

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE AGRONOMIA



**“RECUPERACIÓN APARENTE DEL NITRÓGENO EN
FERTILIZANTES CONVENCIONALES, LIBERACIÓN
CONTROLADA Y LENTA USANDO CULTIVO INDICADOR ARROZ
(*Oryza sativa* L.) EN INVERNADERO”**

PRESENTADO POR:
CARLA JEUNELLI CASTAÑEDA TARRILLO

TRABAJO ACADÉMICO PARA OPTAR EL TÍTULO DE:
INGENIERO AGRÓNOMO

LIMA – PERÚ

2018

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE AGRONOMIA

“RECUPERACIÓN APARENTE DEL NITRÓGENO EN FERTILIZANTES CONVENCIONALES, LIBERACIÓN CONTROLADA Y LENTA USANDO CULTIVO INDICADOR ARROZ (*Oryza sativa* L.) EN INVERNADERO”

PRESENTADO POR:

CARLA JEUNELLI CASTAÑEDA TARRILLO

TRABAJO ACADÉMICO PARA OPTAR EL TÍTULO DE:

INGENIERO AGRÓNOMO

SUSTENTADA Y APROBADA ANTE EL SIGUIENTE JURADO

Dr. Oscar Loli Figueroa

Presidente

Ing. Mg. Sc. Ruby Vega Ravello

Asesora

Ing. Mg. Sc. Elizabeth Heros Aguilar

Miembro

Dr. Guillermo Aguirre Yato

Miembro

Lima - Perú

2018

DEDICATORIA

A mi familia, en especial a mis padres Eufemia y Carlos por su amor, paciencia y apoyo incondicional a lo largo de mi vida, siendo ejemplos de perseverancia y constancia para seguir siempre adelante, “los amo”.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por brindarme fortaleza en momentos de debilidad y permitir el logro de mis objetivos.

Agradezco a la Ing. Ruby Vega Ravello por ser mi guía, haberme brindado su apoyo siempre que la necesitaba y confianza para la realización de este trabajo.

Al Ing. Pedro Pablo Gutiérrez por su tiempo y colaboración durante todo el tiempo en que se llevó cabo el proyecto.

A los trabajadores del Laboratorio e Invernadero de Fertilidad del Suelo “Sven Villagarcía Hermosa” por su colaboración durante toda la parte experimental del proyecto.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	i
ABSTRACT.....	ii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1 CULTIVO DEL ARROZ.....	3
2.1.1 Taxonomía del género <i>Oryza</i>	3
2.1.2 Climatología.....	3
2.1.3 Nutrición y fertilización.....	9
2.1.4 Fertilización nitrogenada.....	10
2.1.5 Manejo de la fertilización nitrogenada.....	10
2.1.6 Comportamiento del nitrógeno en el suelo.....	11
2.1.7 Dinámica del nitrógeno en la planta.....	15
2.2 CULTIVAR IR-43.....	17
2.3 FERTILIZANTES DE LIBERACIÓN CONTROLADA Y LIBERACIÓN LENTA.....	18
2.3.1 Definición y características.....	18
2.3.2 Liberación de nutrientes de los fertilizantes de liberación controlada y lenta.....	20
2.3.3 Diferencias entre fertilizantes de liberación controlada y lenta.....	23
2.3.4 Tipos de fertilizantes de liberación controlada y lenta.....	23
2.3.5 Fertilizantes recubiertos.....	24
2.4 INHIBIDORES DE UREASA.....	26
2.4.1 Modo de acción.....	26
2.4.2 Características.....	28
2.5 EFICIENCIA EN EL USO DE NITRÓGENO.....	29
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	32
3.1 MATERIALES.....	32
3.1.1 Ubicación del ensayo experimental.....	32
3.1.2 Características del suelo.....	32
3.1.3 Características del agua de riego.....	34
3.1.4 Características climatológicas.....	35
3.1.5 Material genético.....	36

3.1.6 Fertilizantes	36
3.1.7 Otros	38
3.2 METODOLOGÍA	39
3.2.1 Factores en estudio	39
3.2.2 Diseño experimental	40
3.2.3 Evaluación de variables	40
3.2.4 Ejecución del experimento.....	42
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	47
4.1 ALTURA DE PLANTA.....	47
4.2 NÚMERO DE MACOLLOS POR PLANTA.....	49
4.3 NÚMERO DE PANÍCULAS POR PLANTA.....	51
4.4 BIOMASA SECA	53
4.5 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DE LA SOLUCIÓN LIXIVIADA.....	56
4.6 PH DE LA SOLUCIÓN DEL LIXIVIADA.....	58
4.7 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA Y PH DEL SUELO AL FINAL DEL EXPERIMENTO	59
4.8 CONCENTRACIÓN DE NITRATOS Y AMONIO EN EL SUELO AL FINAL DEL EXPERIMENTO	61
4.9 CONCENTRACIÓN DE N EN LA PLANTA AL FINAL DEL EXPERIMENTO.....	63
4.10 CONCENTRACIÓN DE P EN LA PLANTA AL FINAL DEL EXPERIMENTO.....	66
4.11 CONCENTRACIÓN DE K EN LA PLANTA AL FINAL DEL EXPERIMENTO	67
4.12 EXTRACCIÓN DE N POR LA PLANTA	69
4.13 RECUPERACIÓN APARENTE DE NITRÓGENO	70
V. CONCLUSIONES.....	73
VI. RECOMENDACIONES	74
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
VIII. ANEXOS.....	81

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Respuesta de la planta de arroz a temperaturas variables en diferentes etapas de crecimiento	4
Tabla 2: Efecto de la luz y la temperatura sobre el crecimiento del grano de los arroces IR20 y Fujisaka 5	7
Tabla 3: Efecto del sombreado en diferentes etapas de crecimiento en los componentes de rendimiento y el rendimiento de IR74782-6.....	8
Tabla 4: Análisis de caracterización del suelo	33
Tabla 5: Análisis de salinidad del suelo.....	33
Tabla 6: Análisis de agua de riego.....	35
Tabla 7: Temperatura, radiación solar y humedad relativa durante la conducción del experimento.....	36
Tabla 8: Dosis de fertilización de N aplicado en los tratamientos	38
Tabla 9: Dosis de fertilización de P y K para estandarizar sus niveles	38
Tabla 10: Tratamientos estudiados en el ensayo experimental	39
Tabla 11: Dosis y fraccionamiento del Nitrógeno	44
Tabla 12: Dosis y fraccionamiento para estandarizar P y K	44
Tabla 13: Efecto de la aplicación de los fertilizantes nitrogenados convencionales, de liberación controlada y lenta sobre la altura de la planta (cm) durante el desarrollo del cultivo.....	49
Tabla 14: Efecto de la aplicación de los fertilizantes nitrogenados convencionales, de liberación controlada y lenta sobre el número de macollos por planta	51
Tabla 15: Efecto de la aplicación de los fertilizantes nitrogenados convencionales, de liberación controlada y lenta sobre el número de panículas por planta	53
Tabla 16: Efecto de la aplicación de los fertilizantes nitrogenados convencionales, de liberación controlada y lenta sobre la biomasa seca (g) en panícula y follaje	55
Tabla 17: Efecto de la aplicación de los fertilizantes nitrogenados convencionales, de liberación controlada y lenta sobre la conductividad eléctrica ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$) de la solución lixiviada durante el desarrollo del cultivo	57
Tabla 18: Efecto de la aplicación de los fertilizantes nitrogenados convencionales, de liberación controlada y lenta sobre el pH de la solución lixiviada durante el desarrollo del cultivo.....	59
Tabla 19: Efecto de la aplicación de los fertilizantes nitrogenados convencionales, de	

liberación controlada y lenta sobre la conductividad eléctrica ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$) y el pH del suelo al final del experimento	61
Tabla 20: Efecto de la aplicación de los fertilizantes nitrogenados convencionales, de liberación controlada y lenta sobre la concentración de N nítrico y amoniacal ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$) en el suelo al final del experimento	63
Tabla 21: Efecto de la aplicación de los fertilizantes nitrogenados convencionales, de liberación controlada y lenta sobre la concentración de N (%) en panícula y follaje.....	65
Tabla 22: Efecto de la aplicación de los fertilizantes nitrogenados convencionales, de liberación controlada y lenta sobre la concentración de P (%) en panícula y follaje.....	67
Tabla 23: Efecto de la aplicación de los fertilizantes nitrogenados convencionales, de liberación controlada y lenta sobre la concentración de K (%) en panícula y follaje.....	68
Tabla 24: Efecto de la aplicación de los fertilizantes nitrogenados convencionales, de liberación controlada y lenta sobre la extracción del nitrógeno (g) por la planta	70
Tabla 25: Efecto de la aplicación de los fertilizantes nitrogenados convencionales, de liberación controlada y lenta sobre la recuperación aparente del N (%)	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Efecto del nitrógeno sobre el porcentaje de esterilidad atribuible a la baja temperatura en la etapa meiótica.....	5
Figura 2: Fertilidad de las espiguillas que florecieron a diferentes temperaturas diurnas ..	6
Figura 3: Relación entre la fertilidad de las espiguilla y la temperatura del follaje del arroz en el 50 por ciento de floración	6
Figura 4: Efecto de la radiación solar en diferentes etapas de crecimiento sobre el rendimiento de grano de IR747B2-6.....	9
Figura 5: Ciclo y transformaciones de N en suelos cultivados con arroz inundado.....	14
Figura 6: Liberación de distintos fertilizantes y requerimientos de un cultivo.....	19
Figura 7: Efecto de la temperatura sobre la tasa de liberación de Meister®.....	21
Figura 8: Valores de la prueba de lixiviación de agua a 21° C (Tecnología de liberación E-Max - ICL)	21
Figura 9: Efecto de la temperatura sobre la tasa de liberación de la tecnología E-Max	22
Figura 10: liberación de nutrientes de un fertilizante de liberación controlada recubierto / encapsulado (Tecnología de liberación E-Max – ICL).....	22
Figura 11: Modo de acción del inhibidor de ureasa (Agrotain)	28

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Análisis de variancia y prueba de Tukey (0.05) para altura de planta (cm).....	81
Anexo 2: Análisis de variancia y prueba de Tukey (0.05) para número de macollos por planta	83
Anexo 3: Análisis de variancia y prueba de Tukey (0.05) para número de panículas por planta	84
Anexo 4: Análisis de variancia y prueba de Tukey (0.05) para materia seca (g) de la panícula.....	85
Anexo 5: Análisis de variancia y prueba de Tukey (0.05) para materia seca (g) del follaje.....	85
Anexo 6: Análisis de variancia y prueba de Tukey (0.05) para conductividad eléctrica (dS.m ⁻¹) del lixiviado	85
Anexo 7: Análisis de variancia y prueba de Tukey (0.05) para pH del lixiviado	87
Anexo 8: Análisis de variancia y prueba de Tukey (0.05) para conductividad eléctrica (dS.m ⁻¹) del suelo al final del experimento	89
Anexo 9: Análisis de variancia y prueba de Tukey (0.05) para el pH del suelo al final del experimento	89
Anexo 10: Análisis de variancia y prueba de Tukey (0.05) para la concentración en ppm de N nítrico en el suelo al final del experimento.....	89
Anexo 11: Análisis de variancia y prueba de Tukey (0.05) para la concentración en ppm de N amoniacal en el suelo al final del experimento.....	89
Anexo 12: Análisis de variancia y prueba de Tukey (0.05) para la concentración de nitrógeno (%) en panícula al final del experimento.....	90
Anexo 13: Análisis de variancia y prueba de Tukey (0.05) para la concentración de nitrógeno (%) en follaje al final del experimento.....	90
Anexo 14: Análisis de variancia y prueba de Tukey (0.05) para la concentración de fósforo (%) en panícula al final del experimento	90
Anexo 15: Análisis de variancia y prueba de Tukey (0.05) para la concentración de fósforo (%) en follaje al final del experimento	91
Anexo 16: Análisis de variancia y prueba de Tukey (0.05) para la concentración de potasio (%) en panícula al final del experimento	91
Anexo 17: Análisis de variancia y prueba de Tukey (0.05) para la concentración de potasio (%) en follaje al final del experimento	91

Anexo 18: Análisis de variancia y prueba de Tukey (0.05) para el nitrógeno extraído (g) en la panícula.....	91
Anexo 19: Análisis de variancia y prueba de Tukey (0.05) para el nitrógeno extraído (g) en el follaje.....	92
Anexo 20: Análisis de variancia y prueba de Tukey (0.05) para el nitrógeno extraído (g) total.....	92
Anexo 21: Análisis de variancia y prueba de Tukey (0.05) para la recuperación aparente del N (%).....	92
Anexo 22: Análisis de variancia y prueba de Tukey (0.05) para la concentración de nitrato de la solución lixiviada.....	93
Anexo 23: Análisis de variancia y prueba de Tukey (0.05) para la concentración de amonio de la solución lixiviada.....	93
Anexo 24: Contenido de nutrientes y absorción total en 2 variedades de arroz en la madurez. IRRI, 1968 temporada seca.....	93
Anexo 25: Rangos óptimos y niveles críticos para que se presenten deficiencias o toxicidades en los tejidos de plantas de arroz.....	94
Anexo 26: Contenido típico de nutrientes en la paja de arroz a la cosecha.....	94
Anexo 27: Efecto de la dosis de nitrógeno (N) aplicado al suelo en el contenido de N del grano de tres variedades de arroz de siembra directa.....	95

RESUMEN

El desafío actual en el campo de la fertilización está orientado a ser más eficiente en el uso de nutrientes y minimizar el impacto ambiental. El N es el nutriente de mayor importancia por el efecto que tiene sobre el crecimiento de las plantas y porque no existe un mecanismo que permita su almacenamiento en el suelo a largo plazo recayendo su pérdida en un riesgo de contaminación. El objetivo de este estudio fue determinar la recuperación aparente del nitrógeno en fertilizantes convencionales, liberación controlada y lenta, usando cultivo indicador arroz en invernadero. Se llevaron a cabo siete tratamientos y un control, con cuatro repeticiones, el diseño experimental usado fue completamente al azar (DCA). Las fuentes nitrogenadas fueron: urea común, urea + inhibidor de ureasa, sulfato de amonio y Agrocote 3M, 4M y 5M. Se emplearon dos dosis, los tratamientos con fertilizantes convencionales, inhibidor de ureasa y Agrocote 4M tuvieron una dosis de 210 mg.kg^{-1} y los tratamientos con Agrocote 3M, 4M y 5M tuvieron una dosis de 140 mg.kg^{-1} . En los tratamientos con fertilizantes convencionales e inhibidor de ureasa su dosis de aplicación se fraccionó en cuatro momentos y los tratamientos con fertilizantes de liberación controlada tuvieron una sola aplicación. Los tratamientos con fertilizantes convencionales e inhibidor de ureasa presentaron la mayor recuperación aparente del nitrógeno además de un mayor efecto en las variables evaluadas (altura de planta, N° de macollos, N° de panículas, biomasa seca, concentración de N y N extraído por la planta); mientras, los fertilizantes de liberación controlada mostraron los más bajos resultados, pero entre ellas el tratamiento con mayor dosis de aplicación obtuvo el mayor valor. La baja recuperación aparente del nitrógeno en fertilizantes de liberación controlada estuvo relacionada a las altas temperaturas ($>21^{\circ}\text{C}$) que se presentaron ocasionando una rápida liberación de los nutrientes.

Palabras claves: recuperación aparente del nitrógeno, fertilizantes de liberación controlada y lenta, arroz

ABSTRACT

The current challenge in the field of fertilization is aimed at being more efficient in the use of nutrients and minimizing the environmental impact. The N is the nutrient of greater importance because of the effect it has on the growth of the plants and because there is no mechanism that allows its storage in the soil long relapse its loss at a risk of contamination. The objective of this study was to determine the apparent recovery of nitrogen in conventional fertilizers, controlled and slow release, using rice as an indicator crop under greenhouse conditions. Seven treatments and one control were carried out, with four repetitions, the experimental design used was completely randomized (DCA). The nitrogenous sources were: common urea, urease inhibitor, ammonium sulfate and Agrocote 3M, 4M and 5M. Two doses were used, treatments with conventional fertilizers, urease inhibitor and Agrocote 4M had a dose of 210 mg.kg^{-1} and treatments with Agrocote 3M, 4M and 5M had a dose of 140 mg.kg^{-1} . In the treatments with conventional fertilizers and urease inhibitor, their application dose was divided in four moments and the treatments with controlled release fertilizers had a single application. The treatments with conventional fertilizers and urease inhibitor presented the highest apparent recovery of nitrogen as well as a greater effect on the evaluated variables (plant height, number of tillers, number of panicles, dry biomass, concentration of N and N extracted by the plant); while, controlled release fertilizers showed the lowest results, but among them the treatment with the highest application dose obtained the highest value. The low apparent recovery of nitrogen in controlled release fertilizers was related to the high temperatures ($> 21^{\circ}\text{C}$) that were present, causing rapid release of nutrients.

Keywords: apparent nitrogen recovery, controlled and slow-release fertilizers, rice

I. INTRODUCCIÓN

En el Perú, el cultivo de arroz tiene una alta importancia ya que constituye el principal cereal como alimento diario en las mesas de los peruanos. En los últimos 15 años la producción de arroz ha venido creciendo a una tasa de 3.1 por ciento anual entre los años 2001 y 2015, este crecimiento en la producción se ha dado principalmente por el incremento de áreas cosechadas (2 por ciento), y los rendimientos mejoraron 1.1 por ciento para satisfacer a la creciente demanda interna (MINAGRI, 2016).

Además del aumento constante de la población también hubo un aumento en el consumo *per-cápita*, el cual pasó de 45 kg por persona en el año 2001 a 56 kg por persona en el año 2009 (OEEE, 2010).

La continua innovación tecnológica existente, va direccionada a alcanzar la productividad adecuada mediante prácticas sostenibles. Uno de los principales factores que hay que tomar en consideración, es la nutrición vegetal, que se ha llevado a efecto con la adición de fertilizantes edáficos. En este tema surgen inconvenientes debido a la baja eficiencia de los productos empleados y al incorrecto manejo de los nutrientes, que se evidencia en la baja producción y calidad de las cosechas (Ramón, 2014).

El mayor desafío está en lograr una eficaz gestión del nitrógeno más que en cualquier otro nutriente, debido a su gran importancia en el efecto que tiene sobre el crecimiento de las plantas y porque no existe un mecanismo que permita su almacenamiento en el suelo a largo plazo. El nitrógeno es el nutriente que tiene más rutas para salir o entrar del sistema suelo-planta que otro, por lo tanto tiende a eliminarse mucho más, sobre todo en cultivos de cereales en donde la mayor cantidad de nitrógeno se encuentra en los granos (Stevenson, 1982).

Por eso una mejor forma sobre todo de mejorar la eficiencia en el uso del nitrógeno y reducir riesgos ambientales es el uso de fertilizantes de liberación controlada, los cuales

basan su tecnología en un recubrimiento polimérico y su tasa de liberación real depende sólo de la temperatura del suelo (Fontanilla y Lledó citado por Ramón, 2014). Dicho producto facilita proveer, durante el ciclo del cultivo, nutrientes en forma gradual, oportuna y por tiempos más largos, reduciendo la posibilidad de causar toxicidad al cultivo.

Según Rose *et al.* (2004), los fertilizantes de liberación controlada de tipo polímero, además de poseer duraciones prolongadas, la principal ventaja es que son ambientalmente seguros y su relación costo-eficiencia resulta económicamente atractivo.

Por lo expuesto anteriormente, el objetivo de la presente investigación es determinar la recuperación aparente del nitrógeno en fertilizantes convencionales, liberación controlada y lenta, usando como cultivo indicador arroz en condiciones de invernadero.

El ensayo experimental se llevó a cabo durante los meses de Abril a mediados de Agosto del 2017 en el Laboratorio e Invernadero de Fertilidad del Suelo “Sven Villagarcía Hermosa” del Departamento Académico de Suelos de la Facultad de Agronomía en la Universidad Nacional Agraria la Molina.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 CULTIVO DEL ARROZ

2.1.1 Taxonomía del Género *Oryza*

INIAP (2007) y Berrío *et al.* (2010) indican que el cultivo de arroz pertenece a las Fanerógama, tipo Espermatófitas, subtipo Angiosperma.

Clase	:	Monocotiledónea
Orden	:	Glumiflorales
Familia	:	Gramineae
Subfamilia	:	Panicoideae
Tribu	:	Oryzeae
Subtribu	:	Oryzineas
Género	:	<i>Oryza</i>
Especie	:	<i>Oryza sativa</i> L.

El género *Oryza* tiene aproximadamente 22 especies, de las cuales 20 son especies silvestres y dos, *O. sativa* y *O. glaberrima*, se cultivan (Vaughan, 1994).

2.1.2 Climatología

La temperatura, la radiación solar y la lluvia influyen en el rendimiento del arroz al afectar directamente los procesos fisiológicos que intervienen en la producción del grano, e indirectamente a través de enfermedades e insectos. Desde el punto de vista de un fisiólogo de cultivos, el período de cultivo, la productividad y la estabilidad son aspectos importantes del cultivo del arroz y los cuales son afectados de manera diferente por los factores climáticos.

a. Temperatura

La temperatura afecta el crecimiento y desarrollo de la planta de arroz, siendo las temperaturas críticas, por lo general inferiores a 20 °C y superiores a 30 °C variando de una etapa de crecimiento a otra (Tabla 1). Estas temperaturas difieren según la variedad, duración de la temperatura crítica, cambios diurnos y estado fisiológico de la planta.

Tabla 1: Respuesta de la planta de arroz a temperaturas variables en diferentes etapas de crecimiento ^a

Etapas de crecimiento	Temperatura crítica ^b (°C)		Temperatura óptimo ^b (°C)
	Bajo	Alto	
Germinación	10	45	20–35
Emergencia y establecimiento de las plántulas	12–13	35	25–30
Enraizamiento	16	35	25–28
Elongación de las hojas	7–12	45	31
Macollamiento	9–16	33	25–31
Iniciación de la panícula (primordio floral)	15	–	–
Diferenciación de la panícula	15–20	38	–
Antesis (floración)	22	35	30–33
Maduración	12–18	30	20–25

^a Adaptado y modificado de Yoshida (1977a). ^b Se refiere a la temperatura media diaria a excepción de la germinación.

FUENTE: Yoshida, 1981

- *Temperaturas bajas*: cuando la planta de arroz es sometida a temperaturas inferiores a 20 °C aproximadamente en la etapa de división de reducción del polen, las células madre generalmente inducen un alto porcentaje de esterilidad de las espiguillas (Satake, citado por Yoshida 1981); pero, esta esterilidad varía según la variedad si es o no tolerante. Sin embargo, si la presencia de temperaturas tan bajas como 12 °C duran sólo 2 días no se induciría la esterilidad; caso contrario, si duran 6 días se llegará a inducir aproximadamente el 100 por ciento de esterilidad. Dicha esterilidad, inducida por bajas temperaturas casi siempre se debe a las bajas

temperaturas nocturnas; pero, las altas temperaturas diurnas parecen disminuir tal efecto. Fageria *et al.* (2006) comentan que el crecimiento de las plantas con niveles bajos de N presentaron una mayor esterilidad de espiguillas en comparación con niveles más altos de N, indicando que una adecuada aplicación del nutriente reduce la esterilidad de las espiguillas. Pero, Yoshida (1981) dice que la fertilización con nitrógeno tiene un bajo efecto sobre la esterilidad causada por las bajas temperaturas durante la etapa de división de reducción; sin embargo, se observó un aumento en el porcentaje de esterilidad con el aumento del suministro de nitrógeno a temperaturas moderadamente bajas (Figura 1).

