

INTRODUCCIÓN

La fertilización es una práctica agrícola para mejorar la productividad de los cultivos y garantizar los nutrientes en el suelo para que las plantas puedan aprovechar para su desarrollo. Los fertilizantes que contienen nitrógeno, fósforo y potasio desempeñan un papel fundamental en el desarrollo vegetal. Sin embargo, la disponibilidad de estos fertilizantes en el suelo depende de su solubilidad, lo que influye directamente con la absorción de las plantas, en la actualidad la agricultura moderna enfrenta un desafío constante de producir alimentos lo necesario como para poder satisfacer la demanda de la población y el problema de la baja producción se debe a que los suelos no contienen los nutrientes que la planta requiere en sus diferentes etapas de su desarrollo, por lo que en la actualidad los fertilizantes químicos son de gran importancia para obtener una buena producción y los agricultores recurren a los fertilizantes sin embargo no saben la cantidad y cuando es el momento adecuado para la aplicación de estos productos. Ante esta problemática, es necesario contar con herramientas que permitan evaluar de forma precisa el comportamiento de los fertilizantes en el suelo. Una de estas herramientas es el lisímetro, un instrumento diseñado para simular el comportamiento del agua y los nutrientes en el perfil del suelo, permitiendo medir con exactitud las pérdidas por lixiviación y, por tanto, el grado de solubilidad y movilidad de los fertilizantes aplicados. (Casanova. A, 2021). A través del uso de lisímetros, es posible determinar qué fracción del fertilizante aplicado permanece en el suelo disponible para la planta y cuál se pierde por efecto del lavado, lo cual permite tomar decisiones técnicas más eficientes y sostenibles.

Por lo tanto, es esencial evaluar el grado de solubilidad y el potencial de absorción de los fertilizantes que contenga **NPK** en suelos arenosos para optimizar su eficiencia y reducir el impacto ambiental. Los fertilizantes inorgánicos, como (YaraMila Unik 15-15-15), son ampliamente utilizados en la agricultura para mejorar el rendimiento de los cultivos. Sin embargo, su uso inadecuado puede generar impactos ambientales negativos significativos, especialmente cuando se aplican en exceso o sin un manejo técnico adecuado (FAO, 2019)

Comprender cómo interactúan estos fertilizantes con las características específicas de los suelos arenosos, como influye en la disponibilidad para la planta, esto permitirá desarrollar estrategias de fertilización más efectivas, mejorando la productividad de los cultivos y promoviendo una agricultura más sostenible.

CAPITULO I

MARCO TEORICO

1.1. Fertilizante (NPK) triple 15

El fertilizante YaraMila Unik 15-15-15 pertenece a la línea de fertilizantes complejos producidos por la empresa Yara International, compañía global dedicada a la producción de insumos para la nutrición vegetal. Es un abono complejo de alta eficiencia que proporciona nitrógeno, fósforo y potasio en proporciones equilibradas, permitiendo una nutrición completa de los cultivos (Internacional, 2023).

1.2. Origen y proceso de producción

Este fertilizante es producido mediante el proceso de nitrofosforación, el cual integra químicamente los nutrientes en cada gránulo, mejorando su disponibilidad y eficiencia agronómica (Internacional, 2023).

1.2.1. Obtención de materias primas

El proceso inicia con la obtención de materias primas básicas:

- Amoníaco (NH_3) → fuente de nitrógeno
- Ácido fosfórico (H_3PO_4) → fuente de fósforo
- Sales de potasio (KCl o K_2SO_4) → fuente de potasio

Estas materias provienen de la industria química y minería (roca fosfórica y potasa). (Unik, 2020)

1.2.2. Proceso de nitrofosforación

En fertilizantes como YaraMila, el proceso de nitrofosforación, que consiste en:

- Reaccionar roca fosfórica con ácido nítrico
- Formar una mezcla de nitrato de calcio y fosfatos
- Integrar el nitrógeno en forma nítrica y amoniacal

Importancia: Este proceso permite que los nutrientes queden químicamente integrados, no solo mezclados.

1.2.3. Neutralización y formación del NPK

- Se añade amoníaco para neutralizar la mezcla
- Se incorporan las sales de potasio
- Se ajusta la fórmula hasta obtener el equilibrio 15-15-15

Aquí se forma una solución homogénea rica en N, P y K.

1.2.4. Granulación

La mezcla líquida pasa a un granulador donde:

- Se forman partículas sólidas (gránulos)
- Cada gránulo contiene los tres nutrientes

Esto diferencia a los fertilizantes complejos de los simples mezclados.

1.2.5. Secado

Los gránulos se secan en hornos rotatorios para:

- Eliminar humedad
- Mejorar estabilidad y almacenamiento

1.2.6. Enfriamiento y clasificación

- Se enfrían los gránulos
- Se clasifican por tamaño (1–4 mm generalmente)
- Se eliminan partículas finas o muy grandes

1.2.7. Recubrimiento y almacenamiento

- Se aplica un recubrimiento antiapelmazante
- Se almacenan o envasan para su distribución (Yara, 2024)
-

1.3. Tipos y composición

También conocidos como macronutrientes que son necesarios en grandes cantidades y si en el suelo existe una deficiencia de uno o más de ellos se deben de incorporar para una buena producción.

La composición de los **abonos NPK** o ‘ternarios’ se expresa por medio de tres números que indican las proporciones de los tres nutrientes:

- el primer número se refiere al nitrógeno.
- el segundo al fósforo.
- el tercero al potasio.

Es bueno aclarar que, estas cifras no se corresponden directamente con los porcentajes de cada elemento, ya que el nitrógeno esta expresado como N_2 , el fósforo como pentóxido (P_2O_5) y el potasio como óxido (K_2O). (Agrosavia, 2020)

1.3.1. Composición química

Composición aproximada por unidad de producto (valores expresados en % peso):

- Nitrógeno total (N): 15.0 %
 - Nitrógeno amoniacal (NH_4^+): 8.89 % (aprox.)
 - Nitrógeno nítrico (NO_3^-): 6.11 % (aprox.)
- Fósforo (P_2O_5): 15.0 %
- Potasio (K_2O): 15.0 %

Estos fertilizantes se emplean para mejorar la eficiencia nutricional del suelo, aumentar el rendimiento de los cultivos y suplir deficiencias específicas que limitan el crecimiento de las plantas (Brandy, 2016)

1.3.2. Características físicas

En cuanto al tamaño de partícula, el fertilizante presenta una granulometría controlada, donde la mayoría de los gránulos se encuentran entre 1 y 4 mm, lo que garantiza una aplicación homogénea y reduce pérdidas por viento o manejo, este tiene característica importante es su color, que generalmente varía entre gris y marrón, dependiendo del

proceso de fabricación y las materias primas utilizadas. Este aspecto es típico de fertilizantes complejos obtenidos por procesos como la nitrofosforación. (Yara, 2024)

1.4. Función de cada nutriente

1.4.1. Nitrógeno

El nitrógeno (N) es uno de los elementos esenciales más importantes para el desarrollo vegetal, considerado un macronutriente primario debido a la gran cantidad que requieren las plantas para cumplir sus funciones fisiológicas. Su importancia radica en su participación en la formación de moléculas fundamentales para la vida, tales como aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos (ADN y ARN), nucleótidos y clorofila. (Marschner, 2012)

1.4.1.1. Participación del nitrógeno en la fotosíntesis de las plantas

El nitrógeno (N) desempeña un papel esencial en el proceso de fotosíntesis, ya que forma parte de la estructura y funcionamiento de los principales componentes involucrados en la captura y transformación de la energía lumínica. Uno de los aspectos más relevantes es su participación en la molécula de clorofila, el pigmento responsable de absorber la luz solar. La clorofila contiene nitrógeno en su estructura, por lo que la disponibilidad de este nutriente influye directamente en la capacidad fotosintética de la planta. (Konrad Mengel, 2001)

1.4.1.2. Alta movilidad y riesgo de pérdida

El nitrógeno, especialmente en forma de nitrato (NO_3^-), es muy soluble en agua y altamente móvil en el perfil del suelo. Esta característica favorece su absorción por las raíces, pero también lo hace susceptible a pérdidas por lixiviación, particularmente en suelos arenosos o con alta precipitación. Estas pérdidas no solo reducen la eficiencia de fertilización, sino que también pueden generar contaminación ambiental, como la presencia de nitratos en aguas subterráneas. (Konrad Mengel, 2001)

1.4.1.3. Influencia en el crecimiento y rendimiento

El nitrógeno promueve el crecimiento vegetativo rápido, incrementando la masa foliar, el área fotosintética y la capacidad de producción de carbohidratos. Además, es determinante en el rendimiento de los cultivos, ya que influye en el número de hojas, tamaño de las plantas, número de flores y calidad de los frutos o granos. Sin embargo, su exceso puede provocar un desarrollo desbalanceado, con tallos débiles y mayor susceptibilidad a enfermedades. (FAO, 2019)

1.4.2. Fósforo

El fósforo (P) es un macronutriente esencial que cumple funciones clave en los procesos energéticos y metabólicos de las plantas. Su principal rol está relacionado con la transferencia y almacenamiento de energía, ya que forma parte de moléculas como el adenosín trifosfato (ATP), indispensables para reacciones bioquímicas como la fotosíntesis, la respiración y la síntesis de compuestos orgánicos. (Konrad Mengel, 2001)

1.4.2.1. Transferencia y almacenamiento de energía

La función más destacada del fósforo es su participación en los compuestos energéticos como el ATP (adenosín trifosfato) y el ADP (adenosín difosfato), los cuales actúan como moléculas portadoras de energía. Estas moléculas son esenciales para la fotosíntesis, la respiración celular, la síntesis de macromoléculas y la activación enzimática. Sin fósforo, las plantas no pueden almacenar ni transferir eficientemente la energía necesaria para el crecimiento y el metabolismo celular. (FAO, 2015)

1.4.2.2. Desarrollo radicular de las plantas

El fósforo favorece el desarrollo de raíces fuertes y profundas, especialmente durante las etapas iniciales del cultivo. Esto se debe a que este elemento estimula la división celular en los meristemos y promueve la diferenciación del sistema radical. Su presencia mejora la absorción de agua y nutrientes del suelo, y permite a la planta establecerse de manera eficiente. (Havlin, 2014)

1.4.2.3. Maduración y reproducción

El fósforo también es esencial para la formación de flores, frutos y semillas, interviniendo en procesos de floración, fecundación y maduración. Su deficiencia puede provocar un retraso en la madurez del cultivo, reducción en el número de flores o frutos y menor viabilidad de las semillas, afectando directamente el rendimiento y la calidad de la cosecha. (FAO, 2019)

1.4.2.4. Movilidad y disponibilidad en el suelo

En contraste con el nitrógeno, el fósforo presenta baja movilidad en el suelo, y su disponibilidad está fuertemente influenciada por el pH, la textura del suelo y la presencia de minerales. En suelos ácidos, tiende a fijarse con aluminio y hierro; en suelos alcalinos, con calcio. Por ello, la eficiencia de los fertilizantes fosfatados es limitada, y se requieren estrategias específicas para mejorar su aprovechamiento, especialmente en suelos arenosos de baja capacidad de retención. (Cabrera, 2018)

1.4.3. Potasio

La letra "k" significa Potasio. Esta sustancia se encarga de la absorción del agua (aumenta su tolerancia a la sequía, heladas y salinidad) y, es clave para el balance hídrico de la planta, en la síntesis de carbohidratos y de proteínas.

El Potasio activa más de 60 enzimas. (Konrad Mengel, 2001)

1.4.3.1. Regulación osmótica y apertura estomática

Una de las funciones más importantes del potasio es su participación en la regulación osmótica. El potasio actúa como ion clave en el control de la presión osmótica celular, lo cual es fundamental para el movimiento del agua dentro de las plantas. Es responsable de la apertura y cierre de las estomas, lo que permite regular la transpiración y el intercambio gaseoso necesario para la fotosíntesis. Esta función es particularmente importante en condiciones de sequía, ya que el potasio ayuda a conservar el agua en los tejidos vegetales. (Lincoln Taiz, 2015)

1.4.3.2. Transporte y acumulación de carbohidratos

El potasio estimula la síntesis y el transporte de azúcares desde las hojas. hacia los órganos de almacenamiento (raíces, tubérculos, frutos), favoreciendo así el crecimiento de los órganos de cosecha. También mejora la acumulación de almidón en cultivos como papa, caña de azúcar y cereales. Esta función impacta directamente en la calidad, sabor, textura y valor nutricional de los productos agrícolas. (Havlin, 2014).

1.4.3.3. Mejora la resistencia al estrés

El potasio contribuye a aumentar la resistencia de las plantas a factores de estrés abiótico y biótico, como heladas, sequías, salinidad y enfermedades. Plantas bien nutridas con potasio tienen tejidos más firmes y resistentes, una mayor eficiencia en el uso del agua y una mayor producción de compuestos defensivos. Esto se traduce en cultivos más sanos y productivos. (FAO, 2019)

1.5. Solubilidad de fertilizantes

Factores que influyen en la solubilidad es la capacidad de disolución de un fertilizante en agua de riego y esta influenciado por tres factores: temperatura, pH y la disponibilidad de agua en el suelo. (Konrad Mengel, 2001)

La temperatura resultante de mezclar varios tipos de fertilizantes en condiciones de campo, influye de manera que pueden bajar la temperatura de la solución a niveles de congelamiento y no se encuentre disponible para que la planta pueda absorber lo necesario para su desarrollo. (Casanova. A, 2021)

El pH es un parámetro que indica la acidez o basicidad de una solución, se considera el pH 7 como neutro. El valor óptimo de la solución nutritiva para cualquier tipo de cultivo varía entre 6 y 6.5, pues a estos valores existe una mayor asimilación de nutrientes por las raíces, se consigues una óptima dilución y estabilidad de la solución nutritiva y se evita las obstrucciones por precipitados.

A mayor cantidad de agua los fertilizantes se disuelven más rápido encontrándose disponibles para las raíces de las plantas. Los fertilizantes son sales que en contacto

con el agua se disocian formando iones (aniones y cationes) diferentes iones pueden interactuar en la solución y precipitar. (Institute, 2012)

1.6. Impacto ambiental

El principal impacto es la contaminación del agua por lixiviación de nitratos, lo que afecta acuíferos y ecosistemas acuáticos. Asimismo, el exceso de nutrientes provoca eutrofización, generando proliferación de algas y disminución del oxígeno en cuerpos de agua. (FAO, 2019)

En el suelo, el uso continuo de fertilizantes inorgánicos puede provocar acidificación, alteración de la microbiota y desequilibrios nutricionales. Por ejemplo, el uso prolongado de fertilizantes nitrogenados amoniacales puede reducir el pH del suelo, afectando la disponibilidad de otros nutrientes y la actividad biológica. (Konrad Mengel, 2001)

1.7. Características de los suelos arenosos

Los suelos arenosos son aquellos en los que predomina la fracción textural de arena, representando usualmente más del 70 % de su composición, y presentan características particulares que condicionan su uso agrícola. Estos suelos se originan comúnmente en regiones con altos niveles de meteorización física o donde los procesos de sedimentación han favorecido la acumulación de partículas gruesas. los suelos arenosos presentan características físicas-químicas, las características físicas son las observables y medibles sin alterar su composición y las químicas son las que están integradas al suelo y su composición. (Brandy, 2016)

1.7.1. Características físicas

En términos de textura, los suelos arenosos están compuestos por partículas grandes (0.05 a 2 mm), lo cual les confiere una estructura suelta y baja cohesión entre partículas. Esta condición favorece la aireación, pero dificulta la retención de agua, resultando en una alta permeabilidad y una baja capacidad de almacenamiento de humedad útil para las plantas. (FAO, 2015)

1.7.1.1. Textura y estructura

La textura del suelo se refiere a la composición física del suelo en términos de las proporciones relativas de partículas de diferentes tamaños: arena, limo y arcilla. La textura tiene que ver con la facilidad con la que funciona el suelo, la cantidad de agua y aire que puede contener y la rapidez con la que el agua puede entrar y atravesar el suelo (CSR, 2021)

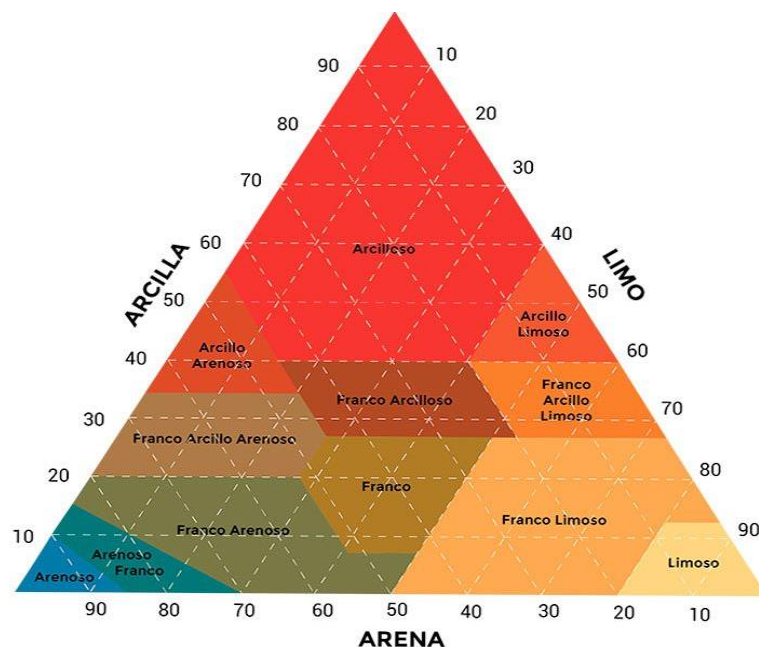
Existen cuatro grandes grupos de texturas en el suelo:

- Suelos Arenosos.
- Suelos Limosos.
- Suelos Francos.
- Suelos Arcillosos.

