

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE AGRONOMÍA



**APLICACIÓN DE FUENTES DE SILICIO ACTIVO PARA LA
MITIGACIÓN DEL ESTRÉS SALINO EN
ESPÁRRAGO (*Asparagus officinalis* L.)**

Presentado por:

LUIS JÁUREGUI DAMIÁN

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO**

Lima – Perú

2018

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE AGRONOMIA

**APLICACIÓN DE FUENTES DE SILICIO ACTIVO PARA LA
MITIGACIÓN DEL ESTRÉS SALINO EN
ESPÁRRAGO (*Asparagus officinalis* L.)**

**Presentado por:
LUIS JÁUREGUI DAMIÁN**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE:
INGENIERO AGRONOMO**

Sustentada y Aprobada ante el siguiente jurado:

Ing. Mg. Sc. Walter Apaza Tapia
PRESIDENTE

Dr. Sady Javier García Bendezú
ASESOR

Ing. M.S. Andrés Casas Díaz
MIEMBRO

Ing. Mg. Sc. Luis Tomassini Vidal
MIEMBRO

**Lima - Perú
2018**

DEDICATORIA

A mi madre, Claudia Damián Arellano quien es mi guía constante en este mar cambiante llamado vida, mi fuerza de voluntad inquebrantable de cada noche en vela, demostrando su amor y cariño al permanecer a mi lado brindándome su apoyo incondicional, de quien aprendí lo que es el valor de enfrentar los problemas hasta cumplir con todas tus metas.

A mis hermanas y hermanos, por su apoyo y la confianza depositada y así poder superar los distintos obstáculos.

A mi sobrino Sebastián quien es un símbolo de vida, un nuevo inicio y nuevas metas por lograr, quien me contagió de esa alegría tan vivaz como solo él lo puede hacer.

AGRADECIMIENTO

Mi inmensa gratitud a mi alma mater la Universidad Nacional Agraria La Molina, por la formación brindada, y por el honor que tengo de integrar la “Familia Molinera”.

Al Dr. Sady García quien es mi mentor y patrocinador, por el apoyo y los constantes consejos brindados en la elaboración de la presente tesis.

Al Ing. Claudio Correa por brindarme la oportunidad de realizar este proyecto en conjunto con FEEDCOR S.A.

A mis amigos y mi primo Antonio J. quienes fueron mis compañeros en esta etapa dándome ánimos y su apoyo en el momento necesario.

A Teresa C. por todos los consejos y apoyo que me brindó en el desarrollo y redacción de tesis.

ÍNDICE

RESUMEN	
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivo general	2
1.2. Objetivos específicos	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. EL ESPÁRRAGO	3
2.2. EL SILICIO	11
2.2.1. Silicio en la naturaleza	11
2.2.2. Silicio en la agricultura	12
2.2.3. Silicio en la planta	13
2.3. EXPERIENCIAS CON EL USO DE SILICIO	14
III. MATERIALES Y MÉTODOS	17
3.1. LUGAR DEL EXPERIMENTO	17
3.2. CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS DE LA ZONA	17
3.3. MATERIALES	17
3.3.1. Material vegetal	17
3.3.2. Características del agua de riego	17
3.3.3. Sustrato	19
3.3.4. Fuentes de silicio	19
3.4. OTROS MATERIALES	19
3.4.1. Fase de invernadero	19
3.4.2. Fase de laboratorio	20
3.5. DESCRIPCIÓN DE LOS TRATAMIENTOS A ENSAYAR	21
3.5.1. Fuentes de silicio	21
3.5.2. Nivel de salinidad en el agua de riego	21

3.6. MÉTODOS	22
3.6.1. Materia orgánica	22
3.7. METODOLOGÍA Y PROCEDIMIENTO	22
3.7.1. Colecta, preparación y muestreo de suelo	22
3.7.2. Preparación de las macetas	23
3.7.3. Trasplante	23
3.7.4. Fertilización y riego	23
3.8. PARÁMETROS EN EVALUACIÓN	25
3.8.1. Parámetros biométricos	25
3.8.2. Análisis químico	26
3.9. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	27
3.9.1. Diseño experimental	27
3.9.2. Tratamiento estadístico	28
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
4.1. CLORO	32
4.2. SODIO	36
4.3. PESO SECO	38
4.4. SILICIO	39
V. CONCLUSIONES	43
VI. RECOMENDACIONES	44
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45
VIII. ANEXOS	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1. Dosis de aplicación de nutrientes recomendadas para el espárrago en producción.....	11
Tabla N° 2. Análisis del agua a ser usada en el experimento	18
Tabla N° 3. Descripción de las fuentes de Si y niveles de salinidad empleadas en los tratamientos del ensayo.....	21
Tabla N° 4. Contenido de N, P, K como compost	22
Tabla N° 5. Dosis de fertilización total mensual para las 45 macetas.....	25
Tabla N° 6. Distribución de grados de libertad por fuente de variación.....	28
Tabla N° 7. Efecto de la aplicación de dos fertilizantes en suelo y tres niveles de salinidad sobre el contenido de cloro, sodio, silicio y peso seco en el follaje del espárrago	30
Tabla N° 8. Efecto de la aplicación de dos fertilizantes y tres niveles de salinidad sobre el silicio extractable y valores medios de la conductividad en el sustrato.....	31
Tabla N° 9. Comparación entre dos fuentes de silicio en el suelo y tres niveles de salinidad respecto al contenido de cloro en la materia seca del follaje de espárrago	33
Tabla N° 10. Comparación entre fuentes y niveles de salinidad respecto al contenido de sodio en la materia seca del follaje de espárrago.....	36
Tabla N° 11. Comparación entre fuentes respecto al contenido de silicio en la materia seca del follaje de espárrago	40
Tabla N° 12. Fertilización y cantidades empleadas por unidad experimental y PPM	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1. Estructura del rizoma de espárrago	3
Figura N° 2. Estructura del tallo y helecho del espárrago.....	4
Figura N° 3. Curva de crecimiento y acumulación de reservas del espárrago	5
Figura N° 4. Fenología del cultivo de espárrago.....	6
Figura N° 5. Valores de correlación de las variables evaluadas.....	29
Figura N° 6. Efecto de dos fuentes de silicio en el suelo y tres niveles de salinidad sobre el contenido de cloro en la materia seca del follaje del espárrago.	32
Figura N° 7. Relación entre el contenido de silicio y cloro en la materia seca del follaje de espárrago sometido a tres fuentes de silicio.....	33
Figura N° 8. Relación entre el contenido de silicio y cloro en la materia seca del follaje de espárrago sometido a tres niveles de salinidad.....	34
Figura N° 9. Relación entre el contenido de silicio extractable en el sustrato y el contenido de cloro en la materia seca del follaje de espárrago sometido a tres fuentes de silicio.	35
Figura N° 10. Relación entre el contenido de silicio en el sustrato y el contenido de cloro en la materia seca del follaje de espárrago sometido a tres niveles de salinidad	35
Figura N° 11. Efecto de dos fuentes de silicio y tres niveles de salinidad sobre el contenido de sodio en la materia seca del follaje de espárrago	36
Figura N° 12. Relación entre el contenido de silicio y sodio en la materia seca del follaje del espárrago sometido a tres fuentes de silicio.....	37
Figura N° 13. Efecto de tres niveles de salinidad sobre el contenido de sodio en la materia seca del follaje de espárrago	38

Figura N° 14. Efecto de dos fuentes de silicio y tres niveles de salinidad sobre peso seco del follaje de espárrago	38
Figura N° 15. Efecto de las fuentes aplicadas y la salinidad sobre el contenido de silicio en la materia seca del follaje de espárrago	39
Figura N° 16. Efecto de dos fuentes de silicio y tres niveles de salinidad sobre el silicio extractable presente en el sustrato	40
Figura N° 17. Relación entre el contenido de silicio extractable del sustrato y silicio en la materia seca del follaje de espárrago sometido a tres fuentes de silicio.	41
Figura N° 18. Relación entre el contenido de silicio foliar de la materia seca del follaje de espárrago y el silicio extractable del sustrato sometido a tres niveles de salinidad.....	41

ÍNDICIE DE ANEXOS

Anexo N° 1. Programa de la primera fertilización de los espárragos por semana.	51
Anexo N° 2. Programa de la segunda fertilización de los espárragos por semana.	51
Anexo N° 3. Resultados totales de los parámetros analizados.....	52
Anexo N° 4. Comparación entre fuentes y niveles de salinidad respecto al peso seco del follaje de espárrago	53
Anexo N° 5. Comparación entre fuentes y niveles de salinidad respecto al silicio extractable en el sustrato.	53

RESUMEN

La tolerancia del espárrago (*Asparagus officinalis* L.) a suelos salinos ha sido ampliamente reconocida, su rendimiento sin embargo puede ser limitado por la salinidad del suelo y del agua de riego. El uso del silicio como un mitigador de los efectos dañinos causados por el estrés salino en los cultivos ha sido extensamente reportado en la literatura. Se instaló un experimento en macetas que permita evaluar los efectos de la aplicación de silicio en el espárrago cultivado con niveles de salinidad crecientes. Las plantas de espárrago cultivadas en macetas que contenían arena fina lavada, luego de seis meses fueron fertilizadas con silicio (500 mg/kg de suelo), utilizando dos fuentes: silicato de potasio acidulado con acetato de calcio y Armurox®. Se incluyó un tratamiento sin silicio como comparación. Dos meses después de la aplicación de silicio, las plantas fueron regadas con agua de salinidad creciente (correspondientes a 0.8, 6 y 12 dS/m) durante seis meses hasta alcanzar respectivamente los mismos niveles de EC en el extracto de saturación. El peso seco del follaje fue evaluado al finalizar el periodo de crecimiento. Los contenidos de sodio, cloro y silicio fueron determinados en la materia seca del follaje. Luego del chapado, el suelo de las macetas fue muestreado y se determinó el contenido de silicio extractable en CaCl_2 0.01 M. La aplicación de silicio incrementó significativamente el contenido de silicio extractable en el suelo y silicio en el follaje del espárrago con respecto al testigo sin silicio, pero no afectó el contenido de cloro en el follaje. La aplicación de silicio mostró un aumento significativo en la concentración del sodio foliar. Se puede concluir que la aplicación de silicio (de las fuentes probadas en este ensayo) no proporcionó ningún efecto de mitigación de la salinidad para las plantas de espárrago.

Palabras clave: *Asparagus officinalis*, estrés salino, silicio.

ABSTRACT

The tolerance of asparagus (*Asparagus officinalis* L.) to soil salinity has been largely recognized, but its yield can still be limited by high soil and water salinity. The effectiveness of silicon as an alleviator of salinity stress has been extensively reported in literature, and recognized in several crops. A pot experiment was setup to evaluate the effect of silicon application on asparagus grown under increasing levels of salinity. Six-month asparagus plants grown in pots containing washed fine sand were fertilized silicon (500 mg/kg of soil) using two sources: potassium silicate acidulated with calcium acetate and Armurox®. A treatment without silicon was included as comparison. Two months after silicon application, the plants were irrigated with water of different salinity (corresponding to EC of 0.8, 6.0 and 12.0 dS/m) during six months to progressively reach the same levels of EC in saturation extract. The dry matter production of asparagus shoots was evaluated at the end of the growth period. The contents of sodium, chloride and silicon were measured in the dry matter. After shoot harvest, the content of extractable silicon (in CaCl₂ 0.01 M) was measured in the soil of the pots. The application of silicon significantly increased soil extractable silicon and the content of silicon in asparagus shoots compared with the unfertilized control, but did not affect the content of chloride. The application of silicon significantly increased the content of sodium in the shoots. It can be concluded that the application of silicon (from the sources tested in this experiment) did not provide any mitigation effect of soil salinity to asparagus plants.

Key words: *Asparagus officinalis*, silicon, salinity stress.

I. INTRODUCCIÓN

El espárrago es una especie cultivada que se ha adaptado bien a la costa peruana. La tolerancia del cultivo a las condiciones adversas de la costa peruana (suelo salino y agua de mala calidad), ha permitido que éste se convierta en un cultivo de alto valor económico además de su gran demanda.

La exportación del espárrago fresco entre enero y septiembre del 2015 alcanzó los U\$ 271 millones frente a los U\$ 252 millones del mismo período del 2014. En el Perú se cultivan alrededor de 25000 hectáreas de espárrago llegando a representar el 14 % del total mundial, lo que nos ubica como el segundo país con mayor área de producción. Las exportaciones son lideradas por Complejo Agroindustrial Beta y Danper Trujillo entre 88 empresas.

Los suelos afectados por sales limitan los rendimientos de los cultivos en todo el mundo. Es especialmente frecuente en la agricultura de regadío y en las tierras marginales asociados con mal drenaje o capas freáticas altas. Las estimaciones de la magnitud del daño por salinidad varían del 25 al 50 % de las tierras de regadío del mundo (Adams y Hughes, 1990).

En un entorno afectado por la presencia de sales, se requiere que las plantas absorban los nutrientes esenciales de una fuente diluida en la presencia de nutrientes no esenciales altamente concentrados (Fageria et al., 2011b). Además, entre los nutrientes, N es uno de los elementos más limitante para la producción de cultivos, cuando las plantas están sometidas a estrés salino.

Uno de los principales problemas de la agricultura peruana es la poca disponibilidad de los recursos hídricos, y esto se acentúa con el uso de agua salina en la zona costera. Es necesaria la aplicación de tecnologías que nos permitan optimizar la eficiencia de riego para lograr una agricultura sustentable. Los suelos encontrados en la costa peruana, son en su mayoría arenosos a franco arenosos de poca retención del agua, por lo que son muy variables los regímenes hídricos aplicados para satisfacer las necesidades de la planta.

Sin embargo, se tiene también problemas en la calidad de agua a utilizar en el riego, siendo de una alta salinidad mayor a 4 dS/m provenientes en su mayoría de pozos por lo

que se tiene problemas en el normal desarrollo de la planta mostrándose síntomas de toxicidad por sales o deficiencias de algún elemento por antagonismo de estos.

El silicio ha demostrado ser eficaz en la mitigación del estrés salino en las diversas investigaciones. El efecto de mitigación de Si sobre la salinidad ha sido examinado en el arroz (Matoh et al., 1986; Yeo et al., 1999), el trigo, la cebada (Liang et al., 1996; Liang, 1998; Liang y Ding, 2002), pepino (Zhu et al., 2004) y tomate (Al-Aghabary et al., 2004). Liang et al. (1996), demostraron que el silicio añadido aumentó tolerancia a la salinidad de la cebada cultivada hidropónicamente.

Dado que en las condiciones donde se realizó el ensayo se simuló problemas con sales, el presente trabajo busca tener una idea más certera del comportamiento de la planta en cuanto a la absorción de nutrientes esenciales con relación a la fertilización silícica en este medio. Planteando la siguiente hipótesis, la aplicación de fuentes de silicio disponible incrementará la producción de biomasa de las plantas de espárrago cultivadas bajo niveles elevados de salinidad, al reducir la absorción de iones Cl^- y Na^+ disminuyendo el efecto tóxico de los mismos.

1.1. Objetivo general

- Evaluar el efecto de la aplicación de silicio sobre la adaptación del espárrago a un ambiente salino.

1.2. Objetivos específicos

- Determinar los efectos de la aplicación de silicio sobre la producción de materia seca del follaje de plantas de espárrago sometidas a tres niveles de salinidad en el agua de riego.
- Evaluar el efecto del silicio aplicado sobre la absorción de iones cloruro (Cl^-) y sodio (Na^+) en el follaje de las plantas de espárrago.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. EL ESPÁRRAGO

- **Taxonomía**

El espárrago (*Asparagus officinalis* L.) es una especie monocotiledónea, herbácea perenne, nativa de Europa y Asia. Pertenece a la familia Liliaceae junto a otras 150 especies descritas. El género *Asparagus* comprende especies comestibles y ornamentales. Su cultivo se desarrolló posiblemente en la zona este del Mediterráneo y se expandió hacia el noroeste de Europa en la época de los romanos (Del Pozo, 1999).

