiento del arroz bajo las circunstancias ambientales acontecidas.

Los factores ambientales los podemos agrupar de la siguiente forma: factores bióticos y factores abióticos. Dentro de los primeros se encuentra los daños de insectos plaga y de enfermedades, mientras que el segundo grupo, a su vez puede subdividirse en factor agua, factor suelo y factor clima (temperatura ambiental, humedad relativa, precipitación, velocidad del viento, fotoperiodo e intensidad luminosa). (Vallejo & Estrada, 2002)

Para este ensayo, la estrategia de manejo agronómico se centró en controlar el factor suelo y las cantidades del factor agua. En cuanto al factor clima, debido a la falta de un invernadero con control ambiental, solo nos limitamos a registrar la temperatura, humedad relativa y la intensidad luminosa, tal y como se detalló en la metodología. La precipitación no fue medida porque La Molina se encuentra en una zona de clima desértico árido subtropical según el mapa climático del Perú (SENAMHI, 2018), por lo que la precipitación media anual es irrisoria. La velocidad del viento tampoco fue medida porque el patio del Laboratorio de Fertilidad de Suelos, cuenta con muros de más de dos metros de altura, y las macetas del ensayo se ubicaron a un metro de altura aproximadamente, por lo que la influencia del viento fue mínima, salvo para el arrastre de algunos insectos plaga y de esporas de hongos, como se detallará más adelante. Por último, en cuanto al fotoperiodo, tampoco se lo midió porque esta información se obtiene a partir de cálculos astronómicos y geográficos, en los que interviene el fenómeno de traslación de la Tierra y la ubicación geográfica (la latitud influye

en la cantidad de horas luz que le llega a cualquier punto del planeta). La información está disponible en la página web de Manatech (2019).

Históricamente, este factor ha sido dejado de lado en la agricultura peruana, y esto se ve reflejado en que la mayoría de publicaciones científicas, al referirse a la luz, lo hacen de forma meramente cualitativa: “zona de mucha nubosidad”, “zona de poca nubosidad”, “radiación intensa”, “radiación baja”. Probablemente, la razón de esto sea la cercanía al Ecuador, lo que repercute en dos aspectos. El primero es la intensa radiación solar casi perpendicular en las zonas agrícolas más importantes, durante todo el año, y por otro lado la ligera variación en el fotoperiodo entre invierno y verano (diferencia de aproximadamente 1.5 h entre el solsticio de invierno y el solsticio de verano). Por lo tanto, al tener un factor luz prácticamente constante, aparentemente podría ser pasado por alto.

Sin embargo, al ser la radiación solar, la fuente energética primigenia para toda forma de vida en la Tierra, se consideró necesaria su cuantificación, ya que no solamente tiene injerencia directa en las tasas fotosintéticas de las plantas, sino que va a influir en los demás factores ambientales, como temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, etc. A continuación, en la Figura 25 se muestran los datos en relación con los estadios fenológicos del cultivo.

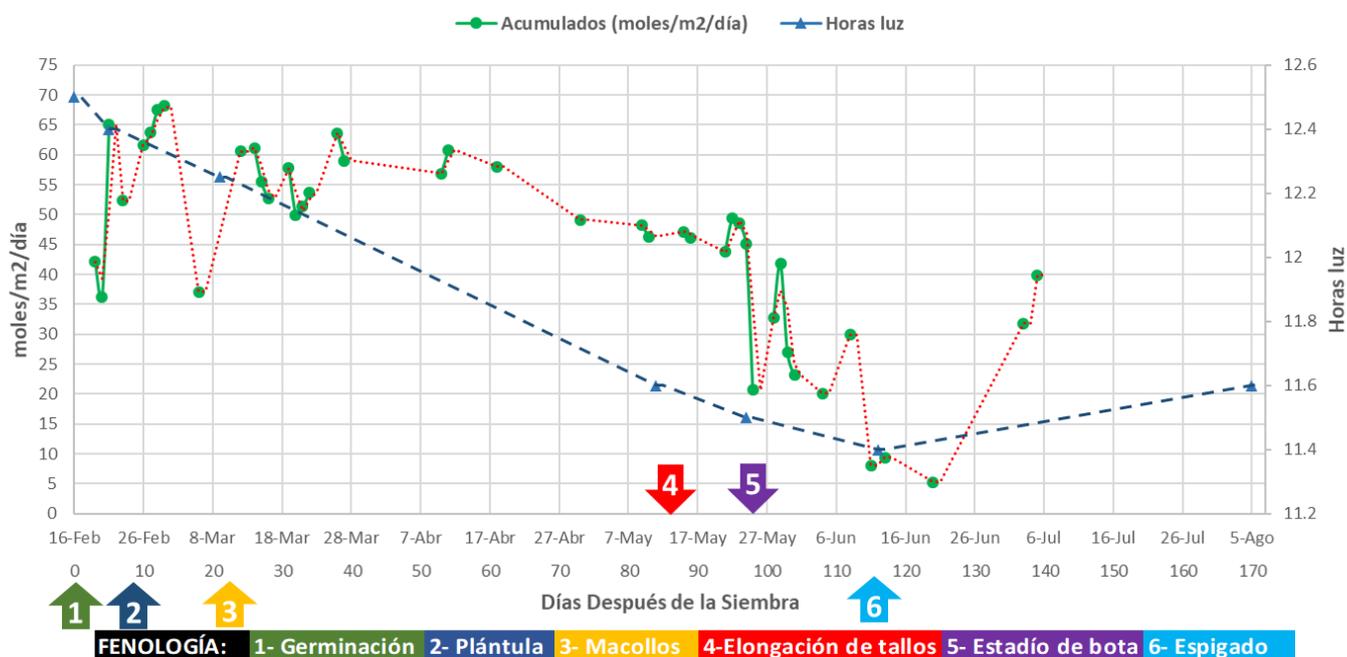


Figura 25: Fluctuación de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) y el fotoperiodo durante la fase de campo en base a Torres y López (2012).

Fuente: Elaboración propia

Los datos de intensidad luminosa están expresados en términos de la integral lumínica diaria. Este concepto se basa en la definición de la luz como partícula (McCree, 1981) para cuantificar el total de fotones fotosintéticamente activos que caen en una superficie de un metro cuadrado a lo largo del día. Se considera como radiación fotosintéticamente activa (PAR, por sus siglas en inglés), a aquella cuya longitud de onda encaja entre los 400 y 700 nm. Como su nombre lo dice, es la que impulsa las reacciones fotoquímicas en las plantas. Es necesario precisar, que debido a la falta de un radiómetro PAR (equipo especializado para medir la radiación entre esas longitudes de onda), se usó un luxómetro. Este es un instrumento fotométrico para medir la intensidad luminosa dentro del espectro de luz visible, es decir, entre 380 y 770 nm y que brinda un dato instantáneo. La luz visible en comparación de la radiación PAR, abarca un rango del espectro electromagnético ligeramente mayor y al ser análogos, los científicos han calculado una constante de 18 para transformar datos de luz visible (en klx) a radiación PAR ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) (Biggs, 2003). Posteriormente se siguió los pasos establecidos en la metodología para calcular el total de radiación PAR incidente por cada día.

Como se puede observar en la figura 25, desde el día de la siembra (16 de febrero) hasta la cosecha (7 de agosto) la intensidad luminosa ha presentado tendencia al descenso. Esto se explica por el cambio de estación. A partir del 20 de mayo (95 DDS) se presentó la caída más marcada en la intensidad luminosa. Según Yoshida (1981) las cantidades de radiación óptimas para el cultivo de arroz dependen del estadio fenológico, pero un promedio general es de unas $300 \text{ cal}/\text{cm}^2/\text{día}$ de PAR (equivalente a $57 \text{ moles}/\text{m}^2/\text{día}$). Sombreamiento durante la fase vegetativa tiene un ligero impacto en el rendimiento final, mientras que un sombreamiento en la fase reproductiva influye muy negativamente en el número de espiguillas/planta, en el cuaje del grano y en el llenado. En este caso, puede verse que hasta el día 95, los valores de intensidad luminosa estaban por encima de las $45 \text{ moles}/\text{m}^2/\text{día}$. Considerando que la fase de Espigado se dio alrededor del día 12/06/18 (116 DDS), se asume que el inicio de la fase reproductiva o “punto algodón” ocurrió 35 días antes, durante la fase de macollamiento (Yoshida, 1981), alrededor del 10/05/18 (81 DDS). En ese momento las intensidades luminosas estaban en su nivel óptimo y permanecieron así por 15 días más. Sin embargo, no fue suficiente para cubrir toda la época de formación de panícula previa al espigado. Según las experiencias de este cultivar en la zona del Alto Huallaga, la inducción floral debió haberse dado entre los 60 y 70 DDS. Quizá uno de los factores que haya influenciado este retraso fue la disminución en las horas luz. Como se puede observar, la

cantidad de horas luz disminuyó de 12 h 30 min al inicio de la campaña a 11 h 30 min al momento de la inducción floral. Considerando que el arroz es una especie que responde al estímulo de los días cortos, esta disminución de una hora pudo haber influenciado a que recién la inducción se de en el día 81, en donde ya estaba disminuyendo la intensidad luminosa por la llegada del manto nuboso que cubre a Lima en invierno. Si bien es cierto, estos 15 días de poca intensidad luminosa no afectaron finalmente el número de espiguillas por planta, sí ocasionó una esterilidad de 100 por ciento en todos los tratamientos por efecto de las bajas temperaturas que trajeron como consecuencia. Esto se verá en la Figura 26.

Tabla 13: Temperaturas máxima, mínima y media durante la fase de campo.

Temperatura Máxima	38.8°C
Temperatura Mínima	13.8°C
Temperatura media	21°C

Fuente: Elaboración propia

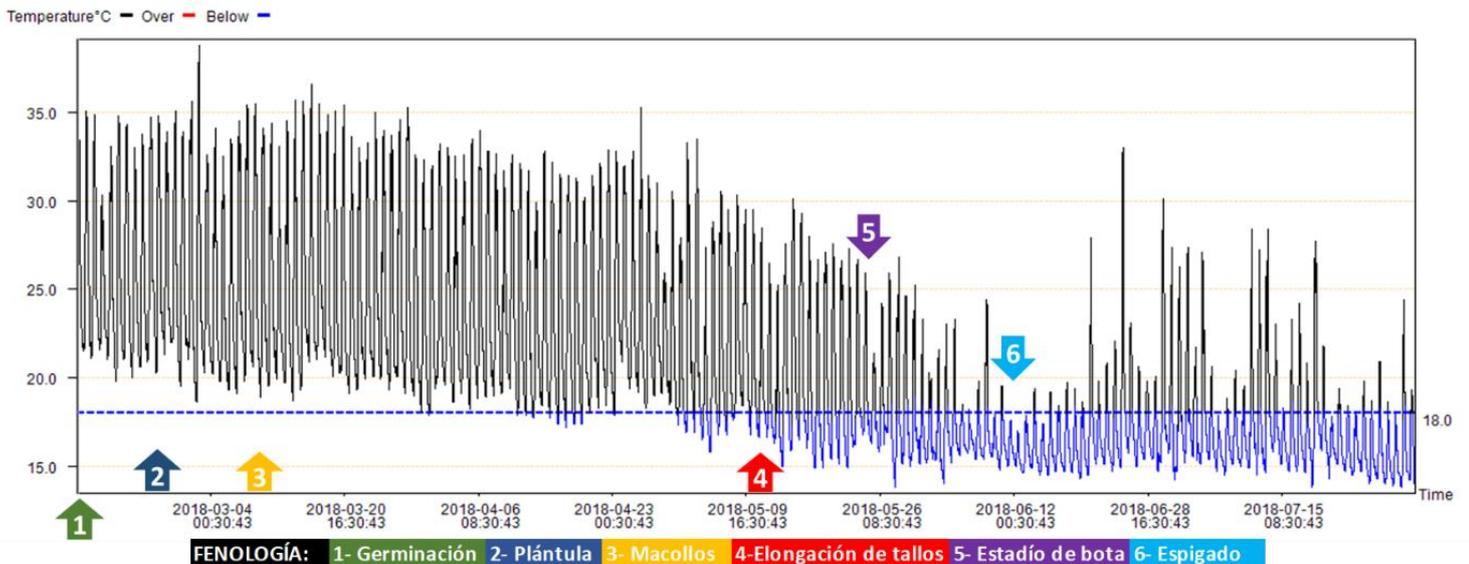


Figura 26: Fluctuación de la temperatura ambiental durante la fase de campo graficada usando el software del termohigrómetro Elitech

Fuente: Elaboración propia

La temperatura del aire está directamente relacionada con la intensidad luminosa, porque la radiación solar al incidir sobre el suelo, lo calienta. Parte de esa energía es transferida al aire por conducción y posteriormente este se redistribuye por convección (Ahrens, 2009). La Figura 26 nos muestra en primer lugar que la temperatura ha ido en descenso al igual que la radiación. También nos muestra una serie de picos que ilustran la variación diaria de la temperatura. Puede verse que al momento de la siembra la temperatura mínima del día estaba alrededor de los 22 °C, mientras que la máxima 35 °C. Esta situación permaneció más o

menos constante hasta el 02/05/18, (93 DDS), fecha en la que la temperatura bajó de 18 °C por más de 8 horas. A partir de este día, hasta el final del cultivo, se presentaron temperaturas inferiores a 18 °C por más de 7 horas. Se fijó una temperatura crítica de 18 °C (línea punteada color azul), ya que las temperaturas por debajo de este margen afectan la esterilidad del polen. Heros (2012) establece una temperatura crítica de 19 °C, mientras que Yoshida (1981), temperaturas entre 15 y 20 °C dependiendo del cultivar. En total se registró datos de temperatura y porcentaje de humedad relativa para 167 días de cultivo, haciendo un total de 3999 horas. De estas, 1474.5 horas presentaron temperaturas menores a 18°C (36.87 por ciento del ciclo del cultivo). También podemos hacer los cálculos para 19 °C (1759.7 h - 43.99 por ciento del ciclo de cultivo) y para 20°C (2062.5 h - 51.56 por ciento del ciclo de cultivo). En cualquiera de los tres casos, la cantidad de horas expuestas a temperaturas tan bajas es excesivo, incluso observando que casi hasta la mitad del cultivo se alcanzaban temperaturas máximas de hasta 30 °C. Yoshida (1981) define como temperaturas críticas aquellas que perjudican el crecimiento y desarrollo del cultivo derivando en pérdidas en el rendimiento, siendo la fase más sensible la fase reduccional de la microgametogénesis. Por lo tanto, es de esperarse esterilidad en el polen como problema principal. Para el caso de este ensayo, la bajada de temperatura más significativa se dio 12 días después de cuando se estima ocurrió la inducción floral. Por lo tanto, los restantes 23 días de formación de las panículas, el ambiente ya se encontraba excesivamente frío. Los síntomas del daño por frío se apreciaron como malformación en las puntas de las panículas, desplegamiento incompleto de la inflorescencia y esterilidad del polen. Estos problemas fueron encontrados también por Hasanuzzaman *et al.* (2013). Evidencias gráficas son presentadas en el ANEXO 20.

Las excesivas bajas temperaturas recién se notaron para el inicio del espigado. Como puede verse en la Figura 27, para el 12/06/18 (116 DDS), las temperaturas máximas no alcanzaban ni los 20°C. Es por eso que, en un intento por aliviar el estrés por frío se optó por colocar plásticos transparentes a manera de invernadero para tratar de “salvar” a las panículas que se estaban formando.

Como puede verse en la Figura 27 cuadro de labores el 14 de junio se empezó con la colocación de estos plásticos, haciendo el sellado final el día 21 de junio. Si ahora regresamos a observar el gráfico de temperatura, observamos que a partir de ese entonces aparecen picos de temperatura máxima entre 27 °C y 33 °C. Sin embargo, observamos que durante las noches la temperatura seguía cayendo muy debajo de los 18 °C. Por lo tanto, el

plástico falló en su cometido general, ya que solo logró incrementar las temperaturas máximas, pero no lo más importante, las temperaturas mínimas.

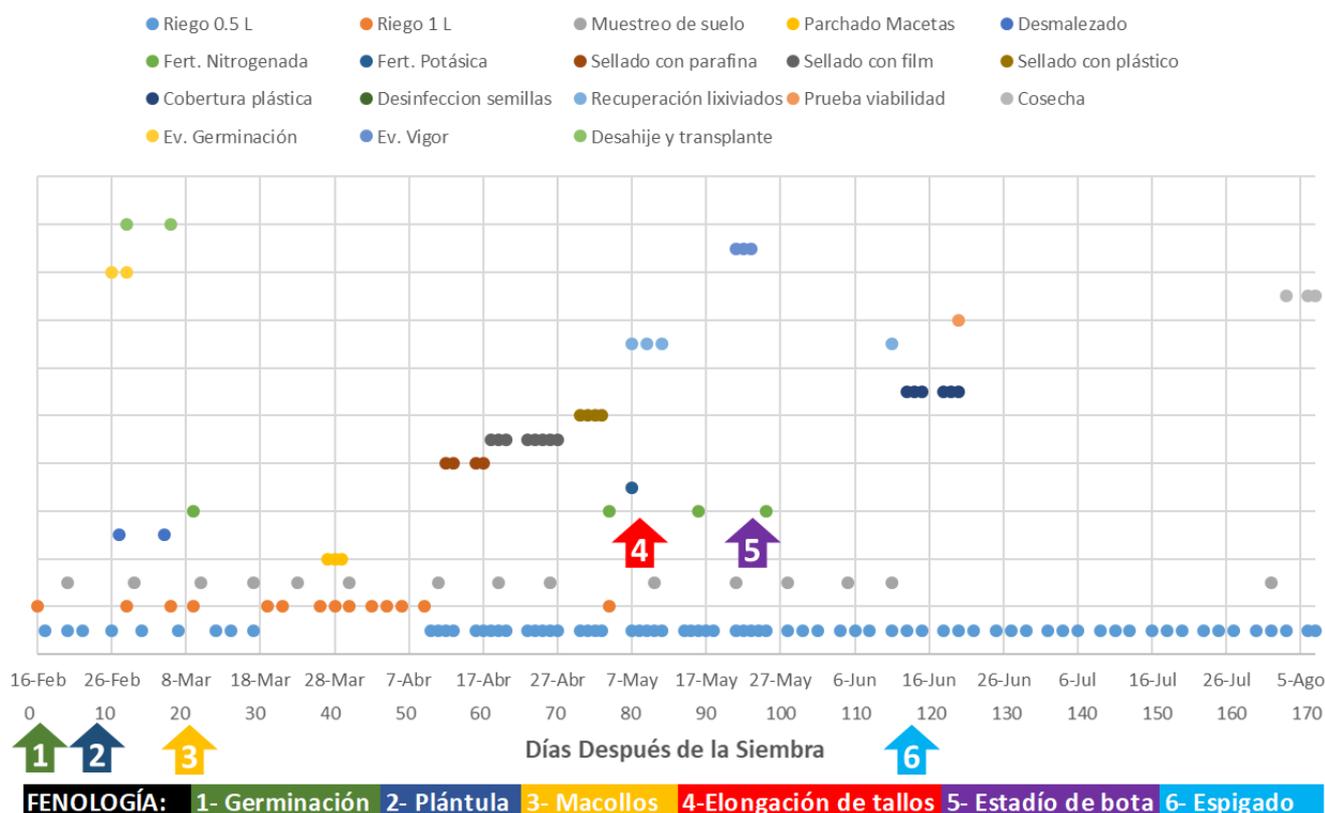


Figura 27: Calendario de labores realizadas durante la fase de campo en relación con la fenología.
Fuente: Elaboración propia

Este accionar conllevó a otra consecuencia: la aparición de manchas necróticas en las espiguillas de casi todas las plantas. Al cabo de unos pocos días, el 100 por ciento de las plantas presentaban el mismo síntoma (ANEXO 21). El problema más grave se dio porque a los 14 días luego del inicio del espigado, no se observaba llenado de grano, por lo que surgió la duda de si el agente causal de la necrosis, también estaba causando la falta de llenado de grano. Es por eso que se tomaron unas muestras de las espigas de todos los tratamientos y se llevaron a la clínica de diagnóstico de fitopatología. El informe final (ANEXO 22) detalla que los agentes causales fueron *Alternaria alternata* y *Curvularia sp.* Estos hongos no infectan directamente, son patógenos secundarios, que van a causar una infección solo si encuentran aperturas abiertas y condiciones ambientales adecuadas para su proliferación.

La Figura 28 muestra la situación que se presentó. Como se puede observar la humedad relativa en la fase del espigado alcanzó niveles mayores a 90 por ciento. Las temperaturas fueron menores a 18 °C y las espiguillas, que se encontraban abiertas luego de la antesis debieron haber recibido esporas de estos patógenos antes de cerrar las jaulas con los plásticos. A pesar de esto, el desarrollo de la enfermedad no se hubiese dado, si las espiguillas hubiesen cuajado al momento de la antesis. Por lo tanto, se concluyó que la necrosis de las espiguillas no fue la causa de la falta de cuaje de grano, sino que surgió como una consecuencia de esto. Entonces se reafirmó que la causa de la falta de formación de grano fue por la esterilidad en el polen ocasionado por estrés de frío.

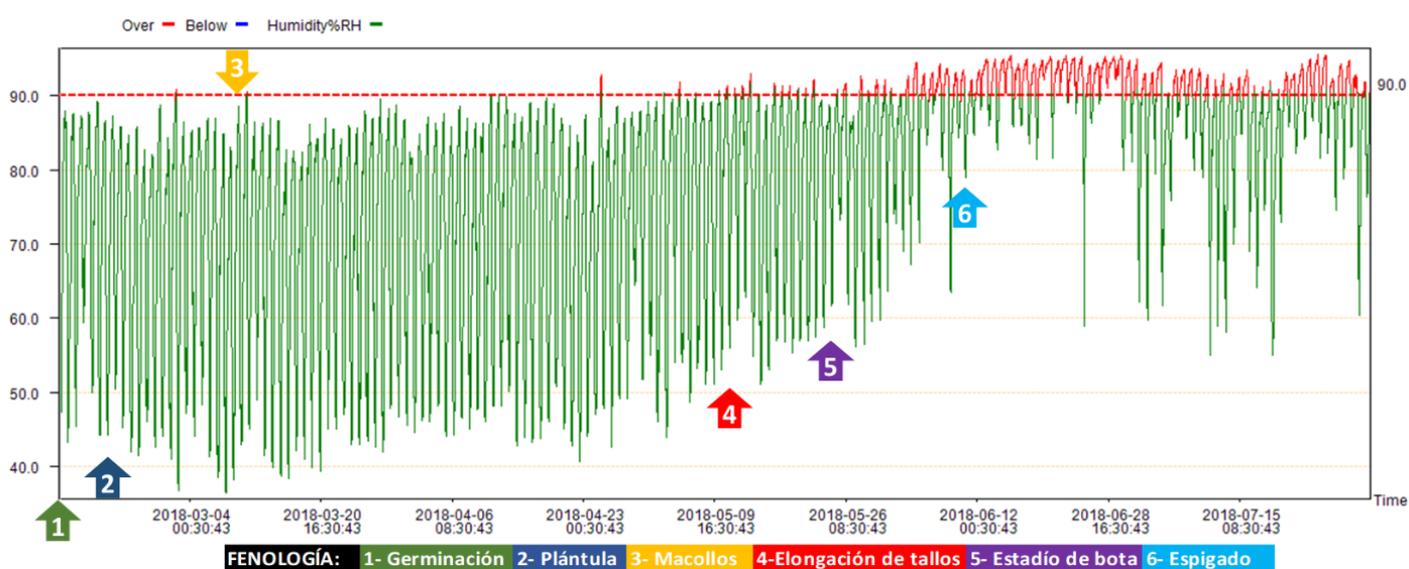


Figura 28: Fluctuación de la humedad relativa durante la fase de campo graficada con el software del termohigrómetro Elitech
Fuente: Elaboración propia

Ahora, la humedad relativa, es un factor íntimamente ligado a la temperatura ambiental. Podemos observar que, al inicio de la campaña debido a las altas temperaturas máximas, se alcanzaban muy bajos niveles de humedad relativa, incluso hasta por debajo de 40 por ciento, pero en las noches, se llegaba hasta un 90 por ciento. A medida que la temperatura fue bajando a lo largo de la campaña, la humedad relativa ya no bajaba tanto. Hasta antes de colocar los plásticos de cobertura, hubo días en los que se mantuvo en 85 por ciento durante el día.

La implicancia más directa de la humedad relativa fueron los volúmenes de agua aplicados en los riegos. En el cuadro de actividades desarrolladas, los momentos de riego se encuentran

divididos en dos zonas, riego de 0.5 litros/maceta y riegos de 1 litros/maceta. Se observa que los riegos de un litro, se han dado solamente al inicio de la campaña durante la fase de macollamiento, así como varios riegos de 0.5 litros muy continuos. A partir del 27/05/18 (100 DDS), se empezaron a espaciar un poco más los riegos. Esto por efecto de la alta humedad relativa ocasionada por las bajas temperaturas, causadas por la baja intensidad luminosa. Esto se visualiza claramente en los tres gráficos. Entonces, a pesar de que en ese entonces la planta se encontraba en su máxima cantidad de hojas y macollos, su consumo de agua se redujo por el asunto ambiental.

A lo largo de todo el cultivo, se hicieron un total de 74 riegos de 0.5 litros/maceta y 16 riegos de 1 litro/maceta. Por lo tanto, el consumo promedio de agua por maceta fue de 53 litros. Considerando que se tenía un total de 72 macetas, esto hace que el consumo total de agua de riego haya sido de 3816 litros. Ahora es necesario precisar que los tratamientos de escoria 200 y escoria 400 recibieron quizá un tercio de esta cantidad ya que las plantas se estancaron en fase de plántula. Por otro lado, los tratamientos con ceniza de cascarilla de arroz recibieron 25 por ciento más de agua, debido a que la baja densidad de la ceniza incrementó el espacio poroso de la maceta, aumentando su capacidad de almacenamiento de agua, por lo tanto, para mantener condiciones de saturación, se debió agregar esa dosis adicional. También es necesario precisar que a partir del día 40 (28/03/2018) se empezaron a realizar trabajos de contención de fugas de agua en las macetas. Estas poseían agujeros de drenaje como parte de su diseño, que fueron parchados usando cinta Ducktape, hecha de tela con pegamento impermeable, con la esperanza que contenga el agua durante toda la campaña. Funcionó bien hasta el día 38 (26/03/2018), pero desde esa fecha, la proliferación de raíces en todos los tratamientos (exceptuando los de escoria 200 y escoria 400) fue tan intensa que comenzaron a presentarse fugas. Desde el día 40 hasta el 77 (4/05/2018) se trató de contener el problema usando cuatro métodos diferentes: resellado con la cinta Ducktape, sellado con parafina calentada, film de plástico adherente y, por último, el empleo de bolsas de polietileno de baja densidad. Cada uno fue realizado a continuación del otro por falta de resultados adecuados. El último de ellos es el que dio resultados con un 85 por ciento de eficacia en la contención de fugas.

Para lograr esto, se optó por colocar platos debajo de las macetas para que colecten los lixiviados y, por último, usando jeringas marcadas por tratamiento se procedían a colectarlos y devolverlos a las macetas. Este asunto de las fugas de agua incrementó el consumo real en

una cantidad que no se pudo medir, además que representa una fuente de variabilidad no controlada de salida de nutrientes del sistema cerrado que debía de representar la maceta.

Este problema ocasionó un retraso en las aplicaciones de fertilizantes nitrogenados y potásicos. Como se explicó en la metodología, la fertilización nitrogenada se fraccionó en 5 partes. La primera parte (13.5 por ciento de la dosis) se aplicó antes de la siembra como componente del fosfato diamónico. La segunda parte (hasta completar 25 por ciento de la dosis) se aplicó al inicio del macollamiento 09/03/2018 (21 DDS). La tercera parte debió haberse aplicado alrededor del día 60 según lo establecido en las curvas de absorción de Bertsch (2009). Sin embargo, la imposibilidad de controlar las fugas en ese momento lo retrasó 18 días, habiéndose realizado finalmente el día 78 (05/05/2018), momento en el cual las fugas ya habían sido controladas. Para este momento, las plantas presentaban un color verde opaco, que puede atribuirse a la ligera falta de nitrógeno sumadas al estrés por baja temperatura (Yoshida, 1981). A los cinco días de la aplicación de la tercera parte (hasta llegar al 50 por ciento de la dosis de N), las plantas habían mejorado su aspecto notoriamente y se empezó a notar más marcadamente su entrada a la fase de elongación de tallos.

La cuarta y quinta parte fueron aplicadas el día 89 (16/05/2018) y 98 (25/05/2018) respectivamente, hasta completar el 50 por ciento de la dosis restante. Esta última encajó con el estadio de bota. Según Yoshida (1981) las aplicaciones de nitrógeno, en el proceso de diferenciación floral sometidas a temperaturas de 16 °C incrementan la infertilidad de las espiguillas. Esta puede ser otra explicación por la que se tuvo un 100 por ciento espiguillas vacías. Con respecto a la fertilización potásica, también se sufrió un retraso. Se realizó el día 80 (07/05/2018), aplicándose el total de la dosis. Debió haberse realizado en dos partes, a los 50 DDS y la segunda a los 80 DDS. Aparte de eso, también se incurrió en un error de cálculo, al asumir que la cantidad de potasio disponible que aparecía en el análisis era lo que realmente iba a estar disponible para el arroz. Según Loli (2018), los datos de disponibilidad de fósforo y potasio que aparecen en los análisis de suelos se deben tomar con mucho cuidado, ya que la composición de los exudados radiculares tiene mucha influencia en la verdadera disponibilidad, es por eso que la cantidad de fertilizantes potásicos y fosfatados debió haber sido ligeramente mayor.

4.2.2. Resultados por cada variable

Todos los datos se encuentran disponibles en el ANEXO 11.

a. Disponibilidad de silicio en suelo al final de la campaña

Los valores medidos cumplen los supuestos estadísticos mencionados en la metodología. Los resultados de las pruebas de Shapiro-Wilk y Breusch-Pagan, así como sus comprobaciones gráficas pueden encontrarse en el ANEXO 23. El análisis de varianza ubicado en el ANEXO 24 indica diferencias significativas a nivel de la interacción. Este resultado se logra apreciar en la Figura 29 mostrada a continuación:

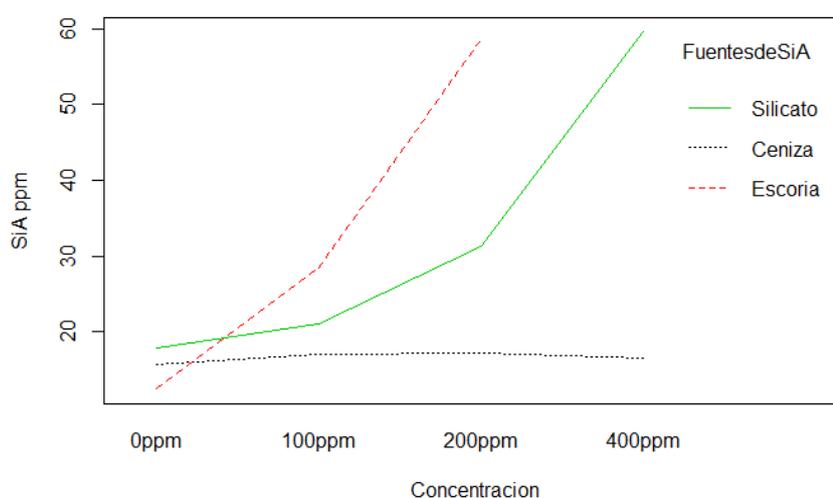


Figura 29: Interacción fuentes de SiA - concentración para la variable silicio disponible (SiA) usando R (RcoreTeam 2014).