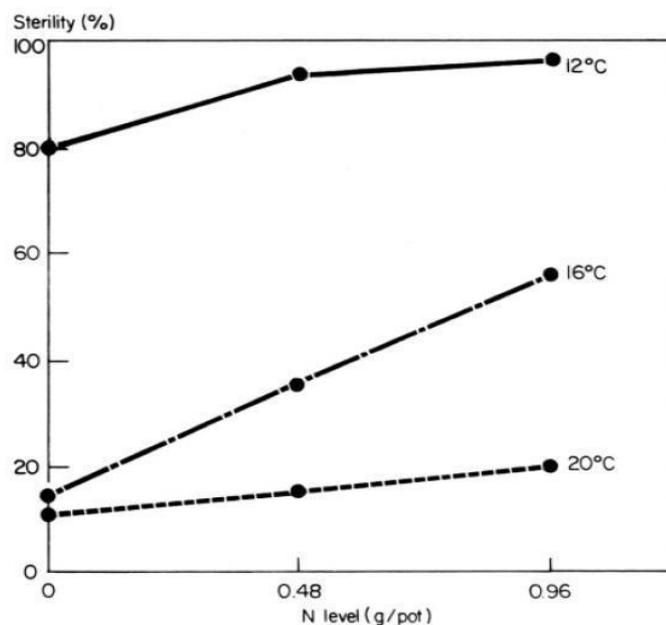


Figura 1: Efecto del nitrógeno sobre el porcentaje de esterilidad atribuible a la baja temperatura en la etapa meiótica (Sasaki *et al.*, 1973). FUENTE: Yoshida, 1981

- *Temperaturas altas:* cuando las temperaturas superan los 35 °C durante la antesis y duran más de una hora se producen altos porcentajes de esterilidad de las espiguillas, variando este porcentaje según la variedad de arroz y su tolerancia (Figura 2). Garrity y O’Toole (1995) evaluaron las respuestas de la temperatura entre diferentes variedades de arroz observándose relaciones negativas entre el rendimiento del grano y la temperatura del follaje en la fecha en fase de floración, donde los cultivares que exhibieron valores de temperatura del mediodía mayores a 34 °C en antesis no tuvieron esencialmente rendimiento y la fertilidad de las

espiguillas disminuyó por debajo del 30 por ciento (Figura 3).

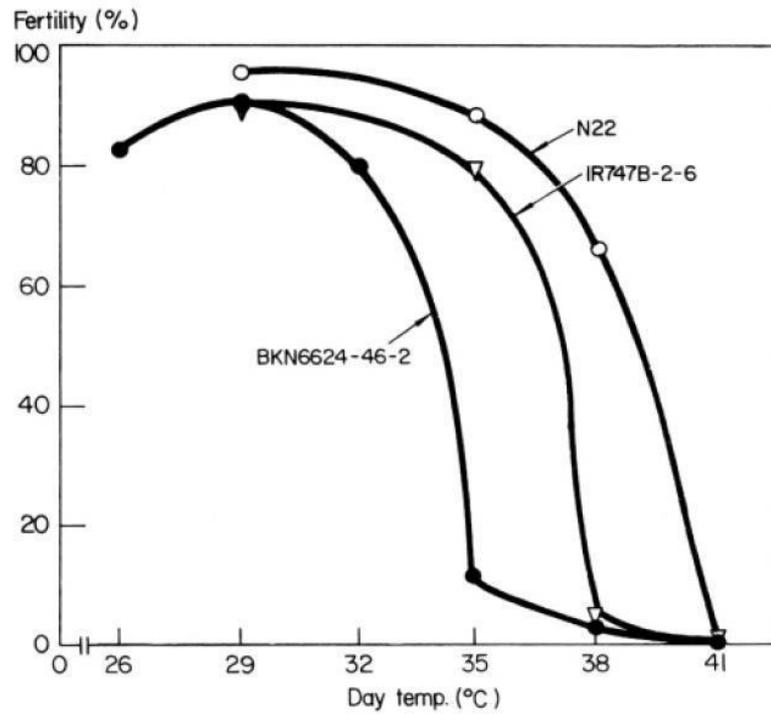


Figura 2: Fertilidad de las espiguillas que florecieron a diferentes temperaturas diurnas (Satake y Yoshida, 1978).

FUENTE: Yoshida, 1981

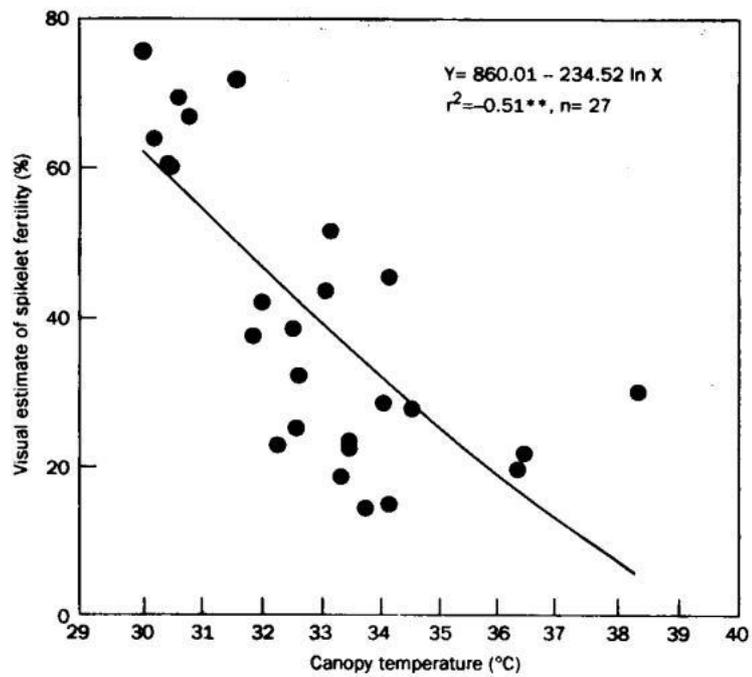


Figura 3: Relación entre la fertilidad de las espiguilla y la temperatura del follaje del arroz en el 50 por ciento de floración.

FUENTE: Garrity y O'Toole, 1995

El peso de grano también es afectado por la temperatura durante la maduración, disminuyendo su peso a temperaturas más altas. En un experimento a temperatura controlada se mostró que las temperaturas medias diarias óptimas para el llenado de grano varían de 19 a 25 °C para IR20 (arroz indica) y de 16 a 22 °C para Fujisaka 5 (arroz japónica). Esto muestra que las variedades Indica se adaptan mejor a altas temperaturas y las variedades Japónica requieren temperaturas bajas para un mejor maduración. Además, la duración de la maduración se correlaciona inversamente con la temperatura media diaria, en donde las condiciones climáticas nubosas persistentes serían más perjudiciales para el llenado de granos a altas temperaturas debido a un período de maduración más corto. En la Tabla 2 se observa como la combinación de altas temperaturas y poca luz puede afectar seriamente la maduración, ya que el peso del grano y el porcentaje de espiguillas llenas se ven afectados por la luz y la temperatura (Yoshida, 1981).

Tabla 2: Efecto de la luz y la temperatura sobre el crecimiento del grano de los arroces IR20 y Fujisaka 5.^a

Luz ^b	Temperatura ^c	Peso grano ^d (W) (mg)	Espiguillas llenas (F) (%)	Grado de maduración ^e (WxF)
<i>IR20</i>				
Bajo	Bajo	15.5	65	1014 (71)
Bajo	Alto	14.8	62	910 (64)
Alto	Bajo	16.3	87	1423 (100)
Alto	Alto	16.0	86	1370 (96)
<i>Fujisaka 5</i>				
Bajo	Bajo	22.0	86	1890 (90)
Bajo	Alto	20.4	84	1718 (82)
Alto	Bajo	23.0	91	2012 (100)
Alto	Alto	21.9	92	2013 (96)

^a Yoshida y Hara (1977). ^b Bajo: 36 cal/cm² por día PAR (radiación fotosintéticamente activa), Alto: 114 cal/cm² por día PAR. ^c Bajo: 23/15 °C, Alto 32/24 °C. ^d El valor LSD al nivel del 5% es 0.2 para ambas variedades. ^e Las cifras entre paréntesis indican valores relativos con 100 como máximo.

FUENTE: Yoshida, 1981

b. Radiación solar

La radiación solar requerida por el cultivo de arroz varía de una etapa de crecimiento a otra (Tabla 3). Existe una relación entre la radiación solar y el rendimiento, observándose una mayor influencia en el rendimiento durante la etapa reproductiva, en menor medida en la maduración y un mínimo efecto en la etapa vegetativa.

Yoshida (1981) y Vargas (2010) dicen que la baja radiación durante la etapa vegetativa solo afecta ligeramente los componentes de rendimiento y el rendimiento; pero, durante la etapa reproductiva existe un efecto pronunciado en el número de espiguillas y durante la maduración el rendimiento de grano se reduce considerablemente debido a una disminución en el porcentaje de espiguillas llenas (Figura 4).

Tabla 3: Efecto del sombreado en diferentes etapas de crecimiento en los componentes de rendimiento y el rendimiento de IR74782-6^a

Luz solar (%)	Producción grano (t/ha)	Índice de cosecha	Espiguillas (Nº/m ²)	Espiguillas llenas (%)	Peso 1000 granos (g)
<i>Etapa vegetativa</i>					
100	7.11	0.49	41.6	89.9	20.0
75	6.94	0.48	40.6	89.9	19.9
50	6.36	0.51	38.3	89.5	19.9
25	6.33	0.51	38.1	84.3	19.8
<i>Etapa reproductiva</i>					
100	7.11	0.49	41.6	88.9	20.0
75	5.71	0.47	30.3	87.8	20.3
50	4.45	0.40	24.4	89.4	19.5
25	3.21	0.36	16.5	89.4	19.1
<i>Etapa de maduración</i>					
100	7.11	0.49	41.6	88.9	20.0
75	6.53	0.49	41.1	81.1	20.0
50	5.16	0.44	40.6	64.5	19.5
25	3.93	0.38	41.7	54.9	19.1

^aYoshida y Parao (1976)

FUENTE: Yoshida, 1981

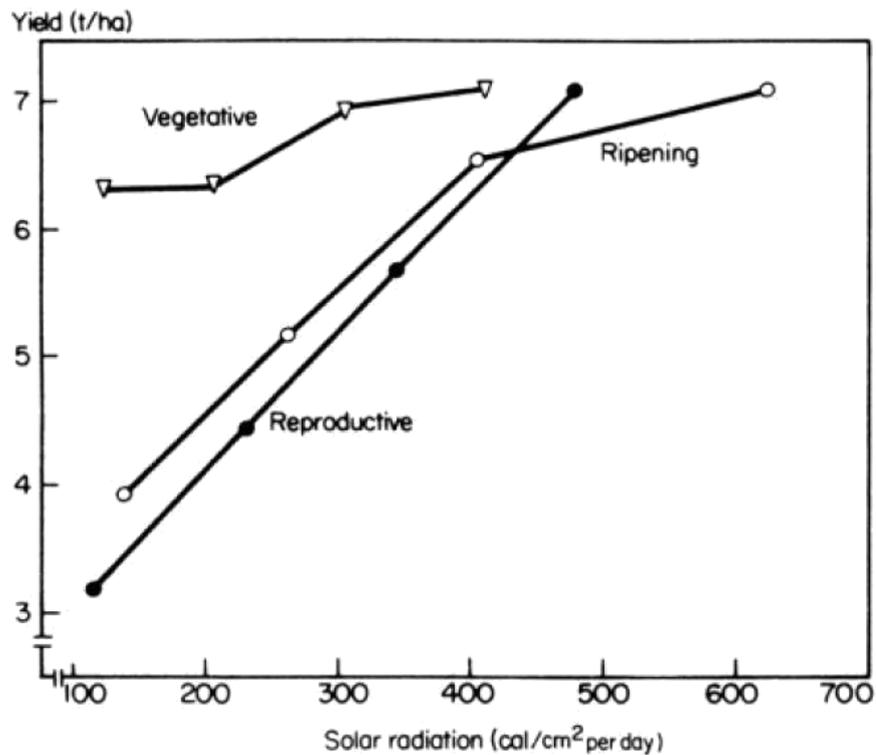


Figura 4: Efecto de la radiación solar en diferentes etapas de crecimiento sobre el rendimiento de grano de IR747B2-6 (Yoshida y Karao, 1976). FUENTE: Yoshida, 1981

2.1.3 Nutrición y Fertilización

Para tener una mayor productividad y rentabilidad en los cultivos se requiere una adecuada nutrición y fertilización, donde se entiende como nutrición a la absorción de los nutrientes necesarios para que la planta pueda desarrollar sus funciones vitales. En muchos suelos el crecimiento de las plantas son afectadas por falta o exceso de algún nutrimento. Hay que tener en cuenta que no siempre que se fertiliza se está nutriendo a la planta, ya que existen factores que influyen como los requerimientos nutricionales de cada cultivar interactuando con el medio ambiente, entendiéndose como ambiente a la influencia que tiene el suelo y el clima sobre la absorción y disponibilidad de los nutrientes) (FEDEARROZ s.f.).

Por lo tanto, una adecuada nutrición en la planta de arroz debe ser realizada a través de un acertado programa de fertilización (momento oportuno y dosis equilibradas) basándose en la fisiología de la planta y las características del suelo donde se establecerá el cultivo (Mejía de Tafur y Menjívar, 2010).

2.1.4 Fertilización Nitrogenada

El nitrógeno es considerado un nutriente esencial, fundamentalmente porque forma parte de la estructura de los aminoácidos (caracterizado por su grupo amino NH_2^-) y por ende de las proteínas, donde aproximadamente el 18 por ciento del peso total de las proteínas lo representa el N; además participa en la estructura de las enzimas (en la parte proteica), en la síntesis de ácidos nucleicos (formación de nucleótidos), de carbohidratos y también de la clorofila. Por lo tanto repercute en forma directa sobre la producción del cultivo de arroz, y a través de su adecuada nutrición favorece:

- El aumento del tamaño de las hojas
- El aumento de número de espiguillas por panícula
- El porcentaje de espiguillas llenas
- El contenido de proteína en el grano
- Promueve el rápido crecimiento (incremento en el tamaño de la planta y número de macollos) (Dobermann y Fairhurst, 2000; Mejía de Tafur y Menjívar, 2010).

Para Yoshida citado por De Battista (2006) existe un claro efecto del nitrógeno sobre el rendimiento siendo el principal el aumento del número de granos por superficie, componente más importante, ya que el peso de mil granos es poco afectado por la fertilización. También, Yoshida citado por Mejía de Tafur y Menjívar (2010), nos reporta que hay una correlación positiva entre el número de granos por unidad de área y el porcentaje de N absorbido por la planta durante la floración.

2.1.5 Manejo de la fertilización nitrogenada

El cultivo de arroz necesita asimilar nitrógeno durante todo su período vegetativo, presentando la mayor necesidad entre el inicio y mediados del macollamiento, y el inicio de la panícula (Dobermann y Fairhurst, 2000); es por ello que la aplicación de este nutriente debe ser adecuado en cantidad y momento.

Altas aplicaciones de nitrógeno en estados tempranos repercuten en un crecimiento vegetativo excesivo impidiendo el ingreso de la luz y el fortalecimiento de la base de las plantas aumentando la tendencia al tumbado, además de una mayor sensibilidad a

enfermedades por la permanencia de tejidos verdes y tiernos; mientras que en estados tardíos se produce la esterilidad de espiguillas y se induce la formación de macollos tardíos e infértiles (Wada *et al.* citado por De Battista, 2006; Heros, 2012). También una absorción tardía del nitrógeno genera un retraso en la maduración, ya que la planta continúa desarrollándose y tarda en madurar (Gros y Dominguez, 1992).

2.1.6 Comportamiento del Nitrógeno en el suelo

El nitrógeno que va a ser usado por las plantas proviene de la materia orgánica del suelo, de la atmósfera, la cual es fijada por los microorganismos y de fertilizantes minerales (Gros y Dominguez, 1992).

Gran parte del nitrógeno presente en el suelo se encuentra en forma orgánica, siendo la forma no aprovechable, ya que la planta de arroz sólo puede absorber el nitrógeno de la solución en forma inorgánica. Para que este nitrógeno orgánico pueda ser usado directamente por la planta tiene que pasar por el proceso de mineralización de la materia orgánica poniendo a disposición de la planta una buena cantidad de nitrógeno en forma aprovechable (Rimache, 2008).

a. Disponibilidad y absorción del nitrógeno

No solo la disponibilidad del nitrógeno del suelo depende del proceso de mineralización, sino también de la inmovilización de este. Se presentan dos situaciones de acuerdo a la presencia y ausencia de oxígeno:

- Suelos de condiciones aeróbicas (suelos secos), al haber presencia de oxígeno hace que la mineralización del nitrógeno orgánico dé como producto final nitratos. En estas condiciones, los nitratos presentan dos desventajas: la primera, el anión es fácilmente lavado y segundo la presencia de bacterias denitrificantes pueden remover el nitrógeno de la zona radical convirtiendo el nitrato a N_2 y N_2O .
- Suelos anaeróbicos (suelos inundados), en estos tipos de suelo el nitrógeno tiene una mayor disponibilidad, pero su manejo se complica. A causa de la inundación se dan varios cambios químicos como el agotamiento de oxígeno, reducción del NO_3^-

y NO_2^- a N_2 y N_2O , reducción de SO_4^{2-} , Mn^{4+} y Fe^{3+} , producción de CO_2 y CH_4 , reducción del potencial redox del suelo, incremento del pH en suelos ácidos y reducción en suelos alcalinos y el incremento de la conductividad eléctrica en la solución del suelo (De Datta, 1981; Dobermann y Fairhurst, 2000).

Días después de haber inundado el suelo el NO_3^- se reduce y se pierde como N_2 y N_2O y el NH_4^+ , como resultado de la mineralización del N, tiende a acumularse considerándose beneficiosa para la planta de arroz por:

- Mejor uso del amonio que el nitrato
- Los productos de la reducción del nitrato son tóxicos
- La presencia de nitratos altera el orden de absorción de nutrientes, sobre todo del manganeso.
- Los excesos de amonio no son tóxicos.

Pocas semanas después de la inundación se producen zonas con diferente estado de oxigenación que afectan la provisión de nitrógeno (Figura 5):

- Una capa de agua de inundación de profundidad variable (1-15 cm.) con una flora viviente (presencia de bacterias y algas que contribuyen a la fijación biológica de N_2);
- Una delgada capa de suelo oxidado (espesor menor a 10 mm), por efecto de la difusión de O_2 disuelto en el agua, que es la interfase entre el agua del riego y la zona reducida subyacente;
- Una zona reducida (espesor variable 10-20 cm.), por la actividad de microorganismos anaeróbicos que usan nitrato, sulfato, hierro y manganeso como receptores finales de electrones por la ausencia de O_2 . Zona en donde se acumula el amonio y se reduce el nitrato que se pierde por desnitrificación;
- Capa de suelo compactado por el uso de implementos de labranza.

De acuerdo a la incorporación de fuentes de N sus transformaciones se dan de diferentes maneras:

- Por el proceso de la mineralización de la materia orgánica del suelo, el amonio

obtenido tiende a acumularse en la zona reducida en las primeras etapas de crecimiento del cultivo cuando la demanda aún es pequeña. Por difusión el amonio pasa a la zona oxidada (capa aeróbica del suelo) donde se nitrifica y transforma a nitrato, este por su gran movilidad es transportado por la solución suelo (difusión) nuevamente hacia la zona reducida para desnitrificarse y perderse como N_2 o N_2O .

- Por incorporación de fertilizantes portadores de amonio en la zona reducida, el fertilizante se hidroliza de forma rápida y el amonio resultante puede ser: adsorbido por la planta de arroz, lixiviado al subsuelo, adsorbido por los coloides, inmovilizado temporalmente por microorganismos o retenido abióticamente en los componentes de la materia orgánica; las pérdidas son pequeñas con excepción en suelos de textura muy gruesa. El amonio puede difundirse a la zona de suelo oxidado donde es absorbido por las raíces, perderse por volatilización o nitrificarse, al pasar a nitrato este puede lixivarse y pasar nuevamente a la zona reducida donde se desnitrifica y se originan pérdidas como N_2 y N_2O .
- Por aplicación de fertilizantes al voleo, este se hidroliza rápidamente resultando amonio el cual es susceptible a pérdidas por la volatilización como amoniaco, también puede quedar inmovilizado temporalmente en la fracción orgánica del suelo o difundirse a la zona oxidada y ser absorbido por las raíces de la planta ya sea como amonio o como nitrato después de nitrificarse. Después de la nitrificación el nitrato no solo puede ser absorbido por la planta, también puede lixivarse a la zona reducida desnitrificándose y perdiéndose como N_2 y N_2O . (Dobermann y Fairhurst, 2000).

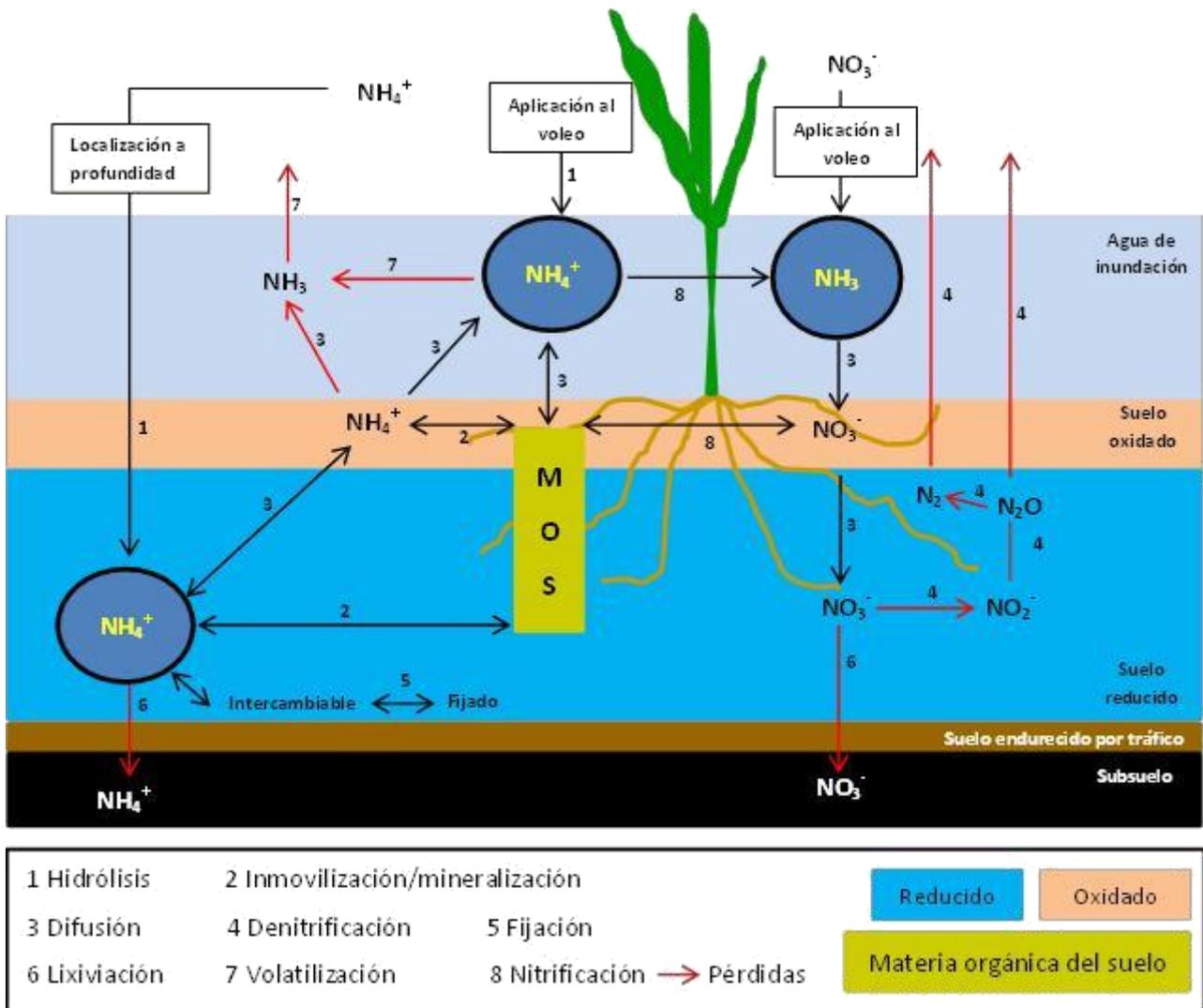


Figura 5: Ciclo y transformaciones de N en suelos cultivados con arroz inundado

FUENTE: Dobermann y Fairhurst, 2000

b. Pérdidas del nitrógeno

La disponibilidad del nitrógeno también se ve afectada cuando existen pérdidas a través de procesos como la lixiviación, denitrificación y volatilización del amonio. Los factores más importantes que controlan dichas pérdidas son: condiciones del suelo (humedad, textura, pH), temperatura y condiciones atmosféricas y prácticas del cultivo (dosis, fuente de nitrógeno, época de aplicación, método y profundidad).

