

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**FACULTAD DE AGRONOMÍA**



**"PÉRDIDAS DE NITRÓGENO POR VOLATILIZACIÓN  
USANDO DIFERENTES FUENTES NITROGENADAS  
EN UN ENTISOL EN LA MOLINA"**

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

**MIJAIL BORIS RAMIREZ RIVERA**

**LIMA - PERÚ**

**2024**

---

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

# Tesis Mijail

## INFORME DE ORIGINALIDAD

<b>10%</b>	<b>10%</b>	<b>2%</b>	<b>1%</b>
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

<b>1</b>	<b>repositorio.lamolina.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>3%</b>
<b>2</b>	<b>ciram.epagri.sc.gov.br</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>3</b>	<b>hdl.handle.net</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1%</b>
<b>4</b>	<b>www.slideshare.net</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1%</b>
<b>5</b>	<b>Submitted to Universidad Nacional Agraria La Molina</b> Trabajo del estudiante	<b>&lt;1%</b>
<b>6</b>	<b>qdoc.tips</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1%</b>
<b>7</b>	<b>sedici.unlp.edu.ar</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1%</b>
<b>8</b>	<b>Enoc Jara-Peña, Angel Villegas M., Prometeo Sánchez G.. "Contenido de N, P, K y rendimiento de frambuesa roja (Rubus idaeus L.) 'Autumn bliss' orgánico asociada con</b>	<b>&lt;1%</b>

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**“PÉRDIDAS DE NITRÓGENO POR VOLATILIZACIÓN USANDO  
DIFERENTES FUENTES NITROGENADAS EN UN ENTISOL EN  
LA MOLINA”**

**MIJAIL BORIS RAMIREZ RIVERA**

Tesis para optar el Título de:

**INGENIERO AGRÓNOMO**

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

.....  
Dr. Juan Waldir Mendoza Cortez  
**PRESIDENTE**

.....  
Ing. Mg. Sc. Pedro Pablo Gutiérrez Vílchez  
**ASESOR**

.....  
Ph. D. Julio César Alegre Orihuela  
**MIEMBRO**

.....  
Ing. Mg. Sc. Julio César Nazario Ríos  
**MIEMBRO**

**LIMA - PERÚ**

**2024**

## **DEDICATORIA**

*A mis padres, William Ramirez y Mirey Rivera; por su respaldo, motivación y apoyo en todos mis proyectos.*

*A Mali Zavaleta, por estar siempre conmigo apoyándome de forma incondicional.*

*A mis hermanos, Edwin y Jeremy por su apoyo y respaldo.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Ing. Mg. Sc. Pedro Pablo Gutiérrez Vílchez por su asesoramiento en el desarrollo del proyecto y la tesis.

Al Dr. Juan Waldir Mendoza Cortez, Ph. D. Julio Cesar Alegre Orihuela y Ing. Mg. Sc. Julio Cesar Nazario Ríos por sus aportes en la corrección de la tesis.

Al Bach. Jhack Baltazar Mendoza encargado del laboratorio de fertilidad de suelos por su asesoramiento en el laboratorio.

A la Unidad de Investigación de Agronomía por el financiamiento de la tesis.

A mi familia: William Ramirez, Mirey Rivera, Mali Zavaleta, Edwin Ramirez y Jeremy Ramirez y por su ayuda en la elaboración de los colectores semiabierto estático.

# ÍNDICE

<b>I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>II. REVISIÓN DE LA LITERATURA.....</b>	<b>3</b>
2.1. Nitrógeno .....	3
2.2. Perdidas de nitrógeno en el suelo .....	4
2.2.1. Desnitrificación .....	4
2.2.2. Lixiviación .....	4
2.2.3. Volatilización de nitrógeno .....	4
2.3. Perdidas de nitrógeno por volatilización.....	4
2.3.1. Factores que afectan la volatilización .....	5
2.4. Fertilizantes nitrogenados.....	8
2.4.1. Urea.....	8
2.4.2. Sulfato de amonio.....	11
2.4.3. Urea + Inhibidor de ureasa NBPT .....	13
<b>III. METODOLOGIA .....</b>	<b>15</b>
3.1. Lugar y duración del estudio .....	15
3.1.1. Fase de campo .....	15
3.1.2. Suelo.....	15
3.1.3. Clima.....	16
3.1.4. Fase de laboratorio .....	16
3.2. Materiales y equipos.....	17
3.2.1. Materiales y equipos para campo.....	17
3.2.2. Materiales y equipos de la fase de laboratorio .....	17
3.2.3. Materiales y herramientas para el colector semiabierto estático desarrollado por Nönmik con las adaptaciones realizadas por Cantarella <i>et al.</i> (1999).....	17
3.2.4. Material vegetal.....	17
3.3. Tratamientos.....	18
3.4. Población y muestras de estudio.....	18
3.4.1. Población.....	18
3.4.2 Muestra.....	19
3.5. Instalación y conducción de la parte de campo.....	19
3.5.1. Marcado del terreno.....	19
3.5.2. Siembra .....	19
3.5.3. Riego .....	19
3.5.4. Instalación y fertilización .....	20

3.5.5. Conducción .....	21
3.6. Métodos.....	22
3.6.1. Elaboración del colector semiabierto estático.....	22
3.7. Variables de medición.....	24
3.7.1. Cantidad de nitrógeno volatilizado total .....	24
3.7.2. Porcentaje de nitrógeno foliar de la planta.....	26
3.7.3. Rendimiento .....	27
3.8. Diseño experimental.....	28
3.8.1. Modelo aditivo lineal.....	28
3.8.2. Análisis estadísticos.....	28
<b>IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>29</b>
4.1. Volatilización de nitrógeno .....	29
4.2. Rendimiento .....	34
4.3. Nitrógeno foliar .....	35
4.4. Grosor de tallo.....	36
<b>V. CONCLUSIONES.....</b>	<b>38</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>39</b>
<b>VII. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>40</b>
<b>VIII. ANEXOS .....</b>	<b>49</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características fisicoquímicas del suelo .....	16
Tabla 2: Temperatura media y humedad durante la parte experimental en la Molina, durante los meses de abril a octubre del 2022.....	16
Tabla 3: Tratamientos (primera fertilización).....	18
Tabla 4: Nitrógeno volatilizado (mg) bajo diferentes fuentes de nitrógeno .....	29
Tabla 5: Perdida de nitrógeno por hectárea y porcentaje de perdida .....	30
Tabla 6: Rendimiento promedio por cada tratamiento.....	34
Tabla 7: Contenido de nitrógeno foliar por cada tratamiento .....	36
Tabla 8: Efecto en el diámetro del tallo por los tratamientos evaluados. ....	37

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Descripción de la inhibición de ureasa por los derivados del NBPTO y NBPT. Los átomos que bloquean el sitio activo están de azul y los átomos que ocupan la posición distal se muestra de rojo.....	14
Figura 2: Ubicación satelital del campo donde se desarrolló la parte experimental.....	15
Figura 3: Croquis de la distribución de los tratamientos.....	19
Figura 4: Instalación de las bases de los colectores semiabierto estático.....	20
Figura 5: Aplicación del fertilizante en las bases de los colectores semiabierto estático.....	20
Figura 6: Extracción de discos de poliuretano después de recolectar el amoniaco volatilizado por 24 horas.....	21
Figura 7: Medidas de la base del colector semiabierto estático.....	22
Figura 8: Medidas de la lámina de poliuretano.....	22
Figura 9: Colector semiabierto estático instalado en el campo.....	23
Figura 10: Medidas del colector semiabierto estático y ubicación de los discos de poliuretano.....	24
Figura 11: Volatilización de nitrógeno por día.....	32
Figura 12: Volatilización de nitrógeno acumulada durante 21 días posterior a la aplicación. ....	33

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Análisis de varianza para la variable nitrógeno volatilizado .....	49
Anexo 2: Análisis de varianza para la variable rendimiento.....	50
Anexo 3: Análisis de varianza para la variable porcentaje de nitrógeno foliar .....	50
Anexo 4: Análisis de varianza para la variable diámetro del tallo .....	51
Anexo 5: Registro diario de la temperatura durante la recolección de nitrógeno volatilizado en campo.....	52
Anexo 6: Grafico diario de la temperatura media durante la recolección de nitrógeno volatilizado.....	53
Anexo 7: Registro mensual (abril – octubre) de la temperatura (media, máxima y mínima), humedad y velocidad del viento a durante la fase de campo .....	53
Anexo 8: Seguimiento fotográfico de la disolución de los fertilizantes en el suelo .....	54
Anexo 9: Análisis de caracterización del suelo usado en el trabajo de tesis .....	55
Anexo 10: Ficha técnica del maíz hibrido “experimental – 5” .....	56
Anexo 11: Registro fotográfico de la parte experimental en campo .....	57
Anexo 12: Registro fotográfico de la parte experimental en el laboratorio .....	61

## RESUMEN

La volatilización es una de las principales formas de pérdida de nitrógeno en los fertilizantes amoniacales, reduciendo significativamente su eficiencia. La intensidad de esta pérdida es afectada principalmente por el pH del suelo. Por eso este trabajo tiene como fin estudiar la volatilización de nitrógeno de diferentes fuentes nitrogenada en un entisol de La Molina, Perú. El experimento se realizó en el 2022 en un entisol ligeramente alcalino (pH: 7.78) y con un contenido bajo de materia orgánica. Las mediciones fueron realizadas durante tres semanas donde presentaron una temperatura promedio de 14.9°C. Para la cuantificación del nitrógeno perdido por volatilización se midió por medio de colectores semiabierto estático los días 1,2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 14, 21 posterior a la primera fertilización (90 kg de N/ha). Se evaluó 3 fertilizantes nitrogenados: urea, sulfato de amonio y urea + inhibidor NBPT. Las pérdidas de nitrógeno fueron mayores para la urea con un 15.64% de nitrógeno aplicado, seguido por el sulfato de amonio con 11.95%. La urea + NBPT presento la menor pérdida de nitrógeno con 5.96% reduciendo en un 61.9% lo volatilizado por la urea. Los valores de volatilización para el caso de la urea no son tan altas como en otros trabajos debido a la baja temperatura y el contenido bajo de materia orgánica que reducen la actividad de la ureasa. En el caso del sulfato de amonio presento valores relativamente alto debido al pH básico del suelo. Por ultimo los valores bajos de volatilización para el tratamiento de Urea + inhibidor NBPT se debe a que se presentaron condiciones adecuadas para una mayor estabilidad en el suelo (pH básico del suelo y las temperaturas bajas).

**Palabras clave:** Volatilización, nitrógeno, suelo básico, fertilizantes nitrogenados

## ABSTRACT

Volatilization is one of the main forms of nitrogen loss in ammonia fertilizers, significantly reducing their efficiency. The intensity of this loss is mainly affected by the pH of the soil. Therefore, this work aims to study the volatilization of nitrogen from different nitrogen sources in an entisol in La Molina, Peru. The experiment was carried out in 2022 in a slightly alkaline entisol (pH: 7.78) and with a low organic matter content. The measurements were made during three weeks where they presented an average temperature of 14.9°C. To quantify nitrogen lost by volatilization, it was measured by means of static semi-open collectors on days 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 14, 21 after the first fertilization (90 kg of N/ha). 3 nitrogen fertilizers were evaluated: urea, ammonium sulfate and urea + NBPT inhibitor. Nitrogen losses were highest for urea with 15.64% nitrogen applied, followed by ammonium sulfate with 11.95%. Urea + NBPT had the lowest nitrogen loss with 5.96%, reducing urea volatilization by 61.9%. The volatilization values for urea are not as high as in other jobs due to the low temperature and low organic matter content that reduce urease activity. In the case of ammonium sulphate, it presented relatively high values due to the basic pH of the soil. Finally, the low volatilization values for the treatment of Urea + NBPT inhibitor are due to the fact that suitable conditions were presented for greater stability in the soil (basic soil pH and low temperatures).

**Keywords:** Volatilization, nitrogen, basic soil, nitrogen fertilizers

## I. INTRODUCCIÓN

En estos últimos años en el mundo se ha presentado un incremento en el precio de los fertilizantes, donde el 2021 se presentó el aumento más notable llegando a triplicar el precio de algunos de los fertilizantes nitrogenados (FAO, 2022). Esto se debe al crecimiento continuo de la producción agrícola por el aumento de la demanda de productos alimenticios, lo que causa un incremento en la demanda de los fertilizantes (Castro *et al.*, 2021). Dentro de este grupo la urea es el fertilizante más usado en el mundo por su alto porcentaje de nitrógeno (Macera, 2019) representando el 34.4% de todos los fertilizantes importados en el Perú mientras que el sulfato de amonio es el segundo fertilizante más importado con el 21.8% del total (Noberta y Vargas, 2016).

La urea y el sulfato de amonio son considerados como fertilizantes amoniacales, debido a que liberan amonio cuando son incorporados en el suelo, pero estos también son susceptibles a pérdidas significantes de nitrógeno debido a su susceptibilidad en volatilizar nitrógeno en forma de amoníaco (Barbieri *et al.*, 2010). Estas pérdidas según Lara *et al.* (1997) puede llegar a valores de hasta el 43% del nitrógeno total aplicado. La magnitud de estas pérdidas está relacionadas a varios factores como las propiedades del suelo, las condiciones climáticas y la técnica de aplicación (Lara *et al.*, 1997). Para ambos fertilizantes, la tasa de volatilización puede ser distinto por el pH del suelo. Para el caso de la urea presenta una mayor volatilización en suelos ácidos, mientras que el sulfato de amonio presenta una mayor volatilización en suelos calcáreos (Cantarella *et al.*, 2018).

De los tres factores mencionado la técnica de aplicación es el que puede ser manejado con más facilidad por los productores y agricultores (Lara *et al.*, 1997). Una de las técnicas para reducir la volatilización es la incorporación del fertilizante dentro del suelo (Jones *et al.*, 2013). Pero estas técnicas resultan ser poco viables debido al costo y al tiempo que se necesita (Cantarella *et al.*, 2018). Esta necesidad en reducir estas pérdidas llevo a la búsqueda de aditivos que aumentan la eficiencia de estos fertilizantes, como la urea con inhibidor NBPT que es el más usado comercialmente (Modolo *et al.*, 2018).

La cuantificación de la volatilización de los fertilizantes se ha desarrollado en varios países de la región, debido a su importancia para determinar la eficiencia de los distintos fertilizantes amoniacales y si este presenta un efecto en el rendimiento del cultivo. Pero a nivel nacional no se tiene conocimiento de la cantidad de nitrógeno que se pierde por el uso de los fertilizantes amoniacales ni de su comportamiento en los suelos del Perú. Por lo tanto, esta investigación plantea que la volatilización de amoniaco de la urea y del sulfato de amonio en un entisol de La Molina son significativos y tienen un efecto en el rendimiento del cultivo de maíz. Los objetivos del siguiente trabajo son:

#### Objetivo general

- Evaluar las pérdidas de nitrógeno volatilizado con el uso de diferentes fertilizantes nitrogenados usados en un entisol en La Molina.

#### Objetivo específico

- Cuantificar las pérdidas de nitrógeno volatilizado en los diferentes fertilizantes durante los primeros 21 días posterior a la aplicación.
- Evaluar cronológicamente los cambios en la intensidad de la volatilización del amoniaco de diferentes fuentes nitrogenadas.
- Determinar el efecto de diferentes fuentes nitrogenadas sobre las variables biométricas en el cultivo de maíz.

## II. REVISIÓN DE LA LITERATURA

### 2.1. Nitrógeno

El nitrógeno es uno de los elementos más importante para el desarrollo de los seres vivos (Lamprea et al., 2015). En las plantas cumple diversas funciones, de forma estructural donde hace parte de los aminoácidos, compuestos energéticos (ATP), poder reductor (NADPH) y la clorofila (Cárdenas et al., 2004). También está presente en la regulación osmótica, ubicándose en la vacuola en forma inorgánica como ion nitrato y también en forma orgánica (prolina) otorgando a la planta tolerancia al estrés (Rodríguez, 2006).

Este elemento se encuentra en el suelo, la atmósfera y las diversas fuentes de agua (ríos, lagos, aguas subterráneas, etc.). La mayor parte (98%) del nitrógeno del mundo se encuentra en las rocas ígneas y metamórficas, pero a pesar de su gran presencia esta no se encuentra disponible para las plantas, por lo tanto, no se considera de importancia agronómica. Esto hace que la atmósfera sea la principal fuente de nitrógeno libre (Alconada et al., 2018). Este elemento se encuentra en forma de nitrógeno molecular  $N_2$ , y se fija al suelo por procesos biológicos, meteorológico e industrial (Pereyra, 2001).

