

DINÁMICA DEL CRECIMIENTO ABSOLUTO, RELATIVO Y ASIMILACIÓN NETA EN PAPA (*Solanum tuberosum* L.) BAJO EFECTO DE ESTIÉRCOL BOVINO Y CUY, NIVELES DE H2ORGANIX Y TIEMPO DE EVALUACIÓN

Dynamics of absolute and relative growth and net assimilation in potatoes (*Solanum tuberosum* L.) under the influence of cattle and guinea pig manure, H2Organix levels, and evaluation period

Magallanes Ali Dinelsa Mirian¹, Quiroga Sossa Brigido Moises², Mendoza Condori Casto Willy³,
Johnson Christopher Milton⁴

RESUMEN

El estudio se efectuó en Challajauri, La Paz, Bolivia, con el objetivo de evaluar el efecto del estiércol bovino vs cuy y cuatro niveles de H2Organix sobre las tasas de crecimiento absoluto (TCA), relativo (TCR), asimilación neta (TAN) y el rendimiento de papa (*Solanum tuberosum* L.) en cuatro periodos (días), seis repeticiones, con el fin de mejorar la eficiencia microbiana en la mineralización e incrementar el rendimiento. Se evaluó mediante modelos lineales mixtos, pruebas post hoc de Tukey y análisis de correlación de Pearson en el programa R Project v4.4.3. El estiércol de cuy superó significativamente al bovino en TCA (1.55 vs 1.04 g/día) y rendimiento (1075 vs 794 g/planta), sin diferencias en TCR ni TAN. El periodo fue el factor determinante para todas las variables, con TAN máxima a los 32 días (0.00234 g/cm² día), TCR máxima a los 63 días (0.0824 g/g día), TCA máxima a los 91 días (3.18 g/día), rendimiento a 152 días (1 728 g/planta). Los niveles de H2Organix no influyeron en el crecimiento. El análisis de correlación mostró que la TCA (91 días) fue el mejor predictor del rendimiento final ($r = 0.490$). Los modelos explicaron entre el 46.6 % y el 68.5 % de la variabilidad (R^2 condicional). Se concluye que el estiércol de cuy mejora el crecimiento absoluto y el rendimiento de papa, el periodo es el factor dominante, la incorporación de H2Organix no aporta beneficios adicionales en las condiciones evaluadas, la TCA a los 91 días constituye un indicador temprano del rendimiento.

Palabras clave: papa, estiércol, crecimiento, rendimiento, modelos mixtos.

ABSTRACT

The study was conducted in Challajauri, La Paz, Bolivia, with the objective of evaluating the effect of cattle manure versus guinea pig manure and four levels of H2Organix on the absolute growth rate (AGR), relative growth rate (RGR), net assimilation (TAN), and potato (*Solanum tuberosum* L.) yield over four periods (days) and six replicates, with the goal of improving microbial efficiency in mineralization and increasing yield. The data were analyzed using mixed-effects linear models, Tukey's post hoc tests, and Pearson's correlation analysis in the R Project v4.4.3 software. Guinea pig manure significantly outperformed cattle manure in TCA (1.55 vs. 1.04 g/day) and yield (1075 vs. 794 g/plant), with no differences in TCR or TAN. The period was the determining factor for all variables, with maximum TAN at 32 days (0.00234 g/cm² day), maximum TCR at 63 days (0.0824 g/g day), maximum TCA at 91 days (3.18 g/day), and maximum yield at 152 days (1.728 g/plant). H2Organix levels did not influence growth. The correlation analysis showed that TCA (91 days) was the best predictor of final yield ($r = 0.490$). The models explained between 46.6 % and 68.5 % of the variability (conditional R^2). It is concluded that guinea pig manure improves absolute growth and potato yield; the period is the dominant factor; the addition of H2Organix does not provide additional benefits under the evaluated conditions; and TCA at 91 days is an early indicator of yield.

Keywords: potatoes, manure, growth, yield, mixed models.