- Lixiviación: la lixiviación es significativa para los nitratos, pero también se da con el amonio (Bertsch, 1995). Este proceso está directamente relacionada con el

movimiento del agua en el suelo, y la cantidad de nitrógeno que se pierde depende de factores como forma y cantidad de nitrógeno añadido, cantidad y duración de lluvias, velocidad de infiltración y percolación, capacidad de retención de agua del suelo, etc. En el caso del amonio, este es menos susceptible, debido a que el ión suele ser retenido fuertemente por el complejo arcillo-húmico en comparación con el nitrato, pero en condiciones de inundación las pérdidas de amonio pueden llegar a ser significativas, debido a su alta acumulación (CIAT, 1982; Gros y Dominguez, 1992).

- La denitrificación: es la reducción biológica del nitrato o nitrito a nitrógeno gaseoso, la cual se da a partir del N inorgánico que se acumula en el suelo por mineralización o solubilización de los fertilizantes aplicados. Es un proceso realizado por varias especies de bacterias anaeróbicas facultativas como *Pseudomonas denitrificans* (heterótrofa) y *Thiobacillus denitrificans* (autótrofa), quienes para realizar el proceso de respiración usan principalmente el oxígeno como receptor del hidrógeno pero cuando el oxígeno no está presente usan nitratos y nitritos como sustitutos (Gros y Dominguez, 1992; Bertsch, 1995).
- La volatilización: la mayor forma de pérdida de nitrógeno es la volatilización del amonio en forma de gas hacia la atmósfera, el cual se logra minimizar por la colocación del fertilizante a cierta profundidad. La volatilización aumenta con el pH del suelo, con valores mayores a 7.0 los iones NH_4^+ se pueden convertir en NH_3 (gas amoníaco) y perderse en la atmósfera. Además altas temperaturas aumentan la hidrólisis de la urea, aumentando la relación $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ y disminuyendo la solubilidad del NH_3 en el agua (Bertsch, 1995).

2.1.7 Dinámica del nitrógeno en la planta

Las formas de N absorbido por la planta son amonio y nitrato, siendo principalmente absorbido en forma amoniacal (Rodríguez, 1982). La mayoría del amonio absorbido se incorpora a los compuestos orgánicos en las raíces y el nitrato, que es móvil en el xilema, se puede almacenar en las vacuolas y diferentes órganos aéreos de la planta. (Dobermann y Fairhurst, 2000; Mejía de Tafur y Menjívar, 2010).

Para mantener un balance iónico (anión-catión) en la planta y una óptima osmorregulación es muy importante la acumulación del nitrato; pero para que este pueda cumplir sus funciones esenciales como nutriente de la planta, debe reducirse a amonio y así poder incorporarse a los esqueletos carbonados en la síntesis de los aminoácidos, cuyo proceso es llamado “asimilación del amonio”, siendo considerado un proceso de gran importancia para la vida de las plantas (Mejía de Tafur y Menjívar, 2010).

La planta para absorber el N es facilitada por una permeasa (proteína transportadora) que permite el ingreso del nutriente a través del plasmalema (membrana plasmática) de las células de las raíces requiriendo energía metabólica, dicha energía disminuye con bajas temperaturas, ausencia de oxígeno y con la presencia de inhibidores de la respiración.

Para absorber el ión nitrato la planta presenta dos formas: la primera, dada por permeasas, se satura con una concentración externa menor a 1mM y la otra con una concentración externa mayor a 1mM sin saturación, por lo tanto se puede decir que la absorción del nitrato está determinada por el pH externo. El posible mecanismo usado para ingresar el nitrato al interior de la célula es el de simporte.

Una vez ingresado el nitrato se reduce a amonio, la cual está dada por dos enzimas la nitrato reductasa (NR) y la nitrito reductasa (NiR), ésta capacidad para reducir el nitrato ya sea en las raíces o en las ramas está determinada por factores como cantidad de nitrato suministrado, genotipo y edad de la planta. Cuando la disponibilidad del nitrato disminuye en el suelo la gran mayoría se reduce en las raíces y cuando ésta aumenta el nitrato es llevado a la parte aérea. La cantidad de nitrato reducido en las raíces de plantas superiores está entre el 5 y 95% de lo que llegan a tomar. Este proceso de reducir y asimilar el nitrato requiere de mucha energía necesitando de 15 moles de ATP para reducir un mol de nitrato en comparación los 5 moles de ATP que se necesitan para asimilar el amonio.

La absorción del amonio se da a través de la membrana celular en donde se libera al rededor de un protón por molécula de amonio. La asimilación del amonio, en su mayoría, se realiza en las raíces debido a su capacidad limitada para disponer de protones, luego el N es transportado a la parte aérea de la planta vía xilema en forma de aminoácidos y aminas. En la asimilación intervienen las enzimas la glutamato deshidrogenasa, glutamina sintetasa y glutamato sintetasa (Mejía de Tafur y Menjívar, 2010).

2.2 CULTIVAR IR-43

Cultivar desarrollado por el Instituto Internacional de Investigación del Arroz (IRRI) y liberada en Filipinas en 1978. Fue introducida en el Perú en 1995 por la Compañía Arrocería del sur. Es un cultivar semi-precoz, de alta capacidad de macollaje, alta respuesta al nitrógeno, de grano largo, delgado y translúcido; su calidad molinera se considera inestable ya que es susceptible al retraso de cosecha pero su calidad culinaria es buena, ya que granea, rinde y es suave al enfriarse (Bruzzone, 2012).

Según Khush y Virk (2005), la variedad IR-43, presenta las siguientes características:

a. Datos agronómicos:

Días a la maduración	:	123
Altura de planta	:	97 cm.
Rendimiento grano (estación seca)	:	5348 kg.ha ⁻¹
Rendimiento grano (estación húmeda)	:	3220 kg.ha ⁻¹
Germinación de semillas en cosecha	:	54 %
Germinación semillas después de 6 sem :	:	97 %

b. Calidad de grano:

Amilosa	:	18 %
T ° de gelatinización	:	bajo
Consistencia gel	:	suave
Longitud de grano	:	largo
Forma de grano	:	esbelto
Peso 1000 granos	:	28.4 g
Cáscara	:	20.6 %
Arroz blanqueado total	:	72 %

Con respecto a las condiciones en el Perú, SEMILLAS EL POTRERO (s.f.) menciona en su catálogo las características del cultivar IR-43:

a. Características:

Nombre Comercial	:	NIR-1
Nombre Variedad	:	IR-43
País de origen	:	Filipinas
Sistema de cultivo	:	Siembra Directa – Trasplante
Período vegetativo	:	140 días
Altura de planta	:	80 – 90 cm
Número de Macollos	:	32 a 42 por golpe
Espiguillas (Aristamiento):	:	Corta en algunos granos
Resistencia al tumbado	:	Resistente
Resistencia desgrane	:	Moderado
Rendimiento potencial	:	12 - 14 TM ha ⁻¹
Peso de 1000 granos	:	28 gramos
Largo de panícula	:	24.3 cm
Grano cáscara	:	Largo 10.28 mm - Ancho 2.36 mm

b. Calidad molinera:

Rendimiento Molinería	:	73 %
Grano entero	:	60 %
Grano quebrado	:	13 %
Traslucencia	:	Transparente

2.3 FERTILIZANTES DE LIBERACIÓN CONTROLADA Y LIBERACIÓN LENTA

2.3.1 Definición y características

Los fertilizantes de liberación lenta (SRF por sus siglas en inglés) y liberación controlada (CRF por sus siglas en inglés) son aquellos fertilizantes que no liberan el total de los nutrientes al momento de la aplicación retrasando su disponibilidad de absorción significativamente por más tiempo que un fertilizante convencional como urea o nitrato de amonio; el objetivo de estos fertilizantes es que la entrega de sus nutrientes coincidan con la demanda de la planta.

En la figura 6, se muestran los requerimientos nutricionales de un cultivo típico y la forma en que un fertilizante convencional y de liberación controlada responde a dichos requerimientos, en donde la curva B representa los requerimientos del cultivo a lo largo del tiempo, la curva A muestra el comportamiento de un fertilizante convencional presentando exceso al momento de su aplicación y un déficit a lo largo del desarrollo del cultivo, la curva C que es la segunda aplicación del FC no llega a cubrir los requerimientos del cultivo y la curva D muestra el comportamiento del CRF el cual manifiesta la disponibilidad de los nutrientes acorde con el requerimiento del cultivo.

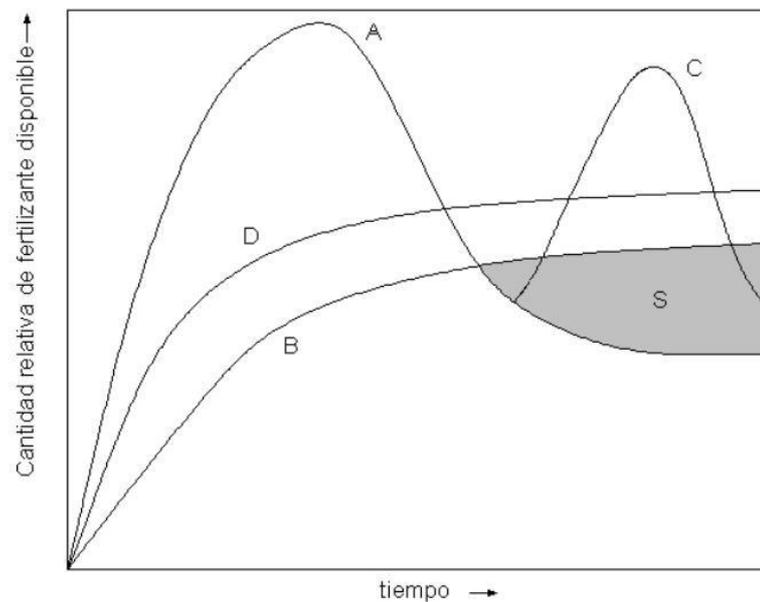


Figura 6: Liberación de distintos fertilizantes y requerimientos de un cultivo.

(A) Fertilizante convencional (FC); (B) Requerimientos del cultivo; (C) Segunda aplicación de FC; (D) CRF; S: Déficit de nutriente

FUENTE: Melaj y Daraio, 2012

La variabilidad de entrega de sus nutrientes se da por diversos mecanismos como el producto (solubilidad del material en agua mediante recubrimientos semipermeables, oclusión, materiales proteicos u otras formas químicas, mediante hidrólisis lenta de compuestos de bajo peso molecular solubles en agua) y los niveles de humedad, temperatura y/o actividad microbiológica del suelo (FAO, 2002; Rose *et al.*, 2004; Trenkel, 2010).

Estos fertilizantes tienen las siguientes características:

- Pueden aplicarse una sola vez para todo el ciclo de cultivo, proveyendo la cantidad necesaria de nutrientes para un óptimo crecimiento.
- Tienen la máxima recuperación porcentual del nutriente aplicado, lo que maximiza la rentabilidad por su uso.
- Tiene un mínimo impacto de daño ambiental, ya sea sobre el suelo, el agua y la atmósfera (Trenkel, 1997).

2.3.2 Liberación de nutrientes de los fertilizantes de liberación controlada y lenta

Para conseguir la sincronización entre el suministro y la absorción de nutrientes es necesario predecir la tasa de liberación y en la práctica los fertilizantes de liberación controlada y lenta lo permiten. El patrón de liberación temporal de los fertilizantes recubiertos oscila entre la liberación parabólica (con o sin "explosión"), la liberación lineal y la liberación sigmoideal. Los patrones de liberación lineal y sigmoideal se sincronizan mejor con la absorción de nutrientes por las plantas que la liberación parabólica (Shaviv citado por Trenkel, 2010)

Shoji y Gandeza citados por Trenkel (2010) clasifican los fertilizantes de liberación controlada y lenta por su tipo de liberación de nutrientes: lineal y sigmoideal. La liberación lineal se da desde el inicio de su aplicación y a medida que pasan los días va liberando de a pocos el nutriente, en la liberación sigmoideal el nutriente comienza a liberarse después de un cierto tiempo de retraso, es decir, un determinado número de días después de haberse aplicado. Ambos patrones de liberación están vinculados a la temperatura del suelo, dependiendo de la formulación en cierta cantidad de días (Figura 7).

En base al cambio de espesor de la capa de recubrimiento se producen gránulos con diferentes longevidades; tal como se observa en la Figura 8, donde la longevidad típica de la tecnología de liberación E-Max (ICL) está dada para un escenario con temperaturas del suelo de 21°C. Estas longevidades cambian con diferentes temperaturas, volviéndose más cortas a temperaturas más altas y más largas a temperaturas más bajas (Figura 9).

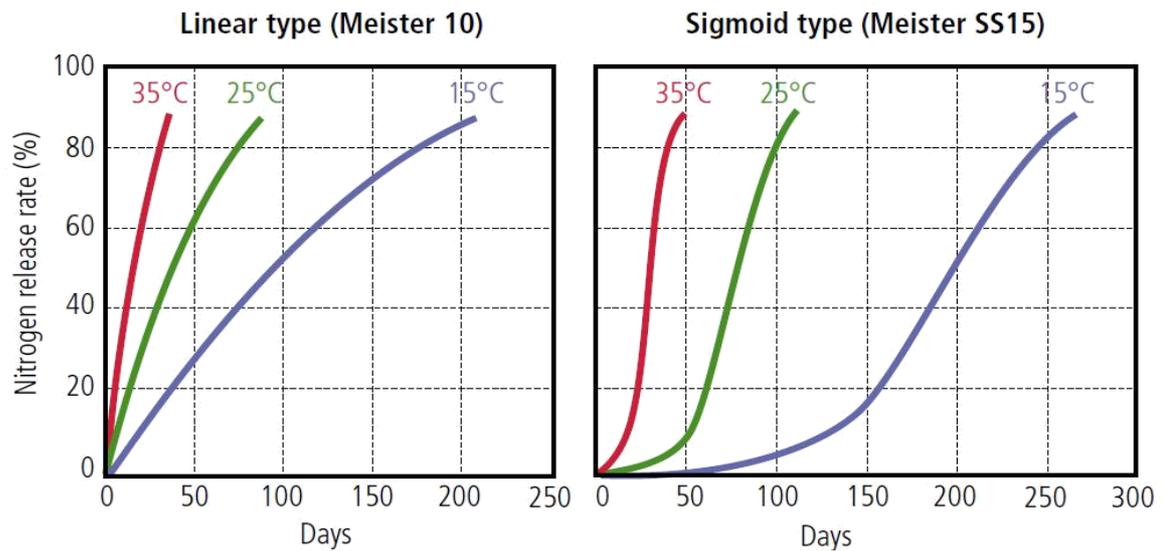


Figura 7: Efecto de la temperatura sobre la tasa de liberación de Meister®

FUENTE: Trenkel, 2010

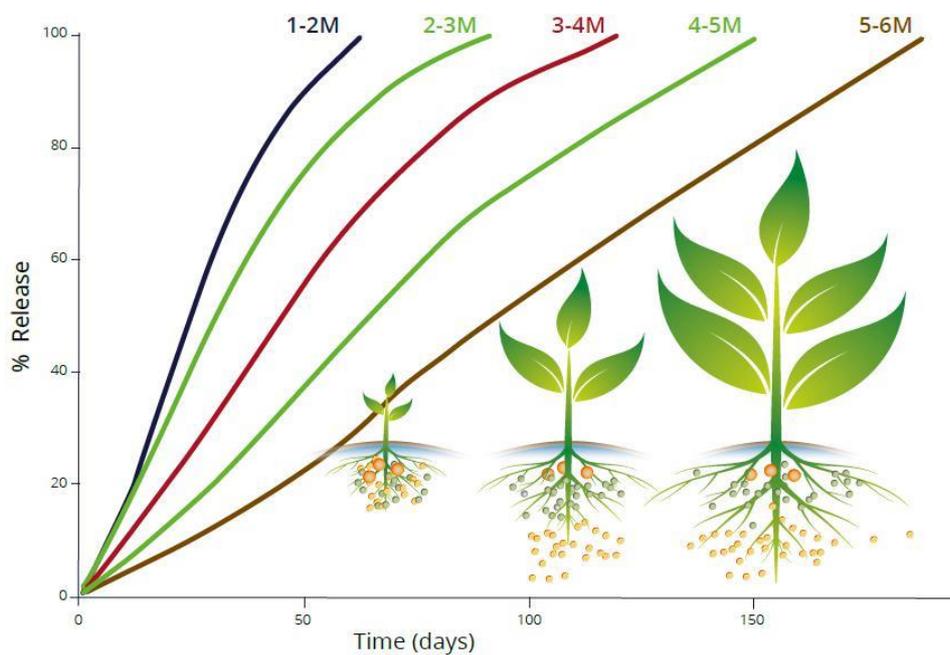


Figura 8: Valores de la prueba de lixiviación de agua a 21° C (Tecnología de liberación E-Max - ICL)

FUENTE: https://icl-sf.com/uploads/Global/brochures/E-max_ReleaseTechnology_factbook.pdf

TYPICAL LONGEVITY	SOIL TEMPERATURE		
	16°C	21°C	26°C
1-2	2-3M	1-2M	0.5-1.5M
2-3	3.5-4.5M	2-3M	1-2M
3-4	5-6M	3-4M	2-3M
5-6	8-9M	5-6M	3-4M

Figura 9: Efecto de la temperatura sobre la tasa de liberación de la tecnología E-Max

FUENTE: https://icl-sf.com/uploads/Global/brochures/E-max_ReleaseTechnology_factbook.pdf

Bajo la influencia de la temperatura del suelo, la humedad penetra el encapsulado semipermeable y disuelve el núcleo de nutriente. La absorción de la humedad y la disolución del nutriente producen un incremento de la presión osmótica dentro del granulo, éste incremento de la presión produce la liberación del nutriente a través de los poros microscópicos del encapsulado. Una vez finalizada la liberación de los nutrientes la cubierta comenzará a degradarse gradualmente (Figura 10).

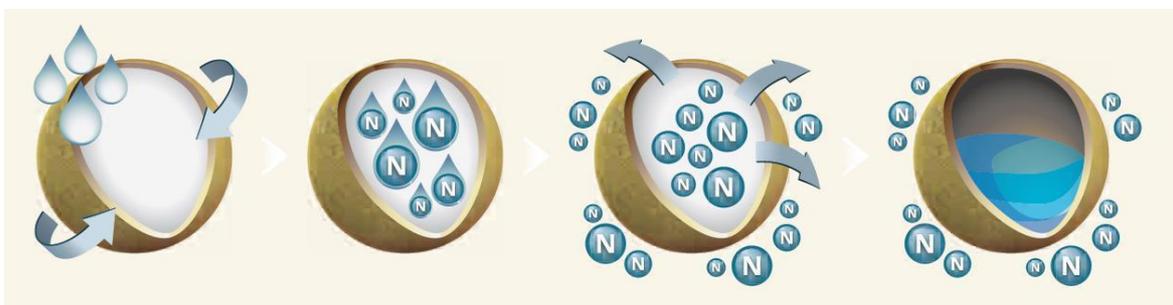


Figura 10: liberación de nutrientes de un fertilizante de liberación controlada recubierto / encapsulado (Tecnología de liberación E-Max – ICL)

FUENTE: https://icl-sf.com/uploads/Global/brochures/E-max_ReleaseTechnology_factbook.pdf

2.3.3 Diferencias entre Fertilizantes de liberación controlada y lenta

Para la FAO (2002) no existen diferencias oficiales entre los fertilizantes de liberación lenta y fertilizantes de liberación controlada, la disponibilidad del nutriente para ambos casos se ve afectada por la temperatura y humedad del suelo; sin embargo, los productos nitrogenados microbiológicamente descompuestos son referidos a fertilizantes de liberación lenta y los productos encapsulados o recubiertos a fertilizantes de liberación controlada. Pero Shaviv, citado por Trenkel (2010) dice que el término de fertilizante de liberación controlada (CRF por sus siglas en inglés) se refiere a aquellos fertilizantes en que los factores como la velocidad, el patrón y la duración de la liberación son conocidos y controlables; por el contrario para el término fertilizante de liberación lenta (SRF por sus siglas en inglés) se refiere a aquellos en que la liberación de los nutrientes ocurre de manera más lenta que con fertilizantes convencionales o de disponibilidad inmediata y la velocidad, patrón y duración de la liberación no son bien controlados.

Urbano (1999) y Kloth, citado por Trenkel (2010) mencionan que el Comité Europeo de Normalización propuso que se considere como fertilizantes de liberación lenta a aquellos que bajo ciertas condiciones, incluida la temperatura de 25°C, cumplan con lo siguiente:

- No se libere más del 15 por ciento en 24 horas,
- No se libere más del 75 por ciento en 28 días y
- Al menos, el 75 por ciento sea liberado durante el tiempo establecido.

Fontanilla y Lledó citado por Ramón (2014) nos dicen que los fertilizantes de liberación controlada basan su tecnología en una cubierta polimérica siendo el proceso de liberación de los nutrientes controlado sólo por la temperatura del suelo.