En el suelo, la principal forma de este elemento es nitrógeno orgánico ocupando el 90% del total, siendo importante debido a que es la principal fuente de nitrógeno mineral del suelo (Wua et al., 2019). Por otro lado, la forma inorgánica es menor al 10% del total, encontrándose en dos formas, como ion nitrato  $NO_3^-$ , que es la más absorbida por la mayoría de las plantas, y el ion amonio  $NH_4^+$ , que solo es preferida por algunas especies como el arroz (Benimeli et al., 2019).

## **2.2. Pérdidas de nitrógeno en el suelo**

### **2.2.1. Desnitrificación**

La desnitrificación ocurre en suelos con problemas de anegamiento, presentando un medio anaeróbico que permite el desarrollo de bacterias heterótrofas. Estos microorganismos tienen como último aceptor de electrones el ion nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), reduciéndolo hasta obtener óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) y nitrógeno molecular  $\text{N}_2$ . El  $\text{N}_2\text{O}$  y el  $\text{N}_2$  son compuestos volátiles que salen del suelo hacia la atmósfera (Illarze *et al.*, 2018). Además, el  $\text{N}_2\text{O}$  es uno de los 3 gases de efecto invernadero más peligrosos (de Richter y Caillol, 2011).

### **2.2.2. Lixiviación**

Es la pérdida del nitrógeno del suelo por el movimiento del agua hacia las capas subterráneas del suelo o en la capa freática. Esta pérdida se debe principalmente a un exceso de fertilización y un inadecuado riego. La pérdida de nitrato es mayor a la del amoníaco debido a que su movimiento en el suelo es por flujo de masa y que no presenta carga positiva que le permita ser retenido por los coloides del suelo (Arias *et al.*, 2004).

### **2.2.3. Volatilización de nitrógeno**

El paso del amonio producido a amoníaco, se debe principalmente a las concentraciones de amonio  $\text{NH}_4^+$  en solución por la mineralización o la aplicación de fertilizantes, lo que causa el paso a amoníaco en solución que luego se volatiliza por diferencia de presión con el amoníaco en el aire (Freney y Simpson, 1983).

## **2.3. Pérdidas de nitrógeno por volatilización**

La volatilización inicia con el incremento en las concentraciones de amonio en la solución del suelo debido a la mineralización de materia orgánica y principalmente por la incorporación de fertilizantes amoniacales y ureicos (Freney y Simpson, 1983). Este amonio en solución pasa a volverse a amonio intercambiable, hasta que la cantidad de amonio incorporado sea mayor de lo que puede ser retenido por los coloides (Sanz, 2010). El amonio en solución se reduce a amoníaco en solución liberando un ion de hidrógeno, acidificando el medio (Avnimelech y Laher, 1977).

Posteriormente para que el amoniaco se volatilice a la atmosfera este debe ubicarse o moverse a la superficie del suelo por medio del movimiento del agua o por la fase gaseosa del suelo. El movimiento entre ambas fases del suelo (liquida y gaseosa) está controlado por la diferencia entre presiones de ambos estados del amoniaco; obedeciendo a la constante de Henry (Freney *et al.*, 1981). La concentración del amoniaco en la solución del suelo es proporcional con la presencia de amoniaco atmosférico hasta valores de pH 9 del suelo (Fenn y Hossner, 1985).

### **2.3.1. Factores que afectan la volatilización**

#### **pH:**

El pH es una de las propiedades químicas del suelo más importante en la volatilización de amoniaco y determina en gran medida la relación entre el amonio y amoniaco en solución (Hargrove, 1988). En los suelos básicos se presentan mayores pérdidas por volatilización de amoniaco, a comparación de uno ácido, esto se debe a que en pH altos la concentración de amoniaco en solución aumenta, debido al incremento del calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ) en el complejo de cambio desplazando al amonio adsorbido a la solución. Y también por el incremento de ion hidróxido  $\text{OH}^-$  que aumenta la volatilización. Este incremento de amoniaco en la solución causa que este compuesto pase a su estado gaseoso, para recuperar el equilibrio inicial. Este efecto se puede repetir en suelos ácidos cuando se aplica fertilizantes amoniacales junto la urea u otras sustancias que producen un microambiente básico (Freney y Simpson, 1983). Además, la volatilización tiene un efecto en el pH, esto se debe a que al momento de pasar a amoniaco se libera protones de hidrogeno  $\text{H}^+$  los cuales disminuyen el pH del contorno de la reacción, lo que detiene la misma volatilización (Chevallier y Toribio, 2005).

#### **CIC:**

La capacidad de intercambio catiónico es una de las propiedades más influyentes en la volatilización de nitrógeno, un suelo que tiene un mayor CIC presenta menores pérdidas de amoniaco. El amoniaco liberado por los fertilizantes es retenido en la CIC debido a que este adquiere un protón formando un amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), el cual es adsorbido por los sitios de intercambio catiónico de la arcilla y materia orgánica del suelo (Fenn y Kissel, 1976).

Los sitios de intercambio de carga provienen de las arcillas y de la materia orgánica, ambos están influenciado por el pH del suelo. En el caso de los minerales arcillosos presenta una mayor adsorción cuando el suelo tiene una condición acida. Mientras que la retención del amonio por parte de la materia orgánica es mayor cuando se presentan condiciones alcalinas (Parr y Papendick, 1996).

### **Textura:**

Las pérdidas por volatilización en suelos no fertilizados no tienen diferencias significantes entre suelos de diferente textura (Awale y Chatterjee, 2017). Para el caso de suelos aplicados con fertilizantes amoniacales los que presentan un mayor contenido de arcillas tienen una menor pérdida de volatilización de nitrógeno (Obcemea *et al.*, 1988). Además del contenido de arcillas, también influye el tipo de arcilla presente, en el caso de las arcillas las del tipo 2:1 como la ilita, vermiculita y montmorillonita son las que más retienen el amonio (Longeri *et al.*, 2001).

La adsorción del amonio se debe a su carga positiva, que le permite ser retenido por el complejo de cambio. Esto disminuye la disponibilidad de amonio libre en el suelo para su conversión en amoniaco (Freney y Simpson, 1983). Esto explica que en los suelos arenosos la concentración de amonio presente en el agua superficial es mayor que en uno arcilloso, por lo que es más susceptible a la pérdida de amoniaco en la atmosfera (Lin *et al.*, 2012).

### **Humedad del suelo:**

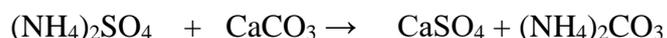
El contenido de agua en el suelo influye en la volatilización de nitrógeno, un mayor contenido de agua inicial incrementa la volatilización del amoniaco, suelos fertilizados con humedad en capacidad de campo presentan mayores valores de pérdida de amoniaco (Al-Kanani *et al.*, 1986). En suelos húmedos las partículas de agua ocupan los microporos y las de amonio los macroporos; esto ocasiona un mayor movimiento capilar por evaporación de estos últimos debido a que este se realiza principalmente en los macroporos (Freney y Simpson, 1983).

El secado del suelo causa un incremento en la volatilización del nitrógeno debido a la evaporación del agua y del traslado del amonio a la superficie seca del suelo lo que causa

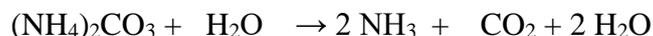
su pérdida a la atmósfera como amoníaco (Ferguson y Kissel, 1986). Pero si se fertiliza en suelos secos, el amonio será retenido por el complejo de cambio ocupando así los microporos, al momento de la evaporación el movimiento de amonio a la superficie va ser menor, lo que ocasionaría una menor volatilización de amoníaco (Freney y Simpson, 1983).

### **Carbonato de calcio:**

Las volatilizaciones de los fertilizantes a base de amonio (sulfato de amonio, fluoruro de amonio y fosfatos de amonio) tienen una reacción con el carbonato de calcio formando sales de baja solubilidad (sulfato de calcio, fosfato de calcio y fluoruro de calcio) y carbonato de amonio (Freney y Simpson, 1983).



Este carbonato de amonio es una sal inestable que se descompone rápidamente en agua, dióxido de carbono y amoníaco (Fernández, 1984).



El amoníaco producido puede tener dos destinos diferentes dependiendo del pH. Si se presenta un medio básico, la mayor parte del amoníaco producido se pierde por volatilización, pero si se desarrolla en un medio ácido una gran parte del amoníaco es mantenido en el suelo (Fernández, 1984).

### **Temperatura:**

El incremento de la temperatura aumenta la velocidad de las reacciones químicas del suelo, esto ocasiona un incremento en la constante de la conversión del paso del amonio a amoníaco en solución. Además, la temperatura incrementa la solubilidad de la urea y la actividad de la ureasa, aumentando la tasa de volatilización del amoníaco (Ernst y Massey, 1960). Este proceso aumenta significativamente a temperaturas del suelo de más de 21°C. A pesar de esto la volatilización se realiza aún a temperatura cercana al punto de congelación. Se halló valores de pérdidas hasta 12% de nitrógeno a temperaturas en suelos menores a 0°C, incluso con nieve sobre el suelo (Dari *et al.*, 2019).

**Viento:**

El aumento de los vientos se lleva el amoniaco cercano al suelo, produciendo una mayor diferencia, lo que acelera el paso del amoniaco en solución a amoniaco gaseoso para volver al equilibrio. Además, estos vientos secan las superficies del suelo aumento el movimiento del agua a la superficie llevando el amonio, lo que incrementa las pérdidas de volatilización (Mikkelsen, 2010).

**Cobertura:**

La aplicación de estos fertilizantes sobre una cobertura vegetal causa una mayor pérdida por volatilización en comparación a un suelo sin cobertura, ya que en este último caso el fertilizante tiene más contacto con el suelo. También el uso de cenizas como cobertura aumenta la volatilización porque la ceniza aumenta el pH de la superficie del suelo, lo que satura los sitios de intercambio catiónico y el amoniaco no es retenido volatilizándose (Freney y Simpson, 1983).

**2.4. Fertilizantes nitrogenados**

El nitrógeno cumple un papel muy importante en la producción de los cultivos, ocupando cantidades relativamente grandes entre 1.5 a 3.5% del peso seco total de la planta. Además, en condiciones naturales este elemento se halla en la materia orgánica y no está disponible directamente para la planta, por lo que necesita pasar por el proceso de la mineralización sin embargo esto ocurre de forma lenta y en menores cantidades a la necesaria para satisfacer las necesidades del cultivo. A causa de esto se requiere adicionar más nitrógeno al suelo por medio de fertilizantes para optimizar el crecimiento de la planta y aumentar los rendimientos de los cultivos (Below, 2002).

**2.4.1. Urea**

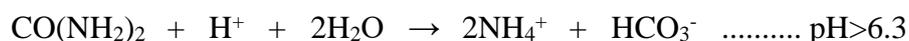
La urea es actualmente el fertilizante más utilizado en la agricultura debido a su gran concentración de nitrógeno (46%) en forma amídica. Además de su alta solubilidad (1000g/l a 20°C) que facilita su incorporación al suelo (Sierra, 2010). Para la elaboración de la urea se hace reaccionar el dióxido de carbono y el amoniaco junto con un catalizador a temperaturas entre 170 a 210°C y a una presión de 170 a 400 atmósfera (Morales *et al.*, 2019). Durante la fabricación de la urea se presenta temperaturas mayores a su punto de fusión (132°C) pueden formarse el biuret que es tóxico para las plantas en especial en la

germinación y cuando se rocía al follaje y, debido a esto, se estableció que la presencia de biuret en la urea no debe ser mayor del 2% (Mikkelsen, 2007).

#### a. Ureasa

La urea pasa por un proceso de hidrolisis formando carbonato de amonio  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ . La ureasa cataliza la hidrolisis de la urea, esta enzima es muy abundante en el suelo, gran parte proviene de los microorganismos y otra menor de los restos frescos (Navarro y Navarro, 2014). La hidrolisis de la urea en un suelo con un alto contenido de materia orgánica puede durar los primeros tres a cuatro días, donde la mayor parte ocurre en los primeros dos días (Fernández, 2003). Mientras en los suelos pobres con bajo contenido de materia orgánica, este proceso puede tardar hasta siete u ocho días (Freney y Simpson, 1983). Además, también depende de la profundidad del suelo, debido a que en la parte superficial existe una mayor proliferación de bacterias por la mayor presencia de oxígeno y materia orgánica (Núñez *et al.*, 2012).

El carbonato de amonio es un compuesto inestable y se descompone en el suelo, esta descomposición depende del pH del suelo, ya que puede ocurrir dos reacciones ligeramente distintas. Ambas reacciones consumen los protones de hidrogeno ( $\text{H}^+$ ) lo que aumenta el valor del pH en el contorno del fertilizante a valores de 8 o más (Mikkelsen, 2010). La reacción más común ocurre en suelos de pH mayores a 6.3. La urea reacciona con el agua y consume los protones de hidrógeno  $\text{H}^+$  del suelo formando amonio y anión bicarbonato (Rodríguez *et al.*, 2016).



La segunda reacción se presenta en suelos ácidos de pH menores de 6.2; donde se consume un mayor número de protones a comparación de la primera; produciendo amonio, dióxido de carbono  $\text{CO}_2$  y agua  $\text{H}_2\text{O}$  (Rodríguez *et al.*, 2016).



## **b. Factores que afectan la actividad de la ureasa**

### **Humedad del suelo:**

El agua tiene un papel muy importante en la actividad de la ureasa, pero en cierto grado la presencia de agua puede tener un efecto negativo para este proceso. Debido a que la hidrólisis de la urea incrementa según aumenta el contenido del agua en el suelo, pero cuando en valores cercanos a la capacidad de campo se presenta una tendencia negativa en la actividad de la ureasa (Dharmakeerthi y Thenabadu, 1996). Además, si hay un exceso de riego después de la incorporación del fertilizante puede desplazar este fertilizante a zonas más profundas con menor presencia de ureasa (Mikkelsen, 2010).

### **Temperatura:**

La temperatura presenta una relación directa con la actividad microbiana lo que causa una mayor producción de ureasa, lo que permite una mayor conversión de la urea a amonio (Mikkelsen, 2010). La actividad ureásica tiene un incremento notable cuando las temperaturas aumentan de 10°C a 40°C. Algunos estudios confirman que la actividad de la ureasa puede seguir aumentando hasta los 70°C, pero a temperaturas mayores a este valor la actividad de la urea decrece significativamente. La ureasa se encuentra activa en valores menores a 0°C, hasta se ha encontrado que esta enzima sigue funcionando en el suelo hasta los -20°C esto debido a que se puede encontrar agua en forma líquida en la superficie de las partículas del suelo (Dharmakeerthi y Thenabadu, 1996).

### **pH:**

Existe mucha controversia sobre el valor óptimo del pH para la actividad de la ureasa, estos fluctúan entre ácidos y básicos (valores de pH de 5 a 8). Esta variación se debe principalmente a los tipos de microorganismos. El pH del suelo influye mucho en la actividad y la biomasa microbiana (Dharmakeerthi y Thenabadu, 1996). Según lo anunciado por Fisher *et al.* (2017) determinaron que la actividad de la ureasa está relacionada según la presencia de los genes bacterianos 16S y ureC. Se halló en la biota microbiana un aumento en la copia de estos genes según el incremento del pH del suelo. Esto sugiere que la hidrólisis de la urea en suelos básicos es mayor debido a que en estos valores de pH hay una estimulación en la actividad y crecimiento de estos microorganismos.

### **Concentración de oxígeno:**

Existe una controversia si el oxígeno en el suelo tiene algún efecto sobre la hidrólisis de la urea. Pero se ha demostrado que suelos con alta disponibilidad de oxígenos acelera el proceso de hidrólisis, debido a que el material vegetal incorporado es descompuesto fácilmente en suelos aeróbicos lo que aumentaría la presencia de esta enzima. Aunque en los suelos anaeróbicos la producción de esta enzima por los microorganismos del suelo es baja, la actividad de la ureasa se sigue realizando, porque este proceso no requiere de la presencia del oxígeno (Dharmakeerthi y Thenabadu, 1996).