Artículo original

DOI: <https://doi.org/10.53287/vctp4556no29p>

Recibido: 15/04/2026

Aceptado: 21/06/2026

¹ Carrera de Ingeniería Agroindustrial. Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia. <https://orcid.org/0009-0000-0236-4025>. dmmagallanes@umsa.bo

² Docente Investigador, Carrera Ingeniería Agroindustrial, Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia. <https://orcid.org/0000-0001-9797-3965>. bmquirola@umsa.bo

³ Director, Choice Humanitarian Bolivia. <https://orcid.org/0009-0005-5109-5542>. wmendoza@choicehumanitarian.org

⁴ Gerente de Ventas, Bactelife Industries, Minersville, Estados Unidos. <https://orcid.org/0009-0004-4262-7829>. cj@c-link.world

INTRODUCCIÓN

El origen de la papa se remonta a la zona Andina de América del Sur, en territorios de Perú y Bolivia. Diferentes estudios confirman que esta zona es el centro primario de diversificación y domesticación de este tubérculo (Swaminathan y Magoon, 1961). Graves (2006), señala que la papa fue cultivada inicialmente por las civilizaciones precolombinas, quienes seleccionaron y adaptaron numerosas variedades, transformando la dieta de las civilizaciones preincaicas y estableció que siglos después, la papa se convierta en un cultivo capaz de alimentar a millones de personas.

Ierna y Distefano (2024), señalaron que la agricultura orgánica constituye un sistema de gestión integral que mejora la salud de los agroecosistemas, abarcando la biodiversidad, los ciclos biológicos y la actividad biológica del suelo. Además, destacaron que la papa es uno de los productos orgánicos con mayor demanda en el mercado. Shi et al. (2023), indican que el uso combinado de estiércoles orgánicos y fertilizantes minerales se presenta como una estrategia eficaz para sostener la productividad de papa y mejorar la fertilidad del suelo.

Cavalcante et al. (2019), reportaron que los biofertilizantes ejercen efectos físicos, químicos y biológicos, así como acciones fitoprotectoras, fisiológicas y productivas en cultivos hortícolas. Estos actúan como activadores enzimáticos, fisiológicos y metabólicos. Según Tueros et al. (2025), la incorporación de microorganismos para aumentar la accesibilidad de nutrientes y potenciar el funcionamiento fisiológico de los cultivos construye una alternativa con el medio ambiente.

Naqqash et al. (2016), identificaron rizobacterias promotoras del crecimiento pertenecientes a los géneros: *Azospirillum*, *Agrobacterium*, *Pseudomonas*, *Enterobacter* y *Rhizobium*, demostraron que estas cepas presentan fijación de nitrógeno y producción de ácido indolacético. Observaron respuestas diferenciales en la biomasa de la cepa inoculada, destacándose *Azospirillum* sp.

Según Ierna y Distefano (2024), el uso de estiércol animal o abono verde de leguminosas junto con una enmienda orgánica del suelo, y preferiblemente con un biofertilizante, como hongos micorrícicos, mejoran las propiedades del suelo y el rendimiento de papa. Ansabayeva et al. (2025), indican que los microorganismos del suelo regulan las tasas de crecimiento y la productividad de los cultivos. Actúan a través de la descomposición de la materia orgánica, la fijación biológica de nitrógeno, la solubilización de fósforo y la producción de fitohormonas.

Lee et al. (2023), demostraron que el estiércol, aporta carbono, nitrógeno y fósforo a través de la materia orgánica, nutrientes esenciales para el desarrollo vegetal. También mejora la actividad microbiana y eleva los cationes intercambiables. Aiysha y Latif (2019), aislaron y caracterizaron la microflora del estiércol bovino, identificando bacterias pertenecientes a los géneros, *Stenotrophomonas*, *Achromobacter*, *Pseudomonas* y *Brevibacillus*. Dichas cepas actúan como promotoras del crecimiento vegetal, incluyendo la fijación de nitrógeno (presente en el 61 % de los aislados), la solubilización de fósforo (79 %), potasio (81 %), zinc (73 %), así como la producción de fitohormonas como el ácido indolacético (77 %).

Nosheen et al. (2021), definen que los biofertilizantes contienen microorganismos vivos principalmente bacterias y hongos benéficos los cuales se aplican al suelo o a la semilla con el objetivo de mejorar la nutrición y el crecimiento del cultivo, son económicos, no tóxicos y ecológicos. Kour et al. (2020), señalan que los biofertilizantes microbianos, aumentan el rendimiento y la biomasa de los cultivos, además de mejorar la fertilidad del suelo, colonizan los sistemas vegetales (epífita, endófita y rizosféricamente).

