



ASIMILACIÓN DE NITRÓGENO EN TRITICALE MEDIANTE EL USO INTEGRADO DE FERTILIZANTES (^{15}N), ABONOS ORGÁNICOS Y BIOFERTILIZANTES

NITROGEN ASSIMILATION IN TRITICALE THROUGH THE INTEGRATED USE OF FERTILIZERS (^{15}N), ORGANIC AMENDMENTS, AND BIOFERTILIZERS

Oscar Arath Grageda-Cabrera^{1*}, José Antonio Vera-Núñez², Martha Guadalupe Irizar-Garza³,
Mónica Guadalupe Lozano-Contreras⁴, Arturo Díaz-Franco⁵ y Juan Francisco Aguirre-Medina⁶

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Bajío, Celaya, Guanajuato, México. ²Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Depto. de Biotecnología y Bioquímica, Unidad Irapuato, Irapuato, Guanajuato, México. ³INIFAP, Campo Experimental Valle de México, Coatlinchán, Texcoco, Estado de México. ⁴INIFAP, Campo Experimental Mocochá, Mocochá, Yucatán, México. ⁵INIFAP, Campo Experimental Río Bravo, Río Bravo, Tamaulipas, México. ⁶Universidad Autónoma de Chiapas, Facultad de Ciencias Agrícolas Campus IV, Huehuetán, Chiapas, México.

*Autor de correspondencia (grageda.oscar@inifap.gob.mx)

RESUMEN

El uso de abonos orgánicos y biofertilizantes es esencial para mantener la productividad agrícola sostenible. Sin embargo, existe un desconocimiento sobre los efectos agronómicos y la eficiencia del uso de nutrientes cuando se integran fertilizantes orgánicos y sintéticos, práctica conocida como fertilización organomineral. Esta investigación se llevó a cabo con el objetivo de evaluar la asimilación de nitrógeno en triticale mediante el uso integrado de abonos orgánicos, fertilizantes sintéticos y biofertilizantes. En condiciones de invernadero se analizaron tres tipos de compostas y un fertilizante sintético en cuatro combinaciones y seis biofertilizantes previamente seleccionados por su efectividad biológica en estudios preliminares. Los parámetros evaluados incluyeron: peso seco de grano, paja, total e índice de cosecha, nitrógeno (N) en grano, paja y total, índice de cosecha de N (ICN), N derivado del fertilizante (Ndff) y de la composta (Ndcc) y eficiencia en la utilización del N de cada fuente. El diseño experimental fue factorial en bloques completos al azar con cuatro repeticiones. Los resultados mostraron que la inoculación con biofertilizantes incrementó el peso seco de las plantas hasta un 11.8 % en comparación con el testigo sin inocular. Este efecto positivo fue observado de manera general con todos los biofertilizantes, destacando la cepa *Rhizophagus intraradices* (micorriza 3), que incrementó el peso seco hasta 19 %. La inoculación mejoró el contenido de N en las plantas hasta 32 % y aumentó la eficiencia de uso del Ndff hasta 10 %. La producción de biomasa y la asimilación de N fueron óptimas cuando las compostas reemplazaron el 50 % de la fertilización sintética.

Palabras clave: *X. Triticosecale* Wittmack, dilución isotópica, mineralización, uso de nitrógeno.

SUMMARY

The use of organic amendments and biofertilizers is essential for maintaining sustainable agricultural productivity. However, there is a lack of knowledge regarding the agronomic effects and nutrient use efficiency when organic and synthetic fertilizers are combined, a practice commonly referred to as organomineral fertilization. This research was conducted to evaluate nitrogen uptake in triticale through the integrated use of organic fertilizers, synthetic fertilizers, and biofertilizers. Under greenhouse conditions, three types of compost and one synthetic fertilizer were analyzed in four combinations, along with six biofertilizers previously selected for their biological effectiveness in preliminary studies. The parameters evaluated included: dry weight of grain,

straw, total, and harvest index; nitrogen (N) in grain, straw, and total; N harvest index (NHI); N derived from fertilizer (Ndff) and from compost (Ndcc); and N use efficiency from each source. The experimental design was a factorial design in completely randomized blocks with four replications. The results showed that inoculation with biofertilizers increased plant dry weight by up to 11.8 % compared to the uninoculated control. This positive effect was generally observed with all biofertilizers, particularly with the *Rhizophagus intraradices* strain (mycorrhiza 3), which increased dry weight by up to 19 %. Inoculation improved the N content in the plants by up to 32 % and increased Ndff use efficiency by up to 10 %. Biomass production and N assimilation were optimal when compost replaced 50 % of the synthetic fertilizer.

Keywords: *X. Triticosecale* Wittmack, isotopic dilution, nitrogen use efficiency, mineralization.

INTRODUCCIÓN

El triticale (*X. Triticosecale* Wittmack), un híbrido entre el trigo (*Triticum* spp.) y el centeno (*Secale cereale*), sobresale por su adaptación a condiciones climáticas adversas y su alto valor nutritivo. Este cultivo no solo es una fuente importante de carbohidratos, sino que también contribuye a la mejora de la calidad del suelo y a la sostenibilidad de los sistemas agrícolas (Hamid *et al.*, 2024). Sin embargo, el rendimiento depende en gran medida de la optimización de su nutrición, un aspecto que se vuelve crítico ante el cambio climático y el aumento de la demanda global de alimentos y el alza sostenida en los precios de los fertilizantes (Kumar *et al.*, 2018).