### **Disponibilidad de urea:**

La concentración de la urea en el suelo tiene un efecto directo con la hidrólisis de esta, hasta que se sature la enzima volviendo constata la actividad a pesar de que se aumente la concentración de urea en el suelo. Sin embargo, cuando se presenta alta concentraciones de urea en el suelo, la actividad úrica disminuye debido a dos factores, la primera puede ser por una competencia entre los sustratos por la enzima y la otra por la desnaturalización de la enzima debido a las concentraciones altas de urea (Dharmakeerthi y Thenabadu, 1996).

### **Materia orgánica:**

La presencia de ureasa en el suelo tiene una relación positiva con el contenido de materia orgánica debido a que esta incrementa la biomasa microbiana y su actividad en el suelo. El aumento de los niveles de actividad de la ureasa en el suelo por la incorporación de materia orgánica se debe principalmente al incremento de la biomasa microbiana y también por los restos vegetales que pueden aportar enzimas directamente al suelo (Dharmakeerthi y Thenabadu, 1996).

#### **2.4.2. Sulfato de amonio**

El sulfato de amonio tiene una concentración de 21% de nitrógeno en forma de amonio y 24% de azufre en forma de sulfato (IFA, 1992). Este fertilizante presenta un pH ácido por lo que se recomienda usarlo en suelos alcalinos. La disponibilidad de este fertilizante ha aumentado en estos últimos años debido a que es un subproducto de algunas industrias (Vitosh, 1996).

Debido a su bajo porcentaje resulta ser una fuente costosa por unidad de nitrógeno, pero este fertilizante resulta ser conveniente para cultivos con alta demanda de azufre. Además de que las pérdidas por lavado y desnitrificación son menores en comparación de las otras fuentes (Castañeda, 2018).

### **Sulfato de amonio en suelos básicos**

El sulfato de amonio en un suelo básicos presenta valores altos de pérdidas de nitrógeno por volatilización, estos valores se encuentran en su mayoría entre 20 a 40%. Estas pérdidas aumentan si en el suelo hay una alta presencia de carbonato de calcio (Powlson y Dawson, 2022). La notable pérdida por fertilización superficial en suelos calcáreos, se debe a la presencia del carbonato de calcio que reaccionan con fertilizantes amoniacales como el sulfato de amonio liberando amoniaco. El proceso inicia con la hidrólisis del carbonato de calcio en dos iones  $\text{CO}_3^{2-}$  y  $\text{Ca}^{+2}$ , esto reacciona con el sulfato de amonio formando sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4$ ) y bicarbonato de amonio  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$  (Fenn y Kissel, 1973; Kissel *et al.*, 1985).

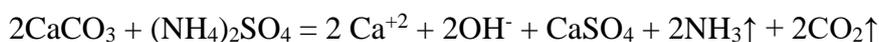


Este sulfato de calcio es de baja solubilidad por ende perderán mucho más amoniaco a comparación de otros fertilizantes que forman un compuesto de más alta solubilidad como el dinitrato de calcio. El sulfato de calcio al ser una sal poco soluble fuerza una mayor formación de  $\text{CO}_3^{2-}$ , en especial el ion bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ). Esto resulta en un incremento en el pH que aumentara la tasa de volatilización del amoniaco (Kissel *et al.*, 1985).



El bicarbonato de amonio  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  resultante es inestable y se descompone en dióxido de carbono y amoniaco (Fenn y Kissel, 1973; Kissel *et al.*, 1985).

Todo esto se resume en:



### **2.4.3. Urea + Inhibidor de ureasa NBPT**

Las pérdidas de nitrógeno en forma de amoníaco en los sistemas agrícolas y ganaderos en el mundo se estiman en 37 Mt de nitrógeno. En el caso de la urea las pérdidas globales tienen un promedio de 14% del fertilizante aplicado, pero este porcentaje aumenta cerca de un 40% en suelos tropicales donde hay mucha temperatura (Cantarella *et al.*, 2018). Estas pérdidas de nitrógeno se pueden reducir significativamente por medio de prácticas culturales como el riego posterior a la fertilización y la incorporación de los fertilizantes dentro del suelo (González *et al.*, 2015; Sanz *et al.*, 2011). Pero estas prácticas resultan de ser poco factibles en algunos cultivos y también generan un costo por lo que es necesario buscar otras alternativas que reduzcan estas pérdidas de nitrógeno (Cantarella *et al.*, 2018).

Una de las formas de disminuir la pérdida por la volatilización de amoníaco es usar aditivos que inhiban la actividad de la ureasa. Existe una amplia diversidad de compuestos que son usados como inhibidores de ureasa como fosfortriamidas, hidroquinona, cobre, catecol, zinc y boro. Las fosfortriamidas son los compuestos más eficientes en la inhibición porque presentan por lo menos una amida ( $\text{NH}_2$ ) libre para reaccionar con los sitios activos de la ureasa (Guelfi, 2017). Un ejemplo de este grupo es la n-butil triamida tio fosfórica (NBPT) que mostraron ser efectivos aproximadamente diez días en la reducción de la volatilización de la urea (Salvagiotti *et al.*, 2012).

El uso de inhibidores de ureasa tiene un aumento en el costo entre un 10 a 30% a comparación de la urea convencional (Guelfi, 2017). Sin embargo, su aumento en la eficiencia del nitrógeno ha logrado mayores rendimientos lo que beneficia económicamente al productor en comparación al uso tradicional de la urea (Portugal y Torres, 2018).

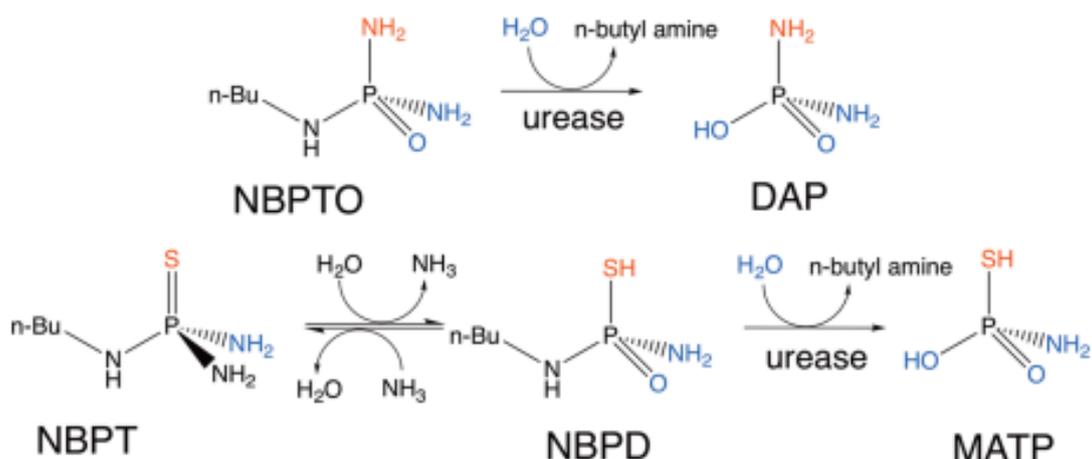
#### **a. Mecanismo de acción de los inhibidores de la ureasa**

La ureasa cataliza la hidrólisis de la urea en el suelo. Esta enzima está presente en una amplia diversidad de hongos, algas, bacterias y plantas; pero a pesar de esto los sitios activos son iguales presentando dos iones de níquel. Para la reducción de la actividad de la ureasa en el suelo se usa la molécula inhibidora N-(n-butyl)-triamida tiofosfórica

(NBPT) que se oxida en N-(n-butil)-triamida fosfórica (NBPTO) donde esta última forma tiene una gran eficacia en inhibir la actividad de la ureasa (Kot *et al.*, 2001; Mazzei *et al.*, 2019).

También el NBPT presenta una acción inhibitoria directamente a la ureasa al formar en monoamido tiofosfato MATP, que presenta la misma geometría tetraédrica que el ácido diamidofosfórico DAP que se forma a partir del NBPTO, solo con la diferencia en el que el grupo distal el MATP presenta un átomo S y el DAP un átomo N (Figura 1). Se ha visto que la capacidad de inhibición mayor de NBPTO en comparación con la NBPT se debe a la necesidad llegar a un preequilibrio de la fosfortriamida (NBPT) para formar la fosforodiamida (NBPD) que posteriormente pasa a MATP (Mazzei *et al.*, 2019).

Se forma un complejo enzima (ureasa) con el inhibidor (NBPTO) resultando en la liberación de ácido diamidofosfórico (DAP). El DAP se enlaza de forma tridentada a los dos iones de níquel en el sitio activo de la ureasa por medio de dos átomos de oxígeno y un grupo amida NH<sub>2</sub> y en el otro grupo amida apunta lejos del centro metálico hacia el canal del sitio activo. La asociación de enzima e inhibidor tiene una gran velocidad de formación y presenta un pequeño valor en la constante del complejo de ureasa-DAP (Mazzei *et al.*, 2019).



**Figura 1:** Descripción de la inhibición de ureasa por los derivados del NBPTO y NBPT. Los átomos que bloquean el sitio activo están de azul y los átomos que ocupan la posición distal se muestra de rojo.

Fuente: Mazzei *et al.* (2019).

### III. METODOLOGÍA

#### 3.1. Lugar y duración del estudio

##### 3.1.1. Fase de campo

La fase de campo del presente trabajo fue realizada en los campos cercanos a los laboratorios de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), ubicado en el distrito de La Molina, Lima. Sus coordenadas geográficas son 12°04'59"S latitud, 76°56'49"O longitud y altitud 236 m.s.n.m.



**Figura 2: Ubicación satelital del campo donde se desarrolló la parte experimental.**

##### 3.1.2. Suelo

Las características del entisol en el que se desarrolló el estudio se presentan en la tabla 1, este es un franco arcilloso arenoso. Considerando la interpretación de Soil Science Division Staff, (2017) este es ligeramente alcalina (pH: 7.78). La salinidad se midió en una suspensión suelo 1:1 considerando como ligeramente salino (1.79 dS/m) (USDA, 1999). A nivel de fertilidad se presentó un contenido bajo de materia orgánica, un nivel alto de fósforo disponible y un nivel medio de potasio disponible. Por último, se presenta un nivel medio de carbonato de calcio.

**Tabla 1: Características fisicoquímicas del suelo**

Características	Unidad	Valor
pH (1:1)		7.78
CE (1:1)	dS/m	1.79
CaCO <sub>3</sub>	%	4.56
MO	%	1.22
P disponible	Ppm	28
K disponible	Ppm	164
CIC	cmolc kg <sup>-1</sup>	9.44

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes (LASPAF) - UNALM

### 3.1.3. Clima

La parte experimental en campo se realizó desde abril del 2022 a octubre del 2022. Según la información reportada por el observatorio meteorológico Alexander Von Humboldt ubicada en la UNALM (Tabla 2) durante ese periodo de tiempo la temperatura promedio oscila entre 14.5 a 20°C, siendo la mayor registrada en abril y la menor en agosto. Mientras en el caso de la humedad se encuentra entre 74.23 a 84.39%, donde abril presenta el menor valor y agosto el mayor valor.

**Tabla 2: Temperatura media y humedad en la Molina durante los meses de abril a octubre del 2022**

Mes	Temperatura °C	Humedad
	Media	%
Abril	20	74.23
Mayo	17.08	78.84
Junio	15.4	80.97
Julio	14.7	83.80
Agosto	14.53	84.39
Septiembre	14.88	82.04
Octubre	15.31	80.72

Fuente: Observatorio Meteorológico Alexander Von Humboldt – UNALM

### 3.1.4. Fase de laboratorio

Esta etapa trabajo se realizó en el laboratorio “Sven Villagarcía Hermoza” perteneciente al departamento de Suelos de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM).

## **3.2. Materiales y equipos**

### **3.2.1. Materiales y equipos para campo**

- Herramientas de campo: Azadón, pala, carretilla.
- Marcado de terreno: Cal, cinta métrica (5m), rafia y estacas de madera.
- Muestreo: Bolsas con cierre hermético, guantes de nitrilo, bolsas de plástico y marcador negro.
- Manejo fitosanitario: Mochila para aplicar, traje EPP, baldes, probeta, insecticida (absolute), moluscocida y herbicida.
- Fertilizantes: Urea, sulfato de amonio y urea con inhibidor de ureasa.

### **3.2.2. Materiales y equipos de la fase de laboratorio**

- Reactivos para la recolección de amoniaco: Ácido fosfórico, hidróxido de potasio, cloruro de potasio y glicerina.
- Reactivos para determinación de nitrógeno: Ácido sulfúrico, ácido bórico, hidróxido de sodio, indicador, agua destilada, sulfato de potasio y sulfato de cobre.
- Equipos de laboratorio: Sistema de destilación-titulación (Kjeldahl), campana extractora de gases, balanzas electrónicas.
- Materiales de laboratorio: Vasos precipitados (2 l y 0.5 l), embudo, probeta, pipeta, bombilla de succión, jarra de plástico y botellas de plásticos.

### **3.2.3. Materiales y herramientas para el colector semiabierto estático desarrollado por Nönmik con las adaptaciones realizadas por Cantarella *et al.* (1999)**

- Herramientas: Sierra, arco, marcador, taladro eléctrico, tijera, cuchilla y amoladora eléctrica.
- Materiales del colector semiabierto estático: Tubo de PVC de 20 cm de diámetro, palitos de globos, pegamentos de PVC, pintura blanca y planchas de poliuretano.

### **3.2.4. Material vegetal**

Se uso el híbrido doble de maíz amarillo duro (*Zea maíz*) “experimental - 5” con doble propósito (grano y forraje) proveniente del programa de maíz de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

### 3.3. Tratamientos

En esta investigación se evaluó la volatilización de amoníaco de las diferentes fuentes de nitrógeno (urea, sulfato de amonio, urea con inhibidor de ureasa). Se fertilizó con 200 kg de nitrógeno por hectárea de maíz con una densidad de 1 x 0.3m (2 plantas por golpes). La fertilización fue dividida en dos fertilizaciones, la primera fertilización se usó el 45% y la última el 55% del nitrógeno restante. La cuantificación de volatilización se hizo solo para la primera fertilización. El fertilizante se colocó en medio de las plantas de forma superficial. Los tratamientos considerados son:

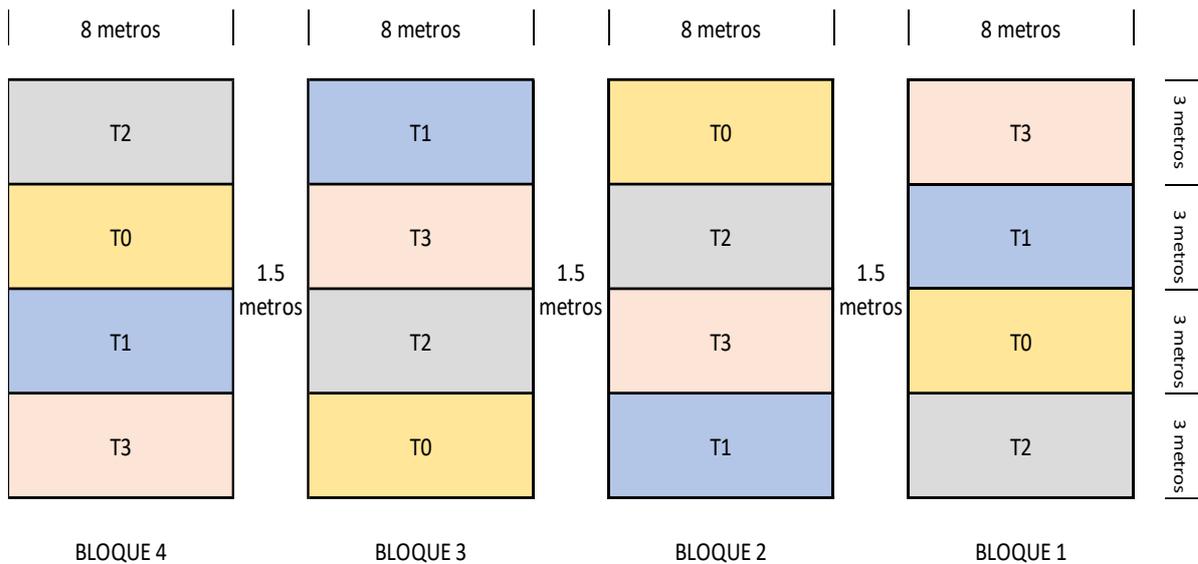
**Tabla 3: Tratamientos (primera fertilización)**

Nº	Tratamiento	N (g)/ golpe	Fertilizantes (g)/ golpe
T0	Sin fertilizantes	-	-
T1	Urea	2.7	5.87
T2	Sulfato de amonio	2.7	12.86
T3	Urea + NBPT	2.7	5.87

### 3.4. Población y muestras de estudio

#### 3.4.1. Población

Se empleó un diseño experimental de bloques completos al azar (DBCA) con cuatro tratamientos y cuatro bloques para cada uno, siendo el total 16 parcelas de maíz. Estas parcelas tendrán un área de 24 m<sup>2</sup> divididas en tres surcos distanciados en un metro y con un largo de ocho metros (dos plantas por golpe) distanciadas en 0.3 metros entre golpe; esto nos da un total de 160 plantas por parcela.