- **Morfología**

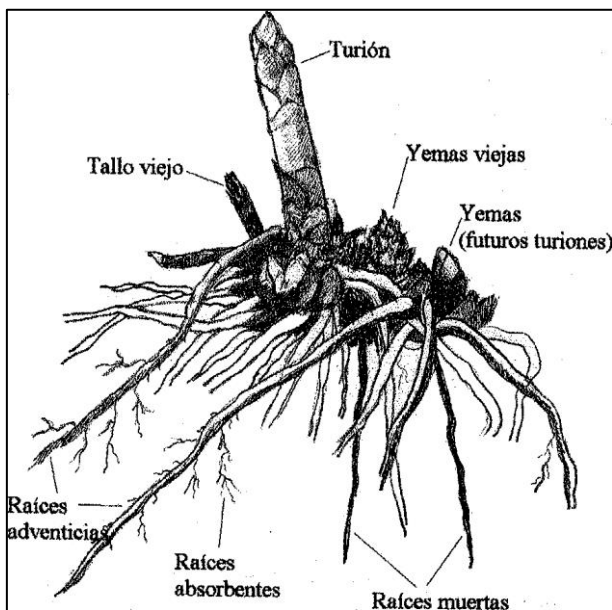


Figura N° 1. Estructura del rizoma de espárrago

Fuente: Del Pozo, 1999

Es una planta perenne, con flores masculinas y femeninas en distinto pie. Los frutos alcanzan el tamaño de un guisante y tienen color rojizo en la madurez. Albergan de dos a seis semillas de color negro y forma triangular, con un poder germinativo que llega a los cinco años (Japon, 1986).

En pleno desarrollo la planta de espárrago puede alcanzar hasta un metro de altura cuando su cultivo se deja en plena libertad. La facilidad de esta planta para reponer las raíces hace que pueda permanecer en el terreno de asiento durante varios años (Ibíd.).

El tallo (Figura N° 2) está formado por una parte subterránea con varias yemas y otra parte aérea que, cuando emerge del terreno y antes de lignificarse adquiere un color verde, constituyendo lo que se denomina espárrago verde (Ibíd.).

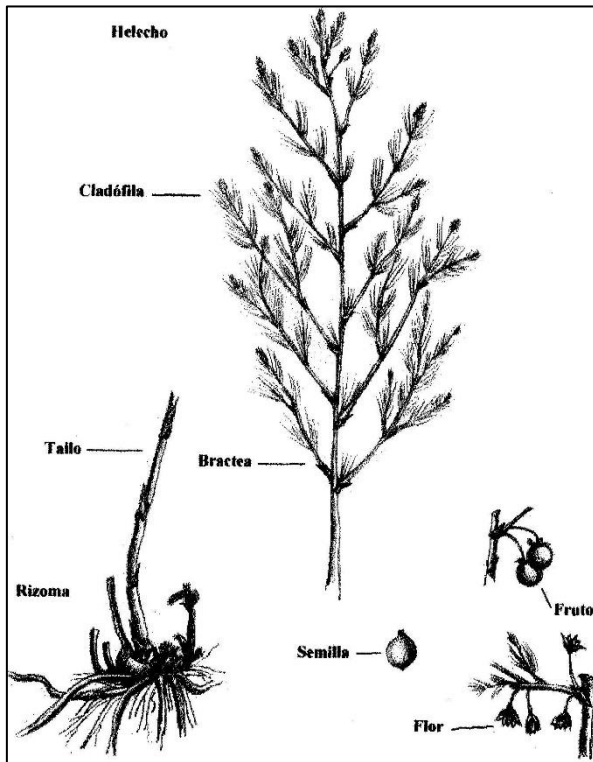


Figura N° 2. Estructura del tallo y helecho del espárrago

Fuente: Del Pozo, 1999

Las raíces son fibrosas, cilíndricas, delgadas, no ramificadas, rastreras y carnosas. Normalmente crecen directamente del tallo bajo la superficie del suelo. Estas raíces fibrosas y cilíndricas forman una masa radicular con múltiples raicillas, llamada corona; en el centro y arriba de ella se ubican las yemas que darán origen a los tallos (Vega, 2013).

Se puede observar dos tipos diferentes de raíces: un tipo de raíces perennes, suculentas, con pocos pelos radiculares reservantes, que crecen casi horizontalmente en los primeros 0.30 a 0.40 m del suelo y el otro tipo de raíces fibrosas, no ramificadas, anuales, más delgadas que las anteriores y absorbentes durante la etapa vegetativa de la planta y

disminuyen en la etapa productiva para desaparecer cuando la planta sufre un período de estrés (Ibíd.).

- **Fenología**

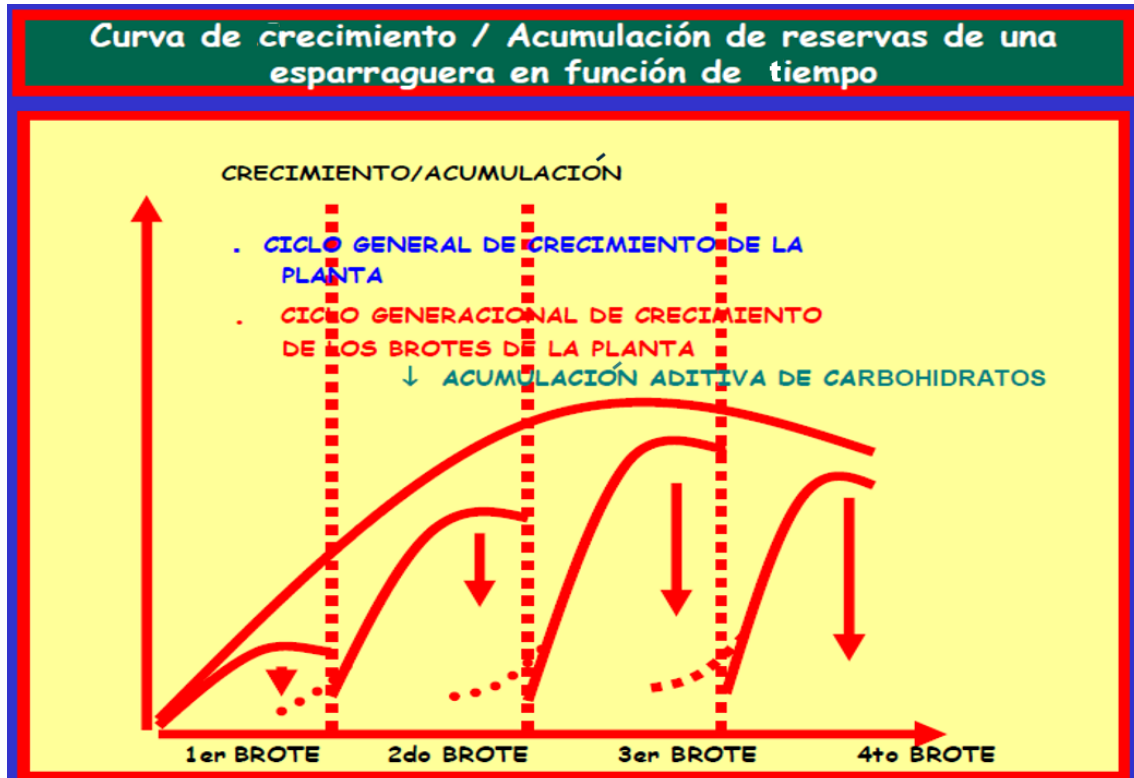


Figura N° 3. Curva de crecimiento y acumulación de reservas del espárrago

Fuente: Garcilazo, 2014

El espárrago, por ser una planta perenne, podemos dividir su ciclo de vida en dos partes: ciclo de vida total y ciclo de vida estacional (Benages, 1990; San Agustín, 1989). El ciclo de vida total del espárrago está caracterizado por tres etapas bien definidas (Figura N° 4). La primera de implantación o de crecimiento activo, donde hay un predominante crecimiento radicular; el fósforo, calcio y potasio tienen gran importancia en la formación de tejidos de reserva (abarca del primer al cuarto año). La segunda etapa, llamada de producción o de máximo rendimiento, es donde precisamente se alcanzan los máximos rendimientos del cultivo, existe una demanda constante de agua y nutrientes y tiene un abundante sistema radicular (abarca del cuarto al octavo año). La tercera etapa o de producción decreciente, caracterizada por una disminución paulatina del rendimiento y

de la demanda de agua y nutrientes, se deteriora el sistema radicular, hay suberización de tejidos, etc. (Sánchez, 2005).

El ciclo vegetativo estacional, está referido a la campaña-cosecha; ésta puede ser anual, dos cosechas por año, tres cosechas en dos años, etc. En el Perú, se utilizan los tres esquemas mencionados y dependiendo de la estación de crecimiento pueden lograrse de dos a cinco brotaciones sucesivos. Cada una de estas brotaciones constituyen a su vez un pequeño “ciclo de vida”, que difieren unos de otros en el tiempo de maduración, siendo siempre el primer brote después de la cosecha el que madura más rápidamente (Sánchez, 1998).

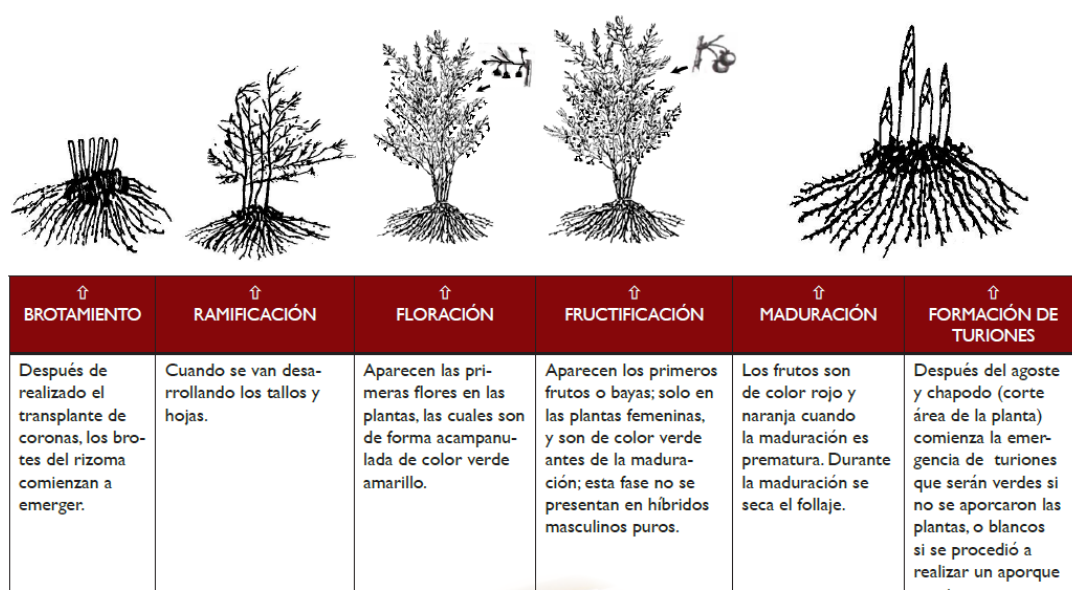


Figura N° 4. Fenología del cultivo de espárrago

Fuente: SENAMHI 2011

- **Clima**

Al igual que para la gran mayoría de las especies cultivadas, la temperatura es el factor climático más crítico para el funcionamiento del espárrago.

Esta especie es de origen mediterráneo sin embargo se comporta como típica especie de estación cálida en cuanto a su respuesta térmica, siendo susceptible a daño por heladas con temperaturas menores a $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y susceptible a daño por enfriamiento en exposición prolongada a temperaturas bajas, cercanas a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, pero sobre el punto de congelación. La temperatura mínima del suelo para la emergencia de turiones es de $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$. La tasa de

crecimiento de los mismos después de su emergencia depende de la temperatura del aire, aumentando de manera curvilínea entre ± 5 °C y 10 °C y linealmente entre 10 y 32 °C, con variaciones reportadas en la literatura según cultivar, edad de la planta y largo del turión (Krarup, 2002).

- **Suelo**

Textura franca, con inclinación a franco arenosa o limosa; también admite la franco arcillosa, aunque no le favorecen los suelos arcillosos. Se debe evitar suelos pedregosos, para el mejor aprovechamiento comercial de los turiones, debido que durante el crecimiento de la yema apical del turión bajo tierra, se deteriora por roces u obstáculos como graba (INIA, 1999).

El pH óptimo está comprendido entre 6.5-8. Tiene gran resistencia a la salinidad del suelo y del agua de riego; aunque tolera una elevada conductividad eléctrica, se entrevé la posibilidad que pueda ser causante de la disminución de longevidad del espárrago (Montt, 1987).

- **Agua**

El espárrago es considerado como una planta capaz de tolerar condiciones de sequía. Aplicaciones regulares de riego a las plántulas de espárrago son necesarias debido al arraigamiento superficial de las plantas jóvenes. El riego durante el establecimiento mejora la supervivencia de las plantas y el rendimiento durante los primeros años de cosecha, confirmando los beneficios del riego en las plantaciones nuevas (Sterrett et al., 1990).

Aunque al espárrago se le conoce por ser una planta tolerante a sequias, se han observado marchitez, muerte del helecho y reducción del rendimiento en condiciones de baja humedad.

Roth y Gardner (1989) indicaron, que para obtener máximos rendimientos (10 872.25 a 18 718.21 kg ha⁻¹) era necesaria una lámina de agua que variaba entre 270 cm y 310 cm y que la cantidad de nitrógeno aplicado variaba de 370 a 630 kg N ha⁻¹.

Cuando se redujeron las aplicaciones de agua, no se afectó la cantidad de espárrago durante los primeros 20 días (de ese año), pero los rendimientos se disminuyeron en los

siguientes 40 días de cosecha. En caso de aplicaciones bajas de nitrógeno, esto causó la reducción del espárrago durante toda la época de cosecha (Ibíd).

El estrés hídrico es negativo para el espárrago, reduciendo el crecimiento de la parte aérea y disminuyendo el rendimiento. La disminución en los niveles de riego afecta los diferentes estadios fenológicos del espárrago, restringiendo el crecimiento del turión, o disminuyendo los fotosintatos y el desarrollo de las yemas. Sin embargo, el espárrago tolera la sequía y es capaz de brotar con un moderado estrés hídrico (Drost, 1997).

- **Humedad relativa**

La humedad relativa óptima en el crecimiento de turiones está comprendida entre el 60 % y 70 %. Si las temperaturas fueran más altas que lo normal, favorecerán el desarrollo vegetativo de la planta de espárrago, por lo que puede esperarse un crecimiento mayor y más acelerado, favorable sobre todo en plantaciones recién establecidas o si se quiere acortar los periodos entre cosechas.

- **Fertilización**

Nitrógeno. - Interviene en la formación de clorofila, producción fotosintética de carbohidratos, síntesis de proteínas, etc. Su carencia se manifiesta rápidamente a través de un amarillamiento de los filocladios más viejos evolucionando a los medios y jóvenes con secamiento de los mismos. El crecimiento del espárrago para su etapa vegetativa requiere de nitrógeno para formar hojas, tallos y brotes o turiones, por lo tanto es importante que la planta tenga este elemento a su disposición después de terminada la cosecha para su desarrollo vegetativo y antes de la cosecha para formar almidones e hidratos de carbono.

Fósforo. - El P es componente de enzimas, nucleoproteínas, fosfolípidos, ATP y otros compuestos que intervienen en la formación de órganos reproductores. Es importante en la fotosíntesis, síntesis de carbohidratos y transferencia de energía dentro de la planta. El P es requerido en cantidades medias por el cultivo. Entre sus roles está el estimular el crecimiento radicular, también influye en la calidad del espárrago pues reduce la fibrosidad y otorga sabor, pues cuando se presenta la carencia de este nutriente el espárrago se vuelve insípido. Tratándose de un elemento de baja movilidad en el suelo en cualquiera de sus fuentes, debe aplicarse en la etapa previa de formación, desarrollo o

acumulación de reservas de las raíces, por lo tanto se debe aplicar después de cada cosecha o antes que se inicie o durante el periodo vegetativo, en dosis que variarán de acuerdo a la riqueza del suelo. Durante el ciclo del cultivo se debe añadir en la proporción antes señalada.

