

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE AGRONOMÍA



**“EL MOLIBDENO SOBRE EL DESEMPEÑO AGRONÓMICO
DE LOS CULTIVOS”**

**TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL
PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERA AGRÓNOMA**

KATHERINE MELISSA QUINDE MONTERO

LIMA – PERÚ

2023

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

EL MOLIBDENO SOBRE EL DESEMPEÑO AGRONÓMICO DE LOS CULTIVOS

INFORME DE ORIGINALIDAD

5%

INDICE DE SIMILITUD

5%

FUENTES DE INTERNET

0%

PUBLICACIONES

0%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

www.ancefn.org.ar

Fuente de Internet

4%

2

www.phloem.cl

Fuente de Internet

1%

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 1%

Excluir bibliografía

Activo

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

**“EL MOLIBDENO SOBRE EL DESEMPEÑO AGRONÓMICO
DE LOS CULTIVOS”**

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

PARA OPTAR EL TÍTULO DE

INGENIERA AGRÓNOMA

Katherine Melissa Quinde Montero

Sustentado y aprobado ante el siguiente jurado:

Dr. Oscar Oswaldo Loli Figueroa
PRESIDENTE

Dr. Juan Waldir Mendoza Cortez
ASESOR

Ing.Mg.Sc. Luis Rodrigo Tomassini Vidal
MIEMBRO

Ing.Mg.Sc. Julio César Nazario Ríos
MIEMBRO

LIMA – PERÚ

2023

DEDICATORIA

A mis padres, cuyo amor incondicional me ha sostenido en cada paso.

A Vanessa, hermana, compañera y cómplice. Cuya determinación para alcanzar metas siempre me inspira y me empuja a lograr mis sueños.

A Lucero, quien brilla con paciencia y encanto en cada momento oscuro de mi vida.

A Ceci, fuente de estímulo, ánimo, fuerza y aplomo. Cuya generosidad y consejos me hacen una mejor persona y una mejor profesional.

A mis mejores amigas, que sin importar la distancia ni el tiempo son refugio que fortalece el alma.

A mis mentores, quienes han estado y permanecen a mi lado con su presencia y consejos en cada paso de mi crecimiento profesional.

AGRADECIMIENTOS

A la UNALM, a la Facultad de Agronomía y a los docentes que se dedican a la noble labor de impartir sus conocimientos.

A mi Asesor Dr. Juan Mendoza, por su apoyo incondicional y guía paciente en cada paso del desarrollo de este trabajo.

A mi jurado de sustentación: Dr. Oscar Loli Figueroa, Ing. Mg.Sc. Luis Tomassini Vidal e Ing. Mg.Sc. Julio Nazario Ríos cuyos comentarios y observaciones me dieron la oportunidad de mejorar.

A las empresas Quiagral y Finka: Ing. Alejandro Chau e Ing. Paola Claros, que siempre dispuestos a la investigación y mejora facilitaron los recursos y la información para el desarrollo de los ensayos descritos.

A la corporación FRUCHINCHA y a los encargados durante las fechas de ejecución: Ing. Juan Antonio Delpero e Ing. Elsa Huamán quienes acompañaron la formulación de los protocolos y la supervisión de los procedimientos efectuados en cítricos.

A Teresa Burga y Marlene Gave, que siempre tienen disposición y paciencia para facilitarnos la información que requerimos estudiantes y egresados.

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Problemática:	1
1.2 Objetivos:.....	3
1.2.1 Objetivo general	3
1.2.2 Objetivos específicos	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1 Generalidades del molibdeno	4
2.2 Características del molibdeno.....	7
2.3 El molibdeno en la planta	10
2.3.1 Fijación biológica de nitrógeno y el complejo enzimático nitrogenasa	13
2.3.2 Nitrato reductasa.....	15
2.3.3 Xantina oxidasa/deshidrogenasa.....	18
2.3.4 Sulfito oxidasa	19
2.3.5 Aldehído oxidasa	20
2.3.6 El molibdeno y el estrés.....	21
2.4 Importancia del molibdeno y síntomas de carencia.....	23
2.5 Fuentes de Molibdeno	27
III. DESARROLLO DE LA EXPERIENCIA PROFESIONAL	29
3.1 Molibdeno en maíz (<i>Zea mays</i>): efecto en el metabolismo de fuentes nitrogenadas	29
3.2 Molibdeno en leguminosas-holantao (<i>Pisum sativum</i> subsp. <i>arvense</i>): efecto en las primeras etapas de desarrollo de plantines	31
3.3 Molibdeno en espárragos (<i>Asparagus officinalis</i> L.): aporte en la traslocación.....	32
3.4 Molibdeno en cítricos (<i>Citrus reticulata</i> var. <i>Murcott</i>): Concentración de solutos en la cosecha, toma de color y grados Brix	33

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
4.1 Resultados en Maíz:.....	36
4.2. Resultados en Holantao:	37
4.3 Resultados en espárrago	42
4.4 Resultados en cítricos	48
V. CONCLUSIONES	53
VI. RECOMENDACIONES	53
VI. BIBLIOGRAFÍA	55
VII. ANEXO	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Enzimas en las que participa el molibdeno y sus respectivas funciones.....	12
Tabla 2. Fijación media de nitrógeno por las leguminosas	13
Tabla 3. Descubrimiento de la esencialidad de los micronutrientes en plantas.	24
Tabla 4. Síntomas de deficiencia de molibdeno en algunos cultivos	26
Tabla 5. Fuentes de molibdeno y su concentración.....	27
Tabla 6. Rendimientos de maíz amarillo duro obtenidos a partir de la comparación de dos fuentes nitrogenadas en interacción con cuatro dosis de molibdeno foliar	36
Tabla 7. Peso fresco de plantines obtenidos a partir de la comparación del testigo y el tratamiento con la aplicación de molibdeno vía foliar	39
Tabla 8. Promedio de nódulos en 100 g de peso fresco de raíz a partir de la comparación del testigo y el tratamiento con la aplicación de molibdeno vía foliar.....	40
Tabla 9. Porcentaje de nódulos activos (coloración rojiza) en 200 nódulos evaluados al azar a partir de la comparación del testigo y el tratamiento con la aplicación de molibdeno vía foliar	41
Tabla 10. Resultados del rendimiento a la cosecha obtenidos a partir de las parcelas en evaluación.....	43
Tabla 11. Promedio diario del calibre (grosor) de acuerdo a los tratamientos evaluados.....	45
Tabla 12. Promedio diario del tamaño (longitud) de acuerdo a los tratamientos evaluados...	45
Tabla 13. Promedio diario del peso de 10 turiones equivalentes en calibre y tamaño de acuerdo a los tratamientos evaluados	47
Tabla 14. Evolución semanal de los grados Brix (gramos de sacarosa en 100 gramos de solución) de acuerdo a los tratamientos evaluados	49
Tabla 15. Bines y peso de cosecha obtenidos con y sin aplicación de molibdeno a lo largo de las cosechas monitoreadas.....	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Influencia del pH en la disponibilidad de nutrientes en suelos orgánicos	8
Figura 2. Estructura esquemática del cofactor de molibdeno (MoCo).	11
Figura 3. Modelo de la reducción de N ₂ por el molibdeno contenido en la nitrogenasa	15
Figura 4. Modelo estructural de la nitrato reductasa con sus dos subunidades. Cada subunidad contiene tres grupos prostéticos: FAD, heme-Fe y Mo-pterin	17
Figura 5. La tolerancia al estrés oxidativo por el molibdeno ocurre a través de la interacción con el ácido abscísico y el óxido nítrico	23
Figura 6. Detalle fotográfico del desarrollo del cultivo de maíz (<i>Zea mays</i>)	30
Figura 7. Detalle fotográfico de la cosecha y peso del rendimiento	37
Figura 8. Efecto de la aplicación (A) y no aplicación de molibdeno (B) sobre el desarrollo vegetativo de <i>Pisum sativum</i> var. <i>Macrocarpum</i>	38
Figura 9. Efecto de la aplicación (A) y no aplicación (B) de molibdeno sobre el desarrollo radicular de <i>Pisum sativum</i> var. <i>macrocarpum</i>	38
Figura 10. Detalle fotográfico de los momentos de la aplicación de molibdeno (220 g Mo/ha) en la fase fenológica de translocación y del chapodo en espárrago (<i>Asparagus officinalis</i>) ...	33
Figura 11. Dinámica del rendimiento de la cosecha de acuerdo a los tratamientos evaluados	44
Figura 12. Detalle fotográfico de la cosecha y el pesaje	43
Figura 13. Detalle fotográfico de las jabas de donde se tomaron las muestras de turiones al azar para las evaluaciones respectivas	44
Figura 14. Detalle fotográfico de los turiones semejantes en calibre y tamaño para la respectiva evaluación de los tratamientos.	46
Figura 15. Detalle fotográfico de comparación específica de peso de turiones (A, B y C)....	48
Figura 16. Evolución semanal de los grados Brix (gramos de sacarosa en 100 gramos de solución) a partir del inicio de la aplicación de los tratamientos evaluados	50

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. Ficha técnica del producto foliar a base de molibdeno usado en los ensayos del presente trabajo.....63

ANEXO 1. Hoja de Seguridad del producto foliar a base de molibdeno usado en los ensayos del presente trabajo.....66

RESUMEN

Entre los 16 elementos esenciales reconocidos para el crecimiento de las plantas, el molibdeno desempeña un papel crucial en varias enzimas y procesos, como la conversión de nitratos en nitritos y la fijación biológica del nitrógeno. A pesar de su importancia, el molibdeno es escaso tanto en el suelo, lo que dificulta su disponibilidad para los cultivos. En campos de producción de agroexportación su monitoreo es prácticamente inexistente bajo los argumentos que los análisis resultan costosos y que se necesita muy poco para solucionar su deficiencia. En pequeños y medianos agricultores los diagnósticos de deficiencias están basados en síntomas foliares pues carecen de recursos para análisis de laboratorio. Por ello es frecuente que en ambos casos la ausencia de este elemento se confunda con deficiencias de nitrógeno, calcio, magnesio e incluso boro. Esta situación genera aplicaciones erradas con repercusiones negativas tanto en el ámbito fisiológico como en el comercial, lo que afecta el cultivo y la economía de los productores. Se llevaron a cabo ensayos en cuatro cultivos: maíz, holantao, mandarina y espárrago, aplicando molibdeno en momentos clave. En maíz se corroboró un impacto positivo en el crecimiento y rendimiento en los campos fertilizados con Nitratos. En Holantao se incrementó la actividad de los nódulos fijadores de nitrógeno. En mandarina se adelantó la toma de color logrando concentrar el mayor % de frutos en las primeras tres cosechas. En espárrago se incrementó el rendimiento en peso. La aplicación de molibdeno en los ensayos resultó en mejoras significativas en la productividad y calidad de los cultivos, lo que sugiere que adiciones foliares preventivas de molibdeno pueden favorecer satisfactoriamente los cultivos siendo más rentables que el monitoreo del mismo y los impactos negativos de su deficiencia.

Palabras clave: Molibdeno, enzima, cofactor.

ABSTRACT

Between the 16 essential elements recognized for plant growth, molybdenum has a crucial role in several enzymes and processes, such as the conversion of nitrates to nitrites and biological nitrogen fixation. Despite its importance, molybdenum is deficient in soils, making its availability for crops very difficult. In agro-export fields, monitoring molybdenum is unusual due the argument that the analyzes are expensive and a pretty little amount of molybdenum is needed to solve its deficiency. In small and medium-sized farmers, deficiency diagnoses are based on foliar symptoms because the absence resources for laboratory analysis. Therefore, it is common that in both cases the lack of this element is confused with deficiencies of nitrogen, calcium, magnesium and even boron. This situation generates wrong applications with negative repercussions in plants physiology and commercial ranges, which affects the crop and the economy of the producers. In order to find a way to deal with the challenge four crops received Molybdenum as an experiment: corn, beans, mandarin and asparagus, at key moments. In corn, a positive impact on growth and production was confirmed in fields fertilized with Nitrates. In beans, the activity of nitrogen-fixing nodules increased. In mandarin, an advantage in color acquisition allowed the concentration of the highest % of production in the first three harvests. In asparagus, the weight yield increased. The application of molybdenum, in the experience described in the document, resulted in significant improvements in crop productivity and quality, suggesting that preventive foliar additions of molybdenum can successfully help crops being more profitable. Being the method less expensive than the negative impacts of its deficiency and the analyzes necessary to monitor the element.

Keywords: Molybdenum, enzyme, cofactor.

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Problemática:

Las plantas requieren una amplia variedad de elementos esenciales para llevar a cabo una serie de procesos fisiológicos cruciales. Estos elementos se consideran de vital importancia y se dividen en macro y micronutrientes, en función de las cantidades requeridas para el crecimiento de los cultivos.

Con frecuencia, se ha subestimado la importancia del seguimiento de micronutrientes como el molibdeno en los programas de fertilización, ya que se asume que cualquier deficiencia puede corregirse de inmediato una vez que se identifica debido a la baja demanda de estos micronutrientes por parte de los cultivos. Sin embargo, es esencial recordar que, siguiendo la Ley de Liebig, el rendimiento final de los cultivos está directamente relacionado con el elemento presente en menor proporción, convirtiéndose en el factor limitante, especialmente cuando sus niveles caen por debajo de los mínimos requeridos. Además, es importante tener en cuenta que, una vez que se manifiestan síntomas de la carencia de un elemento esencial, la planta requiere un gasto de energía para recuperarse fisiológicamente, lo que puede tener un impacto negativo en los rendimientos.

En la práctica, no siempre resulta económicamente viable ni eficiente llevar a cabo un seguimiento constante mediante análisis de suelo/agua y foliares en los campos de producción. Además, no todos los elementos esenciales se evalúan debido a limitaciones económicas, de tiempo y logísticas. Como resultado, a menudo se depende de la observación de los síntomas visuales de deficiencias para definir aplicaciones complementarias. Es importante destacar que esto puede llevar a que un elemento actúe como limitante, reduciendo el potencial de aumentar los rendimientos antes de que los síntomas de su deficiencia sean visibles.

Por otro lado, una vez que los síntomas de la carencia se vuelven evidentes, la deficiencia suele ser significativa y, en ocasiones, puede resultar confusa. Un ejemplo claro es la similitud de los síntomas entre el molibdeno y el nitrógeno: en términos generales, los síntomas son muy parecidos, y en algunos órganos vegetales de ciertos cultivos, son exactamente los mismos. Esto ocurre porque el molibdeno está involucrado en enzimas y procesos metabólicos del nitrógeno, lo que puede llevar a una aparente deficiencia de nitrógeno cuando, en realidad, se trata de una limitante en su metabolismo debido a la falta de molibdeno.

Esta confusión es común y se refleja en la escasa literatura y desarrollo relacionado con el molibdeno en ciertas condiciones. Pocos agricultores y empresas agroexportadoras están familiarizados con la existencia del molibdeno y su función.

La situación descrita anteriormente tiene un impacto económico significativo, tanto cuando podría haber una mayor producción al considerar y corregir el elemento limitante como cuando se confunden los síntomas de carencia. En este último caso, al aplicar otros elementos en lugar del verdaderamente deficiente, se incurre en costos por aplicaciones incorrectas, además del riesgo de posible intoxicación de la planta por un exceso de un elemento que no necesita, con los consiguientes efectos negativos a nivel fisiológico. Además, continuar invirtiendo a ciegas para identificar la causa de la deficiencia resulta en un gasto innecesario. Dado que las deficiencias suelen manifestarse en momentos críticos, pueden ser altamente perjudiciales para la producción y los rendimientos, especialmente en un contexto de cambio climático que plantea nuevos desafíos adicionales.

Es fundamental llevar a cabo estudios a nivel operativo para comprender el impacto, tanto a nivel fisiológico como económico y comercial, de la aplicación de microelementos como el molibdeno en el desempeño agronómico de los cultivos.

Este trabajo tiene como objetivo proporcionar una revisión de la base teórica sobre el molibdeno, un micronutriente que ha sido escasamente estudiado en nuestra región, y compartir los resultados derivados de su aplicación en varios cultivos. Se detallará el lugar, el momento y la forma en que se llevaron a cabo estas aplicaciones. La información recopilada tiene como propósito demostrar que la aplicación preventiva de molibdeno puede ser una alternativa efectiva, económica y segura, ya que se requieren cantidades mínimas de este micronutriente.

Los resultados obtenidos descritos en las validaciones descritas han demostrado que el molibdeno estimula el metabolismo de los cultivos, promoviendo la actividad de múltiples enzimas y funcionando como un activador. Es relevante destacar que estos resultados positivos están respaldados por la literatura científica y están estrechamente relacionados con el momento de la aplicación, ya que se dirigen a cultivos con necesidades específicas para llevar a cabo procesos metabólicos durante etapas fisiológicas definidas, estudiadas y validadas por investigadores en otros contextos.

1.2 Objetivos:

1.2.1 Objetivo general

Sistematizar y compartir los resultados obtenidos en la experiencia profesional con respecto a la aplicación del molibdeno en diferentes cultivos y momentos.

1.2.2 Objetivos específicos

- Describir y analizar la base teórica de las funciones fisiológicas del molibdeno en los cultivos, sobre la cual se sustentaron las propuestas de los ensayos aplicados.
- Demostrar los efectos de la adición de molibdeno de manera preventiva y dirigida a cultivos, momentos fisiológicos y procesos metabólicos donde es requerido.
- Generar antecedentes para realizar futuras investigaciones científicas con relación al efecto del molibdeno en cultivos de importancia económica.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Generalidades del molibdeno

La mayoría de estudios y fuentes relacionados con la nutrición de las plantas se centran principalmente en la fertilización con nitrógeno debido a su gran importancia por la cantidad requerida. Esto ha llevado a que se preste menos atención a microelementos como el molibdeno, sobre todo si consideramos que, según lo señalado por Graham y Stangoulis (2007), los cultivos solo necesitan una cantidad de 0,1 mg de Mo por cada kilogramo de suelo.

Si bien es cierto que la demanda de Mo suele ser muy reducida, no puede negarse su esencialidad establecida por primera vez en 1938 por D. I. Arnon y P. R. Stout, quienes usaron el tomate como planta de prueba (Fageria *et al.*, 1997; Marschner, 2012).

El molibdeno desempeña un rol fundamental en el contexto de las plantas a través de su participación en las molibdoenzimas (Yu *et al.*, 1999). Se destaca como el único metal, presente en la segunda serie de elementos de transición, que actúa como micronutriente esencial para los seres vivos. A pesar de que existen más de 40 enzimas que requieren molibdeno en los seres vivos (Garner *et al.*, 2001), en las plantas se han identificado solo las siguientes molibdoenzimas: Nitrogenasa, Nitrato-reductasa, Aldehído oxidasa, Xantina oxidasa y Sulfito oxidasa (Schwarz y Mendel, 2006).