2.3.4 Tipos de fertilizantes de liberación controlada y lenta

Shaviv, citado por Trenkel (2010) propuso la siguiente clasificación para los fertilizantes de liberación lenta y liberación controlada:

a. Fertilizantes con N orgánico (de baja solubilidad)

Producto de estructura molecular compleja formado por un componente nitrogenado soluble en agua y alhéidos a través de reacciones químicas, con un nivel de solubilidad baja. En la solución suelo el producto es liberado y convertido de forma lenta en soluciones químicas disponibles para la planta. Dentro de este grupo tenemos a las Urea-Form, la cual libera sus nutrientes principalmente por la actividad microbiológica del suelo; y las Isobutilidendiurea (IBDU) a diferencia de las Urea-Form, libera sus nutrientes a través de la hidrólisis (Rose *et al.* 2004). Debido a que la liberación de nutrientes de este tipo de fertilizantes depende totalmente del suelo y de las condiciones climáticas y no puede predecirse se les denomina fertilizantes de liberación lenta (Trenkel, 2010).

b. Fertilizantes Recubiertos

Fertilizantes en los que una barrera física controla la penetración del agua y liberación de sus nutrientes. Consisten en un concentrado que aparte del N contiene otros nutrientes solubles, los cuales se encuentran recubiertos por una capa insoluble al agua. Para recubrir estos fertilizantes se han hecho uso de distintos materiales como ceras, aceites, azufre, plásticos y resinas; siendo la más común las cubiertas a base de polímeros (Benson, citado por Rose *et al.* 2004; Trenkel, 2010).

c. Fertilizantes inorgánicos de baja solubilidad

Estas sustancias nitrogenadas inorgánicas de baja solubilidad son mucho más limitadas, ya que casi todas las sales nítricas y amónicas usadas como fertilizantes son muy solubles en agua, en este grupo se tienen a los fosfatos de amonio y un metal (fosfato amónico magnésico y el fosfato amónico ferroso) los cuales son liberados al medio de forma lenta; contienen un bajo porcentaje de nitrógeno menos del 8 por ciento.

2.3.5 Fertilizantes recubiertos

Son fertilizantes que presentan un recubrimiento protector insoluble en agua, la cual encapsula al fertilizante soluble convencional controlando su liberación; ésta cubierta protectora puede aparecer como núcleos o gránulos revestidos de polímeros hidrófobos o como matrices en la que se dispersa el material activo soluble y se restringe la disolución de los fertilizantes.

Trenkel (2010) clasifica los fertilizantes recubiertos en tres grupos principales, según su material de revestimiento:

a. Fertilizantes con recubrimientos inorgánicos (azufre o minerales)

La urea revestida con S (SCU, por sus siglas en inglés) es el fertilizante recubierto de liberación lenta más importante; se desarrolló en los laboratorios "Tennessee Valley Authority" y su fabricación comercialmente se inició hace más de 30 años (Shaviv, 2001). La liberación de los nutrientes es controlada por el grosor y calidad del recubrimiento dándose la disolución de la urea por la penetración del agua en fallas, poros e imperfecciones de la cubierta (Rose *et al.*, 2004). En este fertilizante se dan tres tipos de recubrimientos: revestimiento dañado con grietas, revestimiento dañado con grietas selladas con cera y revestimiento perfecto, de los cuales aproximadamente un tercio presentan recubrimiento perfecto (efecto bloqueo) y más de un tercio recubrimiento dañado (efecto explosión), definiéndose un porcentaje de 40 a 60 % a una velocidad de liberación de nitrógeno en la solución suelo de siete días (Trenkel, 2010).

b. Revestimiento con polímero para fertilizantes recubiertos con azufre

Este tipo de fertilizante es una modificación de la urea revestida con S debido a un relativo bajo desempeño, recubriendo el fertilizante con una fina capa adicional de un polímero orgánico pudiendo ser termoplástico o resina. La SCU recubierto con el polímero orgánico se le denominó urea recubierta con sulfuro de polímero (PSCU, siglas en inglés). La capa adicional de polímero tiene como objetivo mejorar la resistencia al desgaste de los gránulos revestidos (Shaviv, 2001), lo cual ha mostrado una mejor liberación del nitrógeno que SCU, aunque todavía muestra los efectos de explosión (liberación inmediata de urea después del contacto con agua) y bloqueo (liberación mucho después de que la planta lo requiera).

c. Fertilizantes recubiertos con polímeros orgánicos

En busca de un patrón de liberación de nitrógeno más controlado para mercados hortícolas y jardín, se desarrollaron fertilizantes con recubrimientos modificados (Shaviv, 2001; Trenkel, 2010), dichos recubrimientos con polímeros pueden ser semipermeables o impermeables presentando pequeños poros. Este tipo de fertilizantes es denominado fertilizantes de liberación controlada, ya que la liberación de sus

nutrientes no es afectada significativamente por las propiedades del suelo (pH, salinidad, textura, actividad microbiana, potencial redox, fuerza iónica de la solución suelo) sino por la temperatura y permeabilidad a la humedad del recubrimiento del polímero, por lo tanto es posible predecir o controlar el patrón de liberación, la cantidad y el tiempo con ciertos límites. La velocidad de liberación de nutrientes puede controlarse hasta cierto punto, de acuerdo al tipo y espesor de revestimiento, así como la proporción de diferentes materiales para el revestimiento y la permeabilidad a la humedad (Trenkel, 2010).

Los fertilizantes recubiertos con polímeros orgánicos a su vez se dividen en:

- Fertilizantes recubiertos con resina: son aquellos que por lo general su recubrimiento se prepara por polimerización in situ obteniendo la formación de un polímero hidrofóbico reticulado, también se clasifican como termoestable que significa que se degradan al calentarse. Las principales familias de resinas de uso práctico son las resinas de tipo alquídicas (Osmocote) y el revestimiento con poliuretano (Polyon, Multicote) (Shaviv, 2001).
- Fertilizantes recubiertos con polímeros termoplásticos: son aquellos en que la cubierta es una resina termoplástica muy impermeable como el polietileno, el cual se mezcla con un polímero de alta permeabilidad como el etileno-vinil acetato para controlar la liberación de los nutrientes (Nutricote) (Rose *et al.*, 2004).

2.4 INHIBIDORES DE UREASA

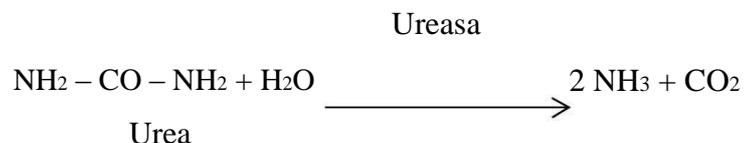
Se le denomina fertilizante estabilizado ya que se le ha incorporado un estabilizador de N, dicho estabilizador es una sustancia que inhibe la acción hidrolítica de la urea por la enzima ureasa.

2.4.1 Modo de acción

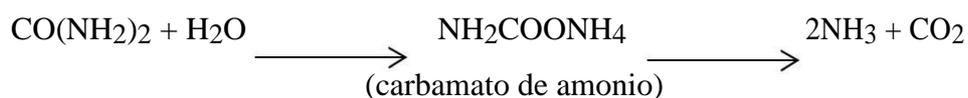
Poco después de haber aplicado la urea, la mayor parte es disuelta en el agua del suelo y posteriormente se hidroliza. La amida-N de la urea, una vez aplicada, se transforma relativamente rápida (pocos días) a través de la ureasa en amoníaco y CO₂; pero existe un

primer paso donde la urea se transforma en carbamato de amonio inestable y luego pasa a amoníaco.

Se muestra las siguientes ecuaciones:



Ecuación completa:



A medida que se incrementa la temperatura la enzima ureasa aumenta su actividad, ya que a una temperatura de 5 °C la hidrólisis se completa en un periodo de diez días y a una temperatura de 30°C esta se completa en dos días (Vilsmeier y Amberger, citados por Trenkel 2010).

Los inhibidores de ureasa, por un período de tiempo, detienen la transformación de la amida-N en amoníaco a través de la acción hidrolítica de la enzima ureasa disminuyendo la velocidad en la que se hidroliza la urea en el suelo (Figura 11), reduciendo las pérdidas de amoníaco por volatilización en el aire, así como pérdidas por lixiviación de nitrato; por lo tanto se incrementa de esta manera la eficacia de la urea y de los fertilizantes nitrogenados que contienen urea.

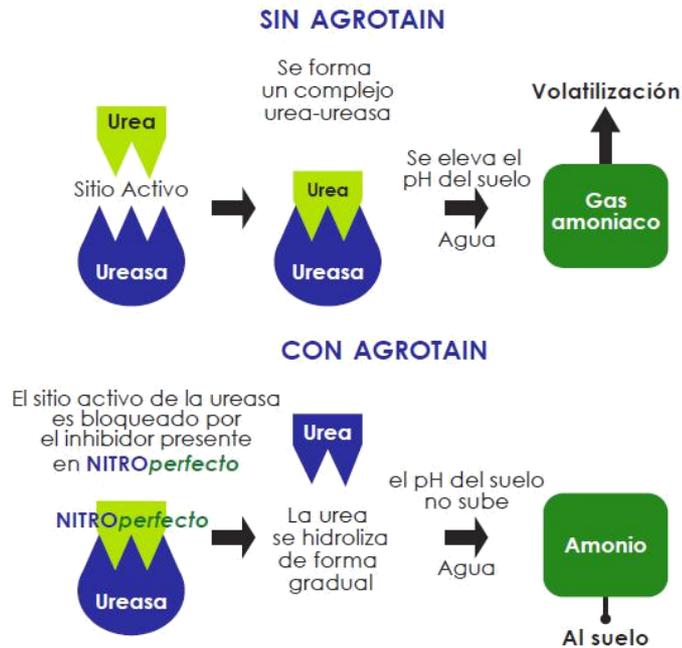


Figura 11: Modo de acción del inhibidor de ureasa (Agrotain)

FUENTE: http://www.diasagto.mx/detalles_productos.php?idproductos=127

2.4.2 Características de los inhibidores de ureasa

Para ser considerado un producto como inhibidores de la ureasa del suelo se tiene que cumplir los requisitos de no ser tóxicos, eficaces a baja concentración, estables y compatibles con urea (sólidos y soluciones), degradables en el suelo y baratos. La clasificación se puede dar de acuerdo a sus estructuras y su supuesta interacción con la enzima ureasa, proponiéndose cuatro clases principales de inhibidores de ureasa:

- Reactivos que interactúan con los grupos sulfhidrilos (reactivos sulfhidrilos),
- Hidroxamatos,
- Productos químicos para la protección de cultivos agrícolas, y
- Análogos estructurales de urea y compuestos relacionados.

La triamida N- (n-butil) tiofosfórica (NBPT), el fenilfosforodiamidato (PPD / PPDA) y la hidroquinona son probablemente los inhibidores de ureasa más estudiados. Los compuestos orgánicos de fósforo son análogos estructurales de urea y son algunos de los inhibidores más efectivos de la actividad ureasa, bloqueando el sitio activo de la enzima (Trenkel, 2010).

2.5 EFICIENCIA EN EL USO DE NITRÓGENO

A nivel mundial la deficiencia de nutrientes está presente en muchos suelos agrícolas, siendo la fertilización edáfica la principal forma para disminuirla. El desafío actual en el campo de la fertilización está orientado a ser más eficiente en el uso de nutrientes (reducir costos del insumo) y minimizar el impacto ambiental (evitar pérdidas de nutrientes en los ecosistemas).

Se estima que la eficiencia general de los fertilizantes en el caso del N es menos del 50%, para el P menos del 10%, en el K aproximadamente un 40% y del 5 al 10 % para los micronutrientes (Baligar *et al.*, 2001; Castro-Luna, 2006). Éstas bajas eficiencias se deben a grandes pérdidas de los nutrientes por lixiviación, escorrentía, emisión de gases y fijación por el suelo; los cuales llegan a contribuir a la degradación del suelo, contaminación del agua y del aire (Baligar *et al.*, 2001; Fageria *et al.*, 2010).

Para el cultivo de arroz, el nitrógeno como nutriente esencial, es uno de los que más limita su rendimiento, siendo su eficiencia de recuperación tan sólo del 25 al 40% del N aplicado (Dobermann y Fairhurst, 2000).

La eficiencia del N aplicado y la cantidad de N absorbido por la planta de arroz puede evaluarse a través del uso de indicadores (Dobermann y Fairhurst, 2000; Baligar *et al.*, 2001):

a. Factor de productividad parcial (FPP): la eficiencia productiva parcial es la cantidad de grano producido por unidad de cantidad de nitrógeno absorbido en una etapa de crecimiento particular.

$$= \frac{1 + \Delta}{2}$$

Donde:

RG₁: rendimiento de grano sin aplicación de N (kg.ha⁻¹)

ΔRG: incremento en rendimiento logrado con la aplicación de N (kg.ha⁻¹)

FN: cantidad de N aplicado (kg.ha⁻¹)

b. Eficiencia agronómica (EA): es la cantidad de rendimiento adicional que se puede producir por unidad de nitrógeno aplicado. También representa el producto de la eficiencia de recuperación y la eficiencia fisiológica.

$$= \frac{2-1}{1}$$

Donde:

RG₁: rendimiento de grano sin aplicación de N (kg.ha⁻¹)

RG₂: rendimiento de grano en un tratamiento con aplicación de N (kg.ha⁻¹)

FN: cantidad de N aplicado (kg.ha⁻¹)

c. Eficiencia de recuperación aparente (RA): se utiliza para reflejar la capacidad de la planta de adquirir nutrientes aplicados del suelo y se define como la cantidad de nutriente aportado por el fertilizante que es absorbida por un cultivo, dividido por la cantidad de nutriente aplicado. La RA depende mucho de la sincronización entre la demanda de N del cultivo y cantidad de N liberado de la fuente portadora de N aplicada.

$$= \frac{(2-1) \cdot 100}{1}$$

Donde:

UN₁: absorción total de N sin adición de N (kg.ha⁻¹)

UN₂: absorción total de N con adición de N (kg.ha⁻¹)

FN: cantidad de N aplicado (kg.ha⁻¹)

d. Eficiencia fisiológica (EF): determina la cantidad de rendimiento adicional que se puede producir por kg de N absorbido. Representa la habilidad de la planta para transformar una cantidad de nutriente en rendimiento económico (grano).

$$= \frac{(2-1)}{1}$$

Donde:

RG₁: rendimiento de grano sin aplicación de N (kg.ha⁻¹)

RG₂: rendimiento de grano en un tratamiento con aplicación de N (kg.ha⁻¹)

UN₁: absorción total de N sin adición de N (kg.ha⁻¹)

UN₂: absorción total de N con adición de N (kg.ha⁻¹)

- e. Eficiencia Interna (EI):* determina la cantidad de rendimiento que se produce por kg de N que es absorbido, el cual proviene del N aplicado con los fertilizantes y del N nativo del suelo.

—

Donde:

RG: rendimiento de grano (kg.ha⁻¹)

UN: N total absorbido (kg.ha⁻¹)

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 MATERIALES

3.1.1 Ubicación del ensayo experimental

El ensayo experimental se llevó a cabo durante el período de abril a setiembre del 2017, en el Laboratorio e Invernadero de Fertilidad del Suelo “Sven Villagarcía Hermosa” del Departamento Académico de Suelos de la Facultad de Agronomía en la Universidad Nacional Agraria La Molina, siendo su ubicación geográfica la siguiente:

Latitud : 12° 05' 06" S

Longitud : 76° 07' 07" O

Altitud : 251 msnm

.

3.1.2 Características del suelo

El Suelo que se usó para el desarrollo del experimento proviene de una zona arroceras de la provincia de Sullana, departamento de Piura. En la Tabla 4 se indica que es un suelo de textura arcillosa, con 44 % arcilla y un porcentaje medio de materia orgánica. Además, su conductividad para cuestiones de interpretación según tabla es de 6.5 dS/m, clasificándose como ligeramente salino. Presenta un pH neutro, a este valor la mayoría de los nutrientes se encuentran disponibles para la absorción de la planta. El contenido de fósforo disponible es bajo, mientras que el potasio disponible es alto; con respecto a las relaciones catiónicas el calcio fue menor frente al magnesio y el potasio se mostró deficiente frente al calcio y magnesio.

Tabla 4: Análisis de caracterización del suelo

Variables	Unidad	Valor
C.E. (1:1)	dS.m ⁻¹	3.25
Análisis mecánico		
Arena		22
Limo	%	34
Arcilla		44
Textura		Arcilloso
pH (1:1)		6.88
CaCO₃	%	0.00
M.O.	%	2.33
P	mg.kg ⁻¹	4.8
K	mg.kg ⁻¹	317
CIC		21.30
Cationes Cambiables		
Ca²⁺		15.33
Mg²⁺	cmol (+).kg suelo ⁻¹	4.33
K⁺		0.33
Na⁺		1.30
Al⁺³ + H⁺		0.00
Suma de cationes		21.30
Suma de bases	cmol (+).kg suelo ⁻¹	21.30

FUENTE: Laboratorio de análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes – UNALM

Tabla 5: Análisis de salinidad del suelo

Variables	Unidad	Valor
Sat. de bases	%	100
Saturación	%	36
pH (ES)		6.61
C.E. (ES)	dS.m ⁻¹	5.07
Cationes Solubles		
Ca²⁺		20.90
Mg²⁺	meq.l ⁻¹	8.67
K⁺		0.49
Na⁺		23.70

	SUMA	53.76
Aniones Solubles	NO₃⁻	0.01
	CO₃²⁻	0.00
	HCO₃⁻	6.76
	SO₄²⁻	meq.l ⁻¹ 32.50
	Cl⁻	14.00
	SUMA	53.27
Boro Soluble	mg.l ⁻¹	0.29
Yeso Soluble	%	0.00
PSI		6.12
B	mg.l ⁻¹	1.66
Cu	mg.l ⁻¹	10.70
Fe	mg.l ⁻¹	22.40
Mn	mg.l ⁻¹	29.70
Zn	mg.l ⁻¹	3.30
Nitrato	mg.l ⁻¹	6.78
Amonio	mg.l ⁻¹	75.60
S	mg.l ⁻¹	69.76

FUENTE: Laboratorio de análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes – UNALM

3.1.3 Características del agua de riego

De acuerdo al Diagrama de Riverside, el agua de riego que se usó durante el ensayo se clasifica como una C3-S1. Indica que es un agua de alta conductividad eléctrica (0.86 dS.m⁻¹); pero, tolerable para el cultivo como el arroz. Además, presenta un bajo peligro de sodio (RAS de 0.53), lo que nos indica su uso para todo tipo de suelo y sin peligro de destruir su estructura. Según FAO, presenta un ligero a moderado peligro de salinización; sin embargo, no hay riesgo de disminuir la infiltración. Asimismo, no presenta peligro de toxicidad por sodio, cloruros y boro y existe un ligero a moderado peligro de usar el agua por el contenido de nitratos y bicarbonatos. El agua presenta una dureza de 38.09 grados franceses, siendo considerada un agua dura, esto nos indica que existen altas cantidades de cationes metálicos multivalentes, principalmente Ca y Mg que pudieran reaccionar con los bicarbonatos precipitándose.

Tabla 6: Análisis de agua de riego

Variables	Unidad	Valor
pH		7.07
C.E	dS.m ⁻¹	0.86
Calcio	meq.l ⁻¹	6.50
Magnesio	meq.l ⁻¹	1.13
Potasio	meq.l ⁻¹	0.11
Sodio	meq.l ⁻¹	1.04
SUMA DE CATIONES		8.78
Nitratos	meq.l ⁻¹	0.14
Carbonatos	meq.l ⁻¹	0.00
Bicarbonatos	meq.l ⁻¹	3.36
Sulfatos	meq.l ⁻¹	3.04
Cloruros	meq.l ⁻¹	2.10
SUMA DE ANIONES		8.64
Sodio	%	11.38
RAS		0.53
Boro	mg.l ⁻¹	0.40
Clasificación		C3-S1
Amonio	mg.l ⁻¹	9.36

FUENTE: Laboratorio de análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes – UNALM

3.1.4 Características climatológicas

Los datos de temperatura, radiación solar y humedad relativa se obtuvieron de la Estación Meteorológica Alexander Von Humboldt ubicada en la Universidad Nacional Agraria La Molina, siendo la temperatura y radiación solar los principales elementos a estudiar.

- **Temperatura:** factor climático de mucha importancia debido a la influencia en el crecimiento y desarrollo adecuado del cultivo de arroz (Vargas, 2010). Durante el ensayo experimental se presentó una temperatura máxima promedio de 31.6 °C y una temperatura mínima promedio de 13.7 °C en los meses de Febrero y Setiembre, respectivamente.

- **Radiación Solar:** factor climático muy importante, ya que de este depende la tasa fotosintética por ende influye en el rendimiento de la planta de arroz (Vargas, 2010). La radiación solar máxima que se presentó durante el experimento fue en el mes de Marzo con 410.6 cal/cm²/día y la mínima fue en el mes de Junio con 187.2 cal/cm²/día.

Tabla 7: Temperatura, radiación solar y humedad relativa durante la conducción del experimento. La Molina, 2017

Mes	Temperatura (°C)			Radiación solar (Cal/cm ² /día)	Humedad Relativa (%)
	Media	Máx.	Mín.		
Febrero	27.2	31.6	21.5	396.6	70
Marzo	27.1	31.3	21.8	410.6	74
Abril	24.1	28.4	18.7	364.6	79
Mayo	21.2	24.9	17.6	264.6	85
Junio	18.3	21.2	15.7	187.2	88
Julio	17.6	21.0	15.0	233.3	86
Agosto	16.5	20.2	13.7	225.4	90
Setiembre	16.7	20.2	13.7	229.0	89

FUENTE: Observatorio Meteorológico Alexander Von Humboldt - UNALM

3.1.5 Material genético

Se usaron semillas de arroz (*Oryza sativa* L.) cultivar IR-43, semi-precoz con período vegetativo de 140 a 150 días aproximadamente, posee una alta capacidad de macollaje y alta respuesta al N. Tiene un potencial de rendimiento de hasta 14 TM ha⁻¹ en la costa norte. Su calidad molinera se considera inestable ya que es susceptible al retraso de cosecha pero de buena calidad culinaria.

3.1.6 Fertilizantes

- **Urea granulada:** fertilizante convencional en forma granulada con mayor concentración de N (46 por ciento), el cual se encuentra en forma amídica (NH₂). Se

tiende a presentar mayores pérdidas de nitrógeno por volatilización hasta un 60 por ciento en forma de gases como N_2 , N_2O y NH_3 , dichas pérdidas se disminuyen aplicando de forma fraccionada, sobre láminas de agua o enterrada en seco.

- **Urea Max:** fertilizante de liberación lenta, recubierto con Arborite AG-NT en mezcla física, el cual es un líquido que contiene el ingrediente activo NBPT también conocido como Triamida N (n-butil) tiofosfórica, que resulta en un efectivo estabilizador de Nitrógeno que inhibe la actividad de la enzima ureasa, por consiguiente se disminuyen pérdidas potenciales de nitrógeno por el efecto de la volatilización.
- **Sulfato de amonio:** fertilizante convencional, contiene como nutriente primario 21 por ciento de N en forma de amonio (NH_4^+) y como nutriente secundario 24 por ciento de S como sulfato (SO_4^-), es de pH ácido y soluble en agua. Las pérdidas en el suelo por lavado, volatilización y denitrificación son menores en comparación a otras fuentes nitrogenadas.
- **Agrocote E-Max:** tiene una composición de 38 por ciento de N, 3 por ciento P_2O_5 y 3 por ciento K_2O , con un tiempo de liberación de 3, 4 y 5 meses a 21 °C. Es un fertilizante de liberación controlada con tecnología E-Max (recubrimiento de polímero) usado para mejorar la eficiencia nutricional y utilización de los nutrientes por parte de la planta; la liberación de los nutrientes se basa en la humedad y la temperatura, por lo que se ofrece una longevidad predecible.
- **Super fosfato triple:** fuente de fósforo altamente concentrada con un 46 por ciento de P_2O_5 , con muy buena solubilidad entre 80 a 90 por ciento del total.
- **Sulfato de potasio:** fertilizante potásico con una concentración del 50 por ciento de K_2O , además aporta 18 por ciento de azufre (SO_4^-).