Kumar et al. (2022) señalaron que los biofertilizantes son insumos microbianos, que contribuyen al reciclaje de nutrientes y a la sostenibilidad ambiental. Asimismo, los microorganismos benéficos asociados a las plantas poseen un enorme potencial para aumentar la biomasa vegetal y el rendimiento de los cultivos, mediante modulación de fitohormonas, el biocontrol de fitopatógenos y la amelioración de estreses bióticos y abióticos.

Mitter et al. (2021), indican que la eficacia real de un biofertilizante comercial depende de: las cepas utilizadas y su adaptación a las condiciones edafoclimáticas locales; la calidad de la formulación, incluyendo la viabilidad microbiana, el portador y el almacenamiento; el manejo del cultivo, como la dosis de fertilizante químico, el uso de estiércoles, el riego y la rotación, estos factores pueden presentar resultados variables en campo, por lo que enfatizaron la necesidad de realizar ensayos locales y establecer estrictos controles de calidad para garantizar su eficacia.

El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto del tipo de estiércol (bovino vs cuy) y de cuatro niveles de H2Organix (N1, N2, N3, Testigo) sobre la tasa de crecimiento absoluto (TCA), tasa de crecimiento relativo (TCR), tasa de asimilación neta (TAN) y el rendimiento de tubérculos (RT), identificando las relaciones entre estas variables fisiológicas y el rendimiento para establecer indicadores tempranos predictivos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización

El trabajo se realizó en la comunidad Challajawira, ciudad de Viacha en La Paz-Bolivia, durante el periodo comprendido entre diciembre del 2024 al 20 de mayo del 2025, ubicada geográficamente: 16° 38' 52" S 68° 17' 32" W y una altitud de 3 857 msnm. La región se caracteriza por un clima frío y seco, con una temperatura media anual de 8.3 °C, una temperatura máxima media de 16.8 °C y una temperatura mínima media de -0.2 °C (Statsclimat.com, 2025).

Metodología

Unidades experimentales

Se realizó bajo dos tratamientos: estiércol bovino (EB) y estiércol de cuy (EC) y H₂Organix en cuatro niveles: nivel N1 con 0.40 %, N2 con 0.78 %, N3 con 1.17 % y un testigo, con seis repeticiones, cuatro evaluaciones en tiempo con un total de 192 unidades experimentales independientes, en una parcela sembrada previamente con alfalfa. Como primer factor se incorporó al suelo para EB y EC 10 toneladas, como segundo factor se aplicó tres dosis de H₂Organix (Nivel 1, 2, 3) y un testigo (T), cada parcela denominada: estiércol bovino nivel 1 (EBN1), estiércol bovino nivel 2 (EBN2), estiércol bovino nivel 3 (EBN3), estiércol bovino testigo (EBT), estiércol de cuy nivel 1 (ECN1), estiércol de cuy nivel 2 (ECN2), estiércol de cuy nivel 3 (ECN3) y estiércol de cuy testigo (ECT). La cantidad aproximada de aplicación fue de 3.5 litros de solución en 800 m² directamente al suelo previo a la siembra.

Siembra y cosecha

Se empleó semillas de papa Waycha, se sembró el 10 de diciembre del 2024 a distancia de 30 cm entre semillas y 80 cm entre surcos y se cosechó el 20 de mayo del 2025. La evaluación se realizó a los 32, 63, 91, 122, 152 días con muestreos destructivos de biomasa (cosecha). La materia seca se determinó a una temperatura de 74 °C determinando el peso constante.

Variables evaluadas

Las variables fueron la tasa de crecimiento absoluta (TCA), tasa de crecimiento relativa (TCR), tasa de asimilación neta (TAN) y rendimiento de tubérculos de papa (RT), se generaron funciones, a partir de los valores obtenidos mediante mínimos cuadrados en el programa Excel, y en el programa R Project versión 4.5.1. se realizó el análisis de varianza y correlación de Pearson con el modelo lineal de efectos mixtos.

Tasa de crecimiento absoluta: se evaluó durante el crecimiento de la planta, cosechando mensualmente, determinando la biomasa y materia seca, se determinó mediante la Ecuación 1 propuesta por Hunt (1978) citado por Morales y Quiroga (2019).

$$TCA = \frac{W2-W1}{(t2-t1)} \quad (1)$$

Dónde: TCA = tasa de crecimiento absoluta (g/día); W1 = peso seco inicial; W2 = peso seco final; t2-t1 = intervalo de tiempo transcurrido entre evaluaciones (días).