El molibdeno es un componente esencial de la enzima nitrogenasa, que posee un rol fundamental en la fijación biológica del nitrógeno, proceso realizado por diversos microorganismos de forma independiente o en simbiosis. Permite que el nitrógeno gaseoso (N_2) se convierta en amonio (NH_4^+) que las plantas utilizan como nutriente. Es importante destacar que este proceso cobra cada vez más relevancia y se hace más necesario, ya que la disponibilidad de nitrógeno suele ser limitada y no puede satisfacerse a nivel mundial mediante la producción de fertilizantes (Azcón-Bieto y Talón en 2008). A nivel global, la fijación biológica de nitrógeno alcanza aproximadamente 75 millones de toneladas al año (Navas, 2000), lo que reviste una gran importancia para mitigar el impacto ambiental de la agricultura.

Las leguminosas son los vegetales involucrados en la mencionada fijación. Tienen una alta demanda de molibdeno debido a su esencialidad en las enzimas nitrogenasa y nitrato reductasa, las cuales desempeñan un papel fundamental en la fijación del nitrógeno. La nitrato reductasa es una enzima que cataliza la conversión de nitrato (NO_3^-) en nitrito (NO_2^-). Al ser fundamental el Mo para el desempeño de ambas enzimas se ha comprobado que su eficiencia se significativamente mejorada por la adición de este elemento (Becking, 1961). Según Marschner (2012), la aplicación de molibdeno puede aumentar el peso seco de los nódulos involucrados en la simbiosis hasta 18 veces. Por lo tanto, mantener una concentración adecuada de molibdeno podría ser determinante para lograr una producción satisfactoria en las leguminosas y reducir la necesidad de agregar fertilizantes nitrogenados.

Por otra parte, el exceso de la aplicación de fertilizantes ricos en nitrógeno redundan en un impacto negativo en la fertilidad del suelo como consecuencia del incremento de sales, su efecto en el pH, entre otros. Asimismo, el aumento del consumo en general de las fuentes de energía (como el petróleo, la electricidad y el gas indispensables para diversas industrias y la población en general), la reducción de su disponibilidad (consecuencia de los recientes conflictos bélicos, el incremento demográfico, entre otros) y su consecuente incremento constante de costos, tienen un impacto negativo sobre la producción de estos fertilizantes, lo que resulta desventajoso a largo plazo. Esto hace que la fijación biológica del nitrógeno sea una alternativa económica y ecológicamente limpia en contraposición a la síntesis química. En este contexto, el molibdeno, como cofactor esencial para la misma, adquiere importancia incluso como un recurso que contribuye de manera positiva a la preservación del medio ambiente.

Por otro lado, la xantina oxidasa, también conocida como xantina deshidrogenasa/hidrogenasa, es una enzima que utiliza el molibdeno como cofactor y juega un papel en la oxidación de compuestos como la hipoxantina y la xantina, convirtiéndolos en ácido úrico. Resulta clave en el metabolismo de las purinas, desempeñando un papel clave en la degradación de bases púricas como la adenina y guanina (Pérez-González *et al.*, 2012).

Además, el molibdeno está vinculado a la enzima aldehído oxidasa ya que le es requerido como cofactor para llevar a cabo el proceso metabólico de oxidar aldehídos y convertirlos en ácidos carboxílicos. En las plantas, esta enzima desempeña un papel clave en la síntesis del ácido abscísico (ABA), como se menciona en el trabajo de Azcón-Bieto y Talón (2008).

Asimismo, el molibdeno es necesario también para los procesos que lleva a cabo la enzima sulfito oxidasa. Esta lo requiere como cofactor para catalizar la conversión del sulfito (SO_3^{2-}) en sulfato (SO_4^{2-}). Su comportamiento en el metabolismo de animales resulta diferente que en las células vegetales (Schwarz y Mendel, 2006; Marschner, 2012).

A pesar que su requerimiento cuantitativo es mínimo, pocas veces se cobra consciencia que su disponibilidad es igual de reducida, pues es el menos abundante de todos los micronutrientes en la corteza terrestre: su rango común en el suelo según Lindsay (1979) es de 0.2 a 5 mg kg^{-1} , y según Swaine (1995), citado por Menger y Kirby (2000), el contenido total en la mayoría de suelos agrícolas fluctúa entre 0.6 y 3.5 ppm, coincidiendo con Cheng Oullete (1973) y Lindsay (1979) en un contenido medio total de 2 ppm y un contenido medio disponible cerca de 0.2 ppm. Dicho nivel se encuentra cerca al punto crítico de 0.1 ppm de Mo en suelos (Kirby y Mengel, 2000), a partir del cual se manifiesta su carencia. La deficiencia de molibdeno es común especialmente en suelos ácidos donde dicho nutriente es adsorbido en los óxidos e hidróxidos hidratados de Fe como MoO_4 .

Se plantea una situación en la que el molibdeno es un nutriente con una disponibilidad notablemente limitada y que generalmente no se tiene en cuenta en los análisis convencionales ni en los planes de fertilización. La decisión de no hacerle seguimiento ni agregarlo a los planes de fertilización suele basarse en la idea de que se necesita en cantidades muy pequeñas y en la suposición teórica de que, en suelos alcalinos y a medida que se incrementa el pH del suelo, su solubilidad aumenta (Azcón-Bieto y Talón, 2018).

Al ser este tipo de suelos predominantes en las zonas y valles costeros (donde se ubican las mayores inversiones en la agroindustria de exportación y producción de consumo masivo interno) se cree que este elemento está ampliamente disponible y no es necesario su adición ni seguimiento.

Es importante destacar que en estos terrenos se ejerce una alta presión de producción al llevarse a cabo agricultura intensiva por décadas, lo que conlleva una extracción constante de nutrientes en general de la solución suelo. A mediano y largo plazo, esto aumenta la probabilidad de que se produzcan deficiencias de micronutrientes que se encuentren en menor proporción y que no sean adicionados como el molibdeno. Esta situación se repite en otros valles agrícolas de Perú, tanto en las regiones de la sierra como en la selva, que enfrentan desafíos más pronunciados en términos de fertilidad físico-química, menor

eficiencia en la producción, limitaciones logísticas, una formación técnica insuficiente de aquellos involucrados en las operaciones agrícolas, entre otros. Por lo tanto, una cultura de prevención de las deficiencias nutricionales mediante la implementación de prácticas de adición foliar de bajo costo resulta ser una opción en relación a micronutrientes esenciales. Además, es necesario llevar a cabo labores de extensión dirigidas a los agricultores para capacitarlos en cuanto a las fuentes de micronutrientes más adecuadas y los momentos oportunos de aplicación, considerando las necesidades de los cultivos y los objetivos fisiológicos que se buscan alcanzar en momentos claves de los ciclos productivos.

2.2 Características del molibdeno

El molibdeno (Mo) se diferencia del hierro (Fe), manganeso (Mn) y cobre (Cu) en el sentido de que se encuentra en las plantas en forma de anión, específicamente como molibdato (MoO_4^{2-}), siendo un elemento de transición presente en soluciones acuosas. Esta formulación corresponde a un estado de oxidación Mo (+6). Sin embargo, también puede encontrarse en formas con estados de oxidación Mo (+5) y Mo (+4) cuando actúa como componente enzimático. En su configuración electrónica Mo (+4), comparte similitudes químicas con el vanadio y, en mayor medida, con el tungsteno.

Es igualmente relevante señalar que numerosas reacciones que requieren la presencia de molibdeno también incluyen la transferencia de un átomo de oxígeno (Baran, 1995). Además, las enzimas que dependen del molibdeno desempeñan un papel esencial no solo en el metabolismo de todos los seres vivos, sino también en los ciclos biogeoquímicos del carbono, nitrógeno y azufre (Stiefel, 2002).

En comparación con otros micronutrientes, el molibdeno se encuentra en las plantas en concentraciones muy bajas, generalmente por debajo de 1 mg por kilogramo de materia seca. En las plantas superiores, varias enzimas contienen molibdeno o dependen de él como cofactores en sus procesos metabólicos. Las dos enzimas más estudiadas son la nitrato reductasa y la nitrogenasa, siendo esta última la que se encuentra presente en las leguminosas que forman nódulos simbióticos y se caracterizan por ser proteínas multicentro de transferencia de electrones (Kirkby y Römheld, 2007).

Solo una pequeña proporción de molibdeno, aproximadamente 4 partes por billón (ppb), se encuentra en la solución del suelo, ya que la mayor parte de este elemento se encuentra inmovilizado en sesquióxidos, minerales primarios y secundarios, arcillas cristalinas o alofano. Se fija en forma de molibdato (MoO_4^{2-}), de manera similar a cómo el fosfato se fija en el suelo.

La inmovilización del molibdeno ocurre a través del proceso de adsorción en el suelo, que generalmente implica un intercambio de ligandos y es altamente específico. El anión molibdato se adhiere de manera firme, y en términos de fuerza de adsorción entre los aniones nutrientes para las plantas, el molibdato ocupa el segundo lugar, justo después del fosfato (Parfitt, 1978). Cabe destacar que esta capacidad de adsorción disminuye a medida que aumenta el pH del suelo. Por lo tanto, el molibdeno se vuelve más disponible y utilizable para las plantas a medida que el suelo tiende a ser más alcalino.

En la Figura 1, se puede apreciar cómo varía la disponibilidad del molibdeno en función del pH en comparación con otros elementos. El molibdeno adsorbido en el suelo puede ser reemplazado por otros aniones. En este contexto, los fosfatos y los iones hidroxilo (OH^-) parecen ser particularmente efectivos como aniones de reemplazo (Parfitt, 1978).

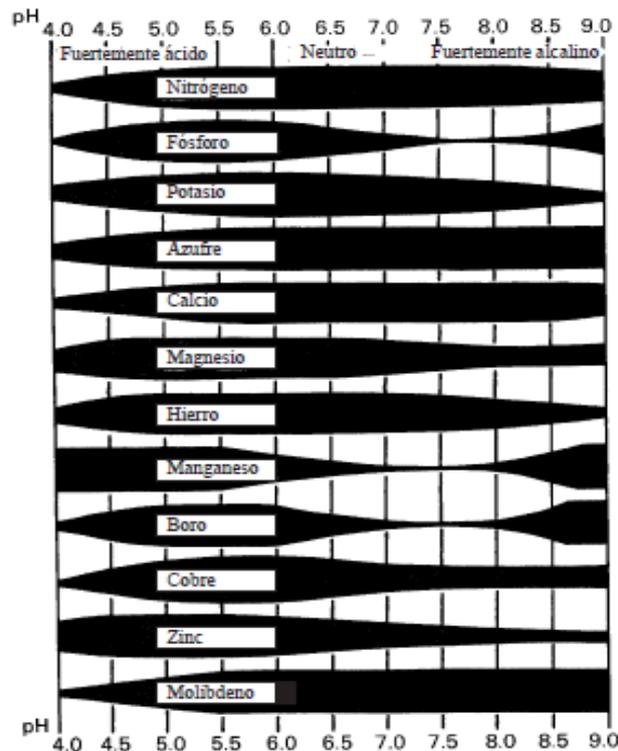


Figura 1. Influencia del pH en la disponibilidad de nutrientes en suelos orgánicos

Fuente: Lucas y Davis (1961); citado por Kirkby y Mengel (2000)

La relación entre la adsorción de molibdeno y el pH tiene implicaciones prácticas, ya que la deficiencia de molibdeno en un suelo rico en molibdeno inmovilizado puede controlarse con frecuencia mediante el encalado. Por lo tanto, a medida que el pH aumenta, el molibdeno se vuelve más disponible debido a que los grupos hidroxilo (OH^-) reemplazan al molibdato (MoO_4^{2-}) en el complejo de intercambio, lo que permite que este elemento esté presente en la solución del suelo y, en consecuencia, esté disponible para la absorción por parte de las raíces de las plantas. Además, los radicales hidroxilo (OH^-) promueven la transformación de las formas de molibdeno, como Mo_2O_5 y MoO_2 , en MoO_4^{2-} , que es una forma disponible para las plantas. Del mismo modo, con un aumento de los iones hidroxilo (OH^-), se inactivan los sesquióxidos de aluminio y hierro que vuelven inaccesible al molibdeno en suelos minerales ácidos, al fijar cantidades significativas de molibdeno en esos medios (Kirkby y Mengel, 2000).

No obstante, es importante destacar que la teoría previamente mencionada relacionada al pH no se aplica necesariamente a todas las situaciones, pues pueden existir otros factores circunstanciales que modifican el medio. Por ejemplo, en suelos con un pH bajo, una fracción del molibdeno del suelo puede encontrarse en forma orgánica. En este sentido Kirkby y Mengel, (2000) informaron que, incluso en suelos ácidos, las plantas pueden absorber niveles adecuados de molibdeno cuando la mineralización de la materia orgánica libera suficiente cantidad de este elemento. Por otro lado, en el extremo opuesto, bajo condiciones alcalinas “en suelos calcáreos con drenaje libre y derivados de serpentinas, puede darse deficiencias absolutas de dicho elemento” (Ocaña, 2016).

La concentración de otros nutrientes también desempeña un papel importante en la disponibilidad del molibdeno. El fósforo (P) y el azufre (S) ejercen influencia en la movilidad y accesibilidad del Mo en los suelos. De acuerdo con Marschner (2012), la disponibilidad del molibdeno en el suelo y su absorción por parte de la planta están vinculadas a aniones inorgánicos divalentes, como el SO_4^{2-} y HPO_4^{2-} . Cuando se aplican altas cantidades de HPO_4^{2-} se incrementa la absorción de este micronutriente por la planta, posiblemente porque este anión reemplaza al MoO_4^{2-} en el complejo de intercambio, de manera similar a como lo hacen el OH^- o el oxalato.

Contrariamente, el SO_4^{2-} por competencia iónica en la superficie de las raíces, disminuye la absorción del molibdeno debido a que los iones compiten al poseer tamaño y carga similar (Nelson y Tisdale, 1970). Asimismo, su presencia favorece la disminución del pH, con lo cual disminuye la disponibilidad de molibdeno.

Concentraciones elevadas de otros nutrientes, como el cobre, zinc, manganeso y níquel, tienen un efecto negativo en la disponibilidad y absorción del molibdeno. En contraste, el magnesio y el cobalto aumentan la absorción del molibdeno por parte de las raíces de las plantas (Kirkby y Mengel, 2000).

El nitrato favorece la absorción del molibdeno, pero las fuentes amoniacales tienen un efecto opuesto. La influencia positiva de la nutrición con nitrato posiblemente esté vinculada a la liberación de iones OH⁻ y al aumento de la solubilidad del molibdeno en el suelo (Havlin *et al.*, 1999).

2.3 El molibdeno en la planta

El molibdeno tiene la capacidad de ser transportado a través del floema, aunque suele desplazarse principalmente a través del xilema en forma de MoO₄²⁻. También puede encontrarse en forma de complejo aminoácido Mo-S o formando parte de complejos con MoO₄²⁻ y azúcares, así como en otros complejos polihidroxidados (Kirkby y Mengel, 2000). En el xilema, la forma iónica (MoO₄²⁻) predomina en mayor medida que los complejos con aminoácidos o azúcares (Marschner, 2012).

El papel del molibdeno como nutriente para las plantas se centra en su capacidad para cambiar su estado de oxidación en el contexto de ciertas enzimas, siendo las más comunes las formas oxidadas +6 y las formas reducidas +5 y +4. Estas enzimas incluyen la nitrogenasa, la nitrato reductasa, la xantina oxidasa/deshidrogenasa y la sulfito reductasa.

Hasta el momento, todas las enzimas que dependen del molibdeno se pueden categorizar en dos grupos distintos, los cuales se diferencian por los dos cofactores de molibdeno que utilizan. Por un lado, encontramos las nitrogenasas, enzimas particulares que emplean un sistema de dos proteínas para romper el fuerte enlace N-N de la molécula de N₂ bajo condiciones normales de presión y temperatura. De esta manera, logran convertir el dinitrógeno en amoníaco (Garner *et al.*, 2001). Por otro lado, las demás molibdoenzimas se conocen como oxotransferasas y hacen uso de un cofactor especial, que se representa en la Figura 2 y comúnmente se denomina MoCo (Baran, 1995). En ocasiones, este cofactor se ilustra con dos grupos “oxo” unidos al molibdeno central (es decir, dos enlaces Mo=O), aunque en los sistemas activos, siempre existe un ligando adicional unido al molibdeno (el

O- en la Figura 2). En las enzimas vegetales, como la nitrato reductasa y la sulfito oxidasa, el átomo O- es reemplazado por un átomo de azufre proveniente de la cisteína. En cambio, en la aldehído oxidasa y la xantina deshidrogenasa, los tres átomos libres conectados al molibdeno incluyen un átomo de oxígeno que está unido por un doble enlace al molibdeno, un átomo de azufre también unido por un doble enlace al metal y un grupo hidroxilo (Garner et al., 2001; citados por Baran, 1995).

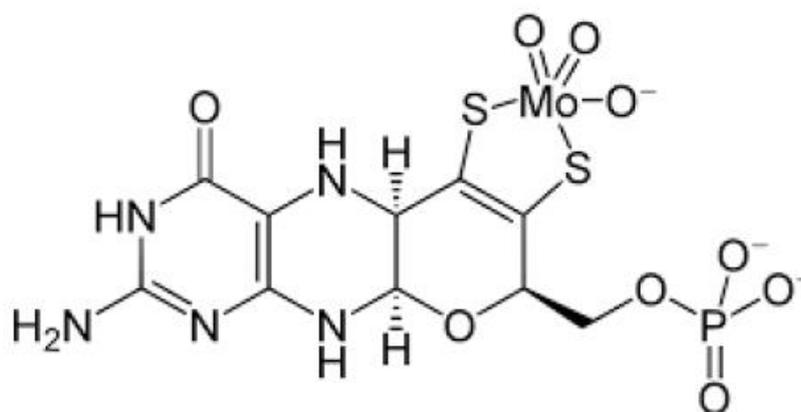


Figura 2. Estructura esquemática del cofactor de molibdeno (MoCo).

Fuente: Baran, E.J. (2021)

El molibdeno cumple un rol estructural y catalítico en estas enzimas y está directamente involucrado en las reacciones redox. Por lo tanto, las funciones del molibdeno están estrechamente relacionadas con el metabolismo del nitrógeno, y la necesidad de molibdeno depende en gran medida del tipo de fuente de nitrógeno disponible. Se ha observado que el molibdeno tiene un efecto beneficioso en el desarrollo y el rendimiento de los cultivos cuando se suministra con fuentes de nitrógeno nítrico, pero no muestra los mismos resultados positivos con fuentes de nitrógeno amoniacal (Marschner, 2012).

En la Tabla 1 se muestran las funciones del molibdeno en el metabolismo a través de diferentes enzimas.

Tabla 1. Enzimas en las que participa el molibdeno y sus respectivas funciones

Enzimas	Funciones
Nitrogenasa	Aceptor de electrones, enlaza al dinitrógeno y libera amonio.
Nitrato reductasa	Reduce el nitrato a nitrito (luego el nitrito reductasa lo reduce a amonio)
Xantina Oxidasa	Metabolismo de las purinas a ureidos, alantoina y ácido úrico.
Sulfito oxidasa	Catalizador de sulfito a sulfato.