**Figura 3: Croquis de la distribución de los tratamientos**

### 3.4.2 Muestra

La muestra estuvo conformada por 16 colectores semiabiertos estáticos, los cuales estuvieron repartidos uno en cada unidad experimental (parcelas), estos colectores estarán ubicados entre plantas.

## 3.5. Instalación y conducción de la parte de campo

### 3.5.1. Marcado del terreno

Se delimitó cada parcela experimental cercándola con un pabito y se colocó un letrero en cada una indicando el número de tratamiento.

### 3.5.2. Siembra

Se sembraron las semillas según el distanciamiento establecido (30 cm). Se colocaron tres semillas por golpes. Dos semanas después a la germinación se realizó el desahijé dejando solo 2 plantas por golpes.

### 3.5.3. Riego

El cultivo se regó por gravedad por medio de surcos. Esto se realizó dos veces por semana.

### 3.5.4. Instalación y fertilización

El campo de maíz se dividió en 16 parcelas de 24 m<sup>2</sup>, que se agruparon en cuatros bloques y se aplicaron cuatros tratamientos (fuentes de nitrógeno). La cantidad de nitrógeno que se usó para cada parcela fue de 0.48 kg (200 kg de N por hectárea), que se dosifico en dos partes (45 % y 55 % de N), la primera se fertilizó en estado fenológico “V6” (aparición de seis hojas verdaderas) y la segunda fertilización un mes después.



**Figura 4: Instalación de las bases de los colectores semiabierto estático**

Las fuentes de nitrógeno se aplicaron entre las bases de la planta sobre el suelo. Las bases del colector se enterraron de forma que el fertilizante quede en el centro. Por último, se usó siete bases por parcela y un colector. Este colector va cambiando de base día por día para evitar el microclima dentro de tubo y evitar un efecto en la volatilización.



**Figura 5: Aplicación del fertilizante en las bases de los colectores semiabierto estático**

### 3.5.5. Conducción

Inmediatamente después de la aplicación de los tratamientos se colocaron los colectores semiabiertos estáticos con las láminas de poliuretano ya preparadas para la recolección de amoníaco. Estos colectores se colocaron sobre las bases durante 24 horas para absorber el amoníaco volatilizado durante ese tiempo.



**Figura 6: Extracción de discos de poliuretano después de recolectar el amoníaco volatilizado por 24 horas**

Una vez terminada la recolección, se sacó la lámina de poliuretano y se llevó al laboratorio para realizar la extracción. Se cuantificó el amoníaco de la lámina más cerca al suelo, mientras que la lámina superior solo sirve para evitar que el amoníaco atmosférico contamine la lámina inferior.

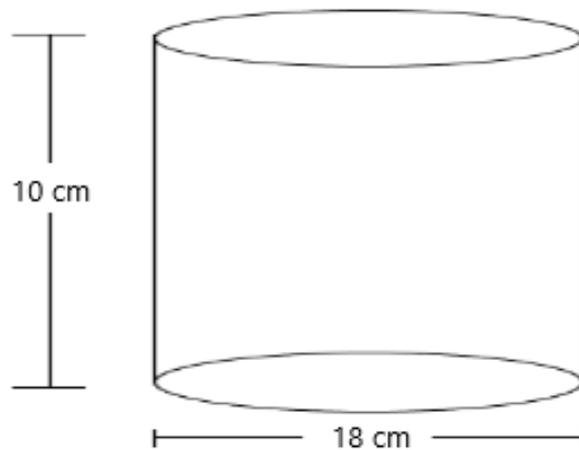
Luego el colector preparado (con nuevas láminas con ácido fosfórico) para la siguiente recolección de nitrógeno será colocado en la siguiente base, esto se repetirá en cada medición.

### 3.6. Métodos

#### 3.6.1. Elaboración del colector semiabierto estático

##### Base del colector

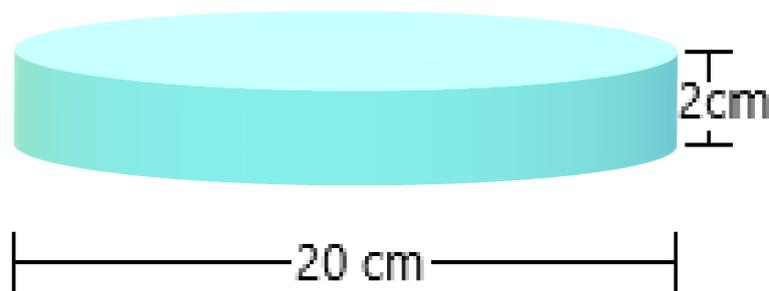
Las bases están elaboradas de un tubo de PVC de 18 cm de radio y 10cm de altura. Se uso un total de 112 bases, 7 para cada parcela experimental, las cuales se enterraron en el suelo y se colocaron los fertilizantes.



**Figura 7: Medidas de la base del colector semiabierto estático**

##### Láminas de poliuretano

Se cortaron láminas de poliuretano en círculos de 20 cm de diámetro que se introdujeron en cada colector. Se usaron dos láminas por cada colector semiabierto estático.



**Figura 8: Medidas de la lámina de poliuretano**

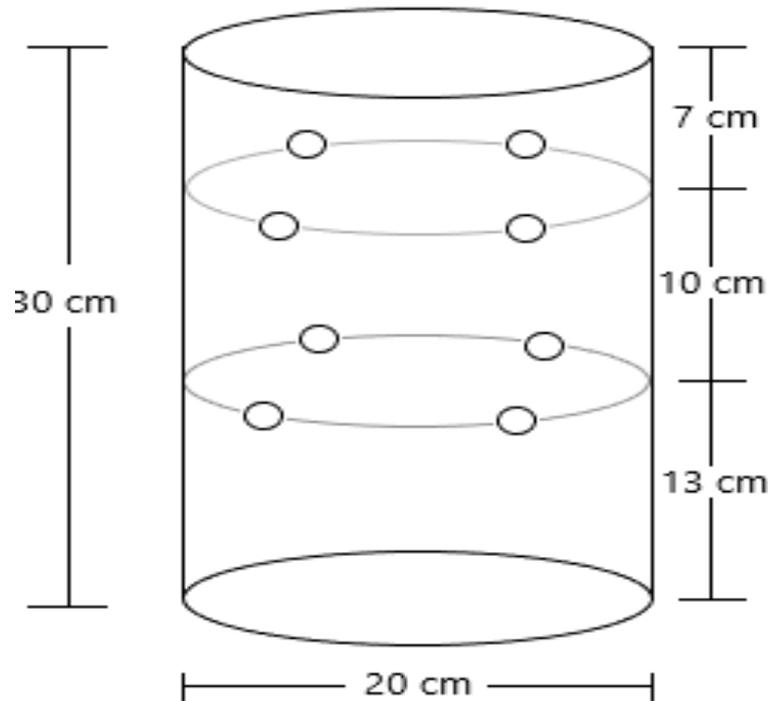
### **Estructura del colector semiabierto estático**

Para la elaboración de cada colector se usó tubos de PVC de 20 cm de diámetro y se realizó un corte a 30 cm de altura.

Luego se colocaron soportes de PVC dentro del tubo a una altura de 13 cm y 23 cm de la base, donde se ubicó las dos láminas de poliuretano. Estas laminas fueron sujetadas por unas rejillas de PVC apoyadas en los soportes internos del tubo. Finalmente se colocó como tapa un plato macetero de 20 cm de diámetro.



**Figura 9: Colector semiabierto estático instalado en el campo**



**Figura 10: Medidas del colector semiabierto estático y ubicación de los discos de poliuretano**

### **Preparación de las esponjas para la colecta de amoniaco**

Primero se lavó con agua destilada las dos láminas de poliuretano, para luego remojarla en una solución de hidróxido de potasio 1 M y luego con una solución ácido fosfórico 1 M. Después se volvió a lavar con agua destilada las láminas y se dejaron secar por algunas horas (Cantarella *et al.*, 1999).

Una vez secado cada lamina se sumergió en ácido fosfórico 1M con 3 ml de glicerina. Estas esponjas contenían 100 mL de esta solución. Una vez listo estos discos son trasladados al campo en bolsas herméticas para evitar contaminación y son colocados en el colector semiabierto estático, para usarlo en la evaluación en campo (Cantarella *et al.*, 1999).

## **3.7. Variables de medición**

### **3.7.1. Cantidad de nitrógeno volatilizado total**

Se cuantificó el nitrógeno volatilizado de acuerdo a los tratamientos en los siete primeros días,

en el décimo, catorceavo y veintiunavo posteriores a la aplicación del fertilizante, este cronograma de recolección se basó en el trabajo de Leal *et al.*, (2007). La obtención del nitrógeno volatilizado se realizó por medio de un colector semiabierto estático desarrollado por Nönmik con las adaptaciones de Cantarella *et al.* (1999).

Estos colectores se colocaron en el campo durante 24 horas para la colección del amoníaco, posterior a eso se retiró los discos de poliuretano, y se extrajo una alícuota de 20 ml que se llevó al laboratorio para medir la cantidad de amoníaco volatilizado. Para esto se siguieron los siguientes pasos:

El disco de poliuretano fue exprimido y lavado con cloruro de potasio KCl a 1 M, el cual se realizó más de cuatro veces usando, aproximadamente, 70 ml de KCl por lavado hasta completar una solución de 500 ml. Una vez obtenido esta solución, se agito durante cinco minutos, para luego extraer 20 ml de esta solución (Cantarella *et al.*, 1999).

Esta solución se colocó en el sistema automático de destilación Kjeldahl a la alícuota se le añadió 20 mL de la solución NaOH (50%) y se sometió a altas temperaturas para liberar el amoníaco (NH<sub>3</sub>). Luego este gas paso por un condensador hasta precipitar en una solución de 20 ml de ácido bórico (20 g/L) mezclado con el indicador usado para determinar la cantidad de nitrógeno inorgánico. La solución obtenida fue titulada con ácido sulfúrico 0.02 N para hallar la cantidad de nitrógeno presente en esa alícuota (Cantarella *et al.*, 1999).

- Para determinar la cantidad de nitrógeno obtenido por muestra (20 mL) tomada de la solución extraída (500 ml) se usa la siguiente formula se usa la siguiente formula:

$$\text{mg de N} = (\text{Vol del ácido}) \times (\text{N del ácido}) \times 14 \times 500/20$$

\*Vol del ácido = mL de ácido sulfúrico gastado para la titulación

\*N del ácido = 0.2 Normal de ácido sulfúrico

\*14 = Peso atómico del nitrógeno

- Para determinar la cantidad de nitrógeno volatilizado por hectárea para la fertilización (90kg/ha) en una hectárea.

$$\text{mg de N} = (\text{Vol del ácido}) \times (\text{N del ácido}) \times 14 \times 500/20 \times D$$

D = Densidad de plantas que hay por hectárea (33333.3 plantas/ha)

### 3.7.2. Porcentaje de nitrógeno foliar de la planta

Para determinar el contenido de nitrógeno foliar de la planta de maíz se usó el método de destilación de Kjeldahl sugerido por Bazán (1995):

- Se colocó 100 mg de materia seca vegetal molida y 3 ml de una solución de ácido sulfúrico en un balón Kjeldahl y se añadió 1 g de catalizador (0.1g sulfato de cobre y 0.9 g de sulfato de potasio).
- Los balones son colocados en hornillas eléctricas dentro de una campana extractora de gases por media hora aproximadamente hasta formar una solución de color turquesa.
- Luego se dejó enfriar y adicionar agua destilada hasta obtener un volumen de 20 ml.
- Esta solución es llevada al sistema de destilación, donde primero se neutralizó la acidez con NaOH (50%), hasta obtener un cambio de color marrón.
- El proceso de destilación dura aproximadamente cinco minutos, este fue recibido por 20 ml de H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> (20g/L) que contiene el indicador.
- Concluida la destilación, se procedió a titular con ácido sulfúrico 0.02 N hasta obtener el color rojo inicial. Para luego obtener por medio de la siguiente ecuación la cantidad de nitrógeno en los 100 mg de materia seca vegetal.

$$\text{mg de N} = (\text{Vol del ácido}) \times (\text{N del ácido}) \times 14$$

\*Vol del ácido = mL de ácido sulfúrico gastado para la titulación

\*N del ácido = 0.2 Normal de ácido sulfúrico

\*14 = Peso atómico del nitrógeno

### 3.7.3. Rendimiento

La cosecha se realizó cuando las mazorcas completaron su formación morfológica. Para esto se cosecho 5 metros lineales de cada subparcela. A la vez se contaron las plantas que hay por subparcela para determinar el número de fallas comparando con la densidad de siembra.

$$\text{Factor de corrección por fallas (FCF)} = \text{Peso de campo} \times (M - 0.3N) / (M - N)$$

M = Numero de plantas para una población sin fallas

N = Numero de fallas (no hay planta por golpe)

Para hallar el contenido de la humedad de la mazorca se tomó una muestra por subparcela determinada y se sometió a desecamiento a la estufa a una temperatura aproximada a 65°C durante 72 horas.

$$\text{Factor de corrección por humedad (FCH)} = (100 - \% \text{ humedad}) / 86$$

RG = Rendimiento de grano (kg/ha)

Pc = Peso total de mazorca cosechada en la parcela

0.971 = Factor contorno

%D = Porcentaje de desgrane (peso de grano Pg/Pc\*100)

A: Área de la parcela (m<sup>2</sup>)

$$\text{RG} = \text{Pc} \times 0.971 \times \%D \times \text{FCH} \times \text{FCF} \times 10000/A$$

### 3.7.4. Diámetro de tallo

Para estimar el diámetro del tallo se tomó 10 muestras (plantas) por cada subparcela, siendo un total de 40 muestras por tratamiento. Estas mediciones se realizaron por medio de un vernier en el segundo entrenudo tomando como referencia la zona radicular.

### 3.8. Diseño experimental

#### 3.8.1. Modelo aditivo lineal

$$Y_{ij} = \mu + \Gamma_i + \beta_j +$$

Dónde:

$Y_{ij}$ : Volatilización de nitrógeno con la  $i$ -ésima fuente de nitrógeno en el  $j$ -ésimo bloque.

$\mu$ : Efecto de la mediageneral

$\Gamma_i$ : Efecto de la  $i$ -ésima fuente de nitrógeno

$\beta_j$ : Efecto del  $j$ -ésimo bloque de humedad del suelo

$E_{ij}$ : Efecto del error experimental con la  $i$ -ésima fuente de nitrógeno en el  $j$ -ésimo bloque.

#### 3.8.2. Análisis estadísticos

Se realizó el análisis de varianza (ANVA) de los datos obtenidos en las evaluaciones de cada variable estudiada. Cuando hubo efectos significativos entre los tratamientos, se realizó la prueba Tukey al 0.05% para la comparación de las medias acumuladas. El procesamiento de los datos realizo con el programa estadístico InfoStat.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Volatilización de nitrógeno

En este trabajo se encontraron diferencias significativas en la volatilización acumulada de nitrógeno entre algunos tratamientos (Tabla 4). La pérdida de volatilización usando la urea como fertilizantes fue la de mayor valor teniendo un acumulado 422.28 mg de 2700 mg nitrógeno aplicado, esto representa una pérdida del 15.64% (Tabla 5). La de menor pérdida fue cuando no se usó fertilizantes con un total de 62.30 mg proveniente de la mineralización del nitrógeno que se encuentra en forma orgánica en el suelo (*Larios et al.*, 2021).

**Tabla 4: Nitrógeno volatilizado (mg) bajo diferentes fuentes de nitrógeno**

Tratamiento Fuente de nitrógeno	Nitrógeno volatilizado Media (mg)	
Sin fertilizante	62.30	A
Urea	422.28	C
Sulfato de amonio	322.61	BC
Urea + NBPT	161.00	AB
Promedio	242.05	
CV	30.43	

La volatilización de nitrógeno por hectárea para la urea causó una pérdida de 30.61 kg de urea usada en la primera fertilización lo que presenta 0.63 saco de urea. En el caso del sulfato de amonio la pérdida por hectárea de nitrógeno es de 10.76 kg siendo 51.24 kg de sulfato de amonio lo que es aproximadamente un saco del fertilizante. Como fertilizante la pérdida del sulfato es mayor debido a que su contenido de nitrógeno del fertilizante es del 21% a comparación de la urea que es de 46%. Por último las pérdidas de la urea + NBPT es de 11.67 kg del fertilizante, reduciendo en 18.94 kg la pérdida encontrada cuando solo se aplica la urea (Tabla 5).