La nutrición adecuada del triticale requiere la consideración de las fuentes de nutrientes disponibles, incluyendo los macronutrientes, principalmente los fertilizantes-N, los abonos orgánicos y biofertilizantes. Los abonos orgánicos no solo aportan nutrientes, sino también materia orgánica al suelo, mejorando su estructura, fertilidad y retención de agua, al tiempo que estimulan

la actividad biológica (Urrea *et al.*, 2019). Mediante la mineralización, estos abonos liberan nutrientes de forma gradual, favoreciendo el crecimiento sostenido del cultivo; por su parte, los fertilizantes-N son esenciales para el crecimiento de las plantas. Sin embargo, la sobreaplicación de fertilizantes-N puede ocasionar problemas ambientales, como la contaminación del agua y la emisión de gases de efecto invernadero (Hamid *et al.*, 2024; Sha *et al.*, 2020). Los biofertilizantes han ganado atención por su capacidad para mejorar la disponibilidad de nutrientes y promover el crecimiento de las plantas. De manera general, un biofertilizante se define como un insumo que contiene microorganismos vivos que, al aplicarse al suelo o a la planta, favorecen el crecimiento vegetal y la eficiencia en el uso de nutrientes (Kumar *et al.*, 2018; Schütz *et al.*, 2018). La integración de biofertilizantes en el manejo agronómico del triticale puede incrementar el rendimiento y contribuir a la sostenibilidad.

A pesar de los beneficios de cada una de estas prácticas de fertilización existe poca información respecto a la interacción entre fertilizantes-N, abonos orgánicos y biofertilizantes en la nutrición del triticale (Cazzato *et al.*, 2012). Con el fin de mejorar el rendimiento, el objetivo de este estudio fue evaluar la asimilación de nitrógeno en triticale mediante el uso integrado de abonos orgánicos, fertilizantes sintéticos y biofertilizantes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del experimento, diseño, tratamientos y unidad experimental

La investigación se realizó en el Campo Experimental Bajío (CEBAJ, INIFAP), ubicado en Celaya, Guanajuato, México (20° 35' 06.59" N, 100° 49' 46.84" O; 1769 msnm). Se estableció un experimento en condiciones de invernadero mediante un arreglo factorial ($3 \times 4 \times 6$) en un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones. En total se evaluaron 72 tratamientos utilizando triticale (var. Bicentenario) como cultivo de interés, con una densidad de siembra de 120 kg ha⁻¹. Cada unidad experimental se estableció en camas de producción, conformadas por cuatro surcos con dimensiones de 1.5 m de ancho, 1.0 m de largo y 0.30 m de altura. La parcela útil correspondió a un área de 1.20 m². El suelo utilizado fue un vertisol pélico con un pH (1:2 suelo:agua) de 7.05 determinado por potenciometría, un contenido de materia orgánica de 2.10 % estimado mediante el método de Walkley y Black y una textura franca arcillo limosa determinada por el método del hidrómetro (Jahn *et al.*, 2006).

Arreglo de tratamientos

Los factores fueron: tipo de composta (3 niveles), porcentaje de sustitución del fertilizante sintético por composta (4 niveles) y tipo de biofertilizante (6 niveles). Los abonos orgánicos fueron: composta 1, composta 2 y composta 3. La composta 1 fue elaborada artesanalmente en el INIFAP, Campo Experimental Bajío mediante compostaje aeróbico de estiércol bovino y residuos vegetales en proporción 60:40, con volteo quincenal, control de humedad 40–60 % y un periodo de maduración de 90 días. Sus características fueron humedad 17.75 %, MO 24.32 %, C:N 8.73, pH 7.70, CE 17.620 dS/m, N total 1.53 %, DA 0.50 g/cm³ y CIC 72 cmol(+)-kg⁻¹). La composta 2 es comercial registrada Humibac®, derivada de estiércol estabilizado, con humedad 13.50 %, MO 15.91 %, C:N 9.30, pH 8.72, CE 17.060 dS/m, N total 0.94 %, DA 0.60 g/cm³ y CIC 48 cmol(+)-kg⁻¹). La composta 3 es lombricomposta comercial Humibac® elaborada a partir de estiércol bovino, con humedad 15.64 %, MO 19.09 %, C:N 10.81, pH 8.94, CE 18.64 dS/m, N total 0.97 %, DA 0.55 g/cm³ y CIC 58 cmol(+)-kg⁻¹). Los otros tratamientos fueron seis biofertilizantes: micorriza 1 (*Sclerocystis clavispora*), micorriza 2 (*Scutellospora scutata*), micorriza 3 (*Rhizophagus intraradices*), bacteria 1 (*Azospirillum* sp.), bacteria 2 (*Pseudomonas* sp.) y bacteria 3 (*Bacillus* sp.). La concentración aproximada de las cepas micorrízicas fue de 60 esporas por gramo (Gerdemann y Nicolson, 1963) y la de las cepas bacterianas 10⁹ células mL⁻¹ (Swandhi *et al.*, 2019). Además, se generaron cuatro tratamientos, que fueron el porcentaje de sustitución del fertilizante sintético por composta (0, 25, 50, y 75 %). La fertilización se aplicó con la dosis recomendada para el triticale (130-60-00), utilizando sulfato de amonio enriquecido con 5.025 % de átomos en exceso de ¹⁵N.

Variables evaluadas

Los parámetros evaluados por unidad experimental fueron: peso seco de grano (PSG), paja (PSP), total (PST) e índice de cosecha (IC, calculado como PSG/PST). El peso seco se expresó en gramos por parcela útil, el material vegetal se secó en estufa de aire forzado a 70 °C hasta peso constante. Otras variables fueron nitrógeno (N) en grano (NG), paja (NP), total (NT) e índice de cosecha de N (ICN), N derivado del fertilizante (Nddf), de la composta (Ndcc) y uso eficiente de N de cada fuente (UENDDF y UENDDC).