Fuente: Adaptado de Marschner (2012)

Es ampliamente reconocido que el molibdeno es un nutriente esencial para el desarrollo saludable y el crecimiento de las plantas. La forma predominante de este nutriente disponible para las plantas es el MoO_4^{2-} , el cual se requiere en cantidades muy pequeñas para formar parte del ya mencionado cofactor MoCo. Este cofactor desempeña un papel crucial en diversos procesos redox esenciales, no limitándose únicamente a sistemas enzimáticos. Además, está implicado en la síntesis del ácido abscísico, lo que influye significativamente en los niveles de esta fitohormona en las células vegetales. Por consiguiente, su presencia está estrechamente relacionada con el equilibrio hídrico, las tasas de transpiración celular y las respuestas a situaciones de estrés (Kaiser *et al.*, 2005).

Las molibdoenzimas presentes en las plantas son proteínas homodiméricas que solo funcionan en su forma de dímero. En su estado de monómero, se vuelven inactivas, y su capacidad de dimerización está condicionada a la presencia del MoCo. Estas enzimas también involucran cadenas de transporte de electrones, las cuales están asociadas a diversos grupos prostéticos (como FAD, hemo, cúmulos Fe/S y MoCo), generalmente unidos a dominios separados dentro de la enzima. Estas enzimas de molibdeno catalizan reacciones que implican la transferencia de dos electrones hacia o desde el sustrato, y esta reacción va acompañada de la transferencia de un átomo de oxígeno, que puede estar derivado o incorporado en una molécula de H_2O . Durante esta reacción, el estado de oxidación del metal se modifica desde Mo(IV) a Mo(VI) (Schwarz y Mendel, 2006).

2.3.1 Fijación biológica de nitrógeno y el complejo enzimático nitrogenasa

La fijación del nitrógeno atmosférico es llevada a cabo por microorganismos que pueden vivir en simbiosis con las plantas o existir de manera independiente. Este proceso ha desempeñado un papel fundamental en la agricultura tradicional. Por ejemplo, las bacterias pertenecientes al género *Rhizobium* establecen una relación simbiótica con plantas leguminosas, lo que se manifiesta a través de la formación de nódulos en las raíces, donde residen estas bacterias. Cabe destacar que existen diversas especies dentro del género *Rhizobium*, y cada una de ellas tiende a infectar un tipo específico de planta huésped. De manera recíproca, cada especie de leguminosa requiere de ciertas especies o cepas particulares de *Rhizobium* para llevar a cabo este proceso simbiótico.

En la Tabla 2 se muestran los valores medios para la fijación biológica por ciertas especies de leguminosas.

Tabla 2. Fijación media de nitrógeno por las leguminosas

Cultivo de leguminosas	Nitrógeno fijado (kg/ha/año)
Forrajeras	
Alfalfa	120-800
Trébol blanco	150-400
Trébol rosado	100-480
Trébol subterráneo	80-340
De grano y hortícolas	
Haba	100-300
Arveja	50-270
Lupino	40-300
Frejol	25-100
Abonos verdes	
Arveja	70-300
Haba	80-380
Vicia	100-300
Lupino	150-310
Arbóreas	
Tamarugo, algarrobo, espino, aramo, pseudocacia	80-590

Fuente: Urzúa, H. (2000)

La eficacia de la fijación simbiótica de nitrógeno puede disminuir significativamente cuando el suelo contiene altos niveles de nitrógeno mineral. Esto puede deberse a procesos naturales que convierten el nitrógeno orgánico en nitrógeno mineral o a una fertilización excesiva con nitrógeno (Urzúa *et al.*, 1986; Mundy *et al.*, 2003). En la práctica agrícola, en ocasiones se realiza una aplicación de nitrógeno en el momento de la siembra para promover la germinación y el crecimiento inicial de las leguminosas, antes de que se establezca la nodulación en las raíces. En cuanto a las cantidades de nitrógeno fijado en simbiosis, estas varían considerablemente y dependen en gran medida de varios factores que incluyen la especie de la leguminosa, la eficacia de los rizobios, las condiciones del suelo y el clima, así como la gestión agrícola. Las cifras oscilan entre 50 y 800 kilogramos por hectárea al año. Es evidente que esta capacidad de fijación de nitrógeno permite reemplazar significativas cantidades de fertilizantes nitrogenados. Por lo tanto, las leguminosas desempeñan un papel fundamental en la rotación de cultivos aportando nitrógeno a las futuras siembras.

La fijación biológica del nitrógeno molecular (N_2) es un proceso catalizado por la enzima nitrogenasa, la cual consta de dos metaloproteínas. Esta enzima se compone de dos proteínas de hierro; una de ellas tiene un peso molecular que varía entre 52 y 73 KDa (kilo Daltons) y está conformado por dos subunidades de Fe_4S_4 . La segunda proteína, denominada MoFe, es más grande, con un peso molecular de 240 KDa y consta de cuatro subunidades, cada una compuesta por 30 átomos de hierro y 2 de molibdeno (Marschner, 2012). La proteína de hierro se conoce como dinitrogenasa reductasa, con una vida útil de aproximadamente 0.5-0.75 segundos, mientras que la proteína de mayor peso molecular (MoFe) recibe el nombre de dinitrogenasa.

Como se observa en la Figura 3, el Mo de la proteína de combinación Fe-S juega un papel fundamental al transferir electrones directamente al nitrógeno molecular (N_2), mientras que el hierro (Fe) actúa como transmisor de electrones. La presencia del molibdeno es esencial en el proceso de fijación de N_2 , tanto en los nódulos de leguminosas como no leguminosas (por ejemplo, *Alnus glutinosa*). La energía necesaria para llevar a cabo la fijación de N_2 se obtiene a partir del trifosfato de adenosina (ATP), que proviene de los productos de la fotosíntesis suministrados por la planta hospedera.

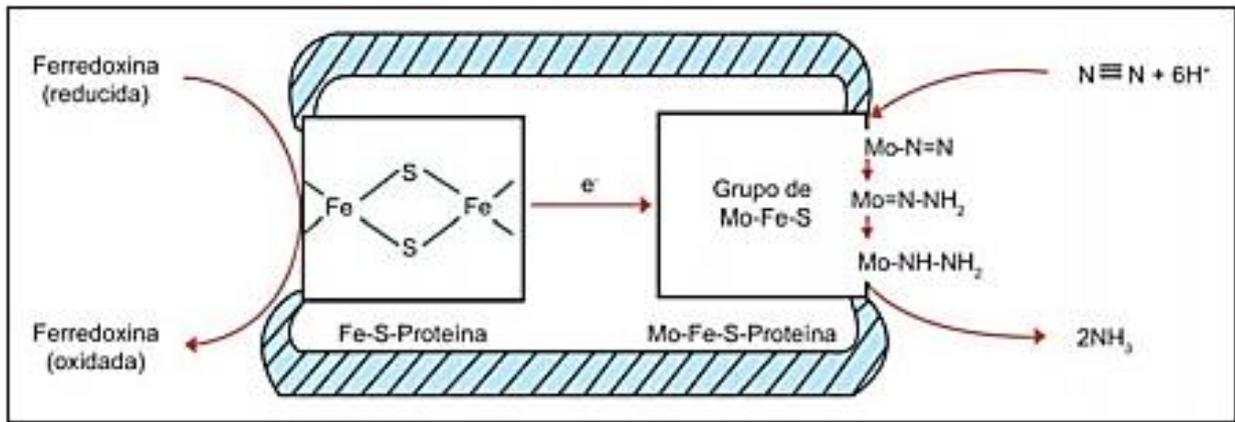


Figura 3. Modelo de la reducción de N_2 por el molibdeno contenido en la nitrogenasa

Fuente: Kyrkby y Römheld (2007)

Este complejo enzimático se destruye por acción del oxígeno. Su activación depende de la presencia de iones de magnesio (Mg^{2+}). Además, tiene la capacidad de convertir el trifosfato de adenosina (ATP) en difosfato de adenosina (ADP), siendo inhibida su actividad a medida que se incrementa la presencia de ADP. Esta enzima es capaz de reducir el nitrógeno molecular (N_2), así como diversas moléculas con enlaces triples, y también tiene la capacidad de reducir iones de hidrógeno (H^+) a hidrógeno molecular (H_2), incluso en presencia de N_2 .

En cuanto a su funcionamiento, la dinitrogenasa reductasa es capaz de aceptar electrones de un donador con bajo potencial redox, como ferredoxina reducida o flavodoxina, y se enlaza con dos moléculas de MgATP. Posteriormente, transfiere un total de ocho electrones a la dinitrogenasa y, simultáneamente, hidroliza dos moléculas de MgATP para formar dos moléculas de MgADP y fosfato inorgánico (Pi). Este proceso se repite, y cuando la dinitrogenasa acumula suficientes electrones, se une a la molécula de N_2 , la reduce y libera amonio (NH_4^+) como producto final (Sylvia *et al.*, 2005). En este proceso, el paso inicial crucial implica la protonización del molibdeno, durante el cual se desprende hidrógeno molecular (H_2) (Marschner, 2012).

2.3.2 Nitrato reductasa

El nitrógeno, al igual que el dióxido de carbono, es un nutriente esencial requerido en grandes cantidades por todas las plantas. En climas templados, el nitrógeno en el suelo suele ser un factor limitante para el crecimiento de las plantas, ya que su concentración tiende a mantenerse baja debido a la lixiviación y la actividad microbiana.

Como se mencionó anteriormente, solo algunas especies de plantas pueden establecer relaciones simbióticas para fijar el nitrógeno atmosférico. Por esta razón, las plantas han desarrollado mecanismos para enfrentar la limitada disponibilidad de nitrógeno. Estos mecanismos incluyen sistemas altamente sensibles y selectivos de captación de nitrógeno, además de la capacidad de utilizar diversas fuentes de nitrógeno para su crecimiento. Esto implica la coordinación de una red de etapas reguladoras en el proceso de asimilación del nitrógeno, ajustándolo a la asimilación del carbono, con el fin de mantener un equilibrio nutricional óptimo que asegure un crecimiento y desarrollo saludable de las plantas.

Según Tischner (2000), las fuentes primarias de nitrógeno incluyen el amonio (que adquiere especial relevancia en suelos con bajo pH), los aminoácidos (consumidos por las plantas en regiones donde la nitrificación y mineralización están restringidas debido a condiciones climáticas, como la temperatura en las zonas árticas) y el nitrato (el compuesto de nitrógeno más ampliamente utilizado).

Las raíces absorben el nitrato. Puede quedarse en las células de las raíces como ser transportado a células del tallo. A nivel celular pasa por un proceso de reducción y posteriormente es almacenamiento en las vacuolas. La primera etapa de reducción tiene lugar en el citosol, donde la enzima nitrato reductasa convierte el nitrato en nitrito.

La nitrato reductasa cataliza la siguiente reacción: $\text{NO}_3^- + 2\text{e}^- + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{NO}_2^- + \text{H}_2\text{O}$

A continuación, el nitrito se reduce a amoníaco gracias a la acción de la enzima nitrito reductasa. El amoníaco es asimilado y transformado a través del mecanismo GS/GOGAT (glutamino sintetasa/glutamato sintasa) en los aminoácidos glutamina y glutamato, que actúan como sustratos para las reacciones de transaminación que generan todos los demás aminoácidos que forman las proteínas (Tischner, 2000).

La regulación de la asimilación del nitrato se enmarca en una intrincada red de control que responde a diversas señales externas e internas, como la presencia de nitrato, la intensidad de la luz, la concentración de dióxido de carbono, la influencia de fitohormonas y los metabolitos resultantes del metabolismo del carbono y el nitrógeno. Este sistema de regulación permite coordinar la asimilación del nitrato con otros procesos metabólicos cruciales para las plantas (Tischner, 2000; Mendel y Hänsch, 2002).

Cada monómero de la nitrato reductasa en las plantas consta de tres dominios funcionales: el dominio N-terminal asociado al MoCo, un dominio central que alberga el hemo, y un dominio C-terminal que contiene FAD. Cada uno de estos grupos prostéticos redox activos se presenta en una proporción de 1:1:1. Estos dominios están interconectados mediante áreas articulares susceptibles a la acción de proteasas. Los tres dominios contribuyen a tres centros redox que facilitan la transferencia de electrones desde el cofactor reductor NAD(P)H, pasando a través de FAD, hemo y MoCo, hacia el nitrato. El centro catalítico es la unidad que contiene el MoCo, mientras que el dominio hemo comprende una proteína de tipo citocromo b5 (Schwarz y Mendel, 2006).

A pesar de los avances logrados, el mecanismo de reacción aún no se comprende completamente, posiblemente debido a la carencia de resultados de un estudio estructural exhaustivo de la nitrato reductasa en plantas. De acuerdo con la información disponible hasta la fecha, se sugiere que el sitio activo inicialmente contiene Mo(IV) en el proceso de reducción, y se presume que el nitrato interactúa con el centro metálico de manera unidentada (Kroneck y Abt, 2002).

En la Figura 4 se aprecia cómo la nitrato reductasa resulta en una enzima dímera, con tres grupos prostéticos que transfieren electrones por subunidad, incluyendo flavina, hemo y Mo. Durante la reducción del nitrato, los electrones se transfieren directamente desde el molibdeno al nitrato (Havlin *et al.*, 1999).

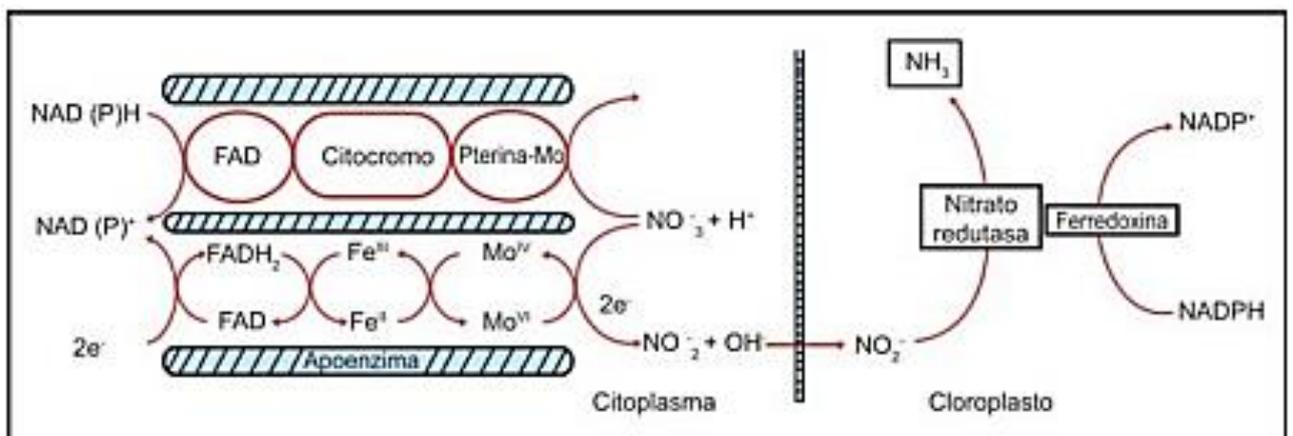


Figura 4. Modelo estructural de la nitrato reductasa con sus dos subunidades. Cada subunidad contiene tres grupos prostéticos: FAD, hemo-Fe y Mo-pterin

Fuente: Campbell (1988); citado por Kyrkby y Römheld (2007)

Por otro lado, es válido afirmar que las plantas que se nutren con amonio (NH_4^+), requieren significativamente menos molibdeno en comparación con aquellas que se alimentan con nitrato (NO_3^-). Los síntomas de deficiencia en el primer caso son menos notorios e incluso pueden estar ausentes en comparación con el segundo (Marschner, 2012).

2.3.3 Xantina oxidasa/deshidrogenasa

La xantina oxidasa comparte numerosas similitudes con la nitrato reductasa, incluyendo un peso molecular similar (Schwarz y Mendel, 2006). Esta enzima participa en la degradación de purinas hacia ácido úrico. Se presenta como xantina oxidasa cuando utiliza oxígeno como aceptor final o como xantina deshidrogenasa (XDH) cuando transfiere electrones al NAD (dinucleótido de nicotinamida adenina).

La xantina deshidrogenasa ha sido identificada en diversos tejidos y organismos vegetales. Se ha logrado purificar la enzima a partir de hojas de trigo y legumbres, y se ha observado que tiene una alta afinidad por xantina e hipoxantina como sustratos, aunque también puede aceptar purinas y pterinas con una eficiencia menor. Es notable que tanto la xantina deshidrogenasa como la aldehído oxidasa presentan secuencias de aminoácidos y organización de dominios muy similares, lo que sugiere que ambas enzimas pueden haber evolucionado a partir de un ancestro común (Schwarz y Mendel, 2006).

La xantina deshidrogenasa en plantas es una proteína homodimérica con un peso molecular de alrededor de 300 kDa. Además de su papel en la degradación de purinas, se ha postulado que desempeña funciones importantes en diversos procesos celulares, como: i) interacciones entre plantas y patógenos, especialmente en el caso de hongos fitopatogénicos que afectan a legumbres y cereales; ii) muerte celular relacionada con respuestas de hipersensibilidad; iii) senescencia natural de las plantas. Todos estos procesos involucran la generación de especies reactivas de oxígeno, relacionando la xantina deshidrogenasa con un papel en la producción de aniones superóxido y/o peróxido de hidrógeno (Schwarz y Mendel, 2006).

En leguminosas con nódulos fijadores de nitrógeno, donde los ureidos son los principales compuestos de nitrógeno formados en las raíces de los nódulos, esta enzima juega un papel fundamental en el metabolismo del nitrógeno (Sylvia *et al.*, 2005). Los bacteroides asimilan nitrógeno en forma de amonio, que se exporta a las células del hospedero y se convierte vía glutamina en glutamato y aspartato, utilizados en la síntesis de purinas. Estos compuestos

son posteriormente convertidos (por células vecinas no infectadas con las bacterias simbioses) en ureidos, alantoína y ácido alantoico. (Marschner, 2012).

Cuando las leguminosas crecen tomando a partir de las raíces fuentes de nitrógeno mineral, exportan al resto de la planta principalmente amidas como glutamina y asparagina. En contraste, al establecer una asociación simbiótica, comienzan a sintetizar ureidos como compuestos para transportar el nitrógeno al resto de la planta. Esta adaptación metabólica se interpreta como una optimización en la utilización del carbono, ya que los ureidos presentan una menor proporción carbono/nitrógeno en comparación con la glutamina y la asparagina. Los ureidos se derivan de las purinas producidas en las células infectadas, y la posterior oxidación de estas purinas tiene lugar en las células no infectadas en la zona central del nódulo. (González et al., 2006).

2.3.4 Sulfito oxidasa

En animales, la sulfito oxidasa consta de dos unidades idénticas y está compuesta por un dominio hemo en el extremo N-terminal y un dominio Molibdeno C-terminal.

En términos generales, esta enzima cataliza la conversión del sulfito en sulfato a través de la reacción química: $\text{SO}_3^{2-} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$

En microorganismos, se ha investigado la conversión del sulfito en sulfato mediante procesos de oxidación. Sin embargo, vale la pena mencionar que esta transformación también puede llevarse a cabo por otras enzimas, como peroxidasas, citocromo oxidasa, iones metálicos y radicales superóxido.