Tasa de crecimiento relativa: se evaluó durante el crecimiento de la planta, cosechando mensualmente, determinando la biomasa y materia seca. Para la obtención de la tasa de crecimiento relativa (TCR), se determinó con la Ecuación 2 (Santos et al., 2010).

$$TCR = \frac{\ln W2 - \ln W1}{(t2-t1)} \quad (2)$$

Dónde: TCR = tasa de crecimiento relativa (g/g día); W1 = peso seco inicial; W2 = peso seco final t2-t1 = intervalo de tiempo transcurrido entre evaluaciones (días); ln = logaritmo natural.

Tasa de asimilación neta: a partir de la materia seca y el área foliar se determinó la tasa de asimilación neta (TAN). La evaluación se determinó mediante la Ecuación 3 propuesta por Hunt (1978) citado por Morales y Quiroga (2019).

$$TAN = \frac{W2-W1}{A2-A1} \cdot \frac{\ln A2 - \ln A1}{t2-t1} \quad (3)$$

Dónde: TAN = tasa de asimilación neta (g/cm² día); W1 = peso seco inicial (g); W2 = peso seco final (g); A1 = área foliar inicial (cm²); A2 = área foliar final (cm²); t2-t1 = intervalo de tiempo transcurrido entre dos evaluaciones (días); ln = logaritmo natural.

Rendimiento de tubérculos: a partir del segundo mes se fue evaluando el rendimiento de tubérculos. Se determinó mediante la Ecuación 4.

$$RT = \frac{PT}{PP} \quad (4)$$

Dónde: RT = rendimiento de tubérculos (g/planta); PT = peso de tubérculos (g); PP = peso de planta.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tasa de crecimiento absoluta (TCA) de la planta de papa

La TCA de la planta de papa en respuesta al primer factor tipo de estiércol EB y EC y el segundo factor niveles de H2Organix y un testigo presentan diferencias sustanciales, ajustados los valores obtenidos, se generan funciones ($f(x)$) polinómicas de tercer orden (Figura 1), con coeficientes de determinación (r^2) altos

en los ocho tratamientos. El tratamiento ECN2, ECN1 son los más destacados en los dos primeros lugares produciendo la mayor cantidad de materia seca con 4.44 g/día y 3.63 g/día, con r^2 0.78 y 0.82 respectivamente. En la parte central corresponde a las funciones de los tratamientos EBT y ECT. Por debajo se encuentra los tratamientos ECN3 y EBN2, con 2.56 g/día y 2.09 g/día, con r^2 0.91 y 0.96 respectivamente. Finalmente, muy por debajo se encuentran los tratamientos restantes EBN1 y EBN3.

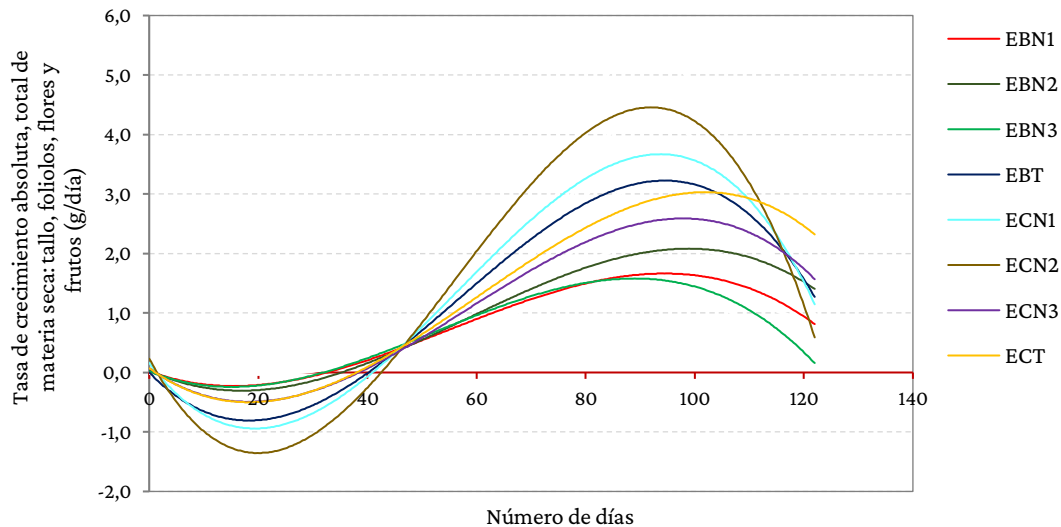


Figura 1. Funciones ajustadas de la tasa de crecimiento absoluta (TCA) de la planta de papa (g/día) en respuesta a dos tipos de estiércol (bovino y cuy) y cuatro niveles de H2Organix.