**Tabla 5: Pérdida de nitrógeno por hectárea y porcentaje de pérdida**

Tratamiento Fuente de nitrógeno	Nitrógeno volatilizado Media (mg)	Nitrógeno volatilizado kg/ha	Fertilizante perdido kg/ha	% de pérdida
Sin fertilizante	62.30	2.08	-	-
Urea	422.28	14.08	30.61	15.64
Sulfato de amonio	322.61	10.76	51.24	11.95
Urea + NBPT	161.00	5.37	11.67	5.96

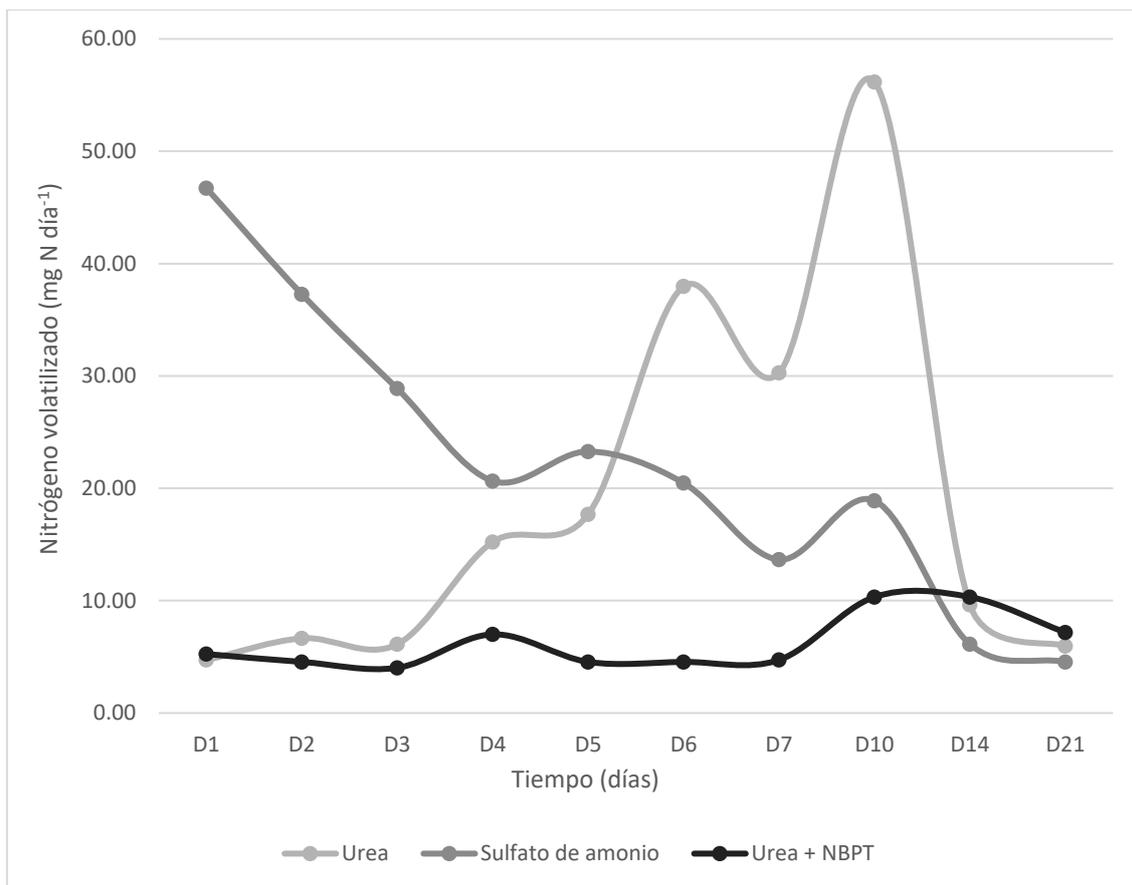
En la Figura 11 se observa la evolución de la volatilización del nitrógeno durante los 21 días posterior a la fertilización. El tratamiento sin fertilizante presentó valores bajos de pérdida de nitrógeno, aproximadamente pierden 2.97 mg por día. Para el tratamiento con urea, las pérdidas de nitrógeno incrementan a partir del tercer día.

Este periodo de retraso en la volatilización de a urea, se explica por la necesidad de este fertilizante en ser hidrolizado en los suelos (Cantarella, 1983). Según lo visto por Ternoski *et al.*, (2012) las pérdidas de nitrógeno en la urea inician a partir del quinto día posterior de la aplicación y el pico de la volatilización en el doceavo día. En la figura (4) se ve que el inicio (tercer día) y el pico de la volatilización (décimo día) en la urea ocurre dos días antes a los mostrado por Ternoski *et al.*, (2012). Fernández, (1984) explica que la diferencia entre días en la que puede tardar la descomposición de la urea depende de diversos factores como la humedad del suelo, temperatura, actividad y presencia de ureasa. Esto va acorde a las condiciones presentadas en la actual investigación ya que las mediciones de la volatilización de la urea se realizaron en el mes de Julio (14.7°C) que presentaba la menor temperatura promedio del año (Anexo 7) y además que el suelo en el que se realizó el trabajo (Anexo 9) tiene baja presencia de materia orgánica lo que puede dar un indicio de la poca producción de ureasa (Dharmakeerthi y Thenabadu, 1996).

El sulfato de amonio es el segundo tratamiento que presentó mayor volatilización (322.61 mg) que representa una pérdida de 11.95%. Las pérdidas del sulfato de amonio no son tan distantes a las obtenidas por la urea. Pero en trabajos posteriores, han hallado que el sulfato de amonio ha presentado valores muy inferiores de volatilización a comparación con la urea como lo hallado por Santos *et al.* (2020) donde encontró que la volatilización en el tratamiento de sulfato de amonio fue menor del 2.5% del nitrógeno aplicado. Lo

mismo se halló para las investigaciones realizadas por Viero *et al.* (2014) y por González y Sadeghian, (2012) donde hallaron valores de pérdidas menores al 1.5% del nitrógeno aplicado en forma de sulfato de amonio. Esta gran diferencia se debe a que estos trabajos citados previamente fueron desarrollados en suelos ácidos con  $\text{pH} < 6.0$ . En estos tipos de suelos con  $\text{pH} < 7$  presentan valores de volatilización en campo por debajo del 5% del nitrógeno aplicado en forma de sulfato de amonio mientras que a  $\text{pH} > 7$  las pérdidas por volatilización están entre un 15 a 35 % llegaron a en algunos casos a presentarse valores cercanos a 60% (Powlson y Dawson, 2022). La misma tendencia encontraron Li *et al.*, (2017) donde la volatilización del sulfato de amonio aumenta con el incremento del pH del suelo. Estos valores de pérdidas se repiten en un trabajo realizado en La Molina por Urguiaga *et al.*, (1989) donde se midió la volatilización de forma indirecta usando isótopos de N15 donde se encontró valores de volatilización de 33.5% del nitrógeno aplicado.

En el Figura 4 se observa que las pérdidas de nitrógeno cuando se usa el sulfato de amonio son mayores en los primeros días, teniendo su pico de volatilización en el primer día perdiendo aproximadamente el 14.5% del total del nitrógeno perdido. Esto coincide con lo presentado por Hargrove *et al.* (1977) donde presentaron el pico de pérdida en el primer día para el sulfato de amonio (en forma de pelets y en estado líquido) perdiendo un 50% de la pérdida total. La mayor parte de la volatilización ocurre en los primeros cuatro días obteniendo un 41.4% de la volatilización total. Cantarella (1983) presentó una tendencia similar donde los primeros cuatro días se presenta la mayor pérdida de nitrógeno en dos tipos de suelos calcáreos (Canisteo y Harps) de 76.8 y 78.1%, respectivamente, posterior a esto días la volatilización disminuyó significativamente.

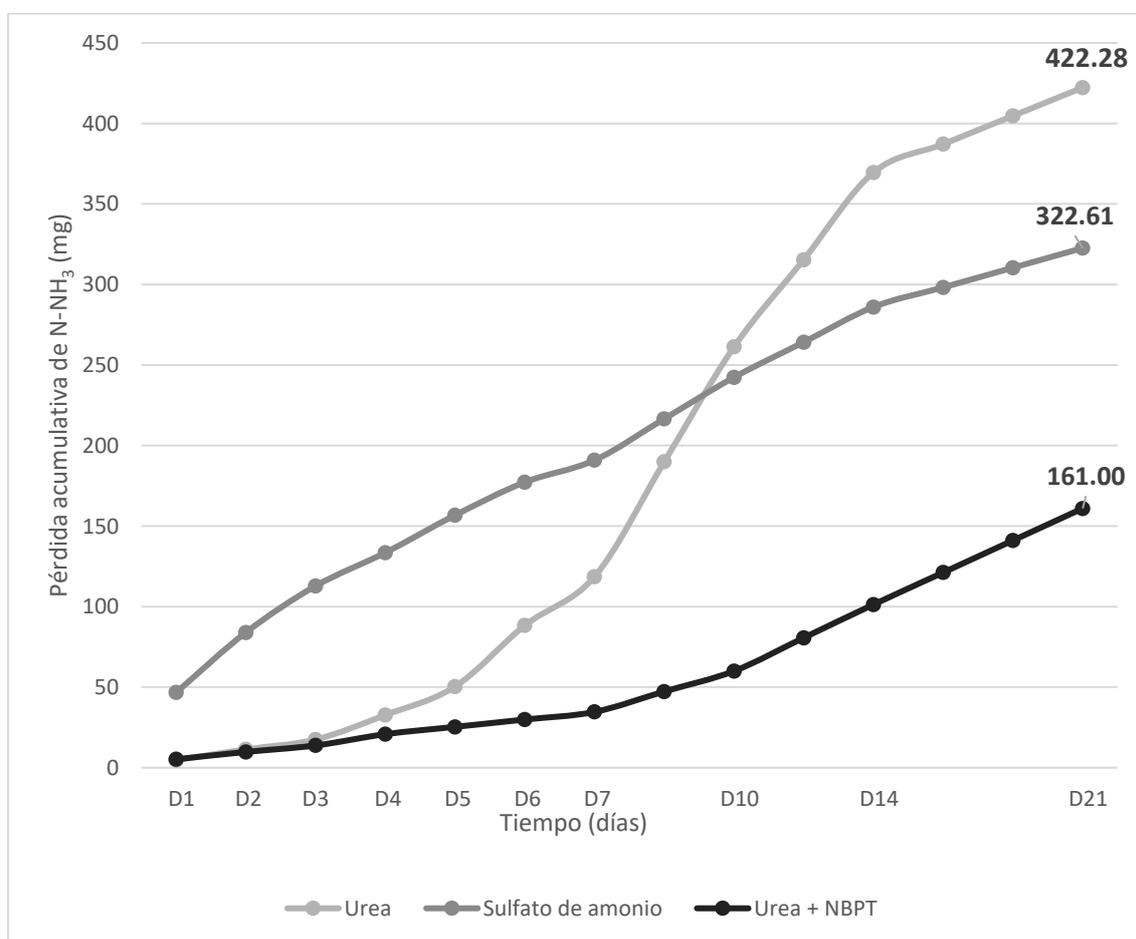


**Figura 11: Volatilización de nitrógeno por día**

En el tratamiento de la urea + NBPT a partir del cuarto día los valores de volatilización se vuelven más significativas. Según lo hallado por Soares *et al.* (2012) el inhibidor NBPT retrasó el inicio de la curva de volatilización hasta el cuarto día posterior a la fertilización, trasladando el pico de volatilización hasta el noveno día. En este experimento se obtuvo una reducción de 62% en la volatilización a comparación de la pérdida total de la urea. En otros trabajos similares como el realizado por Soares *et al.* (2012); encontraron que el uso del NBPT en la urea causó una reducción del 78% de la volatilización. Lo mismo se encontró para el trabajo de Silva *et al.* (2017) donde se redujo la volatilización en un 52% debido al NBPT.

Esta eficiencia en la reducción de la volatilización depende del pH del suelo, Soares y Cantarella, (2023), encontraron que el pH afecta la estabilidad de la molécula de NBPT significativamente, en un suelo muy ácido (pH: 4.5) reduciendo en la volatilización llegó a ser de 18% mientras que un suelo ligeramente ácido (pH: 6.4) la eficiencia del inhibidor fue de 53%. Esto explica la estabilidad y la eficacia del NBPT en el suelo en que se

desarrolló el experimento (Anexo 9); debido a que la estabilidad de este inhibidor es mayor en suelos alcalinos (Engel *et al.*, 2015; Suter *et al.*, 2011).



**Figura 12: Volatilización de nitrógeno acumulada durante 21 días posterior a la aplicación.**

Otro factor que explica la eficacia del inhibidor en el experimento es la temperatura. En el periodo en el que se realizó el experimento (desde el 14 de junio del 2022 hasta el 5 de julio del 2022) ocurrió en unos de los meses más fríos del 2022, presentando en el periodo en el que se desarrolló el experimento una temperatura media de 14.9 °C (Anexo 5). Suter *et al.* (2011) demostraron que la eficiencia del NBPT en la reducción de la volatilización disminuye con el incremento de la temperatura y también del incremento de la actividad de la ureasa. Además, se encontró en suelo franco arcilloso que cuando la temperatura ambiental se encuentra por debajo de los 15°C redujo la volatilización y actividad de la ureasa permitiendo una mejor absorción del nitrógeno por la planta. Ambos factores pueden explicar la estabilidad del inhibidor NBPT en la urea por lo que la volatilización dentro de estos 21 días presentó valores muy bajos (Figura 12).

## 4.2. Rendimiento

Los rendimientos encontrados fueron menor al rendimiento potencial (12000 kg/ha) que presenta el maíz híbrido “experimental – 5” (Anexo 10). El mayor valor encontrado fue para el tratamiento de urea + NBPT con un rendimiento 7083.75 kg/ha y el menor rendimiento fue en el tratamiento control con 5402.01 (Figura 6). Estos bajos rendimiento se deben a la presencia de *Spodoptera frugiperda* en etapas tempranas del cultivo, este insecto es una de las plagas claves que presenta el maíz llegando a afectar hasta el 45% el rendimiento debido a su daño en el área foliar que pueden llegar matar a la planta (Fernández, 2002; Hruska y Gladstone, 1988). Además de la presencia de babosas en los bordes del campo afectando su desarrollo foliar y matando algunas plantas de maíz.

**Tabla 6:Rendimiento promedio por cada tratamiento**

<b>Tratamiento Fuente de nitrógeno</b>		<b>Rendimiento media (kg/ha)</b>
Sin fertilizante	5402.01	A
Urea	6100.99	A
Sulfato de amonio	6877.18	A
Urea + NBPT	7083.75	A
Promedio	5092.79	
CV	23.39	

No se presentaron diferencias estadísticamente significativas entre los rendimientos de los cuatro tratamientos. Esto coincide con lo encontrado por Cassim *et al.*, (2022) en un suelo arenoso donde los tratamientos usados fueron la urea, sulfato de amonio y urea + NBPT, estos no presentaban diferencias significativas en el rendimiento de maíz. Lo mismo se halló en el trabajo de Chatterjee, (2018) donde en el primer año no se presentó una diferencia significativa en el rendimiento del cultivo de remolacha para los mismos tratamientos.

A pesar de que no hay diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos (Tabla 6), se aprecia un mayor rendimiento cuando se fertiliza con urea + NBPT a comparación del resto de fertilizantes. Esto se debe a una mayor disponibilidad de nitrógeno en el suelo debido a la menor volatilización de amoníaco y una mejor distribución en el tiempo por su liberación gradual (Morales *et al.*, 2019). Se halló que el uso de la urea + inhibidor (NBPT) aumenta en un 16% el rendimiento más que cuando se

fertiliza con urea y un incremento del 31% en el rendimiento a comparación cuando no se aplica fertilizantes. Esta tendencia se repite en trabajo de Ferraris *et al.*, (2009) donde a dosis de 60 y 120 kg N ha<sup>-1</sup> cuando se usa la urea con NBPT se logra un incremento estadísticamente significativo en el rendimiento a comparación de la urea y con el testigo (sin fertilizante), este aumento va entre un 4% y 23%, respectivamente.