Fuente: Elaboración propia

Es posible observar que hay interacción en todos los niveles de concentración, así como en la naturaleza de la enmienda. Esto se ve por las múltiples intersecciones y cambios en las pendientes. La línea correspondiente a la escoria no tiene el segmento correspondiente a 400 ppm porque tuvieron que eliminarse dos datos, lo que imposibilitó que el programa dibuje esa parte. Es posible observar que los tratamientos con cenizas al final de la campaña se igualaron en las concentraciones de Si disponible. Para el caso del silicato de potasio, se ve una clara tendencia incrementarse con tendencia exponencial. Esto guarda relación con el crecimiento geométrico de la dosis. Una tendencia similar se ve con la escoria. Un análisis a profundidad de las interacciones se verá a profundidad con el análisis de efectos simples

ANEXO 25. Seguidamente, se procedió con las pruebas de comparación de Tukey. Los resultados se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14: Resumen estadístico de la variable silicio disponible (SiA) al final de la campaña con sus niveles de significancia calculados en base a la prueba de Tukey con un $\alpha= 0.05$

Fuentes de SiA	Concentración (ppm)	Media	Mínimo	Máximo	Repeticiones	Desviación estándar	Error estándar	Sig.
Escoria	400	93.75	90.55	98.66	3	4.32	2.49	a
Silicato	400	59.51	55.32	63.71	2	5.93	4.19	b
Escoria	200	58.58	52.15	62.96	3	5.69	3.29	b
Silicato	200	31.25	24.94	37.15	4	6.01	3.01	c
Escoria	100	28.43	22.33	34.54	2	8.63	6.10	cd
Silicato	100	21.09	18.14	24.19	4	2.99	1.49	cde
Silicato	0	17.83	12.45	26.24	4	6.55	3.28	de
Ceniza	200	17.20	13.48	20.93	2	5.27	3.73	de
Ceniza	100	17.04	14.32	24.19	4	4.78	2.39	de
Ceniza	400	16.51	13.85	20.93	5	2.65	1.19	de
Ceniza	0	15.69	11.80	24.29	5	5.00	2.24	de
Escoria	0	12.45	9.47	15.99	5	2.60	1.16	e

Fuente: Elaboración propia

b. Absorción de silicio en raíz

Los valores medidos cumplen los supuestos estadísticos mencionados en la metodología. Los resultados de las pruebas de Shapiro-Wilk y Breusch-Pagan, así como sus comprobaciones gráficas pueden encontrarse en el ANEXO 26. El análisis de varianza ubicado en el ANEXO 27 indica diferencias significativas a nivel de la interacción. Este resultado se logra apreciar en la Figura 30 mostrada a continuación:

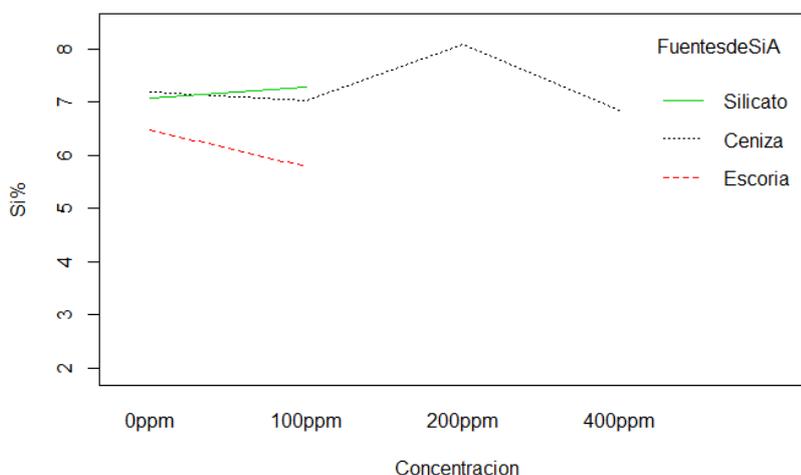


Figura 30: Interacción fuentes de SiA - concentración para la variable porcentaje de Si en raíz usando R (RcoreTeam 2014)

Fuente: Elaboración propia

Puede observarse que la gráfica se encuentra incompleta para las concentraciones de 200 y 400 de escoria y silicato. Esto se debe a que se tuvieron que eliminar dos datos de la concentración 200, uno para escoria y otro para silicato, razón por la cual el paquete estadístico no logró completar la gráfica. Se logra observar una intersección y pendientes desiguales las cuales son indicadores que hay influencia de la naturaleza de la enmienda en la absorción de silicio por parte de la raíz. A pesar de esto inconveniente, el análisis de efectos simples (ANEXO 28) deja en evidencia las interacciones, y cuantifica el nivel de significancia entre ellas. La Tabla 15 muestra los resultados de las pruebas Tukey para contrastar las diferencias entre las medias de los tratamientos.

Tabla 15: Resumen estadístico de la variable porcentaje de Si en raíz con sus niveles de significancia calculados en base a la prueba de Tukey con un $\alpha= 0.05$

Fuentes de SiA	Concentración (ppm)	Media	Mínimo	Máximo	Repeticiones	Desviación estándar	Error estándar	Sig.
Silicato	400	8.40	7.80	9.00	2	0.85	0.60	a
Ceniza	200	8.08	7.35	8.80	2	1.03	0.73	a
Silicato	200	7.34	6.78	7.93	3	0.57	0.33	a
Silicato	100	7.30	6.87	7.96	4	0.47	0.23	a
Ceniza	0	7.20	6.15	8.82	5	1.17	0.52	a
Silicato	0	7.09	4.78	8.54	4	1.72	0.86	a
Ceniza	100	7.04	6.32	8.02	4	0.75	0.37	a
Ceniza	400	6.84	5.94	7.50	5	0.66	0.29	a
Escoria	0	6.49	5.40	8.09	5	1.06	0.48	a
Escoria	100	5.80	5.08	6.51	2	1.01	0.72	ab
Escoria	200	2.65	1.68	3.61	2	1.37	0.97	bc
Escoria	400	1.94	0.78	3.40	5	0.95	0.42	c

Fuente: Elaboración propia

c. Absorción de silicio en órganos aéreos

Al realizar las pruebas de Shapiro-Wilk y Breusch-Pagan, los datos obtenidos cumplen con los supuestos estadísticos mencionados en la metodología. Los resultados y sus comprobaciones gráficas pueden encontrarse en el ANEXO 29. El análisis de varianza ubicado en el ANEXO 30 indica diferencias significativas a nivel de la interacción. Este resultado se logra apreciar en la Figura 31 mostrada a continuación:

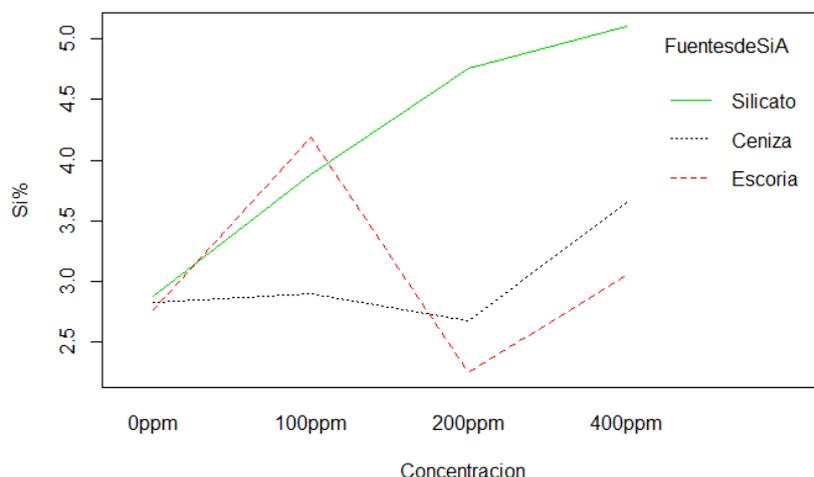


Figura 31: Interacción fuentes de SiA - concentración para la variable porcentaje de Si en órganos aéreos graficada usando R (RcoreTeam 2014)

Fuente: Elaboración propia

Es posible ver múltiples intersecciones en varios segmentos de líneas lo que indica que la naturaleza de las enmiendas tiene una fuerte influencia para este parámetro según la concentración inicialmente aplicada. Es posible observar que la línea correspondiente a ceniza permanece prácticamente constante para todas las concentraciones salvo para la de 400 ppm en donde en promedio se incrementa 0.5 por ciento, esto corresponde a la solubilidad del silicio en suelo para estos tratamientos. Para el caso de la línea de silicato de potasio, esta manifiesta una marcada tendencia al aumento y va acorde a la mayor solubilidad de silicio aportada por estos tratamientos. Por último, la línea de la escoria, presenta un incremento inicial hasta 100 ppm, pero luego una caída. Esto se origina debido a que las plantas se estancaron en su crecimiento, por lo que no absorbieron tanto silicio. Estas interacciones complejas quedan detalladas con el análisis de efectos simples ANEXO 31. Todos los tratamientos fueron sometidos a una prueba de Tukey, cuyos resultados se muestran en la Tabla 16 a continuación.

Tabla 16: Resumen estadístico de la variable porcentaje Si en órganos aéreos con sus niveles de significancia calculados en base la prueba Tukey con un $\alpha= 0.05$

Fuentes de SiA	Concentración (ppm)	Media	Mínimo	Máximo	Repeticiones	Desviación estándar	Error estándar	Sig.
Silicato	400	5.10	4.98	5.22	2	0.17	0.12	a
Silicato	200	4.76	4.55	4.95	4	0.19	0.09	a
Escoria	100	4.19	3.72	4.67	2	0.67	0.47	ab
Silicato	100	3.89	3.26	4.27	4	0.45	0.22	ab
Ceniza	400	3.65	3.13	4.37	5	0.50	0.22	ab
Escoria	400	3.05	1.94	3.96	5	0.97	0.44	bc
Ceniza	100	2.90	2.27	3.24	4	0.45	0.23	bc
Silicato	0	2.88	2.63	3.43	4	0.38	0.19	bc
Ceniza	0	2.82	2.58	3.02	5	0.21	0.09	bc
Escoria	0	2.77	2.38	3.51	5	0.52	0.23	bc
Ceniza	200	2.67	2.62	2.72	2	0.07	0.05	bc
Escoria	200	2.24	2.01	2.43	3	0.21	0.12	c

Fuente: Elaboración propia

d. Peso seco

Con el objetivo de que los datos encajen en los supuestos estadísticos mencionados en la metodología se empleó la transformación $\log(\text{peso Seco } g + 9.87)$. Los resultados de las pruebas de Shapiro-Wilk y Breusch-Pagan, así como sus comprobaciones gráficas pueden encontrarse en el ANEXO 32. El análisis de varianza ubicado en el ANEXO 33 indica diferencias significativas a nivel de la interacción. Este resultado se logra apreciar en la Figura 32 mostrada a continuación.

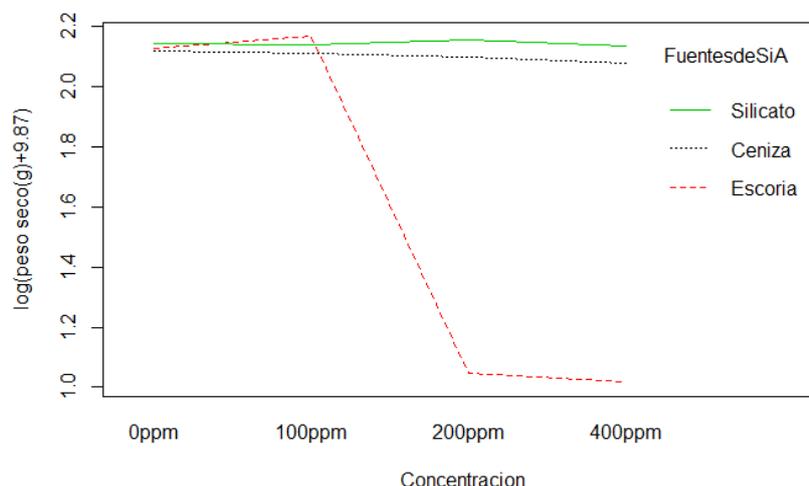


Figura 32: Interacción fuentes de silicio - concentración para los datos transformados de la variable peso seco, graficada usando R (RcoreTeam 2014)

Fuente: Elaboración propia

Es posible apreciar que los valores medidos para los testigos permanecieron prácticamente constantes para los tratamientos con ceniza y silicato con una ligera caída para los tratamientos con ceniza a medida que se incrementa la dosis. Los tratamientos con escoria sí muestran que dosis superiores a 100 ppm habrá caídas en el peso seco. Esto originado porque las plantas se estancan en su crecimiento y desarrollo. Se logra visualizar algunas intersecciones e inclinaciones diferentes, por lo tanto, se procedió con el análisis de efectos simples (ANEXO 34). Se realizó las pruebas de Tukey para comparar todos los tratamientos. Los resultados se muestran en la Tabla 17.

Tabla 17: Resumen estadístico de la variable peso seco (datos transformados usando $\log(\text{peso Seco } g + 9.87)$) con sus niveles de significancia calculados en base a la prueba de Tukey con un $\alpha = 0.05$

Fuentes de SiA	Concentración (ppm)	Media	Mínimo	Máximo	Repeticiones	Desviación estándar ($\times 10^{-3}$)	Error estándar ($\times 10^{-3}$)	Sig.
Escoria	100	2.17	2.16	2.17	2	9.47	6.7	a
Silicato	200	2.16	2.14	2.17	4	17.59	8.8	ab
Silicato	0	2.14	2.12	2.19	4	28.42	14.21	ab
Silicato	100	2.14	2.13	2.15	4	10.91	5.45	ab
Silicato	400	2.14	2.13	2.14	2	8.45	5.98	ab
Escoria	0	2.13	2.12	2.14	5	9.38	4.19	ab
Ceniza	0	2.12	2.10	2.16	5	22.98	10.28	ab
Ceniza	100	2.11	2.09	2.14	4	22.61	11.31	bc
Ceniza	200	2.10	2.10	2.10	2	3.66	2.59	bc
Ceniza	400	2.08	2.06	2.10	5	14.91	6.67	c
Escoria	200	1.05	1.02	1.08	3	34.55	19.95	d
Escoria	400	1.02	1.00	1.03	5	12.32	5.51	d

Fuente: Elaboración propia

e. Porcentaje de materia seca

Al realizar las pruebas de Shapiro-Wilk y Breusch-Pagan se comprobó que los datos obtenidos cumplen con los supuestos estadísticos mencionados en la metodología. Los resultados y sus comprobaciones gráficas pueden encontrarse en el ANEXO 35. El análisis de varianza ubicado en el ANEXO 36 indica diferencias significativas a nivel de la interacción. Este resultado se logra apreciar en la Figura 33 mostrada a continuación.

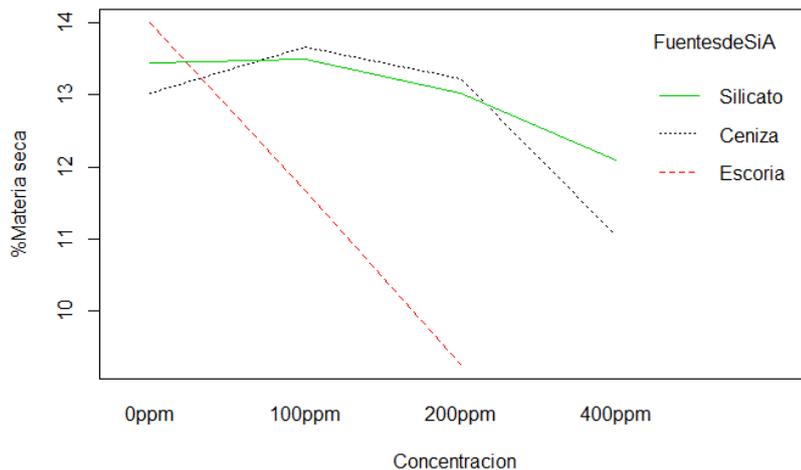


Figura 33: Interacción fuentes de SiA - concentración para la variable porcentaje de materia seca graficada usando R (RcoreTeam 2014)
Fuente: Elaboración propia

Al ser la materia seca un dato que relaciona el peso seco con el peso fresco es muy susceptible a errores en la medición. Es por eso que los valores de 0 ppm están un poco dispersos. Se observa que hay una clara tendencia para todas las enmiendas de reducir su porcentaje de materia seca a medida que se incrementa la dosis. El más marcado corresponde a los tratamientos con escoria los cuales caen por debajo del 10 por ciento a partir de 200 ppm. El segmento de 400 ppm no aparece ya que se tuvieron que eliminar dos datos por lo que le programa no logró terminar de trazar la línea. Sin embargo, esta sí se consideró para el análisis de efectos simples ANEXO 37. En la Tabla 18 se muestra el cuadro de comparación de Tukey, así como su gráfica de barras ilustrativa en la Figura 34.

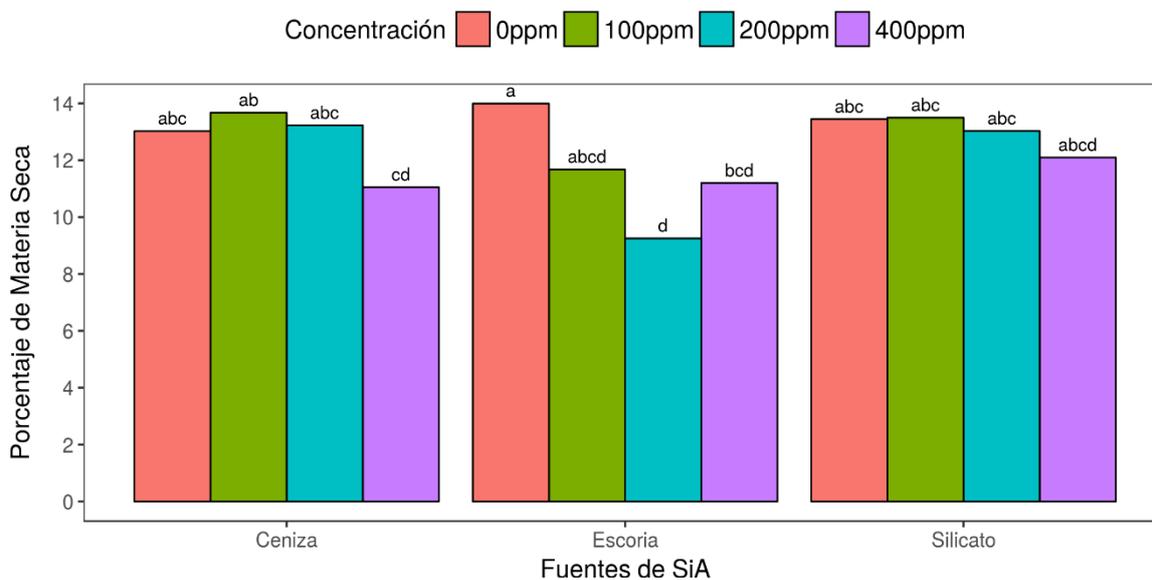


Figura 34: Porcentaje de materia seca graficado usando software Yupana (Lozano *et al.* 2018)
Fuente: Elaboración propia

Tabla 18: Resumen estadístico de la variable porcentaje de materia seca con sus niveles de significancia calculados en base a la prueba Tukey con un $\alpha= 0.05$

Fuentes de SiA	Concentración (ppm)	Media	Mínimo	Máximo	Repeticiones	Desviación estándar	Error estándar	Sig.
Escoria	0	13.99	12.40	15.71	5	1.24	0.56	a
Ceniza	100	13.67	13.16	14.17	4	0.50	0.25	ab
Silicato	100	13.50	12.69	14.41	4	0.85	0.43	abc
Silicato	0	13.45	12.92	13.90	4	0.47	0.23	abc
Ceniza	200	13.23	12.59	13.87	2	0.91	0.64	abc
Silicato	200	13.03	11.59	13.86	4	1.06	0.53	abc
Ceniza	0	13.02	11.73	14.70	5	1.14	0.51	abc
Silicato	400	12.10	11.86	12.34	2	0.34	0.24	abcd
Escoria	100	11.67	11.19	12.16	2	0.69	0.49	abcd
Escoria	400	11.20	10.09	11.91	3	0.97	0.56	bcd
Ceniza	400	11.05	9.04	12.34	5	1.27	0.57	cd
Escoria	200	9.25	7.80	11.04	3	1.64	0.95	d

Fuente: Elaboración propia

f. Habilidad de macollamiento

Los macollos son tallos secundarios que nacen a partir de yemas ubicadas en la parte basal de las plantas. Potencialmente, cada uno puede producir una panícula, por lo tanto, es importante medir la capacidad de macollamiento de cada planta frente a la incorporación de las enmiendas silicatadas. Con la finalidad de lograr el ajuste a los supuestos estadísticos mencionados en la metodología el análisis de esta variable empleó la transformación $\sqrt{\text{Log}(\#Macollos) + 9}$. Los resultados de las pruebas de Shapiro-Wilk y Breusch-Pagan, así como sus comprobaciones gráficas pueden encontrarse en el ANEXO 38. El análisis de varianza ubicado en el ANEXO 39 indica diferencias significativas a nivel de la interacción. Este resultado se logra apreciar en la Figura 35 mostrada a continuación.

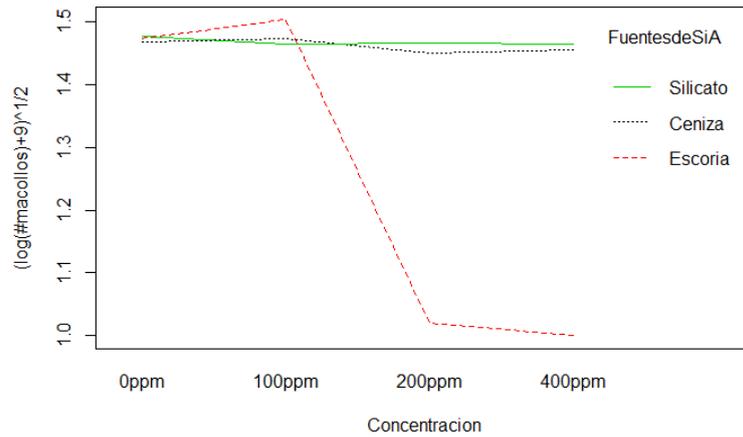


Figura 35: Interacción fuentes de silicio - concentración para los datos transformados del número de macollos, graficada usando R (RcoreTeam 2014)
Fuente: Elaboración propia

Es posible observar que la cantidad de macollos para los tratamientos con ceniza y silicato de potasio se mantuvo casi constante para todas las concentraciones, incluso para las más altas. Sin embargo, la línea de escoria presenta un incremento para la concentración de 100 ppm, pero luego una caída drástica a medida que se incrementa las dosis a 200 y 400 ppm. Esto se debe al estancamiento en el crecimiento y desarrollo de las plantas que recibieron esos tratamientos. Además, se observa una serie de intersecciones y diferencias en las pendientes. La significancia de las interacciones se encuentran en el ANEXO 40. Las pruebas Tukey se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19: Resumen estadístico de la variable número de macollos por planta (transformación $\sqrt{\log(\#Macollos) + 9}$), al final de la campaña con su nivel de significancia calculado en base a la prueba de Tukey con un $\alpha = 0.05$

Fuentes de SiA	Concentración (ppm)	Media	Mínimo	Máximo	Repeticiones	Desviación estándar ($\times 10^{-3}$)	Error estándar ($\times 10^{-3}$)	Sig.
Escoria	100	1.50	1.50	1.51	2	9.04	6.39	a
Silicato	0	1.48	1.46	1.50	4	14.06	7.03	ab
Escoria	0	1.47	1.46	1.49	5	8.59	3.84	ab
Ceniza	100	1.47	1.47	1.48	4	5.13	2.56	ab
Ceniza	0	1.47	1.45	1.49	5	14.88	6.66	b
Silicato	200	1.47	1.45	1.49	4	14.07	7.04	b
Silicato	400	1.46	1.46	1.47	2	5.26	3.72	b
Silicato	100	1.46	1.46	1.48	4	8.58	4.29	b
Ceniza	400	1.46	1.44	1.47	5	10.73	4.8	b
Ceniza	200	1.45	1.45	1.45	2	3.33	2.36	b
Escoria	200	1.02	1.00	1.04	3	19.43	11.22	c
Escoria	400	1.00	1.00	1.00	5	0	0	c

Fuente: Elaboración propia

g. Volumen radicular

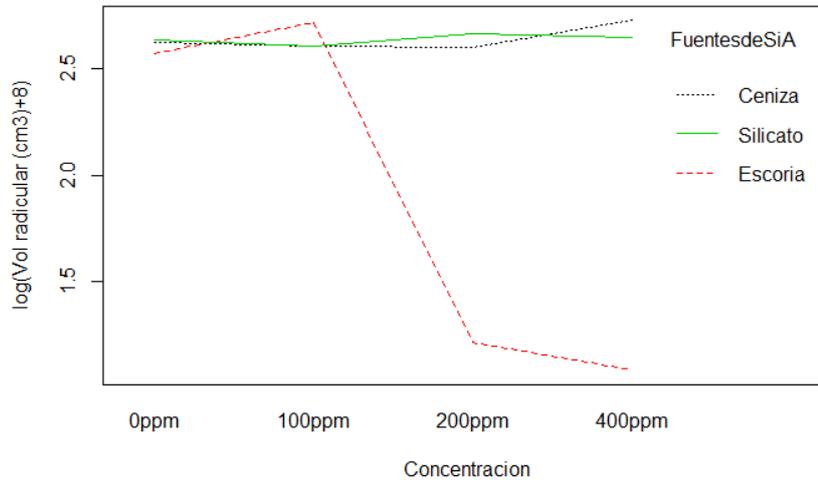


Figura 36: Interacción fuentes de silicio - concentración para los datos transformados de la variable volumen radicular graficada usando R (RcoreTeam 2014).

Fuente: Elaboración propia

El volumen radicular es un parámetro relacionado con la habilidad de macollamiento. Esto se basa en que, para que haya una parte aérea frondosa, es necesario que haya un sistema radicular bien desarrollado para abastecer agua y nutrientes a hojas, tallos e inflorescencias. Se eligió esta variable y no el peso seco de la raíz porque al ser el arroz una planta que posee tejido aerenquimático, era de esperarse que plantas más vigorosas presenten mayor volumen en su raíz por un incremento en los espacios de aire en el córtex y que va de la mano con una mayor proliferación radicular. Si se tomaba solo el peso seco, las pérdidas de raíces durante la cosecha hubiese generado más variabilidad indeseada. Con la finalidad de lograr el ajuste a los supuestos estadísticos mencionados en la metodología el análisis de esta variable empleó la transformación $\log(\text{volumen.cm}^3 + 8)$. Los resultados de las pruebas de Shapiro-Wilk y Breusch-Pagan, así como sus comprobaciones gráficas pueden encontrarse en el ANEXO 41. El análisis de varianza ubicado en el ANEXO 42, indica diferencias significativas a nivel de la interacción. Este resultado se logra apreciar en la Figura 36.

Esta gráfica, proporcionalmente muy parecida al del número de macollos por planta, muestra que el volumen de raíz ha permanecido casi constante para todas las concentraciones de los tratamientos de ceniza y silicato, sin embargo, la situación no fue la misma para los tratamientos con escoria. Hasta 100 ppm se observa un ligero incremento en el volumen radicular, sin embargo, dosis mayores a esas ocasionan disminución marcada de este

parámetro. Esto fue ocasionado por el estancamiento en el crecimiento y desarrollo de las plantas que recibieron este tratamiento. Las intersecciones son claras en la mayoría de los casos, sin embargo, el nivel de significancia estadística tiene que ser comprobado usando el análisis de efectos simples. Los resultados se pueden ver en el ANEXO 43. Este análisis nos permite saber dónde enfocarnos en las pruebas de Tukey mostradas en la Tabla 20 .

Tabla 20: Resumen estadístico de la variable volumen radicular (transformación $\log(\text{volumen. cm}^3 + 8)$) con sus niveles de significancia calculados en base a la prueba de Tukey con un $\alpha = 0.05$

Fuentes de SiA	Concentración (ppm)	Media	Mínimo	Máximo	Repeticiones	Desviación estándar ($\times 10^{-2}$)	Error estándar ($\times 10^{-2}$)	Sig.
Ceniza	400	2.73	2.66	2.81	5	5.96	2.66	a
Escoria	100	2.72	2.67	2.76	2	6.36	4.50	ab
Silicato	200	2.66	2.62	2.70	4	3.29	1.65	ab
Silicato	400	2.65	2.64	2.66	2	1.10	0.78	ab
Silicato	0	2.64	2.56	2.74	4	8.29	4.14	ab
Ceniza	0	2.63	2.51	2.69	5	6.96	3.11	ab
Ceniza	100	2.61	2.59	2.65	4	2.81	1.41	ab
Silicato	100	2.61	2.58	2.63	4	2.31	1.15	ab
Ceniza	200	2.60	2.59	2.61	2	1.00	0.71	ab
Escoria	0	2.58	2.50	2.62	5	5.05	2.26	b
Escoria	200	1.21	1.08	1.32	3	12.27	7.07	c
Escoria	400	1.08	1.00	1.13	5	5.02	2.25	c

Fuente: Elaboración propia

h. Número de panículas por planta

Con la finalidad de lograr el ajuste a los supuestos estadísticos mencionados en la metodología el análisis de esta variable empleó la transformación $\log(\#panículas + 100)$.

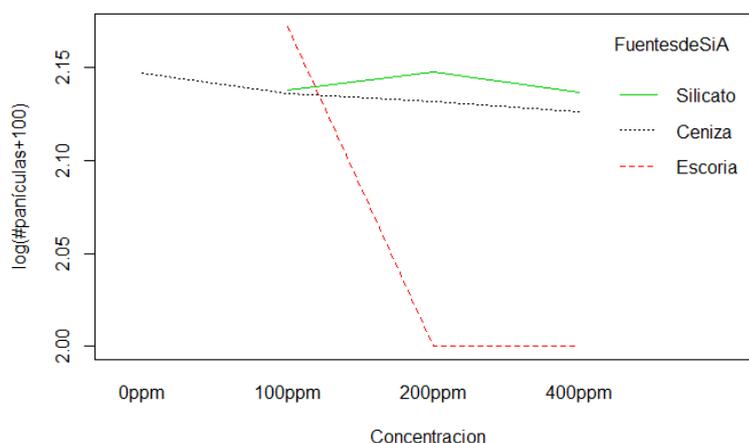


Figura 37: Interacción fuentes de silicio - concentración para los datos transformados del número de panículas, graficadas usando R (RcoreTeam 2014)

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de las pruebas de Shapiro-Wilk y Breusch-Pagan, así como sus comprobaciones gráficas pueden encontrarse en el ANEXO 44. El análisis de varianza ubicado en el ANEXO 45 indica diferencias significativas a nivel de la interacción. Este resultado se logra apreciar en la Figura 37.

Es posible observar que los datos de los testigos están incompletos para los tratamientos con escoria y silicato. Esto se debe a que se tuvo que eliminar un dato de cada tratamiento razón por la cual el programa no logró terminar de dibujar la gráfica. A pesar de esto es posible observar que para los casos de los tratamientos con silicato y ceniza hay una ligera tendencia a reducir el número de panículas a medida que la concentración se incrementa. Por el contrario, los tratamientos con escoria, incrementaron su número de panículas hasta 100 ppm, sin embargo, bajaron drásticamente a concentraciones mayores. Esto se debe a que las plantas que recibieron estos tratamientos detuvieron su crecimiento y desarrollo antes de entrar al macollamiento. Se logra ver que las líneas se intersecan en varios puntos y también presentan diferentes pendientes, lo cual indica clara influencia de la naturaleza de las enmiendas sobre las concentraciones. El grado de significancia entre las interacciones individuales fue revisado con el análisis de efectos simples (ANEXO 46). A continuación, en la Tabla 21 se muestra los resultados de la prueba Tukey para comparar datos.