1.7.1.2. Triángulo de la Textura del Suelo

Es conocido como triángulo de texturas, es un diagrama ternario que se utiliza para clasificar la textura del suelo en función de las proporciones de arena, limo y arcilla que lo componen. Las líneas dibujadas en el triángulo (paralelas a los lados) establecen los límites porcentuales para cada componente (CSR, 2021)

Figura N° 1: Triángulo piramidal de la textura de suelo



1.7.1.3. Aireación

Gracias a su porosidad, estos suelos tienen buena aireación, permitiendo una adecuada difusión del oxígeno hacia las raíces. Sin embargo, esta condición también favorece la oxidación rápida de la materia orgánica, reduciendo su estabilidad a largo plazo (FAO, 2019)

1.7.1.4. Porosidad y permeabilidad

Los suelos arenosos presentan alta microporosidad, lo que permite un excelente drenaje del agua y una alta permeabilidad. Esto significa que el agua se infiltra y se mueve rápidamente a través del perfil del suelo. Aunque esto previene el encharcamiento, también implica una baja capacidad de retención de agua, ya que no poseen suficientes microporos para retener la humedad cerca de las raíces (Agriculture, 2020)

1.7.2. Características químicas

Las características químicas del suelo son determinantes en la fertilidad, disponibilidad de nutrientes, y comportamiento de los fertilizantes, especialmente en suelos de baja capacidad de retención como los suelos arenosos. Estas propiedades influyen en la absorción de nutrientes por las plantas, la actividad microbológica y el equilibrio del ecosistema edáfico. (Agriculture, 2020)

1.7.2.1. Contenido de materia orgánica

Los suelos arenosos suelen tener bajo contenido de materia orgánica, ya que esta se mineraliza rápidamente debido a la buena aireación y a la escasa protección física por parte de las partículas del suelo. La materia orgánica es esencial para mejorar la retención de agua, la CIC y la estructura del suelo. (FAO, 2015)

1.7.2.2. pH del suelo

El pH en suelos arenosos puede variar ampliamente, pero tiende a ser ácido, especialmente en zonas de alta pluviosidad donde hay constante lixiviación de bases (Ca, Mg, K). Este pH ácido puede limitar la disponibilidad de nutrientes como fósforo y molibdeno, e incrementar la toxicidad de elementos como el aluminio (FAO, 2019)

1.7.2.3. Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

Una de las principales desventajas químicas de los suelos arenosos es su baja capacidad de intercambio catiónico, es decir, su limitada habilidad para retener nutrientes como calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), potasio (K^{+}) y amonio (NH_4^{+}). Esto se debe a que la arena tiene muy poca superficie específica para atraer y retener estos iones (Brandy, 2016)

1.8. Disponibilidad y movilidad de nutrientes

Debido a su baja CIC y a su alta tasa de percolación, los suelos arenosos presentan alta pérdida de nutrientes por lixiviación, especialmente nitratos y potasio. Esto reduce la eficiencia de fertilización y requiere aplicaciones más frecuentes o en formas de liberación controlada. El fósforo, aunque menos móvil, también es menos disponible en estos suelos debido a la acidez y la falta de arcillas que lo retengan. (Cabrera, 2018)

1.9. Lixiviación y pérdida de nutrientes

La lixiviación y las escorrentías son diferentes vías por las que se puede producir la pérdida de nutrientes del suelo. La lixiviación es el fenómeno de desplazamiento de sustancias solubles como arcilla, sales, y humus debido al movimiento del agua en el suelo, mientras que la escorrentía describe el flujo del agua sea cual sea su precedencia a su paso sobre la superficie del suelo. Todos los nutrientes, ya sean macronutrientes primarios (nitrógeno, fósforo y potasio), secundarios (calcio, magnesio y azufre) o micronutrientes (boro, zinc, cloro, cobre, hierro, manganeso o molibdeno), son esenciales para los cultivos, pues cada uno adopta un papel esencial para que la planta complete su ciclo de vida. Sin embargo, la planta no siempre puede absorber los nutrientes de forma eficaz y este hecho le provoca continuos desequilibrios en su desarrollo, por lo que es fundamental conocer la cantidad exacta de nutrientes que precisan, en qué estado se encuentra el equilibrio de nutrientes en el suelo. (Cropaia, 2021)

Los nutrientes suelen perderse con facilidad acumulándose en las partes más profundas del suelo que son inaccesibles para las raíces de las plantas, por lo que cada vez se

aplican fertilizantes con más cantidad y frecuencia para que los cultivos sigan teniendo suficiente disponibilidad de todo aquello que necesitan. Esta situación termina habitualmente generando problemas en cultivos, bloqueando su crecimiento y generando muchos desequilibrios fisiológicos por la existencia de un exceso de sales estratificados alrededor del bulbo húmedo que impactan muy negativamente sobre las propiedades del suelo, y sobre la capacidad de absorber agua para el cultivo. Además, el exceso de fertilizantes supone un gasto añadido para el productor que ya no se puede permitir. (Cropaia, 2021)

1.10. La Humedad del Suelo

La humedad del suelo es un factor vital para el correcto desarrollo de las plantas y afecta directamente el rendimiento, ya que las plantas no pueden crecer adecuadamente si no tienen la humedad necesaria, afecta a la disponibilidad de nutrientes, la aireación del suelo y la temperatura del suelo. La capacidad de retención de agua del suelo utilizada por las plantas, conocida como agua disponible, varía según el tipo de suelo, y la práctica en los sistemas de producción (CSR, 2021)

1.11. Interacción fertilizante-suelo-planta

Además de tener un efecto directo sobre la nutrición de la planta, así como en el sustrato o suelo donde van a crecer, también está directamente influenciado por las proporciones presentes de los elementos nutrientes. Los cationes o elementos que tienen carga positiva están, en mayor o menor medida, retenidos por las cargas negativas que presentan algunos de los componentes del suelo, como las arcillas y la materia orgánica. (Agrotey, 2021)

La relación N/K es también crucial en cultivos en los que la planta tiene que pasar de la fase de crecimiento (vegetativa) a la de floración o fructificación (productiva). El principal estímulo que hace que una planta de día corto o día largo pase del periodo vegetativo al productivo es el número de horas de oscuridad seguidas que recibe.

El potasio es un elemento abundante en los frutos, por lo que el suministro debe de estar asegurado en los periodos productivos. Sin embargo, aunque haya mucho potasio, si su relación con respecto al nitrógeno es muy baja, se puede producir una reducción

en la floración, derivando en plantas con mucho desarrollo vegetativo (hojas y ramas), pero poco desarrollo generativo (flores y frutos)

Un exceso de fósforo interacciona negativamente con la mayoría de microelementos (Fe, Mn, Zn y Cu), en algunas ocasiones debido a la formación de precipitados insolubles y en otras, debido a procesos metabólicos en el vegetal que impiden el traslado del elemento nutriente, desde la raíz al resto de partes de la planta, como por ejemplo sucede con la interacción P/Zn. La interacción P/Fe parece estar regulada negativamente, tanto a nivel celular como por la formación de complejos insolubles. En cuanto a la interacción P/Cu, una proporción alta provoca la formación de precipitados en el área radicular. (Agrotey, 2021)

1.12. Modelos de absorción de nutrientes por las plantas

La absorción de nutrientes por las plantas es un proceso dinámico que depende de factores físicos, químicos y biológicos del suelo, así como del desarrollo del sistema radicular. Para describir este proceso, se han propuesto diversos modelos de absorción.

1.12.1. Modelo de difusión

Este modelo explica el movimiento de nutrientes desde la solución del suelo hacia la raíz, impulsado por un gradiente de concentración. Nutrientes como el fósforo (P) y el potasio (K) dependen principalmente de este mecanismo. (Marschner, 2012)

La difusión es el movimiento de partículas (iones) desde una zona de mayor concentración hacia una zona de menor concentración. En el contexto del suelo, este fenómeno ocurre cuando la planta absorbe un nutriente, generando un gradiente de concentración entre la solución del suelo cercana a la raíz y la solución más alejada. Este gradiente impulsa el movimiento del nutriente hacia la raíz por difusión.

Este mecanismo es crucial para nutrientes que tienen baja movilidad en el suelo, como el fósforo (P), el potasio (K) y algunos micronutrientes como el zinc (Zn) y el hierro (Fe). Debido a su baja solubilidad o fuerte adsorción al complejo del suelo, estos nutrientes no se desplazan fácilmente por flujo de agua, y dependen del proceso de difusión para llegar a la superficie de la raíz. (Marschner, 2012)

La eficiencia del transporte por difusión depende de:

- El coeficiente de difusión del nutriente.
- La distancia entre el nutriente y la raíz.
- La demanda de la planta (tasa de absorción radicular).
- La humedad del suelo, que afecta la movilidad iónica.

1.12.2. Modelo de flujo de masa

El transporte de nutrientes ocurre conjuntamente con el agua que se mueve hacia las raíces debido a la transpiración. Este modelo es particularmente importante para nutrientes móviles como el nitrato (NO_3^-), (Havlin, 2014)

El flujo de masa (mass flow) consiste en el movimiento conjunto del agua del suelo y los nutrientes disueltos hacia la raíz, provocado principalmente por la transpiración de la planta. Cuando las plantas pierden agua a través de sus estomas, generan una succión que atrae más agua del suelo hacia la raíz. Esta agua arrastra consigo los nutrientes presentes en la solución del suelo. (Havlin, 2014)

La eficiencia del flujo de masa está determinada por:

- La tasa de transpiración de la planta.
- La concentración del nutriente en la solución del suelo.
- La conductividad hidráulica del suelo (capacidad para transmitir agua).

Indican que el flujo de masa puede representar más del 80% del transporte de nitrato hacia las raíces en condiciones de riego adecuado o en suelos con buena humedad.

1.12.3. Modelo de intercepción radicular

Consiste en la absorción de nutrientes mediante el contacto físico de las raíces en crecimiento con partículas del suelo que contienen nutrientes, siendo importante en las etapas iniciales del crecimiento (Brandy, 2016)

La intercepción radicular (root interception) es el mecanismo por el cual la raíz entra en contacto directo con los nutrientes mientras se expande y crece a través del perfil

del suelo. A diferencia de la difusión o el flujo de masa, en este modelo no hay movimiento del nutriente, sino que es la raíz la que invade nuevos volúmenes de suelo y accede a los nutrientes que están en su camino. Este modelo es menos eficiente en comparación con los otros dos, y representa una fracción menor del total de nutrientes absorbidos. Sin embargo, es relevante para nutrientes que no se mueven fácilmente en el suelo ni están muy disponibles en solución, como el potasio intercambiable y ciertos micronutrientes. (Brandy, 2016)

La efectividad de este mecanismo depende de:

- La densidad radicular.
- La tasa de crecimiento de raíces.
- La distribución espacial de los nutrientes en el suelo.

1.12.4. Relación entre los modelos de absorción de nutrientes

Los modelos de absorción de nutrientes —difusión, flujo de masa e intercepción radicular— no actúan de manera aislada, sino que funcionan de forma complementaria y simultánea durante el proceso de nutrición vegetal. La importancia relativa de cada mecanismo depende del tipo de nutriente, las características del suelo, la fisiología de la planta y las condiciones ambientales. (Marschner, 2012)

- El **fósforo** se absorbe mayoritariamente por difusión.
- El **nitrógeno (en forma de NO_3^-)** llega mayormente por flujo de masa.

1.13. Descripción de la planta (*Lactuca sativa* L.)

1.13.1. Origen de la lechuga crespa

La lechuga, incluida la variedad crespa, tiene su origen en Asia Menor y la región mediterránea, donde fue domesticada a partir de especies silvestres. Con el tiempo, su cultivo se extendió a Europa y posteriormente a América, convirtiéndose en una de las hortalizas más importantes a nivel mundial. (Jarrin, 2011)

1.13.2. Taxonomía

Cuadro N° 1: Taxonomía

Reino	Vegetal
Phylum	Teleomorphytae
División	Tracheophytae
Sud División	Anthophyta
Clase	Angiospermae
Sud Clase	Dicotyledoneae
Grado Evolutivo	Metachlamydeae
Grupo de Ordenes	Tetraclicicos
Ordenes	Campanulales
Familia	Compositae
Nombre Científico	<i>Lactuca sativa L.</i>
Nombre Común	Lechuga

Fuente: Herbario Universitario T.B (2025).

1.13.3. Caracteres morfológicos de la lechuga

La variedad crespa es una planta anual, que se distingue por presentar hojas onduladas, arrugadas y de textura crocante, generalmente de color verde claro o verde intenso. Forma una roseta amplia con diámetros que pueden alcanzar entre 20 y 25 cm, con hojas anchas y brillantes, lo que le da un alto valor comercial. La duración del cultivo suele ser de 50-60 días para las variedades tempranas y de 70-80 días para las tardías, como término medio, desde la plantación hasta la recolección. (Jarrin, 2011)

1.13.3.1. Raíz

la raíz principal es pivotante, corta puede llegar a penetrar hasta 30 cm de profundidad, con pequeñas ramificaciones, crece muy rápido, con bastante látex, tiene numerosas raíces laterales de absorción, las cuales se desarrollan en capas superficiales del suelo a una profundidad de 5 a 30 cm. (U-Mexico, 2017)

1.13.3.2. Tallo

El tallo es corto de tamaño, en su etapa vegetativa, forma cilíndrica, con crecimiento primario, por lo que es herbáceo. Soporta a la roseta de láminas foliares de este vegetal. Durante el periodo reproductivo de la planta de *Lactuca sativa*; se vuelve más alargado 9 para brindar soporte a las estructuras reproductivas, llegando a alcanzar hasta 20 a 40 cm. de altura aproximadamente. (Luis, 2023)

1.13.3.3. Hoja

Las hojas adoptan, al comienzo de su desarrollo, la forma de roseta, para cerrarse más tarde y formar un cogollo más o menos apretado, según variedades. Las hojas son lampiñas, ligeramente dentadas y de formas variadas. A medida que se van cubriendo unas a otras desaparece su contacto directo con la luz, por lo que pierden el color verde. Por otra parte, este color verde variable, ocasionalmente teñido con tonalidades rojizas o violáceas, es característico de cada variedad. Atendiendo a su textura, las hojas pueden ser mantecosas o crujientes, con aspecto ondulado, liso o rizado. (Luis, 2023)

1.13.4. Requerimiento del cultivo

1.13.4.1. temperatura

La lechuga (*Lactuca sativa*) es un cultivo de clima templado que se desarrolla óptimamente en temperaturas entre 15 y 20 °C. En condiciones de invernadero, el control térmico es fundamental, ya que temperaturas superiores a 25 °C pueden inducir el espigado prematuro, mientras que temperaturas inferiores a 10 °C reducen el crecimiento. (FAO, 2013)

1.13.4.2. Requerimientos de humedad relativa

La humedad relativa ideal para el cultivo oscila entre 60% y 80%. Niveles altos favorecen el desarrollo de enfermedades fúngicas como botritis, mientras que niveles bajos provocan deshidratación y disminución del crecimiento. (FAO, 2013)

1.13.4.3. Requerimientos de luz

La lechuga necesita buena iluminación para realizar la fotosíntesis, pero es sensible a radiaciones excesivas. En invernadero, se recomienda mantener niveles de luz moderados, utilizando mallas de sombreo cuando la radiación es alta para evitar estrés térmico y fisiológico. (Resh, 2012)

1.13.4.4. Requerimientos nutricionales

La lechuga necesita macronutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio en cantidades equilibradas. El nitrógeno es clave para el desarrollo foliar, el fósforo para el crecimiento radicular y el potasio para la calidad de la planta. En invernadero, estos nutrientes suelen aplicarse mediante fertirriego (Resh, 2012)

1.13.4.5. Requerimientos de ventilación

La ventilación en el invernadero es esencial para regular la temperatura y la humedad. Un buen flujo de aire reduce la incidencia de enfermedades y mejora el intercambio gaseoso necesario para la fotosíntesis (FAO, 2013)

1.13.4.6. Suelo

El cultivo de lechuga requiere un suelo específico para su óptimo desarrollo, siendo fundamental un suelo bien drenado y rico en materia orgánica. En términos de pH, la lechuga prefiere un suelo ligeramente ácido a neutro, con un rango de pH ideal entre 6.0 y 7.0. Un pH dentro de este rango favorece la disponibilidad de nutrientes esenciales y reduce el riesgo de enfermedades del suelo. (Blogagricultura, 2023)

1.13.4.7. Requerimientos nutricionales

Cubillos (2015) detalla los requerimientos del cultivo (tabla 1) en condiciones normales son: nitrógeno 90 kg/ha, fósforo 35 kg/ha y potasio 160 kg/ha.