Se ha demostrado la existencia de sulfito oxidasa en plantas mediante la identificación de un cDNA funcional en *Arabidopsis thaliana* (Schwarz y Mendel, 2006). Esta enzima es ampliamente distribuida y conservada en el reino vegetal, presentando propiedades distintas a las observadas en sistemas animales. Por ejemplo, en plantas, no posee el dominio hemo y es considerada la enzima de molibdeno más simple entre las eucariotas, con un único centro redox.

Aún no se ha esclarecido por completo si la enzima sulfito oxidasa desempeña un papel en la oxidación del sulfito en las plantas, aunque se sabe que este proceso ocurre en la degradación de proteínas y en la posterior reoxidación del sulfuro reducido en aminoácidos

(Marschner, 2012). Durante el ciclo de asimilación primaria del sulfato en el cloroplasto, el sulfato se reduce a través del sulfito para formar sulfuro orgánico, que se utiliza en la biosíntesis de cisteína (Mendel y Hänsch, 2022).

La sulfito oxidasa de plantas utiliza el oxígeno como aceptor final de electrones, generando peróxido de hidrógeno como producto de la reacción: $\text{SO}_3^{2-} + \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_4^{2-} + \text{H}_2\text{O}_2$

Este hallazgo explica por qué esta enzima se localiza en los peroxisomas de las células vegetales, en contraste con su ubicación en las mitocondrias de los animales. En animales, la sulfito oxidasa se encuentra principalmente en el hígado, donde cataliza la última etapa de la degradación oxidativa de compuestos como la cisteína, la metionina y componentes de membrana, como los sulfátidos (Schwarz y Mendel, 2006).

La estructura cristalina de la enzima se ha analizado con una resolución de 2.6 Å y muestra una sorprendente conservación estructural entre la sulfito oxidasa de plantas y la de animales (Wang *et al.*, 2016). La sulfito oxidasa de plantas es una enzima dimérica con una masa molecular de alrededor de 90 kDa, compuesta por un dominio Molibdeno N-terminal y un dominio C-terminal de dimerización (Schwarz y Mendel, 2006). La comparación de residuos superficiales conservados y la distribución de cargas entre la sulfito oxidasa de plantas y animales revela algunas diferencias notables cerca de las entradas a los sitios activos (Wang *et al.*, 2016). El análisis estructural también ha revelado que la unidad de Molibdeno se encuentra en su forma oxidada, lo que parece estar bien definido dentro de los límites de resolución estructural, con una formulación correcta como LMoVIO₂ (S-cys) (Wang *et al.*, 2016).

2.3.5 Aldehído oxidasa

La aldehído oxidasa es una enzima citoplasmática con un peso molecular aparente de 300 kDa y contiene grupos prostéticos como FAD, hierro y molibdeno en una relación estequiométrica de 4:1:1 (Koshiha *et al.*, 1996). El hierro con actividad redox se encuentra en forma de un centro de ferredoxina 2Fe/2S localizado en la parte N-terminal (Schwarz y Mendel, 2006).

Se han observado diferentes isoformas de esta enzima que muestran una relativa amplitud en la especificidad de sustratos, siendo capaces de procesar diversos aldehídos, como aldehído abscísico, indol-3-aldehído, indol-3-acetaldehído y benzaldehído. Algunos estudios

han confirmado que en *Arabidopsis*, la isoforma AO3 cataliza la conversión de aldehído abscísico en ácido abscísico, que es la etapa final en la biosíntesis de esta fitohormona (Seo y Koshiba, 2022), la cual desempeña funciones cruciales en la fisiología de las plantas (Cutler *et al.*, 2010).

Estudios clásicos de fisiología han demostrado que la adición de molibdeno en plantas de trigo deficientes en este elemento estimula la biosíntesis de ácido abscísico (ABA), una fitohormona relacionada con el crecimiento, el desarrollo y la respuesta a estrés abiótico a través de su influencia en la regulación de los estomas y el equilibrio hídrico (Wu *et al.*, 2018).

Según Taiz y Zeiger (2006), este aumento en ABA está mediado por la adición de molibdeno debido a su papel estructural en la aldehído oxidasa, la misma que en el último paso de la síntesis de ABA requiere una forma sulfurada de molibdeno cofactor (MoCo sulfurado) catalizada por la enzima MoCo sulfurasa (ABA3). ABA3 se activa en respuesta a condiciones de estrés ambiental y es responsable de muchas de las funciones de resistencia al estrés asociadas con el ABA (Wu *et al.*, 2018) y, por lo tanto, la presencia/ausencia de Mo regula su funcionamiento.

Asimismo, investigaciones recientes han relacionado la actividad de la aldehído oxidasa con la biosíntesis de otra fitohormona vegetal. La enzima participa en la conversión del indol-3-acetaldehído en ácido indol-3-acético, la más común de las auxinas, presente en diversos tejidos vegetales (Schwarz y Mendel, 2006).

Las aldehído oxidasas además de estar involucradas en la síntesis de fitohormonas, se ha sugerido que podrían estar involucradas en otros procesos metabólicos, como reacciones de detoxificación y respuestas a patógenos. (Schwarz y Mendel, 2006).

2.3.6 El molibdeno y el estrés

En el metabolismo primario y secundario, el ABA contribuye a la acumulación de azúcares, antocianinas, taninos y flavonoles en frutos no climatéricos como los cítricos. A diferencia de otras hormonas como las auxinas, el ABA no se origina a partir de compuestos nitrogenados, como aminoácidos o nucleótidos, sino que se deriva de un producto de los carotenoides, conocido como isopentenil difosfato. Su síntesis tiene lugar principalmente en los cloroplastos, orgánulos que poseen una estructura rica en membranas y están

involucrados en la síntesis de numerosos lípidos. Los cloroplastos desempeñan un papel crucial en la detección de señales de estrés abiótico y actúan como generadores de señales de protección que se transmiten al resto de las células de la planta para activar mecanismos de defensa. Se ha demostrado que el ABA regula procesos relacionados con el estrés abiótico, como el causado por temperaturas extremas, radiación UV excesiva, sequía y salinidad, entre otros factores. Además, está vinculado a la síntesis de pigmentos y desempeña un papel en la manifestación de colores en diferentes órganos de la planta, incluyendo los tonos amarillos que se vuelven evidentes en otoño cuando la clorofila se degrada (Pinto y Díaz, 2017).

El óxido nítrico conecta la asimilación del nitrógeno y la síntesis de ABA con la resistencia al estrés oxidativo. Se ha demostrado que la resistencia al daño causado por el estrés oxidativo, inducido por el molibdeno, no solo se produce en respuesta a la sequía, sino también en situaciones de frío y salinidad (Abd El-Samad et al., 2005; Sun et al., 2009; Zhang et al., 2012; Ghafarian et al., 2013; Al-Issawi et al., 2013; Wu et al., 2018). Así el elemento llega a estar implicado con adaptaciones metabólicas que favorecen la regulación de la presión osmótica y la homeostasis de las especies reactivas de oxígeno, que son parte de los mecanismos de defensa antioxidante. La evidencia sugiere que el óxido nítrico desencadena esta adaptación metabólica y que su producción inicial está vinculada a la estimulación de la actividad de la nitrato reductasa y la aldehído oxidasa, con el molibdeno desempeñando un papel central, como se ilustra en la Figura 5.

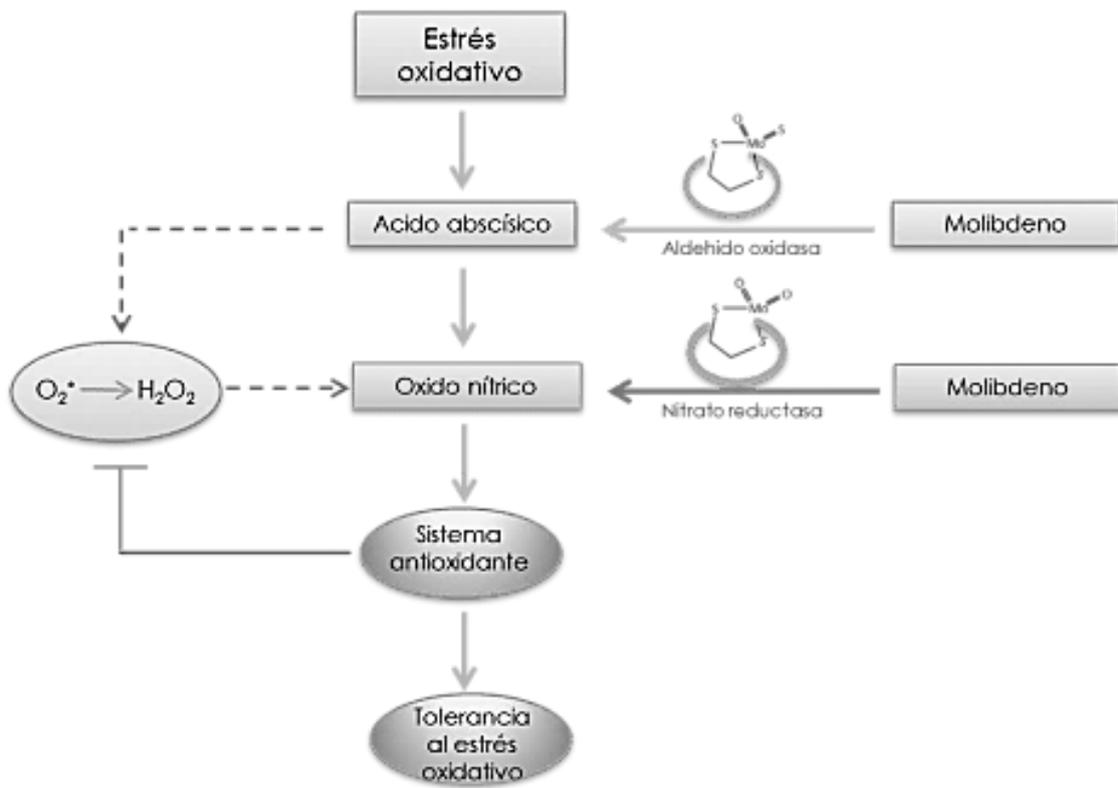


Figura 5. La tolerancia al estrés oxidativo por el molibdeno ocurre a través de la interacción con el ácido abscísico y el óxido nítrico

Fuente: Adaptado de Wu *et al.* (2018)

2.4 Importancia del molibdeno y síntomas de carencia

La importancia del molibdeno en la nutrición de las plantas ha sido ampliamente reconocida por investigadores como Lindsay (1979), Fageria (1992), Marschner (2012), Kirkby y Mengel (2000), entre otros. La esencialidad de este micronutriente para las plantas fue inicialmente establecida en 1938 por D. I. Arnon y P. R. Stout (Fageria *et al.*, 1997; Marschner, 2012).

En la Tabla 3 se presenta un resumen del proceso de descubrimiento de varios elementos, incluyendo el molibdeno.

Tabla 3. Descubrimiento de la esencialidad de los micronutrientes en plantas.

Elemento	Año	Descubridor
Fe	1860	J. Sachs
Mn	1922	J.S. Mc Hargue
B	1923	K. Warrington
Zn	1926	A.L. Sommer y C.P.Lipman
Cu	1931	C.P.Lipman y G. MacKinney
Mo	1938	D.I.Arnon y P.R.Stout
Cl	1954	T.C.Boyer <i>et al.</i>
Ni	1987	P.H.Brown <i>et al.</i>

Fuente: Marschner (2012)

Sillanpaa (1990) realizó un análisis de 190 muestras de suelo de 15 países y encontró que el 15% de estos suelos tenían bajos niveles de molibdeno. La deficiencia de molibdeno es más notoria en áreas con altos niveles de precipitación, y generalmente está relacionada con la adsorción del ion molibdato (MoO_4^{2-}) por los componentes del suelo en condiciones ácidas (Johansen *et al.*, 1977), ya que tiende a ser adsorbido por los óxidos e hidróxidos hidratados de hierro presentes en estos suelos (Franco y Day, 1980).

En numerosos suelos ácidos de Brasil, se observó que el frijol común respondía positivamente a la aplicación de molibdeno solo después de que el pH del suelo alcanzaba un valor superior a 5.5.

Las plantas absorben molibdeno en forma de ion molibdato (MoO_4^{2-}), relativamente móvil en el sistema vascular de las plantas, tanto en el xilema como en el floema. Además, las plantas pueden absorber cantidades considerables de molibdeno sin mostrar signos de toxicidad (Marschner, 2012).

Las principales funciones del molibdeno están estrechamente vinculadas a la asimilación del nitrógeno en las plantas, y su necesidad varía significativamente según la fuente de nitrógeno suministrada.

Como se mencionó previamente, la presencia de este micronutriente es fundamental en los cultivos que reciben nitrógeno en forma de nitrato. El nitrato es asimilado gracias a la actividad de la nitrato reductasa, una enzima que convierte el nitrato (NO_3^-) en nitrito (NO_2^-), luego en amoniaco (NH_3) y finalmente en amonio (NH_4^+). Este último es esencial

para la síntesis de aminoácidos (Marschner, 2012). Asimismo, la necesidad de molibdeno es especialmente alta en especies que realizan la fijación biológica de nitrógeno, un proceso en el cual interviene la enzima nitrogenasa y que se lleva a cabo principalmente en los nódulos de las raíces.

Las plantas que carecen de molibdeno presentan un aumento en la concentración de compuestos solubles de nitrógeno, como amidas, y una disminución en la actividad de la ribonucleasa, lo que indica que una inadecuada concentración de molibdeno afecta la biosíntesis de proteínas y, en consecuencia, entre otros procesos metabólicos, la concentración de clorofila, la estructura de los cloroplastos y el crecimiento de las plantas (Lindsay, 1979; Fageria, 1992).

Aunque se ha avanzado en la comprensión de las funciones del molibdeno en las plantas, aún hay aspectos de su papel que no se comprenden completamente.

En varios cultivos, la deficiencia de molibdeno parece afectar más la fase reproductiva que el crecimiento vegetativo. Por ejemplo, en el maíz con deficiencia de molibdeno, se observa un retraso en la floración, una disminución en la apertura de flores y una reducción en la formación de polen, tanto en tamaño como en viabilidad (Fageria *et al.*, 1997; Marschner, 2012). Otros síntomas de deficiencia pueden incluir punteado intervenal, clorosis marginal en las hojas más antiguas y el enrollamiento hacia arriba de los bordes de las hojas.

A medida que la deficiencia avanza, pueden aparecer manchas necróticas en las puntas y bordes de las hojas, y esto suele asociarse con altas concentraciones de nitrato en el tejido. Un ejemplo bien conocido de esta deficiencia se manifiesta en el cultivo de coliflor, donde las hojas no se desarrollan adecuadamente y, en casos extremos, solo se forman las nervaduras de las hojas. Por esta razón, esta deficiencia de molibdeno en el cultivo de coliflor se conoce como “cola del látigo” (Marschner, 2012; Kirkby y Mengel, 2000).

A continuación, en la Tabla 4, se presentan diversos síntomas típicos de la deficiencia de molibdeno en algunos cultivos.

Tabla 4. Síntomas de deficiencia de molibdeno en algunos cultivos

Cultivos	Síntomas
Col, col rizada, nabo, col de bruselas	Al inicio del desarrollo: fuerte moteado clorótico, y luego secamiento de los limbos que se inicia en los bordes y puede llegar hasta el nervio medial; el tejido afectado se torna tenue y apergaminado. En las áreas moteadas pueden formarse agujeros. Pleno desarrollo: Hojas viejas relativamente grandes y hojas jóvenes progresivamente más pequeñas y estrechas. En las hojas más nuevas sólo llega a desarrollarse el nervio medial que, además esta deformado; los puntos de crecimiento pueden morir y la col no repolla.
Coliflor	En plantas jóvenes los síntomas son similares a los que se dan en la col o col de Bruselas. En plantas desarrolladas poco afectadas las hojas viejas son grandes pero las jóvenes muestran una reducción progresiva en el desarrollo del limbo, de modo sólo forman los nervios mediales y un limbo estrecho. Por otra parte, las plantas desarrolladas muy afectadas pueden no formar en absoluto hojas normales. En lugar de ello solo se observa el desarrollo de los nervios mediales; dicha anomalía se conoce como cola de látigo. Plantas seriamente afectadas no forman pella y sus puntos de crecimiento mueren.
Acelga, espinaca, remolacha azucarera, betabel	Los limbos foliares presentan zonas secas a lo largo de las nervaduras y los tejidos afectados tienen una textura apergaminada, de modo semejante a lo que ocurre en las crucíferas jóvenes. También suelen aparecer amarillamientos semejantes a la deficiencia de azufre, pero en las hojas maduras.
Tomate	Hojas pequeñas, algo deformes y rizadas en los márgenes con moteado clorótico intenso seguido de marchitez y muerte de los tejidos. Los síntomas pasan sistemáticamente de las hojas más viejas a las más jóvenes (las hojas apicales pueden permanecer verdes). La fructificación disminuye mucho, en especial en las partes superiores de la planta.
Lechuga	Presentan enanismo. Las hojas pueden presentar moteado clorótico, apariencia desgastada y un tamaño estrecho. Los bordes de las hojas pueden mostrar zonas pardas irregulares, además de ausencia de repollo.
Tréboles y alfalfa	Plantas enanas. Hojas pequeñas color verde pálido, que más tarde presentan pigmentaciones amarillas y rojas. Estos síntomas se deben a que los microorganismos de los nódulos radicales no pueden fijar el nitrógeno. Si este elemento abunda, las hojas presentan zonas oscuras apergaminadas
Cítricos	Manchas amarillas en las hojas completamente maduras. Las hojas producidas en primavera desarrollan una o varias manchas amarillo-naranjas a finales de verano. Se producen al azar en la hoja y gradualmente se tornan a un color rojizo-marrón. Mayormente en la parte inferior de la hoja.
Maíz	En las hojas más viejas puede producirse muerte del tejido en la punta, en los márgenes o entre las nervaduras. También, afecta la formación de polen en maíz y/o se producen granos de polen más pequeños, con muy poco almidón y baja actividad de la enzima invertasa.

Fuente: Wallace (1970); Bennett (1993); Intagri (s.f.). Funciones del molibdeno en la nutrición de los cultivos. Recuperado de <https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/funciones-del-molibdeno-en-la-nutricion-de-los-cultivos>

2.5 Fuentes de Molibdeno

La elección de la fuente de molibdeno depende de varios factores, incluyendo el método de aplicación previsto, las condiciones del suelo y los requerimientos en momentos críticos de los cultivos. (Gupta, 1997; Marschner, 2012).

A continuación, en la Tabla 5, se detallan fuentes de Mo con sus respectivas fórmulas y concentración.

Tabla 5. Fuentes de molibdeno y su concentración

Fuente	Fórmula	Concentración (%)
Molibdato de amonio	$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	54
Molibdato de sodio	$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	39
Trióxido de Molibdeno	MoO_3	66
Molibdenita	MoS_2	60

Fuente: Castellanos *et al.* (2000) Murphy and Walsh (1972).