Tabla 21: Resumen estadístico de la variable número de panículas por planta(transformación $\log(\#paniculas + 100)$) con sus niveles de significancia calculados en base a la prueba de Tukey con un $\alpha = 0.05$

Fuentes de SiA	Concentración (ppm)	Media	Mínimo	Máximo	Repeticiones	Desviación estándar ($\times 10^{-3}$)	Error estándar ($\times 10^{-3}$)	Sig.
Escoria	100	2.17	2.17	2.18	2	6.20	4.39	a
Silicato	0	2.15	2.14	2.16	2	15.09	10.67	ab
Silicato	200	2.15	2.14	2.15	4	5.94	2.97	b
Ceniza	0	2.15	2.14	2.15	5	2.59	1.16	b
Escoria	0	2.15	2.14	2.15	4	4.64	2.32	b
Silicato	100	2.14	2.13	2.14	4	3.97	1.99	bc
Silicato	400	2.14	2.13	2.14	2	4.48	3.17	bc
Ceniza	100	2.14	2.12	2.15	4	10.47	5.23	bc
Ceniza	200	2.13	2.12	2.14	2	11.33	8.01	bc
Ceniza	400	2.13	2.11	2.14	5	9.32	4.17	c
Escoria	200	2.00	2.00	2.00	3	0.00	0.00	d
Escoria	400	2.00	2.00	2.00	5	0.00	0.00	d

Fuente: Elaboración propia

i. Número de espiguillas por planta

Al realizar las pruebas de Shapiro-Wilk y Breusch-Pagan se comprobó que los datos obtenidos cumplen con los supuestos estadísticos mencionados en la metodología. Los resultados y sus comprobaciones gráficas pueden encontrarse en el ANEXO 47. El análisis de varianza ubicado en el ANEXO 48 indica diferencias significativas a nivel de la interacción. Este resultado se logra apreciar en la Figura 38 mostrada a continuación:

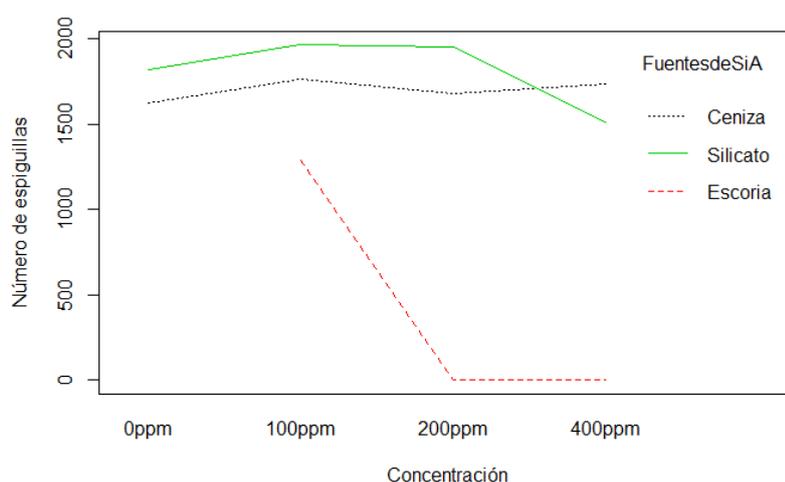


Figura 38: Interacción fuentes de SiA - concentración para la variable número de espiguillas por planta, graficada usando R (RcoreTeam 2014)

Fuente: Elaboración propia

Es posible observar que el número de espiguillas por planta para los tratamientos con ceniza permanecieron más o menos constantes para todas las concentraciones, lo cual indica que mayores concentraciones de Si proveniente de la ceniza no incrementó el número de espiguillas. Para el caso de los tratamientos con silicato de potasio se observa un ligero incremento para las concentraciones de 100 ppm, un mantenimiento de este parámetro para concentraciones de 200 ppm y una ligera reducción para concentraciones de 400 ppm lo cual indica que a excesivas altas concentraciones puede haber una disminución en el número de espiguillas. Para el caso de los tratamientos con escoria, la línea del testigo no aparece graficada porque tuvo que eliminarse un dato, lo cual imposibilitó al programa estadístico para terminar de dibujar la línea. A pesar de esto, se puede ver una marcada tendencia a producir menos espiguillas con dosis crecientes de escoria. Seguidamente se procedió a realizar el análisis de efectos simples (ANEXO 49) para evaluar el grado de significancia entre las interacciones. Posteriormente se realizó la prueba de Tukey para contrastar todos los tratamientos expresada en la Tabla 22.

Tabla 22: Resumen estadístico de la variable número de espiguillas por planta con sus niveles de significancia calculados en base la prueba Tukey con un $\alpha= 0.05$

Fuentes de SiA	Concentración (ppm)	Media	Mínimo	Máximo	Repeticiones	Desviación estándar	Error estándar	Sig.
Silicato	100	1963	1832	2116	4	118	59	a
Silicato	200	1953	1501	2427	4	467	233	a
Escoria	0	1909	1815	2038	4	109	55	a
Silicato	0	1822	1496	2178	4	327	164	a
Ceniza	100	1761	1609	1928	4	175	87	a
Ceniza	400	1738	1644	1850	5	90	40	a
Ceniza	200	1683	1416	1949	2	377	267	a
Ceniza	0	1623	1142	2150	5	378	169	a
Silicato	400	1510	1462	1557	2	67	48	a
Escoria	100	1287	916	1658	2	525	371	a
Escoria	200	0	0	0	3	0	0	b
Escoria	400	0	0	0	5	0	0	b

Fuente: Elaboración propia

j. Número de espiguillas por panícula

A partir de los datos de número de panículas por planta y número de espiguillas por planta se calculó el promedio de espiguillas por panículas para cada tratamiento. Los valores medidos cumplen los supuestos estadísticos mencionados en la metodología. Los resultados de las pruebas de Shapiro-Wilk y Breusch-Pagan, así como sus comprobaciones gráficas pueden encontrarse en el ANEXO 50. El análisis de varianza ubicado en el ANEXO 51 indica diferencias significativas a nivel de la interacción. Este resultado se logra apreciar en la Figura 39 mostrada a continuación:

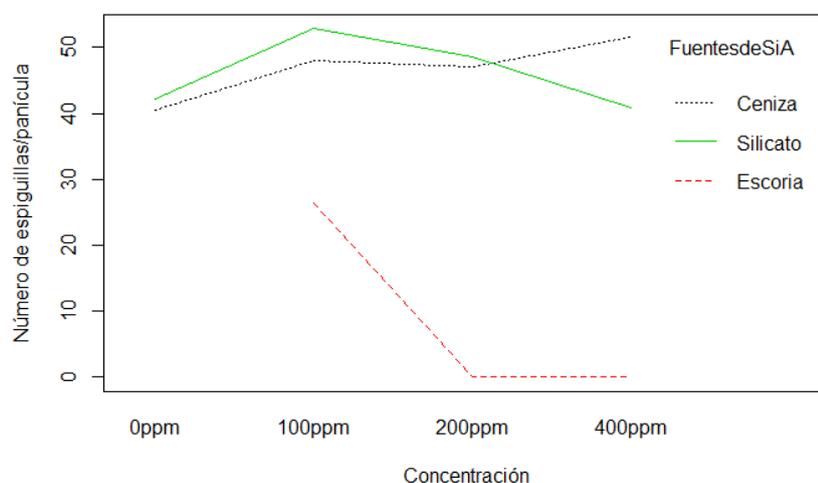


Figura 39: Interacción fuentes de SiA - concentración para la variable número de espiguillas por panícula graficada usando R (RcoreTeam 2014)

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que los tratamientos con ceniza incrementaron ligeramente el número de espiguillas/panícula a medida que se incrementaron las concentraciones mientras que los tratamientos con silicato de potasio, ocasionaron un incremento en este parámetro hasta los 100 ppm sin embargo, hubo un descenso consecutivo para las concentraciones de 200 y 400 ppm, lo cual sugiere que altas dosis de este producto puede reducir los rendimientos. Al ver la línea correspondiente a la escoria, podemos ver que los datos del testigo no aparecen graficados. Esto se debe a que un dato tuvo que ser eliminado ya que ocasionada un desajuste en los supuestos estadísticos. Es posible observar que incluso en la concentración de 100 ppm, los datos están muy por debajo de sus pares de ceniza y silicato. Más aún, a medida que la dosis va incrementándose simplemente no hay formación de espiguillas por el efecto tóxico de estas altas dosis de escoria. Es posible ver las intersecciones y los cambios en las pendientes de los segmentos de línea lo cual indica fuertes interacciones de la naturaleza de la enmienda sobre las concentraciones por lo que se realizó un análisis de efectos simples (ANEXO 52) para cuantificar estas interacciones. El resumen de los datos habiendo realizado la prueba de Tukey se muestra en la Tabla 23.

Tabla 23: Resumen estadístico de la variable número de espiguillas por panícula con sus niveles de significancia calculados en base la prueba Tukey con un $\alpha = 0.05$

Fuentes de SiA	Concentración (ppm)	Media	Mínimo	Máximo	Repeticiones	Desviación estándar	Error estándar	Sig.
Silicato	100	53	47	59	4	5	2	a
Ceniza	400	52	49	57	5	3	1	a
Silicato	200	49	36	61	4	13	7	a
Ceniza	100	48	45	52	4	3	2	a
Escoria	0	48	43	52	4	4	2	a
Ceniza	200	47	43	51	2	6	4	ab
Silicato	0	42	39	47	4	4	2	ab
Silicato	400	41	41	41	2	0	0	ab
Ceniza	0	41	28	55	5	10	5	ab
Escoria	100	26	19	33	2	10	7	b
Escoria	200	0	0	0	3	0	0	c
Escoria	400	0	0	0	5	0	0	c

Fuente: Elaboración propia

k. Rendimiento estimado

Para estimar los datos de rendimiento se asumió un porcentaje de formación de grano del 90 por ciento y se usó el peso de 1000 granos reportado por Abad (2017). Los valores cumplen los supuestos estadísticos mencionados en la metodología. Los resultados de las pruebas de Shapiro-Wilk y Breusch-Pagan, así como sus comprobaciones gráficas pueden encontrarse en el ANEXO 53. El análisis de varianza ubicado en el ANEXO 54 indica diferencias significativas a nivel de la interacción. Este resultado se logra apreciar en la Figura 40 mostrada a continuación:

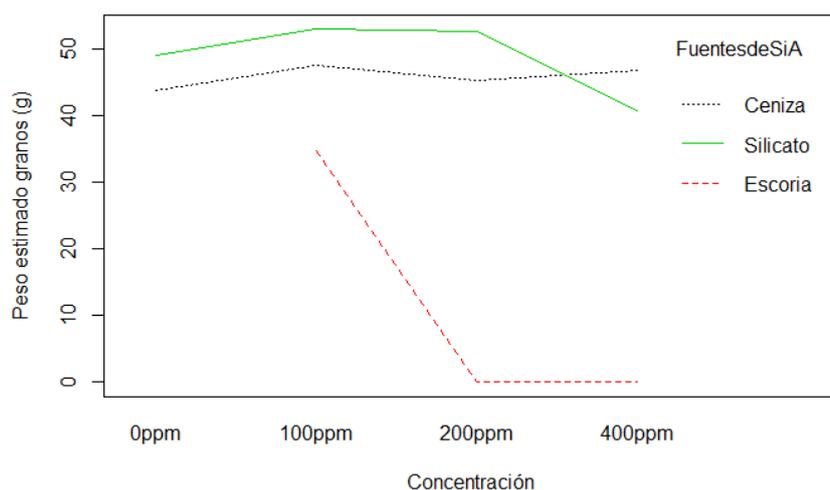


Figura 40: Interacción fuentes de SiA - concentración para la variable rendimiento estimado en gramos de grano producido por planta, graficados usando R (RcoreTeam 2014)

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que la distribución de las líneas es análoga a la del número de espiguillas por planta. Podemos observar que los tratamientos con ceniza permanecen estadísticamente similares en sus rendimientos estimados para cualquier concentración. Sin embargo, para el caso de los tratamientos con silicato de potasio, se observan incrementos ligeros para los tratamientos de 100 y 200 ppm, pero una caída en el rendimiento para los tratamientos con 400 ppm. Esto podría significar un síntoma de toxicidad. Para el caso de los tratamientos con escoria, no se observa los datos del testigo ya que tuvo que eliminarse dos datos que no encajaban con los supuestos. A pesar de esto, es posible ver la marcada tendencia a la reducción de rendimientos respecto a los otros testigos y para los tratamientos con 200 y 400 ppm se observa niveles de cero ya que en ningún caso hubo formación de espiguillas. Se logra observar intersecciones y cambios en las pendientes lo cual son indicadores de la influencia que ejerce la naturaleza de las enmiendas en las concentraciones aplicadas. Esto

se logra cuantificar mediante el análisis de efectos simples ANEXO 55. En la Tabla 24, se muestra los datos de la prueba de Tukey.

Tabla 24: Resumen estadístico de la variable rendimiento estimado en gramos de grano producido por planta con sus niveles de significancia calculados en base a la prueba de Tukey con un $\alpha= 0.05$

Fuentes de SiA	Concentración (ppm)	Media	Mínimo	Máximo	Repeticiones	Desviación estándar	Error estándar	Sig.
Silicato	100	53.0	49.5	57.1	4	3.2	1.6	a
Silicato	200	52.7	40.5	65.5	4	12.6	6.3	a
Escoria	0	51.5	49.0	55.0	4	3.0	1.5	a
Silicato	0	49.2	40.4	58.8	4	8.8	4.4	a
Ceniza	100	47.5	43.4	52.1	4	4.7	2.4	a
Ceniza	400	46.9	44.4	50.0	5	2.4	1.1	a
Ceniza	200	45.4	38.2	52.6	2	10.2	7.2	a
Ceniza	0	43.8	30.8	58.1	5	10.2	4.6	a
Silicato	400	40.8	39.5	42.0	2	1.8	1.3	a
Escoria	100	34.7	24.7	44.8	2	14.2	10.0	a
Escoria	200	0.0	0.0	0.0	3	0.0	0.0	b
Escoria	400	0.0	0.0	0.0	5	0.0	0.0	b

Fuente: Elaboración propia

4.2.3. Discusiones

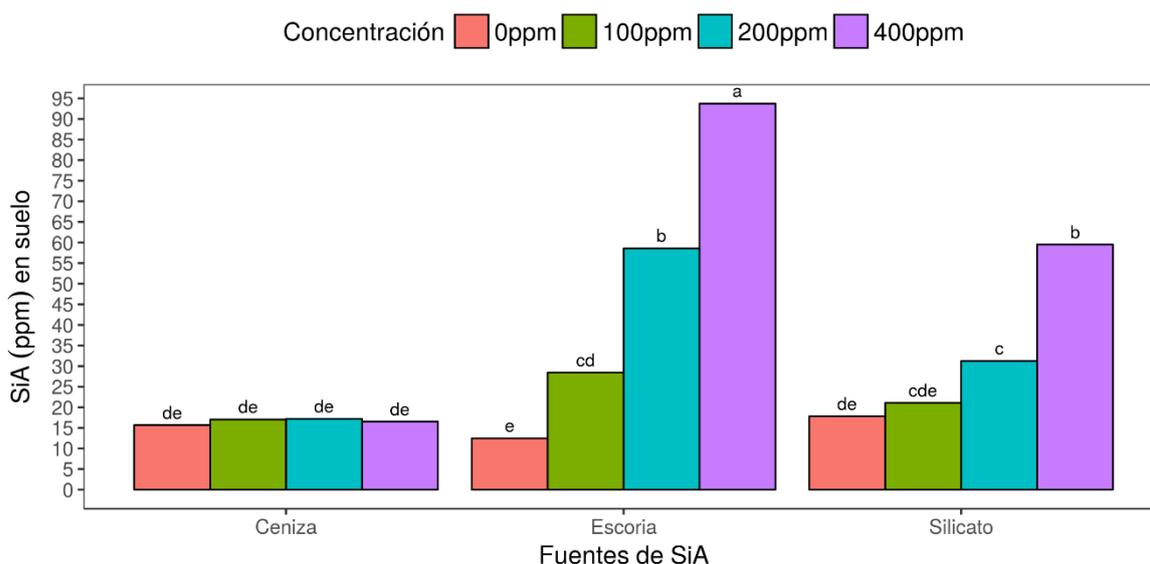


Figura 41: Disponibilidad de Si en el suelo al final de la campaña graficada usando el software Yupana (Lozano *et al.* 2018)

Fuente: Elaboración propia

Recalcamos que los tratamientos de 100, 200 y 400 ppm de SiA, representan la concentración teórica inicial del SiA inmediatamente luego de mezclar las enmiendas con el material de suelo según lo expuesto en la metodología. En pocas palabras, se usó el material de suelo para bajar la concentración de SiA de las enmiendas.

Ahora, tomemos como punto de partida la concentración de silicio disponible (SiA) al final de la campaña mostrada en la Figura 41. Podemos observar que los tratamientos con ceniza presentan prácticamente la misma concentración final de SiA, lo cual se corrobora con la prueba Tukey indicando que todos los tratamientos de 100, 200 y 400 ppm resultaron ser estadísticamente similares al testigo con media de 15 ppm. Esto nos indica que el efecto del suelo, el agua, los fertilizantes y los exudados radiculares influyeron para que el silicio disponible inicialmente medido en la ceniza ante de ser incorporada al suelo, vaya disminuyendo progresivamente al punto de equipararse con la del testigo. En otras palabras, el grado de solubilidad no se mantuvo. La explicación de esto lo encontramos en los trabajos realizados por Elgawhary y Lindsay (1972), quienes indican que a altas concentraciones de Si, este elemento precipita/polimeriza. Por otra parte, es posible observar que estos factores incrementaron un poco la disponibilidad natural del suelo, inicialmente medida en 11.8 ppm. La explicación la encontramos con esos mismos autores quienes en un suelo limoso identificaron que cuando las muestras eran incubadas en húmedo por 50 días, la solubilidad del silicio pasaba de ser 18 ppm a 25 ppm.

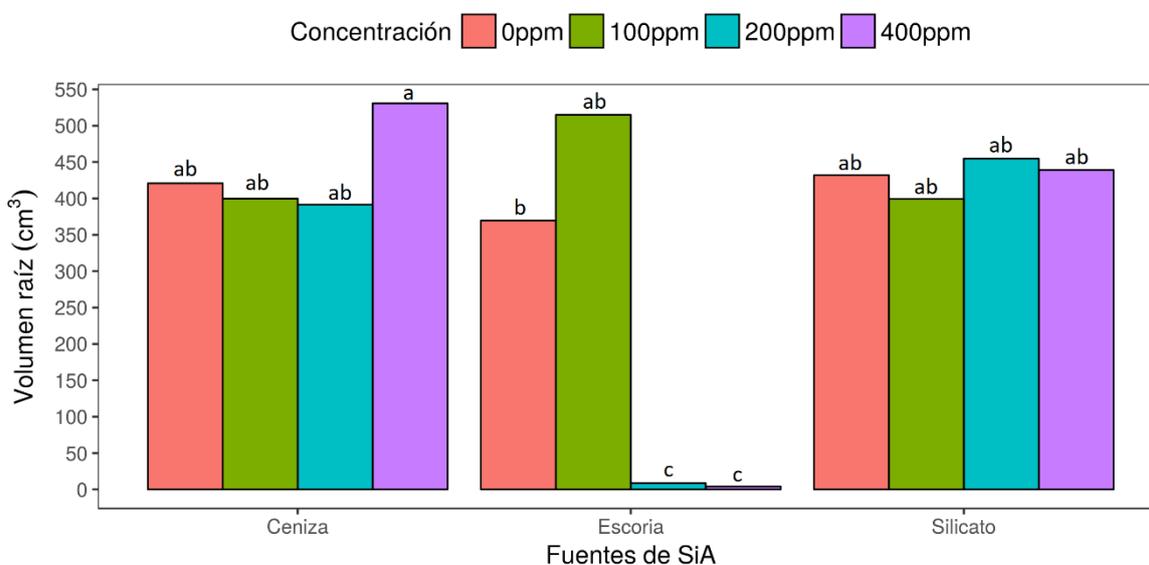


Figura 42: Volumen radicular mostrando los datos originalmente medidos y los niveles de significancia calculados con la transformación $\log(\text{volumen.cm}^3 + 8)$ generado usando el software Yupana (Lozano *et al.* 2018)

Fuente: Elaboración propia

Un efecto similar se observa de forma general en los tratamientos con escoria y silicato, sin embargo, para escoria 400 observamos que la disponibilidad bajó a 93.7 ppm, mientras que para silicato 400 a 59.4 ppm. Hablando específicamente del caso del silicato también podemos decir que esa cifra alcanzada se debe a la influencia del suelo, agua, fertilizantes y exudados radiculares. Sin embargo, para el caso de la escoria, se tendría que excluir la influencia de los exudados radiculares para los tratamientos de 200 y 400 ppm, ya que el desarrollo radicular en estos casos fue mínimo como se observa en la Figura 42 de volumen radicular.

Podríamos afirmar que, entre las tres fuentes de silicio, la que va a ocasionar un incremento en la concentración de Si disponible de forma más sostenible es el silicato de potasio. Probablemente se deba a que la naturaleza de esta enmienda haga que el H_2SiO_4 se haya polimerizado pero los compuestos formados no hayan perdido tanta solubilidad, manteniendo la concentración de equilibrio en solución suelo más arriba de la ceniza y en rangos similares a la escoria.

Observamos que la escoria a la misma dosis de 100 ppm incrementa más el SiA que el silicato mismo (aunque la diferencia no llega a ser estadísticamente significativa). Sin embargo, la escoria causó problemas a las plantas para las concentraciones de 200 y 400 ppm. Esto tiene su explicación en las elevadas concentraciones de Ca y Mg que tiene en su composición y que definitivamente tuvo un efecto enalante muy intenso que cambió las condiciones óptimas de pH para el desarrollo del arroz. Además de eso, hubo grandes cantidades de otros elementos que pudieron haber causado toxicidad, entre ellos algunos elementos pesados. Esto puede corroborarse con los datos de la Tabla 10 en donde es posible observar que las cantidades de Fe, Mn, Pb y Cr presentes en los tratamientos de escoria excedieron ampliamente las cantidades incorporadas en los tratamientos con silicato y ceniza. Por lo tanto, aparte del pH excesivamente alto que limita la absorción de micronutrientes y fósforo, estos elementos pudieron haber interactuado con el medio produciendo sustancias tóxicas para la planta. Sin embargo, cualquier toxicidad o deficiencia tendría que corroborarse con un análisis de tejido, el cual no fue posible realizar. Mucho se ha discutido también de la influencia del silicio en aliviar estrés por toxicidades de elementos (Gu *et al.*, 2011), pero al parecer también influye en la facilidad que tenga para ingresar a las plantas y cumplir este rol.

Observamos que los contenidos de Si en raíz en la Figura 43, para esos dos tratamientos está por debajo que los testigos y del resto de tratamientos, lo cual corrobora lo establecido por Ma *et al.* (2007) quien menciona que las bajas temperaturas sumadas al pH alto reduce la efectividad de transporte del OsLsi-2, con lo cual no se obtendrían los beneficios esperados.

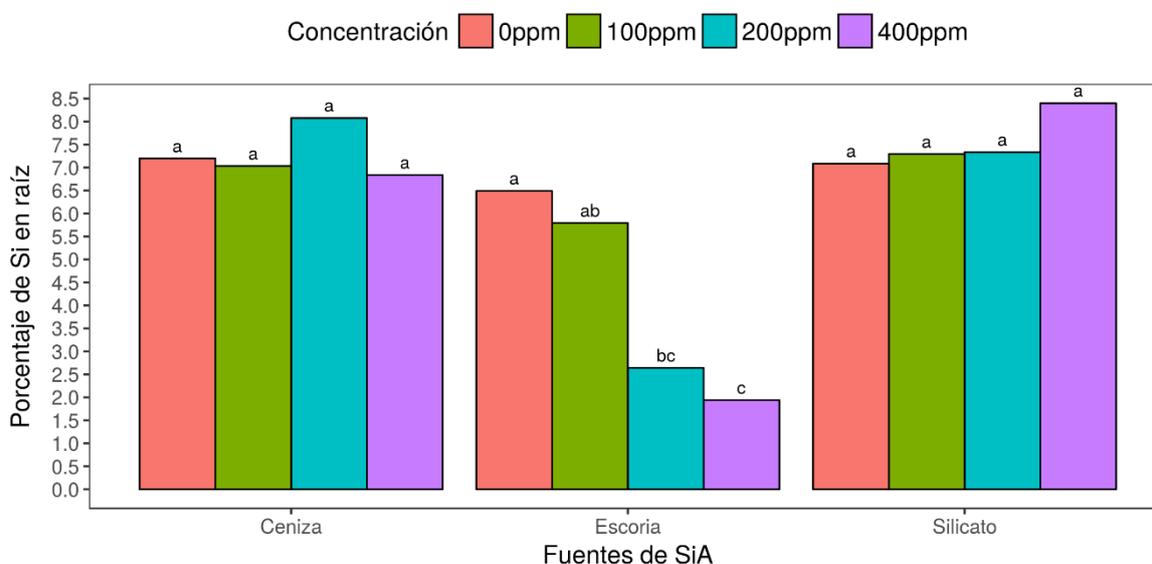


Figura 43: Porcentaje de Si en raíz graficado usando software Yupana (Lozano *et al.* 2018)
Fuente: Elaboración propia

Para el resto de tratamientos incluido el de escoria a 100 ppm, las cantidades de Si en raíz fueron similares los testigos. Esto indica que las cantidades de Si en los suelos sin aplicación de enmiendas fueron suficientes para completar la dotación de este elemento y cubrir la demanda en este tejido. Esto lo podemos observar en la Tabla 25 en donde se hace el balance del silicio absorbido por las plantas y el que teóricamente se agregó al inicio.

Es posible observar que las cantidades extraídas por las plantas del tratamiento testigo fueron muy similares al resto de tratamientos salvo para el de silicato 200 que estuvo muy por encima y de los de escoria 200 y 400 que estuvieron muy por debajo, por lo tanto, se puede concluir que el suelo podía abastecer el silicio necesario o de lo contrario este llegaba con el agua de riego.

Tabla 25: Balance de extracción total de silicio

FUENTES SiA	CONCENTRACION (ppm)	EXTRACCIÓN* (mg)	SG	SiA a la siembra (mg)**	DÉFICIT(mg)	SG***
Ceniza	0	5259	bc	68	-5191	cd
Ceniza	100	5055	c	648	-4407	bc
Ceniza	200	5150	c	1228	-3921	bc
Ceniza	400	5176	c	2388	-2787	b
Escoria	0	4946	c	68	-4878	cd
Escoria	100	6540	abc	648	-5892	cd
Escoria	200	39	d	1228	1190	a
Escoria	400	12	d	2388	2376	a
Silicato	0	5585	bc	68	-5517	cd
Silicato	100	6391	abc	648	-5743	cd
Silicato	200	7431	a	1228	-6203	d
Silicato	400	7324	ab	2388	-4936	cd

Fuente: Elaboración propia

Es difícil decir en qué momento bajo tanto la disponibilidad del silicio. Una recomendación para algún futuro ensayo sería evaluar una vez a la semana la disponibilidad de este elemento y ver si el cambio se dio al inicio de la campaña, a la mitad o al final. Pero lo que se sabe es que los tratamientos con silicato sí tuvieron mayor Si disponible a lo largo de la campaña y, aun así, el incremento en el contenido de Si no difiere del testigo de forma significativa. A pesar de esto, cuando observamos los datos de silicio en órganos aéreos en la Figura 44, la situación cambia.

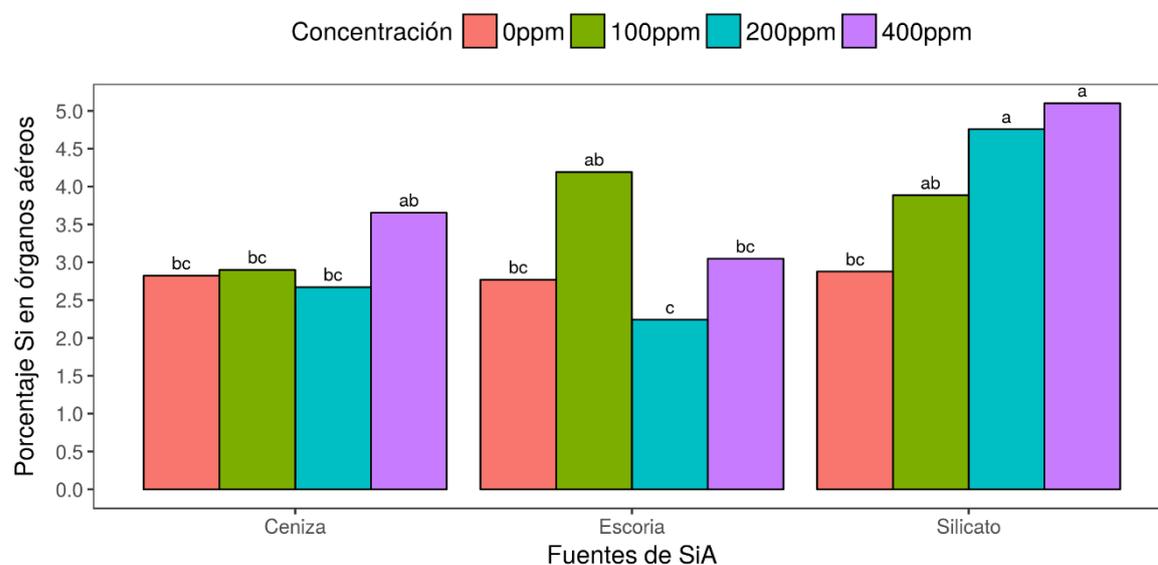


Figura 44: Porcentaje de silicio en órganos aéreos graficadas usando software Yupana (Lozano *et al.* 2018).

Fuente: Elaboración propia

En este caso, sí se logra ver que los tratamientos con silicato de potasio incrementaron su concentración de Si en la mezcla de hojas, tallos y panículas de forma análoga al incremento en las dosis aplicadas. Incluso cuando sus niveles de significancia son iguales, los tratamientos con 200 y 400 ppm sí llegan a diferenciarse del testigo. Es posible ver en esa parte de la gráfica que, si hubiese una dosis mayor, quizá 800 ppm, el incremento en el contenido sería mínimo, ya que la tendencia está adquiriendo un comportamiento asintótico. Esto también nos indica que probablemente valores mayores a 59.5 ppm de SiA en solución suelo, produzcan cada vez menos incremento en la acumulación del silicio en los tejidos para este cultivar. Por ende, podríamos deducir que el valor de 93.7 ppm presentado por la escoria 400, quizá represente el máximo valor de SiA que puede alcanzar este suelo más enmienda antes que se polimerice.

Por otra parte, el tratamiento con escoria 100 ppm, se muestra muy superior al testigo, aunque no llega a diferenciarse totalmente en términos de significancia. Es interesante ver que su contenido es estadísticamente igual al de su equivalente de silicato, lo cual confirma que ambas fuentes tienen la capacidad de mantener altos niveles de Si disponibles. Sin embargo, como ya se mencionó, la escoria tiene la desventaja de alterar otros componentes químicos en el suelo que resultan perjudiciales a medida que las concentraciones se incrementan. Esto se ve con los tratamientos de escoria 200 y 400 ppm, cuyos valores de Si disminuyen al punto de equipararse con los del testigo. Esto quizá por los problemas con los otros elementos en el suelo y el pH definitivamente.