Cuadro N° 2 :Requerimientos nutricionales del cultivo de la lechuga

Fertilizante	Cantidad (g/m²)	Cantidad (Kg/ha)
N	15-20 g/m ²	150-200 Kg/ha
P₂O₅	10-20 g/m ²	100-200 Kg/ha
K₂O	20-30 g/m ²	200-300 Kg/ha
S	1-3 g/m ²	10-30 Kg/ha

1.13.4.8. Requerimientos hídricos

La lechuga requiere un suministro constante de agua durante todo su ciclo, siendo especialmente sensible al déficit hídrico. En condiciones de invernadero, las necesidades de agua pueden variar entre 3 a 5 mm por día, dependiendo de la etapa del cultivo y las condiciones ambientales. (Voogt, 2009)

1.14. Cosecha

La cosecha se realiza entre 45 y 70 días después del trasplante, dependiendo de la variedad y condiciones de cultivo. En invernadero, el ciclo suele ser más corto debido a condiciones óptimas de crecimiento. (Resh, 2012),

CAPITULO II

MARCO METODOLOGICO

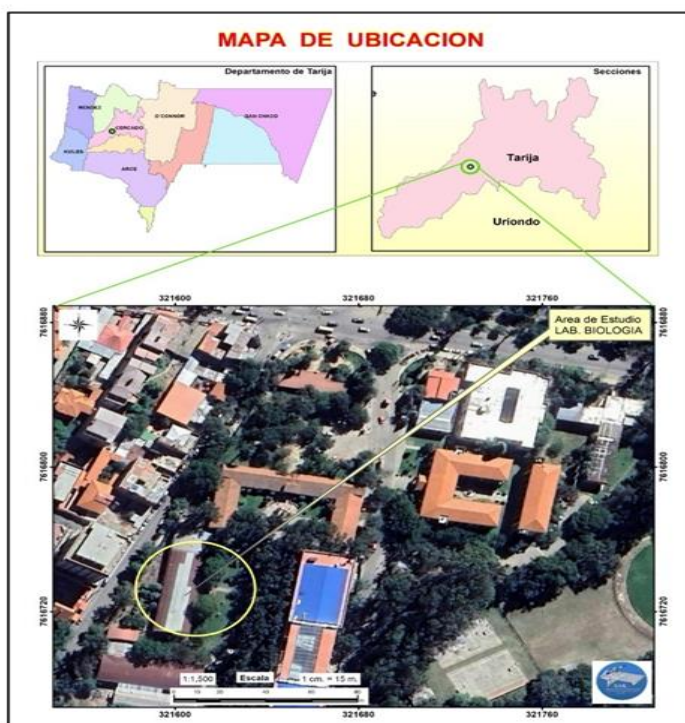
2.1. Localización

El presente trabajo de investigación se realizó en laboratorio de suelos de la Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales que se encuentra en el campus el “TEJAR”

2.2. Ubicación del trabajo

Está ubicado geográficamente se encuentra entre las coordenadas 21°32'34.19 S 64°43'21.26 W, a una altura 1.858 m.s.n.m, específicamente en las instalaciones de la Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho”.

Figura N° 2: Mapa de ubicación



2.3. Límites territoriales

El departamento de Tarija, ubicado en el extremo del sur de Bolivia, limita al norte y noreste con el departamento de Chuquisaca, al oeste con el departamento de Potosí, al este con la república del Paraguay y al sur con la república Argentina. La provincia

cercado área donde se ubica la presente investigación Limita: Al norte con provincia Méndez; al sur con la provincia Arce; al este, con la provincia O'Connor; y al oeste, con la provincia Avilés.

2.4. Características climáticas

Tarija (cercado) presenta un clima templado subhúmedo, con una temperatura media anual entre 18 y 20 °C. La precipitación anual oscila entre 500 y 700 mm, concentrándose principalmente en los meses de noviembre a marzo, lo que determina una marcada estacionalidad hídrica y la necesidad de riego en época seca. Asimismo, la humedad relativa promedio se sitúa entre 50% y 70%, y la zona cuenta con buena disponibilidad de radiación solar, factores que influyen directamente en el crecimiento y rendimiento de los cultivos. (SENAMHI, 2023)

2.4.1 Precipitación

Pico Pluviométrico: Enero es el mes con mayor volumen, alcanzando promedios de 155 mm a 236 mm. En este mes, se pueden registrar hasta 25 días con algún tipo de precipitación. Estiaje Crítico: Entre junio y agosto, la probabilidad de lluvia es casi nula (menos de 3 días por mes), con acumulados que apenas llegan a los 14 mm - 39 mm en todo el trimestre. Transiciones Rápidas: Octubre marca el inicio de la reactivación de lluvias con un aumento a 17 días lluviosos, mientras que en abril la frecuencia comienza a decaer rápidamente.

Cuadro N° 3: Precipitación de la zona de estudio

Parámetro / Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Días con lluvia (dd.)	19,0	16,0	14,0	9,0	7,0	5,0	6,0	6,0	7,0	9,0	12,0	17,0
Precipitación (mm)	155	130	105	60	50	42	40	45	50	65	85	125

En lo que se refiere al tema de las precipitaciones, Tarija tiene una precipitación promedio de 615.4 milímetros (24.25 pulgadas) por año, además se tiene como dato que el mes más cálido en promedio en esta región, es el mes de noviembre, mientras que el mes más frío en promedio, es considerado el mes de julio.

2.5. MATERIALES

el presente estudio de investigación se realiza en condiciones controladas (invernadero) utilizando macetas simulación de lisímetros para evaluar la dinámica de solubilidad y lixiviación de los nutrientes N, P y K tras la aplicación de un fertilizante inorgánico en un suelo arenoso.

También se implementó el cultivo de la lechuga para evaluar el potencial de absorción en comparación a lo agregado de (NPK)

2.5.1. Material de aplicación

- Fertilizante inorgánico granulado (triple 15-15-15).

2.5.2. Material vegetal

- Lechuga cressa (*Lactuca sativa L.*)

2.5.3. Material de campo experimental (invernadero)

- Soporte para las macetas (donde colocar para recolectar lixiviados).
- Suelo arenoso caracterizado (textura, pH, MO).
- pala
- columnas de drenaje (diámetro 10-15 cm. Altura 25-30 cm)
- regadera

2.5.4. Material de laboratorio

- Agua destilada
- Mufla
- Balanza de precisión
- Balanza analítica

- Tubos falcón
- Matraz
- Probeta.
- Pipeta
- puntas
- Calentador
- Molino
- Mortero
- Embudos
- Papel filtro
- Papel aluminio
- Gradilla

2.5.5. Equipos

- pHmetro
- Destilador (nitrógeno)
- Titulador (nitrógeno)
- Espectrofotómetro (fosforo, potasio)
- Agitador rotacional
- Centrifugadora
- Horno (para secado de muestras)

2.5.6. Reactivos

- Agua ultrapura
- Sol. $K_2Cr_2O_4$ al 10% (cromato de potasio)
- H_2SO_4 (ácido sulfúrico)
- Sol. $NaHCO_3$ 0.5 M (bicarbonato de sodio)
- HCl acodo clorhídrico

2.5.7. Material de registro

- Libreta
- Bolígrafo
- Cámara fotográfica
- Etiquetas
- Frascos para recolectar lixiviados
- Bandejas para secado de lechuga
- Bolsas plásticas para poner la masa de la lechuga.

2.5.8. Material de gabinete

- Excel
- Word

2.6. METODOLOGÍA

2.6.1. Diseño de investigación

El diseño que se utilizó para realizar el presente trabajo de investigación, diseño completamente al azar con 4 tratamientos, 5 repeticiones y un total de 20 unidades experimentales.

2.6.2. Descripción de los tratamientos

Para los tratamientos se utilizó diferentes dosis de fertilizante triple 15. Se planteo los tratamientos.

- 1) T1: Fertilizante a dosis elevada (5 g. triple 15).
 - 2) T2: Fertilizante a dosis recomendada (2.5 g, triple 15).
 - 3) T3: Fertilizante a dosis reducida (1 g, triple 15).
 - 4) T4: Control (sin fertilizante).
- Tiempo de evaluación: 0 h, 24 h, 72 h, 7 días.

2.6.3. Descripción de las unidades experimentales

Cada unidad experimental del T1(dosis elevada), T2 (dosis recomendada) y T3 (dosis baja) se aplicó fertilizante para el ensayo de lixiviados, pero al T4 no se aplicó fertilizante.

Para el ensayo de asimilación de NPK en el cultivo de la lechuga de la misma manera se aplicó fertilizante a los tratamientos (T1, T2 y T3) al momento del trasplante sin embargo al T4 no se aplicó fertilizante.

2.6.4. Croquis de campo

Cuadro N° 4:Diseño completamente al azar

T2 R1	T4 R4	T1 R2	T4 R1
T1 R1	T1 R3	T3 R3	T2 R3
T4 R3	T4 R2	T3 R4	T3 R2
T2 R2	T1 R4	T2 R4	T1 R5
T2 R5	T3 R1	T4 R5	T3 R5

Fuente: Elaboración propio

2.7. Procedimiento experimental

Primero se compró las macetas 20 unidades de 1.5 litros cada unidad, también se compró el fertilizante triple 15 de YaraMila Unik. Y posteriormente se compró los plantines de lechuga.

2.7.1. Construcción de un invernadero

se construyó un pequeño invernadero con la finalidad de controlar la humedad y la temperatura, y el cultivo tenga un mejor desarrollo.

2.7.2. Recolección de suelo a usar en el ensayo

- Recolección de suelo a orillas del rio Guadalquivir.

Cuadro N° 5:Análisis de suelo

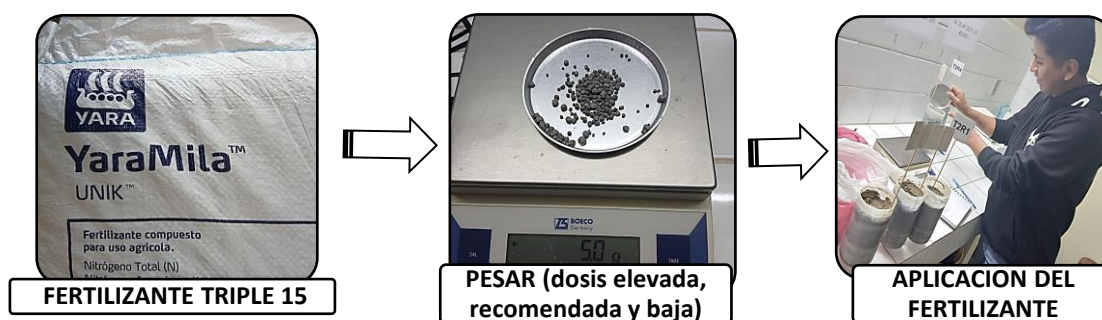
parámetros	valor	interpretación
pH	8.30	Alcalino, puede limitar la disponibilidad de nutrientes como P, Fe. Mn.
CE	149.5 ds/m	Baja capacidad de movimiento de los nutrientes
MO	0.62 %	Baja. Insuficiente para una buena estructura y nutrición sostenible.
N	0.036 %	Muy bajo en nitrógeno totales. (0.15-0.25%)
P	7.67 mg/kg	Bajo, con deficiencia (15-25 mg/kg)
K	17.93 mg/kg	Muy bajo, con deficiencia. ya que un suelo en lo normal tiene (200-1000 mg/kg)
Textura	72% A 20% Y 8% L	Arenoso franco.

Fuente: Elaboración propio

2.7.5. Aplicación del fertilizante y riego en simulación de lluvia

- Aplicación de fertilizante sobre la superficie del suelo, de acuerdo a las cantidades establecidas. Esto se aplicó en el laboratorio.
- Riego simulado lluvia, con volumen equivalente a 40-50 ml. Por maceta.
- Recoger el lixiviado tras el drenaje.
- Repetir riegos en los días establecidos sin añadir más fertilizante.

Diagrama de la aplicación del fertilizante



Análisis del fertilizante NPK (triple 15)

Cuadro N° 6: Analisis de fertilizante

NUTRIENTES	CONCENTRACION
nitrógeno	14.20%
fosforo	14.85%
potasio	15.02%

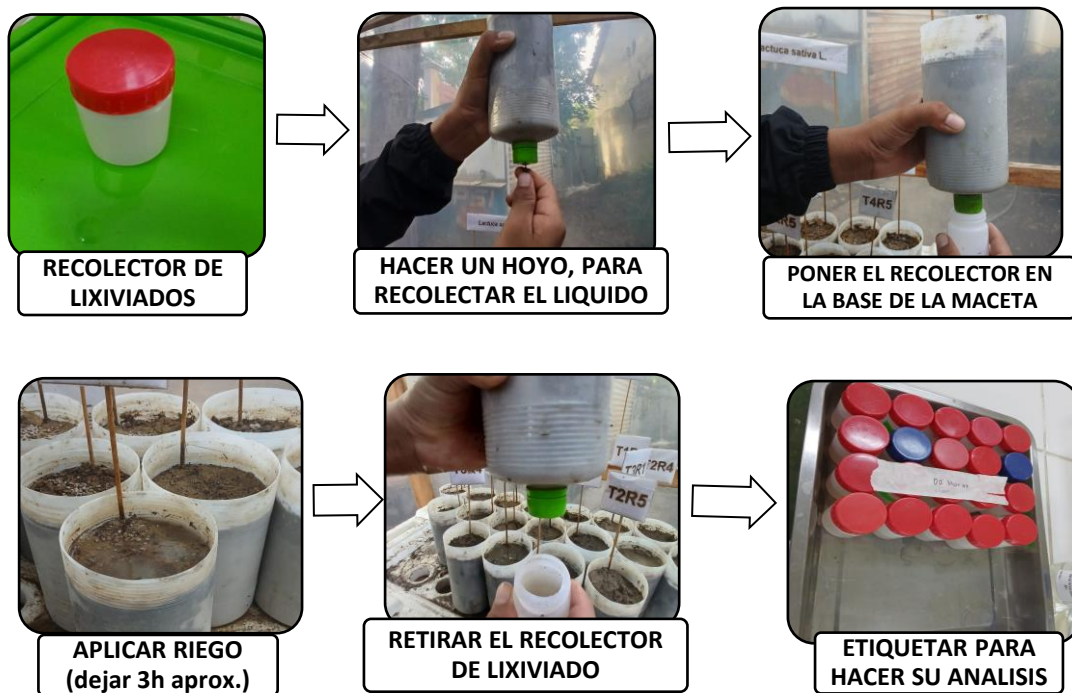
Se realizó el análisis del fertilizante para corroborar el contenido real de los nutrientes.

2.7.6. Recolección de lixiviado paso a paso.

1. Se coloca el recolector (frasco 40ml) debajo de la maceta, para su drenaje de los lixiviados.
2. Aplicar riego en la superficie de la maceta.

3. De deja 3 horas aproximado para poder recoger el lixiviado, debido a que este proceso toma tiempo el drenaje es similar aun gotero, por donde cae el agua aplicada.
4. lo recolectado se lleva al laboratorio para ser analizado.
5. Este proceso se hizo a las 00, 24, 72 horas y a los 7 días.

Diagrama de la recolección de lixiviados.



2.7.7. Análisis del lixiviados en laboratorio de suelos

- Filtrar el lixiviado.
- Se conservo en frío porque no se analizó de inmediato.
- N (NO_3^-): electrodo selectivo o método de reducción de cadmio.
- P (PO_4^{3-}): método azul de molibdeno, espectrofotómetro.
- K: fotometría de llama o AAS.

2.7.8. Trasplante de la lechuga

- Se compró plantines.
- Se colocó una a dos plantines por maceta.

- El fertilizante se lo aplico en la superficie de la maceta.
- Riego en simulación de lluvia, un aproximado de 30-40 ml. Por maceta.
- El riego se lo realizo cada 2 días, y también cuando el cultivo lo requería.
- Cultivo de 65 días.
- Cosecha y secado.

2.7.9. Cálculo del grado de solubilidad y lixiviación

Con la siguiente formula se podrá calcular cual fue el porcentaje del fertilizante se lixivio, referente a lo aplicado.

$\text{Solubilidad (\%)} = (\text{cantidad acumulada en lixiviado} / \text{cantidad aplicada}) * 100$

$\text{Eficiencia del fertilizante (NPK) (\%)} = (\text{nutriente absorbido} / \text{nutriente aplicado}) * 100$

2.8. variables a evaluar

- Concentración de N, P y K, en los lixiviados (mg/l).
- % de solubilidad (asimilable)
- Concentración de N, P y K, en el cultivo de la lechuga
- Eficiencia del fertilizante.

CAPITULO III

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Los datos registrados, fueron analizados de acuerdo a la metodología estadística establecida por la investigación, y luego de haber obtenido los datos se presenta los siguientes resultados:

3.1. ANÁLISIS DE NITRÓGENO SOLUBLE

3.1.1. Análisis de nitrógeno soluble (00 horas)

Medir la solubilidad de nitrógeno de los lixiviados recolectados a las 00 horas, después de aplicar el fertilizante triple 15, así poder sacar el porcentaje de solubilidad en cuanto a lo aplicado.