Tabla 8: Dosis de fertilización de N aplicado en los tratamientos

Tipo	Fuentes	N %	Dosis		Fertilizante total aplicado	
			mg.kg ⁻¹	kg.ha ⁻¹	mg	kg.ha ⁻¹
Convencional	Urea granulada	46	210	462	1369.6	1004.4
Liberación lenta	Urea + Inhibidor de ureasa	46	210	462	1369.6	1004.4
Convencional	Sulfato de amonio	21	210	462	3000.3	2200.2
Liberación controlada	Agrocote E-Max 4M	38	210	462	1657.9	1215.8
Liberación controlada	Agrocote E-Max 3M	38	140	308	1105.3	810.6
Liberación controlada	Agrocote E-Max 4M	38	140	308	1105.3	810.6
Liberación controlada	Agrocote E-Max 5M	38	140	308	1105.3	810.6

Tabla 9: Dosis de fertilización de P y K para estandarizar sus niveles

Tipo	Fuentes	P ₂ O ₅	K ₂ O	Dosis
		%	%	mg.kg ⁻¹
Convencional	Super fosfato triple	46		60
Convencional	Sulfato de potasio		50	80
Liberación controlada	Agrocote E-Max	3	3	

3.1.7 Otros

- **Campo:** soporte de metal, 32 macetas de plástico con dimensiones de 25 cm de diámetro boca, 19 cm de diámetro de base y 19 cm de altura, 32 bandejas de plástico, 32 envases de plástico de 100 ml para colectar el lixiviado, probeta de 100 ml, embudo, papel filtro, regla, plástico para cubrir el soporte de metal, balanza electrónica Model WT6002N, bolsas de papel, tijera, libreta de campo, lapicero y cámara fotográfica.
- **Laboratorio:** balanza de precisión OHAUS PioneerTM modelo PA214, analizador multi-paramétrico CONSORT modelo C1020, estufa, agitador y molino.

3.2 METODOLOGÍA

3.2.1 Factores en estudio

Se realizó la evaluación de 7 tratamientos más un control. Se manejaron dos dosis de N de 140 y 210 mg.kg⁻¹, tal como se muestra en la Tabla 7. Debido a que el fertilizante de liberación controlada, Agrocote E-Max, presenta una riqueza de 3-3 en P-K, se estandarizaron los niveles en todos los tratamientos incluyendo al control.

En los tratamientos con fertilizantes convencionales e inhibidor de ureasa su dosis de aplicación se fraccionó en cuatro momentos, mientras que en los tratamientos con fertilizante de liberación controlada se realizó en una sola aplicación.

Tabla 10: Tratamientos estudiados en el ensayo experimental

Tratamiento	Dosis N mg.kg⁻¹	Producto	Nº Aplicaciones	Momento de la aplicación
T1	210	Urea granulada	4	1 después de siembra, 2 macollamiento y 1 floración.
T2	210	Urea + Inhibidor de ureasa	4	1 después de siembra, 2 macollamiento y 1 floración.
T3	210	Sulfato de amonio granulado	4	1 después de siembra, 2 macollamiento y 1 floración.
T4	210	Agrocote E-MAX (38-3-3) (4M)	1	Después de la siembra
T5	140	Agrocote E-MAX (38-3-3) (3M)	1	Después de la siembra
T6	140	Agrocote E-MAX (38-3-3) (4M)	1	Después de la siembra
T7	140	Agrocote E-MAX (38-3-3) (5M)	1	Después de la siembra
T8	0	-	0	-

3.2.2 Diseño experimental

El diseño experimental que se utilizó fue el Diseño Completamente al Azar (DCA), con 8 tratamientos y 4 repeticiones para darnos un total de 32 unidades experimentales. En la comparación de medias se empleó la prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad.

Modelo Matemático:

El modelo lineal utilizado para este análisis, fue el siguiente:

$$= + +$$

De donde:

Y_{ij} = observación del i-ésimo tratamiento en la j-ésima
repetición = media general

T_i = efecto del i-ésimo tratamiento

e_{ij} = error experimental

Hipótesis:

Las hipótesis son:

Hipótesis nula (H_0): Los efectos de los tratamientos no difieren significativamente entre sí.

Hipótesis alternativa (H_A): Al menos uno de los tratamientos difiere significativamente.

3.2.3 Evaluación de Variables

a. Variables físicas

- Colecta de lixiviado: a los 21 días después de la primera fertilización de N se colectó el primer lixiviado manteniendo la colecta cada quince días. Se midió el volumen lixiviado en una probeta y se colectó en envases de 100 ml previamente filtrado, para posteriormente medir su pH y conductividad eléctrica.

b. Variables químicas

- Concentración de nitratos y amonio del suelo al inicio del experimento
- Concentración de nitratos y amonio del agua de riego
- Concentración de nitratos y amonio en el lixiviado colectado
- Concentración de nitrógeno en la paja al final del experimento
- Concentración de nitrógeno en la panícula al final del experimento
- Concentración de nitratos y amonio en el suelo al final del experimento
- Medición CE y pH del lixiviado colectado: haciendo uso del Analizador multi-paramétrico CONSORT modelo C1020, se midió la conductividad eléctrica y pH de cada muestra de lixiviado. Antes de iniciar la medición se procedió a calibrar el equipo.

c. Variables biométricas

- Altura de la planta cada 15 días: la medición de la altura se inició al mes del transplante, se midió desde la superficie del suelo hasta la parte más alta de la planta, en la madurez se midió hasta el ápice de la panícula más alta. La medición se realizó a todas las plantas.
- Número de macollos por planta: se realizó el conteo de macollos primarios de cada una de las plantas de todos los tratamientos.
- Número de panículas por planta: previo a la cosecha se inició el conteo de panícula por planta en todos los tratamientos.
- Biomasa fresca y biomasa seca (g.maceta^{-1}): al finalizar la cosecha se obtuvo tanto

del follaje como de la panícula el peso fresco, luego el material fue secado en la estufa a 70 °C por 48 horas aproximadamente hasta alcanzar un peso constante dando como resultado el peso seco.

- Determinación de la recuperación aparente de nitrógeno: se obtuvo de dividir la cantidad de nutrientes aportada por el fertilizante que fue absorbida por el cultivo entre la cantidad de nutriente que se aplicó (Doberman y Fairhurst, 2000; Baligar *et al.*, 2001).



Donde:

RA_N: recuperación aparente del nitrógeno

UN: absorción total de N en paja y grano (tratamiento 2 recibe una dosis de N y tratamiento 1 es el control)

FN: cantidad de N añadido por el fertilizante

3.2.4 Ejecución del experimento

a. Instalación

- Preparación del suelo: el suelo fue secado al aire, molido y tamizado a través de un tamiz de 2 mm, para finalmente mezclar y obtener un sustrato homogéneo.
- Preparación de las macetas: las maceta (diámetro boca 25 cm, diámetro base 19 cm, altura 19 cm) fueron rotuladas de acuerdo a los tratamientos y llenadas cada una con 3 kg de suelo. Después se ubicaron en forma aleatoria en una estructura de metal.

b. Siembra

Previo al almácigo se realizó un riego pesado para lavar sales. En una bandeja con agua se puso a remojar un aproximado de 200 semillas durante 24 horas, tiempo en que se observó el inicio de la germinación, luego se realizó el voleo.

c. Transplante

- Batido: el suelo fue humedecido por encima de su capacidad de campo y se procedió a remover con la mano.
- Transplante: se realizó a los 23 días después del voleo del almácigo, se transplantaron 6 plantines por maceta en el suelo previamente batido.

d. Riego

Finalizada la siembra se hizo un riego a capacidad de campo, manteniéndose en esta condición hasta el transplante. Una vez establecido el cultivo, los riegos posteriores se hicieron saturando el suelo y manteniendo una lámina de agua de aproximadamente 2 a 3 cm para que al momento de la aplicación del fertilizante, éste se cubra. Durante la etapa reproductiva se mantuvo este tipo de riego ya que coincidió con la baja de temperaturas. Tres semanas previas a la cosecha se empezó a regar dos veces por semana y la última semana se dejó de regar.

e. Fertilización

La fertilización se realizó al voleo después del riego, asemejando las condiciones reales de los campos arroceros. La fertilización se realizó de la siguiente manera:

Fertilización nitrogenada

La dosis total de nitrógeno para los tratamientos T1, T2 y T3 fue de 210 mg N kg⁻¹ (462 kg N ha⁻¹) y se fraccionó en 4 momentos. La primera aplicación se realizó 12 días después del transplante con una dosis de 55 mg N kg⁻¹ (121 kg N ha⁻¹), la segunda se realizó a los 33 días después del transplante con una dosis de 80 mg N kg⁻¹ (176 kg N ha⁻¹), la tercera aplicación se hizo a los 42 días después del transplante con una dosis de 45 mg N kg⁻¹ (99 kg N ha⁻¹) y la cuarta aplicación se realizó a los 84 días después del transplante (inicio de floración) con una dosis de 30 mg N kg⁻¹ (66 kg N ha⁻¹). Para los tratamientos T4, T5, T6 y T7 se realizó una sola aplicación a los 12 días después del transplante, donde el tratamiento T4 tuvo una dosis de 210 mg N kg⁻¹ y T5, T6 y T7 una dosis de 140 mg N kg⁻¹ (308 kg N ha⁻¹).

Tabla 11: Dosis y fraccionamiento del Nitrógeno

Tratamiento	Fertilizante	N		Aplicaciones			
		mg.kg ⁻¹	kg.ha ⁻¹ ^a	1	2	3	4
T1	Urea granulada	210	462	55	80	45	30
T2	Urea + inhibidor de ureasa	210	462	55	80	45	30
T3	Sulfato de Amonio	210	462	55	80	45	30
T4	Agrocote E-Max (4M)	210	462	210	0	0	0
T5	Agrocote E-Max (3M)	140	308	140	0	0	0
T6	Agrocote E-Max (4M)	140	308	140	0	0	0
T7	Agrocote E-Max (5M)	140	308	140	0	0	0

^aProfundidad de suelo: 20 cm; densidad aparente: 1.1 g.cc⁻¹

Fertilización de fósforo y potasio

En todos los tratamientos, incluyendo al control, se estandarizó el nivel de P y K aplicados en el Agrocote E-Max (38-3-3). Para el fósforo se aplicó el fertilizante superfosfato triple a los 5 días después del transplante en una sola aplicación de 60 mg P₂O₅ kg⁻¹ y para el potasio se usó como fuente el sulfato de potasio en dos aplicaciones del 50 por ciento cada una con una dosis total de 80 mg K₂O kg⁻¹, la primera se realizó a los 42 días y la segunda a los 60 días después del transplante.

Tabla 12: Dosis y fraccionamiento para estandarizar P y K

Tratamiento	Fertilizante	P ₂ O ₅ mg.kg ⁻¹	K ₂ O	
			mg.kg ⁻¹	
			1 aplic.	2 aplic.
T1	Urea granulada	60	40	40
T2	Urea + inhibidor de ureasa	60	40	40
T3	Sulfato de Amonio	60	40	40
T4	Agrocote E-Max (4M)	60	40	40
T5	Agrocote E-Max (3M)	60	40	40
T6	Agrocote E-Max (4M)	60	40	40
T7	Agrocote E-Max (5M)	60	40	40
T8	Control	60	40	40

f. Deshierbo

El deshierbo se realizó de forma manual, a medida que la malezas iban apareciendo eran inmediatamente retiradas.

g. Cubierta con plástico

A los 126 días después del trasplante se colocó una cobertura de plástico con el objetivo de mantener una mayor temperatura, ya que las panículas estaban siendo afectadas por las bajas temperaturas que se presentaba.

h. Cosecha

La cosecha se realizó a los 180 días después del trasplante. El orden de la cosecha se inició con la repetición uno (R1) de cada uno de los tratamientos y así se continuó con las demás repeticiones. Se cosecharon primero las panículas y posteriormente el follaje siendo este último cortado al ras del suelo, luego fueron pesadas obteniendo su peso fresco y colocadas por separado en bolsas de papel previamente rotuladas. Al término de la cosecha todo el material fue llevado a la estufa a 70 °C donde estuvo por un tiempo aproximado de 48 horas hasta que se mantuvo un peso constante, para finalizar el material se volvió a pesar obteniendo el peso seco.

i. Colecta de muestras

- Suelo: una vez preparado el suelo (sustrato homogéneo) se tomó una muestra de 3 kg y se procedió a enviarla al laboratorio para su análisis de caracterización y salinidad.
- Agua: se tomó una muestra de dos litros del agua que se usó para el riego y se procedió a enviarla al laboratorio para su análisis.
- Lixiviados: se recogió el agua gravitacional (drenajes) que escurría después de saturar el suelo con el riego. Para ello se colocaron bandejas bajo cada maceta después de un corto tiempo de realizado el riego, para garantizar que el agua caída procediera del sustrato y no del escurrimiento de las paredes de la maceta. La cantidad de solución lixiviada colectada en la bandeja era medida en una probeta,

luego en un embudo con papel filtro la solución era colectada a un envase de plástico de 100 ml para su posterior análisis (pH y CE).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 ALTURA DE PLANTA

Como se observa en la Tabla 13, en todas las mediciones de altura se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos. En la primera medición, a los 32 DDT, el tratamiento T4 (Agrocote 4M) a dosis de 210 mg.kg^{-1} presentó la mayor altura con una medida de 37.1 cm; sin embargo, estadísticamente fue similar a los demás tratamientos a excepción del tratamiento T8 (control), el cual presentó una altura de 28.2 cm, siendo la menor de todas. Para la segunda evaluación, a los 47 DDT, el tratamiento T1 (Urea) a dosis de 210 mg.kg^{-1} fue el que mostró la mayor altura; no obstante, estadísticamente fue similar a todos los tratamientos a excepción del control. En la tercera evaluación, 63 DDT, el tratamiento T2 (Urea Max) con una dosis de 210 mg.kg^{-1} , numéricamente presentó la mayor altura; pero, estadísticamente mostró similitud sólo con los tratamientos T1 y T3. Para las mediciones a los 80, 95, 108 y 123 DDT, el tratamiento T3 (sulfato de amonio) a dosis de 210 mg.kg^{-1} se posicionó como el de mayor altura y en la última evaluación obtuvo una medida de 51.4 cm, mostrando similitud estadística con los tratamientos T2 y T1. A su vez los tratamientos T2 y T1 fueron estadísticamente similar a los tratamientos con fertilizantes de liberación controlada T4, T5, T6 y T7; mientras que el control (T8) en todas las evaluaciones presentó la menor altura.

En general, se observa valores crecientes con el incremento del aporte de nitrógeno en el tiempo. Se conoce que el nitrógeno es un regulador del crecimiento porque promueve la reproducción celular (Mejía de Tafur y Menjívar, 2010); por lo tanto, la altura es influenciada en forma directa por la cantidad de nitrógeno aplicado.

Binti *et al.* (2014) encontraron que las prácticas de manejo de N sobre el crecimiento vegetativo afecta la altura de la planta. En su estudio, los tratamientos con mayor dosis de aplicación (120 kg N ha^{-1}) obtuvieron las mayores alturas, atribuyendo este resultado a una mayor disponibilidad de nitrógeno que favoreció el crecimiento de las plantas.

Además, Irshad *et al.* y Dastan *et al.* citados por Binti (2014) también obtuvieron resultados en donde la altura presentó un aumento significativo con la aplicación de este elemento.

En el experimento se observó que los tratamientos con mayor dosis de aplicación (T1, T2, T3 y T4) tienden a presentar las mayores alturas en comparación a los tratamientos con menor dosis, coincidiendo con Gavidia (2003), quien reportó en su investigación que los tratamientos con mayor dosis nitrogenada (400 kg N ha^{-1}) resultaron con plantas más altas.

Los tratamientos con fertilizantes convencionales (T1 y T3) e inhibidor de ureasa (T2), al final del estudio, significativamente obtuvieron las mayores alturas; sin embargo, en la primera evaluación (32 DDT), los tratamientos con fertilizantes de liberación controlada mostraron los datos más altos y en las posteriores mediciones fueron las menores. Tal efecto podría ser atribuido a las elevadas temperaturas al inicio del experimento, las cuales fueron superiores a los 21° C (temperatura de trabajo óptimo de para los fertilizantes de liberación controlada) acelerando la tasa de liberación del nutriente en los fertilizantes de liberación controlada en las etapas iniciales del cultivo aportando una mayor cantidad de nutriente en comparación a los otros tratamientos; por ende el efecto en la altura fue mayor.

Ramón (2014) comenta que en su evaluación, el tratamiento convencional logró mayor altura que los tratamientos con fertilizante de liberación controlada (Cote N) debido a la cantidad de fertilizante nitrogenado aportado y el aporte de nutrientes en época temprana. Por su parte, Cortegana (2017), quien usó a diferentes dosis urea comparada con un fertilizante inhibidor de nitrificación, atribuye este comportamiento a la mayor disponibilidad del nitrógeno.

De acuerdo con Oliet *et al.* (1999), en su evaluación a diferentes dosis de fertilizante de liberación controlada (Osmocote), las plantas más altas son las del tratamiento con Osmocote de mayor porcentaje de nitrógeno a la mayor dosis. Coincidiendo con el resultado obtenido en el presente ensayo, entre los tratamientos de liberación controlada el tratamiento T4 (Agrocote 4M) con la mayor dosis de aplicación, numéricamente obtuvo la mayor altura; pero, estadísticamente no existieron diferencias con los otros tratamientos con fertilizantes de liberación controlada.

Tabla 13: Efecto de la aplicación de los fertilizantes nitrogenados convencionales, de liberación controlada y lenta sobre la altura de la planta (cm) durante el desarrollo del cultivo

Tratamientos	DDT						
	32	47	63	80	95	108	123
T1-Urea-210 N	30.4 ab	44.9 a	46.9 a	47.3 abc	47.3 ab	48.0 ab	48.0 ab
T2-Urea Max-210 N	31.2 ab	43.8 a	47.6 a	47.7 ab	47.7 ab	47.9 b	47.9 ab
T3-Sulfato Amonio-210 N	34.3 ab	42.9 a	45.4 ab	47.9 a	50.5 a	51.5 a	51.4 a
T4-Agrocote 4M-210 N	37.1 a	39.8 ab	41.7 b	45.2 abc	46.1 b	47.5 b	47.5 b
T5-Agrocote 3M-140 N	34.9 ab	38.6 ab	40.9 b	43.2 bc	44.5 b	45.6 b	45.7 b
T6-Agrocote 4M-140 N	35.7 ab	39.7 ab	41.4 b	44.1 abc	45.2 b	46.0 b	45.9 b
T7-Agrocote 5M-140 N	35.4 ab	38.4 ab	40.4 bc	42.8 c	44.1 b	44.5 b	44.7 b
T8-Control	28.2 b	33.1 b	35.3 c	37.4 d	38.1 c	39.5 c	39.6 c
CV (%)	10.6	7.5	5.1	4.4	3.9	3.3	3.3
Significancia	*	**	**	**	**	**	**

Las diferencias no significativas entre las medias fueron encontradas usando la prueba de Tukey a $P < 0.05$ ($n=4$)

Altamente significativo (**), Significativo (*), No significativo (NS)

DDT: días después del transplante

4.2 NÚMERO DE MACOLLOS POR PLANTA

De acuerdo a los resultados del análisis estadístico mostrado en la Tabla 14, ésta variable presentó diferencias altamente significativas. A los 70 y 76 DDT, el tratamiento con inhibidor de ureasa, T2 (Urea max), a dosis de 210 mg.kg^{-1} presentó el mayor número de macollos por planta con un promedio de 4; sin embargo, estadísticamente fue similar a los tratamientos T1, T3 y T4. En la última evaluación, 84 DDT, el tratamiento con fertilizante convencional T3 (sulfato de amonio) a dosis de 210 mg.kg^{-1} numéricamente fue el de mayor número con un promedio de 4 macollos por planta; pero, estadísticamente fue similar a los tratamientos T2 y T1. El control (T8) en las tres evaluaciones fue superado por todos los tratamientos quedando con un promedio de 1 macollo por planta.

En el experimento se observó que los tratamientos con fertilizantes de liberación controlada (T4, T5, T6 y T7) presentaron los menores valores, inclusive su tratamiento a la mayor dosis de aplicación (T4) no logró alcanzar el valor promedio de los otros tratamientos a la misma dosis (T1, T2 y T3). Cabe destacar de entre los tratamientos con fertilizantes de liberación controlada, el tratamiento T4 (Agrocote 4M) a dosis de 210 mg.kg⁻¹ numéricamente presentó la mayor cantidad de macollos; pero, estadísticamente fue similar a los otros tratamientos (T5, T6 y T7).

Dobermann y Fairhurst (2002) y Vargas, (2010) nos dicen que el nitrógeno promueve el rápido crecimiento; por ende, el macollamiento de la planta.

Binti *et al.* (2014) registraron la mayor cantidad de macollos en las parcelas donde se aplicó la mayor dosis de N (120 kg N ha⁻¹) y un menor número en las parcelas con la menor dosis de aplicación (60 kg N ha⁻¹), determinando que la cantidad adecuada de N aplicado en el arroz aumentó el número de macollos. De igual manera, Carvalho *et al.* (2016) reportaron en sus dos evaluaciones, que el número de macollos fue influenciado significativamente por todas las fuentes de N que usó en comparación al tratamiento control, obteniendo un aumento en el número de macollos.

Tabla 14: Efecto de la aplicación de los fertilizantes nitrogenados convencionales, de liberación controlada y lenta sobre el número de macollos por planta

Tratamientos	DDT		
	70	76	84
T1-Urea-210 N	3.2 abc	3.6 ab	3.7 abc
T2-Urea Max-210 N	3.5 a	3.8 a	3.8 ab
T3-Sulfato Amonio-210 N	3.3 ab	3.6 ab	4.1 a
T4-Agrocote 4M-210 N	2.8 abcd	3.0 abc	3.1 bcd
T5-Agrocote 3M-140 N	2.4 cd	2.5 c	2.7 d
T6-Agrocote 4M-140 N	2.6 bcd	2.8 bc	2.9 cd
T7-Agrocote 5M-140 N	2.1 d	2.4 c	2.6 d
T8-Control	1.0 e	1.1 d	1.1 e
CV (%)	14.1	13.8	13.4
Significancia	**	**	**

Las diferencias no significativas entre las medias fueron encontradas usando la prueba - de Tukey a $P < 0.05$ ($n=4$)

Altamente significativo (**), Significativo (*), No significativo (NS)

DDT: días después del transplante

4.3 NÚMERO DE PANÍCULAS POR PLANTA

Como se aprecia en la Tabla 15, ésta variable presentó diferencias estadísticas altamente significativas. En cada una de las evaluaciones, todos los tratamientos, a excepción del control (T8), fueron estadísticamente similares entre sí; sin embargo, numéricamente en las tres primeras evaluaciones el tratamiento con inhibidor de ureasa T2 (Urea Max) a dosis de 210 mg.kg^{-1} fue el que presentó el mayor número de panículas por planta; sólo en la última evaluación, el tratamiento con fertilizante convencional T3 (sulfato de amonio) a dosis de 210 mg.kg^{-1} llega a superarlo.