2.5.1 Molibdato de Sodio (Na_2MoO_4):

El molibdato de sodio es una fuente soluble de molibdeno que se disuelve fácilmente en agua. Esta forma de molibdeno es ampliamente utilizada en la agricultura, ya que se puede aplicar a través del riego o mezclarse con fertilizantes líquidos (Marschner, 2012).

2.5.2 Molibdato de Amonio ($(\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4$):

El molibdato de amonio es otra fuente soluble de molibdeno que se emplea en la fertilización de suelos y plantas. Al igual que el molibdato de sodio, esta forma de molibdeno es eficaz para corregir las deficiencias de molibdeno en las plantas (Malavolta *et al.*, 1997).

2.5.3 Trióxido de Molibdeno (MoO_3):

El trióxido de molibdeno es un compuesto sólido que proporciona molibdeno. Puede ser procesado y utilizado en fertilizantes sólidos para enriquecer el suelo con molibdeno (Gupta, 1997).

2.5.4. Molibdenita (MoS₂):

La molibdenita es un mineral que contiene molibdeno en forma de sulfuro de molibdeno (MoS₂). Este mineral se puede moler y procesar para producir polvo de molibdeno, que se utiliza como fuente de molibdeno en fertilizantes sólidos (Gupta, 1997).

2.5.5 Mezclas y formulaciones:

Existen formulaciones específicas generadas en base a los compuestos descritos anteriormente. Existen mezclas de fertilizantes edáficos comerciales que incluyen molibdeno como uno de sus componentes con proporciones definidas de macro y micronutrientes (Marschner, 2012). Asimismo, existen opciones foliares específicas para aportar molibdeno, derivadas de molibdato de amonio o sodio que son las formas más solubles. Estos compuestos de aplicación foliar son formulados en mezcla con sustancias nutritivas orgánicas complementarias, agentes acomplejantes o quelatos de liberación lenta y controlada.

Es importante destacar que el tipo de fuente de nitrógeno empleado también desempeña un papel significativo, ya que puede influir en la asimilación del molibdeno por parte de la planta. En general, los planes de fertilización que incluyen nitratos requieren una mayor asimilación de molibdeno en comparación con el amonio (Intagri, 2018).

Además de la adición exógena, se pueden adicionar enmiendas para mejorar las condiciones para su disponibilidad y absorción. En suelos ácidos, el encalado puede ser una medida efectiva para abordar la deficiencia de molibdeno, ya que ayuda a elevar el pH del suelo.(Gupta, 1997)

III. DESARROLLO DEL TRABAJO

Como representante técnico comercial fueron desarrollados diferentes ensayos de campo preliminares, donde se estudió el efecto del molibdeno sobre diferentes cultivos que se describen a continuación.

Se usó como fuente el un formulado de aplicación foliar, que cuenta con una concentración de 55.0 g/L

3.1 Molibdeno en maíz (*Zea mays*): efecto sobre el metabolismo de fuentes nitrogenadas

Este estudio se centró en validar la combinación óptima de la fuente de fertilizante nitrogenado y la dosis de molibdeno, para obtener los rendimientos más altos. Con este fin, se comparó la aplicación de dos tipos de fuentes de nitrógeno: urea (a una dosis de 200 unidades o 435 kg/ha) y nitrato de amonio (a una dosis de 606 kg/ha) aplicados en el suelo. Además, se evaluaron la aplicación foliar de cuatro dosis de molibdeno utilizando un producto que contenía molibdato de amonio acomplejado con ácidos orgánicos y que poseía una concentración del 5.5 % de Mo.

Con frecuencia, los agricultores de la región suelen optar por utilizar fuentes de fertilización convencionales como la urea, el nitrato de amonio, el fosfato diamónico y el cloruro de potasio. Explorar alternativas que puedan aumentar su productividad resulta complicado debido a restricciones en cuanto a costos, logística y conocimiento técnico. El propósito fundamental de este estudio radicó en demostrar la existencia de opciones complementarias que puedan mejorar la eficiencia de las fuentes de nitrógeno y facilitar la conversión del nitrógeno mineral en nitrógeno orgánico. Este proceso se traduce en una formación más efectiva de proteínas, enzimas y tejido vegetal, lo que tiene el potencial de aumentar significativamente los rendimientos agrícolas.

El estudio se llevó a cabo en el departamento de Ica, provincia de Pisco, distrito de Humay. La densidad de siembra fue de 75,000 plantas por hectárea, y el cultivo tuvo una duración de 6 meses. La parcela completa, que abarcaba 2 hectáreas, recibió 200 kg/ha de fosfato diamónico y 120 kg/ha de cloruro de potasio en el surco de siembra. La clase textural del suelo se aproximaba a una combinación entre arena franca y franco arenoso, determinada mediante el método del tacto. En este caso, no se tuvo acceso al análisis de suelo.

En el ensayo fueron utilizados plantines de maíz de la variedad amarillo duro DK-7088. Los tratamientos fueron aplicados inmediatamente después de la etapa de brotamiento, durante la fase fenológica de crecimiento vegetativo. Además de la diferenciación de las fuentes nitrogenadas, se aplicaron cuatro dosis de Mo vía foliar descrito anteriormente. Las dosis del producto aplicado fueron D₀: 0 L/ha; D₁: 0.5 L/ha; D₂: 1 L/ha; D₃: 1.5 L/ha y D₄: 2 L/ha.

Combinando las fuentes y las dosis, se obtuvieron los siguientes tratamientos: T₁: 0gMo/ha + úrea; T₂: 27.5 gMo/ha + úrea; T₃: 55 gMo/ha+ úrea; T₄: 82.5 gMo/ha + úrea; T₅: 110 gMo/ha + úrea; T₆: 0gMo/ha + nitrato de amonio; T₇: 27.5 gMo/ha + nitrato de amonio; T₈: 55 gMo/ha + nitrato de amonio; T₉: 82.5 gMo/ha + nitrato de amonio y T₁₀: 110 gMo/ha + nitrato de amonio.

Las fertilizaciones edáficas se llevaron a cabo a los 40 días después de la siembra (DDS) y a los 55 DDS, mientras que las dosis de molibdeno se aplicaron simultáneamente con la segunda fertilización edáfica a los 40 DDS. Se llevaron a cabo todos los procedimientos correspondientes al manejo del cultivo y en cosecha se midieron los resultados pesando lo extraído de las parcelas comparadas.



Figura 6. Detalle fotográfico del desarrollo del cultivo de maíz (*Zea mays*)

El desgrane de la cosecha fue mecanizado y se pesó el grano obtenido en sacos por hectárea. Los resultados se describen en el siguiente capítulo.

3.2 Molibdeno en leguminosas-holantao (*Pisum sativum* subsp. *arvense*): efecto en las primeras etapas de desarrollo de plantines

Se realizó un experimento con el propósito de comparar los efectos de la aplicación foliar de molibdeno en la primera etapa de desarrollo de Holantao. La aplicación de Mo se llevó a cabo a los 30 días después de la siembra, y los resultados de las plantas tratadas se compararon con un testigo que no recibió ninguna dotación foliar del elemento.

El ensayo se hizo en una parcela de 0.25 ha, con un suelo homogéneo que tenía una textura franco arcillosa, determinada bajo el método del tacto. Se seleccionó un área reducida del área de la parcela para asegurar condiciones uniformes y minimizar la variabilidad en el sustrato.

El procedimiento experimental se llevó a cabo en Nuevo Imperial, provincia de Cañete, en el departamento de Lima. La duración total del ensayo fue de dos semanas.

Cabe mencionar que no se tuvo acceso a los datos precisos del plan de fertilización del productor debido a las políticas de confidencialidad de la empresa Agroexportadora. Esta empresa alquila parcelas y compete por su obtención, lo que impide económica y logísticamente realizar análisis rutinarios para verificar y hacer un seguimiento detallado del estado de los suelos. La estrategia y “know-how” que protegen, se basa en planes de fertilización que han funcionado en la zona y que replican según los registros de extracción del cultivo.

Para los tratamientos se consideró un testigo absoluto (T_0) y un tratamiento (T_1) donde se aplicaron 110 g/ha de Mo, vía foliar, utilizando un producto derivado del molibdato de amonio con una concentración de 55 g/Mo por litro. Se optó por aplicarlo 30 días después de la siembra en un campo con una densidad de 30,000 plantas por hectárea.

Se realizó una evaluación exhaustiva a los 10 días después de la aplicación de este micronutriente que incluía el registro fotográfico del crecimiento, pesaje de los plantines comparados y análisis de la actividad nodular (se evaluó la formación de nódulos y la actividad de la leghemoglobina, efectuando cortes y verificando la coloración interna característica de la nodulación) para examinar si la adición del elemento, vía foliar, tendría influencia en el desarrollo integral. Asimismo, resultaba importante determinar si se presentaban síntomas de toxicidad en las plántulas. Los resultados obtenidos serán desarrollados y discutidos en el siguiente capítulo.

3.3 Molibdeno en espárragos (*Asparagus officinalis* L.): aporte en la traslocación

Se ha propuesto una conexión entre los niveles de ABA y el movimiento de azúcares en diversos contextos, como la transferencia de sacarosa en plantas de frijol intactas, el transporte de sacarosa en el tejido radicular de remolacha azucarera y la provisión de sacarosa al embrión desde el espacio extracelular en las cubiertas de semillas de soya. Estas conexiones se han señalado y publicado en varios estudios (Rolland et al., 2006; Hölttä et al., 2006; Jung Dae et al., 2006).

Teniendo en cuenta la relación entre el molibdeno y las enzimas que participan en la síntesis de ABA, y considerando los antecedentes mencionados sobre el papel de esta fitohormona en procesos como la traslocación, se llevó a cabo un ensayo en espárrago aplicando molibdeno de manera foliar con el propósito de mejorar la eficiencia del movimiento de azúcares hacia la corona. El objetivo de este ensayo era optimizar la acumulación de carbohidratos en las reservas, con el fin de mejorar los calibres, promover la uniformidad en el brotamiento y concentrar la cosecha en las primeras fechas para acortar la temporada. Como resultado adicional se esperaba reducir la incidencia de plagas y enfermedades en los turiones al reducirse el volumen de cosecha en las fechas finales.

El ensayo se llevó a cabo en el distrito de Hoja Redonda, provincia de Chincha, en el departamento de Ica. El cultivo de espárrago tratado fue de la variedad Atlas, el cual tenía una edad de 3 años con una densidad de 24 000 plantas por hectárea, sembrado sobre un suelo franco arcilloso, según datos brindados por el productor.

Se tomaron dos parcelas de 1 Ha, ambas sobre un terreno homogéneo con condiciones equivalentes. Uno de los campos fue tomado para la aplicación de molibdeno foliar y se le denominó tratamiento T₁. El otro campo, que no recibió la dotación foliar del microelemento fue considerado como testigo absoluto (T₀). Para los resultados, se tomaron en cuenta los datos obtenidos de la evaluación del rendimiento en t/ha, y el tamaño y peso de los turiones. El área denominada tratamiento recibió la aplicación foliar de 220 g Mo/ha, distribuido en dos aplicaciones de 110 g Mo/ha. La primera aplicación se llevó a cabo a los 45 días previos al chapodo y la segunda a los 35 días

En la Figura 7 se observa el estado fenológico de translocación, momento en que se inició el tratamiento.



45 días antes de chapodo

35 días antes del chapodo

Chapodo y 1^{er} Riego

Figura 7. Detalle fotográfico de los momentos de la aplicación de molibdeno (220 g Mo/ha) en la fase fenológica de translocación y del chapodo en espárrago (*Asparagus officinalis*)

El primer parámetro evaluado fue el rendimiento a la cosecha. Luego de realizado el chapodo y el primer riego, las cosechas se llevaron a cabo a diario en dos turnos. Se comparó el acumulado de las cosechas obtenidas durante la campaña en Kg/Ha.. El procedimiento se llevó a cabo repartiendo en los campos definidos jabs marcadas con cintas de colores dispuestas en las líneas del cultivo (para evitar la confusión de los tratamientos una vez se acumulen todas en el punto de pesaje).

Una vez pesado el total de la cosecha por hectárea, se procedió a tomar turiones al azar de cada tratamiento para medir el calibre y el peso con la finalidad de hacer las comparaciones respectivas.

Asimismo, se comparó el peso alcanzado por turiones de dimensiones similares. El dato obtenido se puede interpretar como una mayor concentración de solutos y densidad del tejido si, en el mismo volumen aproximado, el peso llega a ser superior.

Los resultados se desarrollan y discuten en el siguiente capítulo.

3.4 Molibdeno en cítricos (*Citrus reticulata* var. *Murcott*): Concentración de solutos en la cosecha, toma de color y grados Brix

Como se ha discutido en la literatura y en el caso del esárrago, el molibdeno actúa como cofactor en el metabolismo del ácido abscísico (ABA) (Taiz y Zeger, 2002). Esta hormona

desempeña un papel crucial en la translocación de azúcares, metabolitos y sólidos disueltos involucrándose directamente sobre la maduración, toma de color de los frutos y las reacciones frente al estrés.

No solo es fundamental desarrollar procedimientos que promuevan la maduración y la adquisición de color tanto en cítricos y caducifolios por tener una alta producción dirigida a la exportación en un entorno de latitudes y climas tropicales que se caracteriza por las limitaciones tanto en las diferenciales de temperaturas máximas y mínimas como en la disponibilidad de “horas frío”, sino que también debemos abordar las problemáticas de derivadas del cambio climático, su efecto en el incremento general de las T° y sus consecuentes impactos en los cambios de la fisiología de los cultivos, el nivel de estrés de los mismos y el aumento de la presencia de plagas y enfermedades.

Se nos exige hallar soluciones prácticas y económicas para sincronizar y concentrar las cosechas en momentos cruciales que permitan disponer de una ventana comercial rentable durante el menor período posible. Dicha concentración se enfoca además en buscar lograr la mayor cantidad de extracción en las primeras fechas de cosecha pues ello no solo facilita la obtención de frutas con una mayor calidad organoléptica y estética, sino que también reduce la probabilidad de daños bióticos y abióticos, la pérdida de calidad y la disminución de la acidez, entre otros aspectos. Gracias a ello se puede lograr un mayor porcentaje de fruta exportable, lo que reduce los costos, descarte y aumenta la rentabilidad del cultivo.

A continuación, se describe la experiencia llevada a cabo en el distrito de El Carmen, provincia de Chincha, departamento de Ica. El ensayo se realizó en fincas asociadas a Fruchincha y se aplicaron los tratamientos en el estado fenológico de crecimiento de frutos.

Se utilizaron árboles de W. Murcott injertados en patrón Citrumelo de 3 años de edad, con una densidad de 667 plantas por hectárea (distancia de 6 x 2.5 m). Por cuestiones de imparcialidad, los procedimientos de medición de cosecha se llevaron a cabo internamente con el personal de la finca Don Fermín y por acuerdo institucional de confidencialidad no se pudieron tener registros fotográficos. El personal compartió los resultados a través de FRUCHINCHA a cargo del Ing. Juan Antonio Delpero y su equipo de I+D. Quienes brindaron la autorización para la publicación de los mismos en el presente documento.

Se comparó el efecto de un producto a base de molibdeno foliar con una concentración del 55 g/L, aplicado una dosis de 2 L/ha en dos aplicaciones foliares. La primera aplicación

consistió en 1 L/Ha del producto realizada 45 días antes de la cosecha, seguida por una segunda aplicación con el resto de 1 L/Ha, ejecutada 38 días antes de la cosecha.

Frente a la dificultad económica de un análisis que nos permita definir la concentración de proteínas y de ABA, se midieron directamente los parámetros buscados por los productores: concentración de la cosecha consecuencia del avance de grados Brix y toma de color.

Para registrar la evolución de grados Brix se tomaron 10 frutos por tratamiento una vez por semana durante 4 semanas. Se les extrajo el jugo y se mezcló para evaluar un promedio utilizando un refractómetro óptico.

Para definir el efecto del molibdeno sobre el cambio de color, se tomó como referencia los kilogramos cosechados por día y su evolución durante las fechas de cosecha, según se iba acumulando. Al ser una mandarina tardía no se tiene acceso al desverdizado y para cosecharse el color debe estar completamente cerrado. Por ello, este parámetro se toma como evidencia para definir hay algún efecto

Se tomaron los datos de las primeras tres cosechas, por dos razones fundamentales: i) son las cosechas en las que el productor tiene el mayor interés buscar la mayor concentración posible y ii) se dispone del personal más enfocado (posteriormente el personal va mucho más rápido rebuscando las frutas que van madurando entre las líneas y es muy difícil que no se mezclen los frutos de los sectores evaluados). Se midió entonces la cosecha acumulada en los bines por sector demarcado a evaluar.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se detallan a continuación los resultados obtenidos en maíz, leguminosas, espárrago y cítricos.

4.1 Resultados en Maíz:

Los rendimientos obtenidos, expresados en función al tratamiento como toneladas por hectárea, se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Rendimientos de maíz amarillo duro obtenidos a partir de la comparación de dos fuentes nitrogenadas en interacción con cuatro dosis de molibdeno foliar

Tratamiento	Rendimiento (t/ha)	Fuente de N
T ₁	9.1	Urea
T ₂	9.3	Urea
T ₃	9.4	Urea
T ₄	9.5	Urea
T ₅	9.5	Urea
T ₆	8.9	Nitrato de Amonio
T ₇	9.5	Nitrato de Amonio
T ₈	9.7	Nitrato de Amonio
T ₉	10.2	Nitrato de Amonio
T ₁₀	10.2	Nitrato de Amonio

Notas: Los tratamientos recibieron en Mo T1: 0 gMo/ha; T2: 27.5 gMo/ha; T3: 55 gMo/ha; T4: 82.5 gMo/ha; T5: 110 gMo/ha; T6: 0gMo/ha; T7: 27.5 gMo/ha; T8: 55 gMo/ha; T9: 82.5 gMo/ha y T10: 110 gMo/ha.

En términos generales con los resultados obtenidos, se puede verificar que la aplicación de molibdeno generó un incremento en los rendimientos del cultivo condicionado a la fuente de nitrógeno aplicada.

En los tratamientos donde la fuente de nitrógeno fue la urea, las diferencias entre los rendimientos obtenidos fueron de 2 a 4%, lo que no resulta significativo.

No obstante, cuando fue utilizado como fuente el nitrato de amonio, la diferencia entre los resultados obtenidos con las diferentes dosis de Mo fue de 14%. En este caso, esta diferencia llegó a ser importante en términos productivos para el agricultor, ya que, analizando los costos de producción en el año que se efectuó este ensayo, la inversión resultaba mucho menor que los incrementos en el rendimiento, lo que redundaba en una mayor rentabilidad de la producción.



Figura 8. Detalle fotográfico de la cosecha y peso del rendimiento

En los resultados se confirma lo registrado en la literatura. Es necesario recalcar que en las circunstancias en las que se suele sembrar el cultivo únicamente va a tomarse en cuenta una potencial inversión adicional al programa cuando el gasto es mucho menor al valor monetario de lo que se incrementa en el rendimiento y los ingresos correspondientes.