Por último, en cuanto a la ceniza, salvo por el tratamiento de ceniza 400 que fue ligeramente mayor, el contenido de Si en los tratamientos con 100 y 200 ppm fueron estadísticamente igual al testigo. Si los comparamos con sus análogos provenientes del silicato vemos que el tratamiento de silicato 100 es igual al de ceniza 400. Esto confirma que el silicio en los suelos tratados con ceniza tuvo menos disponibilidad que los suelos tratados con silicato de potasio. Esto podría deberse a lo manifestado por Le Blond *et al.* (2010), que las temperaturas de combustión mayores a 700 °C podría cristalizar el silicio reduciendo drásticamente su solubilidad.

Ahora, procederemos a discutir el efecto del silicio en los componentes del rendimiento. El primer componente es el *número de panículas por metro cuadrado*. En primer lugar, haremos la salvedad siguiente: como este ensayo fue realizado en macetas, la unidad de área fue una maceta, no un metro cuadrado. Y como una maceta solo sostuvo a una planta, este

parámetro se expresó como *número de panículas por planta*. Definitivamente estos datos no son inmediatamente extrapolables a condiciones de campo, ya que, en una plantación, un metro cuadrado va a contener más de una sola planta. Sin embargo, la cantidad de panículas va a estar en función de la cantidad de macollos, independientemente de cuantas plantas intervengan. Es más, cuando la densidad de siembra es menor las plantas producen más macollos y cuando la densidad es mayor, ocurre lo contrario, pero se logra tener números similares de macollos en campos bien manejados (Yoshida, 1981). Es por eso es que se optó por cuantificar la habilidad de macollamiento del arroz, cual se expresa en la Figura 45.

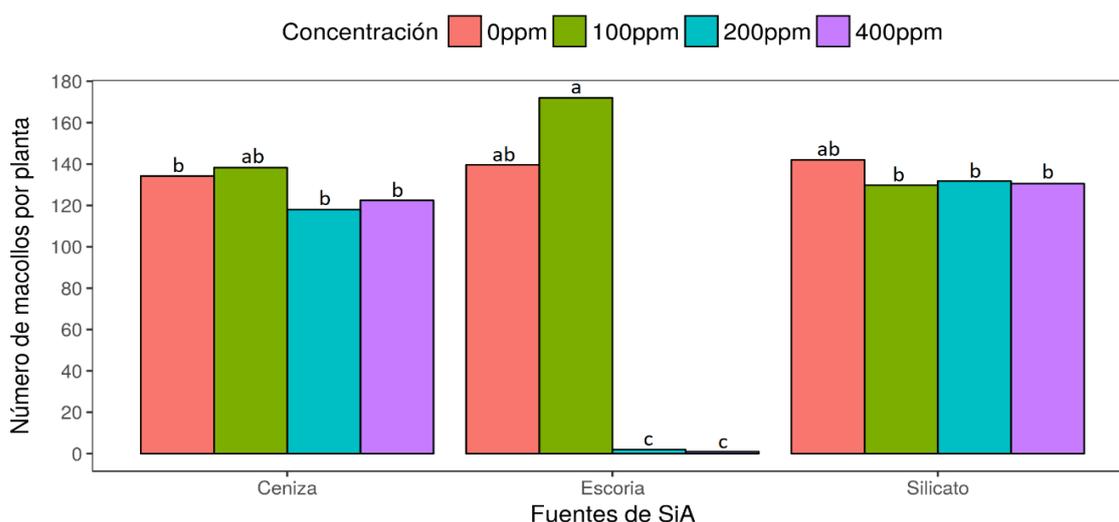


Figura 45: Número de macollos por planta mostrando los datos originalmente medidos y los niveles de significancia calculados con la transformación $\sqrt{\text{Log}(\#\text{Macollos}) + 9}$, generada usando el software Yupana (Lozano *et al.* 2018)

Fuente: Elaboración propia

Una de las primeras características que saltan a la vista es la gran cantidad de macollos que hay incluso en los testigos. Esto se debe a que se cuantificó *todos* los macollos (primarios, secundarios, terciarios y cuaternarios) incluso los que se encontraban en formación en la base de las plantas. Este parámetro es el único que no se vio afectado directamente por las bajas temperaturas. Durante todo el estadio fenológico de macollamiento, las temperaturas fueron óptimas como se puede ver en la gráfica de temperatura ambiental. Por lo tanto, se pueden sacar las siguientes conclusiones. Para los tratamientos con silicato, se puede ver que todas las concentraciones usadas son estadísticamente iguales al testigo. El silicato de potasio fue la enmienda más “limpia” con respecto a otros elementos. Al revisar las figuras de los contenidos de elementos, observamos que a diferencia de la escoria y de la ceniza, el silicato de potasio, solo aportó esos dos elementos. Es más, la cantidad de potasio total incorporado fue muy similar para las tres enmiendas y la disponibilidad de silicio en suelo

fue la más alta entre las tres enmiendas como ya se discutió. Si bien es cierto, el silicio en tejido se incrementó con dosis crecientes de este producto, eso no se ve repercutido en un incremento en el número de macollos. Por lo tanto, se podría concluir que el silicio no tiene influencia en este componente del rendimiento. Habiendo dicho esto, se observa en la figura que el tratamiento de escoria 100 presentó el mayor número de macollos. Aunque no llega ser estadísticamente significativo respecto al testigo, el anterior análisis nos permite deducir que tal incremento no se debe a la influencia del silicio, sino a alguno de los otros elementos que componen la escoria. Según Yoshida (1981) y Heros (2012), el nitrógeno es el principal elemento que juega un rol en este estadio y debido a que las dosis fueron las mismas para todos los tratamientos no se tendría diferencia marcadas tal y como se demostró. También como ya se mencionó la fertilización con este elemento sufrió un retraso, habiéndose aplicado cincuenta por ciento de la dosis cuando la inducción floral ya estaba ocurriendo. Esto también pudo haber fomentado un incremento en el número de macollos que al final no produjeron panículas (Heros, 2012). Esto se observa con más claridad en la Tabla 26.

Tabla 26: Porcentajes promedios de formación de panículas respecto del número de macollos con significancia $\alpha=0.05$

Fuente de SiA	Concentración	Media (%)	SG
Ceniza	0	30.2	a
Ceniza	100	26.6	a
Ceniza	200	30.1	a
Ceniza	400	27.7	a
Escoria	0	30.4	a
Escoria	100	28.3	a
Escoria	200	0.0	b
Escoria	400	0.0	b
Silicato	0	30.3	a
Silicato	100	28.8	a
Silicato	200	30.9	a
Silicato	400	28.4	a

Fuente: Elaboración propia

En cuanto al tratamiento con ceniza los datos para todos los tratamientos fueron estadísticamente iguales al testigo, lo que guarda relación considerando que el silicio no tiene influencia en este parámetro y que las cantidades de nitrógeno recibido fueron las mismas. Sin embargo, se puede ver que el número de macollos se redujo ligeramente a medida que se incrementaron la dosis. Esto se observa de forma análoga en el peso seco, en donde el tratamiento de ceniza 400 resulta ser significativamente menor al testigo.

La explicación a este fenómeno podría deberse a una ligera toxicidad por las cantidades de microelementos que fueron agregados: Fe, Cu, Zn, Mn y Cd. Esto puede observarse en la Tabla 10. Como ya se vio, para este tratamiento el pH se mantuvo entre 5 y 5.5 durante toda la campaña. Este pH favorece la solubilidad de los micronutrientes, por lo tanto, probablemente esto haya ocasionado este fenómeno. Los pesos secos (Figura 47) para ceniza y silicato se mantuvieron análogos a la habilidad de macollamiento (Figura 45) y estos a su vez, al número de panículas por planta (Figura 46).

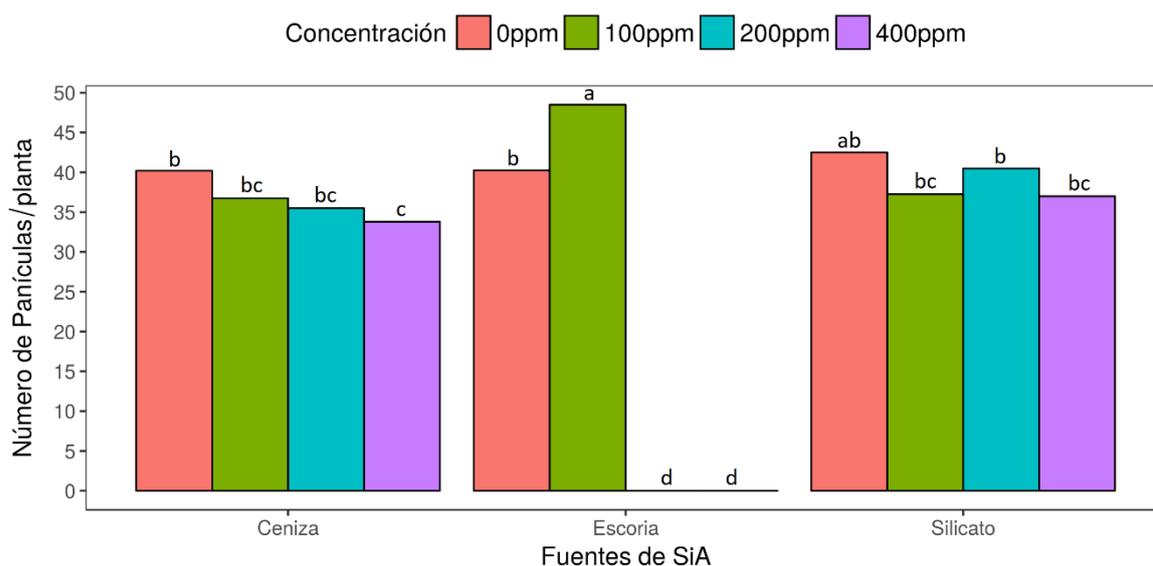


Figura 46: Número de panículas por planta mostrando los datos originalmente medidos y los niveles de significancia calculados con la transformación $\log(\#panículas + 100)$, generadas usando el software Yupana (Lozano *et al.* 2018)
Fuente: Elaboración propia

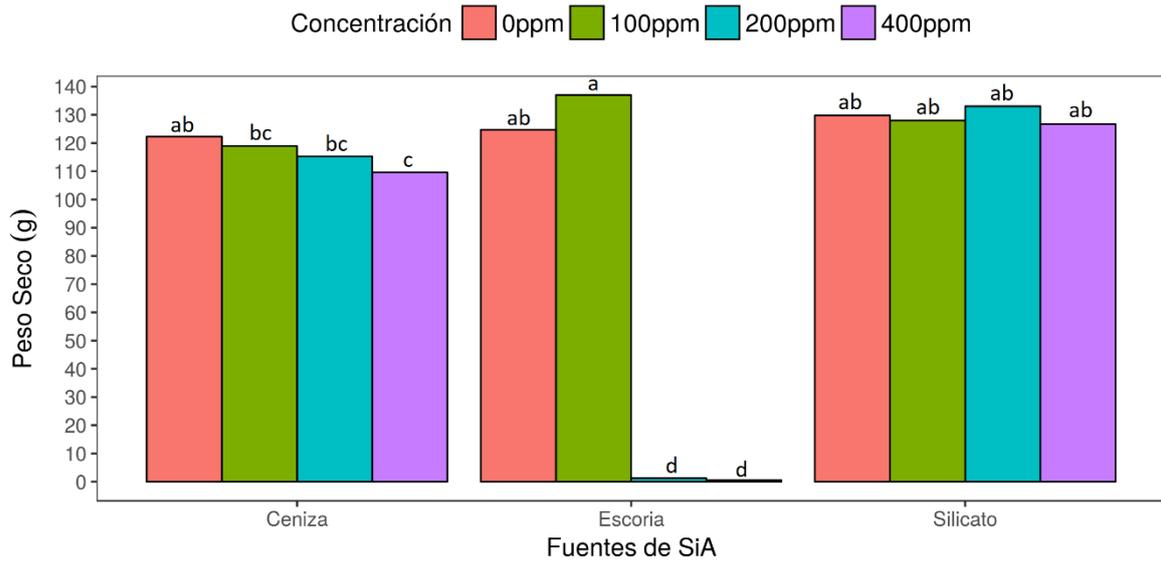


Figura 47: Peso seco total mostrando los datos originalmente medidos y los niveles de significancia calculados con la transformación $\log(\text{peso Seco } g + 9.87)$, generado usando el software Yupana (Lozano *et al.* 2018)

Fuente: Elaboración propia

Estos datos surgen como una consecuencia de lo anteriormente explicado. De igual forma, para el caso de los tratamientos con silicato de potasio, no se logra ver un incremento en el número de panículas respecto del testigo, lo que indica que el silicio, ni el potasio han tenido influencia en esta condición. Con respecto a los datos de ceniza y escoria, los números de panículas por planta son proporcionales a la cantidad de macollos también (Tabla 26).

El siguiente componente del rendimiento es el *número de espiguillas/panícula*. En condiciones de campo es inviable contar la cantidad de espiguillas por planta, por lo tanto, se prefiere tomar una muestra representativa de la plantación en estudio y poder colectar ese dato. Sin embargo, para efectos de este ensayo, no se tomó una muestra de panículas, sino se optó por contabilizar todas las espiguillas que producía cada planta. En la Figura 48, se muestra los promedios de espiguillas/panícula calculados a partir del número de panículas por planta y el número de espiguillas por planta.

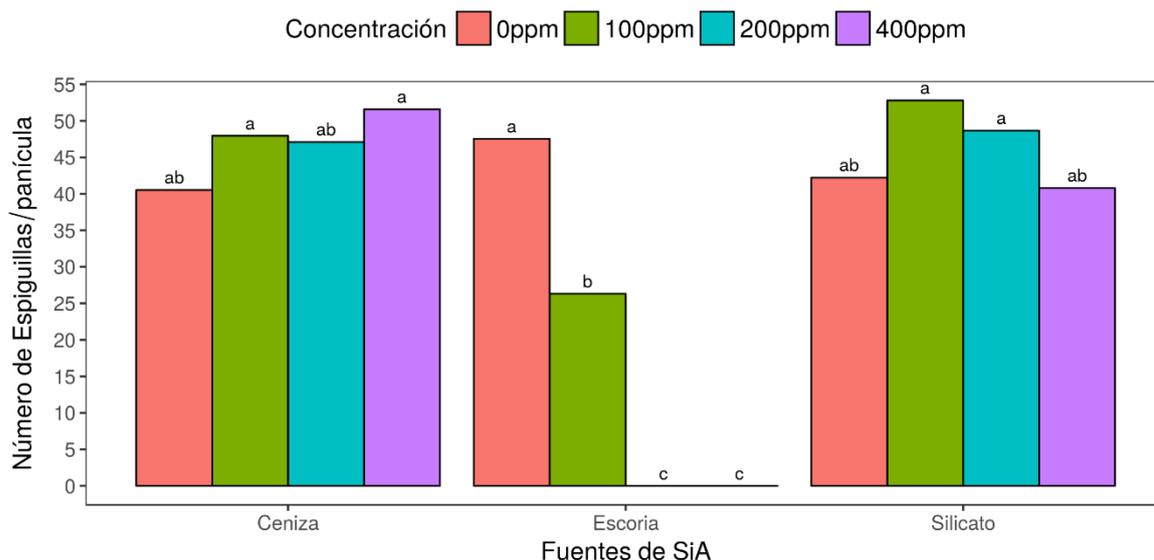


Figura 48: Número de espiguillas por panícula graficada usando el software Yupana (Lozano *et al.* 2018)

Fuente: Elaboración propia

Este componente del rendimiento fue afectado por las bajas temperaturas. Como se puede observar en las gráficas de temperatura, la fase de iniciación floral se dio algunos días antes que empezaran las bajas temperaturas. Las primeras panículas desplegadas no tuvieron ningún problema, sin embargo, las últimas que se formaron sí presentaron los extremos terminales malformados, síntoma de estrés por frío, lo cual repercutió en una menor cantidad de espiguillas/panícula. Podemos observar que, para los tratamientos con silicato de potasio, los datos fueron estadísticamente similares al testigo, sin embargo, se observa un incremento ligero para el tratamiento con silicato 100 que sí podría atribuirse al silicio, y que el potasio fue similar para todos los tratamientos. A partir de ese punto se observa una disminución para los tratamientos con 200 y 400 ppm, lo que indicaría que a mayores dosis, el silicio no tendría mayor injerencia y los resultados serían similares al testigo. Por el lado de la escoria, observamos un marcado decrecimiento en este parámetro incluso en el tratamiento de escoria 100, el cual presentó el mayor número de macollos y panículas. Como ya se mostró, los niveles de Si disponible en suelos y Si en tejidos, para este tratamiento fueron similares a los de silicato 100, por lo tanto, se puede concluir que el aparente efecto positivo que causó el silicio con el silicato 100, se podría ver enmascarado cuando hay presencia de otros elementos en grandes cantidades como lo vemos en la escoria. Esto sumado al pH de 7-7.5 de este tratamiento que pudo causar alguna deficiencia/toxicidad. Nuevamente esto tendría

que corroborarse con un análisis de tejidos. Los tratamientos con ceniza presentaron una tendencia a aumentar el número de espiguillas/panícula a medida que se incrementó la concentración, sin embargo, tal efecto no podría atribuirse al silicio, ya que como se vio, los niveles de SiA en suelos y de Si en tejidos fueron estadísticamente iguales al testigo. Por lo tanto, tal efecto podría atribuirse a alguno de los otros elementos que componen la ceniza como el P, Mg, Fe, Cu, Zn o Mn.

El tercer componente del rendimiento, el porcentaje de granos cuajados en panícula fue cero por ciento. Como ya se discutió, este fue debido a la influencia de las bajas temperaturas. Por lo tanto, se puede concluir que incluso incrementando la concentración de SiA en suelos y el contenido de Si en tejido, no habrá ninguna atenuación del estrés por frío. Al no tener formación de grano, no se pudo tampoco medir el último componente: el peso de 1000 granos. A pesar de esto, al tener el número de espiguillas/planta, se realizó una estimación del rendimiento asumiendo un 90 por ciento de cuaje y un peso de 1000 g de 30 g reportado por Abad (2017) para este cultivar en la Región San Martín. Los datos se muestran en la Figura 49.

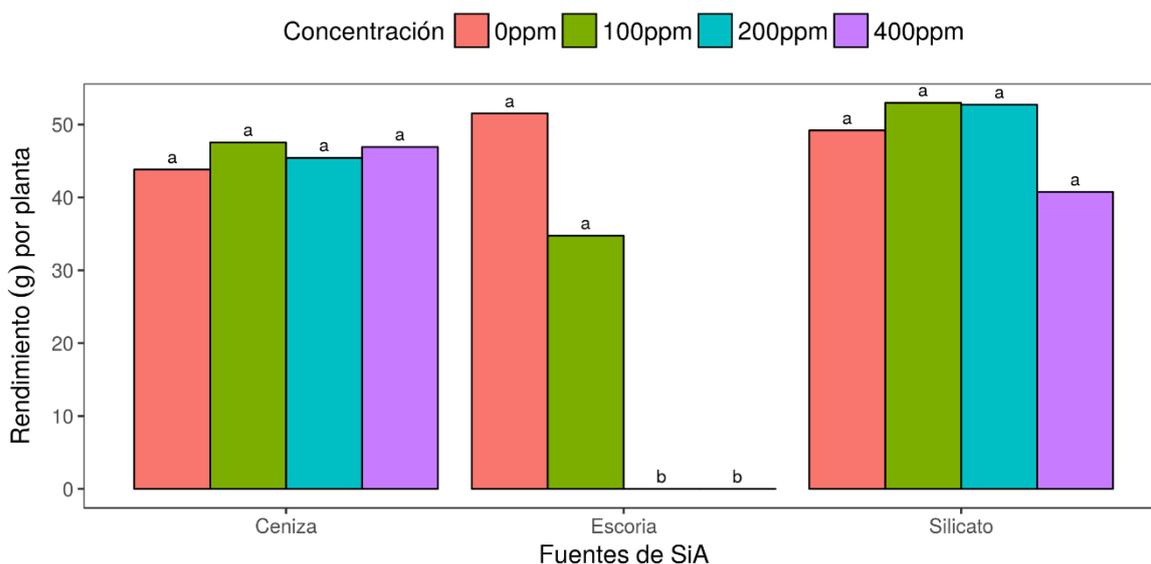


Figura 49: Rendimiento estimado como gramos de grano producido por planta, graficado usando software Yupana (Lozano *et al.* 2018)

Fuente: Elaboración propia

Los datos mostrados son análogos a los del número de espiguillas/panícula. En líneas generales todos los tratamientos a excepción de los de escoria 100 y escoria 200 son estadísticamente similares a los testigos. Para el caso de los tratamientos con silicato, se

observa una ligera tendencia a incrementar su producción con los tratamientos de 100 y 200 ppm pero para el de 400 ppm se reduce, esto indica que el incremento en el contenido de silicio en tejidos no guarda relación con un incremento en el rendimiento, salvo para los tratamientos de 100 y 20 ppm. Aunque, aun así, no llegan a diferenciarse del testigo. Esto contradice lo expuesto por Camargo *et al.* (2007), quien establece que los incrementos de Si en tejido están relacionados con incrementos en el rendimiento, sin embargo en este asunto tiene influencia el factor ambiental, así como el aprovisionamiento suficiente de nuestro suelo. Por otra parte, los tratamientos con escoria presentan el mismo comportamiento que el parámetro anteriormente discutido. Las razones son las mismas al igual que los tratamientos con ceniza.

Ya sea porque el suelo original no era lo suficientemente deficitario en silicio o porque la influencia de las bajas temperaturas fue tan intensa que nada lo puede aliviar, concluimos que un incremento en el contenido nutricional del silicio no está relacionado directamente con algún componente del rendimiento para las condiciones en las que se ejecutó este ensayo. Todas las investigaciones actuales y pasadas resaltan los beneficios sobre el rendimiento final, sin embargo, se enfocan en la tolerancia a diversas formas de estrés, tanto biótico como abiótico. Por lo tanto, enfocar el manejo del silicio de forma análoga al nitrógeno sería incorrecto. Aplicar mayores dosis no incrementan el rendimiento en condiciones ideales. Tendría que haber condiciones desfavorables por presencia de plagas, enfermedades, estrés hídrico, entre otros para notar este efecto. O en condiciones de suelos aún más deficitarios de silicio, probablemente en otras zonas del Perú, ya no en el Alto Huallaga en donde los campos arroceros aparentemente aprovisionan bien de este elemento.

4.3. Observaciones adicionales

A pesar de no ser el objetivo de este ensayo, se aprovechó las condiciones de estrés por frío y la aparición de manchas necróticas en las espiguillas para evaluar el efecto del silicio sobre el porcentaje de panículas malformadas y de espiguillas afectadas por necrosis. Así mismo, se evaluó la influencia en la incorporación de nitrógeno a los tejidos.

4.3.1. Resultados de variables complementarias

a. Porcentaje de panículas malformadas

Como ya se mencionó, el estrés por frío ocasionó diversos síntomas, entre ellos uno de los más importantes fue la malformación en los extremos terminales de las panículas. Al realizar las pruebas de Shapiro-Wilk y Breusch-Pagan se comprobó que los datos obtenidos cumplen con los supuestos estadísticos mencionados en la metodología. Los resultados y sus comprobaciones gráficas pueden encontrarse en el ANEXO 56. El análisis de varianza ubicado en el ANEXO 57 indica diferencias significativas a nivel de la interacción. Este resultado se logra apreciar en la Figura 50 mostrada a continuación.

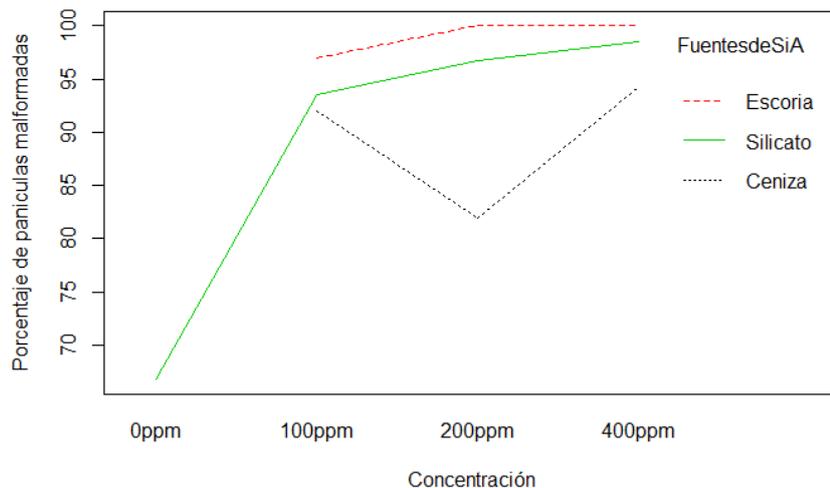


Figura 50: Interacción fuentes de SiA - concentración para la variable porcentaje de panículas malformadas, graficada usando R (RcoreTeam 2014)
Fuente: Elaboración propia

En primer lugar, podemos observar que no hay información para los testigos de ceniza y escoria. Esto debido a que se tuvo que eliminar dos datos por no encajar con los supuestos estadísticos. Esto ocasionó que el programa no pueda terminar de dibujar los segmentos faltantes. Con respecto a la línea del silicato de potasio, se logra ver que dosis mayores del testigo favorecen la malformación de panículas probablemente causadas por un desbalance nutricional por exceso de potasio o de silicio. Para el caso de la línea de escoria se ve que todas las concentraciones muestran un cien por ciento de malformación. Sin embargo, es necesario aclarar que para el caso de las dosis de 200 y 400 ppm, este dato implica que no hubo formación de panículas porque las plantas detuvieron su desarrollo en estado de plántula. Para el caso de los tratamientos con ceniza se observa que sus tratamientos

correspondientes a las dosis de 100, 200 y 400, los porcentajes de malformación de panículas estuvieron por debajo del resto de tratamientos. Para el tratamiento de 200 ppm, la caída se explica porque solo hay dos repeticiones en ese tratamiento. Esto puede deberse a una menor solubilidad del silicio. Las diversas pendientes e intersecciones indican que hay influencia de la naturaleza de la enmienda sobre las concentraciones por lo que se procedió a realizar el análisis de efectos simples ANEXO 58, para cuantificar las significancias observadas. Seguidamente se realizó la prueba de Tukey mostrada en la Tabla 27.

Tabla 27: Resumen estadístico de la variable porcentaje de panículas malformadas con sus niveles de significancia calculados en base a la prueba de Tukey con un $\alpha = 0.05$

Fuentes de SiA	Concentración (ppm)	Media	Mínimo	Máximo	Repeticiones	Desviación estándar	Error estándar	Sig.
Escoria	200	100.0	100.0	100.0	3	0.0	0.0	a
Escoria	400	100.0	100.0	100.0	5	0.0	0.0	a
Silicato	400	98.6	97.2	100.0	2	2.0	1.4	a
Ceniza	0	97.5	95.0	100.0	4	2.9	1.4	a
Escoria	100	97.0	94.0	100.0	2	4.2	3.0	a
Silicato	200	96.7	89.5	100.0	4	5.0	2.5	a
Escoria	0	94.4	90.5	97.6	4	3.6	1.8	ab
Ceniza	400	94.2	89.2	100.0	5	4.3	1.9	ab
Silicato	100	93.4	87.2	97.2	4	4.3	2.2	ab
Ceniza	100	92.1	81.1	100.0	4	8.0	4.0	ab
Silicato	0	88.8	84.8	91.8	3	3.6	2.1	ab
Ceniza	200	81.9	78.9	84.8	2	4.2	3.0	b

Fuente: Elaboración propia

b. Porcentaje de espiguillas necróticas

Posteriormente a la cosecha se realizó una evaluación de las espiguillas que habían sido afectadas por *Alternaria alternata*. Los valores medidos cumplen con los supuestos estadísticos mencionados en la metodología. Los resultados de las pruebas de Shapiro-Wilk y Breusch-Pagan, así como sus comprobaciones gráficas pueden encontrarse en el ANEXO 59. El análisis de varianza ubicado en el ANEXO 60 indica que no hay diferencias significativas en ninguno de los factores ni en la interacción, por lo tanto, se muestra el resumen de los datos en la Tabla 28.

Tabla 28: Resumen estadístico de la variable porcentaje de espiguillas necróticas con sus niveles de significancia calculados en base a la prueba de Tukey con un $\alpha = 0.05$

Fuentes de SiA	Concentración (ppm)	Media	Mínimo	Máximo	Repeticiones	Desviación estándar	Error estándar	Sig.
Ceniza	0	94.5	92.5	98.0	5	2.2	1.0	a
Ceniza	100	97.4	95.2	99.2	4	1.8	0.9	a
Ceniza	200	91.9	86.2	97.6	2	8.1	5.7	a
Ceniza	400	94.3	89.1	98.0	5	3.2	1.4	a
Escoria	0	92.6	78.7	98.1	5	8.2	3.7	a
Escoria	100	93.1	91.9	94.3	2	1.7	1.2	a
Silicato	0	94.5	90.3	97.6	4	3.5	1.8	a
Silicato	100	91.5	82.8	96.8	4	6.1	3.0	a
Silicato	200	88.8	79.4	95.8	4	7.6	3.8	a
Silicato	400	82.6	81.2	84.1	2	2.0	1.4	a

Fuente: Elaboración propia

c. Absorción de nitrógeno en tejidos

Siendo el nitrógeno el elemento que más influye en el rendimiento del arroz, se realizó este análisis con el objetivo de verificar si las enmiendas influyeron en la absorción total de este elemento.

Absorción de nitrógeno en órganos aéreos

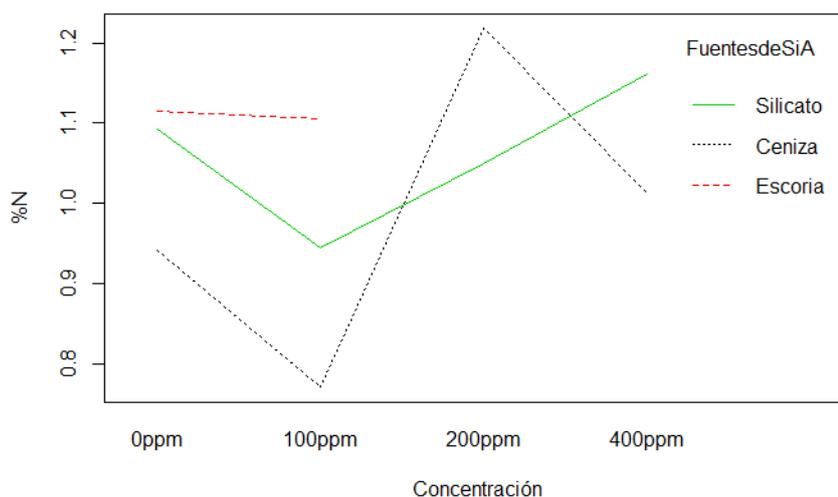


Figura 51: Interacción fuentes de SiA - concentración para la variable porcentaje de nitrógeno en órganos aéreo graficada usando R (RcoreTeam 2014)

Fuente: Elaboración propia

Al realizar las pruebas de Shapiro-Wilk y Breusch-Pagan se comprobó que los datos obtenidos cumplen con los supuestos estadísticos mencionados en la metodología. Los resultados y sus comprobaciones gráficas pueden encontrarse en el ANEXO 61. El análisis de varianza ubicado en el ANEXO 62 indica diferencias significativas a nivel de la interacción. Este resultado se logra apreciar en la Figura 51.