Inoculación

La inoculación con los biofertilizantes se realizó en el momento de la siembra. En las muestras marcadas con ¹⁵N se determinó el contenido total de N y la relación isotópica

$^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ mediante espectrometría de masas, utilizando un espectrómetro de masas de relaciones isotópicas IR-MS SERCON 20-20, conforme a la metodología descrita por Barrie y Prosser (1996). La eficiencia de asimilación de Nddf, Nddc y UEN se calculó mediante la técnica de dilución isotópica de ^{15}N (Zapata, 1990).

Análisis estadístico

Los datos se sometieron a un análisis de varianza estándar. Cuando la prueba de F resultó significativa se aplicó la prueba de comparación de medias mediante la diferencia mínima significativa (DMS), con un nivel de significancia de $P \leq 0.05$. Para complementar el análisis se aplicó un Análisis de Componentes Principales (ACP), técnica que permite reducir la dimensionalidad de los datos e identificar patrones y relaciones clave entre variables (Jolliffe y Cadima, 2016; Abdi y Williams, 2010). Los datos fueron previamente estandarizados para asegurar la comparabilidad entre variables (Abdi y Williams, 2010). Los análisis se realizaron con el programa SAS® OnDemand for Academics (SAS, 2022).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Peso seco

Los resultados del efecto de los tipos de composta, dosis de aplicación y tipos de biofertilizante sobre el peso seco se presentan en el Cuadro 1. Todos los factores estudiados tuvieron un efecto significativo sobre las variables analizadas. Respecto al tipo de composta, la composta artesanal produjo un rendimiento significativamente superior en PSP, PSG y PST en comparación con la composta comercial y la lombricomposta. El IC mostró variaciones significativas entre tipos de composta, siendo superior con la composta artesanal en comparación con la composta comercial y la lombricomposta, lo que refleja una mayor eficiencia en la conversión de biomasa en grano. Compostas de alta calidad aumentan el peso seco y mejoran la calidad del grano, al optimizar las propiedades fisicoquímicas del suelo y facilitar la disponibilidad de nutrimentos (Celestina *et al.*, 2019). Por otro lado, IC es un indicador de la eficiencia de un cultivo, al reflejar la proporción de biomasa convertida en producto disponible para la cosecha. Este comportamiento sugiere que la composta artesanal generó condiciones más favorables para el crecimiento y desarrollo del cultivo, probablemente por su mayor contenido de N y materia orgánica, así como por su efecto positivo sobre las propiedades físicas y biológicas del suelo.

Los distintos porcentajes de composta en sustitución del fertilizante-N afectaron el peso seco y el IC, mostrando que

influyen en el rendimiento y en la distribución de la biomasa. Los valores más altos de PSP, PSG y PST se observaron en el tratamiento sin composta (100 % fertilizante-N), lo que indica una respuesta superior en términos absolutos de biomasa; sin embargo, los tratamientos con 25 % y 50 % de composta mantuvieron valores similares en PSG y mostraron mayor eficiencia fisiológica al equilibrar rendimiento y uso de nutrimentos. A medida que aumentó la proporción de composta, el PSP disminuyó. La aplicación de un alto porcentaje de composta afectó negativamente la producción de paja, posiblemente porque la materia orgánica no proporcionó el mismo nivel de N que el fertilizante-N. Un exceso de materia orgánica puede limitar la disponibilidad de N debido a la inmovilización, afectando negativamente la producción de biomasa (Sher *et al.*, 2022). En el PSG, los tratamientos con 50 % de composta o menos mostraron el peso más alto. Los valores indicaron que este nivel de aplicación proporcionó un equilibrio adecuado de N para el desarrollo óptimo del grano. Los PST mostraron una tendencia similar al PSG. El tratamiento con 0 % de composta mostró el mayor PST, indicando que los fertilizantes sintéticos pueden ser más efectivos, ya que proporcionan nutrimentos de forma más inmediata, en comparación con la liberación más lenta y dependiente de las condiciones ambientales de las compostas (Lalević *et al.*, 2022). El IC mostró su valor más alto en el tratamiento con 75 % de composta. Un mayor IC con menor rendimiento se debe a que, en condiciones desfavorables, tal como poca disponibilidad de N, las plantas asignan más biomasa a los órganos reproductivos para asegurar la reproducción, movilizand nutrimentos hacia los granos a costa del crecimiento vegetativo (McGoverin *et al.*, 2011).

En cuanto al peso seco (PS) y al índice de cosecha (IC) en función del tipo de biofertilizante, los resultados mostraron que el tratamiento sin inoculación presentó el menor PS. En contraste, la inoculación con biofertilizantes incrementó el peso seco de las plantas hasta en 11.8 % en comparación con el tratamiento sin inocular, efecto observado de manera general en todos los inoculantes evaluados. Entre ellos, los tratamientos con micorrizas mostraron los mayores incrementos, destacando *Rhizophagus intraradices* (micorriza 3), que incrementó el PS hasta en 19 %. Se destaca la importancia de los biofertilizantes en el aumento de la biomasa y el rendimiento en cultivos como el triticale, donde la aplicación de micorrizas puede mejorar la absorción de nutrimentos y el crecimiento de las plantas (Cazzato *et al.*, 2012; Martin y van Der Heijden, 2024).

Todas las interacciones evaluadas entre los tratamientos presentan significancia, lo que indica que los efectos de estos factores no son independientes, sino que se influyen mutuamente. El ACP aplicado al PS permitió identificar la

Cuadro 1. Efectos principales del peso seco e índice de cosecha por parcela útil del triticale en función del tipo de composta, sustitución de N del fertilizante con abono orgánico y tipos de biofertilizantes.