Cuadro N° 7: Lixiviados de nitrógeno (00 horas)

LIXIVIADOS (mg/l) 00:00 hrs							
TRATAMIENTOS	REPLICAS					SUMA	MEDIA
	I	II	III	IV	V		
T1	0,350	0,353	0,341	0,348	0,355	1,747	0,349
T2	0,302	0,262	0,285	0,333	0,286	1,468	0,294
T3	0,310	0,305	0,303	0,293	0,308	1,519	0,304
T4	0,280	0,260	0,265	0,279	0,275	1,359	0,272
SUMA	1,242	1,180	1,194	1,253	1,224	6,093	

Fuente: Elaboración propia.

El cuadro número 7 refleja los datos de la concentración (mg/l) de nitrógeno obtenidos mediante un análisis con el método de reducción de cadmio. Se puede observar que el T1 tiene una concentración (0.349 mg/l) que mayor a los demás tratamientos.

Estos resultados demuestran que el T1 dosis elevada, presenta un mejor comportamiento.

Cuadro N° 8: Análisis de varianza ANVA para nitrógeno

Fuente de variación	grados de libertad	suma de cuadrados	cuadrado medio	f-calculada	f-tabulada	
					5%	1%
Total	19	0,01938				
Tratamientos	3	0,01602	0,00534	25,432	2,85	4,44
Error	16	0,00336	0,00021			

Fuente: Elaboración propia.

Según el cuadro número 8 se puede observar el ANVA, el cual presenta diferencias significativas ya que la f-tabulada es mayor a la f-calculada.

Para poder determinar esto se realiza la comparación de medias.

Cuadro N° 9: Test de tukey para los tratamientos

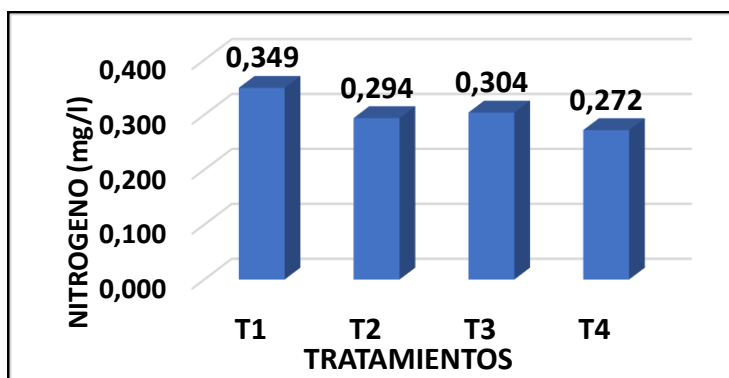
PRUEBA DE TUKEY							
tratamientos	medias	5%	1%		0,349	0,304	0,294
T1	0,349	0,349 A	0,349 A	0,272	0,077	0,032	0,022
T3	0,304	0,304 B	0,304 B	0,294	0,055	0,01	0
T2	0,294	0,294 BC	0,294 B	0,304	0,045	0	-0,01
T4	0,272	0,272 C	0,272 B				

Fuente: Elaboración propia.

El cuadro numero 9 presenta los resultados de la prueba de tukey, comparación de medias aplicada a los 4 tratamientos del ensayo. Se concluye que el T1 tiene una solubilidad media más alta con 0.349 mg/l, obteniendo una diferencia altamente significativa a los demás tratamientos.

El T2 no tiene diferencias significativas del T3 Y T4 al 1% pero si diferencias significativas con el T4 al 5%.

Figura N° 4:Solubilidad de nitrógeno (00 horas)



Fuente: Elaboración propia.

Grado de solubilidad de nitrógeno a las 00:00h.

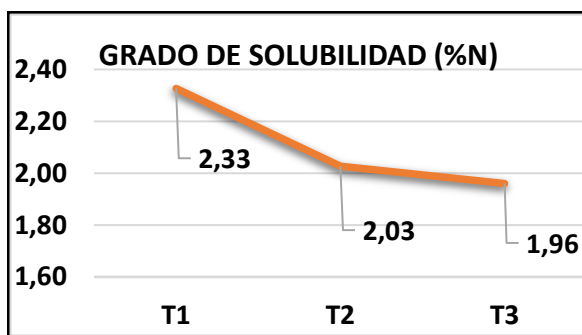
el grado de solubilidad se calculó de los tratamientos a los cuales se les aplico fertilizante para esto se tomó en cuenta (medias, dosis y el % de NPK que contiene).

Cuadro N° 10:Grado de solubilidad

GRADO DE SOLUBILIDAD (%)				
tratamientos	medias (mg/l)	NPK aplicado	% N. fertilizante	N(%)
T1	0,349	5	14.20	2,33
T2	0,304	2,5	14.20	2,03
T3	0,294	1	14.20	1,96

Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 5:Grado de solubilidad de nitrógeno (00 horas)



Fuente: Elaboración propia.

El grafico del grado de solubilidad de los tratamientos es muy bajo, ya que los 3 tratamientos tienen un 2% de solubilidad del fertilizante aplicado.

3.1.2. Análisis de nitrógeno soluble (24 horas)

Medir la solubilidad de nitrógeno de los lixiviados recolectados a las 24 horas, después de aplicar el fertilizante triple 15, así poder sacar el porcentaje de solubilidad en cuanto a lo aplicado.

Cuadro N° 11: Lixiviados de nitrógeno (24 horas)

LIXIVIADOS (mg/l) 24:00 horas							
TRATAMIENTOS	REPLICAS					SUMA	MEDIA
	I	II	III	IV	V		
T1	0,310	0,318	0,312	0,316	0,321	1,577	0,315
T2	0,531	0,539	0,529	0,535	0,528	2,662	0,532
T3	0,398	0,403	0,397	0,391	0,407	1,996	0,399
T4	0,300	0,291	0,286	0,290	0,298	1,465	0,293
SUMA	1,539	1,551	1,524	1,532	1,554	7,700	

Fuente: Elaboración propia.

El cuadro número 11 refleja los datos de la concentración (mg/l) de nitrógeno obtenidos mediante un análisis con el método de reducción de cadmio. Se puede observar que el T2 tiene una concentración (0.532 mg/l) que es mayor a los demás tratamientos.

Estos resultados demuestran que el T2 dosis recomendada (2.5g), presenta un mejor comportamiento a las 24 horas después de aplicar el fertilizante.

Cuadro N° 12: Análisis de varianza ANVA para nitrógeno

Fuente de variación	grados de libertad	suma de cuadrados	cuadrado medio	f-calculada	f-tabulada	
					5%	1%
Total	19	0,17663				
Tratamientos	3	0,17618	0,05873	2101,166	2,85	4,44
Error	16	0,00045	0,00003			

Fuente: Elaboración propia.

Según el cuadro número 12 se puede observar el ANVA, el cual presenta diferencias significativas ya que la f-tabulada es mayor a la f-calculada.

Para poder determinar esto se realiza la comparación de medias.

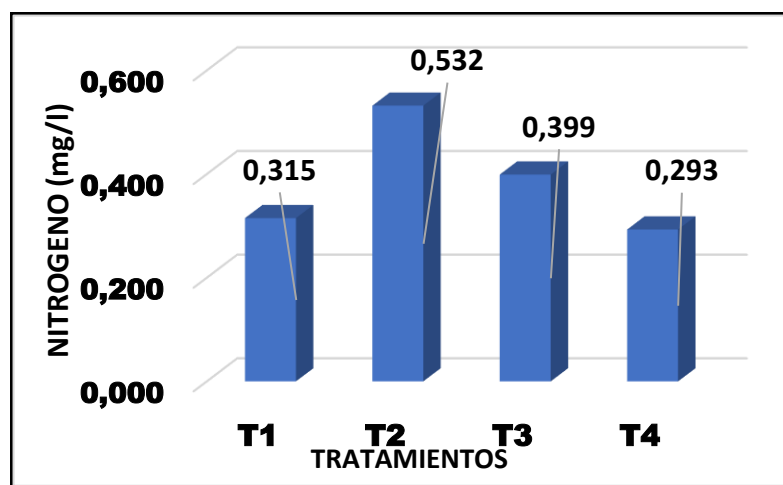
Cuadro N° 13: Test de tukey para los tratamientos

PRUEBA DE TUKEY			
tratamientos	medias	5%	1%
T2	0,532	0,532 A	0,532 A
T3	0,399	0,399 B	0,399 B
T1	0,315	0,315 C	0,315 C
T4	0,293	0,293 D	0,293 D

	0,532	0,399	0,315
0,293	0,239	0,106	0,022
0,315	0,217	0,084	0
0,399	0,133	0	-0,084

Fuente: Elaboración propia.

El cuadro número 13 presenta los resultados de la prueba de tukey, comparación de medias aplicada a los 4 tratamientos del ensayo. Se concluye que el T2 tiene una solubilidad media más alta con 0.532 mg/l, obteniendo una diferencia altamente significativa a los demás tratamientos. El T3>T1>T4 teniendo diferencias altamente significativas al 5% y 1% entre ellos.

Figura N° 6: Solubilidad de nitrógeno (24 horas)

Fuente: Elaboración propia.

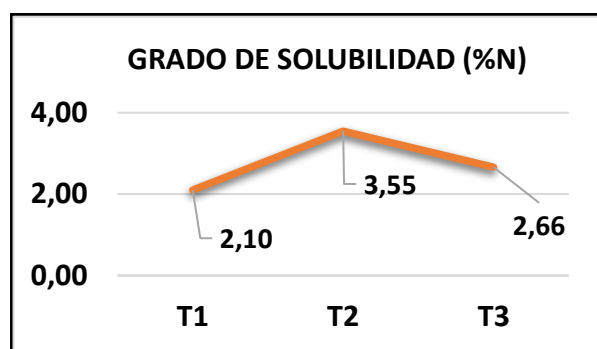
Grado de solubilidad de nitrógeno a las 24:00h.

el grado de solubilidad se calculó de los tratamientos a los cuales se les aplico fertilizante para esto se tomó en cuenta (medias, dosis y el % de NPK que contiene).

Cuadro N° 14: Grado de solubilidad para nitrógeno

GRADO DE SOLUBILIDAD (%)				
tratamientos	medias (mg/l)	NPK aplicado	% N. fertilizante	N(%)
T1	0,315	5	14.20	2,10
T2	0,532	2,5	14.20	3,55
T3	0,399	1	14.20	2,66

Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 7: Grado de solubilidad de nitrógeno

Fuente: Elaboración propia.

El gráfico del grado de solubilidad de los tratamientos es bajo, el T2 (dosis recomendada) tiene 3.55 % de solubilidad en cuanto al fertilizante aplicado, T3 con un 2.66% y el T1 con 2.10% de solubilidad.

3.1.3. Análisis de nitrógeno soluble (72 horas)

Medir la solubilidad de nitrógeno de los lixiviados recolectados a las 72 horas, después de aplicar el fertilizante triple 15, así poder sacar el porcentaje de solubilidad en cuanto a lo aplicado.

Cuadro N° 15: Lixiviados de nitrógeno (72 horas)

LIXIVIADOS (mg/l) 72:00 hrs							
TRATAMIENTOS	REPLICAS					SUMA	MEDIA
	I	II	III	IV	V		
T1	0,370	0,385	0,382	0,361	0,374	1,872	0,374
T2	0,420	0,422	0,426	0,430	0,419	2,117	0,423
T3	0,440	0,444	0,435	0,447	0,441	2,207	0,441
T4	0,200	0,204	0,211	0,188	0,206	1,009	0,202
SUMA	1,430	1,455	1,454	1,426	1,440	7,205	

Fuente: Elaboración propia.

El cuadro número 15 refleja los datos de la concentración (mg/l) de nitrógeno obtenidos mediante un análisis con el método de reducción de cadmio. Se puede observar que el T3 tiene una concentración (0.441 mg/l) que es mayor a los demás tratamientos.

Estos resultados demuestran que el T3 dosis baja, presenta un mejor comportamiento a las 72 horas después de aplicar el fertilizante.

Cuadro N° 16 análisis de varianza ANVA para nitrógeno

Fuente de variación	grados de libertad	suma de cuadrados	cuadrado medio	f-calculada	f-tabulada	
					5%	1%
Total	19	0,1802				
Tratamientos	3	0,1794	0,05980	1146,69	2,85	4,44
Error	16	0,0008	0,00005			

Fuente: Elaboración propia.

Según el cuadro número 16 se puede observar el ANVA, el cual presenta diferencias significativas ya que la f-tabulada es mayor a la f-calculada.

Para poder determinar esto se realiza la comparación de medias.

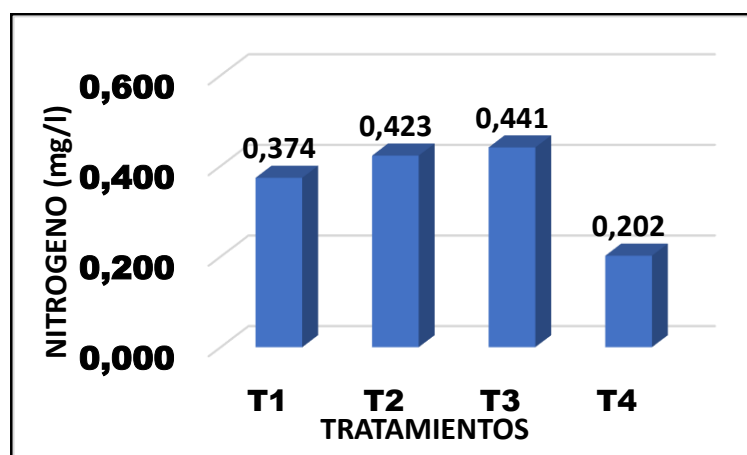
Cuadro N° 17: Test de tukey para los tratamientos

PRUEBA DE TUKEY			
tratamientos	medias	5%	1%
T3	0,441	0,441 A	0,441 A
T2	0,423	0,423 B	0,423 B
T1	0,374	0,374 C	0,374 C
T4	0,202	0,202 D	0,202 D

	0,441	0,423	0,374
0,202	0,239	0,221	0,172
0,374	0,067	0,049	0
0,423	0,018	0	-0,049

Fuente: Elaboración propia.

El cuadro número 17 presenta los resultados de la prueba de tukey, comparación de medias aplicada a los 4 tratamientos del ensayo. Se concluye que el T3 tiene una solubilidad media más alta con 0.441 mg/l, obteniendo una diferencia altamente significativa a los demás tratamientos. El T1>T2>T4 teniendo diferencias altamente significativas al 5% y 1% entre ellos.

Figura N° 8: Solubilidad de nitrógeno (72 horas)

Fuente: Elaboración propia.

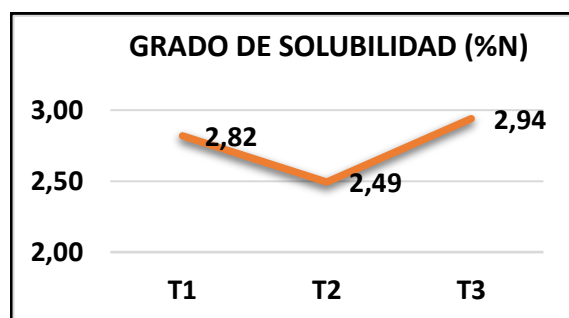
Grado de solubilidad de nitrógeno a las 72:00h.

el grado de solubilidad se calculó de los tratamientos a los cuales se les aplico fertilizante para esto se tomó en cuenta (medias, dosis y el % de NPK que contiene).

Cuadro N° 18: Grado de solubilidad de nitrógeno a las (72 horas)

GRADO DE SOLUBILIDAD (%)				
tratamientos	medias (mg/l)	NPK aplicado	% N. fertilizante	N(%)
T1	0,423	5	14.20	2,82
T2	0,374	2,5	14.20	2,49
T3	0,441	1	14.20	2,94

Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 9: Grado de solubilidad de nitrógeno (72 horas)

Fuente: Elaboración propia.

El T3 tiene 2.94% de solubilidad, el T1 con 2.82% y T2 con 2.49% con una menor solubilidad que los demás tratamientos.

3.1.4. Análisis de nitrógeno soluble (7 días)

Medir la solubilidad de nitrógeno de los lixiviados recolectados a los 7 días, después de aplicar el fertilizante triple 15, así poder sacar el porcentaje de solubilidad en cuanto a lo aplicado.

Cuadro N° 19: Analisis de nitrógeno soluble a los (7 días)

LIXIVIADOS (mg/l) 7 días							
TRATAMIENTOS	REPLICAS					SUMA	MEDIA
	I	II	III	IV	V		
T1	0,310	0,323	0,302	0,314	0,311	1,560	0,312
T2	0,210	0,213	0,208	0,207	0,210	1,048	0,210
T3	0,190	0,198	0,191	0,191	0,195	0,965	0,193
T4	0,201	0,177	0,184	0,190	0,162	0,914	0,183
SUMA	0,911	0,911	0,885	0,902	0,878	4,487	

Fuente: Elaboración propia.

El cuadro número 19 refleja los datos de la concentración (mg/l) de nitrógeno obtenidos mediante un análisis con el método de reducción de cadmio. Se puede observar que el T1 tiene una concentración (0.312 mg/l) que es mayor a los demás tratamientos.

Estos resultados demuestran que el T1 dosis alta, presenta un mejor comportamiento a los 7 días después de aplicar el fertilizante.