Se puede observar que la línea de escoria se encuentra incompleta para las concentraciones de 200 y 400. Esto se debe a que no se disponía de mucho material vegetal para analizar ya que las plantas se quedaron muy pequeñas. En cuanto al silicato y a la ceniza, no se puede establecer una tendencia muy clara, ya que las variaciones porcentuales son mínimas. Esto se corroborará más adelante con la prueba de Tukey. No fue posible realizar el análisis de efectos simples debido a la falta de datos, por lo que se realizó solamente la prueba de Tukey, cuyos datos se muestran en la Tabla 29.

Tabla 29: Resumen estadístico de la variable porcentaje de nitrógeno en órganos aéreos con sus niveles de significancia calculados en base la prueba Tukey con un $\alpha= 0.05$

Fuentes de SiA	Concentración	Media	Mínimo	Máximo	Repeticiones	Desviación estándar	Error estándar	Sig.
Escoria	400	2.35	2.35	2.35	1	NA	NA	a
Ceniza	200	1.22	1.20	1.23	2	0.02	0.01	b
Silicato	400	1.16	1.12	1.20	2	0.06	0.04	b
Escoria	0	1.11	1.06	1.18	5	0.05	0.02	b
Escoria	100	1.11	0.90	1.32	2	0.30	0.21	b
Silicato	0	1.09	0.84	1.26	4	0.21	0.10	b
Silicato	200	1.05	0.98	1.12	4	0.07	0.03	b
Ceniza	400	1.01	0.78	1.15	5	0.14	0.06	b
Silicato	100	0.95	0.73	1.15	4	0.21	0.10	b
Ceniza	0	0.94	0.45	1.29	5	0.32	0.14	b
Ceniza	100	0.77	0.56	1.15	4	0.27	0.13	b

Fuente: Elaboración propia

Absorción de nitrógeno en raíz

Teniendo conocimiento que cada tejido tiene una diferente composición de nutrientes, se optó por analizar la raíz de forma separada. Los valores medidos cumplen los supuestos estadísticos mencionados en la metodología. Los resultados de las pruebas de Shapiro-Wilk y Breusch-Pagan, así como sus comprobaciones gráficas pueden encontrarse en el ANEXO 63. El análisis de varianza ubicado en el ANEXO 64 indica que no hay diferencias

significativas ni en los factores, ni en la interacción, por lo tanto, se procede a mostrar el resumen de los datos en la Tabla 30.

Tabla 30: Resumen estadístico de la variable porcentaje de nitrógeno en raíz con sus niveles de significancia calculados en base la prueba Tukey con un $\alpha= 0.05$

Fuentes de SiA	Concentración (ppm)	Media	Mínimo	Máximo	Repeticiones	Desviación estándar	Error estándar	Sig.
Escoria	0	1.09	1.01	1.23	5	0.09	0.04	a
Ceniza	0	1.06	0.95	1.15	5	0.07	0.03	a
Silicato	100	1.04	0.95	1.18	4	0.10	0.05	a
Ceniza	100	1.02	0.98	1.09	4	0.05	0.03	a
Silicato	0	0.98	0.87	1.09	4	0.10	0.05	a
Escoria	100	0.95	0.92	0.98	2	0.04	0.03	a
Silicato	200	0.95	0.81	1.18	4	0.17	0.08	a
Ceniza	200	0.94	0.92	0.95	2	0.02	0.01	a
Ceniza	400	0.92	0.76	1.09	5	0.13	0.06	a
Silicato	400	0.84	0.84	0.84	1	NA	NA	a

Fuente: Elaboración propia

4.3.2. Discusiones de variables complementarias

La mayoría de literatura científica de la relación arroz-silicio no menciona que aportes de este elemento puedan influir positivamente el desempeño de las plantas frente a situaciones

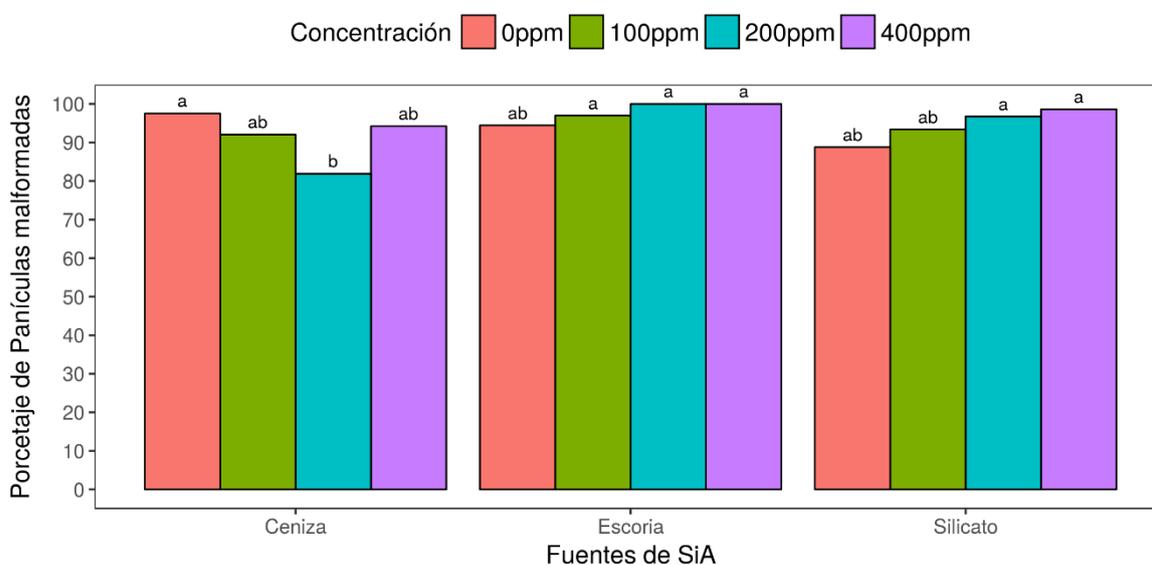


Figura 52: Porcentaje de panículas malformadas graficado usando software Yupana (Lozano *et al.* 2018).

Fuente: Elaboración propia

de estrés por frío. A pesar de esto se optó por cuantificar los daños en este ensayo para dejar constancia que efectivamente, al parecer el silicio no alivia este problema.

En la Figura 52 se puede observar que los porcentajes de panículas malformadas para todos los tratamientos son estadísticamente iguales a los testigos, lo que significa que ninguna de las fuentes presentó una reducción significativa de las panículas malformadas por el frío. Los tratamientos con silicato de potasio, en donde podemos decir que el silicio ha estado más disponible sin injerencia de otros elementos, se ve incluso que a medida que se incrementa las dosis, la cantidad de panículas afectadas por el frío se incrementa. De todas formas, no llega a ser diferente del testigo. Para el caso de la escoria, el tratamiento con 100 ppm es ligeramente mayor al testigo, teniendo un comportamiento análogo al del silicato, sin embargo, para los tratamientos con 200 y 400 ppm, se ve que hay valores de 100 por ciento. Pero hay que recordar que esto corresponde a que estos tratamientos no tuvieron formación de panícula. Dentro de los tratamientos con ceniza, el tratamiento de 200 ppm presentó la más baja reducción de las panículas afectadas por el frío. Sin embargo, es difícil asociar este dato con algún efecto, ya que las concentraciones de silicio disponible y silicio en tejido fueron las mismas que para el testigo, por lo tanto, tal mejoría podría asociarse a alguno de los otros elementos presentes en la ceniza de cascarilla de arroz como el fósforo. La explicación de esto podría subyacer en una reducción de la síntesis proteica debido a las bajas temperaturas, en donde el aprovisionamiento de nutrientes no es un problema, sino que el problema reside en que el cultivar no tolera tan bajas temperaturas.

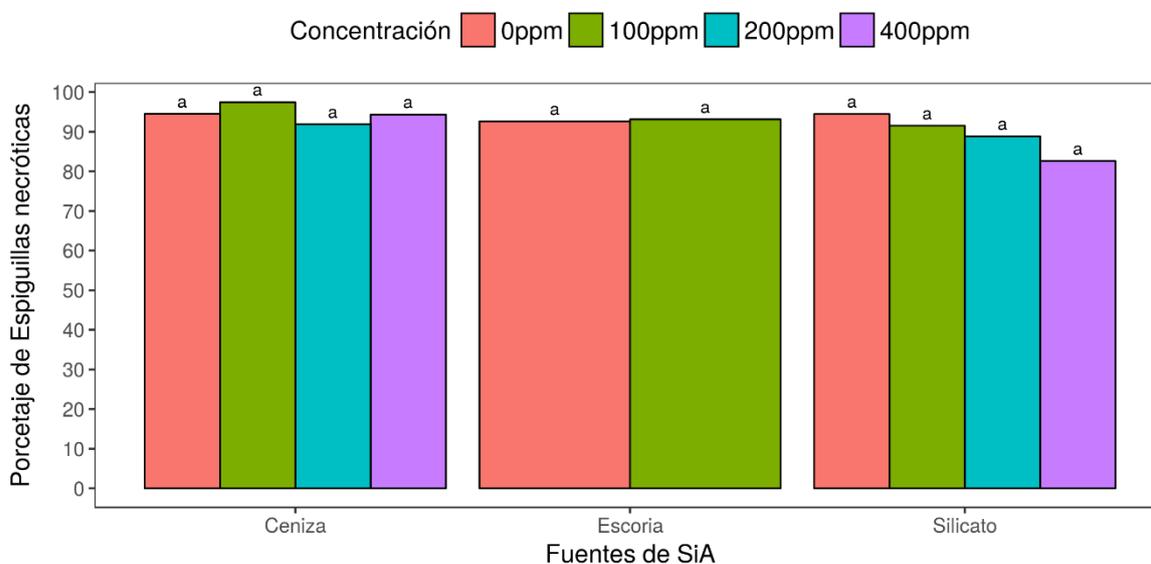


Figura 53: Porcentaje de espiguillas necróticas graficado usando software Yupana (Lozano *et al.* 2018).

Fuente: Elaboración propia

Otro de los efectos bien reportado para el silicio es la atenuación del estrés biótico (Bakhat *et al.*, 2018). Se ha discutido mucho de los mecanismos para evitar el ingreso de patógenos al tejido del arroz, sin embargo, en la Figura 53 observamos que los niveles de daño en las espiguillas son estadísticamente iguales para todos los tratamientos y testigos. Probablemente esto se deba a que este ensayo no ha sido diseñado bajo los estándares de una investigación fitopatológica. La otra explicación podría estar en que el patógeno que afectó este ensayo, *Alternaria alternata*, no es agente infeccioso primario. Es decir, no infecta tejido sano, sino que debe encontrar alguna apertura para poder ingresar, además de condiciones climáticas favorables. Por lo tanto, incluso en presencia de altas concentraciones de silicio en tejido, igual va a ingresar si hay laceraciones o aberturas naturales en el tejido. En este caso, pasó eso porque las espiguillas estuvieron mucho tiempo sin fecundar y los estigmas representan lugares húmedos ideales para su proliferación. Los tratamientos con silicato de potasio muestran una ligera tendencia a reducir el porcentaje de espiguillas infectadas a medida que se incrementa la concentración, por lo que representa un indicio de un efecto positivo del silicio.

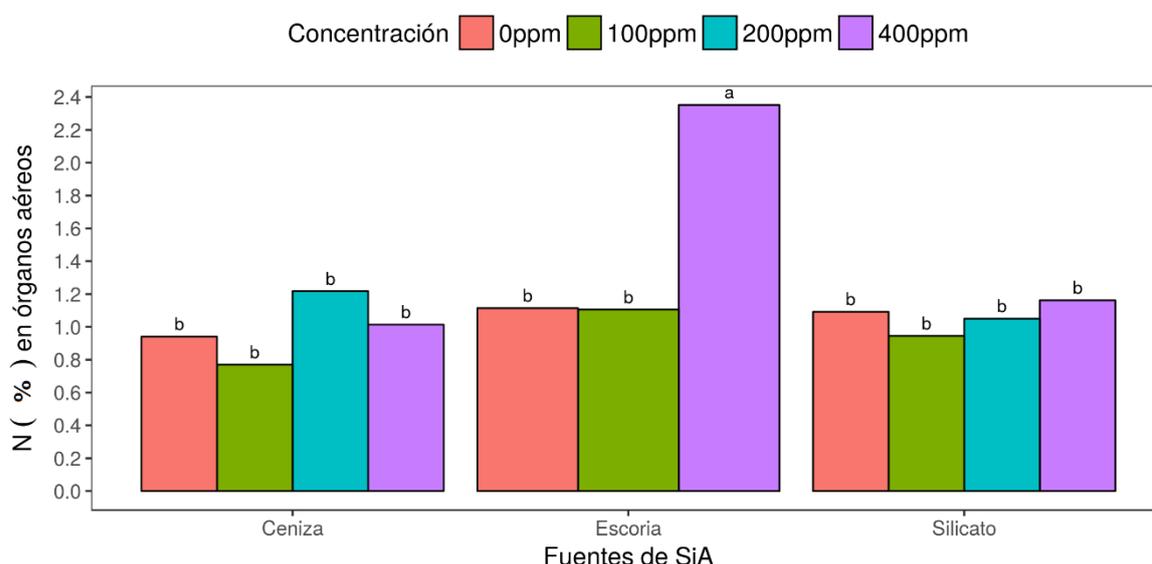


Figura 54: Porcentaje de nitrógeno en órganos aéreos graficado usando software Yupana (Lozano *et al.* 2018)

Fuente: Elaboración propia

Las evaluaciones de nitrógeno (Figura 54 y Figura 55) se realizaron para ver si las grandes dosis de silicio habían afectado de alguna u otra forma la absorción de este elemento. Quizá el momento de toma de muestras no fue el ideal, ya que durante la senescencia del cultivo, el nitrógeno no es un elemento que tenga mayor actividad, por lo que su concentración en tejidos disminuye (Yoshida, 1981). A pesar de esto se realizaron las mediciones a nivel de

hojas y raíces. Para el caso de las raíces, es posible observar que los contenidos son estadísticamente similares para todos los tratamientos y testigos.

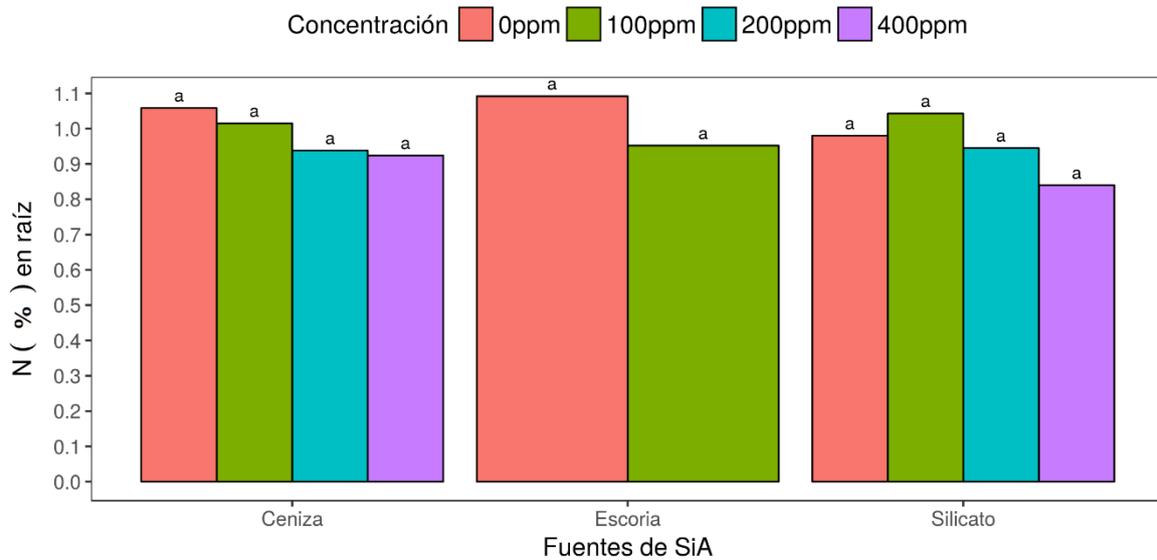


Figura 55: Porcentaje de nitrógeno en raíz graficado usando software Yupana (Lozano *et al.* 2018). Fuente: Elaboración propia

Cabe mencionar que el método usado para este análisis es volumétrico, por lo que el error puede ser considerable. A pesar de esto se observan ligeras tendencias a reducir su concentración a medida que se incrementan las concentraciones de silicio. Para el caso del nitrógeno en órganos aéreos se observa una situación parecida en la que no hay diferencias significativas, salvo por el tratamiento de escoria 400, del cual se pudo medir una muestra. Este dato indica un mayor contenido de nitrógeno quizá por el hecho que se estancó en el estadio fenológico de plántula y también porque según Gu *et al.* (2011), los tejidos con menor cantidad de silicio tienen a presentar mayores concentraciones de otros elementos. Probablemente este sea el caso.

V. CONCLUSIONES

Objetivo 1: Evaluación del efecto de tres enmiendas aportadoras de silicio soluble: escoria de horno cuchara, ceniza de cascarilla de arroz y silicato de potasio en la conductividad eléctrica y pH del material de suelo.

Las variaciones en la conductividad eléctrica del suelo ocasionadas por la incorporación de estas enmiendas fueron ligeras considerando las altas dosis empleadas, al punto de no afectar el crecimiento y desarrollo de las plantas de arroz. El pH de la solución suelo sí varió de acuerdo a la enmienda empleada. Con la ceniza de cascarilla de arroz y el silicato de potasio, el incremento para este parámetro en comparación con el testigo no fue estadísticamente significativo, sin embargo, el uso de la escoria de horno cuchara sí incrementó fuertemente el pH a medida que se incrementaron las dosis. Esta situación originó un efecto tóxico en las plantas que recibieron los tratamientos de 200 y 400 ppm, razón por la cual, su crecimiento y desarrollo se vio afectado. Adicionalmente, se logró identificar que tanto la escoria como la ceniza incluían en su composición cantidades considerables de otros elementos. Para el caso de la escoria, incluso se identificó presencia de metales pesados. Esta situación también pudo haber contribuido al efecto tóxico mencionado anteriormente.

Objetivo 2: Evaluación del efecto de tres enmiendas aportadoras de silicio soluble: escoria de horno cuchara, ceniza de cascarilla de arroz y silicato de potasio en la biomasa del arroz.

La disponibilidad del silicio al final de la campaña, en ningún caso mantuvo las concentraciones iniciales de 100, 200 y 400 ppm debido a la polimerización del ácido monosilícico a altas concentraciones, para las condiciones de pH del suelo empleado. Los tratamientos con silicato de potasio fueron tomados como base para comparar el efecto del silicio sobre los parámetros morfológicos relacionados a los componentes del rendimiento, ya que este producto fue el más “puro” entre los tres. Solo aportó silicio y potasio. Además, no ocasionó toxicidad a dosis de 200 y 400 ppm como sí ocurrió con la escoria. Se determinó

que fue la enmienda que incrementó de manera más sostenida la concentración de silicio disponible en el suelo, así como silicio en tejido, siendo la raíz, el órgano que acumuló más silicio en comparación con la mezcla de hojas, tallos e inflorescencias. Por lo tanto, para las condiciones ambientales acontecidas en el ensayo, la absorción de silicio en los tejidos aumentó en forma directamente proporcional a la disponibilidad de este elemento, sin embargo, un incremento de su concentración en tejidos no influyó en los parámetros morfológicos asociados a los componentes del rendimiento. Por lo tanto, si se enfoca el uso del silicio como un análogo al uso del nitrógeno para incrementar rendimientos, no fue económicamente factible fertilizar con este elemento para las condiciones dadas.

Las temperaturas menores a 20 °C y acontecidas durante el 51.5 por ciento de todo el ciclo del cultivo, originó ausencia total de la formación de grano, y derivó en la infestación de *Alternaria alternata* en la panícula como consecuencia adicional de la humedad relativa mayor a 85 por ciento. Como observaciones adicionales dadas las condiciones ambientales, se observó que el silicio no tuvo injerencia en la reducción del porcentaje de panículas malformadas por estrés de frío, ni tampoco en la infestación de *Alternaria alternata*.

VI. RECOMENDACIONES

- 1- Se recomienda realizar análisis de tejido vegetal para macronutrientes, micronutrientes y metales pesados. También se recomienda realizar análisis de disponibilidad en suelo de estos mismos elementos con la finalidad de identificar las deficiencias y/o toxicidades que pudieron haberse dado por el aporte de estas enmiendas, así como corroborar los beneficios del silicio reportados en la literatura para el alivio de toxicidades.
- 2- Se recomienda analizar el agua de riego para identificar el aporte de silicio disponible de esta fuente.
- 3- Se recomienda enfocar futuros ensayos con silicio al alivio de estreses tanto bióticos como abióticos, ya que la gran mayoría de literatura científica relacionada a este tema indica que los beneficios principales se dan en condiciones desfavorables para los cultivos.
- 4- El uso de la escoria debería de enfocarse en sus propiedades enalantes, no como fuente de silicio ya que las dosis que se requieren para restituir este elemento en el suelo podrían conllevar ciertas toxicidades por la presencia de los otros componentes. Además de eso, cada lote de escoria tiene contenidos variables de SiA, por lo que los cálculos para dosis no son constantes.
- 5- El uso de la ceniza debería de enfocarse como aporte de fósforo, potasio, zinc y cobre, no como fuente de silicio ya que su solubilidad es muy limitada. Sin embargo, debe de tenerse cuidado con el cadmio ya que presenta niveles similares a los de la escoria.
- 6- El uso del silicato de potasio sí ha demostrado elevar sosteniblemente los niveles de silicio disponible en suelo, sin embargo, para futuros ensayos en estrés biótico o abiótico, debería de probarse su efectividad en aplicaciones foliares ya que aplicaciones al suelo podrían resultar muy costosas.
- 7- Debido a que el ensayo tuvo problemas con el factor clima, se recomienda repetir el ensayo en época de siembra favorable (diciembre para condiciones de La Molina).

VII. REFERENCIAS

- Abad, L. (2017). *Influencia de bioactivadores fisiológicos en la productividad del cultivo de arroz (Oryza sativa L.) en el distrito de Morales, Región San Martín* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de San Martín, Tarapoto, Perú.
- Aceros Arequipa. (24 ene. 2019). *Proceso de producción del acero* [página web]. Recuperado de <http://www.acerosarequipa.com/procesos-de-produccion.html>
- Agraria- Agencia de noticias agrarias. (24 ene. 2019). *El añublo bacterial de la panícula de arroz (Burkholderia glumae), enfermedad causa mermas de la calidad y rendimiento del cultivo del arroz* [página web]. Recuperado de <http://www.agraria.pe/noticias/enfermedad-causa-mermas-en-la-calidad-10049>
- Ahrens, C. (2009). *Meteorology Today, an introduction to weather, climate and the environment*. Belmont, Estados Unidos. (Brooks/Cole, Ed.) (9th ed.)
- Albornoz, I., Quispe, J., Crisólogo, M., Bravo, M., Prudencio, M., Luna, G., ... Soto, M. (2016). *Zonificación ecológica económica base para el ordenamiento territorial de la Región de Huánuco*. Huánuco, Perú.
- Arnon, D. I., & Stout, P. R. (1939). The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. *Plant physiology*, 14(2), 371–375. <https://doi.org/10.1104/pp.14.2.371>
- Bakhat, H. F., Bibi, N., Zia, Z., Abbas, S., Hammad, H. M., Fahad, S., ... Saeed, S. (2018). Silicon mitigates biotic stresses in crop plants: A review. *Crop Protection* 104 (2018), 21-34. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2017.10.008>
- Balasta, M. L. F. C., Perez, C. M., Juliano, B. O., Villareal, C. P., Lott, J. N. A., & Roxas, D. B. (1989). Effects of silica level on some properties of *Oryza sativa* straw and hull. *Canadian Journal of Botany*, 67(8), 2356–2363. <https://doi.org/10.1139/b89-301>

- Bertsch, F. (2009). Absorción de nutrimentos por los cultivos [CD-ROOM]. San José, Costa Rica: Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo.
- Biggs, W. (2003). Principles of radiation measurement. Li-cor. Lincoln, Estados Unidos. Recuperado de <https://licor.app.boxenterprise.net/s/liuswfvvtqn7e9loxaut>
- Brady, N. & Weil, R. (2008). *The nature and properties of soils*. 14th ed. India. Pearson.
- Brownell, P. F., & Crossland, C. J. (1972). The requirement for sodium as a micronutrient by species having the c(4) dicarboxylic photosynthetic pathway. *Plant physiology*, 49(5), 794–797. Recuperado de <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=366054&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>
- Broyer, T. C., Carlton, a. B., Johnson, C. M., & Stout, P. R. (1954). Chlorine—A micronutrient element for higher plants 1. *Plant physiology*, 29, 526–532. <https://doi.org/10.1104/pp.29.6.526>
- Camargo, M. S. De, Pereira, H. S., Korndörfer, G. H., Queiroz, A. A., & Reis, C. B. Dos. (2007). Soil reaction and absorption of silicon by rice. *Scientia Agricola*, 64(2), 176–180. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162007000200011>
- Cheng, B. T. (1982). Some significant functions of silicon to higher plants. *Journal of Plant Nutrition*, 5(12), 1345–1353. <https://doi.org/10.1080/01904168209363068>
- Cocker, K., Evans, D., & Hodson, M. (1998). The amelioration of aluminium toxicity by silicon in higher plants: Solution chemistry or an in planta mechanism? *Physiologia Plantarum*, 104, 608–614. <https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.1998.1040413.x>
- Cruz, G. (2019). *Salinidad en agua de riego y fertilización nitrofosfatada empleando ají jalapeño (Capsicum annum L.) como cultivo indicador en invernadero* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.
- Datnoff, L. E., Snyder, G. H., & Korndörfer, G. H. (2001). *Silicon in Agriculture. Studies in Plant Science* (Vol. 8). [https://doi.org/10.1016/S0928-3420\(01\)80010-0](https://doi.org/10.1016/S0928-3420(01)80010-0)
- Deer, W., Howie, R., & Zussman, J. (1992). *Rock-forming minerals* (2nd ed.). Manchester, England. The Geological Society.
- Della, V., Kuhn, I., & Hotza, D. (2002). Rice husk ash as an element source for active

silica production. *Materials Letters*, 57(4), 818–821. [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(02\)00879-0](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(02)00879-0)

Desplanques, V., Cary, L., Mouret, J. C., Trolard, F., Bourrié, G., Grauby, O., & Meunier, J. D. (2006). Silicon transfers in a rice field in Camargue (France). *Journal of Geochemical Exploration*, 88(1-3), 190–193.
<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2005.08.036>

Detmann, K. C., Araújo, W. L., Martins, S. C. V., Sanglard, L. M. V. P., Reis, J. V., Detmann, E., ... Damatta, F. M. (2012). Silicon nutrition increases grain yield, which, in turn, exerts a feed-forward stimulation of photosynthetic rates via enhanced mesophyll conductance and alters primary metabolism in rice. *New Phytologist*, 196(3), 752–762. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04299.x>

Elgawhary, S., & Lindsay, W. (1972). Solubility of silica in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 36, 439–442.
<https://doi:10.2136/sssaj1972.03615995003600030022x>

Encina, K. (2017). *Escoria básica y carbonato de calcio en la recuperación de un suelo ácido de Tingo María en Maíz (Zea mays) PM 213 en invernadero* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú. Recuperado de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/2682/P36-E55-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Epstein, E. (1994). The anomaly of silicon in plant biology. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 91(1), 11–17.
<https://doi.org/10.1073/pnas.91.1.11>

Epstein, E. (1999). Silicon. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, (50), 641–664.
<https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.50.1.641>

Fauteux, F., Rémus-Borel, W., Menzies, J. G., & Bélanger, R. R. (2005). Silicon and plant disease resistance against pathogenic fungi. *FEMS Microbiology Letters*, 249(1), 1–6.
<https://doi.org/10.1016/j.femsle.2005.06.034>

FAO-Food and Agriculture Organization of the United Nations. (14 dic. 2017). *Faostats, FAO statistics database* [Página web]. Recuperado de <https://www.fao.org/faostat/en>

Fox, R. L., Silva, J. A., Younge, O. R., & Pluncknett, D. L. (1967). Soil and plant silicon

- and silicate response by sugarcane. *Soil Science Society of America Proceedings*, 31, 775–779. <https://doi.org/10.2136/sssaj1967.03615995003100060021x>
- Fraysse, F., Pokrovsky, O. S., Schott, J., & Meunier, J. D. (2009). Surface chemistry and reactivity of plant phytoliths in aqueous solutions. *Chemical Geology*, 258(3–4), 197–206. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.10.003>
- Fu, Y. Q., Shen, H., Wu, D. M., & Cai, K. Z. (2012). Silicon-mediated amelioration of Fe²⁺ toxicity in rice (*Oryza sativa* L.) roots. *Pedosphere*, 22(6), 795–802. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(12\)60065-4](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(12)60065-4)
- Goto, M., Ehara, H., Karita, S., Takabe, K., Ogawa, N., Yamada, Y., ... Morita, O. (2003). Protective effect of silicon on phenolic biosynthesis and ultraviolet spectral stress in rice crop. *Plant Science*, 164(3), 349–356. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(02\)00419-3](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(02)00419-3)
- Goussain, M. M., Prado, E., & Moraes, J. C. (2005). Effect of silicon applied to wheat plants on the biology and probing behaviour of the greenbug *Schizaphis graminum* (Rond.) (Hemiptera : Aphididae). *Neotropical Entomology*, 34(October), 807–813. <https://doi.org/10.1590/S1519-566X2005000500013>
- Gu, H. H., Qiu, H., Tian, T., Zhan, S. S., Deng, T. H. B., Chaney, R. L., ... Qiu, R. L. (2011). Mitigation effects of silicon rich amendments on heavy metal accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) planted on multi-metal contaminated acidic soil. *Chemosphere*, 83(9), 1234–1240. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.03.014>
- Gu, H. H., Zhan, S. S., Wang, S. Z., Tang, Y. T., Chaney, R. L., Fang, X. H., ... Qiu, R. L. (2012). Silicon-mediated amelioration of zinc toxicity in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings. *Plant and Soil*, 350(1–2), 193–204. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0894-8>
- Guntzer, F., Keller, C., & Meunier, J. D. (2012). Benefits of plant silicon for crops: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32(1), 201–213. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0039-8>
- Hasanuzzaman, M., Nahar, K., & Fujit, M. (2013). Extreme temperature responses, oxidative stress and antioxidant defense in plants. *Abiotic Stress - Plant Responses and Applications in Agriculture*. <https://doi.org/10.5772/54833>