Potasio. - El espárrago remueve grandes cantidades de K, principalmente en la etapa de maduración. Es el elemento extraído en mayor cantidad por la planta después del N. Entre las funciones fisiológicas en las que interviene el K están la formación de azúcares y 30 almidones, síntesis de proteínas, crecimiento y división celular, regulación del suministro de CO₂, translocación de azúcares desde las hojas a las raíces, regulación hídrica, etc. El K mejora la sanidad de la planta y la resistencia a enfermedades. Las exigencias de K se incrementan al término de la floración y durante la maduración. Su carencia se manifiesta tardíamente, mostrando clorosis y secamiento gradual de los filocladios de la parte terminal. El síntoma tiene semejanza al del calcio, con la diferencia que el secamiento ocurre a lo largo del filocladio. Además, muestran intenso floreamiento y aborto prematuro de flores.

Calcio. - Interviene en la formación de pectatos que actúan en el proceso de absorción de nutrientes, forman sales con los ácidos orgánicos e inorgánicos, regulando la presión osmótica de las células. El Ca promueve el desarrollo del sistema radical de la planta, forma parte de la pared celular y desempeña un papel importante en la división celular y el crecimiento vegetativo. Su carencia se presenta algo tardía, los filocladios intermedios y centrales y en particular los terminales se tornan cloróticos y luego toman coloración ceniza. Además, la parte terminal de los filocladios se tornan erectos.

Magnesio. - El Mg es absorbido en un nivel medio por la planta siendo el componente principal de la clorofila e interviene en la síntesis de carbohidratos, que serán determinante para la obtención de altos rendimientos por el cultivo. Además, participa en la síntesis de proteínas, nucleoproteínas del ácido ribonucleico; y favorece el transporte de P dentro de la planta. Su deficiencia se manifiesta tardíamente, los filocladios presentan una coloración anaranjada en los dos tercios basales y un secamiento terminal.

Zinc. - El Zn es esencial para la síntesis de algunas hormonas, tales como la auxina, y para la síntesis de proteínas. Lo usamos en las dos primeras semanas de cada brote para que nos ayude a elongar los entrenudos de la planta.

Manganeso. - Este nutriente cumple un papel importante como catalizador de los sistemas enzimáticos que intervienen en los fenómenos respiratorios, fotosíntesis y el metabolismo del N. La deficiencia de Mn es común en suelos alcalinos y en suelos arenosos.

Hierro. - El Fe es un activador enzimático en la formación de la clorofila. La deficiencia de Fe está bien identificada en suelos calcáreos y suelos arenosos bajos en materia orgánica.

Boro. - El B juega un papel muy importante en la división celular y también interviene en el transporte de azúcares y otros compuestos orgánicos. Su carencia se manifiesta rápidamente en una clorosis y secamiento del tercio superior de la planta y con un engrosamiento basal de los filocladios.

Para mantener la fertilidad del suelo para obtener cosechas y calidad sostenibles, los nutrientes que se exportan desde el campo con la cosecha y que se pierden en el medio ambiente deben ser reemplazados por otras fuentes orgánicas y/o minerales. El uso integrado de fertilizante en prácticas agrícolas ventajosas proveerá los nutrientes que las plantas necesitan en las cantidades suficientes, en proporciones equilibradas, en la forma disponible y en el período que las plantas lo requieran (IFA, 2016).

La fertilización debe ser completa; debe incluir todos los nutrientes extraídos por el cultivo, balanceada; es decir que las cantidades aplicadas deben estar de acuerdo a las necesidades reales del cultivo, global; es decir debe considerar los nutrientes necesarios tanto para los turiones como para el follaje y corona, medible; es decir que se debe considerar el aporte de nutrientes del suelo, el agua y las enmiendas y finalmente, dinámica; es decir que en la medida que los rendimientos son mayores, más nutrientes son utilizados por la planta (Román, 1996).

Sánchez (2005) propone una dosis de abonamiento en esparragueras en función de la edad y número de cosechas por año (Tabla N° 1):

Tabla N° 1. Dosis de aplicación de nutrientes recomendadas para el espárrago en producción

Condición / dosis (kg/ha)	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	B(sal)	Mic EDTA
A. Menores de 2 años							
Una cosecha x año	250	180	250	80	40	5	10
Más de una cosecha x año	200	120	220	40	20	3	5
B. Mayores de 2 años							
Una cosecha x año	350	150	350	60	30	5	15
Más de una cosecha x año	250	120	280	40	20	3	10

Fuente: Sánchez, 2005

2.2. EL SILICIO

2.2.1. Silicio en la naturaleza

El silicio (Si) es un metaloide tetravalente y, junto con su análogo químico germanio (Ge), es un semiconductor crucial ampliamente utilizado en los circuitos de la electrónica moderna. El Si es un elemento ubicuo y el segundo más abundante después del oxígeno en el suelo, que comprende aproximadamente el 28 % de la corteza terrestre. A pesar de esto, la mayoría de las fuentes de Si en el suelo están presentes como aluminosilicatos cristalinos, que son insolubles y no están disponibles directamente para las plantas (Richmond y Sussman, 2003).

La forma disponible de Si para la planta es el ácido monosilícico (H₄SiO₄), que está presente en la solución del suelo bañando las raíces de la planta en concentraciones que oscilan normalmente entre 0.1 y 0.6 mM (Gunnarsson y Arnórsson, 2000).

Aunque se considera un nutriente no esencial para la mayoría de las plantas, los beneficios del silicio incluyen aumentar la resistencia a plagas y patógenos, la tolerancia a la sequía y los metales pesados, y la calidad y el rendimiento de los cultivos agrícolas. Aunque las vías y los mecanismos moleculares por los cuales el silicio se absorbe y se deposita en las

plantas aún no están claros, se ha logrado un progreso reciente mediante el uso de mutantes de arroz que son deficientes en la absorción de silicio. Además, la aplicación de la espectroscopía de pérdida de energía de electrones (EELS) permite determinar la composición de los depósitos de sílice de manera concluyente (Richmond y Sussman, 2003).

2.2.2. Silicio en la agricultura

Según Liang et al. (2015) con base en el conocimiento actual documentado en la literatura, está claro que el Si muestra su importancia para la vida de las plantas y el rendimiento de los cultivos en los siguientes aspectos, pero definitivamente no se limita a estos: (1) esencialidad (diatomeas (Bacillariophyta), colas de caballo o juncos de fregado (Equisetaceae); (2) mejora del crecimiento, rendimiento y calidad; (3) promoción de la resistencia mecánica o erección de la planta y, por lo tanto, resistencia al acame; (4) mejor interceptación de la luz y, por lo tanto, promoción de la fotosíntesis; (5) resistencia a la luz solar insuficiente o sombreado; (6) efectos de las propiedades de la superficie de la planta; (7) resistencia a enfermedades de plantas causadas por hongos, bacterias, virus y nematodos; (8) resistencia a herbívoros que van desde insectos fitófagos a mamíferos; (9) resistencia al exceso de toxicidad de metales; (10) resistencia al estrés por salinidad; (11) inhibición de la transpiración y por lo tanto resistencia al estrés por sequía y uso eficiente del agua; (12) resistencia a altas temperaturas y estrés por frío o congelación; (13) resistencia a la radiación UV o exposición monocromática; (14) mejora del poder oxidante de la raíz y de las actividades de las raíces y, por lo tanto, alivio de la toxicidad reducida bajo Eh bajo; (15) efectos sobre las actividades enzimáticas; (16) alivio del estrés de otros minerales [p. deficiencia de potasio (K), fósforo (P) y hierro (Fe); exceso de nitrógeno (N), P y boro (B); etc.]; (17) promoción de la formación de nódulos en plantas leguminosas y, por lo tanto, promoción de la fijación de N₂ (Nelwamondo y Dakora, 1999, Nelwamondo et al., 2001, Mali y Aery 2008); y (18) promoción de la formación de carbono fitolítico y, por lo tanto, tiene implicaciones en el bio-secuestro de carbono del CO₂ atmosférico y el cambio climático global (Song et al., 2012, 2013).

2.2.3. Silicio en la planta

- **Transporte y absorción del silicio en las plantas.**

El silicio es absorbido por la planta en forma de ácido silícico [Si(OH)₄], una molécula monomérica no cargada, cuando el pH de la solución es inferior a 9 (Ma et al., 2006). En el brote, el ácido silícico se concentra a través de la pérdida de agua (transpiración) y se polimeriza para formar gel de sílice (SiO₂.nH₂O) (Raven, 2003). El proceso de polimerización de Si convierte el ácido silícico en ácido silícico coloidal y finalmente en gel de sílice con una concentración creciente de ácido silícico (Ma y Takahashi, 1993). Más recientemente, He et al. (2013, 2015), han proporcionado evidencias más convincentes y directas que muestran que el Si está presente de forma natural como constituyente de las paredes celulares, donde está firmemente unido a la matriz de la pared celular (hemicelulosa) en lugar de ocurrir dentro de la deposición de sílice intracelular o extracelular, según se determina mediante el uso de espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) y espectroscopia de fotoelectrones de rayos X (XPS).

- **Beneficios del silicio en la planta**

La alta salinidad o estrés por salinidad pueden afectar negativamente el crecimiento, desarrollo e incluso la supervivencia las plantas (Liang et al., 2015). Los mecanismos implicados incluyen al agua o estrés osmótico, la toxicidad de iones y los trastornos nutricionales. El estrés osmótico es la primera fase del estrés salino, que comienza inmediatamente después de la concentración de sal alrededor de las raíces aumentando más allá de un nivel de umbral, y es seguido por una reducción significativa de la tasa de crecimiento de los brotes. Por lo tanto, la superación de estrés osmótico o déficit fisiológico de agua es una de las estrategias más importantes de la adaptación de las plantas a la salinidad y/o ambientes salinos estresantes. El Si ha demostrado prevenir eficazmente la pérdida de agua de las plantas mediante la inhibición de la tasa de transpiración o reduciendo la pérdida de agua a través de las cutículas debido a la deposición de sílice debajo de las células epidérmicas de las hojas y los tallos. La capacidad de retención de agua fue mejorada con Si bajo estrés salino puede estar asociado no sólo con la reducción de la pérdida de agua por transpiración debido a la deposición de sílice debajo de las células epidérmicas de hojas y tallos, sino también al papel del potasio en la regulación de cierre de los estomas, más potasio fue tomado por

las plantas en medio salino en la presencia de Si que en la ausencia de Si (Liang et al. 1999).

Con el fin de investigar el papel del Si en el alivio de los efectos nocivos de la salinidad sobre el crecimiento de la planta de tomate, se cultivó el cultivar Moneymaker con 0 y 80 mM de NaCl combinado con 0 y 2,5 mM de Si. Se analizaron los parámetros de crecimiento, la acumulación de sal en los tejidos y las relaciones hídricas de las plantas. El contenido de agua de las plantas salinizadas suministradas con Si fue un 40% mayor que en las plantas salinizadas que no recibieron Si. Las plantas tratadas solo con NaCl mostraron una reducción en el peso seco de la planta y el área foliar total de la planta de 55 % y 58 %, respectivamente, mientras que la reducción en plantas tratadas con NaCl más Si fue solo 31 % y 22 % (Romero-Aranda et al. 2006).

2.3. EXPERIENCIAS CON EL USO DE SILICIO

La salinización del suelo es uno de los principales factores edáficos que restringen severamente el crecimiento de los cultivos y comprometen el desarrollo de la agricultura sostenible en las zonas costeras y del interior de todo el mundo (Liang et al., 1996; Zhu y Gong, 2014). Se estima que aproximadamente el 7 % del suelo en la Tierra y el 20 % de la tierra cultivable se ven afectados negativamente por la salinidad (Liang et al., 1996; Rasool et al., 2013). La principal propuesta para mejorar los suelos salinos es lixiviar las sales hacia abajo del perfil del suelo por exceso de riego. Sin embargo, esto se limita con frecuencia tanto en las zonas áridas y semiáridas y en las zonas costeras debido a la cantidad limitada de agua dulce o el aumento de la salinidad en los arroyos (Liang et al., 1996).

De los 260 millones de hectáreas de tierra regada en todo el mundo, 80 millones están afectados por la salinización, una concentración de sal en la superficie del suelo que reduce severamente la fertilidad del suelo (WEHAB, 2002). La mayoría de las plantas que toleran la salinidad, captan Na^+ y Cl^- de una manera restringida, manteniendo la absorción de macronutrientes como K^+ , NO_3^- y Ca^{2+} .

En otros países se propone la fertilización con silicio para mitigar los daños causados por los iones Cl^- y Na^+ (condiciones salinas estresantes), en algunos cultivos. La adición de

silicio aumenta la fotosíntesis y disminuye la permeabilidad de las hojas de cebada estresadas por sales, y el silicio podría inhibir la absorción de Na^+ y aumentar la absorción de K^+ mitigando así la toxicidad de las sales y mejorando el crecimiento vegetativo de la cebada (*Hordeum vulgare*) en un cultivar tolerante a sales (Kopin N° 7) y uno sensible (Jian N° 4) cultivados bajo condiciones salinas estresantes (Liang et al., 1996). El silicio mejoró el área específica de la hoja y la tasa de asimilación de CO_2 , que se redujo debido al estrés salino.

El silicio puede aliviar el estrés salino en el trigo por la disminución de la permeabilidad de la membrana plasmática para el Na^+ manteniendo la integridad con respecto a K^+ y Ca^{2+} (Tuna et al., 2008). Una reducción moderada de sodio en las raíces y los brotes por el silicio añadido fue observada bajo condiciones de estrés salino. El contenido de clorofila se redujo considerablemente tanto en cultivares tolerantes y sensibles a sales en trigo (*Triticum aestivum*) bajo tensión elevada de sales (NaCl 100 mM), y la adición de silicio restaura completamente el contenido de clorofila a el nivel de plantas no estresadas (Ibíd.).

Liang (1998) mostró que, aunque el contenido de clorofila de las hojas de cebada fue consistentemente mayor en el cultivar tolerante a sales que en el cultivar sensible a sales, la tasa neta de asimilación de CO_2 de la hoja aumentó significativamente en ambos cultivares probados bajo estrés salino cuando se les proporcionó silicio. La adición de silicio contrarrestó significativamente la reducción del crecimiento causada por el estrés salino en plantas de arroz (*Oryza sativa*) cultivadas en una solución nutritiva que contiene NaCl 50 mM (Yeo et al., 1999). Los autores indican que el silicio incrementó la tasa de asimilación de CO_2 y la conductancia estomática.

Si bien la aplicación de silicio *per se* (en ausencia de estrés salino) no influyó en la tasa neta de fotosíntesis, la conductancia estomática y la tasa de transpiración en plántulas de sorgo (*Sorghum bicolor*) cultivados hidropónicamente, la suplementación de silicio causaron un aumento significativo en estos parámetros cuando las plantas se sometieron a estrés salino en 100 mM de NaCl (Yin et al., 2013). El rendimiento de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) bajo estrés salino fue significativamente mayor en presencia de silicio que en su ausencia (Ashraf et al., 2010). Las características de la calidad del jugo mejoraron significativamente por la aplicación de Si en genotipos de caña de azúcar sensibles y tolerantes a sales probadas (Ibíd.).

Se encontró que la adición de silicio como tratamiento contra sales, mejora la ultra estructura de las células de las hojas. Bajo condiciones de estrés salino, las dobles membranas de los cloroplastos fueron degradados, pero la integridad de la membrana fue notablemente mejorada con la suplementación de silicio (Liang et al., 2015).

Basado en la literatura actual, parece que el silicio depositado en el apoplasto como SiO_2 ópalo o fitolito puede mejorar la retención de agua mediante la inhibición de la pérdida de agua por transpiración reduciendo así el estrés osmótico inducida por sales, y el silicio soluble en el simplasto pueden participar activamente en los metabolismos fisiológicos y bioquímicos mediante la regulación de la expresión de genes relacionados con la biosíntesis de hormonas como el ácido abscísico (ABA), ácido jasmónico(AJ), etc., las enzimas de defensa antioxidante, bombas de H^+ y osmolitos para reequilibrar la estequiometría de iones, reducir la permeabilidad de la membrana, mejorar su estructura y estabilidad, por lo tanto, mejorar la tolerancia a la sal en las plantas (Liang et al., 2015).