Factor	PSP (g)	PSG (g)	PST (g)	IC
Tipo de Composta				
Composta 1	213.19 a*	109.56 a	322.75 a	0.34 a
Composta 2	212.86 a	104.05 b	316.91 b	0.33 b
Composta 3 (vermicomposta)	207.20 b	100.24 c	307.45 c	0.33 b
DMS	3.49	1.37	4.05	0.004
Dosis de Aplicación				
75	143.22 d	83.41 b	226.63 d	0.36 a
50	201.12 c	111.46 a	312.59 c	0.35 b
25	246.91 b	111.52 a	358.44 b	0.30 d
0	253.08 a	112.07 a	365.15 a	0.31 c
DMS	4.03	1.58	4.68	0.004
Tipos de Biofertilizantes				
Sin Inoculante	179.36 c	97.42 d	276.79 c	0.361 a
Micorriza 1	213.38 b	103.38 c	317.26 b	0.333 c
Micorriza 2	215.29 b	105.17 c	320.43 b	0.334 b
Micorriza 3	224.01 a	104.88 c	328.90 a	0.326 d
Bacteria 1	216.21 b	105.75 b	321.96 b	0.337 b
Bacteria 2	213.88 b	107.35 a	321.24 b	0.340 b
Bacteria 3	215.49 b	107.86 a	323.36 a	0.335 b
DMS	5.33	2.09	6.19	0.006

*Medias dentro del mismo factor con letras iguales en cada columna no son significativamente diferentes. PSP: peso seco de paja, PSG: peso seco de grano, PST: peso seco total, IC: Índice de cosecha.

variabilidad en función de los tratamientos de composta, dosis de aplicación y biofertilizantes (Cuadro 2).

El CP1 explica el 69.14 % de la variabilidad total y está asociado con el PST, PSP y el PSG. Estas variables dominantes en CP1 reflejan el impacto de los tipos de composta y las dosis de aplicación, indicando una relación directa con el PST y el PG, que son los factores dominantes en el rendimiento de triticale. El CP1 sugiere que los tratamientos con compostas en dosis intermedias tienen un efecto positivo en el rendimiento del cultivo de triticale.

El CP2 explica el 30.26 % de la variabilidad y está asociado con el IC y el PSG. Este componente muestra

cómo los biofertilizantes y dosis moderadas de composta influyen en la eficiencia de la cosecha. La aplicación de biofertilizantes optimiza el uso de nutrientes en el suelo, lo que puede mejorar la eficiencia de cosecha al maximizar la transferencia de nutrientes hacia el grano (Schütz et al., 2018).

El ACP indica que los biofertilizantes optimizaron la biomasa total y la eficiencia en la producción de grano en triticale. Estos resultados ponen a las micorrizas como el biofertilizante más eficaz del estudio, en particular en tratamientos con composta en proporciones del 50 % al 75 %.

Cuadro 2. Componentes Principales (CP) y Varianza Explicada.

Variable	CP1	CP2
PSP*	- 0.594	0.116
PSG	- 0.392	- 0.685
PST	- 0.597	- 0.108
IC	0.371	- 0.711
Varianza Explicada (%)	69.14	30.26

PSP: peso seco de paja, PSG: peso seco de grano, PST: peso seco total, IC: Índice de cosecha.

Nitrógeno total

La comparación de medias de los efectos principales sobre el contenido de N y el ICN en función del tipo de composta, dosis de aplicación y biofertilizantes se presentan en el Cuadro 3. La composta artesanal presentó los mayores valores de N en paja, grano y total (1.59, 2.97 y 4.56 g, respectivamente), así como un ICN de 0.65, lo que sugiere una mayor eficiencia en la conversión del N aplicado hacia el grano cuando se combina con fertilizante sintético. Este comportamiento podría estar asociado con su reciente elaboración y el uso de materiales frescos, factores que pueden favorecer una mayor proporción de N potencialmente mineralizable y una actividad biológica más activa en el suelo (Montgomery y Biklé, 2021; Wang *et al.*, 2020).

Las dosis más bajas de composta (25 % y 50 %, complementadas con fertilizante-N en 75 % y 50 %, respectivamente) alcanzaron un ICN de 0.66, lo que indica una mayor eficiencia en la partición del N hacia el grano, sin disminuir el rendimiento. La dosis completa de fertilizante (sin composta) resultó en un ICN más bajo (0.62); así, el complemento de fertilizante sintético optimizó el balance entre N en biomasa y grano, especialmente en dosis medias. La diferencia en la liberación de N entre compostas y fertilizantes sintéticos puede ser atribuida a la mineralización más lenta de N en las compostas, que puede no ser suficiente para satisfacer las necesidades inmediatas del cultivo (Janusauskaite y Ciuberkis, 2010). Es crucial considerar que, si bien los fertilizantes sintéticos pueden proporcionar resultados inmediatos y altos niveles de N, su uso continuo sin considerar la adición de materia orgánica tiene repercusiones negativas sobre la calidad del suelo y la biodiversidad microbiana, lo que afecta a largo plazo la productividad agrícola (Tahat *et al.*, 2020).

El análisis de los tipos de biofertilizantes indicó que el testigo sin inoculación muestra los valores más bajos de N en grano, paja y total, lo que sugiere una limitación en la disponibilidad de N; sin embargo, el ICN fue el mayor. Este

fenómeno puede explicarse como una adaptación de la planta a condiciones de bajo suministro de N, priorizando la partición hacia los órganos reproductivos para asegurar la reproducción, lo cual eleva el ICN. En contraste, la inoculación con biofertilizantes incrementó el contenido total de N sin alterar el ICN de manera significativa. Esta respuesta sugiere que la simbiosis mejora tanto la absorción de N como su translocación hacia el grano, optimizando así el rendimiento del cultivo (Kalamulla *et al.*, 2022). Las micorrizas pueden mejorar no solo la disponibilidad de N y P, sino también la eficiencia general del uso de nutrimentos en los cultivos (Khan *et al.*, 2022).