- Haynes, R. J. (2017). The nature of biogenic Si and its potential role in Si supply in agricultural soils. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 245(April), 100–111. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.04.021>
- Heros, E. (2012). *Manual técnico del manejo integrado del arroz*. Lima, Perú. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Hiradate, S., Taniguchi, S., & Sakurai, K. (1998). Aluminum speciation in aluminum–silica solutions and potassium chloride extracts of acidic soils. *Soil Science Society of America Journal*, 62, 630–636. <https://doi.org/10.2136/sssaj1998.03615995006200030012x>
- Hodson, M. J., White, P. J., Mead, A., & Broadley, M. R. (2005). Phylogenetic variation in the silicon composition of plants. *Annals of Botany*, 96(6), 1027–1046. <https://doi.org/10.1093/aob/mci255>
- INEI-Instituto Nacional de Estadística e Informática. (26 feb. 2017). Perú: consumo per cápita de los principales alimentos 2008-2009. Lima, Perú. Recuperado de https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitaes/Est/Lib1028/cap01.pdf
- IRRI-International Rice Research Institute (2013). *Standard Evaluation System (SES) for Rice* (5th ed.). Manila. Recuperado de <http://ricepedia.blogspot.com/2018/04/2013-irri-ses-standard-evaluation.html>
- Jackson, M. (1958). *Soil Chemical Analysis*. New Jersey, Estados Unidos. Prentice-Hall
- Jenny, H. (1980). *The soil resource, origin and behaviour*. (W. Billings, F. Golley, O. Lange, J. Olson, & K. Remmert, Eds.), *Ecological Studies* (Vol. 37). <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-6112-4>
- Jones, L. H. P., & Handreck, K. A. (1967). Silica in soils, plants, and animals. *Advances in Agronomy*, 19, 107–149. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60734-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60734-8)
- Kidd, P. S., Llugany, M., Poschenrieder, C., Gunsé, B., & Barceló, J. (2001). The role of root exudates in aluminium resistance and silicon-induced amelioration of aluminium toxicity in three varieties of maize (*Zea mays* L.). *Journal of experimental botany*, 52(359), 1339–1352. <https://doi.org/10.1093/jexbot/52.359.1339>
- Korndörfer, G. H., Nolla, A., & Pereira, H. S. (2004). Correção da acidez do solo com a

- silicatagem. Uberlandia, Brazil. Universidade Federal de Uberlandia. Recuperado de http://www.nutricaoeplantas.agr.br/site/downloads/bt2_gps.pdf
- Le-Blond, J. S., Horwell, C. J., Williamson, B. J., & Oppenheimer, C. (2010). Generation of crystalline silica from sugarcane burning. *Journal of Environmental Monitoring*, 12(7), 1459–1470. <https://doi.org/10.1039/c0em00020e>
- Li, P., Song, A., Li, Z., Fan, F., & Liang, Y. (2012). Silicon ameliorates manganese toxicity by regulating manganese transport and antioxidant reactions in rice (*Oryza sativa* L.). *Plant and Soil*, 354(1–2), 407–419. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-1076-4>
- Liang, Y., Belanger, R., Nikolic, M., Gong, H., & Song, A. (2015). *Silicon in Agriculture. Studies in Plant Science* (Vol. 1). [https://doi.org/10.1016/S0928-3420\(01\)80019-7](https://doi.org/10.1016/S0928-3420(01)80019-7)
- Loli, O. (2018). *Apuntes de la clase de fertilidad de suelos ciclo 2018-I*. Lima, Perú. Universidad Nacional Agraria La Molina
- Lozano, F., Gomez, J., Benites, O., De-Mendiburu, F. (2018). Yupana: herramienta web interactiva para el análisis de datos en la investigación agropecuaria e industrial. Lima, Peru. Quipo.org. Recuperado de <https://www.quipo.org>
- Ma, J. F., Miyake, Y., & Takahashi, E. (2001). Chapter 2 Silicon as a beneficial element for crop plants. *Studies in Plant Science*, 8(C), 17–39. [https://doi.org/10.1016/S0928-3420\(01\)80006-9](https://doi.org/10.1016/S0928-3420(01)80006-9)
- Ma, J. F., Yamaji, N., Tamai, K., & Mitani, N. (2007). Genotypic difference in silicon uptake and expression of silicon transporter genes in rice. *Plant Physiology*, 145(3), 919–924. <https://doi.org/10.1104/pp.107.107599>
- Ma, J., Mitani, N., Nagao, S., Konishi, S., Tamai, K., Iwashita, T., & Yano, M. (2004). Characterization of the silicon uptake system and molecular mapping of the silicon transporter gene in rice. *Plant Physiology*, 136(2), 3284–3289. <https://doi.org/10.1104/pp.104.047365>
- Ma, J., Yamaji, N., & Mitani, N. (2011). Transport of silicon from roots to panicles in plants. *Proceedings of the Japan Academy, Series B*, 87(7), 377–385. <https://doi.org/10.2183/pjab.87.377>
- Ma, J., & Yamaji, N. (2006). Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends in*

- Plant Science*, 11(8), 392–397. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2006.06.007>
- Ma, J., Yamaji, N., Mitani, N., Tamai, K., Konishi, S., Fujiwara, T., ... Yano, M. (2007). An efflux transporter of silicon in rice. *Nature*, 448(7150), 209–212. <https://doi.org/10.1038/nature05964>
- Manatech. (27 dic. 2018). *Salida y puesta del sol: calculadora del fotoperiodo* [pagina web]. Recuperado de <http://www.salidaypuestadelsol.com>
- Matichenkov, V. V., & Bocharnikova, E. a. (2001). Chapter 13 The relationship between silicon and soil physical and chemical properties. *Silicon in agriculture, Volume 8*, 209–219. [https://doi.org/10.1016/S0928-3420\(01\)80017-3](https://doi.org/10.1016/S0928-3420(01)80017-3)
- McCree, K. (1981). Photosynthetically active radiation. En O. L. Lange, P. S. Nobel, C. B. Osmond, & H. Ziegler (Eds.), *Plant Physiology Plant Ecology I Responses to the Physical Environment* (Vol. 12A, p. 630). <http://doi.org/10.1007/978-3-642-68090-8>
- Meharg, C., & Meharg, A. A. (2015). Silicon, the silver bullet for mitigating biotic and abiotic stress, and improving grain quality, in rice? *Environmental and Experimental Botany*, 120, 8–17. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.07.001>
- MINAGRI-Ministerio de Agricultura y Riego. (26 feb 2017). *Series históricas de producción agrícola-compendio estadístico* [pagina web]. Lima, Perú. Recuperado de <http://frenteweb.minagri.gob.pe/sisca>
- Mitani, N., Jian, F. M., & Iwashita, T. (2005). Identification of the silicon form in xylem sap of rice (*Oryza sativa* L.). *Plant and Cell Physiology*, 46(2), 279–283. <https://doi.org/10.1093/pcp/pci018>
- NSA-National Slag Association (24 ene. 2019). *Tipos de escoria* [pagina web]. Recuperado de <http://www.nationalslag.org>
- Nikolic, M., Nikolic, N., Liang, Y., Kirkby, E. A., & Romheld, V. (2007). Germanium-68 as an adequate tracer for silicon transport in plants. Characterization of silicon uptake in different crop species. *Plant Physiology*, 143(1), 495–503. <https://doi.org/10.1104/pp.106.090845>
- Parra, S., Baca, G., Carrillo, R., Kohashi, J., Martínez, A., & Trejo, C. (2004). Comparación de tres métodos de análisis de silicio en tejido foliar de pepino. *Terra Latinoamericana*, 22(4), 401–407. Recuperado de

<http://www.redalyc.org/pdf/573/57311096002.pdf>

- Pereira, H. S., Barbosa, N. C., Carneiro, M. A. C., & Korndörfer, G. H. (2007). Avaliação de fontes e de extratores de silício no solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 42(2), 239–247. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007000200013>
- R Core Team. (2014). R: a language and environment for statistical computing. Vienna, Austria. R Foundation for Statistical Computing. Recuperado de <https://www.R-project.org>
- Raven, J. A. (2003). Cycling silicon - The role of accumulation in plants. *New Phytologist*, 158(3), 419–421. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00778.x>
- Savant, N., Snyder, G., & Datnoff, L. (1997). Silicon management and sustainable rice production. *Advances in Agronomy*, 58, 151–199. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60255-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60255-2)
- SENAMHI-Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (03 mar. 2018). Bases de datos climáticos por estaciones [pagina web]. Recuperado de <https://www.senamhi.gob.pe>
- Seyfferth, A. L., Kocar, B. D., Lee, J. A., & Fendorf, S. (2013). Seasonal dynamics of dissolved silicon in a rice cropping system after straw incorporation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 123, 120–133. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.09.015>
- Soil Survey Staff. (2018). *Soil Survey Manual*. (S. S. D. Staff, Ed.), United States Department of Agriculture (18a ed.). <https://doi.org/10.1097/00010694-195112000-00022>
- Solano, F. (2018). *Efecto de la dispersión a base de ceniza de cascarilla de arroz y escoria siderúrgica-silicato de calcio en la producción de arroz (Oryza sativa L.) Var. La Esperanza, bajo riego en Leoncio Prado* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria de la Selva. Tingo María, Perú.
- Sommer, M., Kaczorek, D., Kuzyakov, Y., & Breuer, J. (2006). Silicon pools and fluxes in soils and landscapes - A review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 169(3), 310–329. <https://doi.org/10.1002/jpln.200521981>
- Struyf, E., Smis, A., Van Damme, S., Garnier, J., Govers, G., Van Wesemael, B., ... Meire, P. (2010). Historical land use change has lowered terrestrial silica

- mobilization. *Nature Communications*, 1(8), 127–129.
<https://doi.org/10.1038/ncomms1128>
- Tardy, Y., Bocquier, G., Paquet, H., & Millot, G. (1973). Formation of clay from granite and its distribution in relation to climate and topography. *Geoderma*, 10(4), 271–284.
[https://doi.org/10.1016/0016-7061\(73\)90002-5](https://doi.org/10.1016/0016-7061(73)90002-5)
- Torres, A., & Lopez, R. (2012). Measuring daily light integral in a greenhouse. Purdue Extension. Purdue University. Recuperado de
<https://www.extension.purdue.edu/extmedia/ho/ho-238-w.pdf>
- USDA. (2014). *Claves para la taxonomía de suelos* (12a ed.). Servicio de conservación de recursos naturales. Recuperado de
https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_051546.pdf
- Vallejo, F., & Estrada, E. (2002). *Mejoramiento genético de plantas*. Palmira, Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de
http://bdigital.unal.edu.co/46265/3/9588095115_Part01.PDF
- Van-Bockhaven, J., De Vleeschauwer, D., & Hofte, M. (2013). Towards establishing broad-spectrum disease resistance in plants: silicon leads the way. *Journal of experimental botany*, 64(5), 1281–1293. <https://doi.org/10.1093/jxb/ers329>
- Van-Bockhaven, J., Strnad, M., Asano, T., Kikuchi, S., Monica, H., & Vleeschauwer, D. De. (2015). Silicon induces resistance to the brown spot fungus *Cochliobolus miyabeanus* by preventing the pathogen from hijacking the rice ethylene pathway. *New Phytologist*, 206, 761–773. <https://doi.org/10.1111/nph.13270>
- Wedepohl, K. H. (1995). The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(7), 1217–1232. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00038-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00038-2)
- Williams, D. E., & Vlamis, J. (1957). Manganese toxicity in standard culture solutions. *plant and soil*, VIII(3), 183–193. Recuperado de
<https://link.springer.com/article/10.1007/BF01666156>
- Winslow, M. D., Okada, K., & Correa-Victoria, F. (1997). Silicon deficiency and the adaptation of tropical rice ecotypes. *Plant and Soil*, 188(2), 239–248.
<https://doi.org/10.1023/A:1004298817861>

- Woolley, J. (1957). Sodium and silicon as nutrients for the tomato plant. *Plant physiology*, 32(4), 317–321. Recuperado de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC540926/pdf/plntphys00368-0067.pdf>
- Yamaji, N., & Ma, J. F. (2007). Spatial distribution and temporal variation of the rice silicon transporter Lsi1. *Plant Physiology*, 143(3), 1306–1313. <https://doi.org/10.1104/pp.106.093005>
- Yamaji, N., Mitatni, N., & Ma, J. F. (2008). A Transporter regulating silicon distribution in rice shoots. *the Plant Cell Online*, 20(5), 1381–1389. <https://doi.org/10.1105/tpc.108.059311>
- Ye, M., Song, Y., Long, J., Wang, R., Baerson, S. R., Pan, Z., ... Zeng, R. (2013). Priming of jasmonate-mediated antiherbivore defense responses in rice by silicon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(38), E3631–E3639. <https://doi.org/10.1073/pnas.1305848110>
- Yoshida, S. (1981). *Fundamentals of Rice crop science*. Los Baños, Philippines: International Rice Research Institute. Recuperado de http://books.irri.org/9711040522_content.pdf
- Zhou, Y., & Haynes, R. (2011). A comparison of inorganic solid wastes as adsorbents of heavy metal cations in aqueous solution and their capacity for desorption and regeneration. *Water, Air, & Soil Pollution*, 218(1–4), 457–470. <https://doi.org/10.1007/s11270-010-0659-7>

VIII. ANEXOS

ANEXO 1: Ficha técnica de la escoria de horno cuchara





ESCORIA DE HORNO CUCHARA



ORIGEN: Se genera en el horno cuchara durante el proceso de afino del acero líquido, corresponde a la parte no metálica.

Fuente: SIDERPERU.

- EVALUACIÓN AMBIENTAL**
Residuo no peligroso.
- GENERACIÓN MENSUAL**
800 toneladas.
- ALMACENAMIENTO**
En pilas.
- CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS**

DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS (%)

N° Malla	Retenido (%)
1"	25,05
1/2"	13,38
4	44,34
18	12,57
60	3,01
140	0,83
-140	0,81

Fuente: SIDERPERU.

ANÁLISIS QUÍMICO (en base seca):

% Óxidos				% Metales						
Al ₂ O ₃	CaO	FeO	MnO	SiO ₂	As	Hg	Zn			
3,83	45,16	0,93	0,52	8,93	27,12	0,000033	0,13	0,000037	0,0046	0,01

Fuente: SIDERPERU.

APLICACIONES

- En estudio para fabricación de fertilizantes especializados.

ANEXO 2: Ficha técnica del silicato de potasio

NUTRICIÓN VEGETAL ESPECIALIZADA

COMPOSICIÓN (concentración %P/V)	
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
K ₂ O	Mínimo 11% Máximo 14,5%
SiO ₂	Mínimo 25% Máximo 28%
H ₂ SiO ₄ = SIA(*)	140.000 ppm
Densidad (g/cc)	1,38 - 1,42
pH solución acuosa al1%	10,5 - 11



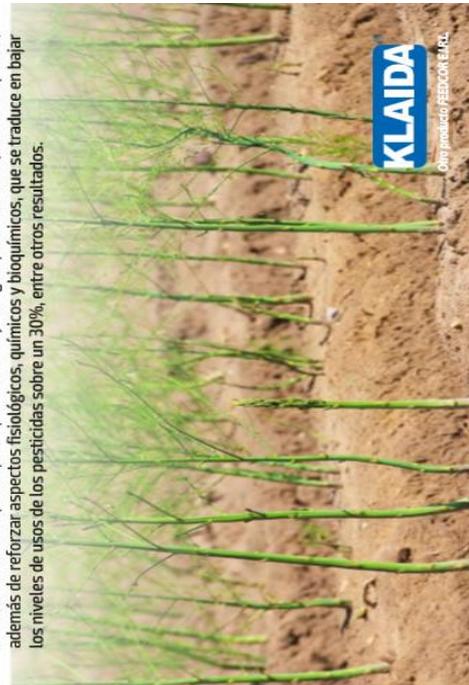
Se trata de un silicato de potasio líquido.

(*) Significa 14% de Silicio Asimilable y el saldo de 11%, que completa el 25% mínimo de SiO₂, se va haciendo biodisponible en el tiempo.

PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS

Recomendado principalmente para aplicación foliar y en drench. Pero también edáficamente para suelos deficitarios en silicio activo y potasio. El silicio activo tiene una influencia positiva en el desarrollo y crecimiento de las plantas y específicamente modifican las características físicas y químicas del suelo en términos que mejora su estructura, facilita la asimilación del fósforo, controla los metales pesados (Pb, Hg, Cd, As, y otros), controla la toxicidad del aluminio. Por sus propiedades de absorción y adsorción de nutrientes como el K, P y N móviles, y de mantenerlos disponibles para la planta.

Por otra parte, al formar parte integral de la planta proporciona funciones de formar una barrera mecánica que impide que insectos y hongos perforen el tejido de la planta, además de reforzar aspectos fisiológicos, químicos y bioquímicos, que se traduce en bajar los niveles de usos de los pesticidas sobre un 30%, entre otros resultados.



$$\begin{aligned} X \text{ kg de P} & \text{-----} 414.6 \text{ kg de material de suelo} \\ X = 0.0253221 \text{ kg} & = 25.32 \text{ g de P}_2\text{O}_5 \end{aligned}$$

El análisis de caracterización de suelos arrojó un valor de P disponible promedio de 5.6 ppm.

$$\begin{aligned} 5.6 \text{ mg de P} & \text{-----} 1 \text{ kg de material de suelo} \\ X \text{ mg de P} & \text{-----} 414.606 \text{ kg de material de suelo} \\ X = 2321 \text{ mg de P} & = 2.321 \text{ g de P es la cantidad que se tiene.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Si:} & \quad \text{En } 142 \text{ g de P}_2\text{O}_5 \text{ -----} 62 \text{ g de P} \\ & \quad X \text{ g de P}_2\text{O}_5 \text{-----} 2.321 \text{ g de P} \end{aligned}$$

$X = 5.32 \text{ g de P}_2\text{O}_5$ es lo que, según el análisis, este suelo contenía como P disponible. Como se puede observar existe un déficit de fósforo para cumplir con la extracción del cultivo. Déficit de $P = 25.32 \text{ g} - 5.32 \text{ g} = 20.00 \text{ g de P}_2\text{O}_5$ (para los 414.606 kg de material de suelo). Esta deficiencia fue suplementada por fósforo proveniente del fosfato diamónico (18 – 46 - 0)

$$\begin{aligned} \text{Si: } 46 \% & \text{-----} 20.00 \text{ g de P}_2\text{O}_5 \\ 100 \% & \text{-----} x \text{ g de fosfato diamónico} \\ X = 43.4879 \text{ g} & \text{ de fosfato diamónico} \end{aligned}$$

Debido a que no se conocía la reacción de este suelo frente a la aplicación del fósforo y para evitar caer en un exceso de fósforo, no se tomó en cuenta la eficiencia en el uso del fertilizante fosfatado. Por lo tanto, para esta cantidad de material de suelo, 414.6 kg, se agregó 43.48 g de fertilizante.

Esto significa que a cada maceta se le tuvo que agregar 0.603 g de fosfato diamónico. Para esto, el material de suelo de cada contenedor fue vaciado en una bandeja en donde se mezcló con el fertilizante hasta lograr un correcto homogeneizado. Por último, se devolvió la mezcla a su respectiva maceta.

Nitrógeno: fuente sulfato de amonio (21 - 0 - 0- 24S)

Según Bertsch (2009), la cantidad de N extraído por 1 ha de arroz para un rendimiento de 9 t/ha (rendimiento potencial de la variedad Fedearroz 60) es equivalente a 189 kg de N por hectárea. Considerando que la mayor absorción de este nutriente se da dentro de los 10 primeros cm, se asumió que el nitrógeno debe estar distribuido en la capa arable a esta

profundidad. Se estimó un volumen de capa arable igual a 1000 m³. El análisis de caracterización del suelo determinó que la textura del suelo era *franco*, por lo que se pudo estimar una densidad en volumen de 1.35 g/cm³. Por lo tanto, se estimó el peso de la capa arable en 1350 t.

La cantidad total de material de suelo que se usó en el ensayo tuvo un peso seco de 414.6 kg. Entonces.

$$\begin{array}{r} 189 \text{ kg de N} \text{-----} 1\,350\,000 \text{ kg de material de suelo} \\ X \text{ kg de N} \text{-----} 414.6 \text{ kg de material de suelo} \\ X = 0.05804 \text{ kg} = 58.04 \text{ g de N} \end{array}$$

Se asumió que la materia orgánica del suelo no abasteció de nitrógeno por el bajo contenido que arroja el análisis de suelo (1.98 por ciento), por lo que toda la dosis de N fue aportada por el sulfato de amonio (21 – 0 – 0 – 24S) y el Fosfato diamónico (18 - 46 - 0). Del cálculo anterior se determinó la aplicación de 43.48 g de fosfato diamónico. Considerando que contiene un 18 por ciento de N, se concluyó que este fertilizante aportó 7.82 g de N. Por lo tanto, la diferencia, equivalente a 50.21 g de N fue aportada por el sulfato de amonio

$$\begin{array}{r} \text{Si:} \quad 21 \% \text{ -----} 50.21 \text{ g de N} \\ \quad 100 \% \text{ -----} X \text{ g de sulfato de amonio} \\ x = 239.12 \text{ g de sulfato de amonio.} \end{array}$$

Debido a que el N es un elemento cuya eficiencia de uso es baja, se optó por fraccionar la dosis en cinco aplicaciones distribuidas según la curva de extracción de nutrientes presentada por Bertsch (2009) diluidas en el agua de riego:

- 1era aplicación: 13.5 por ciento de la dosis= 7.82 g N. Presente con el fosfato diamónico.
- 2da aplicación (inicio macollamiento): 11.5 por ciento de la dosis = 6.68 g N. Aportado en 31.83 g de sulfato de amonio.
- 3ra aplicación (elongación de tallos): 25 por ciento de la dosis= 14.51 g N. Aportado en 69.1 g de sulfato de amonio.
- 4ta aplicación (estadío de bota): 25 por ciento de la dosis= 14.51 g N. Aportado en 69.1 g de sulfato de amonio.
- 5ta aplicación:(espigado) 25 por ciento de la dosis= 14.51 g N. Aportado en 69.1 g de sulfato de amonio.

Potasio: fuente sulfato de potasio (0 - 0 - 50 - 18S)

Según Bertsch (2009), la cantidad de K_2O extraído por 1 ha de arroz es equivalente a 271.15 kg por hectárea. Considerando que la mayor absorción de este nutriente se da dentro de los 10 primeros cm, se asumió que el potasio debe estar distribuido en la capa arable a esta profundidad. Se estimó un volumen de capa arable igual a 1000 m³. El análisis de caracterización del suelo determinó que la textura del suelo era *franco*, por lo que se estimó una densidad en volumen de 1.35 g/cm³. Por lo tanto, se puede establecer un peso de la capa arable de 1350 t. La cantidad total de material de suelo que se usó en el ensayo tuvo un peso de 414.6 kg. Entonces.

$$\begin{array}{l} 271.15 \text{ kg de } K_2O \text{-----} 1\,350\,000 \text{ kg de Material de suelo} \\ X \text{ kg de } K \text{-----} 414.6 \text{ kg de material de suelo} \\ X = 0.08327 \text{ g} = 83.27 \text{ g de } K_2O \text{ es la cantidad de potasio que} \\ \text{el cultivo extrae teóricamente.} \end{array}$$

El análisis de caracterización de suelos arrojó un valor de K^+ intercambiable promedio de 0.2466 cmol_c/kg. 1 cmol_c K^+ = 1 cmol K^+

$$\begin{array}{l} 0.2466 \text{ cmol } K^+ \text{-----} 1 \text{ kg de material de suelo} \\ x \text{ g } K^+ \text{-----} 414.6 \text{ kg de material de suelo} \end{array}$$

$$x = 102.2418 \text{ cmol} = 1.022418 \text{ mol de } K^+ \text{ presentes en el material de suelo.}$$

$$\begin{array}{l} \text{Si} \quad 1 \text{ mol } K^+ \text{-----} 39 \text{ g} \\ \quad 1.022418 \text{ mol } K^+ \text{-----} x \\ x = 39.87 \text{ g de } K^+ \text{ presentes en el material de suelo.} \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{Si:} \quad \text{En } 94 \text{ g de } K_2O \text{-----} 78 \text{ g de } K \\ \quad x \text{ g de } K_2O \quad \text{-----} 39.87 \text{ g de } K \end{array}$$

$$X = 48.05 \text{ g de } K_2O \text{ presentes en el material de suelo.}$$

Como se puede observar existió un déficit de potasio para cumplir con la extracción del cultivo. Déficit de K_2O = 83.27 g - 48.05 g = **35.22 g de K_2O** (para los 414.6 kg de material de suelo). Esta deficiencia fue suplementada por potasio proveniente del sulfato de potasio (0 - 0 - 50 - 18S).

Si: 50 %----- 35.22 g de K₂O
 100 %----- x g de sulfato de potasio
 X= 70.44 g de sulfato de potasio para 414.6 kg de material de suelo.
 Esto significa que a cada maceta le tocó 0.97 g de este fertilizante.

Azufre

La incorporación de sulfato de amonio y sulfato de potasio también agregó cierta cantidad de azufre a los medios de crecimiento. Estos corresponden a las siguientes cantidades: sulfato de amonio (21 – 0 – 0 - 24S) agregado a todo el material de suelo del ensayo fue de 239.12 g. Esto corresponde a 57.39 g de S. En el caso del sulfato de potasio (0 - 0 - 50 - 18S). agregado, la cantidad fue de 70.44 g, lo cual correspondió a 12.67 g de S. Por lo tanto, la cantidad total de azufre agregado para 414.6 kg de material de suelo fue de 70.07 g. A cada una de las 72 macetas le correspondió 0.97 g de S.

ANEXO 8: Algoritmo en Python para calcular la integral de luz diaria

```

from decimal import*
from math import*
from pylab import*
#INGRESO DE DATOS DE LUX CADA HORA
lux0=float(0)
lux1=float(input('Cantidad de LUX a las 9 am: '))
lux2=float(input('Cantidad de LUX a las 12 pm: '))
lux3=float(input('Cantidad de LUX a las 3 pm: '))
lux4=float(0)

#CONVERSION DE LUX A MOLES
mol0=lux0
mol1=(lux1*18)/(1e9)
mol2=(lux2*18)/(1e9)
mol3=(lux3*18)/(1e9)
mol4=lux4

#HORAS DE TOMA DE DATOS FORMATO 24H
h1=float(6)
h2=float(9)
h3=float(12)
h4=float(15)
h5=float(18)

#HORA DE INICIO DE DIAS
iniciodia=float(6)

#CALCULO DE CANTIDAD DE SEGUNDOS DESDE
#INICIO DEL DIA HASTA UNA DETERMINADA HORA
segundo=float(3600)

seg6am=(h1-iniciodia)*segundo
seg9am=(h2-iniciodia)*segundo
seg12pm=(h3-iniciodia)*segundo
seg3pm=(h4-iniciodia)*segundo
seg6pm=(h5-iniciodia)*segundo

#####
#SECCION 6-9

pendiente1=(mol1-mol0)/(seg9am-seg6am)
ecuacion6a9=[]
time6a9=[]

for i in range(1,(int(seg9am)+1)):
    time6a9.append(i)
    sec69=pendiente1*(i-seg6am)+mol0
    ecuacion6a9.append(sec69)

```

```

#####
#SECCION 9-12

pendiente2=(mol2-mol1)/(seg12pm-seg9am)
ecuacion9a12=[]
time9a12=[]

for i in range(int(seg9am)+1,int(seg12pm)+1):
    time9a12.append(i)
    sec912=pendiente2*(i-seg9am)+mol1
    ecuacion9a12.append(sec912)

#####
#SECCION 12-3

pendiente3=(mol3-mol2)/(seg3pm-seg12pm)
ecuacion12a3=[]
time12a3=[]

for i in range(int(seg12pm)+1,int(seg3pm)+1):
    time12a3.append(i)

for i in range(int(seg12pm)+1,int(seg3pm)+1):
    time12a3.append(i)
    sec123=pendiente3*(i-seg12pm)+mol2
    ecuacion12a3.append(sec123)

#####
#SECCION 3-6

pendiente4=(mol4-mol3)/(seg6pm-seg3pm)
ecuacion3a6=[]
time3a6=[]

for i in range(int(seg3pm)+1,int(seg6pm)+1):
    time3a6.append(i)
    sec36=pendiente4*(i-seg3pm)+mol3
    ecuacion3a6.append(sec36)

#####
##SE UNE LOS VECTORES PARA FORMAR UNO SOLO
tiempototal=time6a9+time9a12+time12a3+time3a6
ecuaciontotal=ecuacion6a9+ecuacion9a12+ecuacion12a3+ecuacion3a6
moles=sum(ecuaciontotal)

#GRAFICA DE LA ECUACION
print('El total de moles que se presento el dia de hoy es de:',moles)
#
plot(tiempototal,ecuaciontotal,'r',linewidth=3)
title('MOLES DE LUZ POR DIA')
xlabel('Cantidad de segundos')
ylabel('Moles de luz')