Para el caso del tratamiento control su menor rendimiento se debe al contenido bajo de materia orgánica en el suelo, debido a que, en un campo sin fertilizar, la principal fuente de nitrógeno es la que se produce por la mineralización de N a partir de la materia orgánica (Álvarez *et al.*, 2002). Ferraris *et al.*, (2009) presentaron el menor rendimiento para el tratamiento control ya que también presentaba un bajo nivel de materia orgánica y poca disponibilidad de nitrógeno.

#### **4.3. Nitrógeno foliar**

Los tratamientos presentaron un efecto en el porcentaje de nitrógeno foliar para una fertilización de 200 kg de N por hectárea. Para el tratamiento control, este presenta 25 g/Kg de nitrógeno foliar ubicándose por debajo del rango de suficiencia nutricional del maíz (Laboratorios A-L de México, 2011). Este bajo nivel de nitrógeno se debe al bajo contenido de materia orgánica del suelo ya que es la principal fuente de nitrógeno para la planta (Álvarez *et al.*, 2002). Además, esta poca disponibilidad de nitrógeno causa una degradación de la clorofila en las hojas para obtener nitrógeno lo que reduce la presencia de este elemento en las hojas (Cassim *et al.*, 2022).

En la tabla 7 se observa que los tratamientos que usan fertilizantes nitrogenados como la urea (28.49 g/kg), sulfato de amonio (28.00 g/kg) y urea + NBPT (30.08 g/kg) están dentro del rango de suficiencia nutricional para el maíz que va desde 28 g N/kg hasta 35g N/kg de nitrógeno foliar (Laboratorios A-L de México, 2011). A pesar de las pérdidas por volatilización de nitrógeno en la urea y en el sulfato de amonio, el nitrógeno que se quedó en el suelo fue suficiente para satisfacer la demanda nutricional del maíz. Esta diferencia entre los tratamientos fertilizados y el control (sin fertilizantes) se repite en el trabajo de Rodrigues *et al.* (2020) donde el tratamiento sin fertilizante tiene 23.5 g de N/kg mientras que los tratamientos con urea y sulfato de amonio presenta entre 30.8 y 31 g de N/kg respectivamente.

El tratamiento con urea + NBPT presenta el mayor contenido de nitrógeno foliar siendo mayor a la urea y el sulfato de amonio debido a su liberación controlada y gradual (Tabla 7). En el trabajo realizado por Guelfi *et al.* (2011) mostraron que cuando se aplica más de 180 kg N/ha el contenido foliar de nitrógeno de la urea + NBPT es mayor que la urea convencional. Debido a que la urea a niveles altos de nitrógeno aplicado las pérdidas por volatilización son mayor disminuyendo el nivel de nitrógeno foliar. Mientras que en el caso del tratamiento de urea + NBPT no se presenta grandes pérdidas por volatilización debido a su liberación controlada. Oliveira *et al.*, (2016) hallaron que los valores de nitrógeno foliar en el maíz fertilizado con urea y sulfato de amonio no presentaron diferencias significativas en diferentes dosis de nitrógeno (60, 120, 180 y 240 kg/ha).

**Tabla 7: Contenido de nitrógeno foliar por cada tratamiento**

<b>Tratamiento</b> <b>Fuente de nitrógeno</b>	<b>Nitrógeno foliar</b> <b>media (mg/g)</b>	
Sin fertilizante	25.04	A
Urea	28.49	AB
Sulfato de amonio	28.00	AB
Urea + NBPT	30.08	B
Promedio		27.90
CV		11.83

#### **4.4. Grosor de tallo**

En esta variable no se presentó diferencia significativa entre las medias de los tratamientos evaluados (Tabla 7). El mayor diámetro lo presentó el tratamiento de urea + NBPT con un valor de 2.91 cm, mientras que el menor diámetro lo presentó el tratamiento sin fertilización nitrogenada con 2.86 cm. Por lo observado en este experimento el diámetro del tallo no presentó un incremento relevante cuando se usa una fuente de nitrógeno.

El uso de inhibidor en la urea no ocasiona un incremento significativo en el diámetro del tallo, esto coincide con lo encontrado por Oliveira *et al.* (2016) en el maíz donde al usar Urea Max (urea + NBPT) no presentó una diferencia significativa con los tratamientos con urea y sin fertilizante. Lo mismo sucede en caso del sulfato de amonio donde no existen diferencias significativas en el diámetro del tallo en comparación con la urea.

**Tabla 8: Efecto en el diámetro del tallo por los tratamientos evaluados.**

<b>Tratamiento Fuente de nitrógeno</b>	<b>Diámetro del tallo media (cm)</b>	
Sin fertilizante	2.86	A
Urea	2.88	A
Sulfato de amonio	2.89	A
Urea + NBPT	2.91	A
Promedio	2.89	
CV	11.19	

## V. CONCLUSIONES

- En general la máxima pérdida del nitrógeno que se obtuvo por volatilización de amoníaco fue de un 15.64% (urea) debido principalmente a la temperatura.
- La volatilización de nitrógeno en un entisol de La Molina para la urea, sulfato de amonio y urea + NBPT fueron de 14.08, 10.76 y 5.37 kg/ha respectivamente.
- La mayor parte de la volatilización del sulfato de amonio fueron en los primeros cuatro días posteriores a la fertilización mientras que la urea presenta un incremento a partir del cuarto día y llega a su punto máximo en el décimo día. Mientras que la urea + NBPT presenta valores constantes y bajos.
- El uso de la urea + NBPT en el maíz causó un mayor rendimiento y un mayor contenido de nitrógeno foliar en comparación con los tratamientos de urea y de sulfato de amonio.

## **VI. RECOMENDACIONES**

- Recomendar el uso de urea + NBPT para el cultivo de maíz, en especial en suelos con características que aumenta la volatilización del amoníaco.
- Realizar mediciones de volatilización de amoníaco en todos los días de la segunda semana para evaluar las pérdidas con más exactitud para el tratamiento con urea.
- Cuantificar los mismos tratamientos, pero en suelos con diferentes características al estudiado.
- Medir la volatilización de amoníaco en tratamientos que reducen estas pérdidas (riego posterior a la fertilización, enterrar el fertilizante, etc).
- Realizar mediciones del nivel de nitrógeno que se presenta en el grano de maíz.

## VII. BIBLIOGRAFÍA

- Alconada, M., Lanfranco, J., y Pellegrini, A. (2018). Macronutriente del suelo. In Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP) (Ed.), *Suelo en el paisaje* (pp. 103–105). [http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/65742/Documento\\_completo\\_\\_pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/65742/Documento_completo__pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Al-Kanani, T., Mackenzie, A., y Barthakur, N. N. (1986). Soil Water and Ammonia Volatilization Relationships with Surface-Applied Nitrogen Fertilizer Solutions. *Soil Science Society of America Journal*, 55(6), 1761–1766.
- Alvarez, R., Alvarez, C. R., Steinbach, H. S., Salas, J. M., y Grigera, S. (2002). Materia orgánica y fertilidad de los suelos en la pampa ondulada. *Informaciones Agronómicas Del Cono Sur*, 14.
- Arias, S., Pérez, J., y Rueda, O. M. (2004). Lixiviación de nitratos en dos suelos al alterar sus propiedades físicas. *Revista de La Escuela de Ingeniería de Antioquia*, 2, 35–40.
- Avnimelech, Y., y Laher, M. (1977). Ammonia Volatilization From Soils: Equilibrium Considerations. *Soil Science Society of America Journal*, 41(6), 1080–1084.
- Awale, R., y Chatterjee, A. (2017). Enhanced efficiency nitrogen products influence ammonia volatilization and nitrous oxide emission from two contrasting soils. *Agronomy Journal*, 109(1), 47–57. <https://doi.org/10.2134/agronj2016.04.0219>
- Barbieri, P., Echeveria, H., Sainz Rozas, H., y Maringolo, M. (2010). Fertilización de maíz con urea de liberación lenta: pérdida por volatilización y eficiencia de uso de nitrógeno. *Ciencia Del Suelo*, 28(1), 57–66.
- Bázan, R. (1995). Manual para análisis químico de suelos aguas plantas.
- Below, F. (2002). Fisiología, nutrición y fertilización nitrogenada del maíz. *Informaciones Agronomicas*, 99, 7–12.

- Benimeli, M., Plasencia, A., Corbella, R., Andina, D., Sanzano, A., Sosa, A., y Fernández, J. (2019). El nitrógeno del suelo. *Edafologia.Org*, 1–11. <https://www.edafologia.org/app/download/7953478176/El+nitrogeno+del+suelo+2019.pdf?t=1563476239>
- Cantarella, H. (1983). *Hydrolysis of formamide and volatilization of ammonia from nitrogen fertilizers added to soils* [Iowa State University]. <https://lib.dr.iastate.edu/rtd/7700>
- Cantarella, H., Otto, R., Soares, J., y Silva, A. (2018). Agronomic efficiency of NBPT as a urease inhibitor: A review. In *Journal of Advanced Research* (Vol. 13, pp. 19–27). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2018.05.008>
- Cantarella, H., Rosseto, R., Barbosa, W., Penna, M., y Resende, L. (1999). Perdas de nitrogênio por volatilização da amônia e resposta da cana-de-açúcar à adubação nitrogenada, em sistema de colheita de cana sem queima prévia. *Congresso Nacional Da Stab*, 7, 82–87.
- Cárdenas, R., Sánchez, J., Farías, R., y Peña, J. (2004). Los aportes de nitrógeno en la agricultura. *Revista Chapingo. Serie Horticultura*, 10, 173–178.
- Cassim, B., Besen, M., Kachinski, W., Macon, C., de Almeida, J., Sakurada, R., Inoue, T., y Batista, A. (2022). Nitrogen Fertilizers Technologies for Corn in Two Yield Environments in South Brazil. *Plants*, 11(14). <https://doi.org/10.3390/plants11141890>
- Castañeda, C. (2018). *Recuperación aparente del nitrógeno en fertilizantes convencionales, liberación controlada y lenta usando cultivo indicador arroz (Oryza sativa L.) en invernadero* [Universidad Nacional Agraria La Molina]. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/3867/castaneda-tarrillo-carla-jeunelli.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Castro, N., Silva, A., y Gilio, L. (2021). Desempenho e inter-relações do setor de fertilizantes: uma análise segundo a ótica de insumo-produto. *Revista Planejamento e Políticas Públicas*, 56, 159–189. <https://doi.org/10.38116/ppp56art6>
- Chatterjee, A. (2018). Additions of ammonium sulfate and urease inhibitor with urea to improve spring wheat and sugar beet yield. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 64(10), 1459–1464. <https://doi.org/10.1080/03650340.2018.1436762>
- Chevallier, S., y Toribio, M. (2005). Volatilización del amoniaco. *Publicación Miscelánea*, 105, 69–82.

- Dari, B., Rogers, C., y Walsh, O. (2019). *Understanding Factors Controlling Ammonia Volatilization from Fertilizer Nitrogen Applications*.
- de Richter, R., y Caillol, S. (2011). Fighting global warming: The potential of photocatalysis against CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, CFCs, tropospheric O<sub>3</sub>, BC and other major contributors to climate change. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 12(1), 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2011.05.002>
- Dharmakeerthi, R., y Thenabadu, M. (1996). Urease activity in soil: A review. *Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka*, 24(3), 159–195.
- Engel, R., Towey, B., y Gravens, E. (2015). Degradation of the Urease Inhibitor NBPT as Affected by Soil pH. *Soil Science Society of America Journal*, 79(6), 1674–1683. <https://doi.org/10.2136/sssaj2015.05.0169>
- Ernst, J., y Massey, H. (1960). Effects of Several Factors on Volatilization of Ammonia Formed from Urea in the Soil. *Soil Science Society Proceedings*, 87–90.
- FAO. (2022). *El mercado mundial de fertilizantes: balance de la situación de un mercado en dificultades*. <https://investing.com>.
- Fenn, L., y Kissel, D. (1973). Ammonia Volatilization from Surface Applications of Ammonium Compounds on Calcareous Soils: I. General Theory. *Soil Science Society of America Journal*, 37(6), 855–859.
- Fenn, L., y Kissel, D. (1976). The Influence of Cation Exchange Capacity and Depth of Incorporation on Ammonia Volatilization from Ammonium Compounds Applied to Calcareous Soils 1. *Soil Science Society of America Journal*, 40(3), 394–398.
- Fenn, L., y Hossner, L. (1985). Ammonia Volatilization from Ammonium or Ammonium-Forming Nitrogen Fertilizers. In *Advances in Soil Science* (Vol. 1, pp. 123–169).
- Ferguson, R., y Kissel, D. (1986). Effects of Soil Drying on Ammonia Volatilization from Surface-applied Urea. *Soil Science Society of America Journal*, 50(2), 485–490.
- Fernández del Pozo, M. (1984). La urea, fertilizante nitrogenado. *IPA La Platina*, 26(1), 26–28.
- Fernández, J. (2002). Estimación de umbrales económicos para *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) en el cultivo del maíz. *Investigación Agraria : Producción y Protección Vegetales*, 17(3), 467–474.
- Fernández, L. (2003). *Estudio de mercado sobre fertilizantes en Perú*.

- Ferraris, G., Couretot, L., y Toribio, M. (2009). Pérdidas de nitrógeno por volatilización y su implicancia en el rendimiento del cultivo de maíz: Efectos de fuente, dosis y uso de inhibidores. *Informaciones Agronómicas*, 43, 19–22.
- Fisher, K., Yarwood, S., y James, B. (2017). Soil urease activity and bacterial ureC gene copy numbers: Effect of pH. *Geoderma*, 1–8.
- Freney, J., y Simpson, J. (1983). Volatilization of ammonia. In *Gaseous Loss of Nitrogen from Plant-Soil Systems* (1st ed., pp. 2–22). Springer science business media. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-1662-8>
- Freney, J., Simpson, J., y Denmead, O. (1981). Ammonia Volatilization. *Ecological Bulletins*, 33, 291–302. <https://www.jstor.org/stable/45128671>
- González, H., y Sadeghian, S. (2012). Volatilización del nitrógeno a partir de diferentes fuentes fertilizantes en la etapa de crecimiento vegetativo del café. *Cenicafé*, 63(1), 132–143.
- González, H., Sadeghian, S., Medina, R., y Castro, A. (2015). Alternativas para disminuir la volatilización de nitrógeno producida por la fertilización con urea. *Revista Cenicafé*, 66(1), 7–15.
- Guelfi, D. (2017). Fertilizantes nitrogenados estabilizados, de liberação lenta ou controlada. *Informações Agronômicas*, 157, 4–6. [http://www.ipni.net/PUBLICATION/IA-BRASIL.NSF/0/62EAE392556C904B832580FB0066F6A3/\\$FILE/Page1-14-157.pdf](http://www.ipni.net/PUBLICATION/IA-BRASIL.NSF/0/62EAE392556C904B832580FB0066F6A3/$FILE/Page1-14-157.pdf)
- Guelfi, D., Ferreira, A., Liberato, R., Pinto, F., Ávila, F., y Faquin, V. (2011). *Productivity and efficiency of nitrogen fertilization in maize under different levels of urea and NBPT-treated urea*.
- Hargrove, W. (1988). Evaluation of Ammonia Volatilization in the Field. *Journal of Production Agriculture*, 1(2), 104–111.
- Hargrove, W., Kissel, D., y Fenn, L. (1977). Field Measurements of Ammonia Volatilization from Surface Applications of Ammonium Salts to a Calcareous Soil. *Agronomy Journal*, 69(3), 473–476.
- Hruska, A., y Gladstone, S. (1988). Effect of Period and Level of Infestation of the Fall Armyworm, *Spodoptera frugiperda*, on Irrigated Maize Yield. *Source: The Florida Entomologist*, 71(3), 249–254.
- IFA. (1992). *Los fertilizantes y su uso*. <http://www.fao.org/3/a-x4781s.pdf>
- Illarze, G., del Pino, A., Riccetto, S., y Irisarri, P. (2018). Emisión de óxido nitroso,