Cuadro N° 20: Análisis de varianza ANVA para nitrógeno

Fuente de variación	grados de libertad	suma de cuadrados	cuadrado medio	f-calculada	f-tabulada	
					5%	1%
Total	19	0,054195				
Tratamientos	3	0,053047	0,017682	246,44	2,85	4,44
Error	16	0,001148	0,000072			

Fuente: Elaboración propia.

Según el cuadro número 20 se puede observar el ANVA, el cual presenta diferencias significativas ya que la f-tabulada es mayor a la f-calculada.

Para poder determinar esto se realiza la comparación de medias.

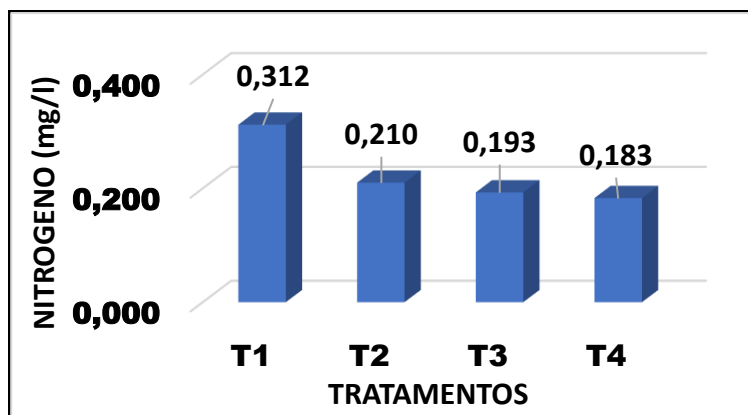
Cuadro N° 21: Test de tukey para los tratamientos

PRUEBA DE TUKEY							
tratamientos	medias	5%	1%		0,312	0,21	0,193
T1	0,312	0,312 A	0,312 A	0,183	0,129	0,027	0,01
T2	0,210	0,210 B	0,210 B	0,193	0,119	0,017	0
T3	0,193	0,193 C	0,193 BC	0,21	0,102	0	-0,017
T4	0,183	0,183 C	0,183 C				

Fuente: Elaboración propia.

El cuadro número 21 presenta los resultados de la prueba de tukey, comparación de medias aplicada a los 4 tratamientos del ensayo. Se concluye que el $T1 > T2 > T3 > T4$, entonces tiene diferencias altamente significativas al 5% y 1%.

Figura N° 10: Solubilidad de nitrógeno (7 días)



Fuente: Elaboración propia.

Grado de solubilidad de nitrógeno a los 7 días.

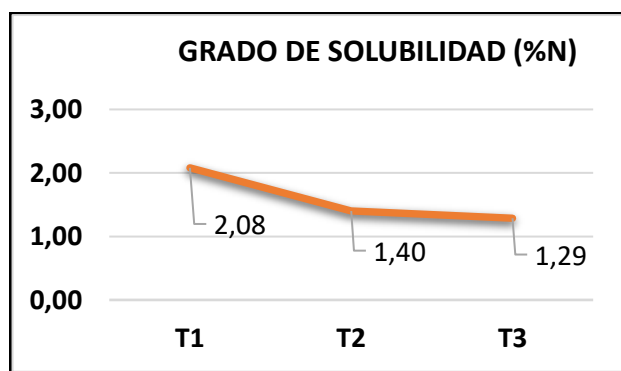
el grado de solubilidad se calculó de los tratamientos a los cuales se les aplico fertilizante para esto se tomó en cuenta (medias, dosis y el % de NPK que contiene).

Cuadro N° 22: Grado de solubilidad de nitrógeno (7 días)

GRADO DE SOLUBILIDAD (%)				
tratamientos	medias (mg/l)	NPK aplicado	% N. fertilizante	N(%)
T1	0,312	5	14.20	2,08
T2	0,210	2,5	14.20	1,40
T3	0,193	1	14.20	1,29

Fuente: Elaboración propia.

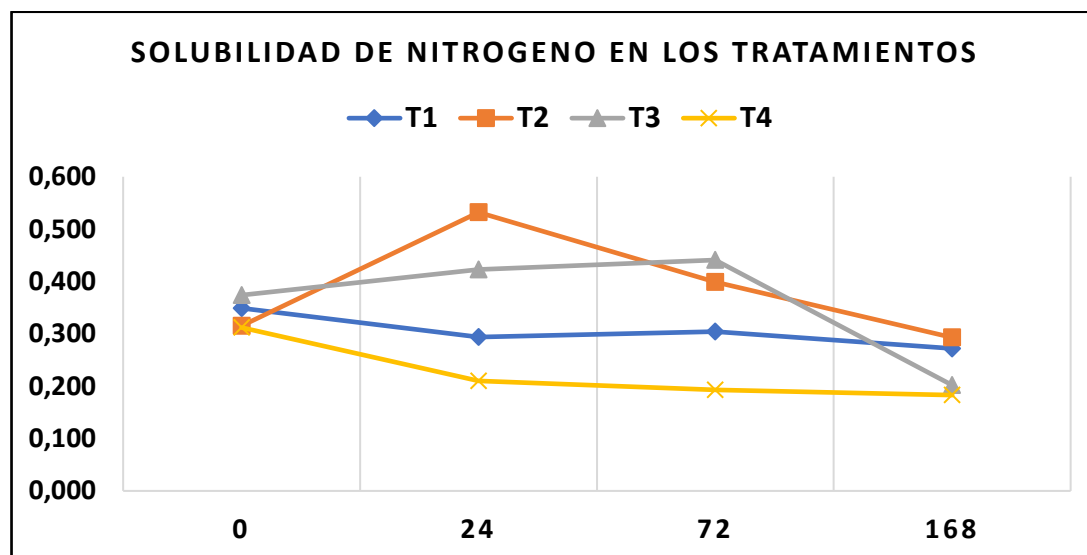
Figura N° 11: Grado de solubilidad de nitrógeno (7 días)



Fuente: Elaboración propia.

El grafico de porcentaje de solubilidad del fertilizante triple 15 se observa que el T1, de dosis elevada resulto con un porcentaje 2.08%, resulta en un tiempo prolongado, con respecto al T2 Y T4.

Solubilidad de nitrógeno para los tratamientos durante todo el ensayo.



En el gráfico de solubilidad del nitrógeno muestra una tendencia clara de alta disponibilidad inicial en los tratamientos (T1, T2 y T3) y después una disminución progresiva a lo largo del tiempo. Este comportamiento evidencia la rápida disolución del nitrógeno aplicado, especialmente en las primeras horas.

3.2. ANÁLISIS DE FOSFORO SOLUBLE

3.2.1. Análisis de fosforo soluble (00 horas)

Medir la solubilidad de fosforo de los lixiviados recolectados a las 00 horas, después de aplicar el fertilizante triple 15, así poder sacar el porcentaje de solubilidad en cuanto a lo aplicado.

Cuadro N° 23: Análisis de solubilidad para fosforo (00 horas)

LIXIVIADOS A LAS 00:00 HORAS (mg/l)							
TRATAMIENTOS	REPLICAS					SUMA	MEDIA
	I	II	III	IV	V		
T1	0,1	0,6	0,1	0,1	1,4	2,3	0,46
T2	0,1	0,4	0,1	0,1	0,1	0,8	0,16
T3	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	0,7	0,14
T4	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,6	0,12
SUMA	0,4	1,2	0,6	0,5	1,7	4,4	

Fuente: Elaboración propia.

El cuadro número 23 refleja los datos de la concentración (mg/l) de fosforo obtenidos mediante un análisis con el método de azul de molibdeno. Se puede observar que el T1 tiene una concentración (0.46 mg/l) que es mayor a los demás tratamientos.

Estos resultados demuestran que el T1 dosis alta, presenta un mejor comportamiento a las 00 horas después de aplicar el fertilizante.

Cuadro N° 24: Análisis de varianza ANVA para fosforo

Fuente de variación	grados de libertad	suma de cuadrados	cuadrado medio	f-calculada	f-tabulada	
					5%	1%
Total	19	1,792				
Tratamientos	3	0,388	0,129	1,474	2,85	4,44
Error	16	1,404	0,088			

Fuente: Elaboración propia.

Según el cuadro número 24 se puede observar el ANVA, el cual presenta que no hay diferencias significativas ya que la f-tabulada es menor a la f-calculada.

Para poder comprobar esto se realiza la comparación de medias.

Cuadro N° 25: Test de tukey para los tratamientos

PRUEBA DE TUKEY			
tratamientos	medias	5%	1%
T1	0,46	0,46 A	0,46 A
T2	0,16	0,16 A	0,16 A
T3	0,14	0,14 A	0,14 A
T4	0,12	0,12 A	0,12 A

Fuente: Elaboración propia.

Mediante el test de TUKEY se evidencio que no hay diferencias significativas en los tratamientos, pero si hay diferencias estadísticas.

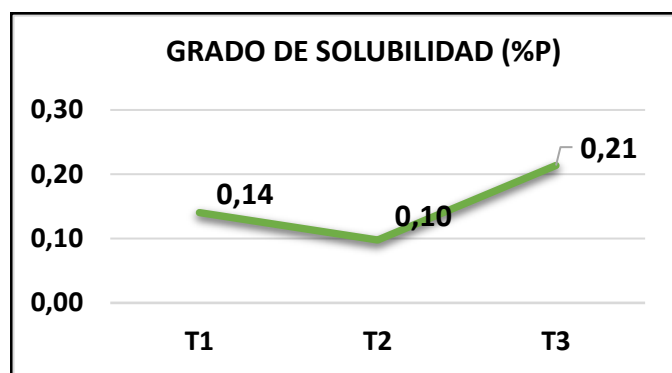
El grado de solubilidad de fosforo a las 00:00 h.

el grado de solubilidad se calculó para los tratamientos a los cuales se les aplico fertilizante para esto se tomó en cuenta (promedio, dosis y mg. P de NPK que contiene).

Cuadro N° 26: Grado de solubilidad de fosforo (00 horas)

GRADO DE SOLUBILIDAD (%)				
tratamientos	medias (mg/l)	NPK aplicado	%P fertilizante	P(%)
T1	0,46	5	14.85	0,14
T2	0,16	2,5	14.85	0,10
T3	0,14	1	14.85	0,21

Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 12: Grado de solubilidad de fosforo (00 horas)

Fuente: Elaboración propia.

El porcentaje de solubilidad de fosforo en el T3, a las 00:00 hrs. es el de mayor porcentaje de solubilidad en cuanto a lo aplicado (dosis baja).

3.2.2. Análisis del fosforo soluble (24 horas)

Medir la solubilidad de fosforo de los lixiviados recolectados a las 24 horas, después de aplicar el fertilizante triple 15, así poder sacar el porcentaje de solubilidad en cuanto a lo aplicado.

Cuadro N° 27: Análisis de fosforo (24 horas)

LIXIVIADOS A LAS 24:00 HORAS (mg/l)							
TRATAMIENTOS	REPLICAS					SUMA	MEDIA
	I	II	III	IV	V		
T1	2	0,2	0,1	0,2	2,7	5,2	1,04
T2	0,1	21,4	27,4	2,1	0,1	51,1	10,22
T3	0,1	0,1	0,1	0,1	1,2	1,6	0,32
T4	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,8	0,16
SUMA	2,4	21,9	27,7	2,5	4,2	58,7	

Fuente: Elaboración propia.

El cuadro número 27 refleja los datos de la concentración (mg/l) de fosforo obtenidos mediante un análisis con el método de azul de molibdeno. Se puede observar que el T2 tiene una concentración (10.22 mg/l) que es mayor a los demás tratamientos.

Estos resultados demuestran que el T2 dosis recomendada, presenta un mejor comportamiento a las 24 horas después de aplicar el fertilizante.

Cuadro N° 28: Analisis de varianza ANVA para fosforo

Fuente de variación	grados de libertad	suma de cuadrados	cuadrado medio	f-calculada	f-tabulada	
					5%	1%
Total	19	1053,866				
Tratamientos	3	356,006	118,669	2,721	2,85	4,44
Error	16	697,860	43,616			

Fuente: Elaboración propia.

Según el cuadro número 28 se puede observar el ANVA, el cual refleja que no hay diferencias significativas ya que la f-tabulada es menor a la f-calculada.

Para poder comprobar esto se realiza la comparación de medias.

Cuadro N° 29: Test de tukey para los tratamientos

PRUEBA DE TUKEY			
tratamientos	medias	5%	1%
T2	10,22	10,22 A	10,22 A
T1	1,04	1,04 A	1,04 A
T3	0,32	0,32 A	0,32 A
T4	0,16	0,16 A	0,16 A

Fuente: Elaboración propia.

Mediante el test de TUKEY se evidencio que no hay diferencias significativas en los tratamientos, pero si hay diferencias estadísticas

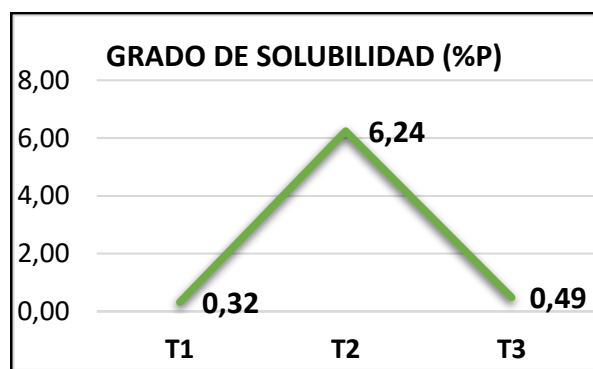
El grado de solubilidad de fosforo a las 24:00 h.

el grado de solubilidad se calculó para los tratamientos a los cuales se les aplico fertilizante para esto se tomó en cuenta (promedio, dosis y mg. P de NPK que contiene).

Cuadro N° 30: Grado de solubilidad de fosforo (24 horas)

GRADO DE SOLUBILIDAD (%)				
tratamientos	medias (mg/l)	NPK aplicado	%P fertilizante	P(%)
T1	1,04	5	14.85	0,32
T2	10,22	2,5	14.85	6,24
T3	0,32	1	14.85	0,49

Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 13: Grado de solubilidad de fosforo (24 horas)

Fuente: Elaboración propia.

En el grafico se puede observar que el T2 con 6.24 %, presento una mayor solubilidad. con una gran diferencia al T1 Y T3.

3.2.3. Análisis de fosforo soluble (72 horas)

Medir la solubilidad de fosforo de los lixiviados recolectados a las 72 horas, después de aplicar el fertilizante triple 15, así poder sacar el porcentaje de solubilidad en cuanto a lo aplicado.

Cuadro N° 31: Análisis de fosforo (72 horas)

LIXIVIADOS A LAS 72:00 HORAS (mg/l)							
TRATAMIENTOS	REPLICAS					SUMA	MEDIA
	I	II	III	IV	V		
T1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,6	0,12
T2	8,1	16,4	25,8	7,5	18,6	76,4	15,28
T3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,6	0,12
T4	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,6	0,12
SUMA	8,5	16,7	26,1	7,8	19,1	78,2	

Fuente: Elaboración propia.

El cuadro número 31 refleja los datos de la concentración (mg/l) de fosforo obtenidos mediante un análisis con el método de azul de molibdeno. Se puede observar que el T2 tiene una concentración (15.28 mg/l) que es mayor a los demás tratamientos.

Estos resultados demuestran que el T2 dosis recomendada, presenta un mejor comportamiento a las 72 horas después de aplicar el fertilizante.

Cuadro N° 32: Analisis de varianza ANVA para fosforo

Fuente de variación	grados de libertad	suma de cuadrados	cuadrado medio	f-calculada	f-tabulada	
					5%	1%
Total	19	1096,898				
Tratamientos	3	861,846	287,282	19,55	2,85	4,44
Error	16	235,052	14,691			

Fuente: Elaboración propia.

Según el cuadro número 32 se puede observar el ANVA, el cual refleja que hay diferencias significativas ya que la f-tabulada es mayor a la f-calculada.

Para poder comprobar esto se realiza la comparación de medias.

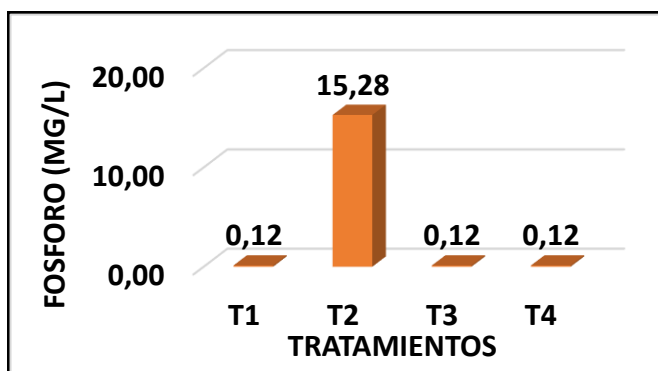
Cuadro N° 33:Test de tukey para los tratamientos

PRUEBA DE TUKEY					15,28	0,12	0,12
tratamientos	medias	5%	1%				
T2	15,28	15,28 A	15,28 A	0,12	15,16	0	0
T1	0,12	0,12 B	0,12 B	0,12	15,16	0	0
T3	0,12	0,12 B	0,12 B	0,12	15,16	0	0
T4	0,12	0,12 B	0,12 B	0,12	15,16	0	0

Fuente: Elaboración propia.