La concentración de sodio en los brotes de arroz (Matoh et al., 1986; Yeo et al., 1999) y la cebada (Liang, 1999) se redujo mediante la adición de silicio. Esto se atribuyó a la reducción silicio inducida en la tasa de transpiración (Matoh et al., 1986) y a la obstrucción parcial del flujo de derivación por transpiración (Yeo et al., 1999). El aumento de la captación y el transporte de K^+ y la disminución de la captación y el transporte de Na^+ de las raíces a los brotes de cebada se cree que son atribuibles a la estimulación silicio inducida de la H^+ -ATPasa en la membrana plasmática de la raíz bajo estrés salino (Liang 1999; Liang et al., 2006).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LUGAR DEL EXPERIMENTO

El presente trabajo de investigación se realizó bajo condiciones de invernadero, en la Universidad Nacional Agraria La Molina en el Laboratorio e Invernadero de Fertilidad del Suelo. La ubicación geográfica es:

Latitud: 12° 4'46.20"S

Longitud: 76°56'45.95"O

Altitud: 240 msnm

3.2. CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS DE LA ZONA

Clima cálido desértico tipo subtropical seco, con una temperatura promedio anual de 13.3 – 28.7 °C, una humedad relativa de 90 – 50% y una precipitación promedio anual de 15 mm.

3.3. MATERIALES

3.3.1. Material vegetal

Se empleó plántulas de espárrago cv. UC-157 F₁ moderadamente resistente a sales de seis semanas de edad. Las plántulas presentaron coronas de 2 – 4 cm de diámetro y altura que varió entre 10 – 15 cm.

El sustrato fue sometido a distintos niveles de salinidad (0.0 dS/m, 6.0 dS/m y 12.0 dS/m), siendo los mismos para cada grupo tratamiento.

3.3.2. Características del agua de riego

Para el desarrollo del experimento se empleó una fuente de agua subterránea procedente de un pozo de la localidad de Huachipa (Lima). El agua potable de la UNALM no fue utilizada debido a su elevada conductividad eléctrica (CE 3.76 dS/m) perjudicial para el desarrollo de los cultivos. Los resultados del análisis químico del agua de riego se resumen en la Tabla N° 2. Para la primera etapa se utilizó agua desionizada.

Tabla N° 2. Análisis del agua a ser usada en el experimento

Característica	Unidades	Valor
pH	(----)	5.61
C.E.	(dS/m)	0.86
RAS	(----)	1.10
Boro	(ppm)	0.20

Suma de aniones (-)	(meq/L)	8.58
Nitrato (NO ₃ ⁻)	(meq/L)	0.09
Carbonato (CO ₃ ²⁻)	(meq/L)	0.00
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	(meq/L)	1.78
Sulfato (SO ₄ ²⁻)	(meq/L)	2.81
Cloruro (Cl ⁻)	(meq/L)	3.90

Suma de cationes (+)	(meq/L)	8.94
Calcio (Ca ²⁺)	(meq/L)	5.38
Magnesio (Mg ²⁺)	(meq/L)	1.40
Potasio (K ⁺)	(meq/L)	0.12
Sodio (Na ⁺)	(meq/L)	2.04

Clasificación del agua		C ₃ S ₁

Fuente: LASPAF-UNALM

De acuerdo a las características analizadas, el agua de riego es clasificada como C₃S₁; esto es un bajo nivel de sodio.

Según el criterio de clasificación de agua propuesto por Richards (1972) y FAO (1976), a continuación se describen las características del agua de riego; la concentración total de sales solubles presenta una clasificación de C₃, con una conductividad eléctrica de 0.86 dS/m, lo cual significa un alto nivel de salinidad. La relación de adsorción de sodio (RAS) para el agua en uso es de 1.10, lo cual indica un nivel bajo como para ocasionar problemas de alcalinidad.

3.3.3. Sustrato

Se utilizó arena fina lavada como sustrato para el crecimiento de las plantas de espárrago.

3.3.4. Fuentes de silicio

Se ensayó dos fuentes experimentales de silicio activo (SiA):

Silicato de potasio soluble; es un producto no comercial de FEEDCOR S.A. por lo que aún no cuenta con una ficha técnica, esta se encuentra en una fase de prueba con la cual se busca obtener una mayor información frente a su comportamiento en la planta, esta fuente se obtuvo por la acidulación de silicato de potasio con acetato de calcio, obteniéndose un precipitado lechoso con un pH de 7.5 y una concentración de 65000 ppm de silicio.

Armurox; es un complejo activo de péptidos con silicio soluble con pH de 12.7 y una concentración de 50000 ppm. Armurox funciona como barrera física y previene la penetración de agentes externos haciendo a la planta menos susceptible a la degradación enzimática. Contribuye a reducir la toxicidad de Al, Mn y Na.

3.4. OTROS MATERIALES

3.4.1. Fase de invernadero

- 45 macetas de plástico con capacidad de 4 kg.
- 45 macetas de plástico con capacidad de 15 kg.
- 45 platos de plástico.
- Papel filtro.
- Tamiz de malla de cobre de 4 mm.
- Tijera de podar.
- Pala.
- Regla graduada o cinta métrica.
- Recipientes graduados de plástico.
- Balanzas mecánica y electrónica.
- Etiquetas adhesivas.

- Bolsas de papel.
- Cajas de plástico.
- Bandeja para almacigo.
- Cámara fotográfica.
- Cuaderno de notas.
- Lapicero, lápiz.

3.4.2. Fase de laboratorio

- Balanza electrónica.
- Bolsas ziploc.
- Guantes quirúrgicos.
- Pipeta.
- Fiolas.
- Micropipeta.
- Conductímetro digital.
- Potenciometro digital.
- Embudos.
- Tubos de ensayo.
- Matraces de erlenmeyer.
- Latas de metal.
- Tubos de centrifuga de 50 ml.
- Crisoles de níquel de 50 ml y 30 ml.
- Gradilla de madera
- Espectofotómetro de luz visible.
- Mechero.
- Mufla.

3.5. DESCRIPCIÓN DE LOS TRATAMIENTOS A ENSAYAR

3.5.1. Fuentes de silicio

Silicato de potasio acidulado con acetato de calcio

Armurox®

Testigo sin silicio

Ambas fuentes de silicio se aplicaron a una cantidad suficiente para proveer 500 ppm de silicio activo (500 mg/kg Si en el sustrato), para luego someter al sustrato a distintas salinidades.

3.5.2. Nivel de salinidad en el agua de riego

Se aplicaron tres niveles de salinidad en el agua de riego 0.0, 6.0 y 12.0 dS/m hasta que el sustrato tome estos valores. En baldes de 20 litros de agua se salinizó con cloruro de sodio hasta que alcance los valores mencionados medidos con el potenciómetro digital, luego se procedió a regar las macetas según demanda hídrica de las plantas de espárrago.

Tabla N° 3. Descripción de las fuentes de Si y niveles de salinidad empleadas en los tratamientos del ensayo

Tratamientos	Fuente de silicio	Nivel de salinidad (dS/m)
T ₁ S ₁	Testigo	0.0
T ₁ S ₂	Testigo	6.0
T ₁ S ₃	Testigo	12.0
T ₂ S ₁	Silicato de potasio	0.0
T ₂ S ₂	Silicato de potasio	6.0
T ₂ S ₃	Silicato de potasio	12.0
T ₃ S ₁	Armurox	0.0
T ₃ S ₂	Armurox	6.0
T ₃ S ₃	Armurox	12.0

El ensayo se manejó a nivel de macetería, las aplicaciones y dosificación se realizaron según el cronograma. Cada tratamiento contó con cinco repeticiones.

El programa de riego se estableció en función al requerimiento de la planta, según el tipo de sustrato y a las condiciones climáticas del invernadero.

3.6. MÉTODOS

3.6.1. Materia orgánica

Estos materiales ayudan a mantener y mejorar la disponibilidad de nutrientes en el suelo así como también puede mejorar las propiedades físicas, aumentando la capacidad de retención de humedad, reduciendo riesgo de erosión, reduciendo la evaporación del agua y regulando la humedad. Mejora la actividad biológica aportando organismos como bacterias y hongos capaces de mejorar la disponibilidad de nutrientes fijados en el suelo para la planta.

Tabla N° 4. Contenido de N, P, K como compost

Nutrientes	Compost	
	%	g/kg
Nitrógeno	1.76	17.60
Fósforo	1.45	14.50
Potasio	0.39	3.90

Fuente: LASPAF-UNALM

En la primera fase antes del remaceteo a cada maceta de 4.0 kg se le agregó 200 gr en materia orgánica (compost), que brinde las propiedades previamente descritas. Se añadieron en el sustrato (arena), y se homogenizaron al momento en que se realizó el trasplante de los almácigos hacia la maceta. El compost que se utilizó para la mezcla del sustrato fue adquirido del CONSAS de la UNALM.

3.7. METODOLOGÍA Y PROCEDIMIENTO

3.7.1. Colecta, preparación y muestreo de suelo

La arena fue secada al aire y tamizada a través de una malla de 4 mm de diámetro. Se realizó una homogenización del sustrato (arena) y se tomaron muestras para su análisis químico en el laboratorio.

3.7.2. Preparación de las macetas

Las macetas de plástico fueron lavadas, esterilizadas con alcohol, etiquetadas y llenadas con 4.0 kg del sustrato preparado (arena y compost). Cada maceta se humedeció hasta alcanzar capacidad de campo.

3.7.3. Trasplante

El trasplante se realizó en el mes de febrero del 2016, los 45 plantines de espárrago se colocaron uno en cada maceta, luego se regaron con un volumen de agua que permitió al sustrato continuar en capacidad de campo durante dos semanas sin ninguna adición de fertilizantes. Este proceso de trasplante se realizó con mucho cuidado de no desmoronar el cono del sustrato de la bandeja almaciguera donde se encontraban los plantines.

Luego de cuatro meses según cronograma se realizó un cambio de maceta a una de 8 kg debido a que las raíces necesitaban más espacio y estaban comprimidas. Se colocó un papel filtro en la base de la maceta que tape los agujeros y no le permita perder sustrato, luego se llenó el fondo de la maceta con 1 kg de sustrato para colocar la planta de espárrago extraída de la anterior maceta (4 kg), y se procedió a rellenar con 3 kg de sustrato.

3.7.4. Fertilización y riego

La dosis de fertilización total (primera fertilización) fue 300 ppm de N, 160 ppm P_2O_5 , 320 ppm de K_2O , 60 ppm de CaO, 60 ppm de MgO. Empleando como fuentes; nitrato de amonio, fosfato monoamónico, nitrato de potasio, nitrato de calcio, sulfato de magnesio respectivamente. Además de Fetrilon Combi 1® como fuente de micronutrientes, 500 ppm de silicio en forma de silicato de potasio acidulado con acetato de calcio y Armurox® que se aplicaron una sola vez en toda la campaña.

El procedimiento a emplear se presenta a continuación.

- Se pesó 30.77 g de nitrato de amonio, 35.41 g de fosfato monoamónico y 27.17 g de nitrato de calcio, y fueron disueltos por separado en un envase de 400 ml para la fertilización del primer mes.

- Se pesó 32.59 g de nitrato de amonio, 11.80 g de fosfato monoamónico, 48.0 g de nitrato de potasio y 45.0 g de sulfato de magnesio para la fertilización del segundo mes.
- Se pesó 16.43 g de nitrato de amonio, 60.0 g de nitrato de potasio, 13.58 g de nitrato de calcio y 22.5 g de sulfato de magnesio para el tercer mes.
- Se tomó 100 ml de la solución preparada anteriormente (400 ml) cada solución se transfirió a un envase más grande de 9 litros de agua desionizada y con ello se realizó la fertilización de las 45 macetas por semana.

Se dio inicio a la fertilización dos semanas después del trasplante y continuó durante los tres meses siguientes según cronograma. Cada semana se aplicó 100 ml del fertilizante preparado en la descripción anterior y se repartió en las 45 macetas. Antes de la fertilización se regó con 250 ml de agua desionizada para mantener el suelo a capacidad de campo.

Las fuentes silícicas se agregaron según cronograma (nueve semanas de iniciada la fertilización) y tuvieron una dosis de 500 ppm de Si activo.

Las macetas fueron regadas convenientemente, para ello los riegos fueron frecuentes con volúmenes variables de agua manteniendo al suelo a capacidad de campo. Las macetas fueron regadas durante cuatro meses, tiempo en el cual se hicieron las evaluaciones. Luego del primer período de fertilización y riego, se suministró agua con alta conductividad eléctrica hasta que el suelo se encuentre en las condiciones de 0.0 dS/m, 6.0 dS/m y 12.0 dS/m, para cada tratamiento y repetición luego se mantuvo esa conductividad hasta el final del ensayo.

Tabla N° 5. Dosis de fertilización total mensual para las 45 macetas

Fertilizante	Marzo	Abril	Mayo	Dosis total	ppm
Nitrato de amonio	30.77	32.59	16.43	N	300
Fosfato monoamónico	35.41	11.80	0.00	P ₂ O ₅	160
Nitrato de potasio	0.00	48.00	60.00	K ₂ O	320
Nitrato de calcio	27.17	0.00	13.58	CaO	60
Sulfato de magnesio	0.00	45.00	22.5	MgO	60
Silicio activo	---	---	---	Si	500

Para los siguientes tres meses se tuvo otro plan de fertilización el cual se adjuntó en los anexos.

3.8. PARÁMETROS EN EVALUACIÓN

3.8.1. Parámetros biométricos

Al final del período de crecimiento en la fecha planteada según cronograma, se realizaron distintas evaluaciones y mediciones a la planta y sustrato, peso fresco, peso seco, análisis de suelo, análisis de broza etc.

La primera cosecha del espárrago (follaje) se realizó el mes de agosto del 2016, y la segunda cosecha (follaje) se realizó en el mes de abril y mayo del 2017 a continuación se describe el procedimiento.

- **Peso fresco por planta:** las plantas fueron cortadas con una tijera de podar desde la corona, y luego pesadas en una balanza de precisión para obtener la materia fresca o biomasa por planta. Posteriormente fueron lavadas con agua desionizada para luego ser colocadas en bolsas de papel que previamente fueron rotulados.
- **Peso seco por planta:** porciones de la materia fresca anterior fueron pesadas y secadas a estufa a 70 °C por 24 horas hasta peso constante. Posteriormente fueron nuevamente pesadas obteniéndose el peso seco por planta y el porcentaje de materia seca.

3.8.2. Análisis químico

Porciones de materia seca del follaje de las plantas de espárrago fueron molidas finamente y homogenizadas. Los contenidos de silicio, calcio, sodio y cloro en la materia seca fueron determinados de acuerdo a los procedimientos siguientes:

- Silicio foliar: se pesó 0.1 g de materia vegetal seco y molido y se colocó en crisoles de níquel. Estos se transfirieron a la mufla y se incrementó la temperatura a 300 °C, manteniéndose durante 30 min. Posteriormente, se incrementó a 550 °C y se mantuvo así por 30 min. Después de enfriarse, se añadió a los crisoles 4.5 g de una solución de NaOH a 50%. Los crisoles se cubrieron parcialmente y se colocaron en una plancha caliente hasta evaporar la solución. Posteriormente, los crisoles y su contenido se calentaron lentamente en un mechero durante 10 min. Después de que los crisoles se enfriaron a temperatura ambiente, se añadieron 25 ml de agua destilada y se dejaron en reposo por una noche. Finalmente, el contenido de los crisoles se aforó a 50 ml y se transfirió a botellas de polietileno, previamente lavadas con NaOH 0.1 M (Parra-Terraza et al., 2004).

El análisis colorimétrico fue una modificación del procedimiento descrito por Elliott y Snyder (1991).

- Silicio suelo: se pesó 2.0 g del sustrato previamente secado a estufa y se colocó en un recipiente de plástico con tapa y con 20 ml de cloruro de calcio (CaCl_2 0.01 M). Se agitaron en agitador orbital durante 16 horas a 20 RPM. Luego se dejó reposar por una hora, para que el sólido sedimente. Se tomó 6 ml de la solución digestada y se pasó por papel de filtro lento. Se hicieron tres repeticiones por muestra para disminuir el error.

El análisis colorimétrico se realizó según el protocolo de laboratorio de la UNALM.

- Sodio: porciones de 1.0 g de materia seca pulverizada de follaje, fueron sometidas a digestión vía húmeda empleando una mezcla 1:1 de ácidos nítrico y perclórico (Zasoski y Burau, 1977). El sodio fue determinado en extracto por espectrofotometría de absorción atómica.