- nitrificación, desnitrificación y mineralización de nitrógeno durante el cultivo del arroz en 2 suelos de Uruguay. *Revista Argentina de Microbiología*, 50(1), 97–104. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ram.2017.05.004>
- Jones, C., Brown, B., Engel, R., Horneck, D., y Olson, K. (2013). *Nitrogen Fertilizer Volatilization Factors Affecting*.
- Kissel, D., Sander, D., y Ellis, R. (1985). Fertilizer-Plant Interactions in Alkaline Soils. In *Fertilizer Technology and Use* (3rd ed., pp. 154–157).
- Kot, M., Zaborska, W., y Orlinska, K. (2001). Inhibition of Jack Bean Urease by N-(n-butyl) thiophosphorictriamide and N-(n-butyl) phosphorictriamide: Determination of the Inhibition Mechanism. *Journal of Enzyme Inhibition*, 16, 507–516.
- Laboratorios A-L de México. (2011). *Análisis foliar*. <https://fuentesdeinformacioniapb.files.wordpress.com/2013/11/analisis-foliar.pdf>
- Lamprea, A., Herrera, N., Buitrago, J., y Ramirez, Y. (2015). *El Nitrógeno: Ciclo Biogeoquímico*. [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/57115231/Articulo.pdf?1533152498=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DEL\\_Nitrogeno\\_Ciclo\\_Biogeoquimico.pdf&Expires=1592280699&Signature=KcYWWfwyvZLHNSNpPQ0bldzmIulQJJoI47L2dzPrUiFpU0kB2zsVGu1I1SO6d4XuCsX](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/57115231/Articulo.pdf?1533152498=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DEL_Nitrogeno_Ciclo_Biogeoquimico.pdf&Expires=1592280699&Signature=KcYWWfwyvZLHNSNpPQ0bldzmIulQJJoI47L2dzPrUiFpU0kB2zsVGu1I1SO6d4XuCsX)
- Lara, W., Korndorfer, G., y Motta, S. (1997). Volatilização de N-NH<sub>3</sub> na cultura de milho: I. efeito da irrigação e substituição parcial da uréia por sulfato de amônio. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 21(3), 481–487.
- Larios, R., García, L., Ríos, M., Avalos, C., y Castro, J. (2021). Pérdidas de nitrógeno por volatilización a partir de dos fuentes nitrogenadas y dos métodos de aplicación. *Siembra*, 8(2), e2475. <https://doi.org/10.29166/siembra.v8i2.2475>
- Leal, L., Salamanca, A., y Sadeghian, S. (2007). Pérdidas de nitrógeno por volatilización en cafetales en etapa productiva. *Cenicafé*, 58(3), 216–226. <http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/224/1/arc058%2803%29216-226.pdf>
- Li, Y., Huang, L., Zhang, H., Wang, M., y Liang, Z. (2017). Assessment of ammonia volatilization losses and nitrogen utilization during the rice growing season in alkaline salt-affected soils. *Sustainability (Switzerland)*, 9(1). <https://doi.org/10.3390/su9010132>
- Lin, Z., Dai, Q., Ye, S., Wu, F., Jia, Y., Chen, J., Xu, L., Zhang, H., Huo, Z., Xu, K., y Wei, H. (2012). Effects of Nitrogen Application Levels on Ammonia Volatilization

- and Nitrogen Utilization during Rice Growing Season. *Rice Science*, 19(2), 125–134. [https://doi.org/10.1016/S1672-6308\(12\)60031-6](https://doi.org/10.1016/S1672-6308(12)60031-6)
- Longeri, L., Vidal, I., y Fernández, M. (2001). Ammonium fixation in six Chilean soils from the VIII Region of Chile. *Agricultura Técnica*, 61(2), 180–191.
- Macera, D. (2019, January 30). Fertilizantes: La úrea, el químico mucho más contaminante que el CO<sub>2</sub>. *El Comercio*. <https://elcomercio.pe/economia/dia-1/fertilizantes-urea-quimico-contaminante-co2-noticia-602852-noticia/?ref=ecr>
- Mazzei, L., Cianci, M., Contaldo, U., y Ciurli, S. (2019). Insights into Urease Inhibition by N-(n-Butyl) Phosphoric Triamide through an Integrated Structural and Kinetic Approach. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(8), 2127–2138. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b04791>
- Mikkelsen, R. (2007). Biuret en fertilizantes de urea. *Informaciones Agronomicas*, 67, 7–9. [http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/EFEA3465E9DC67A3852579A3006CAEC6/\\$FILE/Inf-Agro.67.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/EFEA3465E9DC67A3852579A3006CAEC6/$FILE/Inf-Agro.67.pdf)
- Mikkelsen, R. (2010). Emisiones de amoníaco de operaciones agrícolas. *Informaciones Agronomicas*, 79(1), 24–27.
- Modolo, L., da Silva, C., Brandão, D., y Chaves, I. (2018). A minireview on what we have learned about urease inhibitors of agricultural interest since mid-2000s. *Journal of Advanced Research*, 13, 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2018.04.001>
- Morales, E., Rubi, M., Lopez, J., Martinez, A., y Morales, E. (2019). Urea (NBPT) una alternativa en la fertilización nitrogenada de cultivos anuales. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(8), 1875–1886.
- Navarro, G., y Navarro, S. (2014). Fertilizantes nitrogenados. In *Fertilizantes Químicas y Acción* (pp. 76–78). Mundi-Prensa.
- Noberta, S., y Vargas, M. (2016). *Boletín estadístico de medios de producción agropecuarios*. <https://www.minagri.gob.pe/portal/download/pdf/herramientas/boletines/prod-agropecuarios/2016/boletin-estad-medios-produccion-agropec-diciembre16.pdf>
- Núñez, P., Jara, A., Sandoval, Y., Demanet, R., y Mora, M. (2012). Biomasa microbiana y actividad ureasa del suelo en una pradera permanente pastoreada de Chile. *Asociación Argentina de La Ciencia Del Suelo*, 30(2), 187–199.
- Obcemea, W., Real, J., y de Datta, S. (1988). Effect of Soil Texture and Nitrogen Management on Ammonia Volatilization and Total Nitrogen Losses. *Philippine Journal of Crop Science*, 13(3), 145–153.

- Oliveira, F., De Sousa, M., Da Silva, L., De Sousa, A., Da Silveira, P., y Da Cunha, P. (2016). Single-cross performance in off-season in function of urea sources on side-dressing fertilization. *Revista Caatinga*, 29(4), 812–821. <https://doi.org/10.1590/1983-21252016v29n405rc>
- Parr, J., y Papendick, R. (1996). Retention of Ammonia in Soils. In Malcolm Vickar, W. Martin, Ivan Miles, & H. Tucker (Eds.), *Agricultural Anhydrous Ammonia Technology and Use* (pp. 213–236).
- Pereyra, M. (2001). Asimilación del nitrógeno en plantas. In *Archivo Internet*. [http://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/Asimilacion del nitrogeno.pdf](http://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/Asimilacion%20del%20nitrogeno.pdf)
- Portugal, J., y Torres, F. (2018). *Evaluación de la eficiencia de fertilización nitrogenada con la aplicación de inhibidor de la ureasa (NBPT) sobre el rendimiento en grano de maíz* [Universidad Nacional de la Plata]. [http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/67924/Documento\\_completo\\_\\_\\_PDF.pdf-PDFA1b.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/67924/Documento_completo___PDF.pdf-PDFA1b.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Powlson, D., y Dawson, C. (2022). Use of ammonium sulphate as a sulphur fertilizer: Implications for ammonia volatilization. *Soil Use and Management*, 38(1), 622–634. <https://doi.org/10.1111/sum.12733>
- Rodrigues, A., Dos, W., Sousa, S., Pelá, A., Tavares, A., Oliveira, V., y De Gláucia, M. (2020). Efeito de fontes nitrogenadas protegidas e de solução concentrada em adubação de cobertura em milho effect of protected nitrogenated sources and concentrated solution in corn coverage fertilization. *Revista Agrotecnologia, Ipameri*, 11(2), 36–45.
- Rodríguez, L. (2006). Implicaciones fisiológicas de la osmorregulación en plantas. *Agronomía Colombiana*, 24 (1), 28–37.
- Rodríguez, T., Ojeda, D., Blanco, F., Valdez, R., y Parra, R. (2016). Ureasa y níquel en la fisiología de las plantas. *Chapingo Serie Horticultura*, 22(2), 69–82.
- Salvagiotti, F., Ferraguti, F., y Manlla, A. (2012). Respuesta a la fertilización y eficiencia en el uso del nitrógeno en maíz de siembra tardía sobre diferentes antecesores utilizando inhibidores de ureasa. In *Actas XXIII Congreso Argentino de Ciencia del Suelo*.
- Santos, W., Alves, B., Urquiaga, S., Pacheco, E., de Barros, I., Fernandes, M., Batista, J., Bender, E., de Souza, H. y Jantalia, C. (2020). Ammonia volatilization and yield of corn fertilized with different nitrogen sources in the Brazilian semiarid. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 55. <https://doi.org/10.1590/S1678->

- Sanz, A. (2010). *Ammonia Emission from Fertiliser Application: Quantification Techniques and Mitigation Strategies*. Universidad Politecnica de Madrid.
- Sanz, A., Misselbrook, T., Camp, V., y Vallejo, A. (2011). Effect of water addition and the urease inhibitor NBPT on the abatement of ammonia emission from surface applied urea. *Atmospheric Environment*, 45(8), 1517–1524. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.12.051>
- Sierra, C. (2010). *La urea: Características, ventajas y desventajas de esta fuente nitrogenada* (35).
- Silva, A., Sequeira, C., Sermarini, R., y Otto, R. (2017). Urease inhibitor NBPT on ammonia volatilization and crop productivity: A meta-analysis. *Agronomy Journal*, 109(1), 1–13. <https://doi.org/10.2134/agronj2016.04.0200>
- Soares, J., y Cantarella, H. (2023). Dynamics of ammonia volatilization from NBPT-treated urea in tropical acid soils. *Scientia Agricola*, 80. <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2022-0076>
- Soares, J., Cantarella, H., y Menegale, M. (2012). Ammonia volatilization losses from surface-applied urea with urease and nitrification inhibitors. *Soil Biology and Biochemistry*, 52, 82–89. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.04.019>
- Soil Science Division Staff. (2017). *Soil Survey Manual* (US Department of Agriculture, Ed.; Vol. 18).
- Suter, H., Pengthamkeerati, P., Walker, C., y Chen, D. (2011). Influence of temperature and soil type on inhibition of urea hydrolysis by N-(n-butyl) thiophosphoric triamide in wheat and pasture soils in south-eastern Australia. *Soil Research*, 49(4), 315–319. <https://doi.org/10.1071/SR10243>
- Ternoski, G., Pauletti, V., Silveira, C., Ranzan, T., Lemiska, A., y de Oliveira, A. (2012). Volatilização da amônia da uréia misturada com subprodutos do xisto. *WORKSHOP INSUMOS PARA AGRICULTURA SUSTENTÁVEL*.
- Urguiaga, S., Victoria, R., Buitrón, F., y Chávez, J. (1989). Perdas por volatilizacao do N-ureia e N-sulfato de amonio num solo calcario da parte central da parte central da regio costeira do Peru. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 607| – 613.
- USDA. (1999). *Soil Quality Test Kit Guide*.
- Viero, F., Bayer, C., Vieira, M., Fontoura, S.y de Moraes, R. (2014). Ammonia volatilization from nitrogen fertilizers in no-till wheat and maize in southern Brazil. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 38, 1515–1525.

Vitosh, M. (1996). *N-P-K Fertilizers*.

[https://www.canr.msu.edu/field\\_crops/uploads/archive/E0896.pdf](https://www.canr.msu.edu/field_crops/uploads/archive/E0896.pdf)

Wua, H., Dua, S., Zhanga, Y., Ana, J., Zoua, H., Zhanga, Y., y Yu, N. (2019). Effects of irrigation and nitrogen fertilization on greenhouse soil organic nitrogen fractions and soil-soluble nitrogen pools. *Agricultural Water Management*, 2016, 415–424. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.02.020>

## VIII. ANEXOS

### Anexo 1: Análisis de varianza para la variable nitrógeno volatilizado

#### Análisis de la varianza

Variable N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Valores	16 0.87	0.78	30.43

#### Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	323045.35	6	53840.89	9.92	0.0015
Tratamiento	311402.13	3	103800.71	19.13	0.0003
Bloques	11643.22	3	3881.07	0.72	0.5673
Error	48835.00	9	5426.11		
Total	371880.35	15			

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=162.60513

Error: 5426.1111 gl: 9

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
0	62.30	4	36.83	A
3	161.00	4	36.83	A B
2	322.61	4	36.83	B C
1	422.28	4	36.83	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

## Anexo 2: Análisis de varianza para la variable rendimiento

### Análisis de la varianza

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Rendimiento real	16	0.40	0.00	23.39

### Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	13084211.69	6	2180701.95	0.98	0.4884
Tratamiento	7103891.69	3	2367963.90	1.07	0.4100
Bloque	5980320.00	3	1993440.00	0.90	0.4786
Error	19952905.62	9	2216989.51		
Total	33037117.31	15			

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=3286.78823

Error: 2216989.5137 gl: 9

Tratamiento	Medias	n	E.E.
0	5402.01	4	744.48 A
1	6100.99	4	744.48 A
2	6877.18	4	744.48 A
3	7083.75	4	744.48 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

## Anexo 3: Análisis de varianza para la variable porcentaje de nitrógeno foliar

### Análisis de la varianza

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
ml Acido	48	0.46	0.38	11.84

### Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	3.76	6	0.63	5.75	0.0002
Bloque	2.16	3	0.72	6.62	0.0009
Tratamiento	1.59	3	0.53	4.88	0.0054
Error	4.47	41	0.11		
Total	8.22	47			

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=0.36077

Error: 0.1089 gl: 41

Tratamiento	Medias	n	E.E.
0	2.50	12	0.10 A
2	2.79	12	0.10 A B
1	2.85	12	0.10 A B
3	3.01	12	0.10 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

#### Anexo 4: Análisis de varianza para la variable diámetro del tallo

##### Análisis de la varianza

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Datos	160	0.11	0.07	11.19

##### Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1.90	6	0.32	3.04	0.0077
Tratamiento	0.06	3	0.02	0.21	0.8910
Bloque	1.84	3	0.61	5.87	0.0008
Error	15.95	153	0.10		
Total	17.85	159			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=0.18576

Error: 0.1042 gl: 153

Tratamiento	Medias	n	E.E.
0	2.86	40	0.05 A
1	2.88	40	0.05 A
2	2.89	40	0.05 A
3	2.91	40	0.05 A

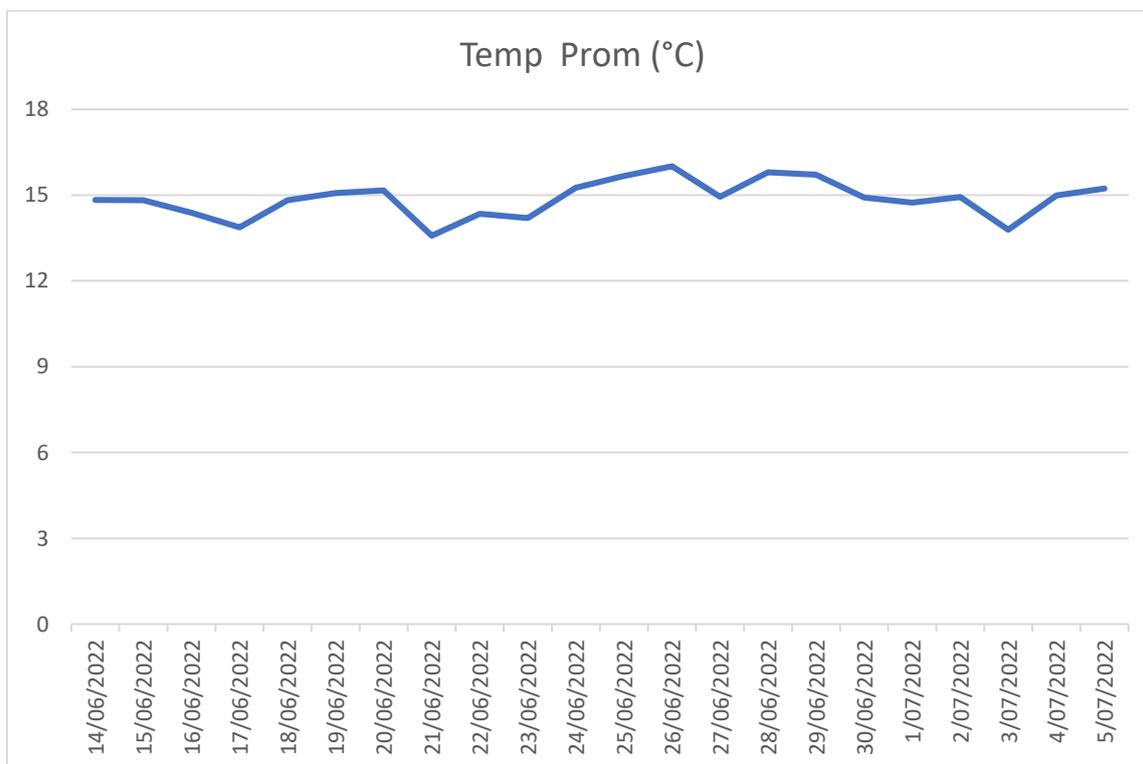
Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