El ACP aplicado al contenido de N se presenta en el Cuadro 4. Los dos primeros componentes principales explican conjuntamente el 98.6 % de la variabilidad total de los datos. El CP1 se asoció con el N total, NP y NG, por lo que sugiere que CP1 representa la acumulación general de N en la biomasa del cultivo, reflejando la capacidad de los tratamientos para incrementar el contenido total de N en la planta. Este componente es importante cuando las compostas se aplican a dosis medias y complementadas con fertilizante sintético, lo cual facilita una disponibilidad continua de N en el suelo para el desarrollo del cultivo. El CP2 se caracterizó principalmente por el ICN, indicador clave de la eficiencia de uso del N. Un alto valor en ICN implica que el N absorbido se destina en mayor proporción al grano, lo cual es benéfico en cultivos de grano como el triticale.

La dosis de aplicación influyó significativamente en los valores de CP1 y CP2. En el caso de CP1, las dosis intermedias (50 %) de composta se correlacionaron con una mayor acumulación de N en la biomasa. Los tratamientos con composta al 50 %, junto con biofertilizantes, maximizan la eficiencia de uso de N, favoreciendo su acumulación en el grano. Esta combinación asegura que el N disponible se aproveche mejor, optimizando el uso de insumos (Du *et al.*, 2022; Chivenge *et al.*, 2021).

Nitrógeno derivado del fertilizante y de la composta

En el Cuadro 5 se presentan los efectos de los tipos de composta, dosis de aplicación y uso de biofertilizantes en la eficiencia de asimilación del N proveniente de diversas fuentes en triticale. El NDDF fue significativamente mayor con composta 3 (44.18 %), lo que indica que esta composta favorece la absorción del fertilizante sintético debido a una menor oferta de N orgánico, a diferencia de la composta 1 (31.84 %), que aporta más N orgánico. La calidad de la composta puede influir en su capacidad para liberar N de manera eficiente en el suelo (Karthik *et al.*, 2022). Entre las dosis, el 0 % de composta (solo fertilizante) tuvo el mayor

Cuadro 3. Efectos principales del contenido de nitrógeno (N) e índice de cosecha de nitrógeno (ICN) por parcela útil del triticale en función del tipo de composta, dosis de sustitución de N del fertilizante con abono orgánico y tipos de biofertilizantes.

Factor	N Paja (g)	N Grano (g)	N Total (g)	ICN
Tipo de Composta				
Composta Artesanal	1.59 a*	2.97 a	4.56 a	0.65 a
Composta Humibac	1.42 b	2.58 b	4.01 b	0.64 a
VMC Humibac	1.28 c	2.23 c	3.51 c	0.63 b
DMS	0.020	0.039	0.50	0.004
Dosis de Aplicación				
75	0.97 d	1.97 d	2.95 d	0.66 a
50	1.35 c	2.68 c	4.04 c	0.66 a
25	1.66 b	2.79 b	4.46 b	0.63 b
0	1.73 a	2.93 a	4.66 a	0.62 c
DMS	0.023	0.045	0.058	0.005
Tipos de Biofertilizantes				
Sin Inoculante	1.06 c	2.13 d	3.20 d	0.65 a
Micorriza 1	1.47 b	2.61 c	4.09 c	0.64 cd
Micorriza 2	1.48 b	2.64 bc	4.13 bc	0.64 cd
Micorriza 3	1.47 b	2.70 ab	4.18 ab	0.64 b
Bacteria 1	1.48 b	2.66 bc	4.15 abc	0.64 bc
Bacteria 2	1.54 a	2.67 bc	4.22 a	0.63 d
Bacteria 3	1.48 b	2.74 a	4.23 a	0.64 bc
DMS	0.031	0.061	0.076	0.006

*Medias dentro del mismo factor con letras iguales en cada columna no son significativamente diferentes. DMS P < 0.05. ICN: Índice de cosecha de nitrógeno.

NDDF en la planta (62.69 %), confirmando la dependencia del fertilizante en ausencia de composta. Esto confirma que los fertilizantes sintéticos proporcionan N de manera más inmediata y concentrada, facilitando su absorción en comparación con las enmiendas orgánicas (Singh *et al.*, 2017). Los tratamientos con biofertilizantes mostraron mayores valores de NDDF frente al tratamiento sin inoculante, mostrando que los biofertilizantes optimizan la absorción del fertilizante sin reducir la dependencia del mismo, lo que resulta en una menor necesidad de insumos químicos.

Para el NDDC, la composta artesanal presentó el valor más alto (49.95 %), lo que puede atribuirse a su mejor calidad fisicoquímica, caracterizada por un mayor contenido de materia orgánica, adecuada relación C:N, pH neutro, buena humedad y una capacidad de intercambio catiónico elevada. Estas condiciones favorecen la

mineralización y disponibilidad progresiva del nitrógeno, promoviendo su eficiencia de liberación hacia el cultivo. La lombricomposta, en cambio, mostró un menor NDDC (31.60 %) y fue menos efectiva como fuente de N, lo que indica que la composición y calidad de la materia orgánica en la composta pueden influir directamente en la capacidad del suelo para retener y suministrar N a las plantas (Masunga *et al.*, 2016; Thomas *et al.*, 2019). La dosis de 75 % resultó en el mayor NDDC (56.42 %), indicando que una proporción alta de composta es esencial para que el cultivo aproveche su N. Los tratamientos con biofertilizantes también mejoraron el NDDC, al promover la mineralización del N de la composta y facilitar su absorción. El uso de compostas de alta calidad puede no solo proporcionar N, sino también mejorar la estructura del suelo y aumentar su capacidad de retención de agua, factores importantes para el cultivo de triticale (Sosa *et al.*, 2016; Verma *et al.*, 2020).