```


ANEXO 11: Matriz general de datos

ID	rep	FuenteSIA	Concentracion	NumHo/2d	AlfPia94	HabMac	PeFre	PeRaizFre	PeHojaFre	VoRaiz	PeSeo	PeSeoHoja	PeSeoRaiz	MaeriaSecal	PePlani	ManiMalforma	EsguillaPlant	EgNioproPlant	EgNioproPlant	EspPorPlant	Rdo	N°hojas	N°Raiz	PorcShoj	PorcRaiz	SJSuelos	CE	pH	PorcEspNeoco	PorcPanMal
U101	r1	Escoria	100ppm	10	43	164	1245.21	689.37	355.84	589	138.3	88.27	50.03	11.19	50	47	1658	1824	1824	33.16	44.77	1.316	0.924	4.86	6.51	34.54	1.45	7.07	91.92	94.00
U103	r1	Silicato	Opdm	21	54	142	1107.69	598.3	508.39	541	143.14	94.37	48.744	12.92	49	45	2017	1969	1969	41.16	54.46	1.26	0.868	3.43	8.54	26.24	1.35	4.99	97.62	91.84
U105	r2	Escoria	Opdm	17	48	141	884.59	442.23	442.36	375	126.56	83.76	42.8	14.31	41	40	1815	1682	1682	44.27	49.01	1.176	1.082	3.11	8.09	15.99	1.43	5.07	91.57	97.56
U106	r2	Escoria	Opdm	17	58	153	804.22	342.96	461.26	306	126.34	88.02	37.32	15.71	52	24	3707	2918	2918	71.29	100.09	1.064	1.082	2.43	5.99	9.47	1.18	5.12	78.72	46.15
U109	r1	Centiza	Opdm	20	53	119	897.22	467.87	509.35	433	116.89	79.45	37.54	11.73	40	38	1478	1380	1380	36.95	39.91	1.288	1.148	3.02	6.15	11.80	1.11	4.99	94.05	95.00
U110	r1	Silicato	200ppm	12	53	120	1116.2	548.08	568.12	497	129.41	86.34	43.07	11.59	42	42	1501	1290	1290	35.74	40.53	1.008	0.84	4.55	7.93	35.56	1.47	5.36	85.94	100.00
U112	r1	Silicato	400ppm	20	52	126	1003.7	485.99	517.71	412	129.07	86.71	42.36	12.86	39	34	1832	1517	1517	46.97	49.46	1.148	1.008	4.14	6.87	18.97	1.33	5.24	82.81	87.18
U113	r1	Centiza	400ppm	24	51	118	1090.06	608.73	451.33	573	114.9	74.47	40.43	10.84	36	33	1850	1813	1813	51.39	49.95	1.12	0.84	4.37	7.05	15.53	1.36	5.53	98.00	91.67
U114	r2	Centiza	400ppm	28	50	138	1233.45	778.76	454.69	636	111.54	72.09	39.45	9.04	34	34	1670	1588	1588	48.12	45.09	0.98	0.98	3.81	7.50	13.85	1.24	5.32	95.09	100.00
U116	r3	Silicato	400ppm	13	51	127	1042.4	485.63	430.57	431	128.6	88.91	39.69	12.34	36	35	1482	1229	1229	40.61	39.47	1.12	1.12	4.98	6.87	55.32	1.56	5.49	84.06	97.22
U118	r4	Escoria	Opdm	20	47	136	911.89	481.32	430.57	410	120.99	79.09	41.9	13.27	42	38	1821	1786	1786	43.36	49.17	1.148	1.008	2.41	7.00	13.57	1.48	5.12	98.08	90.48
U119	r1	Centiza	200ppm	21	52	120	909.94	428.5	481.44	385	114.54	75.43	39.11	12.59	33	28	1416	1220	1220	42.91	38.23	1.232	0.952	2.72	8.80	20.93	1.02	5.24	86.16	84.85
U121	r3	Centiza	Opdm	19	51	123	992.08	488.04	504.04	439	134	86.4	47.6	13.51	40	40	1806	1769	1769	45.15	48.76	0.952	0.952	2.58	8.82	12.64	1.15	5.16	97.95	100.00
U122	r2	Centiza	100ppm	16	50	133	850.77	360.47	480.3	439	119.18	79.26	39.92	14.01	37	30	1928	1886	1886	52.11	52.06	1.148	1.098	3.21	8.02	24.19	1.3	5.2	98.34	81.08
U123	r2	Silicato	100ppm	21	51	127	993.63	502.43	497.2	422	126.04	86.98	39.06	12.68	37	35	1970	1826	1826	53.24	53.19	0.812	1.098	3.88	7.19	24.19	1.24	5.45	92.69	94.59
U125	r3	Centiza	400ppm	28	50	125	988.88	534.13	455.55	513	110.8	73.37	37.23	11.18	37	33	1814	1722	1722	48.03	48.98	1.036	0.952	3.75	6.39	20.93	1.41	5.49	94.93	89.19
U126	r2	Silicato	100ppm	15	54	142	943.74	443.79	499.95	388	132.38	87.47	44.91	14.03	37	35	1932	1812	1812	52.22	52.16	1.092	0.952	3.26	7.96	23.07	1.29	5.45	93.79	94.59
U129	r2	Escoria	400ppm	3	23	1	5.55	3.2	2.35	5.5	0.56	0.92	0.24	10.09	0	0	0	0	0	0	0	0	3.49	3.40	63.71	2.59	7.86	96.16	92.68	
U130	r3	Centiza	100ppm	21	55	144	905.7	419.48	486.22	391	128.37	85.15	43.22	14.17	41	38	1895	1840	1840	46.22	51.17	0.916	1.008	2.27	7.19	15.15	1.13	5.57	97.10	92.68
U131	r4	Centiza	200ppm	22	54	116	836.4	408.61	427.79	388	116.03	78.76	37.27	13.87	38	30	1949	1803	1803	51.28	52.62	1.204	0.924	2.62	7.35	13.48	1.29	5.44	97.64	78.95
U135	r5	Silicato	400ppm	9	50	134	1052.75	551.77	500.98	447	124.84	87	37.84	11.86	38	38	1557	1424	1424	40.97	42.04	1.204	0.84	5.22	7.80	63.71	1.33	6.03	81.18	100.00
U136	r4	Silicato	200ppm	17	57	124	1019.76	453.95	465.81	412	127.09	85.89	41.16	13.82	38	34	2277	2182	2182	58.92	61.48	1.092	0.952	4.56	7.35	37.15	1.71	5.45	95.83	89.47
U137	r5	Escoria	Opdm	17	49	129	892.33	408.05	484.21	404	127.4	88.41	38.99	14.28	39	36	2038	1982	1982	52.26	55.03	1.092	1.092	2.38	5.40	10.40	1.35	5.45	97.74	92.31
U138	r2	Silicato	Opdm	16	52	163	932.43	379.78	552.65	366	128.38	85.8	42.59	13.77	46	39	2178	2022	2022	47.35	58.81	1.26	1.066	2.83	8.23	12.82	0.699	5.6	92.94	84.78
U139	r2	Escoria	200ppm	3	48	2	20.48	12	8.48	13	2.26	1.41	0.85	11.04	0	0	0	0	0	0	0	0	2.43	3.61	52.15	1.98	7.61	96.16	92.68	
U141	r3	Escoria	400ppm	3	18	1	4.69	3.33	1.36	4	0.32	0.16	0.16	6.82	0	0	0	0	0	0	0	0	3.79	1.59	90.55	1.78	8.4	96.16	92.68	
U142	r4	Escoria	400ppm	3	25	1	6.12	3.25	2.87	4	0.71	0.5	0.21	11.6	0	0	0	0	0	0	0	0	2.05	2.02	92.04	1.79	8.36	96.16	92.68	
U144	r5	Escoria	400ppm	3	21	1	2.5	1.67	0.83	2	0.13	0.06	0.07	5.2	0	0	0	0	0	0	0	0	3.96	0.78	106.07	2.26	8.28	96.16	92.68	
U145	r4	Centiza	Opdm	17	54	132	986.25	528.34	457.91	481	122.31	81.25	41.06	12.4	39	29	2150	2044	2044	55.13	58.05	0.448	1.064	2.97	8.05	15.25	1.01	5.4	95.07	74.36
U146	r6	Escoria	Opdm	15	50	139	985.07	486.3	498.77	363	122.19	84.61	37.58	12.4	39	38	1981	1901	1901	50.28	52.85	1.092	1.232	3.51	5.98	12.82	1.09	5.24	96.94	97.44
U147	r4	Centiza	400ppm	28	55	113	850.24	485.66	364.58	446	104.93	71.18	33.75	12.34	30	28	1770	1614	1614	57	46.17	1.148	0.756	3.13	7.32	16.46	1.1	5.61	94.39	93.33
U148	r5	Silicato	200ppm	14	49	151	1007.32	484.21	523.11	450	139.56	97.01	42.55	13.85	42	42	1608	1277	1277	38.29	43.42	0.98	0.812	4.88	7.30	27.36	1.52	5.74	79.42	100.00
U150	r3	Escoria	200ppm	3	36	3	14.62	8.02	6.6	9	1.14	1.14	0	7.8	0	0	0	0	0	0	0	0	2.01	2.01	62.96	2.23	7.87	96.16	92.68	
U151	r4	Silicato	Opdm	14	47	133	873.86	488.74	385.12	469	121.48	84.63	36.85	13.9	39	35	1938	1443	1443	40.97	43.15	0.84	1.092	2.63	4.78	19.81	1	5.2	90.30	89.74
U152	r4	Silicato	100ppm	17	53	124	863.94	384.27	479.67	375	124.53	84.98	38.55	14.41	36	35	2116	2049	2049	58.78	57.13	0.728	1.176	4.26	7.16	18.14	1.36	5.41	96.83	97.22
U154	r5	Silicato	Opdm	14	53	130	955.73	462.03	493.7	372	126.18	85.1	41.08	13.2	38	38	1496	1463	1463	39.37	40.39	1.008	0.924	2.63	6.80	12.45	0.99	5.32	97.13	100.00
U155	r4	Escoria	200ppm	3	25	1	5.49	3.31	2.18	4	0.49	0.21	0.28	8.83	0	0	0	0	0	0	0	0	2.28	1.68	60.63	2.63	7.7	96.16	92.68	
U156	r4	Centiza	100ppm	19	52	135	877.56	449.62	427.94	377	115.45	77.15	38.3	13.16	36	34	1610	1597	1597	44.72	43.47	0.56	1.092	3.24	6.62	14.31	1.16	5.49	99.19	94.44
U157	r6	Silicato	200ppm	20	53	132	1080.42	585.25	495.17	460	136.15	83.02	43.13	12.84	40	39	2427	2286	2286	60.68	65.53	1.12	1.176	4.95	6.78	24.94	1.44	5.82	94.19	97.50
U159	r5	Escoria	100ppm	9	47	180	1108.39	581.07	527.32	461	134.77	87.21	47.56	12.16	47	47	916	864	864	19.49	24.73	0.866	0.98	3.72	5.08	22.33	1.34	7.48	94.32	100.00
U160	r5	Centiza	100ppm	18	51	141	845.05	459.69	405.36	392	112.8	78.19	33.61	13.35	33	33	1609	1531	1531	48.76	43.44	0.98	0.98	2.88	6.32	14.50	1.25	5.49	95.15	100.00
U161	r6	Escoria	400ppm	3	28	1	7.22	4.38	2.84	5	0.86	0.4	0.46	11.91	0	0	0	0	0	0	0	0	1.94	1.93	96.66	2.27	8.4	96.16	92.68	
U162	r5	Centiza	Opdm	13	46	155	909.05	473.88	435.17	438	116.08	79.21	36.87	12.77	41	41	1540	1424	1424	37.56	41.58	1.12	1.092	2.92	6.57	24.29	1.34	5.28	92.47	100.00
U166	r5	Centiza	400ppm	18	54	118	894.1	539.95	354.15	4																				

ANEXO 12: Comandos usados para los análisis estadísticos en R

```
pseco<-read.table("E:/pseco.txt",T)
pseco
attach(pseco)
str(pseco)
head(pseco)
names(pseco)
FuentesdeSiA<-as.factor(FuentesdeSiA)
Concentracion<-as.factor(Concentracion)
modelo3<-lm(ferxu~FuentesdeSiA+Concentracion+FuentesdeSiA*Concentracion,data=pseco)
anova<-aov(modelo3)
summary(anova)
pseco<- data.frame(FuentesdeSiA,Concentracion,ferxu)
plot.design(pseco, fun="mean", main=" Gráfica de efectos principales", ylab= "Log(Peso Seco (g) + 9.87)", xlab="FuentesdeSiA")
interaction.plot(FuentesdeSiA , Concentracion,ferxu, main="Interacción FuentesdeSiA-Concentracion en Peso Seco", xlab="FuentesdeSiA", ylab="Log(Peso Seco (g) + 9.87)"
plot(rstandard(modelo3), main="Gráfica de residuos estándar", xlab="Observación", ylab="Residuos estandarizados")
qqnorm(rstandard(modelo3))
qqline(rstandard(modelo3), col="red")
shapiro.test(rstandard(modelo3))
library(car)
ncvTest(modelo3)
library(phia)
modelo3.means <- interactionMeans(modelo3,factors=c("FuentesdeSiA","Concentracion"))
modelo3.means
plot(modelo3.means)
testInteractions(modelo3, fixed="FuentesdeSiA", across="Concentracion")
testInteractions(modelo3, fixed="Concentracion", across="FuentesdeSiA")
```

ANEXO 13: Conductividad eléctrica - comprobación de supuestos estadísticos

```
> shapiro.test(rstandard(modelo16))
```

Shapiro-Wilk normality test

```
data: rstandard(modelo16)
W = 0.98496, p-value = 0.8181
```

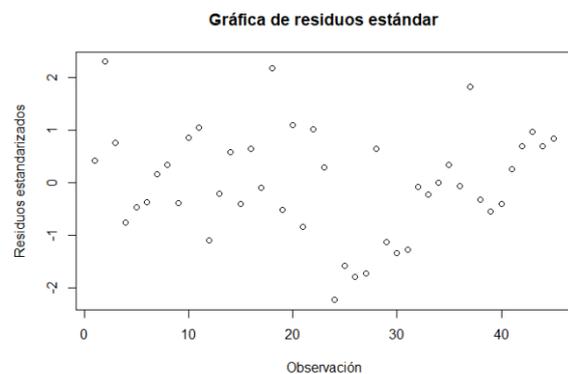
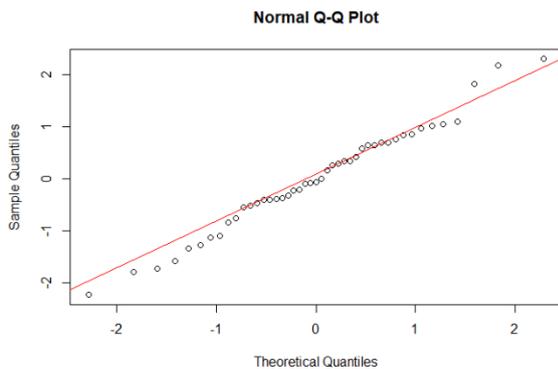
```
> library(car)
```

```
> ncvTest(modelo16)
```

Non-constant Variance Score Test

Variance formula: ~ fitted.values

Chisquare = 2.820473, Df = 1, p = 0.093069



ANEXO 14: : Conductividad eléctrica - análisis de varianza

```
> anova<-aov(modelo16)
```

```
> summary(anova)
```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FuentesdeSiA	2	0.3600	0.18000	33.95	9.81e-09 ***
Concentracion	3	0.2914	0.09713	18.32	3.56e-07 ***
FuentesdeSiA:Concentracion	6	0.1572	0.02619	4.94	0.00105 **
Residuals	33	0.1750	0.00530		

```
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

ANEXO 15: Conductividad eléctrica - análisis de efectos simples

```

F Test:
P-value adjustment method: holm
      Concentracion1 Concentracion2 Concentracion3 Df Sum of Sq      F
Ceniza    -0.048422    -0.03783    -0.061397   3   0.00833   0.5237
Escoria   -0.292228    -0.25639     0.045881   3   0.33998  21.3717
Silicato  -0.180208    -0.05349     0.033805   3   0.10025   6.3019
Residuals                                33   0.17499

      Pr(>F)
Ceniza    0.668987
Escoria   2.135e-07 ***
Silicato  0.003367 **
Residuals
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
> testInteractions(modelo16, fixed="Concentracion", across="FuentesdeSiA")
F Test:
P-value adjustment method: holm
      FuentesdeSiA1 FuentesdeSiA2 Df Sum of Sq      F      Pr(>F)
0ppm      0.077887      0.125863   2  0.035407  3.3386  0.09563 .
100ppm    -0.038241     0.034979   2  0.007607  0.7173  0.49551
200ppm    -0.149102     0.249959   2  0.209233  19.7291 6.937e-06 ***
400ppm    -0.053900     0.237882   2  0.226945  21.3993 4.397e-06 ***
Residuals                                33  0.174987
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
>
MSerror Mean   SDev   Min    Max    Num    CV
0.01   1.31   0.15   1.00   1.71   45     5.56

```

ANEXO 16: pH – comprobación de supuestos estadísticos

```
> shapiro.test(rstandard(modelo17))
```

Shapiro-Wilk normality test

```
data: rstandard(modelo17)
```

```
W = 0.98342, p-value = 0.7588
```

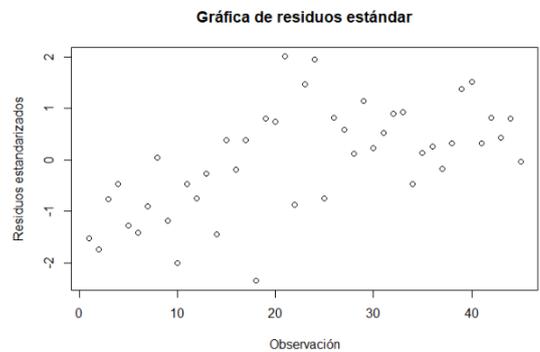
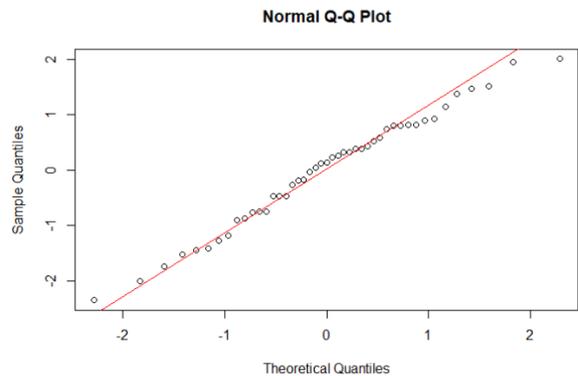
```
> library(car)
```

```
> ncvTest(modelo17)
```

Non-constant Variance Score Test

Variance formula: ~ fitted.values

```
Chisquare = 0.6049068, Df = 1, p = 0.43671
```



ANEXO 17: pH – análisis de varianza

```

> anova<-aov(modelo17)
> summary(anova)
              Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
FuentesdeSiA  2  25.065  12.532   344.46 < 2e-16 ***
Concentracion  3  13.672   4.557   125.27 < 2e-16 ***
FuentesdeSiA:Concentracion  6  12.873   2.146   58.97 3.15e-16 ***
Residuals    33   1.201   0.036
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

ANEXO 18: pH – análisis de efectos simples

```

F Test:
P-value adjustment method: holm
      Concentracion1 Concentracion2 Concentracion3 Df Sum of Sq      F
Ceniza    -0.3160      -0.0845      -0.18200  3    0.2686    2.4611
Escoria   -3.0600      -0.9850      -0.53333  3   25.8733  237.0503
Silicato  -0.4825      -0.3725      -0.16750  3    0.4036    3.6979
Residuals                33    1.2006
      Pr(>F)
Ceniza  0.07992 .
Escoria < 2e-16 ***
Silicato 0.04253 *
Residuals
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
> testInteracciones(modelo17, fixed="Concentracion", across="FuentesdeSiA")
F Test:
P-value adjustment method: holm
      FuentesdeSiA1 FuentesdeSiA2 Df Sum of Sq      F    Pr(>F)
0ppm      -0.0715      -0.0775  2    0.0159    0.2192    0.8043
100ppm     0.0500     1.8875  2    5.5553   76.3455  8.346e-13 ***
200ppm    -0.2525     2.1342  2    9.9270  136.4263  3.324e-16 ***
400ppm    -0.2380     2.5000  2   20.8735  286.8638 < 2.2e-16 ***
Residuals                33    1.2006
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
>
MSerror Mean   SDev   Min   Max   Num   CV
0.04   5.95   1.10   4.99   8.40   45   3.21

```

ANEXO 19: Fotos que demuestran la presencia de otros cultivares.



ANEXO 20: Fotos del daño por frío



ANEXO 21: Síntomas necróticos en las espiguillas



ANEXO 24: Disponibilidad de silicio en suelo – análisis de varianza

```
> anova<-aov(modelo6)
> summary(anova)
              Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
FuentesdeSiA  2  5561  2780.4  118.56 3.00e-15 ***
Concentracion  3  8197  2732.5  116.52 < 2e-16 ***
FuentesdeSiA:Concentracion  6  7959  1326.4   56.56 2.46e-15 ***
Residuals     31    727    23.5
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
2 observations deleted due to missingness
```

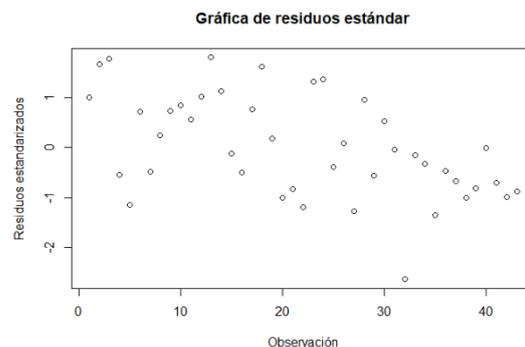
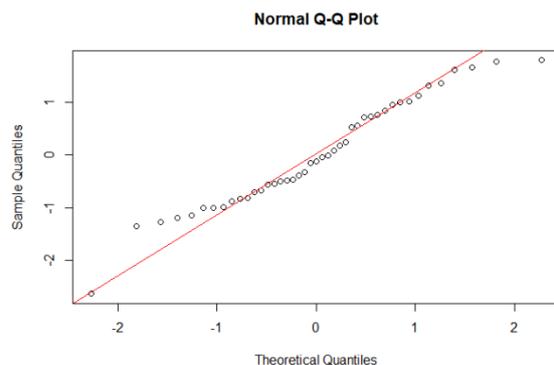
ANEXO 25: Disponibilidad de silicio en suelo – análisis de efectos simples

```
F Test:
P-value adjustment method: holm
      Concentracion1 Concentracion2 Concentracion3 Df Sum of Sq      F
Ceniza      -0.820           0.527           0.690  3         5.4    0.0767
Escoria     -81.296          -65.313          -35.165  3    13522.2 192.2016
Silicato    -41.681          -38.419          -28.261  3     2628.5  37.3607
Residuals                                31         727.0
      Pr(>F)
Ceniza      0.9721
Escoria     < 2.2e-16 ***
Silicato    4.112e-10 ***
Residuals
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
> testInteractions(modelo6, fixed="Concentracion", across="FuentesdeSiA")
F Test:
P-value adjustment method: holm
      FuentesdeSiA1 FuentesdeSiA2 Df Sum of Sq      F    Pr(>F)
0ppm      -2.139           -5.382  2         66.7    1.4220  0.25653
100ppm     -4.054           7.339  2         173.2   3.6932  0.07284 .
200ppm     -14.049          27.329  2         2312.7  49.3085 7.03e-10 ***
400ppm     -43.000          34.233  2    11499.5 245.1761 < 2.2e-16 ***
Residuals                                31         727.0
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
>
MSerror Mean   SDev   Min   Max   Num   CV
23.45  28.82  23.12  9.47  98.66  43   16.80
```

ANEXO 26: Absorción de silicio en raíz – comprobación de supuestos estadísticos

```
> shapiro.test(rstandard(modelo8))
      Shapiro-Wilk normality test
data:  rstandard(modelo8)
W = 0.96609, p-value = 0.2304
```

```
> library(car)
> ncvTest(modelo8)
Non-constant Variance Score Test
Variance formula: ~ fitted.values
Chisquare = 0.04101865, Df = 1, p = 0.8395
```



ANEXO 27: Absorción de silicio en raíz – análisis de varianza

```
> anova<-aov(modelo8)
> summary(anova)
```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FuentesdeSiA	2	88.42	44.21	43.102	1.12e-09 ***
Concentracion	3	18.65	6.22	6.062	0.00227 **
FuentesdeSiA:Concentracion	6	47.72	7.95	7.755	3.81e-05 ***
Residuals	31	31.80	1.03		

```
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
2 observations deleted due to missingness
```

ANEXO 28: Absorción de silicio en raíz – análisis de efectos simples

```
> plot(modelo8.means)
> testInteractions(modelo8, fixed="FuentesdeSiA", across="Concentracion")
F Test:
P-value adjustment method: holm
```

	Concentracion1	Concentracion2	Concentracion3	Df	Sum of Sq	F
Ceniza	0.3617	0.1979	1.24087	3	2.276	0.7398
Escoria	4.5481	3.8533	0.70191	3	61.644	20.0339
Silicato	-1.3155	-1.1051	-1.06478	3	2.454	0.7974
Residuals				31	31.795	

```
Pr(>F)
Ceniza      1
Escoria 6.235e-07 ***
Silicato    1
Residuals
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
> testInteractions(modelo8, fixed="Concentracion", across="FuentesdeSiA")
F Test:
P-value adjustment method: holm
```

	FuentesdeSiA1	FuentesdeSiA2	Df	Sum of Sq	F	Pr(>F)
0ppm	0.11460	-0.5945	2	1.421	0.6929	0.5077
100ppm	-0.25963	-1.4996	2	3.137	1.5292	0.4652
200ppm	0.74309	-4.6913	2	36.213	17.6538	2.286e-05 ***
400ppm	-1.56256	-6.4580	2	86.717	42.2739	5.564e-09 ***
Residuals			31	31.795		

```
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
>
```

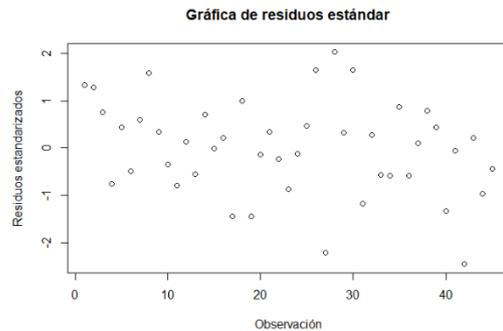
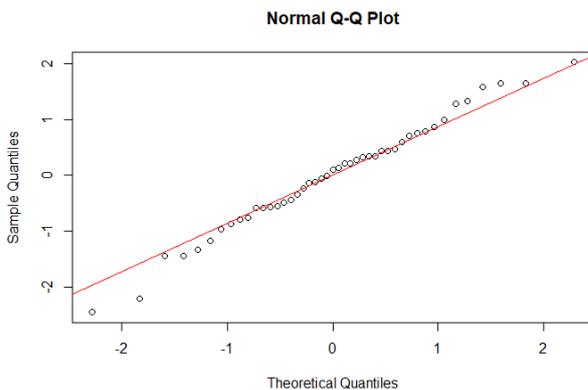
ANEXO 29: Absorción de silicio en órganos aéreos – comprobación de supuestos estadísticos

```
> shapiro.test(rstandard(modelo7))

      Shapiro-Wilk normality test

data:  rstandard(modelo7)
W = 0.98711, p-value = 0.8918
```

```
> library(car)
> ncvTest(modelo7)
Non-constant Variance Score Test
Variance formula: ~ fitted.values
Chisquare = 0.5974926, Df = 1, p = 0.43954
```



ANEXO 30: Absorción de silicio en órganos aéreos – análisis de varianza

```
> anova<-aov(modelo7)
> summary(anova)
          Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
FuentesdeSiA      2  9.864   4.932  19.447 2.63e-06 ***
Concentracion     3  5.987   1.996   7.868 0.000427 ***
FuentesdeSiA:Concentracion 6 11.052   1.842   7.263 5.30e-05 ***
Residuals        33  8.369   0.254
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

ANEXO 31: Absorción de silicio en órganos aéreos – análisis de efectos simples

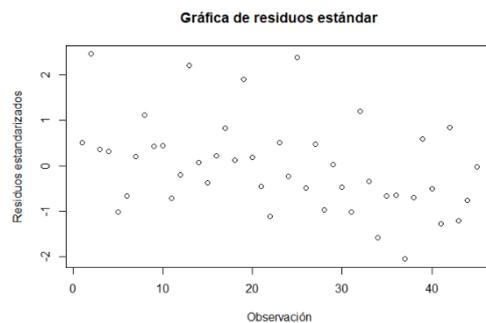
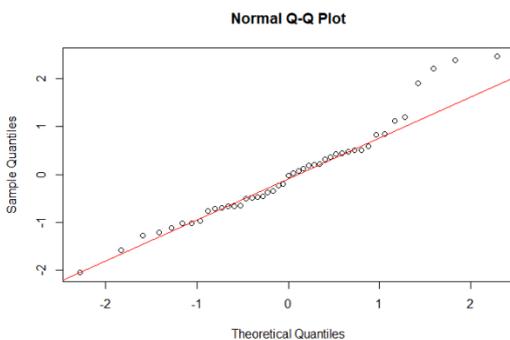
```
F Test:
P-value adjustment method: holm
      Concentracion1 Concentracion2 Concentracion3 Df Sum of Sq      F
Ceniza      -0.83176      -0.7545      -0.98368   3   2.4455  3.2141
Escoria     -0.27908       1.1436      -0.80526   3   4.7954  6.3026
Silicato    -2.22231      -1.2142      -0.34282   3   9.7981 12.8777
Residuals                                     33   8.3694
      Pr(>F)
Ceniza    0.035379 *
Escoria   0.003365 **
Silicato  2.953e-05 ***
Residuals
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
> testInteractions(modelo7, fixed="Concentracion", across="FuentesdeSiA")
F Test:
P-value adjustment method: holm
      FuentesdeSiA1 FuentesdeSiA2 Df Sum of Sq      F    Pr(>F)
0ppm      -0.05592      -0.10913   2   0.0265  0.0523 0.9491108
100ppm    -0.98674      0.30544   2   2.9683  5.8518 0.0133618 *
200ppm    -2.08734     -2.51480   2  12.4270 24.4993 1.202e-06 ***
400ppm    -1.44647     -2.05236   2   6.0185 11.8652 0.0003932 ***
Residuals                                     33   8.3694
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
>
MSError Mean   SDev   Min    Max    Num    CV
0.25   3.33   0.90   1.94   5.22   45    15.13
```

ANEXO 32: Peso seco – comprobación de supuestos estadísticos

```
> shapiro.test(rstandard(modelo3))
      Shapiro-Wilk normality test

data:  rstandard(modelo3)
W = 0.95761, p-value = 0.09898
```

```
> library(car)
> ncvTest(modelo3)
Non-constant Variance Score Test
Variance formula: ~ fitted.values
Chisquare = 0.817825, Df = 1, p = 0.36582
```



ANEXO 33: Peso seco – análisis de varianza

```
> anova<-aov(modelo3)
> summary(anova)
          Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
FuentesdeSiA  2  3.318  1.6591   4655 <2e-16 ***
Concentracion  3  1.703  0.5676   1592 <2e-16 ***
FuentesdeSiA:Concentracion  6  2.923  0.4871   1367 <2e-16 ***
Residuals    33  0.012  0.0004
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

ANEXO 34: Peso seco – análisis de efectos simples

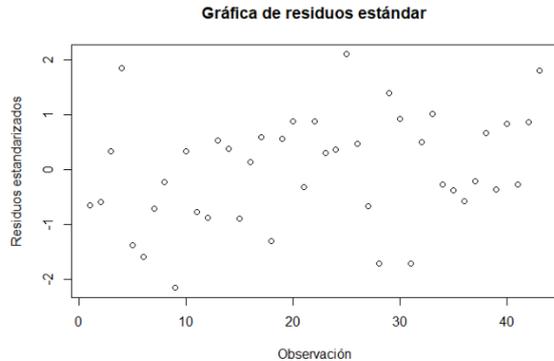
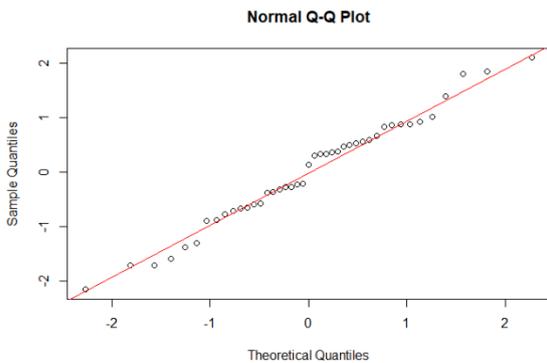
```
F Test:
P-value adjustment method: holm
      Concentracion1 Concentracion2 Concentracion3 Df Sum of Sq      F
Ceniza      0.04351      0.03247      0.020372  3  0.0051  4.7641
Escoria     1.11255     1.15068     0.030694  3  4.6197 4320.1072
Silicato    0.00898     0.00400     0.019455  3  0.0007  0.6528
Residuals                    33  0.0118
Pr(>F)
Ceniza 0.01445 *
Escoria < 2e-16 ***
Silicato 0.58690
Residuals
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
> testInteractions(modelo3, fixed="Concentracion", across="FuentesdeSiA")
F Test:
P-value adjustment method: holm
      FuentesdeSiA1 FuentesdeSiA2 Df Sum of Sq      F Pr(>F)
0ppm      -0.023786     -0.01551  2  0.0013  1.7872 0.1832
100ppm    -0.029845     0.02760  2  0.0047  6.5575 0.0080 **
200ppm    -0.057393    -1.10783  2  2.3749 3331.3687 <2e-16 ***
400ppm    -0.058309    -1.11907  2  3.3906 4756.1096 <2e-16 ***
Residuals                    33  0.0118
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

MSerror	Mean	SDev	Min	Max	Num	CV
0.00	1.93	0.43	1.00	2.18	45	0.98

ANEXO 35: Porcentaje de materia seca – comprobación de supuestos estadísticos

```
> shapiro.test(rstandard(modelo4))
Shapiro-Wilk normality test
data:  rstandard(modelo4)
W = 0.98217, p-value = 0.7328
```

```
> library(car)
> ncvtTest(modelo4)
Non-constant Variance Score Test
Variance formula: ~ fitted.values
Chisquare = 2.095971, Df = 1, p = 0.14769
```



ANEXO 36: Porcentaje de materia seca – análisis de varianza