El tratamiento control (T8), con un promedio de 1 panícula por planta fue superado por todos los tratamiento en todas las evaluaciones.

A pesar de no existir diferencias estadísticas entre los tratamientos con aporte de N, los que recibieron mayor dosis de aplicación (T1, T2, T3 y T4) presentaron mayor cantidad de panículas por planta en comparación a los tratamientos que recibieron la menor dosis (T5, T6 y T7). Con resultados parecidos, Gavidia (2003), Carvalho *et al.* (2016) y Cortegana (2017) reportaron haber encontrado diferencias altamente significativas sólo entre dosis de nitrógeno y no entre las fuentes usadas, obteniéndose el menor número de panículas en el nivel cero (sin aplicación de fertilizantes) y la mayor cantidad al más alto nivel de N. En la investigación de Carvalho *et al.* (2016) mencionan que las condiciones de lluvias que se presentaron en la zona, días después de haberse realizado la fertilización, son una posible explicación de la falta de diferencias entre las fuentes usadas (urea común, PCU y con inhibidores de ureasa).

Por el contrario, Fageria *et al.* (2011) indican que no sólo hubieron influencias significativas entre las tasas de N, también las hubo entre las fuentes, donde el sulfato de amonio a la tasa más alta y más baja siempre presentó un mayor número de panículas en comparación a la urea.

En este estudio se aprecia notoriamente que los tratamientos con mayor número de panículas por planta (T2 y T3) fueron los que presentaron el mayor número de macollos (Tabla 14). Dobermann y Fairhurst (2000) afirman que en el arroz transplantado, el número de panículas está determinado por el comportamiento de los macollos, lo que da soporte a los resultados obtenidos.

Tabla 15: Efecto de la aplicación de los fertilizantes nitrogenados convencionales, de liberación controlada y lenta sobre el número de panículas por planta

Tratamientos	DDT			
	112	126	140	154
T1-Urea-210 N	2.7 a	2.8 a	2.8 a	2.9 a
T2-Urea Max-210 N	2.8 a	3.1 a	3.1 a	3.1 a
T3-Sulfato Amonio-210 N	2.6 a	2.8 a	2.9 a	3.2 a
T4-Agrocote 4M-210 N	2.7 a	2.8 a	2.8 a	2.8 a
T5-Agrocote 3M-140 N	2.4 a	2.5 a	2.5 a	2.5 a
T6-Agrocote 4M-140 N	2.5 a	2.6 a	2.7 a	2.7 a
T7-Agrocote 5M-140 N	2.5 a	2.5 a	2.5 a	2.5 a
T8-Control	1.0 b	1.0 b	1.0 b	1.1 b
CV (%)	13.3	12.7	12.2	12.4
Significancia	**	**	**	**

Las diferencias no significativas entre las medias fueron encontradas usando la prueba de Tukey a $P < 0.05$ ($n=4$)

Altamente significativo (**), Significativo (*), No significativo (NS)

DDT: días después del transplante

4.4 BIOMASA SECA

En ésta variable, tal como se muestra en la Tabla 16, se dieron diferencias altamente significativas entre los tratamientos, tanto en panícula como en follaje.

Para el presente estudio, en la biomasa seca de la panícula no se ha considerado al grano, debido a su poca a nula formación; la ausencia de granos es atribuida a las bajas temperaturas que se fueron presentando en los meses de mayo y junio, periodo en que la etapa reproductiva se venía desarrollando, con temperaturas mínimas promedio de 17.6 y 15.7 °C respectivamente (Tabla 4).

Yoshida (1981) nos dice que la planta de arroz expuesta a temperaturas extremas menores a 20 °C y mayores a 30 °C pueden causar grandes daños dependiendo de la variedad, duración de temperatura crítica, cambios diurnos y estado fisiológico de la planta (Tabla

1). Cuando la planta es sometida a temperaturas por debajo de 20 °C durante el estado de reducción de células madres de polen se induce un alto porcentaje de esterilidad (Satake citado por Yoshida, 1981 y Vargas, 2010). Sin embargo, si las temperaturas tan bajas como 12 °C no sobrepasan los 2 días no habrá tal efecto; por el contrario, si la exposición es de 6 a más días se podría causar hasta un 100 % de esterilidad (Yoshida, 1981 y Vargas, 2010)

Además, a estas bajas temperaturas también se le asocia la baja radiación solar que según Vargas (2010), si bien no afecta los rendimientos y sus componentes en la fase vegetativa, en la fase reproductiva afecta notoriamente con una alta disminución en el número de granos y si se mantiene en el llenado de grano hasta la madurez entonces se disminuye el porcentaje de granos llenos.

Para la biomasa seca en panícula, el tratamiento con inhibidor de ureasa T2 (Urea Max) y fertilizante convencional T3 (Sulfato de amonio) con dosis de 210 mg.kg⁻¹ obtuvieron el mayor peso de 3.93 g; sin embargo, estadísticamente fueron similares a todos los tratamientos, con excepción del control (T8). En el caso del follaje, numéricamente el tratamiento con inhibidor de ureasa T2 (Urea Max) fue el de mayor peso, con un valor de 34.03 g; pero, estadísticamente fue similar a los tratamientos T1, T3 y T4. Con respecto al tratamiento control (T8), éste fue superado por todos los tratamientos, tanto en panícula como follaje con por una gran diferencia, llegando a tener un peso en promedio de 1.48 y 11.25 g, respectivamente.

En la panícula como en el follaje se observó un comportamiento superior en los tratamientos que recibieron la mayor dosis de aplicación de N (210 mg.kg⁻¹), los cuales presentaron los mayores pesos de biomasa seca; del mismo modo, Gavidia (2003), quien también evaluó el cultivar IR-43, reportó que los tratamientos con mayor dosis de nitrógeno (400 kg N ha⁻¹) superaron en un 24.25 % de producción de materia seca a la obtenida con menor dosis (240 kg N ha⁻¹). Además, entre los tratamientos con la mayor dosis de N, la fuente de nitrógeno con inhibidor de ureasa T2 (Urea Max) fue el que presentó el mayor valor. Similarmente, Cortegana (2017) encontró diferencias significativas entre fuentes y altamente significativas entre los niveles de aplicación de N en materia seca a la maduración, siendo el tratamiento con inhibidor de ureasa y a la mayor dosis (360 kg N ha⁻¹) el de mayor producción de materia seca en comparación a los tratamientos con urea común e inhibidor de la nitrificación.

Carvalho *et al.* (2016) comentan que en los dos años de evaluación, la biomasa seca fue significativamente influenciada por las dosis de nitrógeno aplicado, obteniéndose el mayor peso a la más alta dosis y el menor peso en el control (sin fertilizante); entre las fuentes que llegaron a usar no hallaron diferencias significativas, ya que la urea común proporcionó valores similares a las otras fuentes. Rojas *et al.* (1983) mencionan que se han relacionado los aumentos de suministro de nitrógeno con el efecto sobre ciertas características agronómicas en arroz, siendo una de ellas la materia seca; corroborando esto, encontró que el incremento en el nitrógeno aplicado aumentó la producción de materia seca.

Cabe destacar, en el presente estudio, de entre los tratamientos con fertilizante de liberación controlada, el T4 (Agrocote 4M) a dosis de 210 mg.kg⁻¹, presentó numéricamente la mayor biomasa seca en panícula y follaje con 3.85 g y 30.60 g por maceta respectivamente.

Tabla 16: Efecto de la aplicación de los fertilizantes nitrogenados convencionales, de liberación controlada y lenta sobre la biomasa seca (g) en panícula y follaje

Tratamientos	Panícula	Follaje
T1-Urea-210 N	3.61 a	30.66 ab
T2-Urea Max-210 N	3.93 a	34.03 a
T3-Sulfato Amonio-210 N	3.93 a	31.06 ab
T4-Agrocote 4M-210 N	3.85 a	30.60 abc
T5-Agrocote 3M-140 N	3.04 a	24.77 cd
T6-Agrocote 4M-140 N	3.05 a	26.04 bcd
T7-Agrocote 5M-140 N	3.12 a	24.68 d
T8-Control	1.48 b	11.25 e
CV (%)	14.06	9.38
Significancia	**	**

Las diferencias no significativas entre las medias fueron encontradas usando la prueba de Tukey a P<0.05 (n=4)

Altamente significativo (**), Significativo (*), No significativo (NS)

4.5 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DE LA SOLUCIÓN LIXIVIADA

En esta variable se realizaron 6 evaluaciones durante el desarrollo del cultivo; como se muestra en la Tabla 17.

La primera evaluación (33 DDT) se realizó 21 días después de haberse aplicado el segundo fraccionamiento de N; si bien, no existieron diferencias significativas, la solución lixiviada del tratamiento con fertilizante de liberación controlada T5 (Agrocote 3M) a dosis de 140 mg.kg^{-1} presentó la mayor conductividad con un valor de 2.6 dS.m^{-1} . La segunda evaluación (60 DDT) fue realizada 18 días después de aplicarse el tercer fraccionamiento de N, en ésta evaluación se evidenció diferencias significativas donde el lixiviado del tratamiento con fertilizante de liberación controlada T4 (Agrocote 4M) a dosis de 210 mg.kg^{-1} registra la más alta conductividad eléctrica (3.3 dS.m^{-1}); pero, estadísticamente fue similar a los tratamientos T1, T2, T3, T5 y T6. En la tercera evaluación (76 DDT) existieron diferencias altamente significativas, con una conductividad de 2.7 dS.m^{-1} el tratamiento con fertilizante de liberación controlada T6 (Agrocote 4M) a dosis 140 mg.kg^{-1} fue el de mayor valor; sin embargo, estadísticamente fue similar a los tratamientos T1, T2, T7 y T8. La cuarta evaluación (94 DDT) se realizó 10 días después de haberse aplicado el último fraccionamiento de N; aunque no hubo diferencias significativas, el tratamiento con fertilizante de liberación controlada T7 (Agrocote 5M) a dosis de 140 mg.kg^{-1} destacó por presentar la mayor conductividad de 1.9 dS.m^{-1} . En la quinta evaluación (110 DDT), sí hubieron diferencias significativas y el tratamiento con fertilizante de liberación controlada T5 (Agrocote 3M) a dosis de 140 mg.kg^{-1} con un valor de 1.9 dS.m^{-1} fue el más alta conductividad eléctrica; pero, estadísticamente mostró similitud a todos los tratamientos, excepto al tratamiento T4 (Agrocote 4M). Y en la última evaluación (125 DDT), aunque no se evidenciaron diferencias significativas, el tratamiento con fertilizante de liberación controlada T7 (Agrocote 5M) y convencional T1 (Urea común) obtuvieron la mayor conductividad eléctrica con un valor de 2.0 dS.m^{-1} .

La variable en estudio, a pesar de la estandarización de la metodología para la colecta de la solución lixiviada, no ha mostrado tendencia en sus resultados con respecto a los días después de la aplicación del fertilizante y/o dosis, dado a que el agua de drenaje depende de la lámina de riego, homogeneidad del batido, velocidad de infiltración, conductividad hidráulica, entre otros; por ello, las concentraciones de nitrato y amonio de la solución

lixiviada muestran un comportamiento errático (Anexo 22 y 23). No obstante, la conductividad eléctrica de las soluciones colectadas, en general, disminuye a mayor desarrollo del cultivo y en cada evaluación es el lixiviado de algún tratamiento con fertilizante de liberación controlada el que registra la mayor concentración de sales. La menor salinidad del agua de drenaje a través del tiempo puede ser resultado de un mayor consumo de N ante el incremento de biomasa. El más alto potencial osmótico en algún tratamiento con fertilizantes de liberación controlada puede atribuirse al afecto del incremento de su tasa de liberación de N ante las altas temperaturas registradas entre los meses de febrero a abril, que superan la temperatura óptima de buen funcionamiento para este tipo de fertilizantes (21 °C). Trenkel (2010), Fontanilla y Lledó citados por Ramón (2014) mencionan que en este tipo de fertilizantes su tasa de liberación real depende sólo de la temperatura.

Tabla 17: Efecto de la aplicación de los fertilizantes nitrogenados convencionales, de liberación controlada y lenta sobre la conductividad eléctrica (dS.m⁻¹) de la solución lixiviada durante el desarrollo del cultivo

Fertilización Fenología DDT	2da N		3ra N		4ta N	
	Macollamiento			Floración	Maduración	
	33	60	76	94	110	125
T1-Urea-210 N	1.8	2.0 ab	2.1 ab	1.6 ab	1.0 ab	2.0
T2-Urea Max-210 N	1.9	2.3 ab	2.6 a	0.8 b	1.6 ab	1.5
T3-Sulfato Amonio-210 N	2.0	1.9 ab	1.6 b	1.4 ab	1.5 ab	1.6
T4-Agrocote 4M-210 N	2.1	3.3 a	1.6 b	1.0 ab	0.8 b	1.9
T5-Agrocote 3M-140 N	2.6	1.9 ab	1.2 b	1.5 ab	2.0 a	1.7
T6-Agrocote 4M-140 N	2.3	1.9 ab	2.7 a	1.1 ab	1.9 a	1.4
T7-Agrocote 5M-140 N	2.4	1.6 b	2.0 ab	1.9 a	1.3 ab	2.0
T8-Control	2.5	1.7 b	2.0 ab	1.2 ab	1.8 ab	1.6
CV (%)	17.0	27.7	17.5	30.9	25.8	15.2
Significancia	NS	*	**	NS	*	NS

Las diferencias no significativas entre las medias fueron encontradas usando la prueba de Tukey a P<0.05 (n=3)

Altamente significativo (**), Significativo (*), No significativo (NS)

DDT: días después del transplante

4.6 PH DE LA SOLUCIÓN LIXIVIADA

La variable pH de la solución lixiviada tiene 6 evaluaciones, de las cuales sólo tres presentaron significancia (Tabla 18). En la primera evaluación (33 DDT) existieron diferencias significativas, donde los tratamientos con fertilizante convencional T1 (Urea) e inhibidor de ureasa T2 (Urea Max) con dosis de 210 mg.kg^{-1} obtuvieron el mayor valor con un pH de 8.2 y mostraron similitud estadística con los demás tratamientos a excepción del tratamiento T5 (Agrocote 3M), el cual fue el menor de todos con un pH de 7.5. Para la segunda evaluación (60 DDT), a pesar de no existir diferencias significativas entre los tratamientos, se observó disminución en el pH, mostrando los valores más bajos en comparación a las otras evaluaciones. A la tercera evaluación (76 DDT), al igual que la segunda, no se evidenciaron diferencias significativas; pero, se observó un aumento del pH en todos los tratamientos. La cuarta evaluación (94 DDT) sí presentó diferencias significativas, siendo los tratamiento con inhibidor de ureasa T2 (Urea Max), de liberación controlada T7 (Agrocote 5M) y T8 (Control) quienes presentaron el mayor pH (8.2); pero, fueron estadísticamente similar a los demás tratamientos excepto al tratamiento T4 (Agrocote 4M) quien obtuvo el menor pH (7.9). Y para las dos últimas evaluaciones (110 y 125 DDT) no se evidenciaron diferencias.

El pH de la solución lixiviada en todos los tratamientos y evaluaciones se mantuvo constante; pero, en la segunda evaluación (60 DDT) se observó el mayor descenso, tal comportamiento puede ser respuesta al proceso de la nitrificación (paso de amonio a nitrato). Zapata (2004) comenta que por cada mol de amonio que se oxida se liberan dos iones H^+ ocasionando la disminución del pH. Para las evaluaciones posteriores, el pH tiende a incrementar y mantenerse constante, ésta elevación podría estar relacionada a las condiciones de inundación permanente que se mantuvo al cultivo. Zapata (2004) nos dice que la continua presencia de un exceso de agua en el cultivo genera reacciones de reducción y esto lleva a un consumo de protones; por ende, se eleva el pH.

Tabla 18: Efecto de la aplicación de los fertilizantes nitrogenados convencionales, de liberación controlada y lenta sobre el pH de la solución lixiviada durante el desarrollo del cultivo

Fertilización	1ra N		2da N		3ra N		4ta N	
	Macollamiento				Floración	Maduración		
	12	33	60	76	94	110	125	
Fenología								
DDT								
T1-Urea-210 N		8.2 a	7.1	8.2	8.1 ab	7.9	8.1	
T2-Urea Max-210 N		8.2 a	7.6	8.1	8.2 a	8.1	8.2	
T3-Sulfato Amonio-210 N		7.9 ab	7.2	8.1	7.9 ab	8.0	8.2	
T4-Agrocote 4M-210 N		7.9 ab	7.6	8.2	7.9 b	7.9	8.1	
T5-Agrocote 3M-140 N		7.5 b	7.6	8.3	7.9 ab	7.9	8.1	
T6-Agrocote 4M-140 N		8.0 ab	7.1	8.1	8.0 ab	7.9	8.0	
T7-Agrocote 5M- 140 N		7.9 ab	7.3	8.1	8.2 ab	8.1	8.1	
T8-Control		8.1 ab	7.4	8.2	8.2 ab	8.2	8.3	
CV (%)		2.7	3.9	1.2	1.4	1.6	1.5	
Significancia		*	NS	NS	*	NS	NS	

Las diferencias no significativas entre las medias fueron encontradas usando la prueba de Tukey a $P < 0.05$ ($n=3$)

Altamente significativo (**), Significativo (*), No significativo (NS)

DDT: días después del transplante

4.7 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA Y PH DEL SUELO AL FINAL DEL EXPERIMENTO

En la Tabla 19, el análisis de varianza determinó la existencia de diferencias altamente significativas tanto en la conductividad eléctrica (CE) como en el pH.

En la CE, el tratamiento con fertilizante de liberación controlada T4 (Agrocote 4M) a dosis de 210 mg.kg^{-1} con 3.49 dS.m^{-1} fue el de mayor salinidad; sin embargo, se mostró estadísticamente similar al tratamiento T2 (Urea Max) y el tratamiento con fertilizante convencional T1 (Urea) fue el de menor valor con una conductividad de 2.61 dS.m^{-1} . Para el pH, el tratamiento con fertilizante de liberación controlada T5 (Agrocote 3M) a dosis de 140 mg.kg^{-1} obtuvo el mayor valor con un pH de 7.49; pero mostró similitud estadística

con los tratamientos T6, T7 y T8; y el tratamiento con menor pH fue el fertilizante con inhibidor de ureasa T2 (Urea Max) a dosis de 210 mg.kg^{-1} con un valor de 6.78 siendo estadísticamente similar a los tratamientos T1 (Urea) y T3 (sulfato de amonio).

La conductividad eléctrica que presentó el suelo antes de iniciar el experimento fue de 3.25 dS.m^{-1} (Tabla 1) y como se observa en los resultados al finalizar el experimento, la CE disminuyó en todos los tratamientos a excepción del T4 (Agrocote 4M), el cual presentó un aumento de 0.24 dS.m^{-1} . De Datta (1981) menciona que la CE de la mayoría de los suelos después de haber sido inundados se incrementa por el mal drenaje; pero, en dos suelos observó que la conductividad disminuyó atribuyendo a la pérdida de nitrato por desnitrificación ya que al inicio presentaban valores de nitratos más altos. Asimismo, la facilidad con que se pierde nitratos por lixiviación o la alta eficiencia de absorción del nitrógeno por la planta reduce su presencia en el suelo.

En el pH se puede observar que los tratamientos con fertilizantes de liberación controlada T5, T6 y T7 muestran un valor similar al control, estadísticamente no existen diferencias significativas entre ellos. Este comportamiento similar al control nos podría indicar la ausencia de nutrientes al final del experimento por parte de este tipo de fertilizantes debido a una liberación prematura del producto a causa de las altas temperaturas que se presentaron en las etapas iniciales del cultivo sobrepasando los $21 \text{ }^\circ\text{C}$ (temperatura óptima de buen funcionamiento de este tipo de fertilizantes); sin embargo, entre los tratamientos con fertilizantes de liberación controlada el T4 estadísticamente es diferente, mostrando un menor pH, resultado que se puede atribuir al efecto de un remanente por la mayor dosis de aplicación que recibió. De igual manera, los tratamientos con fertilizantes convencionales (T1 y T3) e inhibidor de ureasa (T2) muestran un menor pH en comparación al control (T8), con diferencias estadísticamente significativas.

Tabla 19: Efecto de la aplicación de los fertilizantes nitrogenados convencionales, de liberación controlada y lenta sobre la conductividad eléctrica (dS.m^{-1}) y el pH del suelo al final del experimento

Tratamientos	CE	pH
T1-Urea-210 N	2.34 c	6.87 bc
T2-Urea Max-210 N	2.78 bc	6.78 c
T3-Sulfato Amonio-210 N	2.97 ab	6.85 bc
T4-Agrocote 4M-210 N	3.49 a	7.08 b
T5-Agrocote 3M-140 N	2.81 bc	7.49 a
T6-Agrocote 4M-140 N	2.64 bc	7.45 a
T7-Agrocote 5M-140 N	2.62 bc	7.45 a
T8-Control	2.61 bc	7.40 a
CV (%)	7.87	1.35
Significancia	**	**

Las diferencias no significativas entre las medias fueron encontradas usando la prueba de Tukey a $P < 0.05$ ($n=3$)

Altamente significativo (**), Significativo (*), No significativo (NS)

4.8 CONCENTRACIÓN DE NITRATOS Y AMONIO EN EL SUELO AL FINAL DEL EXPERIMENTO

Existen diferencias altamente significativas para las concentraciones del N nítrico y N amoniacal halladas en el suelo al término del experimento (Tabla 20).

En la concentración de nitratos, el tratamiento con inhibidor de ureasa T2 (Urea Max) y de liberación controlada T4 (Agrocote 4M), ambos con una dosis de 210 mg.kg^{-1} , presentaron la mayor concentración con un valor de 0.59 mg.l^{-1} ; sin embargo estadísticamente se mostraron similares a los tratamientos T1, T3, T5 y T7. El control (T8) fue el de menor valor con una concentración de 0.24 mg.l^{-1} .

En la concentración de amonio el tratamiento T3 (sulfato de amonio) y el control (T8) presentaron ambos el mayor valor de 51.3 mg.l^{-1} ; pero, estadísticamente fueron similares al resto de tratamientos a excepción del tratamiento T5 (Agrocote 3M), el cual tuvo el

menor valor (29.9 mg.l^{-1}).

Antes del experimento, el suelo presentaba una concentración de 6.78 mg.l^{-1} de nitratos (Tabla 4), en comparación a lo que se observa en la Tabla 20, ésta concentración se redujo en todos los tratamientos. Si bien pudo haber sido absorbido por la planta es posible que su reducción haya estado influenciado también por la escasa o nula nitrificación, proceso de oxidación de amonio a nitrato realizada por bacterias (*Nitrosomonas* y *Nitrobacter*) que se muestran activas en condiciones aeróbicas (Paul y Clark, citados por Barrios *et al.* 2010) y por el incremento de la denitrificación, proceso que ocurre de forma más rápida a mayores contenidos de humedad en el suelo (Mora *et al.* citado por Barrios *et al.*, 2010); además, Dave *et al.* citados por Tong *et al.* (2018) nos dicen que el nitrato en condiciones de hipoxia (deficiencia de oxígeno) se desnitrifica en N_2 , NO y N_2O , y se pierde.