- Cloro: porciones de 1.0 g de materia seca pulverizada de follaje, fueron sometidas a extracción con 50 ml agua destilada durante 30 minutos. Posteriormente el extracto fue filtrado a través de papel filtro Whatman N° 40. Una alícuota de 5 ml del filtrado fue titulado con nitrato de plata (AgNO_3) en presencia de indicador cromato de potasio (K_2CrO_4), para determinar el contenido de cloro libre en el tejido seco.
- Conductividad eléctrica del sustrato: se tomaron pequeñas porciones de sustrato de cada maceta y fueron secadas. Una muestra de 50 g de sustrato se colocó en un vaso de precipitado y se agregó agua destilada gradualmente hasta formar una pasta saturada con la ayuda de una espátula. La pasta saturada fue vertida en un embudo de filtración y el extracto acuso se recibió en un vaso. Se procedió a leer la conductividad eléctrica del filtrado (dS m^{-1}) empleando un conductivímetro digital YSI® (*Yellow Spring Instruments*).

3.9. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

3.9.1. Diseño experimental

En el presente estudio se empleó un diseño completo al azar con arreglo factorial de tres niveles de salinidad en el sustrato por dos fuentes de silicio disponible, con 05 repeticiones por cada combinación

El modelo aditivo lineal es el siguiente:

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

Donde:

Y_{ijk} = es la respuesta observada en la k-ésima maceta, sometida a la i-ésima fuente de silicio bajo el j-ésimo nivel de salinidad en el sustrato.

μ = estima la media general

α_i = efecto producido por la i-ésima fuente de silicio aplicada al suelo

β_j = efecto debido al j-ésimo nivel de salinidad en el sustrato

$(\alpha \beta)_{ij}$ = efecto de la interacción entre i-ésima fuente de silicio y al j-ésimo nivel de salinidad en el sustrato

ϵ_{ijk} = efecto aleatorio de variación (error experimental)

La distribución de grados de libertad para cada fuente de variación puede apreciarse en la Tabla N° 6

Tabla N° 6. Distribución de grados de libertad por fuente de variación

Fuente de variación	Grados de libertad (G.L)	
Salinidad (S)	$S - 1$	2
Nivel de silicio (Si)	$Si - 1$	2
Interacción salinidad x Nivel de Si	$(S - 1)(Si - 1)$	4
Error experimental	$SSi(R - 1)$	36
Total	$SSiR - 1$	44

3.9.2. Tratamiento estadístico

Los datos obtenidos de los pesos fresco y seco de plantas, así como de la extracción de silicio, sodio y cloro fueron sometidos el análisis de variancia (ANVA) con un nivel de significación de 0.05. Los promedios fueron comparados mediante la prueba de comparación de medias HSD Tukey. Para el análisis estadístico se empleó el paquete *Agricolae* del ambiente de proceso estadístico R, versión 3.2.4 (R Core Team, 2016).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Según la Figura N° 5 el silicio en el suelo tiene una relación directa respecto al silicio foliar, y esto se entiende debido a que la aplicación al suelo de las fuentes silíceas proveyeron una mayor concentración de éste y por ende una mayor absorción por las plantas.

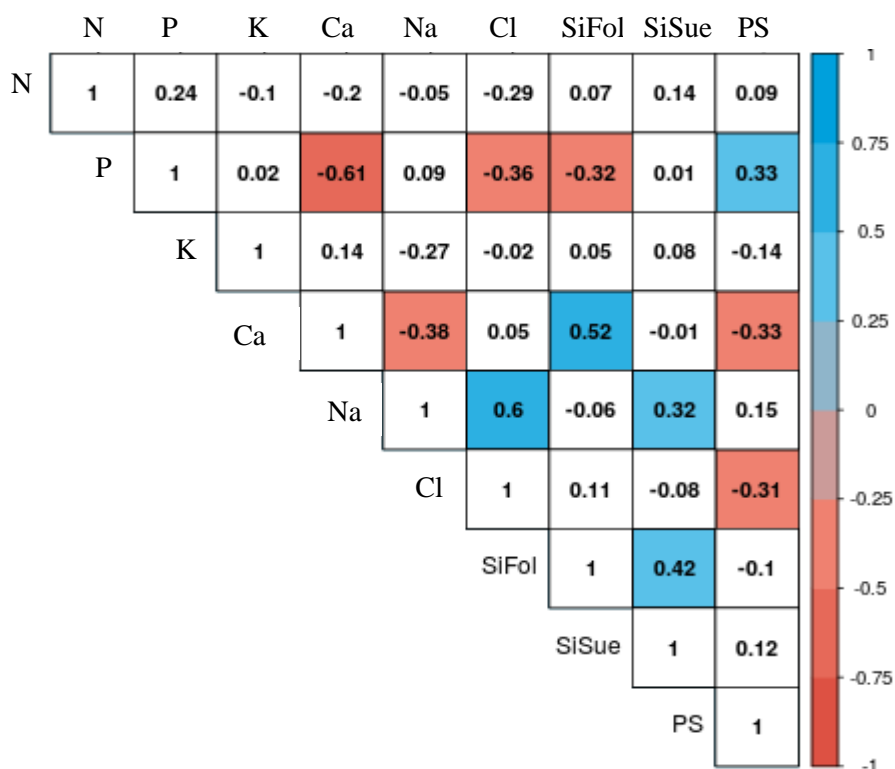


Figura N° 5. Valores de correlación de las variables evaluadas

Se notó también que el cloro tiene una alta y relación directa con el sodio en la broza seca del espárrago, esto debido a la alta concentración de NaCl añadida al suelo con lo cual la planta al tomar altas cantidades de Cl también toma Na. Pero esta relación afecta negativamente a la absorción de fósforo, mientras más cloro tome la planta ayuda a la absorción de sodio, pero dificulta la absorción de fósforo.

Un alta y relación negativa se puede observar con la absorción de calcio foliar disminuyendo la cantidad de fósforo absorbido por la planta.

Se notó también que el silicio foliar tiene un efecto negativo en cuanto a la absorción de fósforo por la planta y una relación positiva con la absorción de calcio. Por ende mientras más silicio tome la planta ayudará a la absorción de calcio y mermará la de fósforo.

Tabla N° 7. Efecto de la aplicación de dos fertilizantes en suelo y tres niveles de salinidad sobre el contenido de cloro, sodio, silicio y peso seco en el follaje del espárrago

Tratamiento	Cloro	Sodio	Silicio	Peso seco
	----- (%) -----			(g)
Producto				
Ninguna	2.86a	0.74b	0.29b	23.16a
Silicato de potasio	2.61a	1.38a	0.34a	24.08a
Armurox	2.76a	1.55a	0.34a	28.32a
Salinidad dS/m				
0	1.37c	0.41c	0.32a	26.83a
6	2.56b	1.21b	0.33a	25.74a
12	4.31a	2.06a	0.31a	22.98a

Producto	n.s	***	*	n.s
Salinidad	***	***	n.s	n.s
Producto × Salinidad	**	**	n.s	n.s
C.V. (%)	20.84	36.64	17.83	21.95

Los valores dentro de una columna seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes ($P > 0.05$), según la prueba de comparación de medias HSD de Tukey.

Tabla N° 8. Efecto de la aplicación de dos fertilizantes y tres niveles de salinidad sobre el silicio extractable y valores medios de la conductividad en el sustrato

Tratamiento	Silicio (ppm)	C.E (dS/m)
Producto		
Ninguna	28.44b	7.02
Silicato de potasio	76.94a	7.80
Armurox	71.56a	7.80
Salinidad dS/m		
0	60.87a	1.00
6	59.17a	8.21
12	56.90a	11.73
Producto	***	--
Salinidad	n.s	--
Producto × Salinidad	n.s	--
C.V. (%)	14.47	--

Los valores dentro de una columna seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes ($P > 0.05$), según la prueba de comparación de medias HSD de Tukey.

De la Tabla N° 7 se pudo concluir que el peso seco de la broza es no significativo, por lo que no hay diferencias en los valores encontrados para los productos, niveles de salinidad y su interacción.

Mientras que tanto para silicio foliar y silicio extractable encontramos que hay una diferencia significativa y altamente significativa respectivamente para el efecto de los productos.

El sodio muestra diferencias altamente significativas para las variables producto, salinidad y su interacción entre ellas por lo que se describirá a detalle más adelante.

De la misma forma el cloro no se encuentra diferencias significativas para la variable productos pero si para la salinidad y su interacción entre ellas.

4.1. CLORO

En la Figura N° 6 se pudo notar que hay un efecto significativo entre los tres niveles de salinidad para el contenido de cloro de la materia seca del follaje de espárrago, con lo que se demuestra que el contenido de cloro fue mayor a una conductividad de 12 dS/m y menor a 0.0 dS/m.

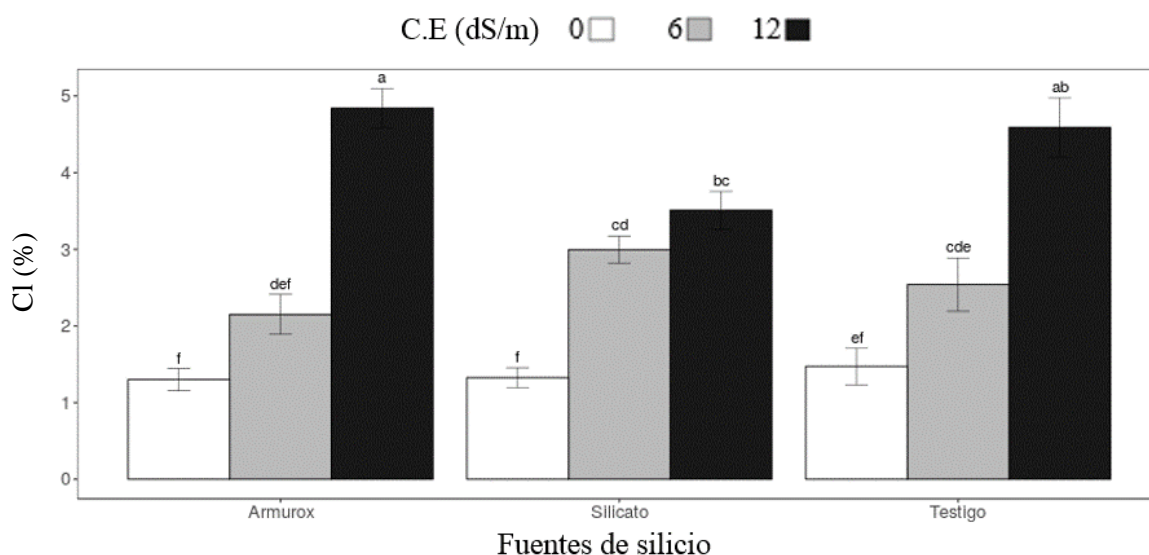


Figura N° 6. Efecto de dos fuentes de silicio en el suelo y tres niveles de salinidad sobre el contenido de cloro en la materia seca del follaje del espárrago.

En la siguiente tabla (N°9) se notó una diferencia significativa entre la interacción de las dos fuentes de silicio y los tres niveles de salinidad. La fuente de silicato de potasio disminuyó la concentración de cloro foliar para una conductividad de 12 dS/m en comparación con los otros dos tratamientos por lo que se encontraron diferencias significativas, de la misma forma para el armurox con la conductividad de 6 dS/m.

No se encontraron diferencias significativas entre las fuentes Armurox y silicato de potasio.

Tabla N° 9. Comparación entre dos fuentes de silicio en el suelo y tres niveles de salinidad respecto al contenido de cloro en la materia seca del follaje de espárrago

Fuentes	C.E. (dS/m)	Cloro (%)
Testigo	0	1.47 ef
	6	2.54 cde
	12	4.59 ab
Silicato de potasio	0	1.33 f
	6	3.00 cd
	12	3.51 bc
Armurox	0	1.30 f
	6	2.15 def
	12	4.84 a

Los valores dentro de una columna seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes ($P > 0.05$), según la prueba de comparación de medias HSD de Tukey.

En conclusión, se encontraron diferencias significativas solo para el efecto de la variable salinidad y para la interacción fuentes con salinidad, siendo más importante los niveles de salinidad en la concentración de cloro en la planta que el producto suministrado para mitigar los efectos de este.

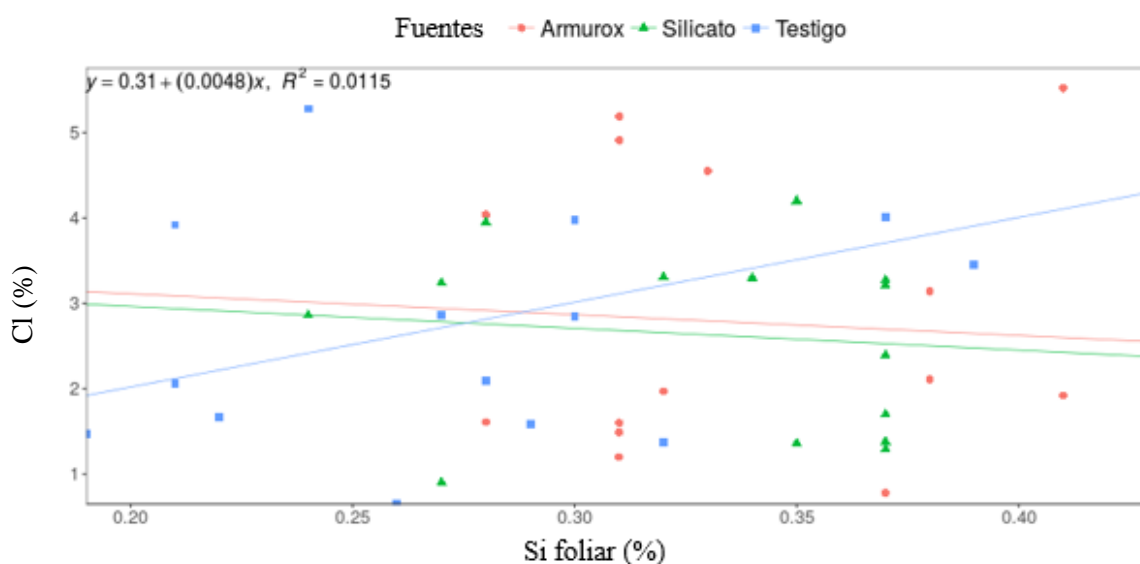


Figura N° 7. Relación entre el contenido de silicio y cloro en la materia seca del follaje de espárrago sometido a tres fuentes de silicio.

Según la Figura N° 7 no se puede concluir que el contenido de cloro sean explicados por el contenido de silicio encontrados en la materia seca del follaje en el espárrago con respecto a tres fuentes de silicio aplicadas.

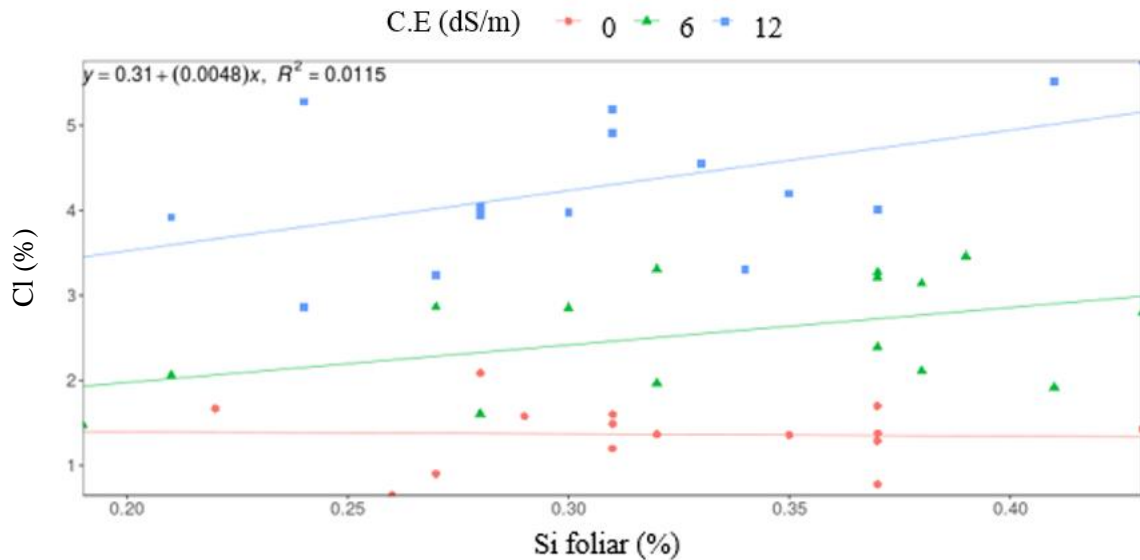


Figura N° 8. Relación entre el contenido de silicio y cloro en la materia seca del follaje de espárrago sometido a tres niveles de salinidad

En la Figura N° 8 se pudo notar que la línea de tendencia de 0 dS/m es prácticamente horizontal y esto se entiende porque no se le agregó sales (NaCl) al sustrato teniendo solo valores mínimos dados por el agua de riego. Sin embargo en las concentraciones de 6 dS/m y 12 dS/m muestran pendientes positivas, lo que nos indica una supuesta tendencia que mientras aumenta el silicio también aumenta el cloro en la materia seca del follaje de espárrago, aunque estos efectos no puedan ser explicados por el silicio foliar por la baja relación, según los valores arrojados hay una diferencia significativa para los niveles de salinidad y la concentración de cloro en la planta con respecto a los tres niveles de salinidad.