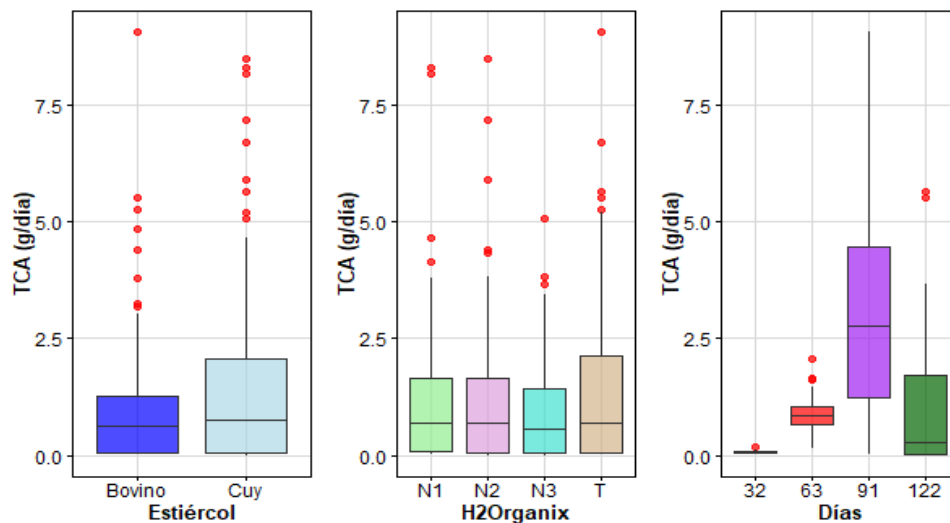


Figura 2. Diagrama de caja y bigote de la tasa de crecimiento absoluta (TCA) de la planta de papa (g/día) en respuesta a dos tipos de estiércol (bovino y cuy) y cuatro niveles de H2Organix.

De acuerdo a los datos (Figura 2), en la comparación tipos de estiércol (TE), ambos presentan medianas aproximadas, el EC tiene mayor potencial de crecimiento, pero presenta mayor dispersión por lo tanto mayor

variabilidad, en comparación al EB que presenta menor dispersión y es más consistente. La comparación entre niveles de H2Organix presenta medianas similares, no se presenta tendencias, todos los niveles expresan

cajas similares. La incorporación de H2Organix no tiene influencia en la TCA, se puede interpretar que los microorganismos tanto del estiércol y del suelo son suficientes. La comparación entre periodos de evaluación, a los 32 días los valores hallados presentan baja variabilidad por lo que las plantas presentan TCA uniforme. A los 63 días la TCA empieza a diferenciarse, se

presentan valores atípicos y la caja presenta mayor expansión. A los 91 días la caja se expande más, presenta asimetría positiva muy marcada donde la TCA expresa su máxima diferenciación coincidiendo con la fase fenológica de la planta de papa con el máximo crecimiento. A los 122 días se desacelera el crecimiento.

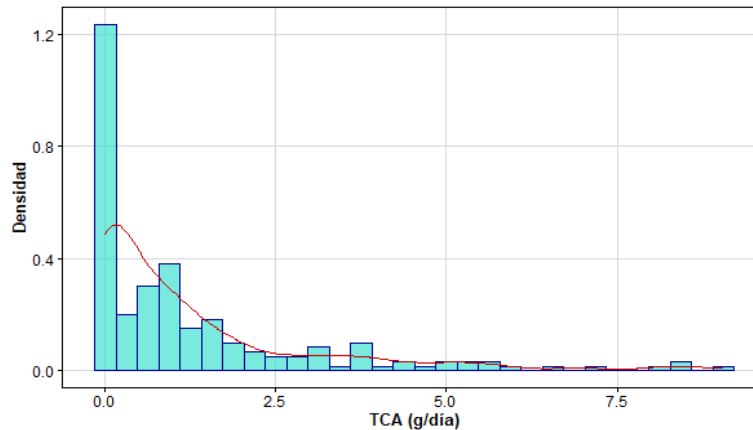


Figura 3. Histograma de distribución de la tasa de crecimiento absoluta (TCA) de la planta de papa (g/día) en respuesta a dos tipos de estiércol (bovino y cuy) y cuatro niveles de H2Organix.