El cuadro número 33 presenta los resultados de la prueba de tukey, comparación de promedio aplicada a los 4 tratamientos del ensayo. Se concluye que el T2 tiene diferencias altamente significativas al 5% y 1%.con respecto al T1, T3 y T4.

El T1, T3 y T4 no tienen diferencias significativas entre ellos, pero si estadísticamente.

Figura N° 14:Solubilidad de fosforo (72 horas)

Fuente: Elaboración propia.

Grado de solubilidad de fosforo a las 72 horas.

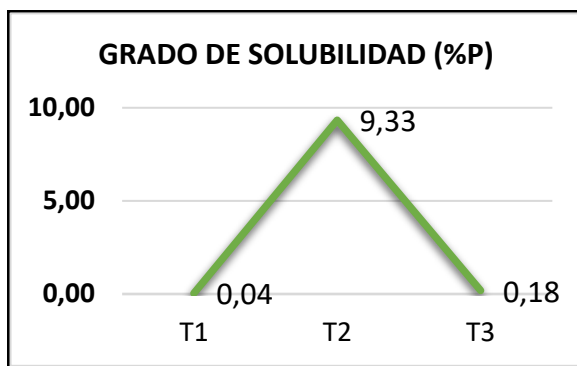
el grado de solubilidad se calculó para los tratamientos a los cuales se les aplico fertilizante para esto se tomó en cuenta (promedio, dosis y mg. P de NPK que contiene).

Cuadro N° 34:Grado de solubilidad de fosforo (72horas)

GRADO DE SOLUBILIDAD (%)				
tratamientos	medias (mg/l)	NPK aplicado	%P fertilizante	P(%)
T1	0,12	5	14.85	0,04
T2	15,28	2,5	14.85	9,33
T3	0,12	1	14.85	0,18

Elaboración propia.

Figura N° 15: Grado de solubilidad de fosforo (72 horas)



Elaboración propia.

El T2 tiene mayor porcentaje de solubilidad con 9.33%, a las 72 horas, respecto al T1 Y T3 que su porcentaje de solubilidad es muy bajo.

3.2.4. Análisis del fosforo soluble (7 días)

Medir la solubilidad de fosforo de los lixiviados recolectados a los 7 días, después de aplicar el fertilizante triple 15, así poder sacar el porcentaje de solubilidad en cuanto a lo aplicado.

Cuadro N° 35: Análisis de fosforo (7 días)

LIXIVIADOS A LAS 168:00 HORAS (mg/l)							
TRATAMIENTOS	REPLICAS					SUMA	MEDIA
	I	II	III	IV	V		
T1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,2	0,8	0,16
T2	0,1	4,7	3,4	6,2	2,8	17,2	3,44
T3	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,6	0,12
T4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5	0,1
SUMA	0,4	5	3,7	6,8	3,2	19,1	

Elaboración propia.

El cuadro número 35 refleja los datos de la concentración (mg/l) de fosforo obtenidos mediante un análisis con el método de azul de molibdeno. Se puede observar que el T2 (dosis recomendada) tiene una concentración (3.44 mg/l) que es mayor a los demás tratamientos.

Estos resultados demuestran que el T2 dosis recomendada, presenta un mejor comportamiento a los 7 días después de aplicar el fertilizante.

Cuadro N° 36: Analisis de varianza ANVA para fosforo

Fuente de variación	grados de libertad	suma de cuadrados	cuadrado medio	f-calculada	f-tabulada	
					5%	1%
Total	19	61,990				
Tratamientos	3	41,178	13,726	10,552	2,85	4,44
Error	16	20,812	1,301			

Elaboración propia.

Según el cuadro número 36 se puede observar el ANVA, el cual refleja que hay diferencias significativas ya que la f-tabulada es mayor a la f-calculada.

Para poder comprobar esto se realiza la comparación de medias.

Cuadro N° 37: Test de tukey para los tratamientos

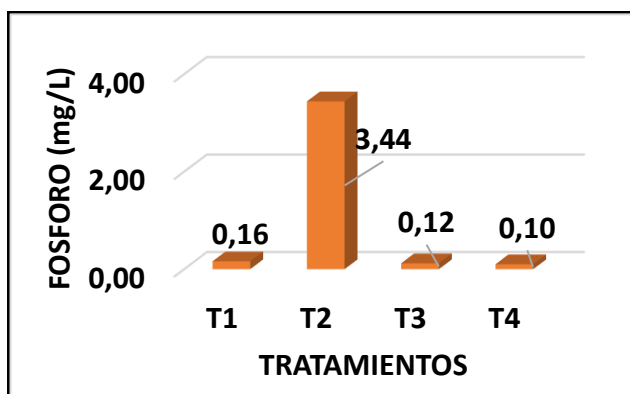
PRUEBA DE TUKEY							
tratamientos	medias	5%	1%				
T2	3,44	3,44 A	3,44 A		3,44	0,16	0,12
T1	0,16	0,16 B	0,16 B	0,10	3,34	0,06	0,02
T3	0,12	0,12 B	0,12 B	0,12	3,32	0,04	0
T4	0,10	0,10 B	0,10 B	0,16	3,28	0	-0,04

Elaboración propia.

El cuadro número 37 presenta los resultados de la prueba de tukey, comparación de promedio aplicada a los 4 tratamientos del ensayo. Se concluye que el T2 tiene diferencias altamente significativas al 5% y 1%. con respecto al T1, T3 y T4.

El T1(dosis alta), T3(dosis baja) y T4(sin fertilizante), no tienen diferencias significativas entre ellos, pero si estadísticamente.

Figura N° 16: Solubilidad de fosforo (7 días)



Elaboración propia.

El grado de solubilidad de fosforo a los 7 días.

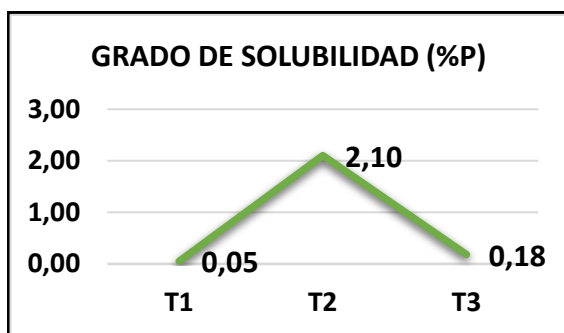
el grado de solubilidad se calculó para los tratamientos a los cuales se les aplicó fertilizante para esto se tomó en cuenta (promedio, dosis y mg. P de NPK que contiene).

Cuadro N° 38: Grado de solubilidad de fosforo (7 días)

GRADO DE SOLUBILIDAD (%)				
tratamientos	medias (mg/l)	NPK aplicado	%P fertilizante.	P(%)
T1	0,16	5	327,51	0,05
T2	3,44	2,5	163,70	2,10
T3	0,12	1	65,50	0,18

Elaboración propia.

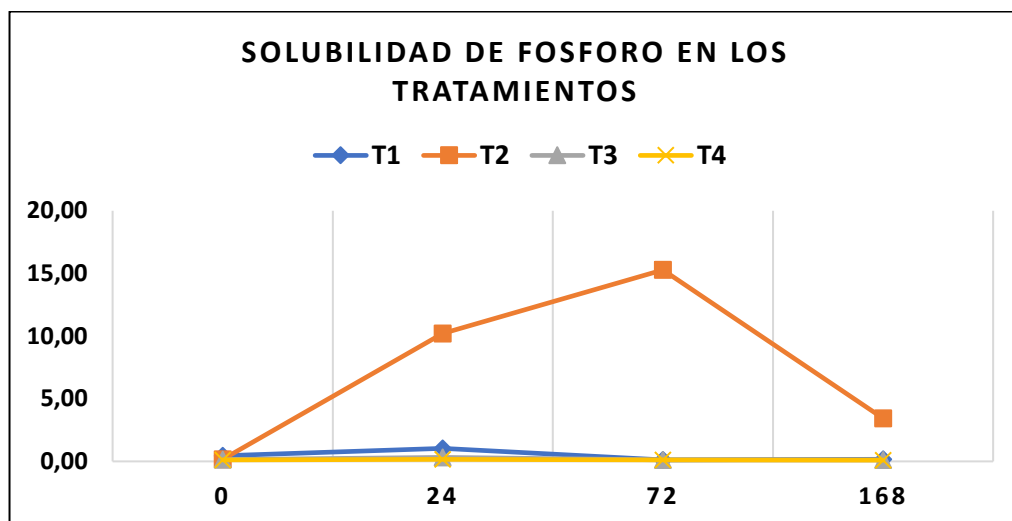
Figura N° 17: Grado de solubilidad de fosforo (7 días)



Elaboración propia.

El T2 tiene mayor porcentaje de solubilidad con 2.10%, a los 7 días, respecto al T1 y T3 que su porcentaje de solubilidad es muy bajo.

Solubilidad de fosforo para los tratamientos durante el ensayo de lixiviados.



La grafica de solubilidad de fosforo presenta valores inferiores al nitrógeno y potasio, evidenciando su baja movilidad de este nutriente en el suelo.

El T2 (dosis recomendada) presento un mejor comportamiento con relación a los demás tratamientos, su mayor concentración se observa a las 72 horas

3.3. ANÁLISIS DE POTASIO SOLUBLE

3.3.1. Análisis de potasio soluble (00 horas)

Medir la solubilidad de potasio de los lixiviados recolectados a las 00 horas, después de aplicar el fertilizante triple 15, así poder sacar el porcentaje de solubilidad en cuanto a lo aplicado.

Cuadro N° 39: Análisis de solubilidad para potasio (00 horas)

LIXIVIADOS A LAS 00:00 hrs (mg/l)							
TRATAMIENTOS	REPLICAS					SUMA	MEDIA
	I	II	III	IV	V		
T1	15,25	5,37	4,98	6,69	14,57	46,85	9,37
T2	6,32	5,53	5,73	7,80	5,74	31,13	6,23
T3	4,83	5,70	5,16	4,79	6,31	26,79	5,36
T4	6,50	5,58	6,02	8,00	6,55	32,65	6,53
SUMA	32,90	22,18	21,89	27,28	33,18	137,42	

Fuente: Elaboración propia.

El cuadro número 39 refleja los datos de la concentración (mg/l) de potasio obtenidos mediante un análisis con el método de fotometría de llama o AAS. Se puede observar que el T1 tiene una concentración (9.37 mg/l) que es mayor a los demás tratamientos.

Estos resultados demuestran que el T1 dosis elevada, presenta un mejor comportamiento a las 00 horas, después de aplicar el fertilizante.

Cuadro N° 40: Análisis de varianza ANVA para potasio

Fuente de variación	grados de libertad	suma de cuadrados	cuadrado medio	f-calculada	f-tabulada	
					5%	1%
Total	19	157,858				
Tratamientos	3	45,362	15,121	2,15	2,85	4,44
Error	16	112,497	7,031			

Fuente: Elaboración propia.

Según el cuadro número 40 se puede observar el ANVA, el cual refleja que no hay diferencias significativas ya que la f-tabulada es menor a la f-calculada.

Para poder comprobar esto se realiza la comparación de medias.

Cuadro N° 41: Test de tukey para los tratamientos

PRUEBA DE TUKEY			
tratamientos	medias	5%	1%
T1	9,37	9,37 A	9,37 A
T4	6,53	6,53 A	6,53 A
T2	6,23	6,23 A	6,23 A
T4	5,36	5,36 A	5,36 A

Fuente: Elaboración propia.

El cuadro número 41 presenta los resultados de la prueba de tukey, comparación de promedio aplicada a los 4 tratamientos del ensayo. Se concluye que los tratamientos no tienen diferencias significativas, sin embargo, si tiene diferencias estadísticas.

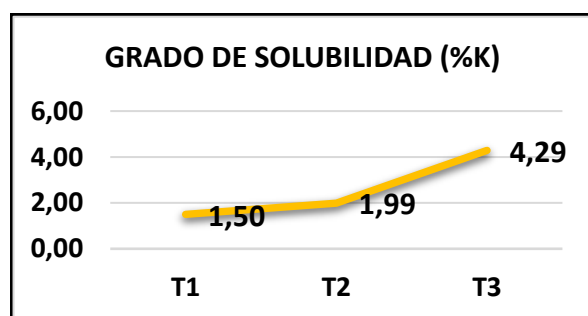
Grado de solubilidad de potasio a las 00:00 h.

el grado de solubilidad se calculó para los tratamientos a los cuales se les aplico fertilizante para esto se tomó en cuenta (promedio, dosis y mg. K de NPK que contiene).

Cuadro N° 42: Grado de solubilidad de potasio (00 horas)

GRADO DE SOLUBILIDAD (%)				
tratamientos	medias (mg/l)	NPK aplicado	%K fertilizante.	K(%)
T1	9,37	5	15.02	1,50
T2	6,23	2,5	15.02	1,99
T3	5,36	1	15.02	4,29

Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 18: Grado de solubilidad de potasio (00 horas)

Fuente: Elaboración propia.

El T3 tiene mayor porcentaje de solubilidad con 4.29 % a las 00 horas, respecto al T1 y T3 que su porcentaje de solubilidad es muy bajo.

3.3.2. Análisis del potasio soluble (24 horas)

Medir la solubilidad de potasio de los lixiviados recolectados a las 24 horas, después de aplicar el fertilizante triple 15, así poder sacar el porcentaje de solubilidad en cuanto a lo aplicado.

Cuadro N° 43: Análisis de solubilidad de potasio (24 horas)

LIXIVIADOS A LAS 24 HRS (mg/l)							
TRATAMIENTOS	REPLICAS					SUMA	MEDIA
	I	II	III	IV	V		
T1	4,02	3,93	3,66	3,58	7,80	22,98	4,60
T2	16,25	24,73	38,96	14,47	31,96	126,37	25,27
T3	3,33	4,26	7,49	3,67	4,35	23,09	4,62
T4	4,73	3,03	3,16	3,64	5,15	19,71	3,94
SUMA	28,32	35,94	53,28	25,36	49,26	192,15	

Fuente: Elaboración propia.

El cuadro número 43 refleja los datos de la concentración (mg/l) de potasio obtenidos mediante un análisis con el método de fotometría de llama o AAS. Se puede observar que el T2 tiene una concentración (25.27 mg/l) que es mayor a los demás tratamientos.

Estos resultados demuestran que el T2 dosis recomendada, presenta un mejor comportamiento a las 24 horas, después de aplicar el fertilizante.

Cuadro N° 44: Análisis de varianza ANVA para potasio

Fuente de variación	grados de libertad	suma de cuadrados	cuadrado medio	f-calculada	f-tabulada	
					5%	1%
Total	19	2095,981				
Tratamientos	3	1637,783	545,928	19,064	2,85	4,44
Error	16	458,197	28,637			

Fuente: Elaboración propia.

Según el cuadro número 44 se puede observar el ANVA, el cual refleja que hay diferencias significativas ya que la f-tabulada es mayor a la f-calculada.

Para poder comprobar esto se realiza la comparación de medias.

Cuadro N° 45: Test de tukey para los tratamientos

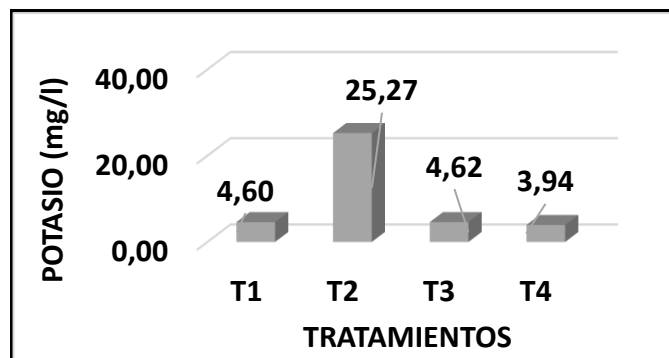
PRUEBA DE TUKEY			
tratamientos	medias	5%	1%
T2	25,27	25,27 A	25,27 A
T3	4,62	4,62 B	4,62 B
T1	4,60	4,60 B	4,60 B
T4	3,94	3,94 B	3,94 B

	25,27	4,62	4,6
3,94	21,33	0,68	0,66
4,6	20,67	0,02	0
4,62	20,65	0	-0,02

Fuente: Elaboración propia.

El cuadro número 45 presenta los resultados de la prueba de tukey, comparación de promedio aplicada a los 4 tratamientos del ensayo. Se concluye que el T2 tiene diferencias altamente significativas al 5% y 1% con respecto a los demás tratamientos, sin embargo, el T1 (dosis elevada), T3(dosis baja) y T4 (sin fertilizante) no tienen diferencias significativas, pero si tiene diferencias estadísticas entre ellos.

Figura N° 19: Solubilidad de potasio (24 horas)



Fuente: Elaboración propia.

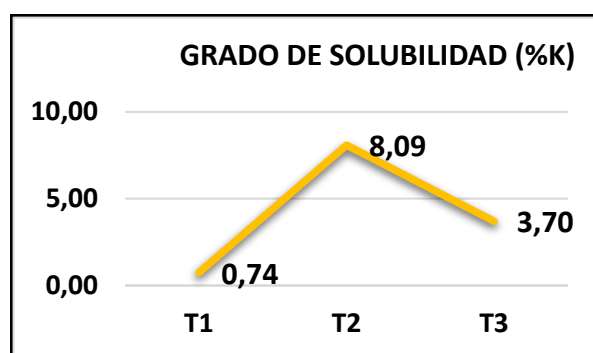
Grado de solubilidad de potasio a las 24 h.