```
> anova<-aov(modelo4)
> summary(anova)
          Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
FuentesdeSiA  2  10.57   5.283   4.898 0.01418 *
Concentracion  3   36.28  12.092  11.211 3.82e-05 ***
FuentesdeSiA:Concentracion  6   29.60   4.933   4.573 0.00197 **
Residuals    31   33.44   1.079
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
2 observations deleted due to missingness
```

ANEXO 37: Porcentaje de materia seca – análisis de efectos simples

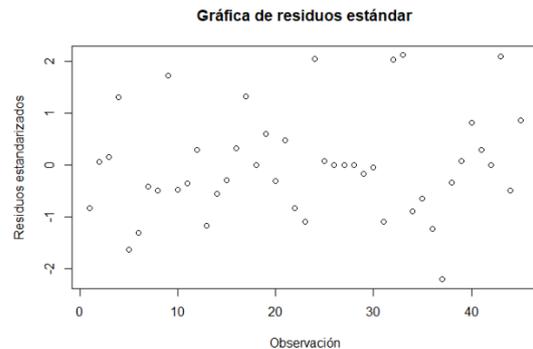
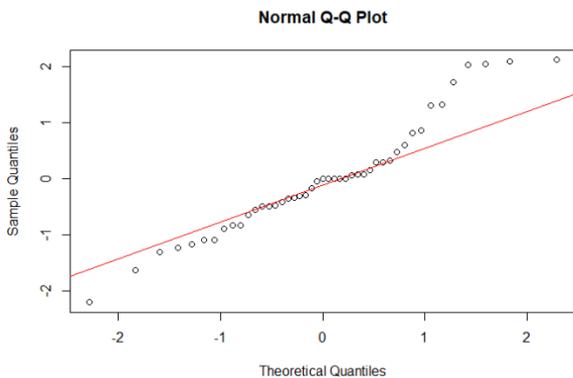
```
F Test:
P-value adjustment method: holm
      Concentracion1 Concentracion2 Concentracion3 Df Sum of Sq      F
Ceniza      1.9698      2.61963      2.17818  3      18.259  5.6426
Escoria     2.7923      0.47205     -1.94825  3      44.503 13.7532
Silicato    1.3504      1.39871      0.92865  3       3.111  0.9615
Residuals                    31      33.437
      Pr(>F)
Ceniza  0.006642 **
Escoria 2.119e-05 ***
Silicato 0.423227
Residuals
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
> testInteractions(modelo4, fixed="Concentracion", across="FuentesdeSiA")
F Test:
P-value adjustment method: holm
      FuentesdeSiA1 FuentesdeSiA2 Df Sum of Sq      F Pr(>F)
0ppm      -0.42635      0.5452  2      2.370  1.0985 0.6920065
100ppm     0.17515     -1.8234  2      5.904  2.7371 0.2412490
200ppm     0.20375     -3.7737  2     29.571 13.7079 0.0002172 ***
400ppm    -1.04577     -0.8968  2      1.609  0.7461 0.6920065
Residuals                    31      33.437
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
>
MSerror Mean   SDev   Min    Max    Num    CV
1.08   12.56   1.62   7.80   15.71   43     8.27
```

ANEXO 38: Habilidad de macollamiento – comprobación de supuestos estadísticos

```
> shapiro.test(rstandard(modelo10))
      Shapiro-Wilk normality test
```

```
data:  rstandard(modelo10)
W = 0.95287, p-value = 0.0653
```

```
> library(car)
> ncvTest(modelo10)
Non-constant Variance Score Test
Variance formula: ~ fitted.values
Chisquare = 0.00548403, Df = 1, p = 0.94097
```



ANEXO 39: Habilidad de macollamiento – análisis de varianza

```
> anova<-aov(modelo10)
> summary(anova)
              Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
FuentesdeSiA  2  0.5581  0.27905   2300.2 <2e-16 ***
Concentracion  3  0.3180  0.10600    873.8 <2e-16 ***
FuentesdeSiA:Concentracion  6  0.5255  0.08758    721.9 <2e-16 ***
Residuals     33  0.0040  0.00012
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

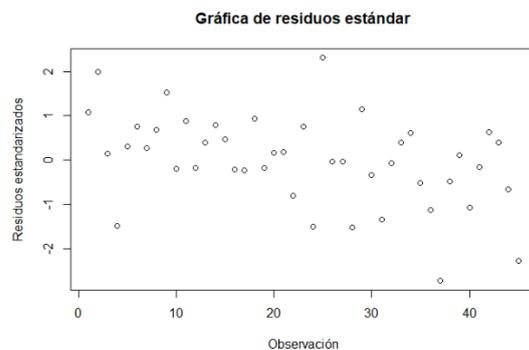
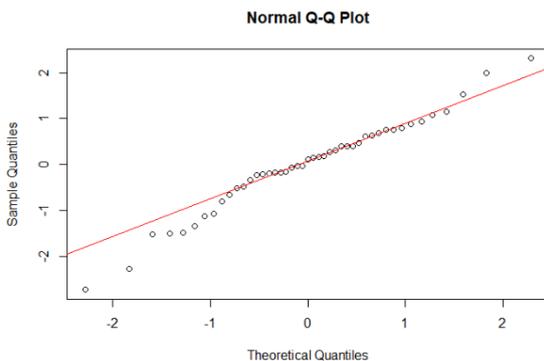
ANEXO 40: Habilidad de macollamiento – análisis de efectos simples

```
F Test:
P-value adjustment method: holm
      Concentracion1 Concentracion2 Concentracion3 Df Sum of Sq      F
Ceniza      0.01245      0.01717      -0.0047637  3  0.00108  2.9628
Escoria     0.47355      0.50240      0.0197743  3  0.84206 2313.6193
Silicato    0.01118      -0.00096      0.0008100  3  0.00037  1.0095
Residuals                                     33  0.00400
      Pr(>F)
Ceniza 0.09261 .
Escoria < 2e-16 ***
Silicato 0.40089
Residuals
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
> testInteractions(modelo10, fixed="Concentracion", across="FuentesdeSiA")
F Test:
P-value adjustment method: holm
      FuentesdeSiA1 FuentesdeSiA2 Df Sum of Sq      F      Pr(>F)
0ppm      -0.0079221      -0.00201  2  0.00016  0.6503  0.528467
100ppm     0.0089307      0.03897  2  0.00206  8.5105  0.002092 **
200ppm     -0.0147661     -0.44542  2  0.38837 1600.5997 < 2.2e-16 ***
400ppm     -0.0091924     -0.46439  2  0.61145 2519.9885 < 2.2e-16 ***
Residuals                                     33  0.00400
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
>
MSerror Mean   SDev   Min   Max   Num   CV
0.00  1.39  0.18  1.00  1.51  45   0.79
```

ANEXO 41: Volumen radicular – comprobación de supuestos estadísticos

```
> shapiro.test(rstandard(modelo2))
      Shapiro-Wilk normality test
data:  rstandard(modelo2)
W = 0.97518, p-value = 0.4394
```

```
> library(car)
> ncvTest(modelo2)
Non-constant Variance Score Test
Variance formula: ~ fitted.values
Chisquare = 3.634274, Df = 1, p = 0.056601
```



ANEXO 42: Volumen radicular – análisis de varianza

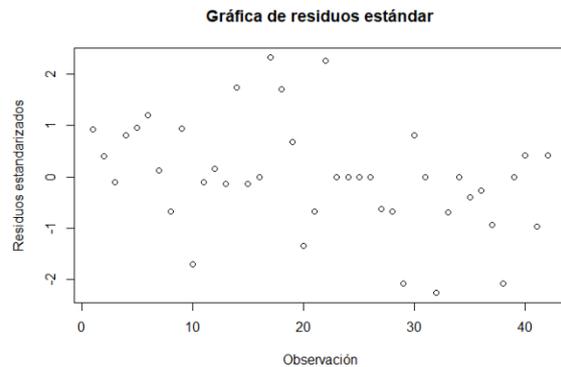
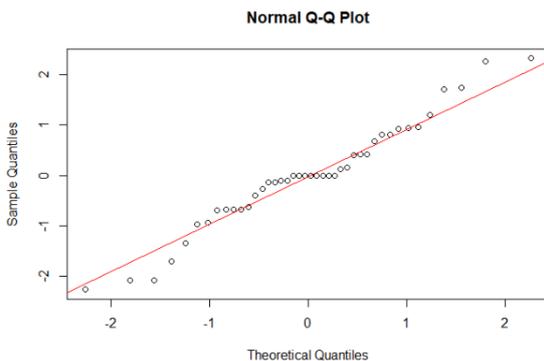
```
> anova<-aov(modelo2)
> summary(anova)
              Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
FuentesdeSiA  2  6.773   3.386   963.0 <2e-16 ***
Concentracion 3  2.471   0.824   234.3 <2e-16 ***
FuentesdeSiA:Concentracion 6  5.881   0.980   278.8 <2e-16 ***
Residuals    33  0.116   0.004
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

ANEXO 43: Volumen radicular – análisis de efectos simples

```
F Test:
P-value adjustment method: holm
      Concentracion1 Concentracion2 Concentracion3 Df Sum of Sq      F
Ceniza    -0.10008      -0.11844    -0.126677  3    0.0441  4.1813
Escoria    1.49421      1.63565     0.130089  3    8.3025 786.9846
Silicato   -0.01279      -0.04084     0.014175  3    0.0063  0.6019
Residuals                                33    0.1160
      Pr(>F)
Ceniza  0.02588 *
Escoria < 2e-16 ***
Silicato 0.61840
Residuals
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
> testInteractions(modelo2, fixed="Concentracion", across="FuentesdeSiA")
F Test:
P-value adjustment method: holm
      FuentesdeSiA1 FuentesdeSiA2 Df Sum of Sq      F Pr(>F)
0ppm      -0.009389    -0.06270  2    0.0108  1.5381 0.2298
100ppm     0.000297     0.10677  2    0.0182  2.5863 0.1810
200ppm    -0.062954    -1.45380  2    4.1112 584.5444 <2e-16 ***
400ppm     0.077899    -1.56971  2    7.7138 1096.7824 <2e-16 ***
Residuals                                33    0.1160
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
>
MSerror Mean   SDev   Min   Max   Num   CV
0.00  2.37  0.59  1.00  2.81  45    2.50
```

ANEXO 44: Número de panícula por planta – comprobación de supuestos estadísticos

```
> shapiro.test(rstandard(modelo5))
      Shapiro-Wilk normality test
data:  rstandard(modelo5)
W = 0.96638, p-value = 0.2484
> library(car)
> ncvTest(modelo5)
Non-constant Variance Score Test
Variance formula: ~ fitted.values
Chisquare = 3.762174, Df = 1, p = 0.052424
```



ANEXO 45: Número de panícula por planta – análisis de varianza

```
> anova<-aov(modelo5)
> summary(anova)
              Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
FuentesdeSiA  2 0.04956  0.024782  556.8 <2e-16 ***
Concentracion 3 0.03501  0.011671  262.2 <2e-16 ***
FuentesdeSiA:Concentracion 6 0.04993  0.008322  187.0 <2e-16 ***
Residuals     30 0.00134  0.000045
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
3 observations deleted due to missingness
```

ANEXO 46: Número de panícula por planta – análisis de efectos simples

```
F Test:
P-value adjustment method: holm
      Concentracion1 Concentracion2 Concentracion3 Df Sum of Sq      F
Ceniza      0.020366      0.009456      0.0054891  3 0.001074  8.0413
Escoria     0.146884     0.171704     0.0000000  3 0.083360 624.3618
Silicato    0.016975     0.000790     0.0109370  3 0.000512  3.8381
Residuals                    30 0.001335
      Pr(>F)
Ceniza 0.0008886 ***
Escoria < 2.2e-16 ***
Silicato 0.0194258 *
Residuals
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
> testInteractions(modelo5, fixed="Concentracion", across="FuentesdeSiA")
F Test:
P-value adjustment method: holm
      FuentesdeSiA1 FuentesdeSiA2 Df Sum of Sq      F      Pr(>F)
0ppm      -0.0069420     -0.006800  2 0.000077  0.8704  0.4291
100ppm     -0.0016662      0.034206  2 0.001970 22.1314 2.49e-06 ***
200ppm     -0.0157806     -0.147646  2 0.040879 459.2749 < 2.2e-16 ***
400ppm     -0.0103327     -0.136709  2 0.048936 549.7925 < 2.2e-16 ***
Residuals                    30 0.001335
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
>
MSerror Mean      SDev      Min      Max      Num      CV
0.00      2.11      0.06      2.00      2.18      42      0.32
```

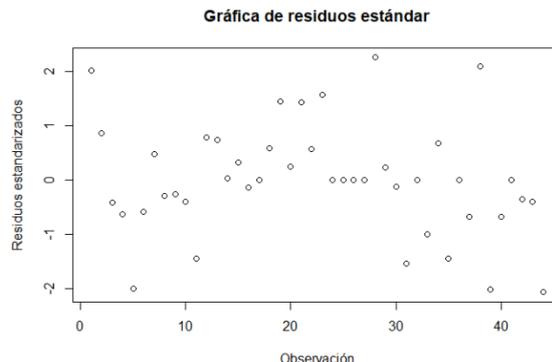
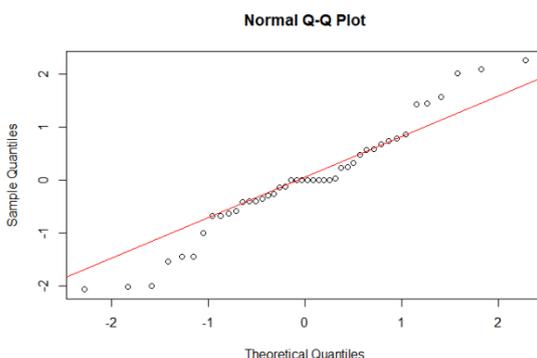
ANEXO 47: Número de espiguillas por planta – comprobación de supuestos estadísticos

```
> shapiro.test(rstandard(modelo11))

      Shapiro-Wilk normality test

data:  rstandard(modelo11)
W = 0.96332, p-value = 0.173
```

```
> library(car)
> ncvTest(modelo11)
Non-constant Variance Score Test
Variance formula: ~ fitted.values
Chisquare = 3.834362, Df = 1, p = 0.050212
```



ANEXO 48: Número de espiguillas por planta – análisis de varianza

```
> anova<-aov(modelo11)
> summary(anova)
          Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
FuentesdeSiA      2 10572314 5286157  78.01 4.95e-13 ***
Concentracion     3  3541096 1180365  17.42 6.93e-07 ***
FuentesdeSiA:Concentracion 6  7280074 1213346  17.91 5.57e-09 ***
Residuals        32  2168341   67761
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
1 observation deleted due to missingness
```

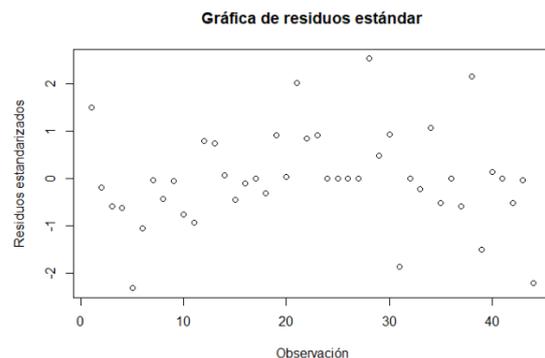
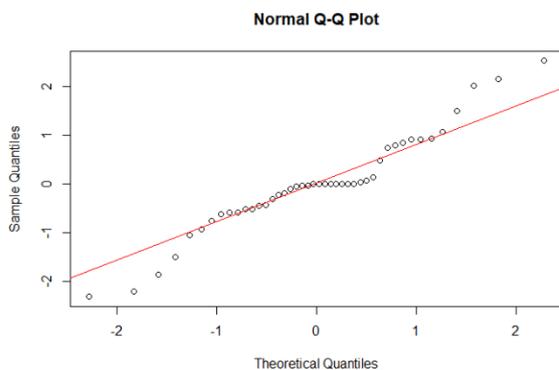
ANEXO 49: Número de espiguillas por planta – análisis de efectos simples

```
F Test:
P-value adjustment method: holm
      Concentracion1 Concentracion2 Concentracion3 Df Sum of Sq      F
Ceniza      -114.40         22.9         -55.10  3    51806  0.2548
Escoria     1908.75        1287.0          0.00  3 10441496 51.3646
Silicato     312.75         453.0         443.75  3    327868 1.6129
Residuals                    32    2168341
      Pr(>F)
Ceniza      0.8573
Escoria     7.412e-12 ***
Silicato     0.4115
Residuals
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
> testInteractions(modelo11, fixed="Concentracion", across="FuentesdeSiA")
F Test:
P-value adjustment method: holm
      FuentesdeSiA1 FuentesdeSiA2 Df Sum of Sq      F      Pr(>F)
0ppm      -199.05         86.5  2    195608  1.4434  0.25109
100ppm    -202.00        -675.5  2    609688  4.4988  0.03796 *
200ppm    -270.75       -1953.2  2   7039279 51.9422 2.684e-10 ***
400ppm     228.10       -1509.5  2   8232295 60.7454 5.095e-11 ***
Residuals                    32    2168341
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
>
MSError Mean  SDev  Min  Max  Num  CV
67760.66     1440.70 740.24 0.00 2427.00 44 18.07
```

ANEXO 50: Número de espiguillas por panícula – comprobación de supuestos estadísticos

```
> shapiro.test(rstandard(modelo))
      Shapiro-Wilk normality test
data:  rstandard(modelo)
W = 0.95017, p-value = 0.05582
```

```
> library(car)
> ncvTest(modelo)
Non-constant Variance Score Test
Variance formula: ~ fitted.values
Chisquare = 3.288142, Df = 1, p = 0.069782
```



ANEXO 51: Número de espiguillas por panícula – análisis de varianza

```
> anova<-aov(modelo)
> summary(anova)
              Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
FuentesdeSiA  2  8261    4130   99.39 1.87e-14 ***
Concentracion 3  1310     437   10.51 5.75e-05 ***
FuentesdeSiA:Concentracion 6  5535     923   22.20 4.02e-10 ***
Residuals     32  1330      42
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
1 observation deleted due to missingness
```

ANEXO 52: Número de espiguillas por panícula – análisis de efectos simples

```
> plot(modelo.means)
> testInteractions(modelo, fixed="FuentesdeSiA", across="Concentracion")
F Test:
P-value adjustment method: holm
      Concentracion1 Concentracion2 Concentracion3 Df Sum of Sq      F
Ceniza      -11.053      -3.6299      -4.4824  3      316.2  2.5359
Escoria       47.541      26.3247       0.0000  3     6215.2 49.8530
Silicato       1.421      12.0105       7.8626  3       314.1  2.5198
Residuals                                32     1329.8

      Pr(>F)
Ceniza    0.1484
Escoria  1.097e-11 ***
Silicato  0.1484
Residuals

---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
> testInteractions(modelo, fixed="Concentracion", across="FuentesdeSiA")
F Test:
P-value adjustment method: holm
      FuentesdeSiA1 FuentesdeSiA2 Df Sum of Sq      F      Pr(>F)
0ppm      -1.6849      5.328  2      115.0  1.3831 0.2654005
100ppm    -4.8510    -26.478  2      972.7 11.7034 0.0003065 ***
200ppm    -1.5557    -48.655  2     4637.5 55.7961 1.110e-10 ***
400ppm     10.7893    -40.792  2     7026.8 84.5434 6.766e-13 ***
Residuals                                32     1329.8

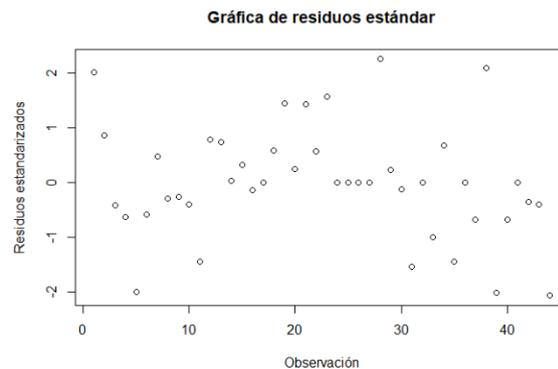
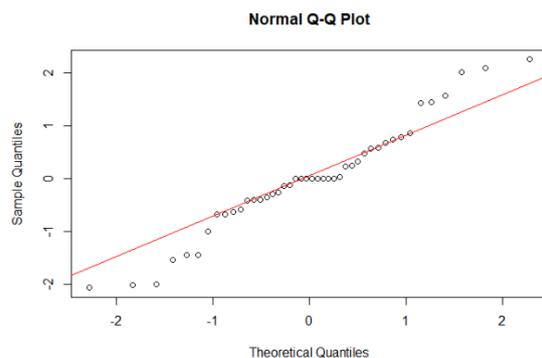
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
>
```

ANEXO 53: Rendimiento estimado – comprobación de supuestos estadísticos

```
> shapiro.test(rstandard(modelo13))
Shapiro-Wilk normality test

data:  rstandard(modelo13)
W = 0.96332, p-value = 0.173

> library(car)
> ncvTest(modelo13)
Non-constant Variance Score Test
Variance formula: ~ fitted.values
Chisquare = 3.834362, Df = 1, p = 0.050212
```



ANEXO 54: Rendimiento estimado – análisis de varianza

```
> anova<-aov(modelo13)
> summary(anova)
          Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
FuentesdeSiA      2   7707    3854   78.01 4.95e-13 ***
Concentracion     3   2581     860   17.42 6.93e-07 ***
FuentesdeSiA:Concentracion 6   5307     885   17.91 5.57e-09 ***
Residuals        32   1581      49
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
1 observation deleted due to missingness
```

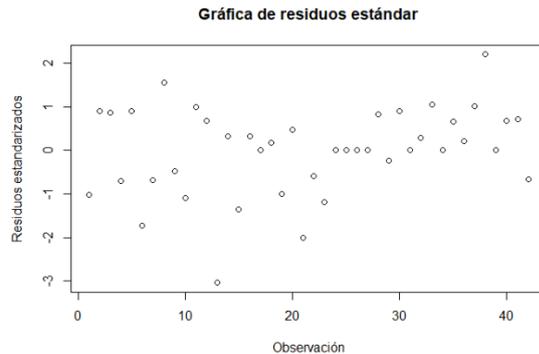
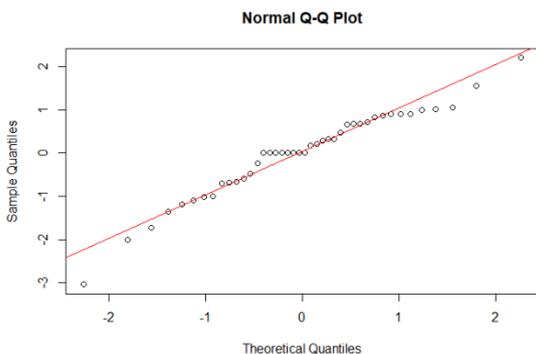
ANEXO 55: Rendimiento estimado – análisis de efectos simples

```
F Test:
P-value adjustment method: holm
      Concentracion1 Concentracion2 Concentracion3 Df Sum of Sq      F
Ceniza      -3.089          0.618      -1.4877  3      37.8  0.2548
Escoria     51.536         34.749         0.0000  3     7611.9 51.3646
Silicato     8.444         12.231         11.9812  3      239.0  1.6129
Residuals                                32     1580.7
      Pr(>F)
Ceniza      0.8573
Escoria     7.412e-12 ***
Silicato     0.4115
Residuals
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
> testInteractions(modelo13, fixed="Concentracion", across="FuentesdeSiA")
F Test:
P-value adjustment method: holm
      FuentesdeSiA1 FuentesdeSiA2 Df Sum of Sq      F    Pr(>F)
00ppm      -5.3743          2.335  2      142.6  1.4434  0.25109
100ppm     -5.4540         -18.238  2      444.5  4.4988  0.03796 *
200ppm     -7.3102         -52.738  2     5131.6 51.9422 2.684e-10 ***
400ppm      6.1587         -40.757  2     6001.3 60.7454 5.095e-11 ***
Residuals                                32     1580.7
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
>
MSerror Mean   SDev   Min    Max    Num   CV
49.40  38.90  19.99  0.00  65.53  44    18.07
```

ANEXO 56: Porcentaje de partículas malformadas – comprobación de supuestos estadísticos

```
> shapiro.test(rstandard(modelo))
      Shapiro-Wilk normality test
data:  rstandard(modelo)
W = 0.96048, p-value = 0.1537
```

```
> library(car)
> ncvTest(modelo)
Non-constant Variance Score Test
Variance formula: ~ fitted.values
Chisquare = 3.110994, Df = 1, p = 0.077766
```



ANEXO 57: Porcentaje de panículas malformadas – análisis de varianza

```
> anova<-aov(modelo)
> summary(anova)
          Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
FuentesdeSiA      2  201.2   100.59   5.777 0.00755 **
Concentracion     3    80.4    26.78   1.538 0.22494
FuentesdeSiA:Concentracion 6  498.8    83.13   4.774 0.00159 **
Residuals        30  522.4    17.41
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
3 observations deleted due to missingness
```

ANEXO 58: Porcentaje de panículas malformadas – análisis de efectos simples

```
> testInteractions(modelo, fixed="FuentesdeSiA", across="Concentracion")
F Test:
P-value adjustment method: holm
      Concentracion1 Concentracion2 Concentracion3 Df Sum of Sq      F
Ceniza      3.3176      -2.1607      -12.3149  3    339.34  6.4957
Escoria     -5.5548      -3.0000       0.0000  3     84.54  1.6183
Silicato    -9.8235      -5.2134      -1.8677  3    155.23  2.9714
Residuals                                30    522.41
      Pr(>F)
Ceniza 0.004841 **
Escoria 0.205871
Silicato 0.094943 .
Residuals
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
> testInteractions(modelo, fixed="Concentracion", across="FuentesdeSiA")
F Test:
P-value adjustment method: holm
      FuentesdeSiA1 FuentesdeSiA2 Df Sum of Sq      F Pr(>F)
0ppm      8.7428      5.6575  2    132.15  3.7944 0.1018733
100ppm    -1.3456      3.6023  2     32.86  0.9436 0.4004703
200ppm   -14.8455      3.2566  2    428.50 12.3034 0.0005014 ***
400ppm    -4.3983      1.3889  2     87.50  2.5124 0.1959760
Residuals                                30    522.41
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
>
MSerror Mean   SDev   Min    Max   Num   CV
17.41  94.98  5.64   78.95 100.00 42    4.39
```

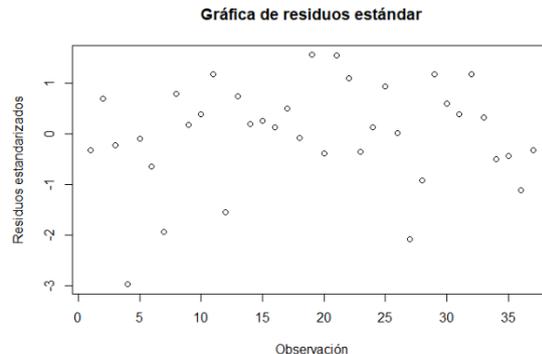
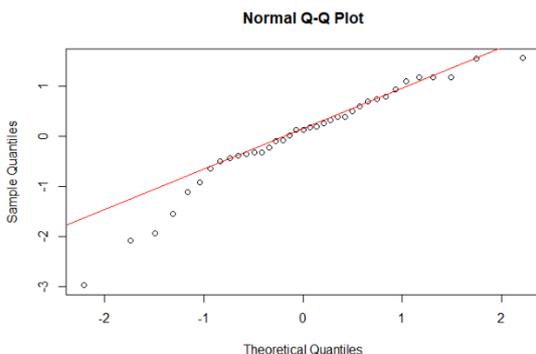
ANEXO 59: Porcentaje de espiguillas necróticas – comprobación de los supuestos estadísticos

```
> shapiro.test(rstandard(modelo))

      Shapiro-Wilk normality test

data:  rstandard(modelo)
W = 0.94205, p-value = 0.05361
```

```
> library(car)
> ncvTest(modelo)
Non-constant Variance Score Test
Variance formula: ~ fitted.values
Chisquare = 1.747148, Df = 1, p = 0.18624
```



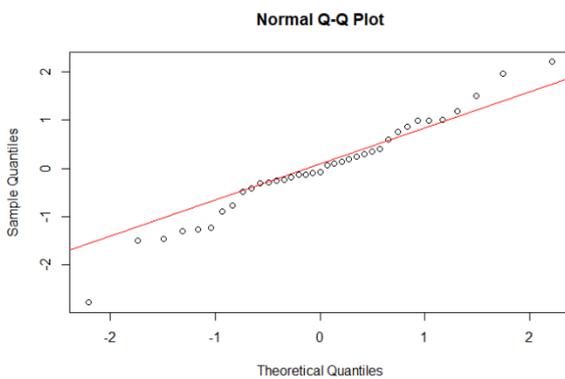
ANEXO 60: Porcentaje de espiguillas necróticas – análisis de varianza

```
> anova<-aov(modelo)
> summary(anova)
              Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
FuentesdeSiA  2  152.6   76.32   2.807 0.0781 .
Concentracion 3  124.2   41.40   1.523 0.2312
FuentesdeSiA:Concentracion 4  124.6   31.15   1.146 0.3564
Residuals     27  734.2   27.19
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
8 observations deleted due to missingness
```

ANEXO 61: Absorción de nitrógeno en órganos aéreos – comprobación de supuestos estadísticos

```
> shapiro.test(rstandard(modelo14))
Shapiro-Wilk normality test
data:  rstandard(modelo14)
W = 0.97874, p-value = 0.6877
```

```
> library(car)
> ncvTest(modelo14)
Non-constant Variance Score Test
Variance formula: ~ fitted.values
Chisquare = 3.674954, Df = 1, p = 0.055236
```



ANEXO 62: Absorción de nitrógeno en órganos aéreos – análisis de variancia

```
> anova<-aov(modelo14)
> summary(anova)
              Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
FuentesdeSiA  2  0.5186  0.25932   6.600 0.00464 **
Concentracion 3  0.6410  0.21365   5.438 0.00467 **
FuentesdeSiA:Concentracion 5  1.0741  0.21483   5.468 0.00133 **
Residuals     27  1.0608  0.03929
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
7 observations deleted due to missingness
```

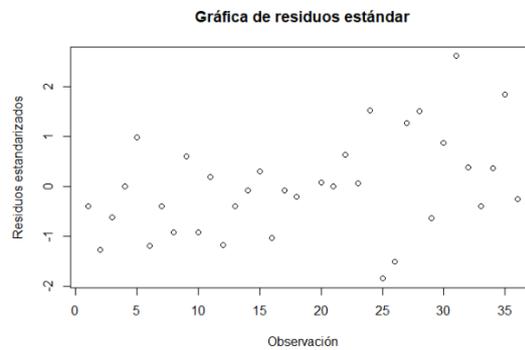
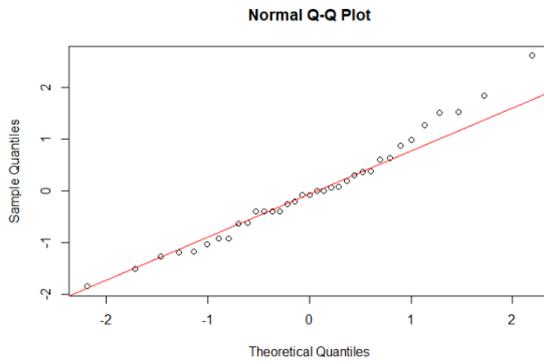
ANEXO 63: Absorción de nitrógeno en raíz – comprobación de supuestos estadísticos

```
> shapiro.test(rstandard(modelo))

      Shapiro-Wilk normality test

data:  rstandard(modelo)
W = 0.9767, p-value = 0.6498
```

```
> library(car)
> ncvTest(modelo)
Non-constant Variance Score Test
Variance formula: ~ fitted.values
Chisquare = 1.240478, Df = 1, p = 0.26538
```



ANEXO 64: Absorción de nitrógeno en raíz – análisis de varianza

```
> anova<-aov(modelo)
> summary(anova)
```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FuentesdeSiA	2	0.02659	0.013296	1.283	0.2941
Concentracion	3	0.08216	0.027386	2.644	0.0703
FuentesdeSiA:Concentracion	4	0.03924	0.009809	0.947	0.4528
Residuals	26	0.26934	0.010359		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
9 observations deleted due to missingness