De acuerdo a la Figura 3, los valores de la TCA presentan un sesgo positivo a la derecha donde la mayor concentración es en la parte izquierda, lo que expresa una distribución exponencial o una distribución gamma y no normal, la curva de densidad de los valores señala un decaimiento exponencial. Según Shapiro-Wilk el valor p resulta $p < 0.00001$, y según la prueba de Levene el valor $F = 4.95$ y $p < 0.0001$, por lo tanto, no se presentan varianzas homogéneas, lo que determinó realizar el análisis mediante un modelo lineal de efectos mixtos.

De acuerdo a los resultados, la calidad de ajuste del modelo lineal de efectos mixtos el coeficiente de determinación marginal (R^2_m) alcanza un valor de

0.4657 es decir que el 46.6 % es resultado de efectos fijos (TE, nivel H2Organix, periodo de evaluación), y el coeficiente de determinación condicional (R^2_c) con 0.4803, por lo que el 48.0 % (efectos fijos + variabilidad entre parcelas) explica que el crecimiento se debe al TE, Nivel H2Organix, periodo de evaluación, incluido por las diferencias que se presenta entre parcelas. Con una diferencia de 0.0146 que representa el 1.46 % las repeticiones aportan poca variabilidad por lo que el modelo resulta robusto por lo tanto los efectos fijos fueron determinantes. El 52 % es la variabilidad no explicada (error residual).

Tabla 1. Análisis de varianza (modelo lineal de efectos mixtos) de la tasa de crecimiento absoluta (TCA) de la planta de papa (g/día) en respuesta a dos tipos de estiércol (bovino y cuy) y cuatro niveles de H2Organix.

Efecto	Suma de cuadrados	Grados de libertad	F	p-valor	Significancia
Tipo estiércol	12.48	1	6.76	0.0102	*
Nivel H2Organix	7.67	3	1.38	0.2495	ns
Periodo (días)	254.80	3	45.96	<0.0001	***
T estiércol × nivel (H2Organix)	2.20	3	0.40	0.7561	ns
T estiércol × periodo (días)	22.70	3	4.10	0.0078	**
Nivel H2Organix x periodo (días)	16.37	9	0.98	0.4548	ns

ns = no significativo ($p > 0.05$); * = $p < 0.05$; ** = $p < 0.01$; *** = $p < 0.001$

El efecto del estiércol promueve una mayor TCA por el contenido elevado de nitrógeno, de acuerdo a la Tabla 1 él TE resulta significativo ($F_{1,164} = 6.76$; $p = 0.0102$). El efecto del periodo de evaluación es el más determinante, resultando extremadamente significativo con un valor ($F_{3,164} = 45.96$; $p < 0.0001$). El efecto de la interacción

estiércol x periodo presenta alta significancia ($F_{3,164} = 4.10$; $p = 0.0078$), por lo que la diferencia entre estiércol varía en cada periodo. El efecto del nivel de H2Organix y sus interacciones no fueron significativos ($p > 0.05$).

Tabla 2. Promedio ajustado por tipo de estiércol de la tasa de crecimiento absoluta (TCA) de papa (g/día) en respuesta a dos tipos de estiércol (bovino y cuy) y cuatro niveles de H2Organix.

Tipo estiércol	Tasa de crecimiento absoluta media (g/día)	Error estándar	Intervalo de confianza (95 %)
Bovino	1.04	0.167	0.674-1.405
Cuy	1.55	0.167	1.184-1.915

El promedio de TCA con EC (Tabla 2) con un promedio de 1.55 g/día es mayor al EB con un promedio 1.04 g/día, por lo que el EC incrementa la TCA en 0.51 g/día, con un intervalo de confianza (IC) del 95 %. En ambos tratamientos de acuerdo a los límites inferior y superior los intervalos son estrechos, existe menor variabilidad de los datos de la TCA y las medias estimadas

están cerca de las medias poblacionales, por lo que la diferencia de 0.51 g/día es precisa. Paralelamente de acuerdo a la Figura 4 el ECN2 presenta mayor valor de la TCA a los 91 días.