En este caso se hace necesario cada vez que inicia la campaña del cultivo evaluar, según el costo de los fertilizantes y el potencial valor de la cosecha si agregar el microelemento sumaría realmente para el agricultor cuando se fertilice a base de nitrato de amonio.

4.2. Resultados en Holantao:

Los resultados en cuanto al desarrollo general se analizaron a nivel subjetivo y objetivo. Tanto para el desarrollo vegetativo como para la formación de raíces se generó un registro fotográfico para apreciación subjetiva y, a nivel objetivo, se registró y comparó el peso fresco de 15 plantines extraídos al azar según los tratamientos definidos.

En la Figura 9 se muestra la comparación de los resultados visuales del desarrollo vegetativo foliar y en la Figura 10, se observan los resultados visuales del crecimiento radicular bajo tierra.



Testigo absoluto



Tratamiento con 110 g Mo/ha vía foliar

Figura 9. Efecto de la aplicación (A) y no aplicación de molibdeno (B) sobre el desarrollo vegetativo de *Pisum sativum* var. *Macrocarpum*



Testigo absoluto



Tratamiento con 110 g Mo/ha vía foliar

Figura 10. Efecto de la aplicación (A) y no aplicación (B) de molibdeno sobre el desarrollo radicular de *Pisum sativum* var. *macrocarpum*

Por otro lado, en la Tabla 7, se detallan los resultados que fueron obtenidos del peso fresco de los plantines extraídos para evaluación.

Tabla 7. Peso fresco de plantines obtenidos a partir de la comparación del testigo y el tratamiento con la aplicación de molibdeno vía foliar

Repetición	Peso fresco (g)	
	Testigo	Dosis de Mo (110 g/ha)
1	16.5	61
2	14	30
3	18	23.5
4	14.5	28.5
5	18	29
6	22	35.5
7	22.5	22
8	37	35.5
9	26.5	36.5
10	19	34.5
11	22	24
12	21	29.5
13	15	45
14	10	30
15	15	32
Promedio	20.5	33.1

Se comprueba en términos cuantitativos lo registrado a nivel fotográfico: existe un mayor desarrollo inicial en las plantas tratadas, lo que confirma el efecto del molibdeno

Las leguminosas en general tienen un alto requerimiento debido a la necesidad de activar la nitrogenasa y nitrato reductasa. Por la alta demanda el micronutriente podría comportarse como el elemento limitante según la Ley del mínimo del Liebig.

Al observar los resultados inmediatos y notables de la adición del elemento, se confirma que existe un efecto significativo de la adición de molibdeno. Los resultados muestran que el

tratamiento exhibe un desarrollo inicial que supera a los plantines del grupo de control, con un incremento promedio de más del 50% en peso.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de los nódulos que fueron evaluados en 100 g de raíces frescas (Tabla 8).

Tabla 8. Promedio de nódulos en 100 g de peso fresco de raíz a partir de la comparación del testigo y el tratamiento con la aplicación de molibdeno vía foliar

Nódulos por 100 g/raíz	
Testigo	Dosis de Mo (110 g/ha)
128	112

En relación al número de nódulos por cada 100 g de raíz, no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos evaluados. Cuando se evaluaron raíces de igual proporción en peso, se notó que los nódulos en las raíces tratadas tenían un mayor tamaño y volumen, ello pudo derivar en que la cantidad de nódulos contabilizados en las mismas, fue ligeramente menor.

Finalmente se evaluó también la viabilidad de los nódulos. Ello depende de actividad de la leghemoglobina fácilmente detectable en la manifestación de una coloración rojiza en el interior de los nódulos al cortarse.

La leghemoglobina es una proteína fundamental al actuar como una especie de transportador de oxígeno (Appleby, 1984). Tiene la capacidad de unirse reversiblemente al oxígeno, presentando un tono rojo brillante cuando está oxigenada. Este cambio de color es una característica distintiva y refleja su capacidad para mantener un ambiente de bajo oxígeno en los nódulos, lo que evita la inhibición de la nitrogenasa y resulta esencial para el éxito de la fijación de nitrógeno (Hakoyama et al., 2009)

Los resultados a discutir se basaron en el examen de 200 nódulos. Después de ser cortados se observó su color interno. Se notaron diferencias en la intensidad de la tonalidad, pero solo se consideró como nódulos inactivos aquellos que no presentaban ninguna pigmentación y estaban completamente blancos. El resultado obtenido se expresó como el porcentaje de nódulos activos, el cual se detalla en la Tabla 9.

Tabla 9. Porcentaje de nódulos activos (coloración rojiza) en 200 nódulos evaluados al azar a partir de la comparación del testigo y el tratamiento con la aplicación de molibdeno vía foliar

Nódulos activos (%)	
Testigo	Dosis de Mo (110 g/ha)
76	95

En este caso, se evidencia un efecto directo de la adición de molibdeno en la formación y activación de los nódulos. En esta experiencia, el tratamiento fue aproximadamente un 30% superior al grupo control. Esto se debe probablemente a un mejor aprovechamiento del nitrógeno gracias a la disponibilidad de Mo en la activación de las enzimas relacionadas a su fijación biológica, crucial para el cultivo en las etapas iniciales de su desarrollo.

Es importante destacar que estos resultados están condicionados por el pH del suelo y en función a ello podrían no presentarse si la adición de Mo es a través del suelo por su impacto en la disponibilidad. Según la literatura, en varios suelos ácidos de Brasil, la respuesta del frijol común a la aplicación de molibdeno solo se observó después de elevar el pH del suelo por encima de 5,5 (Franco y Day, 1980). Esta respuesta podría estar relacionada con la limitación de los nódulos o la incapacidad de algunos cultivares de frijol para absorber molibdeno o transportarlo a los nódulos en suelos altamente ácidos (Franco y Munns, 1981).

Lo más común en nuestras condiciones de costa con los casos en los que la adición de molibdeno no produce resultados significativos, principalmente en suelos ricos en materia orgánica con un pH neutro a alcalino (condiciones que coinciden con la teoría). Sin embargo hay situaciones en las que los terrenos con estas características desafían y contradicen lo que se ha establecido en la literatura. Como se ha mencionado, uno de los factores que puede influir en esta variabilidad es la fuente de fertilizante utilizada. Como se constató en los resultados obtenidos en el ensayo con maíz, si predomina la forma de nitrato, sin Mo se pierde eficiencia en la conversión del nitrógeno a la forma amoniacal. Esta situación en la que encontramos resultados significativos a la adición de Mo (de forma contradictoria a la teoría donde se tienen condiciones donde el Mo no tendría que resultar limitante) se repite cuando estamos frente a un cultivo en un momento con alta demanda.

En lo observado se verifica que el Holantao, una leguminosa y cultivo de alto requerimiento de Mo, responde notablemente al incremento de su presencia. En la práctica no se toma en cuenta, los productores en su mayoría no aplican adiciones de este micronutriente, lo que sugiere que en muchos casos el molibdeno puede convertirse en un factor limitante y el productor está dejando de incrementar su producción y rendimientos.

Sobretodo en casos como los suelos donde se llevó a cabo el ensayo, Valle costero con una intensa actividad agrícola, la disponibilidad de este micronutriente puede llegar a ser escasa en momentos críticos. En tales circunstancias, y teniendo como principal argumento los resultados observados, se sugiere la aplicación foliar como la forma más efectiva de corrección. En otras palabras, se puede concluir que las adiciones de molibdeno, vía foliar, pueden representar inversiones modestas que generen un retorno económico significativo.

4.3 Resultados en espárrago

Se llevó a cabo un ensayo en el cultivo de espárrago con el objetivo de mejorar el movimiento y la acumulación de carbohidratos en las reservas, buscando homogeneizar en cosecha los tamaños de los turiones, promover la uniformidad en el crecimiento y concentrar la cosecha en las primeras fechas para acortar la duración de la temporada. Esto, a su vez, ayudaría a reducir la incidencia de plagas y enfermedades comunes y problemáticas en los brotes tardíos.

El primer parámetro evaluado fue el rendimiento a la cosecha, verificándose una diferencia de casi 35 kg por hectárea en las primeras 10 cosechas entre el tratamiento y el grupo control.

Luego de realizado el chapado y el primer riego, las cosechas se llevaron a cabo a diario en dos turnos (mañana y tarde) como se observa en el detalle fotográfico de la cosecha y el pesaje de la Figura 11.



Figura 11. Detalle fotográfico de la cosecha y el pesaje

Se hizo el seguimiento y pesaje de lo extraído como cosecha durante la campaña. Los resultados se encuentran detallados en la Tabla 10 donde se registran los pesos obtenidos por fecha. En la misma tabla se detallan las diferencias de ambos tratamientos por día y en el acumulado total.

Tabla 10. Resultados del rendimiento a la cosecha obtenidos a partir de las parcelas en evaluación

Fecha	Cosecha (kg/ha)		Diferencia
	Testigo (0 g Mo/ha)	Dosis de Mo (220 g Mo/ha)	
27/04	108	159	51
28/04	168	190.75	22.75
30/04	166	226.75	60.75
02/05	150.5	176.75	26.25
03/05	151	176.5	25.5
04/05	154	184.75	30.75
05/05	142.61	159.36	16.75
07/05	243.75	283.25	39.5
08/05	175.25	217	41.75
09/05	166.25	201	34.75
Total	1625.36	1975.11	349.75
Promedio	162.54	197.51	34.98

Según los resultados obtenidos en las diez fechas evaluadas se observan diferencias significativas en el peso de y en el rendimiento acumulado. Es importante mencionar que ambos grupos experimentaron una dinámica de cosecha similar ilustrada en la Figura 12.

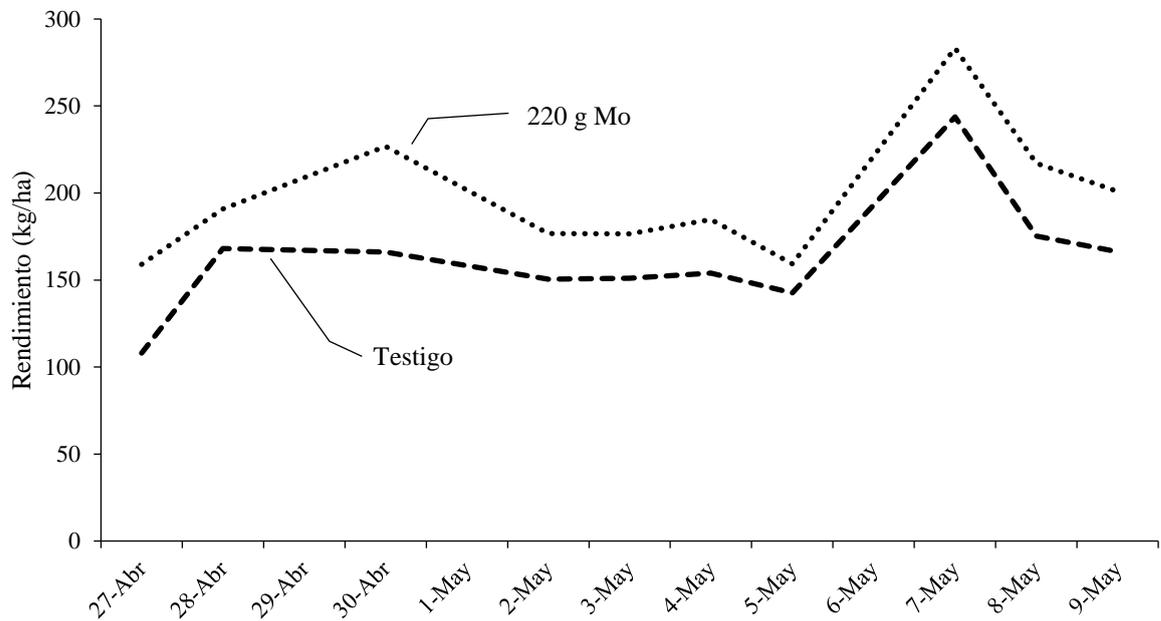


Figura 12. Dinámica del rendimiento de la cosecha de acuerdo a los tratamientos evaluados

Después de evaluar el rendimiento, se procedió a analizar los datos relacionados con el calibre (grosor) y el tamaño (longitud). Para medir estas variables, se tomaron al azar 30 turiones de jabas al azar como se observa en la Figura 13.



Figura 13. Detalle fotográfico de las jabas de donde se tomaron las muestras de turiones al azar para las evaluaciones respectivas

Se registraron las dimensiones y se calcularon los promedios diarios de grosor y longitud. Los detalles del registro de estas medidas se encuentran en las tablas las Tablas 11 y 12.

Tabla 11. Promedio diario del calibre (grosor) de acuerdo a los tratamientos evaluados

Fecha	Calibre (cm)		Diferencia
	Testigo (0 g Mo/ha)	Dosis de Mo (220 g Mo/ha)	
27/04	1	1.1	0.1
28/04	1	1.1	0.1
30/04	1	1.2	0.2
02/05	1.2	1.2	0
03/05	1.2	1.3	0.1
04/05	1.3	1.3	0
05/05	1.3	1.4	0.1
07/05	1.3	1.4	0.1
08/05	1.3	1.3	0
09/05	1.3	1.3	0
Promedio	1.19	1.26	0.07

Tabla 12. Promedio diario del tamaño (longitud) de acuerdo a los tratamientos evaluados

Fecha	Tamaño (cm)		Diferencia
	Testigo (0 g Mo/ha)	Dosis de Mo (220 g Mo/ha)	
27/04	23.7	24.17	0.47
28/04	23.89	24.81	0.92
30/04	22.85	22.85	0
02/05	24.1	24	-0.1
03/05	23.7	24.4	0.7
04/05	24.8	24.3	-0.5
05/05	23.8	24	0.2
07/05	23.7	24.2	0.5
08/05	22.7	23.2	0.5
09/05	24.4	24	-0.4
Promedio	23.76	23.99	0.23

Según los resultados obtenidos, se puede observar que el tratamiento con la aplicación de Mo mostró una ligera mejora en el calibre en comparación con el grupo de control. No obstante, es importante destacar que las diferencias observadas en los parámetros mencionados no fueron significativas.

El tercer y último parámetro evaluado se refiere al peso por turión. Este parámetro refleja la densidad del tejido y su calidad, y está directamente relacionado con el peso seco, el valor nutricional, la turgencia y, por ende, la vida útil después de la cosecha. Para comparar el peso, se seleccionaron turiones con un calibre y tamaño promedio equivalente, como se muestra en la imagen detallada en la Figura 14. En la parte izquierda de la figura se encuentran los turiones correspondientes al grupo de control, mientras que en la parte derecha se encuentran los turiones del grupo tratado con la aplicación de Mo.



Figura 14. Detalle fotográfico de los turiones semejantes en calibre y tamaño para la respectiva evaluación de los tratamientos.

Los diez turiones evaluados por tratamiento se seleccionaban bajo parámetros específicos, debían tener una longitud que no variara de 2 cm dando en conjunto un promedio equivalente como grupo. Asimismo como el mismo grosor en mm medido con un vernier.

Los detalles de los pesos promedio obtenidos por fecha, de 10 turiones similares seleccionados en ambos tratamientos, se detallan en la Tabla 13.

Tabla 13. Promedio diario del peso de 10 turiones equivalentes en calibre y tamaño de acuerdo a los tratamientos evaluados

Fecha	Peso (g)		Diferencia
	Testigo (0 g Mo/ha)	Dosis de Mo (220 g Mo/ha)	
27/04	16.95	16.95	0
28/04	24.39	27.03	2.64
30/04	27.77	29.41	1.64
02/05	31.25	37.04	5.79
03/05	30.3	40	9.7
04/05	33.3	38.46	5.13
05/05	35.71	38.46	2.75
07/05	38.46	40	1.54
08/05	33.3	38.46	5.16
09/05	35.71	37.04	1.33
Promedio	30.72	34.28	3.57

Se observaron los resultados significativos evidenciados en la tabla. En el mismo volumen los turiones tratados superaban a los pertenecientes al grupo de control en casi 4 gramos en promedio por turión. Si esta diferencia se multiplica por todos los turiones obtenidos por hectárea se llegan a tener diferencias en los rendimientos significativas.

Asimismo cabe resaltar que estos resultados provienen de un mejor aprovechamiento de los fotosintatos logrados durante el ciclo del cultivo y no representan un mayor desgaste de la corona, sino mas bien una menor pérdida de los mismos en la broza que se retira al chapodo.

Además, con la finalidad de hacer las diferencias más evidentes, en la Figura 15, se grafica una comparación específica donde se compara un turión de mayor dimensión proveniente del campo testigo con un turión ligeramente más pequeño proveniente del campo tratado. A pesar de ser más grande evidentemente, el brote perteneciente al grupo de control presentó un peso menor en comparación al tratamiento con la aplicación de molibdeno que poseía una dimensión ligeramente menor.

La diferencia de longitud entre la no aplicación y aplicación de molibdeno fue de 1.5 cm (Figura 15A) y, la diferencia de peso entre la aplicación y no aplicación de molibdeno fue de 0.87 g (Figuras 15B y 15C).



Figura 15. Detalle fotográfico de comparación específica de peso de turiones (A, B y C)

Se hizo evidente un incremento en la densidad de la savia y el peso de los turiones. Esto implica un aumento en los rendimientos en peso. Este incremento en los niveles de azúcares y la consiguiente materia seca, contribuyen a una mejor calidad del producto después de la cosecha y brindan una mayor garantía para el transporte internacional.

4.4 Resultados en cítricos

Según la experiencia descrita en el desarrollo de la experiencia profesional los resultados se basaron por un lado en la medición de los grados Brix, que se evaluaron a partir de las fechas de aplicación de los tratamientos. Y la toma de color evaluada a través de la concentración de la cosecha en las primeras fechas.

Para registrar la evolución de los grados brix se tomaron 10 frutos al azar por tratamiento. Se extrajo el jugo para su medición utilizando un refractómetro óptico y se registró el promedio.

En cuanto a resultados, el tratamiento que incluyó la aplicación de molibdeno exhibió una ventaja evidente en comparación con el grupo control en lo que respecta a la evolución de los grados Brix como se evidencia en la tabla 14. Al final de la evaluación, el tratamiento con molibdeno superó al grupo control en 0.63 grados Brix.

Tabla 14. Evolución semanal de los grados Brix (gramos de sacarosa en 100 gramos de solución) de acuerdo a los tratamientos evaluados

Fecha	Grados Brix		Diferencia
	Testigo (0 g Mo/ha)	Dosis de Mo (110 g Mo/ha)	
20/05	5.8	5.7	-0.1
27/05	6.5	7.0	0.5
03/06	7.2	7.9	0.7
10/06	8.6	9.2	0.6
17/06	9.3	10.3	1.0
24/06	10.5	11.6	1.1
Diferencia Promedio			0.63

Se hace evidente la ventaja del tratamiento con la aplicación de Mo frente al testigo en cuanto a la evolución de los grados Brix, el cual se inició con una ligera ventaja en favor del testigo.