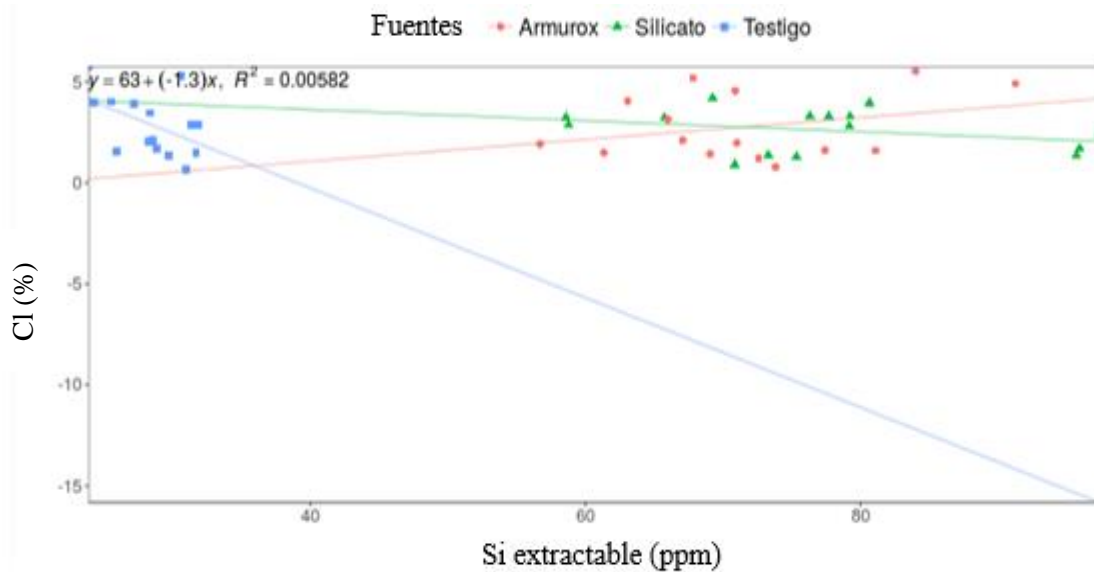


Figura N° 9. Relación entre el contenido de silicio extractable en el sustrato y el contenido de cloro en la materia seca del follaje de espárrago sometido a tres fuentes de silicio.

En la Figura N°9 al igual que la Figura N° 7 el contenido de cloro en la materia seca del follaje de espárrago no se puede explicar por el contenido de silicio extractable encontrado en el sustrato con respecto a las tres fuentes de silicio aplicadas.

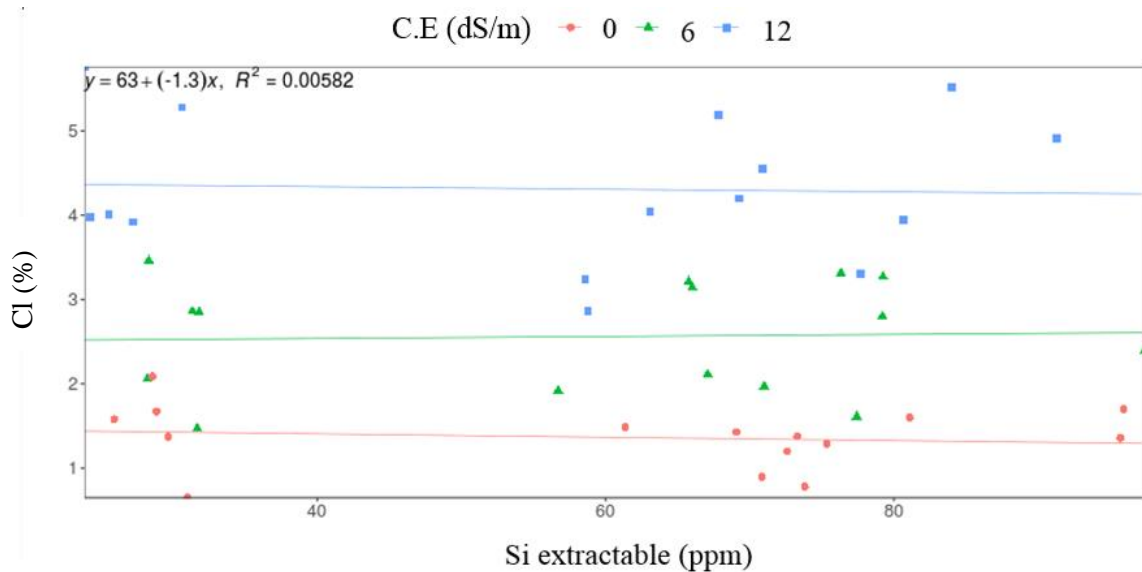


Figura N° 10. Relación entre el contenido de silicio en el sustrato y el contenido de cloro en la materia seca del follaje de espárrago sometido a tres niveles de salinidad

En este caso se encontró una interacción significativa entre el silicio extractable del sustrato y el contenido de cloro de la materia seca del follaje de espárrago con respecto a los tres niveles de salinidad.

4.2. SODIO

No se encontró diferencias significativas para el contenido de sodio en la materia seca del follaje de espárrago con respecto a las dos fuentes de silicio aplicado.

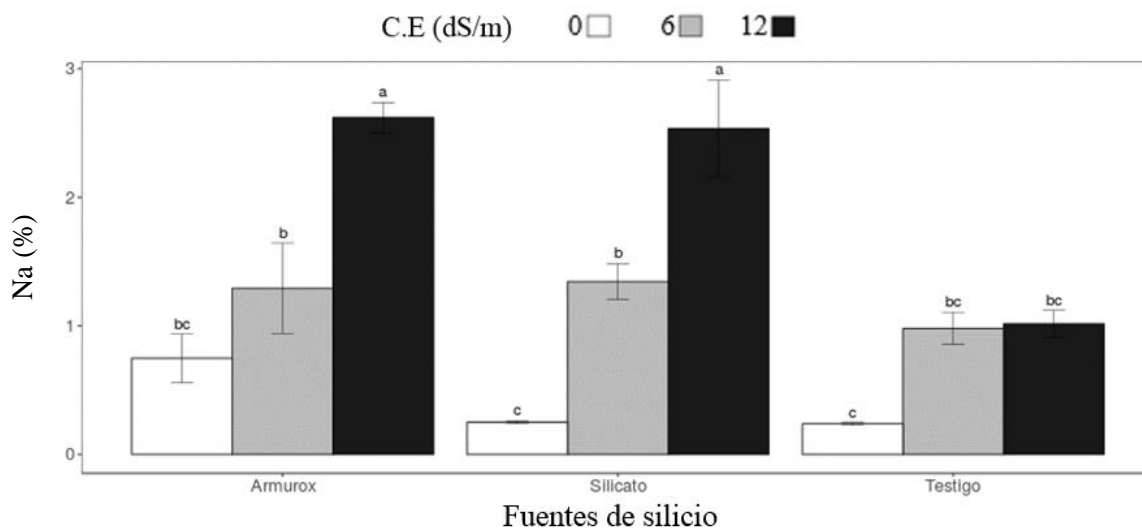


Figura N° 11. Efecto de dos fuentes de silicio y tres niveles de salinidad sobre el contenido de sodio en la materia seca del follaje de espárrago

Sin embargo, si hubo un efecto significativo en el contenido de sodio en la materia seca del follaje de espárrago entre las fuentes de silicio y el testigo.

Tabla N° 10. Comparación entre fuentes y niveles de salinidad respecto al contenido de sodio en la materia seca del follaje de espárrago.

Fuentes	Nivel de salinidad (dS/m)	Sodio (%)
Testigo	0	0.24 c
	6	0.98 bc
	12	1.02 bc
Silicato	0	0.25 c
	6	1.34 b
	12	2.53 a
Armurox	0	0.75 bc
	6	1.29 b
	12	2.62 a

Los valores dentro de una columna seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes ($P > 0.05$), según la prueba de comparación de medias HSD de Tukey.

En este caso se observó que existen diferencias significativas para la interacción de las fuentes de silicio y los tres niveles de salinidad, pero no se encontró una diferencia significativa entre la fuente silicato y Armurox® como se mencionó en la Figura N° 11. En conclusión las plantas a las que se le suministró silicio, tienen una mayor concentración de sodio en el follaje comparándolas con el testigo, por lo que las fuentes tuvieron un efecto inverso al tratar de mermar la concentración del sodio en el follaje.

Hay una alta diferencia significativa entre los niveles de salinidad encontrándose valores altos en 12 dS/m y menores en 0 dS/m, para la concentración de sodio en el follaje del espárrago.

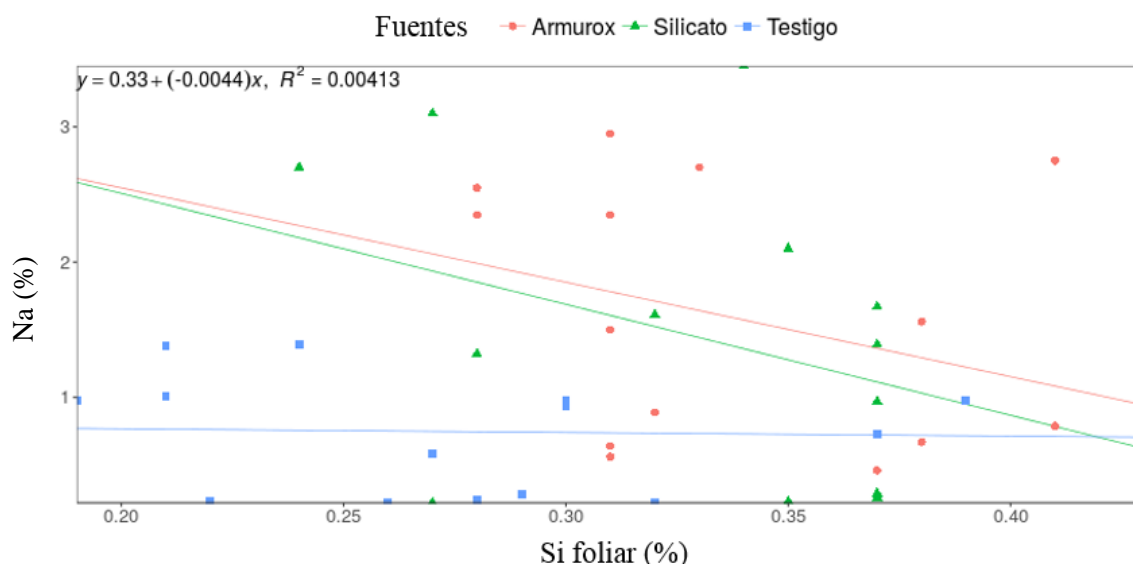


Figura N° 12. Relación entre el contenido de silicio y sodio en la materia seca del follaje del espárrago sometido a tres fuentes de silicio

Aunque la Figura N° 12 se notó que las fuentes silicato y Armurox tienen una pendiente negativa con lo cual una mayor concentración de silicio foliar nos daría una menor concentración de sodio foliar, sin embargo no muestran una diferencia significativa entre ellas, ni tampoco los efectos del sodio podrían ser explicados por la concentración de silicio foliar

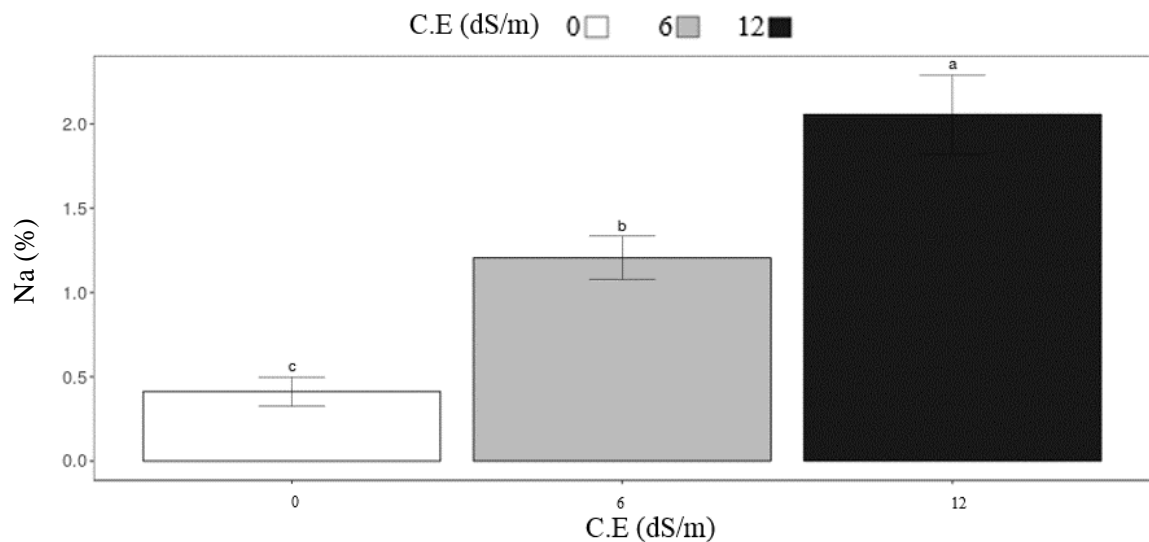


Figura N° 13. Efecto de tres niveles de salinidad sobre el contenido de sodio en la materia seca del follaje de espárrago

Se notó una diferencia significativa para la concentración de sodio foliar frente a los niveles de salinidad, siendo mayor a una conductividad de 12 dS/m y el menor a 0 dS/m. Con lo cual se puede concluir que mientras a mayor estrés salino este sometida la planta, mayor será la concentración de sodio foliar.

4.3. PESO SECO

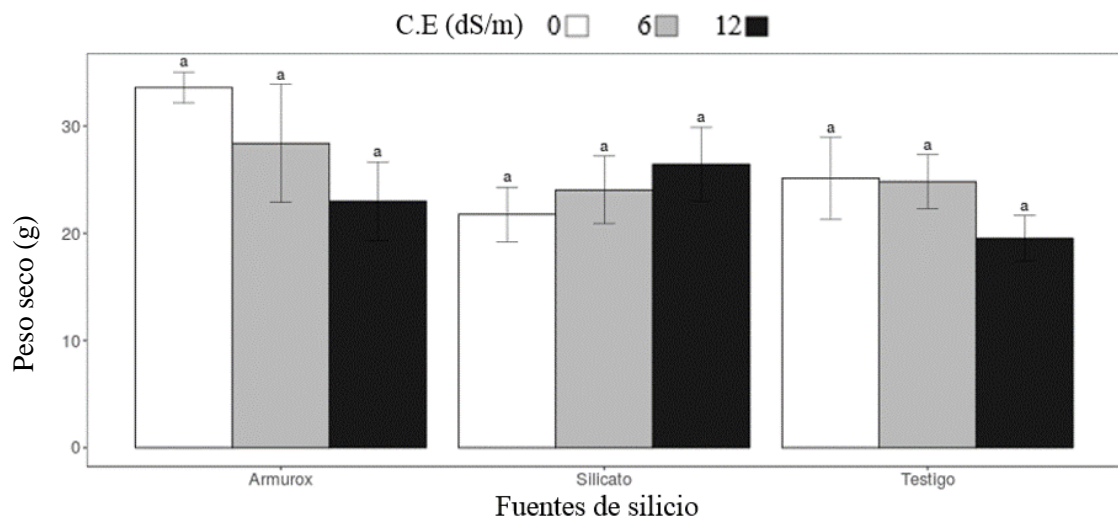


Figura N° 14. Efecto de dos fuentes de silicio y tres niveles de salinidad sobre peso seco del follaje de espárrago

No se encontraron diferencias significativas en la producción de materia seca del follaje de espárrago para las dos fuentes de silicio aplicados y para los tres niveles de salinidad sometidos. Por lo cual pese a la alta salinidad que se sometió las plantas de espárrago no mostraron una baja producción de materia seca respecto al testigo sin sales, por ende no

mostró un estrés salino, o una pérdida significativa de materia seca en el follaje del espárrago por causa de las sales.