**Anexo 5: Registro diario de la temperatura durante la recolección de nitrógeno volatilizado en campo**

<b>Fecha</b>	<b>Temp Prom (°C)</b>	<b>Temp Max (°C)</b>	<b>Temp Min (°C)</b>	<b>Humedad (%)</b>	<b>Velocidad del viento</b>
14/06/2022	14.83	19.6	10.4	74.46	1.99
15/06/2022	14.82	21	8.7	74.83	2.93
16/06/2022	14.38	21.4	8.7	78.58	2.18
17/06/2022	13.87	18.5	9.2	84.58	2.03
18/06/2022	14.82	20.5	11.2	80.92	2.03
19/06/2022	15.07	20.6	11.1	81.08	1.45
20/06/2022	15.17	22.1	11	79.08	0.38
21/06/2022	13.58	17.3	10.3	85.21	1.27
22/06/2022	14.35	18.7	10.5	80.23	2.4
23/06/2022	14.2	19.2	9.4	81.92	2.8
24/06/2022	15.26	20.6	11.3	82.38	2.84
25/06/2022	15.67	20.3	13.3	83.57	3.19
26/06/2022	16.01	19.8	14.1	80	2.45
27/06/2022	14.94	21.3	10.3	81.88	2.72
28/06/2022	15.8	15.8			
29/06/2022	15.71	20.1	12.5	78.38	2.19
30/06/2022	14.91	17.4	11.1	81.54	2.28
1/07/2022	14.74	18	11.3	84.26	2.4
2/07/2022	14.93	19.4	13.3	85.5	2.56
3/07/2022	13.79	15.9	10.9	87.33	2.42
4/07/2022	14.99	18.9	11.5	81.54	2.72
5/07/2022	15.23	19.3	13.2	83.67	2.76
<b>Promedio</b>	<b>14.87</b>	<b>19.35</b>	<b>11.11</b>	<b>81.47</b>	<b>2.29</b>

Fuente: Observatorio Meteorológico Alexander Von Humboldt – UNALM

**Anexo 6: Gráfico diario de la temperatura media durante la recolección de nitrógeno volatilizado**

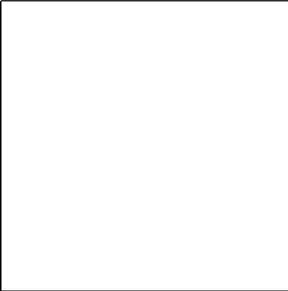
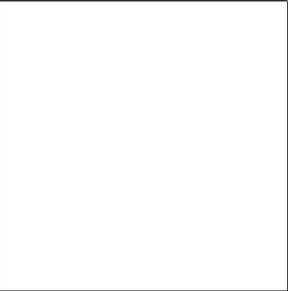
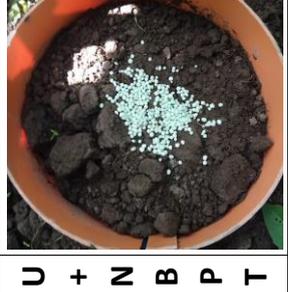


**Anexo 7: Registro mensual (abril – octubre) de la temperatura (media, máxima y mínima), humedad y velocidad del viento a durante la fase de campo**

Mes	Temperatura °C			Humedad	Velocidad del Viento
	Media	Máxima	Mínima	%	m/s
Abril	20	25.93	15.67	74.23	3.02
Mayo	17.08	22.62	12.79	78.84	2.71
Junio	15.4	20.25	11.67	80.97	2.32
Julio	14.7	18.17	12.25	83.80	2.71
Agosto	14.53	18.67	12.27	84.39	2.92
Septiembre	14.88	19.11	12.32	82.04	3.14
Octubre	15.31	19.72	12.08	80.72	3.64

Fuente: Observatorio Meteorológico Alexander Von Humboldt – UNALM

Anexo 8: Seguimiento fotográfico de la disolución de los fertilizantes en el suelo

DIA 10			
DIA 7			
DIA 5			
DIA 3			
DIA 1			
DIA 0			
T	U R E A	S A	D + N B P T

Anexo 9: Análisis de caracterización del suelo usado en el trabajo de tesis

ANALISIS DE SUELOS : CARACTERIZACION

Solicitante : UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

Departamento : LIMA  
 Distrito : LA MOLINA

Provincia : LIMA  
 Predio : CAMPOS DE LA FACULTAD DE AGRONOMIA

Referencia H.R. 78906-015C-23

Fact.: 9663

Fecha : 26/11/2022

Número de Muestra	Claves	pH (1:1)	C.E. (1:1) dS/m	CaCO <sub>3</sub> %	M.O. %	P ppm	K ppm	Análisis Mecánico			Clase Textural	CIC	Cationes Cambiables meq/100g				Suma de Cationes	Suma de Bases	% Sat. De Bases
								Arena %	Limo %	Arcilla %			Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>			
1004		7.78	1.79	4.56	1.22	28.0	164	23	21	Fr.Ar.A.	9.44	6.43	2.29	0.40	0.32	0.00	9.44	9.44	100

A = Arena ; A.Fr. = Arena Franca ; Fr.A. = Franco Arenoso ; Fr. = Franco ; Fr.L. = Franco Limoso ; L = Limoso ; Fr.Ar.A. = Franco Arcillo Arenoso ; Fr.Ar. = Franco Arcilloso ; Fr.Ar.L. = Franco Arcillo Limoso ; Ar.A. = Arcillo Arenoso ; Ar.L. = Arcillo Limoso ; Ar. = Arcilloso

## Anexo 10: Ficha técnica del maíz híbrido “experimental – 5”

**EXPERIMENTAL – 5**  
**HÍBRIDO DOBLE DE MAÍZ AMARILLO DURO**  
**PARA GRANO Y FORRAJE**



**PROGRAMA DE MAÍZ**  
**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA**  
**MOLINA**

### PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS

ADAPTACIÓN	:	Meses de Invierno en Costa Central
PERIODO VEGETATIVO	:	160 a 180 DÍAS
ALTURA DE LA PLATA	:	2.50 m – 2.80 m
ALTURA DE LA MAZORCA	:	1.40 m – 1.80 m
MAZORCAS POR PLANTA	:	1.5
RESISTENTE A TUMBADA, GRANO ANARANJADO, SEMIDURO		

**POTENCIAL DE RENDIMIENTO:** 12,000 Kg / ha

### MANEJO DEL MAÍZ PARA GRANO Y FORRAJE:

- Recomendable incorporar de 6 a 10 t/ha de guano.
- Preparar el terreno con buen riego de machaco.
- Tratar la semilla contra las plagas del suelo.
- Surcar a 80 cm y sembrar 2 semillas por golpe a 40 cm

<b>PRIMER ABONO</b>	<b><u>A LOS 10 – 15 DÍAS</u></b>
3 sacos UREA	150 kg / ha
4 sacos FOSFATO DI AMONIACO	200 kg / ha
3 sacos CLORURO DE POTASIO	150 kg / ha

<b>SEGUNDO ABONO</b>	<b><u>A LOS 40 – 45 DÍAS</u></b>
4 sacos UREA	200 kg / ha

Si no incorporó guano, preparar la mezcla de fertilizantes con igual número de bolsas de guano en cada abonamiento.

Los riegos deben ser ligeros hasta la floración, luego riegos pesados.

### PROGRAMA DE INVESTIGACIÓN Y PROYECCIÓN SOCIAL EN MAÍZ – UNALM

**E-mail :** [pmaiz@lamolina.edu.pe](mailto:pmaiz@lamolina.edu.pe)  
**Celular:** 991139570  
**Teléfono:** 614-7800 Anexos: 343 y 344

## Anexo 11: Registro fotográfico de la parte experimental en campo



Marcado de terreno



Siembra de maíz



Germinación del maíz



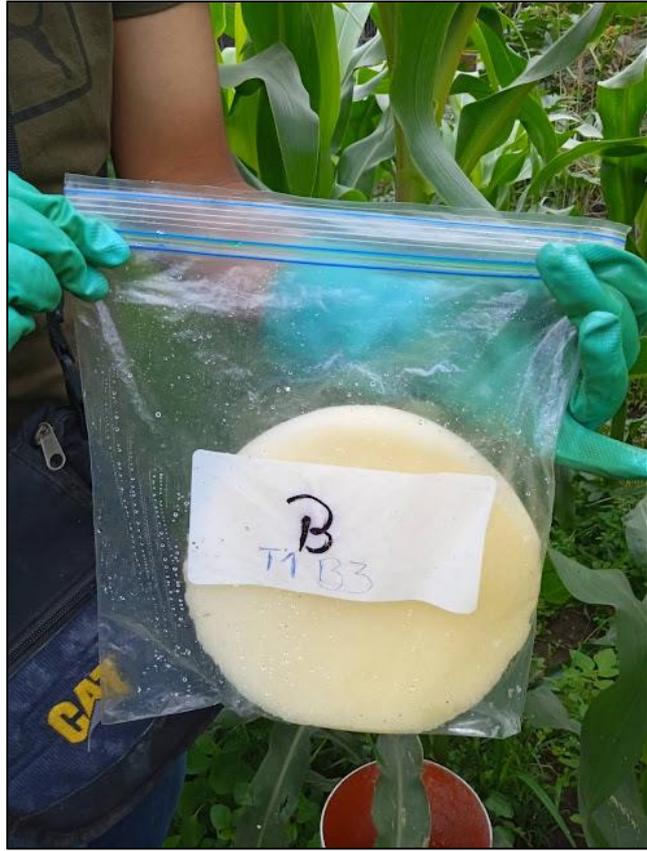
Ensayo previo de la instalación de los colectores semiabierto estático



Instalación de las bases de los colectores en el campo



Bases instaladas en el campo

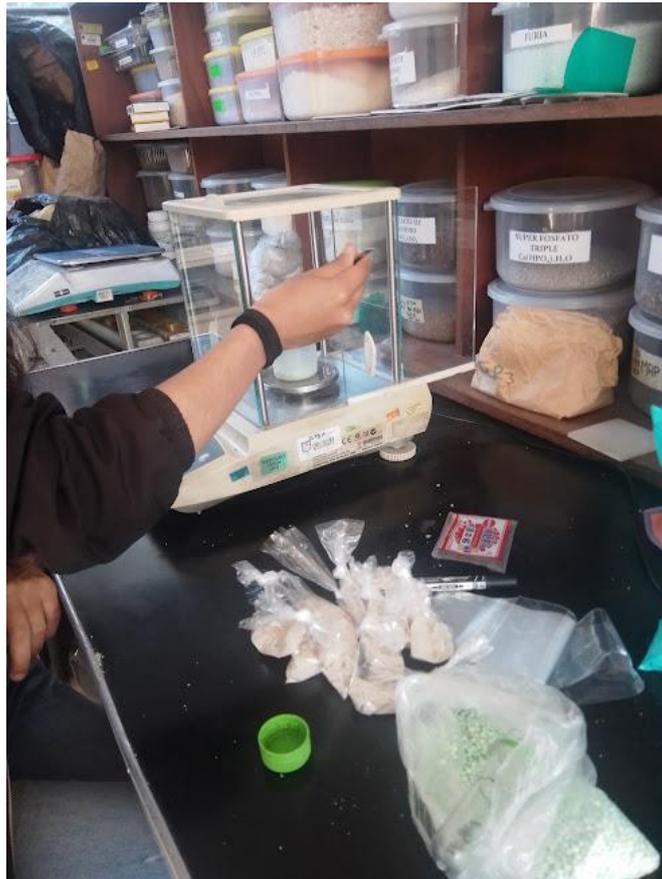


Recolección de las esponjas en bolsas con cierre hermético



Cosecha del maíz amarillo duro

## Anexo 12: Registro fotográfico de la parte experimental en el laboratorio



Pesado de los fertilizantes para la instalación de los tratamientos



Determinación de humedad del suelo



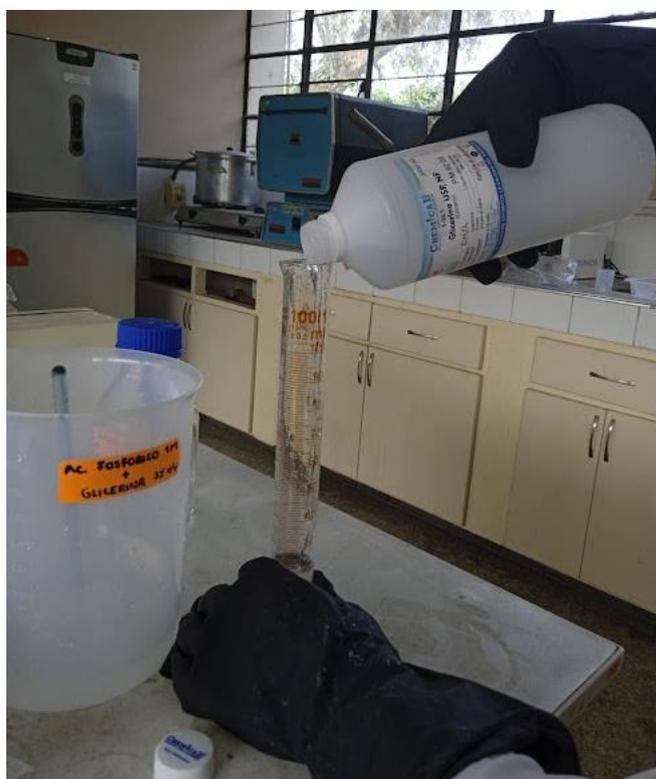
Determinación del contenido de nitrógeno foliar



Destilación de las muestras foliares para determinar nitrógeno



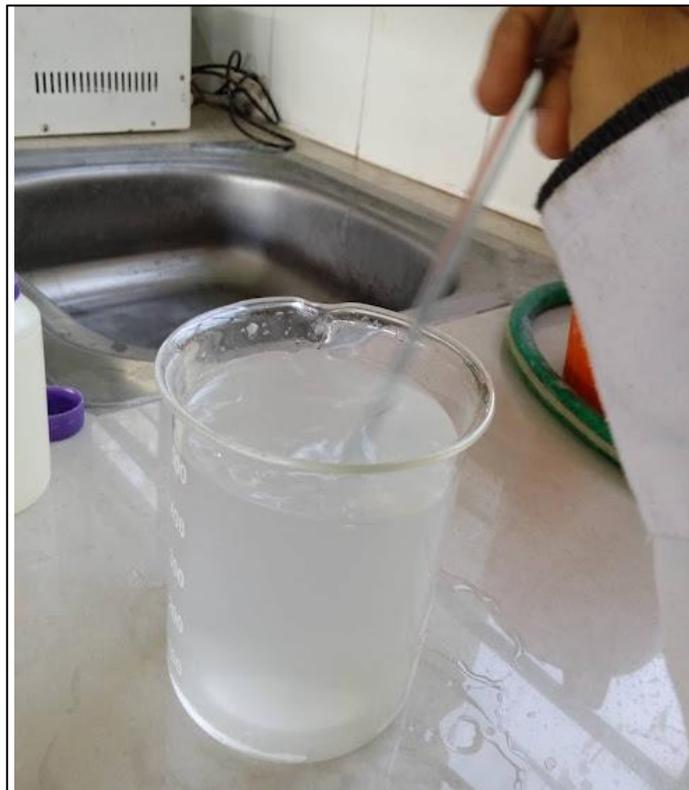
Lavado de esponja con agua desionizada, ácido fosfórico e hidróxido de potasio



Preparación de solución colectora (ácido fosfórico + glicerina)



Preparación de las esponjas para la captura del amoniac



Preparación de la solución de cloruro de potasio para la extracción del amoniac



Lavado de las esponjas para extraer el amonio



Toma de la alícuota para determinar posteriormente el contenido de nitrógeno



Determinación del contenido de nitrógeno con el equipo de la destilación automática