Cuadro 4. Componentes principales (CP) y varianza explicada.

Variable	CP1	CP2
N* Paja	- 0.572	0.307
N Grano	- 0.544	- 0.385
N Total	- 0.603	- 0.114
ICN	0.119	- 0.863
Varianza Explicada (%)	66.47	32.09

*N: nitrógeno, ICN: Índice de cosecha de nitrógeno.

La UEFN fue más alta con las compostas 2 y 3 (30.46 % y 30.39 %, respectivamente), mientras que la composta 1 tuvo el menor valor (26.26 %). La composta 1 presentó el mayor contenido de N, mientras que las compostas 2 y 3 mostraron concentraciones menores. Los biofertilizantes también incrementaron la UEFN en comparación con el tratamiento sin inoculante. La aplicación de diferentes fuentes de N y biofertilizantes puede mejorar la eficiencia del uso de nutrientes al facilitar una mayor movilización de los mismos dentro del suelo y la planta (Schütz *et al.*, 2018; Singh *et al.*, 2020).

El UENDDC fue más alto con la composta 1 (40.38 %), por

Cuadro 5. Efectos principales para los porcentajes de asimilación de N en función del tipo de composta, dosis de sustitución de N del fertilizante con abono orgánico y tipos de biofertilizantes.

Factor	N Total (%)	NDDF (%)	NDDC (%)	UEFN (%)	UENDDC (%)
Tipo de Composta					
Composta Artesanal	100	31.84 c	49.95 a	26.26 b	40.38 a
Composta Humibac	100	41.17 b	36.38 b	30.46 a	32.43 b
VMC Humibac	100	44.18 a	31.60 c	30.39 a	25.78 c
DMS	--	0.963	1.020	1.051	1.393
Dosis de Aplicación					
75	100	27.63 d	56.42 a	32.73 a	50.51 a
50	100	31.52 c	52.13 b	27.80 b	48.01 b
25	100	34.42 b	48.70 c	22.77 c	32.94 c
0	100	62.69 a	0.00 d	32.85 a	0.00 d
DMS	--	1.112	1.178	1.214	1.60
Tipos de Biofertilizantes					
Sin Inoculante	100	33.42 b	34.31 b	21.06 b	27.62 c
Micorriza 1	100	40.09 a	40.18 a	29.68 a	33.59 ab
Micorriza 2	100	39.98 a	40.60 a	30.03 a	35.20 a
Micorriza 3	100	40.16 a	39.62 a	30.68 a	33.44 ab
Bacteria 1	100	39.73 a	39.95 a	29.82 a	33.06 b
Bacteria 2	100	40.01 a	40.24 a	30.83 a	33.42 ab
Bacteria 3	100	40.07 a	40.26 a	31.15 a	33.73 ab
DMS	--	1.47	1.55	1.606	2.129

*Medias dentro del mismo factor con letras iguales en cada columna no son significativamente diferentes. DMS $P < 0.05$. NDDF: nitrógeno derivado del fertilizante, NDDC: nitrógeno derivado de la composta, UEFN: uso eficiente del fertilizante nitrogenado, UENDDC: uso eficiente del nitrógeno derivado de la composta.

lo que fue la mejor fuente para un UEN orgánico. Las dosis de composta con el 75 % mostraron el mayor UENDDC (50.51 %), destacando la importancia de proporciones altas para optimizar el uso del N de la composta. Asimismo, los tratamientos inoculados con biofertilizantes superaron el UENDDC al tratamiento sin inocular. Se ha sugerido que dosis altas de composta aumentan la actividad microbiana en el suelo y los biofertilizantes facilitan la mineralización del N, favoreciendo su disponibilidad para la planta (Masunga *et al.*, 2016).

El mejor desempeño observado con la composta artesanal en varios parámetros, incluido el mayor NDDC, puede vincularse con principios agroecológicos que promueven el uso eficiente de recursos locales disponibles, como el estiércol y residuos vegetales generados en el propio sistema agrícola. Esta práctica no sólo reduce la dependencia de insumos externos, sino que también mejora la funcionalidad del agroecosistema, alineándose con el enfoque de sostenibilidad. Dicho resultado fortalece la pertinencia técnica y ecológica de este tratamiento en esquemas agrícolas de bajos insumos y economía circular (Montgomery *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2020).

El ACP integra aspectos relacionados con la eficiencia en el uso de N de las diferentes fuentes aplicadas (Cuadro 6). Los dos primeros componentes principales explican conjuntamente el 98.74 % de la varianza total en las variables evaluadas.

El CP1 explica el 70.50 % de la varianza en los datos. Este componente representa un índice general de eficiencia en el uso del N aplicado mediante compostas y fertilizantes, con énfasis en las variables Nddc y Nddf. El Nddf indica que el aumento en la cantidad de N sintético mejora el rendimiento del triticale en términos de absorción de N, por lo que incrementan la disponibilidad de N mineral rápidamente asimilable (Kubota *et al.*, 2018). El Nddc sugiere que la eficiencia en la utilización del N de las

compostas se comporta inversamente con el N sintético. Esto implica que los tratamientos que incluyen compostas en combinación con dosis bajas de fertilizante sintético pueden generar un mayor aprovechamiento del N orgánico, dado que la mineralización de este tipo de N ocurre de manera progresiva, mejorando la disponibilidad de nutrientes y favoreciendo una liberación controlada de N al suelo (Masunga *et al.*, 2016). La composta 1, aplicada al 50 % y complementada con biofertilizantes específicos (como micorrizas), se adapta a la demanda del cultivo y reduce la dependencia de los fertilizantes sintéticos.