El grado de solubilidad se calculó para los tratamientos a los cuales se les aplicó fertilizante para esto se tomó en cuenta (promedio, dosis y mg. K de NPK que contiene).

Cuadro N° 46: Grado de solubilidad de potasio (24 horas)

GRADO DE SOLUBILIDAD (%)				
tratamientos	promedio (mg/l)	NPK aplicado	%K fertilizante	K(%)
T1	4,60	5	15.02	0,74
T2	25,27	2,5	15.02	8,09
T3	4,62	1	15.02	3,70

Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 20: Grado de solubilidad de potasio (24 horas)

Fuente: Elaboración propia.

El T2 es que obtuvo 8.09 % de solubilidad que es mayor a los demás tratamientos, quiere decir que este tratamiento tiene mejor comportamiento a las 24 horas después de aplicar el fertilizante.

3.3.3. Análisis del fósforo soluble (72 horas)

Medir la solubilidad de potasio de los lixiviados recolectados a las 72 horas, después de aplicar el fertilizante triple 15, así poder sacar el porcentaje de solubilidad en cuanto a lo aplicado.

Cuadro N° 47: Análisis de solubilidad de potasio (72 horas)

LIXIVIADOS A LAS 72:00 HORAS (mg/l)							
TRATAMIENTOS	REPLICAS					SUMA	MEDIA
	I	II	III	IV	V		
T1	8,07	9,07	10,07	11,07	12,07	50,35	10,07
T2	40,20	34,22	30,07	36,07	38,07	178,63	35,73
T3	6,42	5,18	2,88	2,59	2,24	19,30	3,86
T4	1,23	2,52	1,25	2,09	2,48	9,56	1,91
SUMA	55,91	50,99	44,26	51,81	54,85	257,83	

Fuente: Elaboración propia.

El cuadro número 47 refleja los datos de la concentración (mg/l) de potasio obtenidos mediante un análisis con el método de fotometría de llama o AAS. Se puede observar que el T2 tiene una concentración (35.73 mg/l) que es mayor a los demás tratamientos.

Estos resultados demuestran que el T2 dosis recomendada, presenta un mejor comportamiento a las 72 horas, después de aplicar el fertilizante.

Cuadro N° 48: Análisis de varianza ANVA para potasio

Fuente de variación	grados de libertad	suma de cuadrados	cuadrado medio	f-calculada	f-tabulada	
					5%	1%
Total	19	3742,449				
Tratamientos	3	3657,444	1219,148	229,475	2,85	4,44
Error	16	85,004	5,313			

Fuente: Elaboración propia.

Según el cuadro número 48 se puede observar el ANVA, el cual refleja que hay diferencias significativas ya que la f-tabulada es mayor a la f-calculada.

Para poder comprobar esto se realiza la comparación de medias.

Cuadro N° 49: Test de tukey para los tratamientos

PRUEBA DE TUKEY							
tratamientos	medias	5%	1%				
T2	35,73	35,73 A	35,73 A				
T1	10,07	10,07 B	10,07 B				
T3	3,86	3,86 C	3,86 C				
T4	1,91	1,91 C	1,91 C				

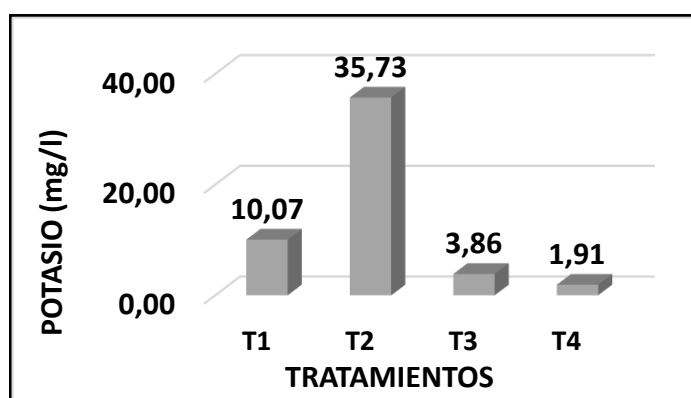
	35,73	10,07	3,86
1,91	33,82	8,16	1,95
3,86	31,87	6,21	0
10,07	25,66	0	-6,21

Fuente: Elaboración propia.

El cuadro número 49 presenta los resultados de la prueba de tukey, comparación de promedio aplicada a los 4 tratamientos del ensayo. Se concluye que el T2 tiene diferencias altamente significativas al 5% y 1% con respecto a los demás tratamientos, sin embargo, el T3 y T4 no tienen diferencias significativas, pero si tiene diferencias estadísticas entre ellos.

El T1 tiene diferencias altamente significativas al 5% y 1% con respecto al T3 T4.

Figura N° 21: Solubilidad de potasio (72 horas)



Fuente: Elaboración propia.

Grado de solubilidad de potasio a las 72 h.

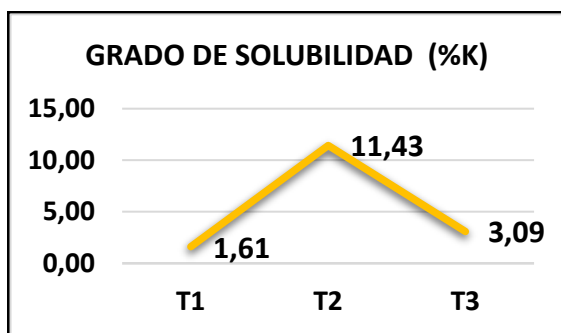
El grado de solubilidad se calculó para los tratamientos a los cuales se les aplicó fertilizante para esto se tomó en cuenta (promedio, dosis y mg. K de NPK que contiene).

Cuadro N° 50: Grado de solubilidad de potasio (72 horas)

GRADO DE SOLUBILIDAD (%)				
tratamientos	promedio (mg/l)	NPK aplicado	%K fertilizante.	K(%)
T1	10,07	5	15.02	1,61
T2	35,73	2,5	15.02	11,43
T3	3,86	1	15.02	3,09

Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 22: Grado de solubilidad de potasio (72 horas)



Fuente: Elaboración propia.

El T2 tiene un grado mayor con 11.43 % y el T3 con 3.09% y el T1 1.61% que es el que menos resultado en cuanto a lo aplicado que es dosis elevada.

3.3.4. Análisis del potasio soluble (7 días)

Medir la solubilidad de potasio de los lixiviados recolectados a los 7 días, después de aplicar el fertilizante triple 15, así poder sacar el porcentaje de solubilidad en cuanto a lo aplicado.

Cuadro N° 51: Análisis de potasio (7 días)

LIXIVIADOS A LOS 7 DIAS (mg/l)							
TRATAMIENTOS	REPLICAS					SUMA	MEDIA
	I	II	III	IV	V		
T1	8,87	7,22	10,52	9,72	5,77	42,10	8,42
T2	44,90	42,70	42,02	46,50	48,40	224,52	44,90
T3	19,84	5,48	4,40	5,29	6,74	41,75	8,35
T4	1,61	3,36	1,94	3,35	1,80	12,05	2,41
SUMA	75,22	58,76	58,88	64,86	62,71	320,42	

Fuente: Elaboración propia.

El cuadro número 51 refleja los datos de la concentración (mg/l) de potasio obtenidos mediante un análisis con el método de fotometría de llama o AAS. Se puede observar que el T2(dosis recomendada) tiene una concentración (44.90 mg/l) que es mayor a los demás tratamientos.

Estos resultados demuestran que el T2 dosis recomendada, presenta un mejor comportamiento a los 7 días, después de aplicar el fertilizante.

Cuadro N° 52: Analisis de varianza ANVA para potasio

Fuente de variación	grados de libertad	suma de cuadrados	cuadrado medio	f-calculada	f-tabulada	
					5%	1%
Total	19	5893,976				
Tratamientos	3	5680,423	1893,474	141,865	2,85	4,44
Error	16	213,553	13,347			

Fuente: Elaboración propia.

Según el cuadro número 52 se puede observar el ANVA, el cual refleja que hay diferencias significativas ya que la f-tabulada es mayor a la f-calculada.

Para poder comprobar esto se realiza la comparación de medias.

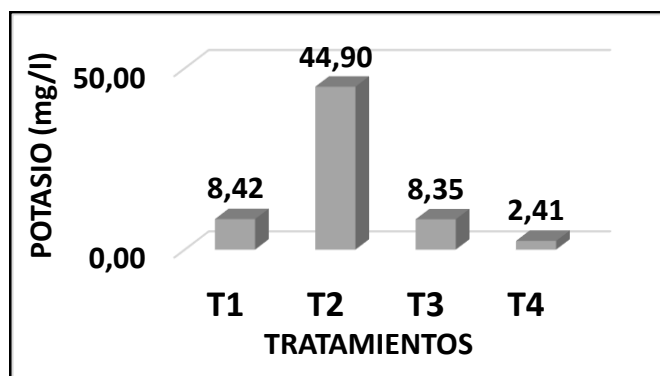
Cuadro N° 53: Test de tukey para los tratamientos

PRUEBA DE TUKEY							
tratamientos	medias	5%	1%				
T2	44,90	44,90 A	44,90 A	2,41	42,49	6,01	5,94
T1	8,42	8,42 B	8,42 B	8,35	36,55	0,07	0
T3	8,35	8,35 B	8,35 B	8,42	36,48	0	-0,07
T4	2,41	2,41 B	2,41 B				

Fuente: Elaboración propia.

El cuadro número 53 presenta los resultados de la prueba de tukey, comparación de promedio aplicada a los 4 tratamientos del ensayo. Se concluye que el T2 (dosis recomendada) tiene diferencias altamente significativas al 5% y 1% con respecto a los demás tratamientos, sin embargo, el T1 (dosis alta), T3 (dosis baja) y T4 (sin fertilizante), no tienen diferencias significativas, pero si tiene diferencias estadísticas entre ellos.

Figura N° 23: Solubilidad de potasio (7 días)



Fuente: Elaboración propia.

Grado de solubilidad de potasio a los 7 días.

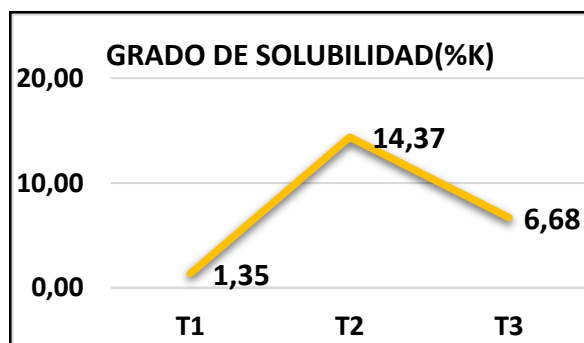
el grado de solubilidad se calculó para los tratamientos a los cuales se les aplicó fertilizante para esto se tomó en cuenta (promedio, dosis y mg. K de NPK que contiene).

Cuadro N° 54: Grado de solubilidad para potasio (7 días)

GRADO DE SOLUBILIDAD (%)				
tratamientos	promedio (mg/l)	NPK aplicado	%K fertilizante	K(%)
T1	8,42	5	15.02	1,35
T2	44,90	2,5	15.02	14,37
T3	8,35	1	15.02	6,68

Fuente: Elaboración propia.

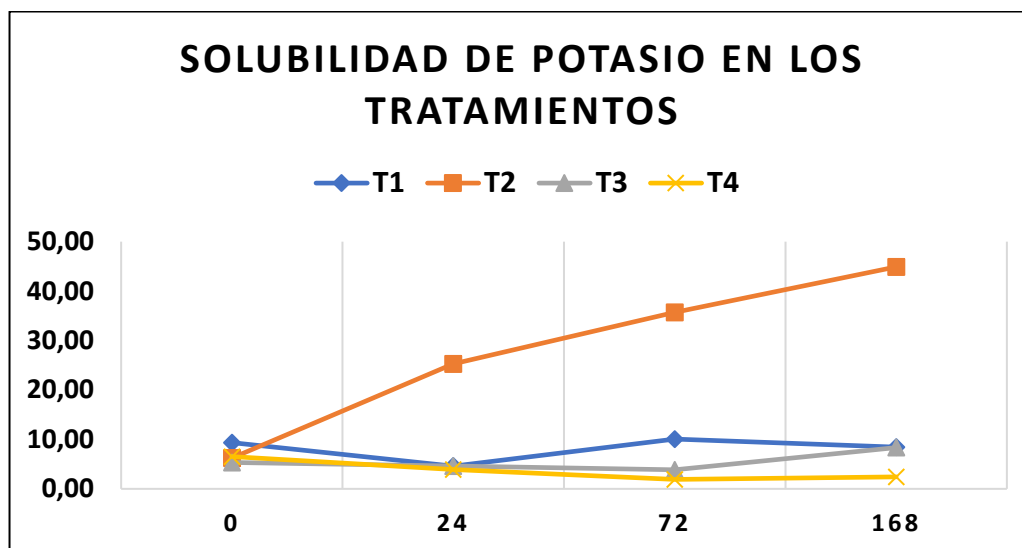
Figura N° 24: Grado de solubilidad de potasio (7 días)



Fuente: Elaboración propia.

En el siguiente grafico podemos observar que el T2 tiene 14,37 % se solubilidad del fertilizante aplicado.

Solubilidad de potasio para los tratamientos durante el ensayo de los lixiviados



Las gráficas de solubilidad del potasio muestran un comportamiento intermedio entre el nitrógeno y el fosforo, con valores de lixiviación.

El T2 (dosis recomendada) presento una mayor lixiviación ya que en todo el ensayo su concentración (mg/l) fue de forma ascendente con diferencia a los demás tratamientos.

3.4. EVALUACION DEL POTENCIAL DE ABSORCIÓN DE MACRONUTRIENTES (NITRÓGENO, FOSFORO Y POTASIO). EN EL CULTIVO DE LA LECHUGA (*Lactuca sativa L.*)

3.4.1. Asimilación de nitrógeno (lechuga)

Determinar el porcentaje de asimilación de un fertilizante sirve para verificar si la planta absorbe todo el fertilizante que se incorporó al suelo o cuanto es lo que requiere para su desarrollo y con esto poder determinar una mejor dosis a aplicar.

Cuadro N° 55: Analisis de asimilación de nitrógeno para las lechugas

nitrógeno de la lechuga (%)							
TRATAMIENTOS	REPLICAS					SUMA	MEDIA
	I	II	III	IV	V		
T1	8,90	8,39	7,89	8,14	8,55	41,86	8,37
T2	6,45	5,83	6,14	6,30	6,18	30,91	6,18
T3	4,09	4,09	3,73	3,60	3,15	18,66	3,73
T4	2,35	1,75	1,75	2,56	2,37	10,78	2,16
SUMA	21,79	20,06	19,51	20,60	20,25	102,20	

Fuente: Elaboración propia.

En el cuadro número 55 se refleja los datos de nitrógeno obtenidos mediante un análisis por el método de reducción de cadmio. Donde se observa que el T1 tiene un mayor promedio con 8.37 mg/l dosis elevada, con respecto a los demás tratamientos.

Cuadro N° 56: Analisis de varianza ANVA para nitrógeno

Fuente de variación	grados de libertad	suma de cuadrados	cuadrado medio	f-calculada	f-tabulada	
					5%	1%
Total	19	114,13				
Tratamientos	3	112,14	37,38	299,22	2,85	4,44
Error	16	2,00	0,12			

Fuente: Elaboración propia.

Según el cuadro número 56 se puede observar el análisis de varianza, en el cual presentan diferencias significativas ya que la f-calculada es mayor a la f-tabulada.

Para verificar se realiza la comparación de medias para los tratamientos.

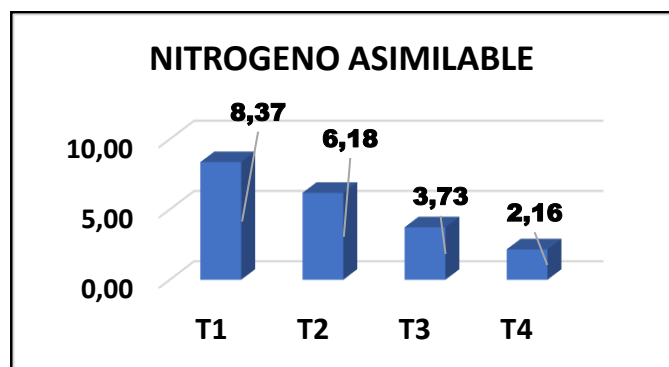
Cuadro N° 57: Test de tukey para los tratamientos

PRUEBA DE TUKEY			
tratamientos	promedio	5%	1%
T1	8,37	8,37 A	8,37 A
T2	6,18	6,18 B	6,18 B
T3	3,73	3,73 C	3,73 C
T3	2,16	2,16 D	2,16 D

	8,37	6,18	3,73
2,16	6,21	4,02	1,57
3,73	4,64	2,45	0
6,18	2,19	0	-2,45

Fuente: Elaboración propia.