Asimismo, con los datos obtenidos a partir de la medición semanal de la variable que se repitió en las seis fechas, se graficó la evolución de la concentración de azúcares en los frutos, detallada en la Figura 16.

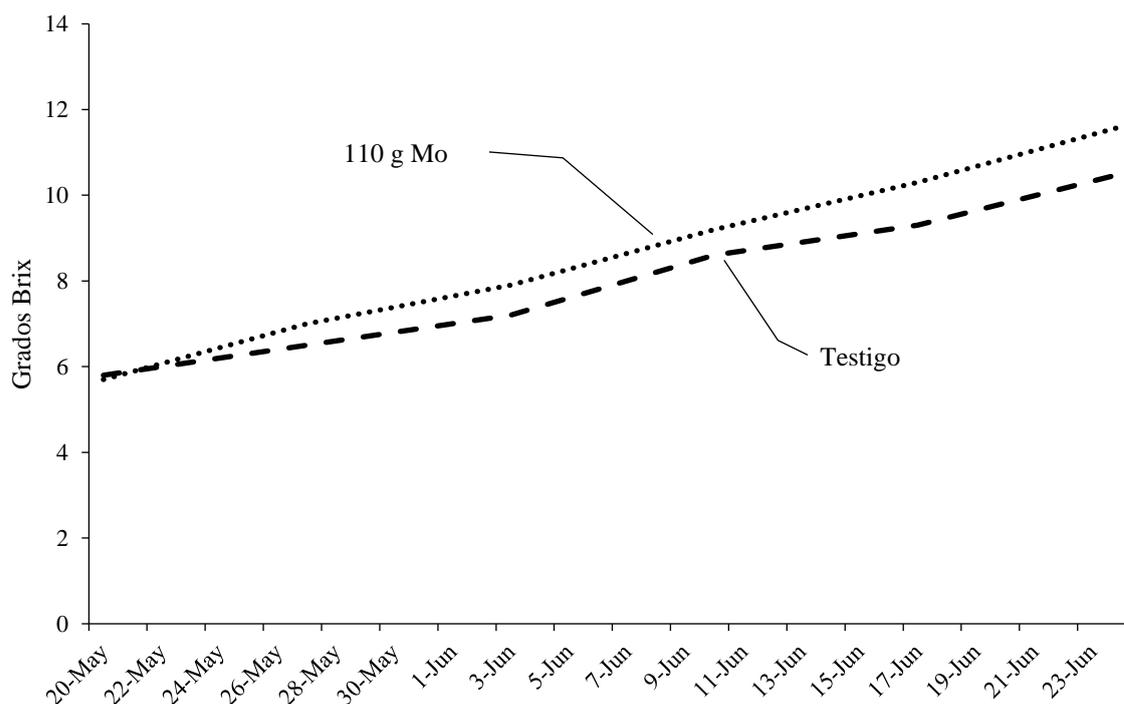


Figura 16. Evolución semanal de los grados Brix (gramos de sacarosa en 100 gramos de solución) a partir del inicio de la aplicación de los tratamientos evaluados

Para definir el efecto del molibdeno sobre el cambio de color, se tomó como referencia los kilogramos cosechados por día y su evolución durante las fechas de cosecha, según se iba acumulando. Al ser una mandarina tardía no se tiene acceso al desverdizado y el color debe estar completamente cerrado, lo que evidencia rápidamente si hay algún efecto de la adición de Mo sobre el ABA y la consecuente maduración de los frutos a cosechar.

La concentración de la cosecha que deriva de una toma de color más eficiente implica soluciones a nivel logístico, en mano de obra, en la inversión total de la cosecha, en el mantenimiento de los parámetros de Grados Brix y acidez solicitados por el comprador, en la reducción de la incidencia de plagas y enfermedades en la fruta colgada, etc.

Se tomaron los datos de las primeras tres cosechas, en las cuales el productor tiene el mayor interés en incrementar el volumen y se dispone del personal para las evaluaciones (posteriormente el personal va mucho más rápido entre líneas en rebusque y es imposible definir bins por sector de cosecha).

Se midió entonces peso de la cosecha concentrada en dos unidades de medición: Volumen (definido en bins/ha) de cosecha y su respectivo peso (definido en Kg/Ha) detallados en la Tabla 15.

Tabla 15. Bines y peso de cosecha obtenidos con y sin aplicación de molibdeno a lo largo de las cosechas monitoreadas

Cosecha	Testigo (0 g Mo/ha)	Dosis de Mo (110 g Mo/ha)
Desbrebe (Inicios Julio)	10	21
Primera Cosecha (Quincena Julio)	40	51
Segunda Cosecha (Inicios Agosto)	51	45
Total Cosecha Concentrada (Bines/ha)	101	117
Peso (kg/ha)	21 109	24 453
Diferencia (kg/ha)		3344
% Incremento de fruta con color cerrado		15.84 %

Se logró un aumento significativo en la concentración de la cosecha al aplicar molibdeno, alcanzando a cosechar el 40% del proyectado en las primeras cosechas, en comparación con el 35% del testigo. Este 5% adicional es equivalente a 8.3 toneladas adicionales cosechadas por hectárea, con ventajas en calidad, ya que en este período el descarte es menor al 5%.

Esta experiencia se llevó a cabo bajo la supervisión de FRUCHINCHA, institución que asocia

Estos resultados favorables se repitieron en experiencias posteriores en otros fundos asociados de la misma corporación FRUCHINCHA. Las ventajas obtenidas se replicaron en campos de agroexportadores como COPACABANA, LA FLORESTA, GRUPO FALCONE entre otros.

Además de los ensayos mencionados, se llevaron a cabo otras experiencias en varias ubicaciones, como San Vicente de Cañete, Lunahuaná, Herbay Bajo, El Carmen, Sunampe, Salas, Hoja Redonda, Chinchá Baja y Santa Fe de Lachas. En estas experiencias, se observaron diferentes respuestas a la adición de molibdeno que se exponen con la finalidad de marcar antecedentes para posteriores investigaciones.

Por ejemplo, en Lunahuaná, donde se observó un mayor aporte de materia orgánica y variaciones en la temperatura, el efecto del molibdeno en toma de color fue menos pronunciado. En Sunampe y Santa Fe de Lachas, suelos pedregosos con baja retención de agua y alta lixiviación, el impacto del molibdeno fue más significativo en cuanto al desarrollo del cultivo y crecimiento que a la maduración del fruto. En Salas, Hoja Redonda y El Carmen, donde los suelos eran arcillosos y propensos a encharcamientos no se sintieron diferencias significativas. En Chíncha Baja y Santa Fe de Lachas, donde había problemas severos de salinidad, se observaron dos situaciones extremas: en los cultivos bien manejados, se logró concentrar hasta el 50% de la cosecha en las primeras tres fechas (un 15% más que el grupo control sin tratamiento). Sin embargo, en cultivos con problemas de estrés, el molibdeno favoreció a la planta en cuanto a la respuesta a las condiciones supresoras. El etileno producido durante estos estados de estrés favoreció el cambio de color, pero la cosecha resultó con una disminución de la calidad y vida postcosecha además de verse reducido el tamaño de los frutos y caerse la acidez. y se observó defoliación severa y caída de frutos. Estas situaciones se presentaron en menor medida en los campos tratados con Mo donde el % de descarte resultó de 3-8% menor.

V. CONCLUSIONES

- La aplicación preventiva de molibdeno en etapas críticas del crecimiento y desarrollo de los cultivos estudiados proporciona múltiples ventajas para la producción agrícola.
- La disponibilidad de molibdeno se ve influenciada por factores como la estructura del suelo, el pH, el nivel de erosión, la cantidad de arcilla y la materia orgánica presente en el suelo. La eficacia de la enmienda con molibdeno varía según el estado fenológico del cultivo, los objetivos perseguidos, el nivel de estrés al que se somete el cultivo y las condiciones de la aplicación.
- En el caso del maíz, la necesidad de adicionar molibdeno depende del tipo de fuente nitrogenada utilizada. Cuando se emplean fuentes nitrogenadas a base de urea difícilmente la adición de molibdeno refleja resultados significativos.
- Para las leguminosas, debido a su alta demanda y los efectos positivos registrados en el desarrollo, se concluye que es necesario aplicar una dosis suplementaria de molibdeno en las primeras etapas de crecimiento vegetativo, donde se concentra el mayor requerimiento.
- En el caso del espárrago, la adición de molibdeno en etapas de translocación favorece un adecuado comportamiento de las fitohormonas relacionadas con el proceso, como el ABA. Se incrementa el rendimiento en peso y la densidad del tejido.
- En cítricos, la adición de molibdeno influye positivamente en la concentración y calidad de la cosecha, aunque este efecto está condicionado por un manejo adecuado del cultivo y la variedad tratada.
- La aplicación preventiva de molibdeno en áreas con alta probabilidad de deficiencia, donde no se disponga de análisis de suelo ni tecnología agrícola avanzada, ha mostrado efectos positivos en la investigación exploratoria. Dado que las dosis requeridas son bajas y las fuentes de molibdeno son económicas, la aplicación preventiva podría considerarse como una alternativa viable en áreas propensas a la carencia de este micronutriente.

VI. RECOMENDACIONES

- Se recomienda considerar la aplicación dirigida de molibdeno como una estrategia efectiva para mejorar el rendimiento y la calidad de los cultivos que lo requieran en las condiciones y etapas de crecimiento de mayor demanda..
- Realizar más investigaciones sobre el efecto del molibdeno en la fisiología y rendimiento de otros cultivos de importancia económica en el Perú.
- Repetir ensayos y cuantificar, con la finalidad de registrar tendencia, los efectos deseados que podrían mejorar la rentabilidad de los cultivos observados.
- Se ha identificado una carencia de investigaciones locales relacionadas con el efecto del molibdeno en diversos cultivos. Dado que la fisiología de los cultivos es específica y depende del entorno en el que se desarrollan, resulta crucial iniciar investigaciones en diferentes condiciones edafoclimáticas del Perú.

VI. BIBLIOGRAFÍA

- Al-Issawi, M., Rihan, H. Z., Woldie, W. A., Burchett, S., & Fuller, M. P. (2013). Exogenous Application of Molybdenum Affects the Expression of CBF14 and the Development of Frost Tolerance in Wheat. *Plant Physiology and Biochemistry*, 63, 77-81. Doi: 10.1016/j.plaphy.2012.11.010.
- Appleby, C. A. (1984). Leghemoglobin and Rhizobium respiration. *Annual Review of Plant Physiology*, 35, 443-478.
- Arnon, D. I., & Stout, P. R. (1938). The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. *Plant Physiology*, 13(3), 371-375.
- Azcón Bieto, J., & Talón, M. (2013). *Fundamentos de Fisiología Vegetal* (2da ed.). McGRAW-HILL - INTERAMERICANA DE ESPAÑA, S. L.
- Baran, E. J. (1995). *Química Bioinorgánica*. McGraw-Hill Interamericana de España S.A., Madrid.
- Baran, E. J. (2021). *Metaloenzimas de plantas*. ANCEF - Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. (Publicaciones científicas; 17). ISBN 978-987-4111-16-6.
- Bennet, W. F. (1993). *Nutrient Deficiencies and Toxicities in Crop Plants*. The American Phytopathological Society.
- Becking, J. H. (1961). Plant growth substances produced by the root nodule bacteria. *Proceedings of the Plant Nutrition Colloquium*, 404-418.
- Castellanos, J. Z., Uvalle, J. X., & Aguilar, S. A. (2000). *Manual de Interpretación de Análisis de Suelo y Planta* (2da ed.). INCAPA.

- Cheng Oullete, A. (1973). Soil and Plant Nitrogen. In R. W. F. Hardy & W. S. Silver (Eds.), *A Treatise on Dinitrogen Fixation* (Vol. 4, pp. 181–256). John Wiley & Sons.
- Coelho, F. C., Vieira, C., Mosquim, P. R., & Cassini, S. T. A. (1998). Nitrogeno e Molibdenio nas culturas do milho e do Feijao em monocultivos e em consorcio. *Efeitos sobre o Milho. Revista Ceres*, 45(261), 479-489.
- Cutler, S. R., Rodriguez, P. L., Finkelstein, R. R., & Abrams, S. R. (2010). Abscisic Acid: Emergence of a Core Signaling Network. *Annual Review of Plant Biology*, 61(1), 651-679. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042809-112122>
- El-Samad, H. M. A., El-Komy, H. M., Shaddad M. A. K., & Hetta, A. M. (2005). Effect of Molybdenum on Nitrogenase and Nitrate Reductase Activities of Wheat Inoculated with *Azospirillum brasilense* Grown Under Drought Stress. *General and Applied Plant Physiology*, 31(1-2), 43-54.
- Fageria, N. K., Baligar, V. C., & Jones, C. A. (1997). *Growth and Mineral Nutrition of Field Crops* (2nd ed.). Marcel Dekker.
- Fageria, N. K. (2009). *The Use of Nutrients in Crop Plants* (1st ed.). Taylor & Francis Group, LLC.
- Franco, A. A., & Day, J. M. (1980). Effects of molybdenum on symbiotic nitrogen fixation. En: *Molybdenum in the Environment. Molybdenum 1980*, vol 21, p. 221-241. Springer, Dordrecht.
- Franco, A. A., & Munns, D. N. (1981). Symbiotic N₂ Fixation and Plant Molybdenum Content. *Agronomy Journal*, 73(6), 999-1003.
- Garner, C. D., Banham, R., Cooper, S. J., Davies E. S., & Stewart, L. J. *Enzymes and Proteins Containing Molybdenum and Tungsten*. En: *Handbook of Metalloproteins*, I. Bertini, A. Sigel & H. Sigel (Eds.), Marcel Dekker, New York, 2001, pp. 1023-1090.

- Ghafarian, A. H., Zarghami, R., Zand, B., & Bayat, V. (2013). Wheat Performance as Affected by Foliar Application of Molybdenum (Mo) Under Drought Stress Condition. *International Journal of Agronomy and Plant Production*, 4(11), 3050-3056. Disponible en línea en <http://www.ijappjournal.com>. ISSN 2051-1914.
- Graham, R. D., & Stangoulis, J. C. R. (2007). In: Welch R.M. & Graham R.D. (Eds.), *Breeding for micronutrients in staple food crops from a human nutrition perspective*. En: K.J. Horst *et al.* (Eds.), *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. Academic Press.
- González, E., Gálvez L., Marino D., Ladrera R., Larrainzar L. y Arrese-Igor C. (2006). Metabolismo carbonado y nitrogenado en nódulos en la fijación de nitrógeno. En: *Fundamentos y Aplicaciones*. Sociedad Española de Fijación de Nitrógeno.
- Gupta, U. C. (1997). Molybdenum in Agriculture. In J. J. Rechcigl (Ed.), *Handbook of Plant Nutrition* (pp. 785-805). CRC Press.
- Hakoyama, T., Niimi, K., Watanabe, H., Tabata, R., & Matsunaga, S. (2009). The difference between *Lotus japonicus* accessions in the regulation of senescence and nitrogen fixation in symbiotic association with *Mesorhizobium loti*. *Plant and Cell Physiology*, 50(1), 121-124
- Havlin, J. L., Beaton, J. D., Tisdale, S. L., & Nelson, W. L. (1999). *Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management* (6th ed.). Prentice Hall, Upper Saddle River.
- Hölttä, T., T. Vesala, S. Sevanto, M. Perämäki y E. Nikinmaa. (2006). Modeling xylem and phloem water flows in trees according to cohesion theory and Münch hypothesis. *Trees- struct. Func.*, 20(1), 67-78.
- INTAGRI. (s.f.). *Funciones del Molibdeno en la Nutrición de los Cultivos*. [Enlace URL: www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/funciones-del-molibdeno-en-la-nutricion-de-los-cultivos]
- Jung Dae Lim, Cho Jung-II, Park Youn-II, Hahn Tae-Ryong, Choi Sang-Bong, Jeon Jong-Seong. (2006). Sucrose transport from source to sink seeds in rice. *Physiol. Plant*,

126(4), 572-581.

- Kaiser, B. N., Gridley, K. L., Brady, N., Phillips, T., & Tyerman, S. D. (2005). The Role of Molybdenum in Agricultural Plant Production. *Annals of Botany*, 96, 745-754.
- Kirkby, E. A., & Römheld, V. (2007). *Mineral Nutrition of Higher Plants* (2nd ed.). Academic Press.
- Kirkby, E. A., & Mengel, K. (2000). Practical significance of mineral nutrition. In E. A. Kirkby, K. Mengel, R. C. Kosegarten, & H. Appel (Eds.), *Physiological Plant Ecology: I. Responses to the Physical Environment* (pp. 205–297). Springer.
- Koshiha, T., Saito, E., Ono, N., Yamamoto, N., & Sato, M. (1996). Purification and properties of flavin- and molybdenum-containing aldehyde oxidase from coleoptiles of maize. *Plant Physiology*, 110, 781-789.
- Kroneck, P. M. H., & Abt, D. J. (2002). Molybdenum in nitrate reductase and nitrite oxidoreductase. *Met Ions Biol Syst*, 39, 369-403. PMID: 11913131.
- Lindsay, W. L. (1979). *Chemical Equilibria in Soils*. John Wiley & Sons.
- Lucas, R. E., & Davis, J. F. (1961). Relationships Between pH Values of Organic Soils and Availabilities of 12 Plant Nutrients. *Soil Science*, 92(3), 177-182. <https://doi.org/10.1097/00010694-196109000-00005>
- Marschner, H. (2012). *Mineral Nutrition of Higher Plants* (3rd ed.). Academic Press.
- Mendel, R. R., & Hänsch, R. (2002). Molybdoenzymes and molybdenum cofactor in plants. *Journal of Experimental Botany*, 53(375), 1689-1698. <https://doi.org/10.1093/jxb/erf038>
- Mundy, G. N., Jones, H. R., & Mason, W. K. (2003). Nitrogen fixation activity by white clover pastures during flood irrigation cycles. *Aust. Jour. Agric. Res.*, 39, 409-414.
- Nelson, W. L., & Tisdale, S. L. (1970). *Fertilidad de los suelos y fertilizantes*, Ed. Montaner y Simón S.A. E.E.U.U 760 pp.