El análisis del CP2 explica un 28.24 % de la varianza en los datos, reflejando aspectos específicos del uso eficiente del N con relación a la composta y el fertilizante sintético. La aplicación de compostas en dosis moderadas (50 %) logra un equilibrio donde el N de la composta y del fertilizante se complementan, permitiendo utilizar ambas fuentes de N con mayor eficiencia.

A pesar de la efectividad de los fertilizantes sintéticos, para aumentar rápidamente los niveles de N disponibles para las plantas, su uso excesivo está asociado con efectos negativos en la fertilidad del suelo y la contaminación ambiental. Los resultados demuestran que combinar composta y fertilizantes sintéticos optimiza el uso de N y reduce la dependencia de insumos químicos.

CONCLUSIONES

La combinación de compostas en niveles de sustitución del 50–75 % de la fertilización sintética de N optimizó la asimilación de N y aumentó significativamente el rendimiento del triticale. Los tratamientos con micorrizas, sobre todo micorriza 3 (*Rhizophagus intraradices*), incrementaron el peso seco hasta 19 % en comparación con los testigos no inoculados, así como la eficiencia de uso del N, particularmente en las condiciones de aplicación del 50 % de compostas, lo que contribuyó a un mayor peso seco de la planta y un mejor índice de cosecha. La estrategia que combinó compostas y fertilizante sintético, enmarcada en la fertilización organomineral, permitió un equilibrio entre disponibilidad de nutrientes y liberación controlada, mejorando la absorción de N sin comprometer el rendimiento, lo que reduce la necesidad de fertilizantes sintéticos y disminuye el impacto ambiental. Estos resultados resaltan el potencial de un manejo integrado que optimice el uso de recursos y disminuya la dependencia de fertilizantes sintéticos, estableciendo una vía efectiva para aumentar la productividad y la sostenibilidad en el cultivo de triticale.

Cuadro 6. Componentes principales y varianza explicada.

Variable	CP1	CP2
N Total	- 0.0000	0.0000
NDDF	0.5853	- 0.1066
NDDC	- 0.5916	- 0.0595
UEFN	0.2964	- 0.8116
UENDDC	- 0.4686	- 0.5713
Varianza Explicada (%)	70.4979	28.2391