4.4. SILICIO

En la Figura N° 15 no se encontró una diferencia significativa para la interacción de dos fuentes de silicio y tres niveles de salinidad con respecto al contenido de silicio en el follaje del espárrago.

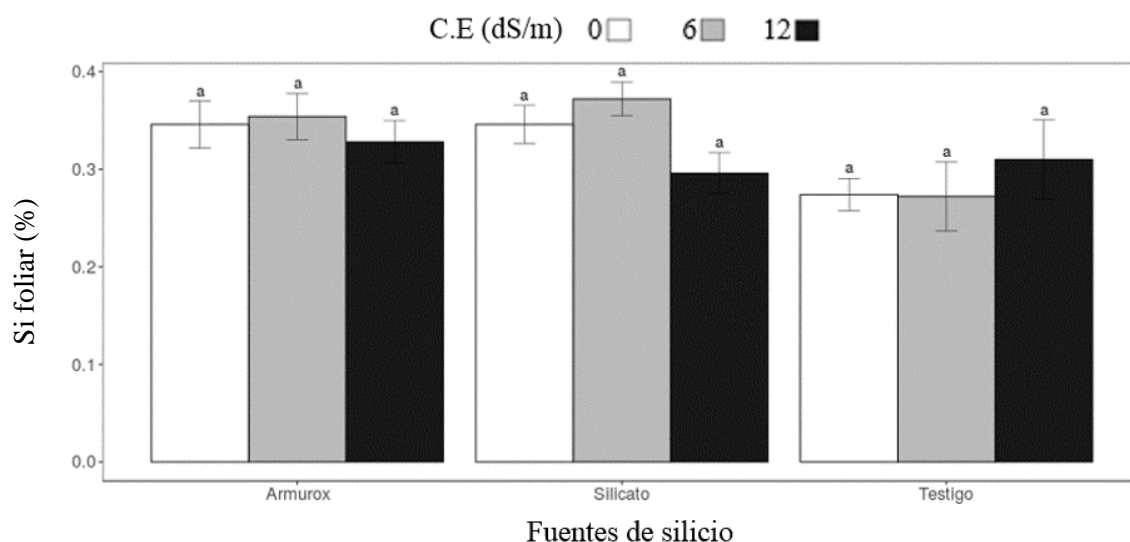


Figura N° 15. Efecto de las fuentes aplicadas y la salinidad sobre el contenido de silicio en la materia seca del follaje de espárrago

Para el contenido de silicio en el follaje de espárrago no se encontraron diferencias significativas en las fuentes silicato y Armurox® ni en los niveles de salinidad, pero sí hay diferencias significativas para el testigo y esto se sobre entiende porque no se le suministró ninguna fuente de silicio. Se pudo concluir que ambas fuentes proveen la misma cantidad de silicio no encontrándose diferencias significativas.

En la Tabla N° 11 se puede observar a más detalle la diferencia significativa y los valores del contenido de silicio en la materia seca del follaje de espárrago con respecto a las fuentes, teniendo al testigo con el menor valor debido a que no se aplicó silicio de ninguna forma.

Tabla N° 11. Comparación entre fuentes respecto al contenido de silicio en la materia seca del follaje de espárrago

Fuentes	Silicio (%)	sg
Testigo	0.29	b
Silicato	0.34	a
Armurox	0.34	a

Los valores dentro de una columna seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes ($P > 0.05$), según la prueba de comparación de medias HSD de Tukey.

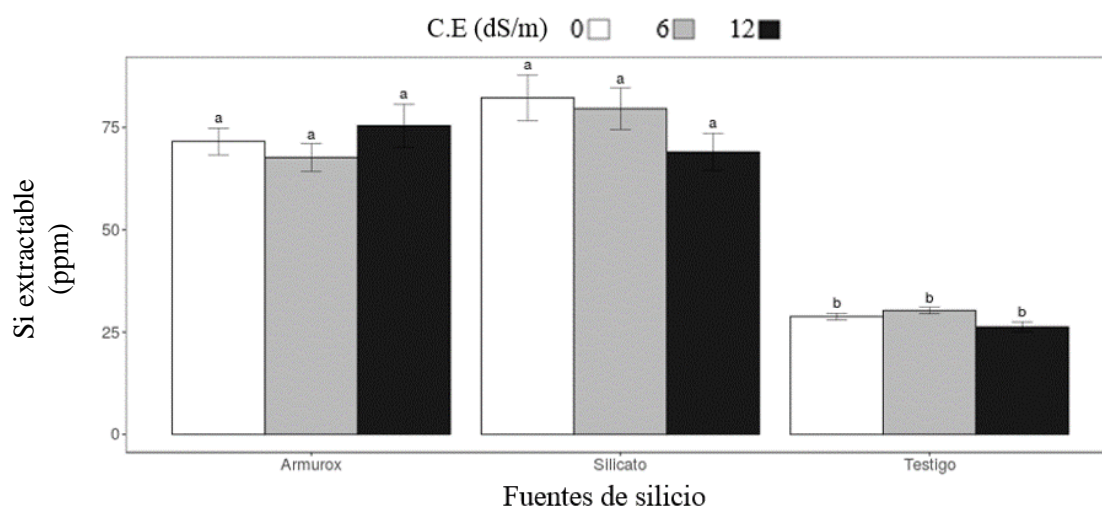


Figura N° 16. Efecto de dos fuentes de silicio y tres niveles de salinidad sobre el silicio extractable presente en el sustrato

Se pudo observar que para el caso del silicio extractable se encuentra una diferencia significativa entre las fuentes y el testigo y esto se entiende porque al testigo no se le suministro silicio por ende al realizar el análisis los valores resultantes son menores. Sin embargo los valores encontrados para las fuentes silicato y Armurox® no muestran diferencias significativas entre sí, por lo que el efecto sería igual para una aplicación con cualquiera de las fuentes con respecto silicio extractable.

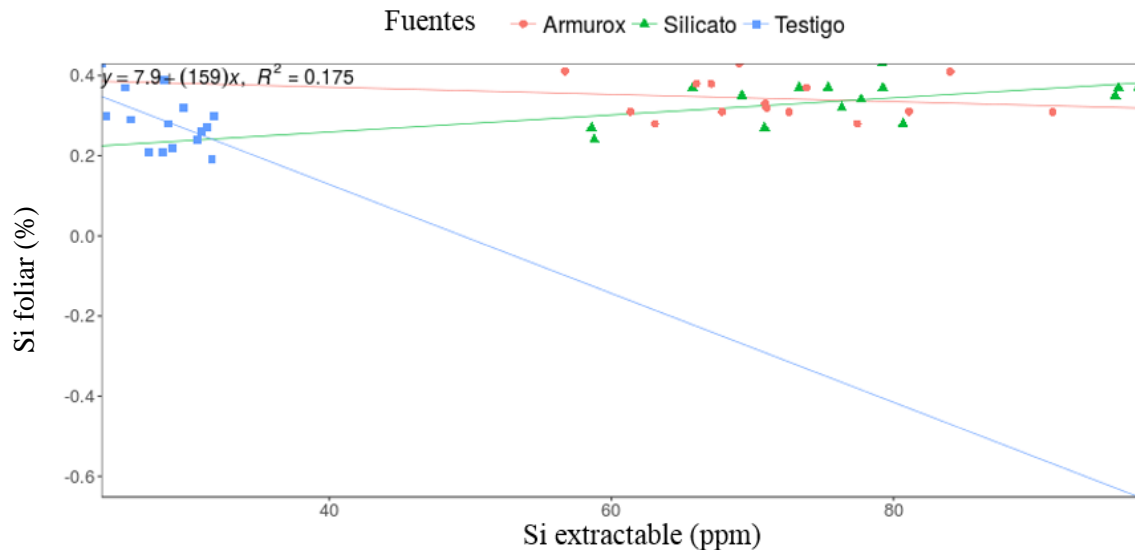


Figura N° 17. Relación entre el contenido de silicio extractable del sustrato y silicio en la materia seca del follaje de espárrago sometido a tres fuentes de silicio.

Según lo descrito anteriormente no existe una diferencia significativa en la concentración de silicio extractable entre fuentes, pero si una diferencia entra el silicio extractable de las fuentes y el testigo, y se observa una marcada pendiente en la Figura N° 17 para el testigo y esto se entiende porque no se le suministro silicio de ninguna forma. También se nota que el silicato tiene una mayor pendiente pudiéndose entender como una mayor disponibilidad de silicio extractable que será aprovechada por la planta, aunque no se tenga un efecto significativo.

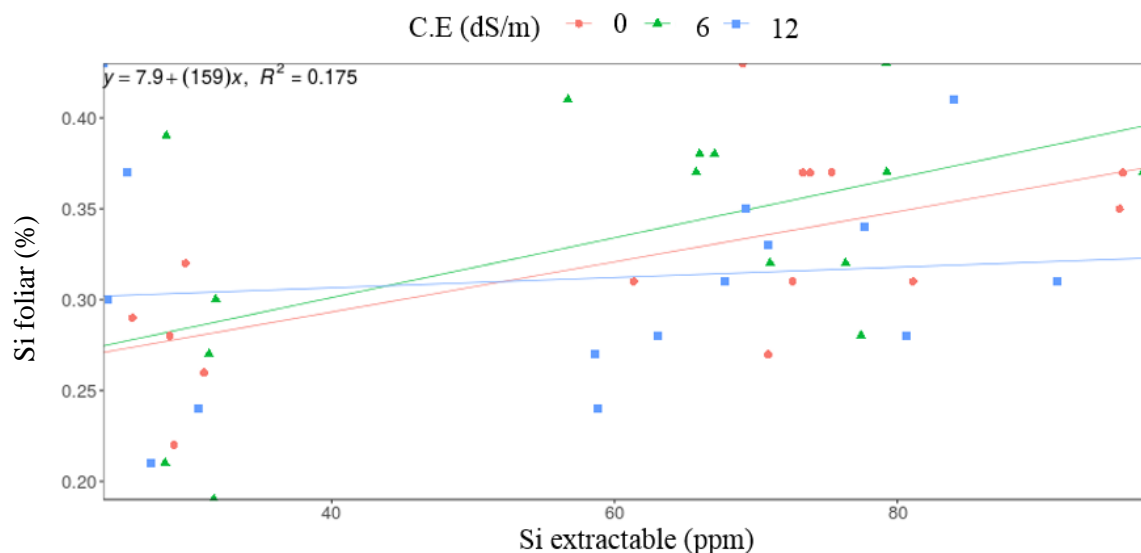


Figura N° 18. Relación entre el contenido de silicio foliar de la materia seca del follaje de espárrago y el silicio extractable del sustrato sometido a tres niveles de salinidad.

Según la gráfica condiciones de mayor salinidad disminuyó la relación de silicio foliar con respecto al silicio extractable, aunque no se encuentren diferencias significativas entre las salinidades y la relación de silicio.

Tabla N° 12. Fertilización y cantidades empleadas por unidad experimental y PPM

Fertilizante	N	P₂O₅	K₂O	CaO	MgO	g/UE	ppm
	(%)						
Nitrato de amonio	31.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.00	250
Fosfato monoamónico	12.0	61.0	0.0	0.0	0.0	1.12	140
Nitrato de potasio	13.5	0.0	45.0	0.0	0.0	2.24	280
Nitrato de calcio	15.5	0.0	0.0	26.5	0.0	0.40	50
Sulfato de magnesio	0.0	0.0	0.0	0.0	16.0	0.40	50

V. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados experimentales se puede obtener las siguientes conclusiones:

- Los niveles de salinidad aplicados en el presente trabajo no afectaron la producción de materia seca por el follaje de las plantas de espárrago, indicando una alta tolerancia del cultivo a la salinidad.
- La aplicación de silicio no afectó el contenido de cloro en la materia seca del follaje del espárrago.
- La aplicación de silicio incrementó significativamente el nivel de sodio en la hoja, no resultando un efecto mitigante para las condiciones en las cuales se desarrolló el ensayo.
- El contenido de sodio y cloro incrementaron proporcionalmente a la cantidad de sal aplicada pero no afectaron la producción de materia seca por el follaje de las plantas de espárrago.
- No se encontró diferencias entre las fuentes de silicio aplicadas en el ensayo.

VI. RECOMENDACIONES

Realizar otros ensayos sometiendo la planta de espárrago a distintos niveles de salinidad donde podría mostrar diferencias significativas para los fertilizantes suministrados.

Trabajar con distintas especies vegetales, comparando cultivos tolerantes, moderadamente tolerantes y sensibles a la salinidad.

Evaluar los efectos de los fertilizantes y la salinización por un tiempo mayor a dos campañas.

Bajo las condiciones que se realizó el ensayo, no se encontró diferencias en el uso de los fertilizantes puesto que no muestra una mejora de los efectos dañinos causados por el estrés salino.

Más investigación es necesaria para evaluar el comportamiento del silicio en la planta.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, W. M.; HUGHES, F. M. R. 1990. Irrigation development in desert environments, in A.S Goudie (ed.) *Techniques for Desert Reclamation*, Wiley, Chichester. 135-60

AL-AGHABARY, K.; ZHU, Z.; SHI, Q. H. 2004. Influence of silicon supply on chlorophyll content, chlorophyll fluorescence, and antioxidative enzyme activities in tomato plants under salt stress. *J. Plant Nutr.* 27: 2101-2115.

ASHRAF, M.; RAHMATULLAH, A. M.; AHMED, R.; MUJEEB, F.; SARWAR, A.; ALI, L. 2010. Alleviation of detrimental effects of NaCl by silicon nutrition in salt-sensitive and salt-tolerant genotypes of sugarcane (*Saccharum officinarum L.*). *Plant Soil.* 326: 381–391.

BENAGES, B. 1990. El Espárrago. Ediciones Mundi - Prensa. Madrid, España. 218.

BRADBURY, M.; AHMAD, R.; 1990. The effect of silicon on the growth of *Prosopis juliflora* growing in saline soil. *Plant Soil* 125: 71-74.

DEL POZO, A. L. 1999. Morfología y Funcionamiento de la Planta. En: El Cultivo del Espárrago. Boletín INIA-Chile No. 6. 9-28.

DROST, D. T. 1997. Asparagus. In: H.C. We in (Ed). *The physiology of vegetable Crops.* CAB International. New York, U.S.A. 621-649

ELLIOTT, C. L.; SNYDER, G. H. 1991. Autoclave-Induced Digestion for the Colorimetric Determination of Silicon in Rice Straw. *J. Agric. Food Chem.* 1091(39): 1118-1119

FAGERIA, N. K.; DOS SANTOS, A. B.; COELHO, A. M. 2011. Growth, yield and yield components of lowland rice as influenced by ammonium sulfate and urea fertilization, *J. Plant Nutr.* 34:3, 371-386

GARCÍA-PETILLO, M. 2008. Manejo del riego: uso de instrumentos de medición de agua del suelo y del estado hídrico de los cultivos, presentación de casos de estudio incluso en riego deficitario. Jornadas sobre "Ambiente y Riegos: Modernización y Ambientalidad", La Antigua-Guatemala, Red Riegos, CYTED y AECID.