Las concentraciones de amonio en el suelo antes de iniciar el experimento fue de 75.60 mg.l^{-1} (Tabla 1), al igual que el nitrato, también disminuyó en todos los tratamientos y sobre todo en los tratamientos con fertilizante de liberación controlada quienes presentaron las menores concentraciones. Esta disminución, puede indicar una mayor absorción del N sobre todo en los tratamientos con fertilizante de liberación controlada por su gradual liberación de nutrientes a lo largo del desarrollo del cultivo; pero, también puede estar relacionado a la pérdida del nutriente mediante la volatilización de amoníaco, importante mecanismo de pérdida de N por presentar valores de pH por encima de 7.0 (Barbieri *et al.*, Ferguson *et al.*, citados por Barrios *et al.*, 2010).

Tabla 20: Efecto de la aplicación de los fertilizantes nitrogenados convencionales, de liberación controlada y lenta sobre la concentración de N nítrico y amoniacal (mg.l^{-1}) en el suelo al final del experimento

Tratamientos	N	N
	Nítrico	Amoniacal
T1-Urea-210 N	0.58 a	46.7 ab
T2-Urea Max-210 N	0.59 a	46.7 ab
T3-Sulfato Amonio-210 N	0.45 ab	51.3 a
T4-Agrocote 4M-210 N	0.59 a	45.7 ab
T5-Agrocote 3M-140 N	0.55 a	29.9 b
T6-Agrocote 4M-140 N	0.37 bc	32.7 ab
T7-Agrocote 5M-140 N	0.45 ab	40.1 ab
T8-Control	0.24 c	51.3 a
CV (%)	10.8	15.5
Significancia	**	**

Las diferencias no significativas entre las medias fueron encontradas usando la prueba de Tukey a $P < 0.05$ ($n=3$)

Altamente significativo (**), Significativo (*), No significativo (NS)

4.9 CONCENTRACIÓN DE NITRÓGENO EN LA PLANTA AL FINAL DEL EXPERIMENTO

En ésta variable, tal como se observa en la Tabla 21, se encontraron diferencias altamente significativas en la panícula, mientras que para el follaje no se evidenciaron.

Para la panícula, la mayor concentración de N se presentó en el tratamiento con inhibidor de ureasa T2 (Urea Max) a dosis de 210 mg.kg^{-1} con un valor de 0.89 %; sin embargo, tuvo similitud estadística con todos los tratamientos a excepción del T6 (Agrocote 4M) a dosis 140 mg.kg^{-1} , quien presentó la menor concentración de N con un valor de 0.46 %.

En el caso del follaje, a pesar de no existir diferencias, el tratamiento con fertilizante convencional T3 (sulfato de amonio) a dosis de 210 mg.kg^{-1} destaca por presentar la mayor concentración de N con un valor de 0.57 % y al igual que en la panícula el tratamiento T6

(Agrocote 4M) a dosis de 140 m.kg^{-1} con un valor de 0.41 % tuvo la menor concentración de N.

En general, se observa en todos los tratamientos que el contenido de N en la panícula fue mayor que en el follaje. Yoshida (1981) comenta que en etapas tempranas de crecimiento la planta de arroz presenta un elevado contenido de nitrógeno en sus partes vegetativas y en la madurez son más elevados en la panícula que en la paja; además, Mejía de Tafur y Menjívar (2010) menciona que el N absorbido y acumulado en la hoja antes de la floración será transportado al grano en donde se acumulará hasta el 75 % del N absorbido.

Yoshida (1981) nos muestra que la variedad de arroz IR8, a la madurez, presenta un contenido de N en la paja de 0.60 % y en la panícula de 1.27 % (Anexo 24); por otro lado, Dobermann y Fairhurst (2000) nos presentan un rango óptimo de concentración de N en la paja a la madurez, la cual va de 0.6 a 0.8 % (Anexo 25). Según los resultados obtenidos, para el contenido de N en la paja, todos los tratamientos se encuentran por debajo de dicho rango a excepción del tratamiento T3 (sulfato de amonio) el cual tuvo un valor de 0.6 %; con respecto al contenido de N en la panícula, todos los tratamientos sin excepción presentaron valores muy por debajo en comparación al hallado por Yoshida en la variedad IR8.

En el experimento se mostraron síntomas visuales de deficiencia de N en los tratamientos con fertilizantes de liberación controlada desde el máximo macollamiento manteniéndose así durante todo el desarrollo del cultivo, mientras que los tratamientos con fertilizantes convencionales e inhibidor de ureasa mostraron la deficiencia desde la floración. Ésta deficiencia prematura podría explicar las bajas concentraciones de N en la paja como en la panícula pudiéndose considerar que las dosis de nitrógeno usadas fueron muy bajas para el cultivo de arroz en ensayos en maceta.

Salisbury y Ross citados por Mejía de Tafur y Menjívar (2010) encontraron que el contenido de N en el grano aumentaba con el incremento de la dosis de N aplicado (Anexo 27); de igual manera, Cortegana (2017) en su ensayo halló diferencias estadísticas entre los niveles de nitrógeno siendo superior el de mayor nivel, más no hubo diferencias entre las fuentes que utilizó (inhibidor de ureasa, inhibidor de nitrificación y urea común). Ésta tendencia también se pudo observar en el experimento, a pesar de no haberse formado el

grano, los tratamientos T1, T2 y T3 a mayor dosis de aplicación de N (210 mg.kg^{-1}) fueron los que presentaron las mayores concentraciones tanto en la panícula como en follaje; sin embargo, en el tratamiento T4 (Agrocote 4M), el cual se le aplicó la mayor dosis de N, se observó un efecto contrario presentando una de las concentraciones más bajas de nitrógeno.

Además, se puede apreciar que los tratamientos con fertilizante de liberación controlada (T4, T5, T6 y T7), tanto en panícula como en follaje, numéricamente presentaron las menores concentraciones de N en comparación a los tratamientos con fertilizantes convencionales (T1 y T3) e inhibidor de ureasa (T2).

Tabla 21: Efecto de la aplicación de los fertilizantes nitrogenados convencionales, de liberación controlada y lenta sobre la concentración de N (%) en panícula y follaje

Tratamientos	%N	
	Panícula	Follaje
T1-Urea-210 N	0.85 a	0.53
T2-Urea Max-210 N	0.89 a	0.48
T3-Sulfato Amonio-210 N	0.79 a	0.57
T4-Agrocote 4M-210 N	0.68 ab	0.44
T5-Agrocote 3M-140 N	0.73 a	0.42
T6-Agrocote 4M-140 N	0.46 b	0.41
T7-Agrocote 5M-140 N	0.73 a	0.44
T8-Control	0.78 a	0.43
CV (%)	11.21	14.55
Significancia	**	NS

Las diferencias no significativas entre las medias fueron encontradas usando la prueba de Tukey a $P < 0.05$ ($n=3$)

Altamente significativo (**), Significativo (*), No significativo (NS)

4.10 CONCENTRACIÓN DE FÓSFORO AL FINAL DEL EXPERIMENTO

Para esta variable se encontraron diferencias altamente significativas tanto para la panícula como en el follaje.

La mayor concentración de fósforo en la panícula la obtuvo el tratamiento con fertilizante convencional T3 (sulfato de amonio) a dosis de 210 mg.kg^{-1} y con un valor de 0.253 %, a pesar de tener la mayor concentración presentó similitud estadística a los tratamientos T1, T2, T5 y T6 y el tratamiento con fertilizante de liberación controlada T7 (Agrocote 5M) a dosis de 140 mg.kg^{-1} fue el de menor concentración con un valor de 0.207 %.

En el follaje, el tratamiento con fertilizante de liberación controlada T5 (Agrocote 3M) a dosis de 140 mg.kg^{-1} fue el que obtuvo la mayor concentración con 0.197 % de fósforo y fue estadísticamente similar a los tratamientos T4, T6, T7 y T8; el menor valor se observó en el tratamiento con inhibidor de ureasa T2 (Urea Max) a dosis de 210 mg.kg^{-1} y con una concentración de 0.113 % de fósforo.

Dobermann y Fairhurst (2002) nos dicen que el rango óptimo de fósforo en la paja a la madurez va de 0.10 a 0.15 % y valores menores a 0.06 % es un nivel crítico para mostrar deficiencia (Anexo 25), según estos valores todos los tratamientos se encuentran dentro de lo óptimo, a excepción de los tratamientos T5 y T6 los cuales sobrepasan dicho rango.

Yoshida (1981) nos dice que el contenido de fósforo en la planta de arroz presenta el mismo comportamiento que el del nitrógeno, elevado en sus partes vegetativas a etapas tempranas de crecimiento y disminuye en la madurez para ser más elevado en la panícula que en la paja. Mejía de Tafur y Menjívar, (2010) mencionan que del total de P absorbido, después de la floración, cerca del 75 % es transportado a los granos esto explicaría que la concentración de P sea mayor en la panícula que en el follaje.

Tabla 22: Efecto de la aplicación de los fertilizantes nitrogenados convencionales, de liberación controlada y lenta sobre la concentración de P (%) en panícula y follaje

Tratamientos	%P	
	Panícula	Follaje
T1-Urea-210 N	0.23 abc	0.12 b
T2-Urea Max-210 N	0.23 abc	0.11 b
T3-Sulfato Amonio-210 N	0.25 a	0.14 b
T4-Agrocote 4M-210 N	0.21 bc	0.14 ab
T5-Agrocote 3M-140 N	0.24 abc	0.20 a
T6-Agrocote 4M-140 N	0.24 ab	0.16 ab
T7-Agrocote 5M-140 N	0.21 c	0.14 ab
T8-Control	0.21 bc	0.16 ab
CV (%)	5.60	13.89
Significancia	**	**

Las diferencias no significativas entre las medias fueron encontradas usando la prueba de Tukey a $P < 0.05$ ($n=3$)

Altamente significativo (**), Significativo (*), No significativo (NS)

4.11 CONCENTRACIÓN DE POTASIO AL FINAL DEL EXPERIMENTO

Esta variable presentó diferencias altamente significativas entre los tratamientos tanto para la panícula como para el follaje.

La mayor concentración de K lo obtuvo el tratamiento con fertilizante de liberación controlada T7 (Agrocote 5M) a dosis de 140 mg.kg^{-1} con 0.92 % en la panícula y 1.32 % en el follaje. La menor concentración en la panícula lo obtuvo el control (T8) con un valor de 0.61 % y en el follaje fue el tratamiento con fertilizante convencional T3 (sulfato de amonio) con un valor de 0.69 %.

El contenido de potasio a la madurez generalmente es más altos en la paja (Yoshida, 1981) y sólo el 12 % del total absorbido se llega acumular en el grano, mientras que el resto se tiende a acumular a las partes vegetativas de la planta (Mejía de Tafur y Menjívar, 2010); sin embargo, en los resultados se observa una concentración casi similar tanto en la panoja

como en el follaje.

Dobermann y Fairhurst (2000) mencionan que el rango óptimo de K en la paja a la madurez va en un rango de 1.5 a 2.0 % y valores menor a 1.2 % presenta deficiencia (Anexo 25), como se observan los resultados todos los tratamientos muestran un nivel crítico para la deficiencia al estar por debajo de 1.2 % a excepción de T7 y T8. Estos dos últimos tratamientos (T7 y T8) presentarían una mayor concentración de K debido a la baja materia seca que presentaron.

La deficiencia del nutriente en los tratamientos ha podido influenciar en la ausencia de formación de granos, ya que el K participa en diferentes procesos en la planta de arroz y uno de ellos es el transporte de asimilados hacia el grano; además, su presencia influyen en el incremento del número de granos por panícula, el porcentaje de granos llenos y el peso de 1000 (Dobermann y Fairhurst, 2000).

Tabla 23: Efecto de la aplicación de los fertilizantes nitrogenados convencionales, de liberación controlada y lenta sobre la concentración de K (%) en panícula y follaje

Tratamientos	%K	
	Panícula	Follaje
T1-Urea-210 N	0.82 bc	0.86 b
T2-Urea Max-210 N	0.87 ab	0.76 b
T3-Sulfato Amonio-210 N	0.82 bc	0.69 b
T4-Agrocote 4M-210 N	0.74 dc	0.78 b
T5-Agrocote 3M-140 N	0.64 ef	0.74 b
T6-Agrocote 4M-140 N	0.89 ab	0.78 b
T7-Agrocote 5M-140 N	0.92 a	1.32 a
T8-Control	0.61 f	1.27 a
CV (%)	4.16	7.44
Significancia	**	**

Las diferencias no significativas entre las medias fueron encontradas usando la prueba de Tukey a $P < 0.05$ ($n=3$)

Altamente significativo (**), Significativo (*), No significativo (NS)

4.12 EXTRACCIÓN DE NITRÓGENO POR LA PLANTA

En la Tabla 24, se evidenciaron diferencias altamente significativas entre los tratamientos. En la extracción total de N, el tratamiento con fertilizante convencional T3 (sulfato de amonio) a dosis de 210 mg.kg^{-1} fue superior al resto con una extracción de 0.212 g de N por planta; pero, estadísticamente mostró similitud con los tratamientos T1, T2 y T4. El control (T8) fue superado por todos los tratamientos, logrando sólo una extracción total de 0.062 g de N por planta.

Como se puede observar, los tratamientos que recibieron la mayor dosis de aplicación (210 mg.kg^{-1}) presentaron una mayor extracción en comparación a los tratamientos que recibieron la menor dosis (140 mg.kg^{-1}), estos resultados dan una clara influencia de la adición de N sobre su extracción por la planta. Binti *et al.* (2014) en su evaluación encontraron que todas las fuentes de N a 120 kg.ha^{-1} aumentaron la concentración de N y la absorción en el grano durante el tiempo de aplicación; sin embargo, los fertilizantes recubiertos a una menor dosis de N (60 kg.ha^{-1}) dieron como resultado una baja concentración de N y menor absorción por el grano.

Yoshida (1981) dice que la absorción total de nutrientes de un cultivo es afectada por el contenido de nutrientes en la materia seca y la producción de materia seca. Como se puede observar los tratamientos T1, T2 y T3 presentaron la mayor extracción de N y para las variables contenido de nutrientes en la materia seca y producción de materia seca también obtuvieron los mayores valores corroborando la influencia de estas dos últimas variables sobre la absorción total de nutrientes.

Tabla 24: Efecto de la aplicación de los fertilizantes nitrogenados convencionales, de liberación controlada y lenta sobre la extracción del nitrógeno (g) por la planta

Tratamientos	N extraído		
	Panícula	Follaje	Total
T1-Urea-210 N	0.033 a	0.169 a	0.202 a
T2-Urea Max-210 N	0.033 a	0.155 ab	0.188 a
T3-Sulfato Amonio-210 N	0.032 a	0.180 a	0.212 a
T4-Agrocote 4M-210 N	0.028 ab	0.127 ab	0.155 ab
T5-Agrocote 3M-140 N	0.021 c	0.100 bc	0.121 b
T6-Agrocote 4M-140 N	0.013 d	0.102 bc	0.114 bc
T7-Agrocote 5M-140 N	0.023 bc	0.107 b	0.129 b
T8-Control	0.012 d	0.050 c	0.062 c
CV (%)	8.84	16.18	13.89
Significancia	**	**	**

Las diferencias no significativas entre las medias fueron encontradas usando la prueba de Tukey a $P < 0.05$ ($n=3$)

Altamente significativo (**), Significativo (*), No significativo (NS)

4.13 RECUPERACIÓN APARENTE DE NITRÓGENO (RAN)

El análisis de la variable evidencia diferencias significativas entre los tratamientos; donde el tratamiento con fertilizante convencional T3 (sulfato de amonio) a dosis de 210 mg.kg^{-1} a pesar de haber presentado la mayor recuperación aparente de nitrógeno con 23.8 %, estadísticamente mostró similitud con todos los tratamientos, a excepción del tratamiento con fertilizante de liberación controlada T6 (Agrocote 4M) a dosis de 140 mg.kg^{-1} , el cual obtuvo la menor eficiencia de recuperación aparente de nitrógeno con 12.6 %.

Ésta RAN depende en gran parte de la sincronización entre la demanda de N del cultivo y la cantidad de N liberado de la fuente portadora de N aplicada (Dobermann y Fairhurst, 2000).

En la tabla 25, se pudo observar un comportamiento superior en los tratamientos con fertilizantes convencionales e inhibidor de ureasa (T1, T2 y T3), presentando los mayores

valores de RAN en comparación a los tratamientos con fertilizante de liberación controlada (T4, T5, T6 y T7). Si bien, Delgado y Mosier, Prasad y Power, Hauck y Peoples *et al.* citados por Baligar *et al.* (2001) afirman que los fertilizantes de liberación lenta y controlada presentan ventajas adicionales para aumentar la recuperación de nutrientes en las plantas por proporcionar una fuente de nutrientes duradera, en el presente estudio la influencia fue mayor en la dosis de aplicación que en las fuentes de N usadas.

Entre los tratamientos con fertilizantes de liberación controlada, el tratamiento T7 numéricamente obtuvo la mayor eficiencia de recuperación aparente de N, siendo superior inclusive al tratamiento T4 el cual recibió la mayor dosis de aplicación. Si bien, las altas temperaturas que se presentaron en las etapas iniciales del cultivo acortaron las longevidades de todos los tratamientos con fertilizante de liberación controlada, el tratamiento T7, con la mayor longevidad de gránulo, aportaría el nutriente por un mayor tiempo en comparación a los otros tratamientos, lo que podría haber influenciado en lograr una mayor recuperación aparente de N. Además, Carvalho *et al.* (2016) dicen que al aumentar las dosis de N la tasa de recuperación de nutrientes se reduce, atribuyendo que el aumento de nitrógeno por fertilización podría aumentar su pérdida y reducir su eficacia.

Prasad y De Datta citados por Yoshida (1981) indican que la recuperación aparente de nitrógeno en los trópicos se encuentra entre 30 y 50 %, rango en el que ninguno de los tratamientos llega a alcanzar.

Tabla 25: Efecto de la aplicación de los fertilizantes nitrogenados convencionales, de liberación controlada y lenta sobre la recuperación aparente del N

Tratamientos	RAN (%)
T1-Urea-210 N	22.3 ab
T2-Urea Max-210 N	20.0 ab
T3-Sulfato Amonio-210 N	23.8 a
T4-Agrocote 4M-210 N	14.8 ab
T5-Agrocote 3M-140 N	14.1 ab
T6-Agrocote 4M-140 N	12.6 b
T7-Agrocote 5M-140 N	16.0 ab
CV (%)	21.05
Significancia	*

Las diferencias no significativas entre las medias fueron encontradas usando la prueba de Tukey a $P < 0.05$ (n=3)

Altamente significativo (**), Significativo (*), No significativo (NS)

V. CONCLUSIONES

- La mayor recuperación aparente de N se presentó en los tratamientos con fertilizantes convencionales (Urea granulada y sulfato de amonio) e inhibidor de ureasa (Urea max) y los tratamientos con fertilizante de liberación controlada presentaron los más bajos valores. Los tratamientos que obtuvieron los más altos resultados de recuperación aparente de N, también mostraron un alto efecto en las variables evaluadas (altura de planta, N° de macollos, N° de panículas, biomasa seca, concentración de N y N extraído por la planta); mientras que en los tratamientos con menor recuperación, el efecto en dichas variables fue menor.

VI. RECOMENDACIONES

- Efectuar más estudios con fertilizantes de liberación lenta y controlada en condiciones reales, teniendo en cuenta las características del polímero a usarse.
- Aplicar mayores dosis de aplicación de N para futuros trabajos en el cultivo de arroz en macetas y tener en cuenta la época oportuna de siembra del cultivo (temperaturas óptimas).
- Determinar un mejor método para la colecta de lixiviados durante el desarrollo del cultivo que permita la obtención de datos lo más real posible.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Berrío, LE; Charry, RE; Degiovanni, V; Mejía de Tafur, S; Menjívar JC; Vargas, JP. 2010. Producción eco-eficiente del arroz en América Latina: Tomo I. Degiovanni, V; Martínez, CP; Motta, F (eds.). Cali, Colombia, CIAT. 487 p.
2. Baligar, VC; Fageria, NK; He, ZL. 2001. Nutrient use efficiency in plants. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 32(7): 921-950.
3. Barrios, M; Killorn, R; García J. 2010. Nitrificación del amonio a partir de un fertilizante de liberación controlada y urea convencional en dos suelos de Iowa, EEUU. *Bioagro* 22(3): 193-200.
4. De Battista, JJ. 2006. El Arroz: su cultivo y sustentabilidad en Entre Ríos. Concepción del Uruguay, Argentina, UNER. v. 2, 414 p.
5. Bertsch Hernández, F. 1995. La fertilidad de los suelos y su manejo. San José, Costa Rica, ACCS. 157 p.
6. Binti Said, FN; Yusop, MK; Oad, FC. 2014. Nutrient uptake, pH changes and yield of rice under slow release sulfur-coated urea fertilizers. *Australian Journal of Crop Science* 8(10): 1359-1366.
7. Bruzzone, C. 2012. Situación actual del mejoramiento genético del arroz en América Latina y El Caribe: Caso Perú (en línea). I Taller GRiSP de Mejoradores de Arroz de América Latina y El Caribe. Palmira, Colombia, CIAT. Consultado 13 jul. 2017. Disponible en <https://es.slideshare.net/CIAT/situacion-actual-del-mejoramiento-geneticodelarrozenamericalatinayelcaribecasoperu>

8. Carvalho, M; Nascente, AS; Teixeira PC. 2016. Fertilizers with coated urea in upland rice production and nitrogen apparent recovery. *Bioscience Journal* 32(5): 1155-1164
9. Castro-Luna, I; Gavi-Reyes, F; Peña-Cabriales, JJ; Nuñez- Esscobar, R; Etchevers-Barra, JD. 2006. Eficiencia de recuperación de N y K de tres fertilizantes de lenta liberación. *Terra Latinoamericana* 24 (2): 277-282.
10. CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical, Colombia). 1982. Fertilización nitrogenada del arroz: Guía de estudio para ser usada como complemento de la Unidad Audiotutorial sobre el mismo tema. Cali, Colombia. 40p. (Serie 04SR-09.02).
11. Contreras Fajardo, LI. 2016. Aplicación de fósforo y micronutrientes en un sistema intensivo del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.) cv. Tinajones en Jequetepeque. Tesis Ing. Agr. Lima, Perú, UNALM. 131 p.
12. Cortegana Vargas, M. 2017. Respuesta de fuentes y niveles de nitrógeno en el cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.) en condiciones del Valle Chancay, Lambayeque. Tesis Ing. Agr. Lima, Perú, UNALM. 114 p.
13. De Datta, SK. 1981. Principles and practices of rice production. New York, USA, Wiley. 618 p.
14. Dobermann, A; Fairhurst, TH. 2000. Arroz: Desórdenes nutricionales y manejo de nutrientes. PPI- IRRI. 214 p.
15. Fageria, NK; Baligar VC; Clark, RB. 2006. Physiology of crop production. New York, USA, CRC Press. 356p.
16. Fageria, NK; De Moraes, OP; Dos Santos, AB. 2010. Nitrogen use efficiency in upland rice genotypes. *Journal of Plant Nutrition* 33: 1696-1711.
17. Fageria, NK; Moreira, A; Coelho, AM. 2011. Yield and yield components of upland rice as influenced by nitrogen sources. *Journal of Plant Nutrition* 34: 361-370.

18. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2002. Los fertilizantes y su uso: una guía de bolsillo para los oficiales de extensión. 4 ed. Roma, Italia. 86 p.
19. FEDEARROZ (Federación Nacional de Arroceros). s.f. Manejo integrado del cultivo de arroz (en línea). Colombia. PRODUMEDIOS. 566 p. Consultado 15 dic. 2016. Disponible en <http://es.slideshare.net/javierivan39/manejo-integrado-del-cultivo-del-arroz-libro-digital-1>.
20. Gavidia Cilloniz, AM. 2003. Efecto de la densidad de siembra, dosis y fraccionamiento del nitrógeno y edad de transplante en arroz (*Oryza sativa* L.) cultivar IR 43 Lambayeque. Tesis Ing. Agr. Lima, Perú, UNALM. 85p.
21. Garrity, DP; O'Toole, JC. 1995. Selection for reproductive stage drought avoidance in rice, using infrared thermometry. *Agronomy journal*, 87(4): 773-779.
22. Gros, A; Dominguez Vivancos, A. 1992. Abonos: guía práctica de la fertilización. 8 ed. rev. y ampl. Madrid, España, Mundi-Prensa. 450 p.
23. Heros Aguilar, EC. 2012. Manual técnico de manejo integrado de arroz. Olaya Morales, MB (ed.). La Molina, Perú, EDIAGRARIA. 62 p.
24. INIAP (Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias). 2007. Manual del cultivo de Arroz (en línea). 2 ed. Guayas, Ecuador. 161 p. (Manual n° 66). Consultado 10 mar. 2017. Disponible en <https://books.google.com.pe/books?id=IXozAQAAMAAJ&printsec=frontcover&dq=Manual+del+cultivo+de+Arroz+INIAP&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwi9iqSf6-vVAhWJVyYKHQT7CYEQ6AEIJDA#v=onepage&q=Manual%20del%20cultivo%20de%20Arroz%20INIAP&f=false>.
25. Khush, GS; Virk, PS. 2005. IR varieties and their impact. Los Baños, Philippines. International Rice Research Institute. 163 p.
26. Melaj, M; Daraio, M. 2012. Matrices poliméricas sólidas basadas en quitosano y

- xantano para liberación controlada de fertilizantes. *Avances en Ciencia e Ingeniería* 3(1): 1-9.
27. MINAGRI (Ministerio de Agricultura y Riego, Perú). 2016. Evolución de producción y precios de Arroz. Lima, Perú. 6 p.
28. OEEE (Oficina de Estudios Económicos y Estadísticos, Perú). 2010. Arroz en el Perú. Lima, Perú. 6 p.
29. Oliet, J; Segura, M; Martín, F; Blanco, E; Serrada, R; López, M; Artero, F. 1999. Los fertilizantes de liberación controlada lenta aplicados a la producción de planta forestal de vivero. Efecto de dosis y formulaciones sobre la calidad de *Pinus halepensis* mill. *Investigación agraria. Sistemas y recursos forestales* 8(1): 207-228.
30. Ovando Jiménez, J; Aguilera, RM. 2009. Respuesta del arroz (*Oriza sativa* L.) a la fertilización con diferentes niveles de nitrógeno. Universidad Cristiana de Bolivia 1: 44-51.
31. Ramón Carrión, OD. 2014. Efecto del fertilizante de liberación controlada Cote N2 y convencional en el cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.) en la Cuca. Tesis Ing. Agr. Machala, Ecuador. Universidad Técnica de Machala. 64 p. Consultado 15 Ene. 2017. Disponible en http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/1046/7/CD310_TESIS.pdf.
32. Rimache Artica, M. 2008. Cultivo del Arroz. Miraflores, Perú. MACRO. 112 p.
33. Rodríguez Suppo, F. 1982. Fertilizantes: Nutrición Vegetal. México D.F, México, A.G.T. 157 p.
34. Rojas, C; Alvarado, R; Belmar, C. 1983. Fertilización nitrogenada en Arroz. Efecto sobre algunos parámetros agronómicos del cultivo. *Agricultura Técnica (Chile)* 43(4): 353-357.

35. Rose, R; Haase, DL; Arellano, E. 2004. Fertilizantes de entrega controlada: potencial para mejorar la productividad de la reforestación. *Bosque (Valdivia)* 25(2): 89-100.

36. SEMILLAS EL POTRERO. s.f. Catálogo de productos (en línea). Cajamarca, Perú. Consultado 16 dic. 2016. Disponible en http://www.molicom.com.pe/semillas/web/secciones/prod_ir43.php.

37. Shaviv, A. 2001. Advances in controlled-release fertilizers. *Advances in agronomy* 71: 1-49

38. Stevenson, FJ. 1982. Nitrogen in agricultural soils. Madison, USA. American Society of Agronomy. 600 p.

39. Tong, X; He, X; Duan, H; Han, L; Huang, G. 2018. Evaluation of controlled release urea on the dynamics of nitrate, ammonium, and its nitrogen release in black soils of northeast china. *International journal of environmental research and public health* 15(1): 119.

40. Trenkel, ME. 1997. Improving Fertilizer Use Efficiency: Controlled-Release and Stabilized Fertilizers in Agriculture. Paris, Francia. IFA.

41. Trenkel, ME. 2010. Slow- and Controlled-Release and Stabilized Fertilizers: An Option for Enhancing Nutrient Use Efficiency in Agriculture". 2 ed. Paris, Francia. IFA. Consultado 14 dic. del 2016. Disponible en http://www.fertilizer.org/imis20/images/Library_Downloads/2010_Trenkel_slow%20release%20book.pdf?WebsiteKey=411e9724-4bda-422f-abfc-8152ed74f306&=404%3bhttp%3a%2f%2fwww.fertilizer.org%3a80%2fen%2fimages%2fLibrary_Downloads%2f2010_Trenkel_slow+release+book.pdf.

42. Urbano Terrón, P. 1999. Utilización de fertilizantes con liberación controlada de nutrientes. *Vida rural* (82): 37-40.

43. Vaughan, DA. 1994. The wild relatives of rice: A genetic resources handbook. Los

Baños, Philippines. IRRI. 137 p.

44. Yoshida Shouichi. 1981. Fundamentals of rice crop science. Los Baños, Laguna, Philippines. IRRI. 269 p.

45. Zapata Hernández, RD. 2004. Química de la acidez del suelo (en línea). Medellín, Colombia. 208 p. Consultado 9 mar. 2018. Disponible en <http://www.bdigital.unal.edu.co/1735/>.

VIII. ANEXOS

Anexo 1: Análisis de variancia y prueba de Tukey (0.05) para altura de planta (cm)

a. 32 DDT

F.V	G.L.	S.C.	C.M.	Fcal	Pr > F
Tratamientos	7	268.38	38.34	3.06	0.019
Error	24	300.73	12.53		
Total	31	569.11			
CV (%)	10.61				
Promedio	33.38				

b. 47 DDT

F.V	G.L.	S.C.	C.M.	Fcal	Pr > F
Tratamientos	7	393.28	56.18	6.26	0.0003
Error	24	215.43	8.98		
Total	31	608.71			
CV (%)	7.47				
Promedio	40.13				

c. 63 DDT

F.V	G.L.	S.C.	C.M.	Fcal	Pr > F
Tratamientos	7	457.41	65.34	13.68	<.0001
Error	24	114.63	4.78		
Total	31	572.04			
CV (%)	5.15				
Promedio	42.44				

d. 80 DDT

F.V	G.L.	S.C.	C.M.	Fcal	Pr > F
Tratamientos	7	338.39	48.34	12.83	<.0001
Error	24	90.41	3.77		
Total	31	428.80			
CV (%)	4.37				
Promedio	44.44				

e. 95 DDT

F.V	G.L.	S.C.	C.M.	Fcal	Pr > F
Tratamientos	7	361.61	51.66	16.34	<.0001
Error	24	75.87	3.16		
Total	31	437.48			
CV (%)	1.78				
Promedio	45.44				

f. 108 DDT

F.V	G.L.	S.C.	C.M.	Fcal	Pr > F
Tratamientos	7	334.25	47.75	20.98	<.0001
Error	24	54.63	2.28		
Total	31	388.88			
CV (%)	3.26				
Promedio	46.28				

g. 123 DDT

F.V	G.L.	S.C.	C.M.	Fcal	Pr > F
Tratamientos	7	320.80	45.83	20.06	<.0001
Error	24	54.84	2.28		
Total	31	375.64			
CV (%)	3.26				
Promedio	46.34				

DDT: Días después del trasplante

Anexo 2: Análisis de variancia y prueba de Tukey (0.05) para número de macollos por planta

a. 70 DDT

F.V	G.L.	S.C.	C.M.	Fcal	Pr > F
Tratamientos	7	18.66	2.67	19.64	<.0001
Error	24	3.26	0.14		
Total	31	21.92			
CV (%)	14.09				
Promedio	2.62				

b. 76 DDT

F.V	G.L.	S.C.	C.M.	Fcal	Pr > F
Tratamientos	7	21.25	3.04	19.78	<.0001
Error	24	3.68	0.15		
Total	31	24.93			
CV (%)	13.82				
Promedio	2.83				

c. 84 DDT

F.V	G.L.	S.C.	C.M.	Fcal	Pr > F
Tratamientos	7	24.61	3.52	22.02	<.0001
Error	24	3.83	0.16		
Total	31	28.45			
CV (%)	13.36				
Promedio	2.99				

DDT: Días después del transplante

Anexo 3: Análisis de variancia y prueba de Tukey (0.05) para número de panículas por planta

a. 112 DDT

F.V	G.L.	S.C.	C.M.	Fcal	Pr > F
Tratamientos	7	9.41	1.34	13.17	<.0001
Error	24	2.45	0.10		
Total	31	11.86			
CV (%)	13.31				
Promedio	2.40				

b. 126 DDT

F.V	G.L.	S.C.	C.M.	Fcal	Pr > F
Tratamientos	7	11.25	1.61	15.79	<.0001
Error	24	2.44	0.103		
Total	31	13.69			
CV (%)	12.74				
Promedio	2.50				

c. 140 DDT

F.V	G.L.	S.C.	C.M.	Fcal	Pr > F
Tratamientos	7	12.00	1.71	17.77	<.0001
Error	24	2.32	0.09		
Total	31	14.32			
CV (%)	12.24				
Promedio	2.54				

d. 154 DDT

F.V	G.L.	S.C.	C.M.	Fcal	Pr > F
Tratamientos	7	11.58	1.65	15.84	<.0001
Error	24	2.51	0.10		
Total	31	14.08			

Continuación...

CV (%)	12.43
Promedio	2.60

DDT: Días después del transplante

Anexo 4: Análisis de variancia y prueba de Tukey (0.05) para materia seca (g) de la panícula

F.V	G.L.	S.C.	C.M.	Fcal	Pr > F
Tratamientos	7	18.59	2.66	12.67	<.0001
Error	24	5.03	0.21		
Total	31	23.63			
CV (%)	14.06				
Promedio	3.26				

Anexo 5: Análisis de variancia y prueba de Tukey (0.05) para materia seca (g) del follaje

F.V	G.L.	S.C.	C.M.	Fcal	Pr > F
Tratamientos	7	1402.38	200.34	32.08	<.0001
Error	24	149.87	6.24		
Total	31	1552.24			
CV (%)	9.38				
Promedio	26.64				

Anexo 6: Análisis de variancia y prueba de Tukey (0.05) para conductividad eléctrica ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$) del lixiviado

a. 33 DDT

F.V	G.L.	S.C.	C.M.	Fcal	Pr > F
Tratamientos	7	2.06	0.29	2.11	0.102
Error	16	2.23	0.14		
Total	23	4.29			
CV (%)	17.00				
Promedio	2.19				

b. 60 DDT

F.V	G.L.	S.C.	C.M.	Fcal	Pr > F
Tratamientos	7	6.30	0.90	2.74	0.0452
Error	16	5.26	0.33		
Total	23	11.57			
CV (%)	27.74				
Promedio	2.07				

c. 76 DDT

F.V	G.L.	S.C.	C.M.	Fcal	Pr > F
Tratamientos	7	5.43	0.78	6.46	0.001
Error	16	1.92	0.12		
Total	23	7.35			
CV (%)	17.50				
Promedio	1.98				

d. 94 DDT

F.V	G.L.	S.C.	C.M.	Fcal	Pr > F
Tratamientos	7	2.71	0.39	2.35	0.075
Error	16	2.64	0.16		
Total	23	5.35			
CV (%)	30.96				
Promedio	1.31				

e. 110 DDT

F.V	G.L.	S.C.	C.M.	Fcal	Pr > F
Tratamientos	7	3.99	0.57	3.90	0.011
Error	16	2.34	0.15		
Total	23	6.32			
CV (%)	25.85				
Promedio	1.48				

f. 125 DDT

F.V	G.L.	S.C.	C.M.	Fcal	Pr > F
Tratamientos	7	0.93	0.13	2.00	0.1197
Error	16	1.06	0.07		
Total	23	1.99			
CV (%)	15.19				
Promedio	1.70				

DDT: Días después del trasplante

Anexo 7: Análisis de variancia y prueba de Tukey (0.05) para pH del lixiviado

a. 33 DDT

F.V	G.L.	S.C.	C.M.	Fcal	Pr > F
Tratamientos	7	0.93	0.13	2.94	0.035
Error	16	0.73	0.05		
Total	23	1.66			
CV (%)	2.67				
Promedio	7.98				

b. 60 DDT

F.V	G.L.	S.C.	C.M.	Fcal	Pr > F
Tratamientos	7	1.00	0.14	1.68	0.184
Error	16	1.36	0.09		
Total	23	2.36			
CV (%)	3.96				
Promedio	7.37				

c. 76 DDT

F.V	G.L.	S.C.	C.M.	Fcal	Pr > F
Tratamientos	7	0.07	0.01	1.01	0.463
Error	16	0.15	0.01		
Total	23	0.22			

Continuación...

CV (%)	1.19
Promedio	8.16

d. 94 DDT

F.V	G.L.	S.C.	C.M.	Fcal	Pr > F
Tratamientos	7	0.34	0.048	3.94	0.011
Error	16	0.19	0.01		
Total	23	0.53			

CV (%)	1.37
Promedio	8.07

e. 110 DDT

F.V	G.L.	S.C.	C.M.	Fcal	Pr > F
Tratamientos	7	0.29	0.04	2.68	0.048
Error	16	0.25	0.02		
Total	23	0.54			

CV (%)	1.55
Promedio	8.03

f. 125 DDT

F.V	G.L.	S.C.	C.M.	Fcal	Pr > F
Tratamientos	7	0.14	0.02	1.29	0.318
Error	16	0.24	0.02		
Total	23	0.38			

CV (%)	1.51
Promedio	8.16

DDT: Días después del trasplante

Anexo 8: Análisis de variancia y prueba de Tukey (0.05) para conductividad eléctrica (dS.m⁻¹) del suelo al final del experimento

F.V	G.L.	S.C.	C.M.	Fcal	Pr > F
Tratamientos	7	2.41	0.34	7.18	0.001
Error	16	0.77	0.05		
Total	23	3.18			
CV (%)	7.87				
Promedio	2.78				

Anexo 9: Análisis de variancia y prueba de Tukey (0.05) para el pH del suelo al final del experimento

F.V	G.L.	S.C.	C.M.	Fcal	Pr > F
Tratamientos	7	1.98	0.28	30.19	< .0001
Error	16	0.15	0.01		
Total	23	2.13			
CV (%)	1.35				
Promedio	7.17				

Anexo 10: Análisis de variancia y prueba de Tukey (0.05) para la concentración en ppm de N nítrico en el suelo al final del experimento

F.V	G.L.	S.C.	C.M.	Fcal	Pr > F
Tratamientos	7	0.335	0.047	18.01	<.0001
Error	16	0.043	0.003		
Total	23	0.378			
CV (%)	10.79				
Promedio	0.48				

Anexo 11: Análisis de variancia y prueba de Tukey (0.05) para la concentración en ppm de N amoniacal en el suelo al final del experimento

F.V	G.L.	S.C.	C.M.	Fcal	Pr > F
Tratamientos	7	1382.13	197.45	4.41	0.007
Error	16	716.05	44.75		
Total	23	2098.18			

Continuación...

CV (%)	15.54
Promedio	43.05

Anexo 12: Análisis de variancia y prueba de Tukey (0.05) para la concentración de nitrógeno (%) en panícula al final del experimento

F.V	G.L.	S.C.	C.M.	Fcal	Pr > F
Tratamientos	7	0.36	0.05	7.61	0.0004
Error	16	0.11	0.01		
Total	23	0.47			

CV (%)	11.22
Promedio	0.74

Anexo 13: Análisis de variancia y prueba de Tukey (0.05) para la concentración de nitrógeno (%) en follaje al final del experimento

F.V	G.L.	S.C.	C.M.	Fcal	Pr > F
Tratamientos	7	0.067	0.009	2.12	0.101
Error	16	0.073	0.005		
Total	23	0.141			

CV (%)	14.55
Promedio	0.46

Anexo 14: Análisis de variancia y prueba de Tukey (0.05) para la concentración de fósforo (%) en panícula al final del experimento

F.V	G.L.	S.C.	C.M.	Fcal	Pr > F
Tratamientos	7	0.0059	0.0008	5.14	0.0032
Error	16	0.0026	0.0002		
Total	23	0.0085			

CV (%)	5.60
Promedio	0.23

Anexo 15: Análisis de variancia y prueba de Tukey (0.05) para la concentración de fósforo (%) en follaje al final del experimento

F.V	G.L.	S.C.	C.M.	Fcal	Pr > F
Tratamientos	7	0.0133	0.0019	4.63	0.0053
Error	16	0.0066	0.0004		
Total	23	0.0199			
CV (%)	13.89				
Promedio	0.15				

Anexo 16: Análisis de variancia y prueba de Tukey (0.05) para la concentración de potasio (%) en panícula al final del experimento

F.V	G.L.	S.C.	C.M.	Fcal	Pr > F
Tratamientos	7	0.255	0.036	35.67	<.0001
Error	16	0.016	0.001		
Total	23	0.271			
CV (%)	4.16				
Promedio	0.78				

Anexo 17: Análisis de variancia y prueba de Tukey (0.05) para la concentración de potasio (%) en follaje al final del experimento

F.V	G.L.	S.C.	C.M.	Fcal	Pr > F
Tratamientos	7	1.272	0.182	40.43	<.0001
Error	16	0.072	0.004		
Total	23	1.344			
CV (%)	7.44				
Promedio	0.90				

Anexo 18: Análisis de variancia y prueba de Tukey (0.05) para el nitrógeno extraído (g) en la panícula

F.V	G.L.	S.C.	C.M.	Fcal	Pr > F
Tratamientos	7	0.00158	0.000226	48.84	<0.0001
Error	16	0.00007	0.000005		
Total	23	0.00166			

Continuación...

CV (%)	8.84
Promedio	0.02

Anexo 19: Análisis de variancia y prueba de Tukey (0.05) para el nitrógeno extraído (g) en el follaje

F.V	G.L.	S.C.	C.M.	Fcal	Pr > F
Tratamientos	7	0.039	0.0056	13.88	<0.0001
Error	16	0.006	0.0004		
Total	23	0.045			

CV (%)	16.18
Promedio	0.124

Anexo 20: Análisis de variancia y prueba de Tukey (0.05) para el nitrógeno extraído (g) total

F.V	G.L.	S.C.	C.M.	Fcal	Pr > F
Tratamientos	7	0.055	0.0078	18.53	<0.0001
Error	16	0.007	0.0004		
Total	23	0.062			

CV (%)	13.89
Promedio	0.148

Anexo 21: Análisis de variancia y prueba de Tukey (0.05) para la recuperación aparente del nitrógeno

F.V	G.L.	S.C.	C.M.	Fcal	Pr > F
Tratamientos	6	345.50	57.58	4.18	0.013
Error	14	192.93	13.78		
Total	20	538.43			

CV (%)	21.05
Promedio	17.64

Anexo 22: Análisis de variancia y prueba de Tukey (0.05) para la concentración de nitrato de la solución lixiviada

F.V	G.L.	S.C.	C.M.	Fcal	Pr > F
Tratamientos	7	23.67	3.38	2.86	0.0387
Error	16	18.91	1.18		
Total	23	42.58			
CV (%)	118.12				
Promedio	0.92				

Anexo 23: Análisis de variancia y prueba de Tukey (0.05) para la concentración de amonio de la solución lixiviada

F.V	G.L.	S.C.	C.M.	Fcal	Pr > F
Tratamientos	7	302.75	43.25	8.78	0.0002
Error	16	78.79	4.92		
Total	23	381.54			
CV (%)	7.34				
Promedio	30.24				

Anexo 24: Contenido de nutrientes y absorción total en 2 variedades de arroz en la madurez. IRRI, 1968 temporada seca ^a

Nutrient	Contenido de nutrientes en (%)		Cantidad de nutrientes removidos por 1 cultivo (kg/ha)		Cantidad de nutrientes removidos por 1t de arroz (kg)	
	Straw	Panicle	Total	Panicle	Total	Panicle
IR8						
N	0.60	1.27	164	116	18.9	13.3
P	0.09	0.42	46	38	5.17	4.37
K	3.07	0.68	309	62	35.5	7.13
Peta						
N	0.62	1.07	143	68.5	23.5	11.2
P	0.18	0.20	34.4	12.8	5.67	2.10
K	2.43	0.27	308	17.3	50.6	2.84

^a Los rendimientos de grano de IR8 y Peta fueron 8.70 y 6.09 t / ha, respectivamente (Yoshida, no publicado).

FUENTE: Yoshida, 1981

Anexo 25: Rangos óptimos y niveles críticos para que se presenten deficiencias o toxicidades en los tejidos de plantas de arroz

Elemento	Etapas de crecimiento	Parte de la planta	Rango óptimo	Nivel crítico para deficiencia	Nivel crítico para exceso o toxicidad
N	Macollamiento-IP	Hoja Y	2.9-4.2%	<2.5%	>4.5%
	Floración	Hoja bandera	2.2-2.5%	<2.0%	
	Madurez	Paja	0.6-0.8%		
P	Macollamiento-IP	Hoja Y	0.20-0.40%	<0.10%	>0.50%
	Floración	Hoja bandera	0.20-0.30%	<0.18%	
	Madurez	Paja	0.10-0.15%	<0.06%	
K	Macollamiento-IP	Hoja Y	1.8-2.6%	<1.5%	>3.0%
	Floración	Hoja bandera	1.4-2.0%	<1.2%	
	Madurez	Paja	1.5-2.0%	<1.2%	

IP = Inicio de la

FUENTE: Dobermann y Fairhurst, 2000

Anexo 26: Contenido típico de nutrientes en la paja de arroz a la cosecha

	N	P	K	S	Si
Contenido en la MS de la paja (%)	0.5-0.8	0.07-0.12	1.2-1.7	0.05-0.10	4.7
Remoción con 1 t de paja (kg. ha ⁻¹)	5-8	0.7-1.2	12-17	0.5-10	40-70

MS = Materia seca

FUENTE: Dobermann y Fairhurst, 2000

Anexo 27: Efecto de la dosis de nitrógeno (N) aplicado al suelo en el contenido de N del grano de tres variedades de arroz de siembra directa

Dosis de N (kg.ha ⁻¹)	N en el grano (%) de la variedad		
	IR 42	CICA 8	CICA 4
0	1.00	0.90	0.97
30	0.99	0.93	0.93
60	0.96	1.01	0.96
90	1.04	1.06	1.00
120	1.12	1.05	1.08
150	1.06	1.04	1.01
180	1.15	1.17	1.15
210	1.17	1.19	1.20

FUENTE: Salisbury y Ross (Mejía de Tafur y Menjívar, 2010)