BIBLIOGRAFÍA

- Abdi H. and L. J. Williams (2010) Principal component analysis. Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics 2: 433-459.
- Barrie A. and S. J. Prosser (1996) Automated analysis of light-element stable isotopes by isotope ratio mass spectrometry. In: Mass Spectrometry of Soils, Boutton T. W. and S. Yamasaki (eds.); Marcel Dekker, New York. pp. 1-46.
- Cazzato E., V. Laudadio and V. Tufarelli (2012) Effects of harvest period, nitrogen fertilization and mycorrhizal fungus inoculation on triticale ($\times$ Triticosecale Wittmack) forage yield and quality. *Renewable Agriculture and Food Systems* 27: 278-286, <https://doi.org/10.1017/S1742170511000482>
- Celestina C., J. R. Hunt, P. W. Sale and A. E. Franks (2019) Attribution of crop yield responses to application of organic amendments: A critical review. *Soil and Tillage Research* 186: 135-145, <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.10.002>
- Chivenge P., S. Sharma, M. A. Bunquin and J. Hellin (2021) Improving nitrogen use efficiency-a key for sustainable rice production systems. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 5: 737412, <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.737412>
- Du T. Y., H. Y. He, Q. Zhang, L. Lu, W. J. Mao and M. Z. Zhai (2022) Positive effects of organic fertilizers and biofertilizers on soil microbial community composition and walnut yield. *Applied Soil Ecology* 175: 104457, <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104457>
- Gerdemann J. W. and T. H. Nicolson (1963) Spores of mycorrhizal 'Endogone' extracted from soil by wet sieving and decanting. *Transacciones de la Sociedad Micológica Británica* 46:235-244, [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(63\)80079-0](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(63)80079-0)
- Hamid D., D. Kathuria, S. Gautam, S. Suri and A. K. Jaiswal (2024) Triticale. In: Cereals and Nutraceuticals, Singh J., S. Kaur, P. Rasane and J. Singh (eds); Springer, Singapore, https://doi.org/10.1007/978-981-97-2542-7_8
- Jahn R., H. P. Blume, V. B. Asio, O. Spaargaren and P. Schad (2006) Guidelines for soil description. FAO. 109 p, <https://www.fao.org/4/a0541e/a0541e.pdf>
- Janusauskaite D. and S. Ciuberkis (2010) Effect of different soil tillage and organic fertilizers on winter triticale and spring barley stem base diseases. *Crop Protection*, 29: 802-807, <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2010.04.002>
- Jolliffe I. T. and J. Cadima (2016) Principal component analysis: a review and recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 374(2065), 20150202, <https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0202>
- Kalamulla R., S. C. Karunarathna, S. Tibpromma, M. C. Galappaththi, N. Suwannarach, S. L. Stephenson, S. Asad, Z. S. Salem and N. Yapa (2022) Arbuscular mycorrhizal fungi in sustainable agriculture. *Sustainability* 14: 12250, <https://doi.org/10.3390/su141912250>
- Karthik R., D. Dhaker and L. Raising (2022) Performance of cereals under need-based nitrogen management strategies: A review. *Agricultural Reviews* 43: 320-326, <https://doi.org/10.18805/ag.R-2312>
- Khan Y., S. Shah and H. Tian (2022) The roles of arbuscular mycorrhizal fungi in influencing plant nutrients, photosynthesis, and metabolites of cereal crops - A review. *Agronomy* 12: 2191, <https://doi.org/10.3390/agronomy12092191>
- Kubota H., M. Iqbal, S. Quideau, M. Dyck and D. Spaner (2018) Agronomic and physiological aspects of nitrogen use efficiency in conventional and organic cereal-based production systems. *Renewable Agriculture and Food Systems* 33: 443-466, <https://doi.org/10.1017/S1742170517000163>
- Kumar M. S., G. C. Reddy, M. Phogat and S. Korav (2018) Role of bio-fertilizers towards sustainable agricultural development: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry* 7: 1915-1921.
- Lalević D., B. Miladinović, M. Biberdžić, A. Vuković and L. Milenković (2022) Differences in grain yield and grain quality traits of winter triticale depending on the variety, fertilizer and weather conditions. *Applied Ecology & Environmental Research* 20:3779-3792, http://dx.doi.org/10.15666/aeer/2005_37793792
- Martin F. M. and M. G. van Der Heijden (2024) The mycorrhizal symbiosis: research frontiers in genomics, ecology, and agricultural application. *New Phytologist* 242: 1486-1506, <https://doi.org/10.1111/nph.19541>
- Masunga R. H., V. N. Uzokwe, P. D. Mlay, I. Odeh, A. Singh, D. Buchan and S. De Neve (2016) Nitrogen mineralization dynamics of different valuable organic amendments commonly used in agriculture. *Applied Soil Ecology* 101: 185-193, <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.01.006>
- McGoverin C. M., F. Snijders, N. Muller, W. Botes, G. Fox and M. Manley (2011) A review of triticale uses and the effect of growth environment on grain quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 91: 1155-1165, <https://doi.org/10.1002/jsfa.4338>
- Montgomery D. R. and A. Bikié (2021) Soil health and nutrient density: beyond organic vs. conventional farming. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 5: 699147, <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.699147>
- SAS, Statistical Analysis System (2022). SAS® OnDemand for Academics. Copyright© (2012-2018) SAS Institute Inc., NC, USA.
- Schütz L., A. Gattinger, M. Meier, A. Müller, T. Boller, P. Mäder and N. Mathimaran (2018) Improving crop yield and nutrient use efficiency via biofertilization-A global meta-analysis. *Frontiers in Plant Science* 8: 2204, <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02204>
- Sha Z., X. Ma, J. Wang, T. Lv, Q. Li, T. Misselbrook and X. Liu (2020) Effect of N stabilizers on fertilizer-N fate in the soil-crop system: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 290: 106763, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106763>
- Sher A., M. Nawaz, Z. Hasnain, K. Mehmood, M. B. Chattha, M. Ijaz, A. Sattar, D. Ibrar, S. Bashir, M. Khan, S. Gul, S. Irshad, S. Fahad, N. Ahmed, Habibullah, A. Rais and S. Khan (2022) Impact of press mud and animal manure in comparison with NPK on the growth and yield of triticale (*Triticosecale wittmack*) genotypes cultivated under various irrigation regimes. *Agronomy* 12: 2944, <https://doi.org/10.3390/agronomy12122944>
- Singh R. P., S. Kumar, M. Sainger, P. A. Sainger and D. Barnawal (2017) Eco-friendly nitrogen fertilizers for sustainable agriculture. In: Adaptive Soil Management: From Theory to Practices CRC Press. pp. 227-246, https://doi.org/10.1007/978-981-10-3638-5_11
- Singh T. B., A. Ali, M. Prasad, A. Yadav, P. Shrivastav, D. Goyal and P. K. Dantu (2020) Role of organic fertilizers in improving soil fertility. In Contaminants in Agriculture: Sources, Impacts and Management. pp. 61-77, https://doi.org/10.1007/978-3-030-41552-5_3
- Sosa E. S., H. T. Escareño, J. Luna, M. A. Anguiano, E. Salazar-Melendez and J. D. L. Martínez (2016) Long term effects of cattle manure amendments and its impact on triticale ($\times$ Triticosecale Wittmack) production and soil quality. *Advances in Crop Science and Technology* 4: 223, <https://doi.org/10.18483/ijSci.937>
- Swandi M. K., N. R. Mubarik and A. Tjahjoleksono (2019) Rhizobacterial inoculants: the formulation as biofertilizer and its application on chili plants (*Capsicum annum* L.). *Malaysian Journal of Microbiology* 15: 44-51, doi: <http://dx.doi.org/10.21161/mjm.112517>
- Tahat M., M. K. Alananbeh, Y. A. Othman and D. I. Leskovar (2020) Soil health and sustainable agriculture. *Sustainability* 12: 4859, <https://doi.org/10.3390/su12124859>
- Thomas C. L., G. E. Acquah, A. P. Whitmore, S. P. McGrath and S. M. Haefele (2019) The effect of different organic fertilizers on yield and soil and crop nutrient concentrations. *Agronomy* 9: 776, <https://doi.org/10.3390/agronomy9120776>
- Urta J., I. Alkorta and C. Garbisu (2019) Potential benefits and risks for soil health derived from the use of organic amendments in agriculture. *Agronomy* 9: 542, <https://doi.org/10.3390/agronomy9090542>
- Zapata F. (1990) Use of isotope dilution techniques in soil fertility studies. *Agricultural Research* 45: 159-166.