- GARCILAZO, C. J. M. 2014 Manejo del espárrago en el Perú primer producto de agroexportación. I simposio internacional de la agroexportación y la tecnología agrícola.
- GUARDIOLA, B. J. L.; GARCIA, L. A. 1990. Fisiología vegetal I: Nutrición y transporte. Madrid-España. Síntesis. 440.
- GUNNARSSON, I.; ARNÓRSSON, S. 2000: Amorphous silica solubility and the thermodynamic properties of H₄SiO₄ in the range 0/ to 350/C at Psat. *Geochim. Cosmochim. Ac.*, 64, 2295-2307.
- HE, C. W.; MA, J.; WANG, L. J. 2015. A hemicellulose-bound form of silicon with potential to improve the mechanical properties and regeneration of the cell wall of rice. *New Phytol.* 206:1051–62.
- HE. C. W.; WANG, L. J.; LIU, J.; LIU, X.; LI, X. L.; MA, J.; LIN, Y. J.; XU, F. S. 2013. Evidence for silicon within the cell walls of suspension-cultured rice cells. *New Phytol.* 200:700–9.
- IFA. Nutrient Management Handbook. 2016. París, 09p. Página Web <http://www.fertilizer.org>, también disponible en versión CD.
- JAPON, Q. J. 1986. Cultivo del espárrago para verde. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Hojas divulgadoras. HD. Servicio de Extensión Agraria Corazón de María, Madrid. 17/86(8): 28002.
- LIANG, Y. C. 1998. Effects of Si on leaf ultrastructure, chlorophyll content and photosynthetic activity in barley under salt stress. *Pedosphere* 8: 289–296.
- LIANG, Y. C.; DING, R. X. 2002. Influence of silicon on microdistribution of mineral ions in roots of salt-stressed barley as associated with salt tolerance in plants. *Sci. Agric. China* (Series C) 45, 298-308.
- LIANG, Y. C.; DING, R. X.; LIU, Q. 1999. Effects of silicon on salt tolerance of barley and its mechanism. *Sci. Agric. Sin.* 32(6): 75–83.
- LIANG, Y. C.; NIKOLIC, M.; BÉLANGER, R.; GONG, H.; SONG, A. 2015. Silicon in Agriculture from theory to practice. *Springer*. 123-125.

- LIANG, Y. C.; SHEN, Q. R.; SHEN, Z. G.; MA, T. S. 1996. Effects of silicon on salinity tolerance of two barley cultivars. *J. Plant Nutr.* 19: 173-183.
- LIANG, Y. C.; ZHANG, W. H.; CHEN, Q.; LIU, Y.; DING, R. X. 2006. Effect of exogenous silicon (Si) on H⁺-ATPase activity, phospholipids and fluidity of plasma membrane in leaves of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.). *Environ. Exp. Bot.* 57: 212–219.
- MA, J. F.; TAMAI, K.; YAMAJI, N.; MITANI, N.; KONISHI, S.; KATSUHARA, M.; ISHIGURO, M.; MURATA, Y.; YANO, M. 2006. A silicon transporter in rice. *Nature.* 440:688–91.
- MA, J. F.; TAKAHASHI, E. 1993. Interaction between calcium and silicon in water-cultured rice plants. *Plant Soil.* 148(1). 107
- MALI, M.; AERY, N. C. 2008. Silicon effects on nodule growth, dry-matter production, and mineral nutrition of cowpea (*Vigna unguiculata*). *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 171:835–40.
- MANUAL DE COMPOSTAJE DEL AGRICULTOR Experiencias en América Latina FAO 2013. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura Oficina Regional para América Latina y el Caribe Santiago de Chile.
- MATOH, T.; KAIRUSMEE, P.; TAKAHASHI, E. 1986. Salt-induced damage to rice plants and alleviation effect of silicate. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 32: 295-304.
- MONTT, M. 1987. Manual del cultivo del espárrago: Requerimientos climáticos (en línea). Chile CIREN, No 67. Consultado 15 nov. 2017. Disponible en: <http://bibliotecadigital.ciren.cl/gsdlexterna/collect/bdirenci/index/assoc/HASH0123/1212e0b9.dir/PC06787.pdf>
- NELWAMONDO, A.; DAKORA, F. D. 1999. Silicon promotes nodule formation and nodule function in symbiotic cowpea (*Vigna unguiculata*). *New Phytol.* 142:463–7
- NELWAMONDO, A.; JAFFER, M. A.; DAKORA, F. D. 2001. Subcellular organization of N₂-fixing nodules of cowpea (*Vigna unguiculata*) supplied with silicon. *Protoplasma.* 216:94–100
- PARRA-TERRAZA, S.; BACA, C. G. A.; CARRILLO, G. R.; KOHASHI, S. J.; MARTÍNEZ, G. A.; TREJO, L. C. 2004. Silicio y potencial osmótico de la solución nutritiva

en el crecimiento de pepino. Terra Latinoamericana. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A. C. Chapingo, México. 22(4):467-473

PEREIRA, H. S.; KORNDÖRFER, G. H.; VIDAL, A. A.; CAMARGO, M. S. 2004. Silicon sources for rice crop. *Sci. Agric.* 61(5):522-528.

R CORE TEAM. 2016. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>.

RASOOL, S.; HAMEED, A.; AZOOZ, M. M.; MUNEEB-U-REHMAN, S. T. O.; PARVAIZ, A. P. 2013. Salt stress: causes, types and responses of plants. In: Ahmad P, Azooz MM, Prasad MNV, editors. Ecophysiology and responses of plants under salt stress. New York: *Springer*. 1–24.

RAVEN, J. A. 2003. Cycling silicon—the role of accumulation in plants. *New Phytol.* 158:419–430

RICHMOND K. E.; SUSSMAN M. 2003. Got silicon. The non-essential beneficial plant nutrient. *Curr. Opin. Plant Biol.* 6, 268–272

ROBINSON, F. E.; BERRY, W. L.; SCHERER, D. J.; THOMAS, T. R. 1984. Yield Potential of asparagus irrigated with geothermal and ground water on Imperial East Mesa Desert, California. *Hort. Sci.* 19 (3): 407-408.

ROMÁN, S. 1996. Nutrición del cultivo de espárrago en la costa del Perú. En: Seminario Internacional del Espárrago. Instituto Peruano del Espárrago. Ica, Perú. Cap. IX

ROMERO-ARANDA M. R.; JURADO, O.; CUARTERO, J. 2006. Silicon alleviates the deleterious salt effect on tomato plant growth by improving plant water status. *J. Plant Physiol.* 163:847–855

ROTH, R. L.; GARDNER, B. R. 1989. Asparagus yield response to water and nitrogen. *ASAE* 32 (1): 105 - 112

ROTH, R. L.; GARDNER, B. R. 1990. Asparagus spear size distribution and earliness as affected by water and nitrogen applications. *Trans. ASAE* 33 (2): 480 - 486.

SAN AGUSTÍN, M. J. L. 1989. Fertilización del Espárrago. II Jornadas Técnicas del Espárrago. Agrícola Vergel-Pamplona. 227-249.

SÁNCHEZ, J. 1998. Fertirrigación del Cultivo del Espárrago. Instituto Peruano del Espárrago. 24 p.

SÁNCHEZ, J. 2005. Nutrición y fertilización en el cultivo de espárrago. Conferencia dictada en el Módulo de Espárrago y Alcachofa. UNALM, Lima-Perú.

SONG, Z.; LIU, H.; LI, B.; YANG, X. 2013. The production of phytolith-occluded carbon in China's forests: implications to biogeochemical carbon sequestration. *Glob. Change Biol.* 19:2907–15.

SONG, Z.; LIU, H.; SI, Y.; YIN, Y. 2012. The production of phytoliths in China's grasslands: implications to the biogeochemical sequestration of atmospheric CO₂. *Glob. Change Biol.* 18:3647–53.

STERRETT, S. B.; ROSS, B. B.; SAVEGE, J. R. 1990. Establishment and yield of asparagus as influenced by planting and irrigation method. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 1 15: 29-33.

The WEHAB Working Group, 2002. Un marco para la acción sobre la agricultura (New York: United Nations)

TUNA, A. L.; KAYA, C.; HIGGS, D.; MURILLO-AMADOR, B.; AYDEMIR, S.; GIRGIN, A. R. 2008. Silicon improves salinity tolerance in wheat plants. *Environ. Exp. Bot.* 62: 10–6.

VEGA, R. R. 2013. Manejo integrado y uso de semilla certificada F1 en el cultivo de espárrago. Guía técnica Agrobanco Huarmey- Anchas. Perú.

YEO, A. R.; FLOWERS, S. A.; RAO, G.; WELFARE, K.; SENANAYAKE, N.; FLOWERS, T. J. 1999. Silicon reduces sodium uptake in rice (*Oryza sativa* L.) in saline conditions and this is accounted for by a reduction in the transpirational bypass flow. *Plant Cell Environ.* 22: 559–565.

YIN, L. N.; WANG, S. W.; LI, J. Y.; TANAKA, K.; OKA, M. 2013. Application of silicon improves salt tolerance through ameliorating osmotic and ionic stresses in the seedling of *Sorghum bicolor*. *Acta Physiol. Plant.* 35: 3099–3107.

ZASOSKI, R. J.; BURAU, R. G. 1977. A rapid nitric-perchloric acid digestion method for multi-element tissue analysis. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 8: 425-436.

ZHU, Y. X.; GONG, H. J. 2014. Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants. *Agron. Sustain. Dev.* 34: 455–72.

ZHU, Z. J.; WEI, G. Q.; LI, J.; QIAN, Q. Q.; YU, J. Q. 2004. Silicon alleviates salt stress and increases antioxidant enzymes activity in leaves of salt-stressed cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Plant Sci.* 167: 527-533.

VIII. ANEXOS

Anexo N° 1. Programa de la primera fertilización de los espárragos por semana

g/45												
macetas/semana	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Nitrato de amonio	7.69	7.69	7.69	7.69	8.15	8.15	8.15	8.15	5.81	5.81	2.41	2.41
Fosfato monoamónico	8.85	8.85	8.85	8.85	2.95	2.95	2.95	2.95	0.00	0.00	0.00	0.00
Nitrato de potasio	0.00	0.00	0.00	0.00	12.00	12.00	12.00	12.00	20.00	20.00	20.00	20.00
Nitrato de calcio	6.79	6.79	6.79	6.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.79	6.79
Sulfato de magnesio	0.00	0.00	0.00	0.00	11.25	11.25	11.25	11.25	11.25	11.25	0.00	0.00

Anexo N° 2. Programa de la segunda fertilización de los espárragos por semana

gr/45												
macetas/semana	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Nitrato de amonio	4.84	4.84	4.84	4.84	4.90	4.90	4.90	4.90	3.15	3.15	0.88	0.88
Fosfato monoamónico	6.64	6.64	6.64	6.64	2.21	2.21	2.21	2.21	0.00	0.00	0.00	0.00
Nitrato de potasio	0.00	0.00	0.00	0.00	9.00	9.00	9.00	9.00	15.00	15.00	15.00	15.00
Nitrato de calcio	4.53	4.53	4.53	4.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.53	4.53
Sulfato de magnesio	0.00	0.00	0.00	0.00	7.50	7.50	7.50	7.50	7.50	7.50	0.00	0.00

Anexo N° 3. Resultados totales de los parámetros analizados

		Rep.	% N	% Ca	% K	% Na	% P	% Cl	Si-F %	Si-S PPM	PESO SECO
Silicato de potasio con acetato con acetato de calcio	0 dS/m	R1	1.04	0.10	0.62	1.51	0.26	1.29	0.37	75.36	28.30
		R2	1.15	0.11	1.18	1.22	0.25	1.38	0.37	73.31	27.28
		R3	1.06	0.09	1.13	1.02	0.22	0.90	0.27	70.86	18.98
		R4	0.9	0.09	1.61	1.54	0.29	1.70	0.37	95.95	18.66
		R5	0.9	0.11	1.62	1.79	0.23	1.36	0.35	95.72	15.61
	6 dS/m	R1	0.81	0.07	1.37	1.27	0.97	3.21	0.37	65.76	18.92
		R2	0.84	0.21	1.93	0.92	1.39	3.27	0.37	79.25	32.41
		R3	0.98	0.13	3.01	0.96	1.61	3.31	0.32	76.33	31.08
		R4	1.46	0.16	0.59	0.76	1.67	2.39	0.37	97.38	19.12
		R5	0.81	0.13	0.97	1.47	1.08	2.80	0.43	79.21	18.66
	12 dS/m	R1	0.98	0.16	0.39	0.51	3.45	3.30	0.34	77.70	34.30
		R2	1.26	0.16	0.62	0.73	2.70	2.86	0.24	58.78	27.47
		R3	0.84	0.08	0.95	1.51	2.10	4.20	0.35	69.25	15.09
		R4	0.92	0.09	1.29	0.99	1.32	3.95	0.28	80.67	23.00
		R5	1.09	0.15	0.30	0.63	3.10	3.24	0.27	58.59	32.31
Armurox	0 dS/m	R1	0.9	0.14	1.18	1.37	0.46	0.78	0.37	73.83	32.34
		R2	1.01	0.13	1.18	1.51	0.58	1.43	0.43	69.07	35.30
		R3	1.04	0.10	0.82	1.63	0.64	1.49	0.31	61.36	34.86
		R4	1.12	0.11	1.16	0.99	1.50	1.60	0.31	81.11	28.62
		R5	0.87	0.13	1.05	1.00	0.56	1.20	0.31	72.59	36.86
	6 dS/m	R1	1.12	0.10	1.53	1.56	0.79	1.92	0.41	56.71	34.98
		R2	0.78	0.06	1.50	1.63	1.56	3.14	0.38	66.02	22.04
		R3	0.78	0.11	1.23	0.98	0.89	1.97	0.32	71.00	23.56
		R4	0.98	0.20	0.50	0.39	2.55	1.61	0.28	77.43	46.32
		R5	1.06	0.13	2.06	1.28	0.67	2.11	0.38	67.08	15.03
	12 dS/m	R1	0.73	0.07	0.47	1.23	2.70	4.55	0.33	70.90	12.94
		R2	0.73	0.10	1.83	1.34	2.35	4.04	0.28	63.08	28.23
		R3	0.76	0.05	1.09	0.88	2.35	5.19	0.31	67.84	18.97
		R4	0.87	0.09	1.18	1.15	2.75	5.52	0.41	84.03	20.89
		R5	0.7	0.13	1.34	0.88	2.95	4.91	0.31	91.28	33.93
Testigo	0 dS/m	R1	0.95	0.08	1.14	0.94	0.28	1.58	0.29	25.91	34.78
		R2	1.12	0.12	0.76	1.21	0.22	1.37	0.32	29.66	31.21
		R3	0.76	0.11	1.53	1.28	0.23	1.67	0.22	28.85	23.43
		R4	0.84	0.21	2.29	0.98	0.22	0.65	0.26	30.98	12.74
		R5	0.98	0.18	1.10	0.51	0.24	2.09	0.28	28.56	23.54
	6 dS/m	R1	0.48	0.18	0.22	1.18	0.98	1.47	0.19	31.68	26.21
		R2	0.76	0.06	1.34	1.63	0.58	2.86	0.27	31.33	27.00
		R3	0.9	0.17	0.77	0.14	0.98	2.85	0.30	31.80	24.00
		R4	1.06	0.18	1.50	0.55	1.38	2.06	0.21	28.22	31.00
		R5	0.84	0.06	0.80	1.82	0.98	3.46	0.39	28.31	15.83
	12 dS/m	R1	1.09	0.08	0.89	1.45	0.93	3.98	0.30	24.21	16.56
		R2	0.7	0.06	0.87	1.29	0.73	4.01	0.37	25.53	25.23
		R3	0.59	0.10	1.43	0.98	1.39	5.28	0.24	30.61	24.14
		R4	0.92	0.09	1.06	2.16	1.02	5.76	0.43	23.85	16.50
		R5	1.29	0.15	1.36	0.86	1.01	3.92	0.21	27.18	15.21

Anexo N° 4. Comparación entre fuentes y niveles de salinidad respecto al peso seco del follaje de espárrago

Fuentes	CE (dS/m)	Peso seco (g)
Testigo	0	25.14a
	6	24.81a
	12	19.53a
Silicato	0	21.77a
	6	26.43a
	12	24.04a
Armurox	0	33.6a
	6	28.39a
	12	22.99a

Los valores dentro de una columna seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes ($P > 0.05$), según la prueba de comparación de medias HSD de Tukey.

Anexo N° 5. Comparación entre fuentes y niveles de salinidad respecto al silicio extractable en el sustrato.

Fuentes	CE (dS/m)	Silicio (ppm)
Armurox	0	71.59a
	12	75.43a
	6	67.65a
Silicato	0	82.24a
	12	69.00a
	6	79.59a
Testigo	0	28.79b
	12	26.28b
	6	30.27b

Los valores dentro de una columna seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes ($P > 0.05$), según la prueba de comparación de medias HSD de Tukey.