El cuadro número 57 presenta los resultados de la prueba de tukey, comparación de promedio aplicada a los 4 tratamientos del ensayo. Se concluye que el $T1 > T2 > T3 > T4$, tienen diferencias altamente significativas al 5% y 1% entre ellos.

Figura N° 25: Asimilación de nitrógeno (lechuga)

Fuente: Elaboración propia.

Eficiencia de nitrógeno en el cultivo de la lechuga.

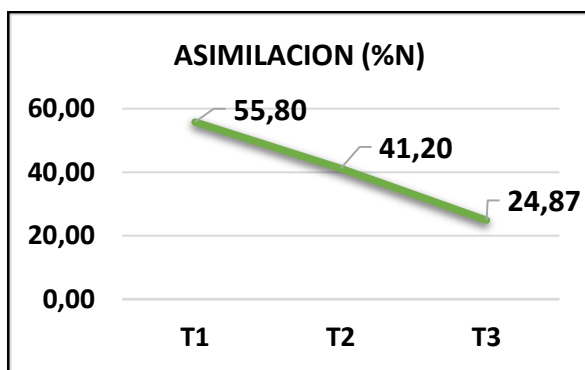
La asimilación se calculó para los tratamientos a los cuales se les aplicó fertilizante para esto se tomó en cuenta (biomasa, promedio, dosis y %N de NPK que contiene).

Cuadro N° 58: Grado de asimilación de nitrógeno para las lechugas

ASIMILACION DE NITROGENO				
tratamientos	promedio (%N)	NPK aplicado	% N. fertilizante	%N
T1	8,37	5	14.20	55,80
T2	6,18	2,5	14.20	41,20
T3	3,73	1	14.20	24,87

Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 26: Grado de asimilación de nitrógeno (lechuga)



Fuente: Elaboración propia.

En el siguiente grafico podemos observar que el T1(dosis elevada) tiene 55.80 % de eficiencia en asimilación del fertilizante aplicado, siendo el que respondió. El T2 tiene 41.20% y el T3 24.87% de eficiencia de asimilación.

El % de nitrógeno faltante quiere decir que se perdió por lixiviación o volatilización.

3.4.2. Asimilación de fósforo (lechuga)

Determinar el porcentaje de asimilación de un fertilizante sirve para verificar si la planta absorbe todo el fertilizante que se incorporó al suelo o cuanto es lo que requiere para su desarrollo y con esto poder determinar una mejor dosis a aplicar.

Cuadro N° 59: Análisis de fósforo para la lechuga

fósforo de lechuga mg/kg							
TRATAMIENTOS	REPLICAS					SUMA	MEDIA
	I	II	III	IV	V		
T1	15,64	14,35	15,25	14,40	14,25	73,88	14,78
T2	14,98	14,71	14,83	13,50	14,50	72,52	14,50
T3	14,30	14,15	14,23	14,30	14,00	70,98	14,20
T4	14,10	14,50	15,20	12,50	14,50	70,80	14,16
SUMA	59,01	57,71	59,50	54,70	57,25	288,17	

Fuente: Elaboración propia.

En el cuadro número 59 se refleja los datos de nitrógeno obtenidos mediante un análisis por el método de método de azul de molibdeno. Donde se observa que los tratamientos no tienen diferencia.

Cuadro N° 60: Analisis de varianza ANVA para fosforo

Fuente de variación	grados de libertad	suma de cuadrados	cuadrado medio	f-calculada	f-tabulada	
					5%	1%
Total	19	8,34				
Tratamientos	3	1,26	0,42	0,95	2,85	4,44
Error	16	7,08	0,44			

Fuente: Elaboración propia.

Según el cuadro número 60 se puede observar el análisis de varianza, en el cual no presentan diferencias significativas ya que la f-calculada es menor a la f-tabulada.

Para verificar se realiza la comparación de medias para los tratamientos.

Cuadro N° 61: Test de tukey para los tratamientos

PRUEBA DE TUKEY			
tratamientos	promedio	5%	1%
T1	14,78	14,78 A	14,78 A
T2	14,5	14,50 A	14,50 A
T3	14,2	14,20 A	14,20 A
T3	14,16	14,16 A	14,16 A

El cuadro número 61 presenta los resultados de la prueba de tukey, comparación de promedio aplicada a los 4 tratamientos del ensayo. Se concluye que los tratamientos no tienen diferencias significativas al 5% tampoco al 1%.

Eficiencia de fosforo para el cultivo de la lechuga.

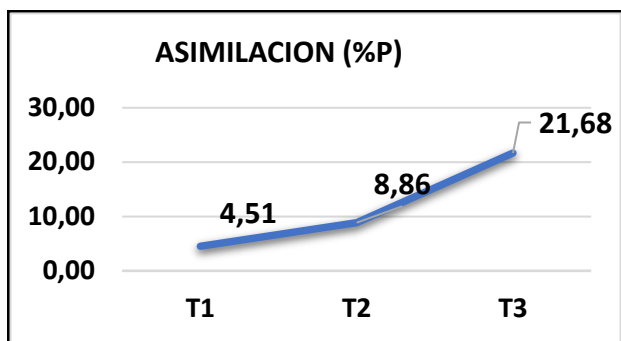
La asimilación se calculó para los tratamientos a los cuales se les aplicó fertilizante para esto se tomó en cuenta (biomasa, promedio, dosis y mg P de NPK que contiene).

Cuadro N° 62: Grado de asimilación de fosforo para la lechuga

ASIMILACION DE FOSFORO				
tratamientos	medias (mg/kg)	NPK aplicado	%P fertilizante.	%P
T1	14,78	5	14.85	4,51
T2	14,5	2,5	14.85	8,86
T3	14,2	1	14.85	21,68

Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 27: Grado de asimilación de fosforo (lechuga)



Fuente: Elaboración propia.

En el siguiente grafico podemos observar que el T3 tiene 21.68 % de eficiencia del fertilizante aplicado, siendo el que mejor respondió. el T2 tiene 8.86 % y el T1 4.51% de eficiencia.

3.4.3. Asimilación de potasio (lechuga)

Determinar el porcentaje de asimilación de un fertilizante sirve para verificar si la planta absorbe todo el fertilizante que se incorporó al suelo o cuanto es lo que requiere para su desarrollo y con esto poder determinar un mejor plan de fertilización.

Cuadro N° 63: Análisis de potasio para las lechugas

potasio de lechuga mg/kg							
TRATAMIENTOS	REPLICAS					SUMA	MEDIA
	I	II	III	IV	V		
T1	82,65	76,80	79,10	84,55	80,39	403,49	80,70
T2	73,32	68,67	74,15	71,93	70,73	358,80	71,76
T3	50,99	49,54	53,20	45,31	48,07	247,11	49,42
T4	32,33	39,13	40,95	36,62	35,66	184,69	36,94
SUMA	239,29	234,14	247,40	238,41	234,85	1194,09	

Fuente: Elaboración propia.

En el cuadro número 63 se refleja los datos de nitrógeno obtenidos mediante un análisis por el método de método de método de fotometría de llama o AAS. Donde se observa que el T1 tienen un promedio mayor a los demás tratamientos.

Cuadro N° 64: Análisis de varianza ANVA para potasio

Fuente de variación	grados de libertad	suma de cuadrados	cuadrado medio	f-calculada	f-tabulada	
					5%	1%
Total	19	6185,15				
Tratamientos	3	6050,53	2016,84	239,70	2,85	4,44
Error	16	134,63	8,41			

Fuente: Elaboración propia.

Según el cuadro número 64 se puede observar el análisis de varianza, en el cual presentan diferencias significativas ya que la f-calculada es mayor a la f-tabulada.

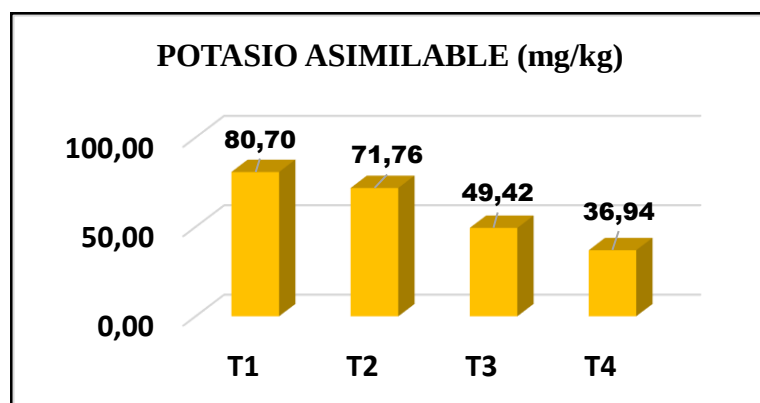
Para verificar se realiza la comparación de medias para los tratamientos.

Cuadro N° 65: Test de tukey para los tratamientos

PRUEBA DE TUKEY					80,7	71,76	49,42
tratamientos	promedio	5%	1%				
T1	80,7	80,70 A	80,70 A	36,94	43,76	34,82	12,48
T2	71,76	71,76 B	71,76 B	49,42	31,28	22,34	0
T3	49,42	49,42 C	49,42 C	71,76	8,94	0	-22,34

Fuente: Elaboración propia.

El cuadro número 65 presenta los resultados de la prueba de tukey, comparación de promedio aplicada a los 4 tratamientos del ensayo. Se concluye que los tratamientos tienen diferencias altamente significativas al 5% tampoco al 1%. ($T1 > T2 > T3 > T4$)

Figura N° 28: Asimilación de potasio (lechuga)

Fuente: Elaboración propia.

La eficiencia de potasio en el cultivo de la lechuga.

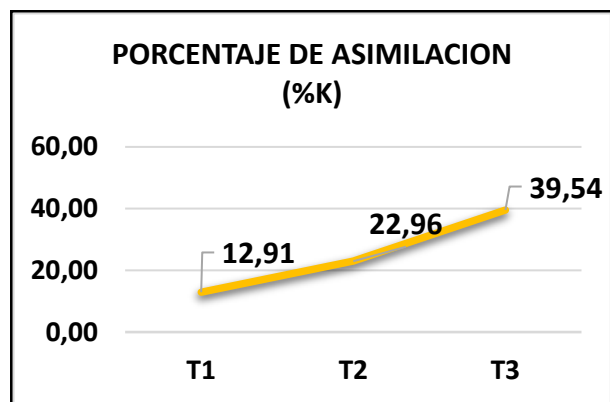
La asimilación se calculó para los tratamientos a los cuales se les aplicó fertilizante para esto se tomó en cuenta (promedio, dosis y mg P de NPK que contiene).

Cuadro N° 66: Grado de asimilación de potasio para las lechugas

ASIMILACION DE POTASIO				
tratamientos	medias (mg/kg)	NPK aplicado	%K fertilizante	%K
T1	80,70	5	15.02	12,91
T2	71,76	2,5	15.02	22,96
T3	49,42	1	15.02	39,54

Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 29: Grado de asimilación de potasio (lechuga)



Fuente: Elaboración propia.

En el siguiente gráfico podemos observar que el T3(baja) tiene 39.54 % de asimilación del fertilizante aplicado, siendo el que mejor eficiencia presenta. El T2 (recomendada) tiene 22.96 % y el T1 (dosis alta) tiene 12.91% de asimilación en el cultivo de la lechuga.

3.5. DISCUSION DE LOS RESULTADOS

Los resultados obtenidos en el presente estudio evidencian que el nitrógeno fue el nutriente con mayor solubilidad en el suelo arenoso, especialmente en los tratamientos con dosis recomendada (T2) y alta (T1), lo cual confirma la alta movilidad de este elemento en el perfil del suelo. Este comportamiento se explica principalmente porque

el nitrógeno, en su forma nítrica (NO_3^-), presenta una elevada solubilidad en agua, lo que facilita su desplazamiento con el flujo hídrico.

Este fenómeno puede explicarse por las características propias del suelo utilizado en el ensayo, el cual presenta textura arenosa, baja materia orgánica y limitada capacidad de intercambio catiónico (CIC). Estas condiciones reducen significativamente la capacidad del suelo para retener iones, especialmente aquellos con carga negativa como los nitratos, facilitando su pérdida por lixiviación. En este sentido, lo observado concuerda con lo planteado por (Konrad Mengel, 2001), quien señala que el nitrógeno es el nutriente más susceptible a pérdidas en suelos de textura gruesa debido a su alta movilidad.

Un aspecto clave a destacar es que la mayor concentración inicial de nitrógeno en el tratamiento T1 (dosis elevada) no se traduce necesariamente en una mayor eficiencia de uso por parte de la planta, sino en un incremento de las pérdidas por lixiviación. Esto indica que, en suelos arenosos, el aumento en la dosis de fertilización puede generar un efecto contraproducente, donde una fracción significativa del nutriente es rápidamente removida del sistema antes de ser aprovechada por el cultivo.

Los resultados obtenidos evidencian que el fósforo presentó la menor movilidad entre los macronutrientes evaluados, registrando bajos niveles de lixiviación en todos los tratamientos y tiempos de evaluación. Este comportamiento resulta particularmente interesante, considerando que el suelo utilizado posee textura arenosa, la cual generalmente favorece el movimiento del agua y de los solutos en el perfil del suelo.

Sin embargo, esta aparente contradicción puede explicarse por la naturaleza química del fósforo. A diferencia del nitrógeno, el fósforo no se encuentra predominantemente en formas altamente solubles, sino que tiende a reaccionar con componentes del suelo, formando compuestos de baja solubilidad. En este estudio, el pH alcalino del suelo (8.30) constituye un factor determinante, ya que favorece la formación de fosfatos de calcio, reduciendo significativamente su disponibilidad en la solución del suelo.

Este comportamiento coincide con lo señalado por (Havlin, 2014), quien indica que el fósforo presenta una movilidad limitada debido a procesos de fijación química, especialmente en suelos con pH extremos. Asimismo, (Konrad Mengel, 2001), establece que la disponibilidad del fósforo depende más de reacciones químicas del suelo que del movimiento del agua, lo que explica su baja lixiviación incluso en condiciones de alta permeabilidad.

Otro aspecto relevante es que el fósforo requiere condiciones específicas para su solubilización y posterior absorción por la planta, tales como un pH adecuado, presencia de humedad constante y actividad radicular. Esto implica que, aunque el fósforo esté presente en el suelo, no necesariamente se encuentra disponible para la planta en el corto plazo.

El potasio presentó un comportamiento intermedio entre el nitrógeno y el fósforo, mostrando niveles de lixiviación moderados en función de la dosis aplicada y el tiempo de evaluación. Este comportamiento se debe a que el potasio, aunque es soluble, se encuentra en forma catiónica (K^+), lo que le permite ser parcialmente retenido en el complejo de intercambio catiónico del suelo.

Sin embargo, debido a la baja capacidad de intercambio catiónico (CIC) característica de los suelos arenosos utilizados en este estudio, esta retención fue limitada, favoreciendo su pérdida por lixiviación.

Este resultado coincide con lo reportado por (Brandy, 2016), quien señala que en suelos arenosos el potasio puede perderse con facilidad debido a la escasa capacidad de retención del suelo.

Asimismo, se observó que el incremento en el tiempo de evaluación generó un aumento en la lixiviación de potasio, lo cual indica que este nutriente también es influenciado por el movimiento del agua, aunque en menor medida que el nitrógeno.

Los resultados obtenidos evidencian que el tratamiento T2 (dosis recomendada) presentó las mayores pérdidas por lixiviación de nitrógeno y potasio, lo cual pone en cuestionamiento la aplicabilidad de las dosis estándar en condiciones específicas de

suelo. Este comportamiento sugiere que la “dosis recomendada”, generalmente establecida bajo condiciones promedio, no necesariamente garantiza una mayor eficiencia en suelos con características particulares como las del presente estudio.

El suelo evaluado, de textura arenosa, con bajo contenido de materia orgánica (0.62 %) y limitada capacidad de intercambio catiónico, presenta una baja capacidad de retención de nutrientes, lo que favorece su rápida movilización y pérdida por lixiviación. En este contexto, una dosis intermedia como la aplicada en T2 puede coincidir con condiciones en las que el nutriente se encuentra suficientemente disponible en solución, pero sin una adecuada retención en el suelo, lo que facilita su desplazamiento antes de ser absorbido por la planta.

Este resultado coincide con lo planteado por, (Havlin, 2014) quien señala que la eficiencia de uso de los fertilizantes depende en gran medida de la interacción entre la dosis aplicada y las propiedades del suelo, especialmente en sistemas con baja capacidad de retención. Asimismo, (Marschner, 2012) indica que la absorción de nutrientes por las plantas no solo depende de su disponibilidad en el suelo, sino también de la sincronización entre la liberación del nutriente y la demanda del cultivo.

En contraste, el tratamiento T1 (dosis alta) mostró un mayor porcentaje de absorción de nitrógeno en la planta, lo que indica que una mayor disponibilidad del nutriente puede favorecer su asimilación. Sin embargo, este incremento en la absorción no implica necesariamente una mayor eficiencia, ya que también se asocia con mayores pérdidas por lixiviación, lo que representa un costo adicional tanto desde el punto de vista económico como ambiental.

Este comportamiento refleja una relación compleja entre dosis aplicada, disponibilidad y eficiencia de uso del nutriente, donde una mayor cantidad aplicada no garantiza un mejor aprovechamiento, y una dosis recomendada no siempre se ajusta a las condiciones específicas del suelo.