- Ocaña, J. (2016). Aplicación de molibdeno y cobalto en Frijol (*Phaseolus vulgaris*) con dos sistemas de fertilización bajo cero labranza. Tesis de maestría, Universidad Nacional Agraria La Molina. Recuperada de BAN – UNALM.
- Pérez-González, A., Gómez-Peralta, J. I., Garza-Ortiz, A., & Barba-Behrens, N. (2012). Importancia del molibdeno en los sistemas biológicos y su papel en enzimas mononucleares como parte del cofactor Moco. *Educación Química*, 23(1). ISSN 0187-893X.
- Pinto, M., & Díaz, D. (2017). Charlas y publicaciones del Centro de Pomáceas de la U. de Talca ponencias de la empresa mexicana Agroenzymas. Citados por Red Agrícola Chile.
- Parfitt, R. L. (1978). Adsorption of phosphate, sulphate, and molybdate by soils. *European Journal of Soil Science*, 29(1), 2-12.
- Rolland, F., Baena-González, E., & Sheen, J. (2006). Sugar sensing and signaling in plants: Conserved and Novel Mechanisms. *Annu. Rev. Plant Biol.*, 57, 675-709.
- Schwarz, G., & Mendel, R. R. (2006). Molybdenum cofactor biosynthesis and molybdenum enzymes. *Annual Review of Plant Biology*, 57, 623-647.
- Seo, M., & Koshiba, T. (2002). Complex regulation of ABA biosynthesis in plants. *Trends in Plant Science*, 7(1), 41-48. [https://doi.org/10.1016/s1360-1385\(01\)02187-2](https://doi.org/10.1016/s1360-1385(01)02187-2)
- Serraj, R., Sinclair, T. R., & Purcell, L. C. (1999). Symbiotic N₂ fixation response to drought. *Journal of Experimental Botany*, 50(331), 143-155.
- Sillanpaa, M. (1990). *Micronutrient Assessment at the Country Level: An International Study*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 216 pp.
- Stiefel, E. I. (2002). The Biogeochemistry of Molybdenum and Tungsten. En: A. Sigel & H. Sigel (Eds.), *Metal Ions in Biological Systems*, Vol. 39, Marcel Dekker, New York, pp. 1-29.
- Sun, X., Hu, C., Tan, Q., Liu, J., & Liu, H. (2009). Effects of Molybdenum on Expression of Cold-Responsive Genes in Abscisic Acid (ABA)-Dependent and ABA-

Independent Pathways in Winter Wheat Under Low-Temperature Stress. *Annals of Botany*, 104(2), 345–356.

Sylvia, D. M., Fuhrmann, J. J., Hartel, P. G., & Zuberer, D. A. (2005). *Principles and Applications of Soil Microbiology*. Pearson Prentice Hall.

Swaine, D. J. (1995). *Chemistry and Agriculture: Nitrogen in the Environment*. Academic Press.

Tischner, R. (2000). Nitrate uptake and reduction in higher and lower plants. *Plant, Cell and Environment*, 23, 1005-1024. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2000.00595.x>

Urzúa, H., Ruíz, M., & Bernier, R. (1986). Fijación de nitrógeno en praderas de la X Región. *Ciencia e Investigación Agraria*, 14, 217-223.

Wang, J., Keceli, G., Cao, R., Su, J., & Mi, Z. (2016). Molybdenum-containing nitrite reductases: Spectroscopic characterization and redox mechanism. *Redox Report: Communications in Free Radical Research*, 22(1), 17-25. <https://doi.org/10.1080/13510002.2016.1206175>

Wallace, J. (1970). *Las Deficiencias Minerales de las Plantas: Su Diagnóstico a través de los Síntomas Visuales*. Ariel. España, 169 páginas.

Wu, S., Hu, C., Tan, Q., Xu, S., & Sue, X. (2017). Nitric oxide mediates molybdenum-induced antioxidant defense in wheat under drought stress. *Plant Sci.*, 8, 1085. doi.org/10.3389/fpls.2017.01085.

Wu, S., Hu, C., Tan, Q., Nie, Z., & Sun, X. (2014). Effects of Molybdenum on Water Utilization, Antioxidative Defense System, and Osmotic-Adjustment Ability in Winter Wheat (*Triticum aestivum*) Under Drought Stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 83, 365-374. Doi: 10.1016/j.plaphy.2014.08.022.

Wu, S., Hu, C., Tan, Q., Zhao, X., Xu, S., Xia, Y., & Sun, X. (2018). Nitric oxide acts downstream of abscisic acid in molybdenum-induced oxidative tolerance in wheat. *Plant Cell Reports*, 37(4), 599-610. doi: 10.1007/s00299-018-2254-0.

- Yu, L. X., Sun, J. H., Li, L. L., Gao, Y., & Zhao, J. (1999). Transformation of beta-2 monoclinic MoO₃ nanobelts to orthorhombic MoO₃ nanobelts and the gas-sensing properties. *European Journal of Inorganic Chemistry*, 1999(1), 237-242.
- Zhang, M., Hu, C., Zhao, X., Tan, Q., Sun, X., Cao, A., Cui, M., & Zhang, Y. (2012). Molybdenum improves antioxidant and osmotic-adjustment ability against salt stress in Chinese cabbage (*Brassica campestris* L. ssp. *Pekinensis*). *Plant and Soil*, 355, 375–383. Doi: 10.1007/s11104-011-1109-z.
- Zurita, A., Urzúa, H., Longeri, L., & Herrera, A. (1994). Factores del suelo limitantes del crecimiento de la alfalfa en cuatro suelos de la X Región. I. Disponibilidad de nutrientes. *Ciencia e Investigación Agraria*, 21, 137-144.

VII. ANEXOS

Anexo 2. Ficha técnica del producto foliar a base de molibdeno usado en los ensayos del presente trabajo

FICHA TÉCNICA
MOVAXIÓN®



MOVAXIÓN® es un formulado especial desarrollado para una provisión eficiente de molibdeno, elemento esencial para el desarrollo de los cultivos, favoreciendo la asimilación y metabolismo del nitrógeno y un mejor aprovechamiento de otros nutrientes como fósforo y potasio.

MOVAXIÓN® facilita la translocación de azúcares y carbohidratos dentro de la planta hacia los órganos de reserva.

Composición Química (p/v)

Oxido de Molibdeno (MoO ₃)	82.5 g/l
Molibdeno (Mo)	55.0 g/l
Ácidos Orgánicos	25.0 g/l

Características Físico-Químicas del Producto

Estado	Líquido
Color	Marrón
Olor	Característico del producto
Densidad	1.05 - 1.15 g/cm ³
pH	4.0 - 8.0 (solución al 5% a 20 °C)
Solubilidad en agua	100 %

Actualizado enero 2023 / www.finka.com.pe Página 1 / 3

MOVAXION® se aplica al suelo, vía sistema de riego tecnificado o en riego convencional diluyendo en suficiente volumen de agua para asegurar la cobertura completa y uniforme de la plantación.

Hortalizas	Dosis (L/Ha/aplicación)
Control de vigor vegetativo	1.00 a 1.50
Maduración de la cosecha (30 a 45 días antes de la cosecha)	1.50 a 2.00

Frutales	Dosis (L/Ha/aplicación)
Control de vigor vegetativo	1.50 a 2.00
Maduración de la cosecha (30 a 45 días antes de la cosecha)	2.00 a 4.00

Precauciones para el manejo y almacenamiento del producto

- Manténgase fuera del alcance de los niños.
- Almacenar bajo sombra, en lugar fresco y ventilado, fuera de la exposición directa del sol.
- No transportar junto con alimentos y/o animales.
- Para mayor información referirse al MSDS del producto.
- Para consultas adicionales contacte con el Departamento Técnico al (01) 719 2800.

Presentación

Frasco x 1 L
Galonera x 5 L
Bidón x 20 L

Departamento de Investigación y Desarrollo, FINKA SAC.

Dosis y recomendaciones de uso

MOVAXIÓN® se aplica de forma foliar, diluyendo en suficiente volumen de agua para asegurar la cobertura completa y uniforme de la planta.

Cultivos	Momento de Aplicación	Dosis	
		(L/Ha/aplic.)	(L/200 L agua)
Hortalizas: Ajo, apio, camote, cebolla, crucíferas (brócoli, col, coliflor), culantro, espinaca, lechuga, olluco, papa, perejil, poro, nabo, rabanito, yuca, zanahoria, alcachofa, capsicum (ajíes, pimiento, paprika, etc.), cucurbitáceas (calabaza, melón, pepinillo, sandía, zapallo), leguminosas (arveja, frijol, haba, garbanzo, soya, vainita) tomate.	Control de vigor vegetativo: Aplicar cuando la planta manifiesta crecimientos vegetativos excesivos.	0.70 a 1.50	0.35 a 0.50
	Llenado y Maduración de frutos: Aplicar en forma foliar y repetir la aplicación a los 10 a 12 días. La última aplicación debe ser realizada de 25 a 30 días antes de la cosecha.	1.00 a 2.00	0.50 a 1.00
Arroz, maíz, cereales (avena, cebada, quinua, kiwicha, sorgo, trigo)	Aplicar para favorecer el metabolismo del nitrógeno cuando se emplea alta dosis de fertilizante nitrogenado.	0.70 a 1.50	0.35 a 0.50
Frutales: Berries, arándano, cereza, etc), cítricos (naranja, tangelo, mandarina, limón), café, durazno, fresa, granada, lúcuma, cacao, pitahaya, mango, manzana, maracuyá, nueces, olivo, palto, pera, piña, vid.	Control de vigor vegetativo: Aplicar cuando la planta manifiesta crecimientos vegetativos excesivos.	1.00 a 2.00	0.35 a 0.50
	Llenado y Maduración de frutos: Aplicar en forma foliar y repetir la aplicación a los 10 a 12 días. La última aplicación debe ser realizada de 20 a 30 días antes de la cosecha.	1.50 a 3.00	0.35 a 0.50
Industriales, Forrajeras, Ornamentales: Caña de azúcar, esparrago, té, palma aceitera, oleaginosas industriales, alfalfa y forrajeras Ornamentales	Aplicar para favorecer el metabolismo del nitrógeno cuando se emplea alta dosis de fertilizante nitrogenado.	1.00 a 2.00	0.50 a 0.75

Anexo 3. Hoja de Seguridad del producto foliar a base de molibdeno usado en los ensayos del presente trabajo

HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD DEL MATERIAL					
MOVAXIÓN®					
1. IDENTIFICACIÓN DE LA SUSTANCIA/PREPARADO Y DE LA EMPRESA					
1.1 Identificación de la sustancia o del preparado					
Nombre del producto : MOVAXIÓN®					
Nombre químico : Fertilizante en base a molibdeno.					
Usos : Fertilizante de Molibdeno para aplicación foliar y al suelo.					
1.2 Identificación de la empresa:					
FINKA SAC					
Psje. Combate de Abtao 140, Santiago de Surco-Lima, Perú					
Teléfono: (511) 01 719 2800					
comercial@qcorp.com.pe					
2. COMPOSICIÓN / INFORMACIÓN SOBRE LOS COMPONENTES DEL PRODUCTO					
2.1 Componentes					
Nombre químico		CAS N°	Concentración	Límite de exposición (ACGIH)	Símbolos / Frases de Riesgo
No contiene productos peligrosos					
3. IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS					
3.1 Información general					
Exposiciones prolongadas a los vapores del producto a altas concentraciones puede causar irritación de la garganta, ojos y dolor de cabeza; en caso de ingestión causa malestar y náuseas.					
3.2 Potenciales efectos sobre la salud					
No tiene efectos perjudiciales para la salud si se usa de acuerdo a las instrucciones de la etiqueta.					
3.3 Potenciales efectos en el medio ambiente					
No verter los desechos del producto en corrientes de agua, canales, etc. Debido a su valor de nutriente podría contribuir a la eutrofización en masas de agua. Cualquier desecho, derrame o salida debe ser contenido y desechado como un fertilizante.					
4. MEDIDAS DE PRIMEROS AUXILIOS					
Inhalación: Si se presentan síntomas, retirar a la persona fuera del área contaminada llevándola al aire fresco. Se indica el suministro suplemental de Oxígeno. Obtenga atención médica inmediatamente.					
Ojos: Inmediatamente Lavar los ojos con abundante agua durante al menos 15 minutos levantando los párpados para lavar completamente todo el ojo y el tejido conjuntivo. Obtenga atención médica inmediatamente.					
Ingestión: Nunca le dé nada por la boca a una persona inconsciente. Hacer beber al paciente varios vasos de agua tibia o leche para inducir al vómito introduciendo un dedo en la garganta y llamar al médico inmediatamente. Retirar los contenidos por succión gástrica.					
Piel: En caso de irritación, lave abundantemente con agua y jabón la zona afectada, lave la ropa antes de reutilizar. No intente neutralizar con químicos. No aplique grasa o ungüentos. Obtenga atención médica inmediatamente.					
Actualizado enero 2023 / www.finka.com.pe					
Página 1 4					

HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD DEL MATERIAL



MOVAXIÓN®

5. MEDIDAS DE LUCHA CONTRA INCENDIOS

Punto de estallido:	No disponible
Límite de inflamabilidad:	LEL: No establecido UEL: No establecido
Medios de extinción adecuados:	Emplear todos los medios recomendados para combatir fuegos en los alrededores. Use CO ₂ , Polvo químico seco, Espuma de alcohol.
Vestimenta/Equipamiento de protección especial:	Emplear ropa con equipo de respiración asistida
Productos en caso de fuego:	Humos tóxicos pueden generarse a elevadas temperaturas.

6. MEDIDAS EN CASO DE DERRAME

Precauciones del personal:	Asegure la ventilación adecuada del área de trabajo. Vestir ropas y equipos de protección personal.
Peligros específicos:	Ninguno conocido.
Vestimenta del personal:	Antes de manipular el producto, es conveniente que el operario cuente con indumentaria de trabajo resistente. Use guantes de goma natural, lentes de seguridad resistente contra proyecciones de la sustancia química, calzado cerrado no absorbente y de planta baja
Precauciones ambientales:	Asegure que el producto derramado no llegue a canales, vías, cuerpos de agua o sistemas de drenaje.
Métodos de limpieza:	El producto derramado debe recogerse y colocarlo en un contenedor para desecho. Absorber los desechos en un medio inerte (aserrín, arena, etc.) y deséchelo como si fuera un sólido.

7. MANIPULACIÓN Y ALMACENAMIENTO

Manipulación:	Evitar contacto con la piel y los ojos. Usar guantes protectores y lavarse las manos con agua y jabón al terminar la manipulación.
Almacenamiento:	Mantener en sus envases originales. Los contenedores no deben ser expuestos a la luz directa, al calor, al congelamiento ni la humedad. Los contenedores deben mantenerse cerrados y sin dañar. Mantener fuera del alcance de los niños y animales domésticos. No almacene con alimentos y medicinas de consumo humano o animal.

8. CONTROLES DE EXPOSICIÓN / PROTECCIÓN PERSONAL

Límites de Exposición Permisible (LEP = PEL) OSHA:	No establecidos
Umbral de Valor Límite (UVL = TVL):	No establecidos
Protección respiratoria:	Las requeridas por las condiciones de trabajo. Use un respirador aprobado por OSHA o NIOSH si es requerido.
Ventilación:	Una ventilación general es usualmente adecuada. Un sistema de ventilación local debe ser usado para mantener el ambiente de trabajo seguro y confortable.
Protección de la piel y los ojos:	Usar gafas de seguridad a prueba de salpicaduras bajo cualquier condición de manipulación del producto. Use un respirador de completa cobertura facial cuando haya condiciones de salpicaduras. Usar guantes de goma de butilo para protección bajo cualquier condición de manipulación del producto.

HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD DEL MATERIAL



MOVAXIÓN®

Otras medidas de control Siempre debe estar disponible facilidades para lavarse los ojos y el cuerpo. Asearse completamente después del manipuleo del producto. No fume cuando manipule químicos.

9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

Aspecto / Color / Olor:	Líquido concentrado / Marrón / Característico del producto.
Punto de ebullición:	100 °C
Densidad (g/cm³):	1.05 - 1.15 g/cm³
pH:	4.0 - 8.0 (solución al 5% a 20°C)
Presión de vapor (mm hg):	No aplicable
Porcentaje de volatilidad por volumen:	No aplicable
Densidad de vapor (aire = 1):	No disponible
Tasa de evaporación (Etil éter = 1):	No disponible
Solubilidad en agua:	100 %
Reactividad en agua:	Ninguna
Temperatura de auto ignición:	No disponible

10. ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

Estabilidad:	Estable
Incompatibilidad, Materiales a prevenir:	Oxidantes y ácidos pueden causar degradación.
Productos peligrosos por descomposición:	Ninguno
Peligro de polimerización:	Ninguno

11. INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

11.1 DATOS TOXICOLÓGICOS	
DL50 (Oral en ratas)	= No disponible
DL50 (Dermal en conejos)	= No disponible
CL50 (Inhalación en ratas)	= No disponible

11.2 CARCINOGENICIDAD O POTENCIAL DE CARCINOGENICIDAD

NTP	No
IARC	No
OSHA	No

11.3 EFECTOS DE SOBRE-EXPOSICIÓN

11.3.1 Agudos.

Inhalación:	Prolongada exposición puede causar dolor temporal de la garganta y dolor temporal de la cabeza.
Ojos:	Prolongadas exposiciones de vapores puede causar irritación de ojos y lesiones en los ojos.
Ingestión:	Puede causar malestares, náuseas, diarrea y muerte si no se tratan con prontitud.
Piel:	Puede causar ligeras irritaciones e incomodidad

11.3.2 Crónicos.

No se tiene información de datos de Pruebas Crónicas.

HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD DEL MATERIAL



MOVAXIÓN®

12. INFORMACIÓN ECOLÓGICA

12.1 Efectos ecotóxicos

Los datos disponibles sobre este material nutriente de plantas no indican ningún peligro indebido para el entorno ambiental bajo almacenamiento y uso anticipado.

12.2 Informaciones adicionales

Este producto no ha sido probado para evaluar efectos sobre el entorno ambiental. Si se derramara en el ambiente marino podría ser tóxico para los peces u otros organismos marinos y debido a su valor de nutrientes podrían contribuir a la eutricación en masas de agua. Cualquier desecho debido a derrame o salida debe ser contenido y desechado como un fertilizante.

13. INFORMACIÓN SOBRE ELIMINACIÓN DE RESIDUOS DEL PRODUCTO Y DE LOS ENVASES

13.1 Métodos para el desecho de residuos

Deseche residuos cumpliendo las leyes nacionales y locales concernientes a la salud y el entorno ambiental.

13.2 Desecho de Envases y Recipientes

Después de usar el contenido enjuague tres veces el envase y vierta la solución en la mezcla de aplicación, luego inutilice el envase, triturándolo o perforándolo y deposítelo en los sitios destinados por las autoridades locales para este propósito.

Nunca reutilice los envases y recipientes para almacenar agua y/o alimentos para consumo humano o animal.

14. TRANSPORTE DEL PRODUCTO

Nombre Indicado para el embarque:

Calificación de Peligrosidad para el Transporte:

Información adicional:

MOVAXIÓN®
(Fertilizante)

Material No Peligroso

Material No Regulado

15. INFORMACIÓN REGULATORIA

No disponible

16. OTRA INFORMACIÓN

FINKA S.A.C. considera que la información contenida en esta Hoja de Datos de Seguridad del Material es correcta basada en el estado actual de nuestro conocimiento y esta es proporcionada sin garantía de ninguna índole, expresa o implícita.

La información está diseñada sólo como una guía de manipuleo, uso, almacenamiento, transporte, eliminación y disposición seguros y no debe ser considerado como garantía o especificación de calidad del material. La información se refiere sólo al material específico designado y puede no ser válido para el material utilizado en combinación con otros materiales o en otro proceso, a no ser especificado en el texto.

Departamento de Investigación y Desarrollo, FINKA SAC.

Actualizado enero 2023 / www.finka.com.pe

Página 4 | 4