La TCA media del estiércol de cuy (1.55 ± 0.17 g/día) fue significativamente mayor que la del estiércol bovino (1.04 ± 0.17 g/día), con una diferencia de 0.51 g/día.

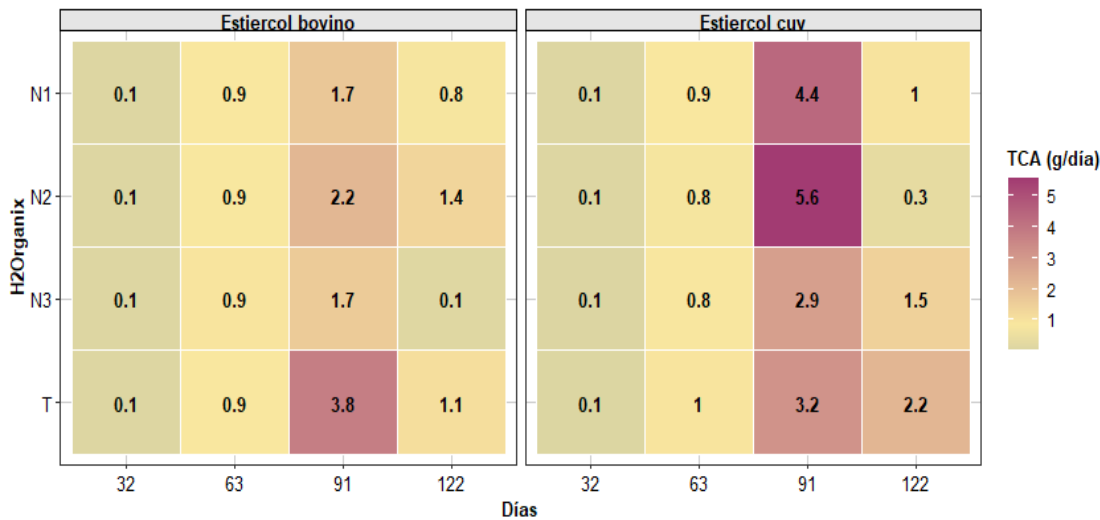


Figura 4. Mapa de calor de la tasa de crecimiento absoluta (TCA) de la planta de papa (g/día) en respuesta a dos tipos de estiércol (bovino y cuy) y cuatro niveles de H2Organix.

Tabla 3. Promedio ajustado por periodo de evaluación de la tasa de crecimiento absoluta (TCA) de la planta de papa (g/día) en respuesta a dos tipos de estiércol (bovino y cuy) y cuatro niveles de H2Organix.

Periodo (días)	Tasa de crecimiento absoluta media (g/día)	Intervalo de confianza (95 %)	Error estándar	Tukey
32	0.069	-0.374-0.512	0.217	a
63	0.869	0.426-1.312	0.217	b
91	3.184	2.741-3.626	0.217	c
122	1.056	0.614-1.499	0.217	b

El promedio de TCA por periodo de evaluación a los 91 días (Tabla 3) alcanza la mayor formación de materia seca con un promedio de 3.184 g/día disminuyendo a los 122 días con 1.056 g/día coincidiendo con la fase de senescencia. El aporte de nutrientes del EC es máximo en la fase de mayor crecimiento de la planta de papa. De acuerdo a la prueba de significancia según Tukey el promedio a los 91 días es superior a los demás periodos de evaluación, a los 63 y 122 no hay diferencia estadística. La comparación de medias para los niveles de H2Organix, no resultan significativas ($p < 0.05$), por lo tanto, la incorporación de microorganismos no produce efecto significativo sobre la TCA.

La TCA mostró una variación por periodo significativa, alcanzando su valor máximo a los 91 días (3.184 ± 0.217 g/día), valor que difiere significativamente de los registrados en los demás periodos ($p < 0.001$). No se observaron diferencias significativas entre los niveles de H2Organix ($p = 0.2495$).

El estiércol de cuy (1.55 g/día) superó significativamente al bovino (1.04 g/día) en la TCA media. Esta respuesta se atribuye a la composición química del estiércol de cuy, con concentraciones más altas de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) (Calero-Rios et al., 2025). El mayor contenido de nutrientes acelera los procesos metabólicos, incrementando la división celular y

la expansión foliar (Calderan-Rodrigues et al., 2024), lo que se traduce en una mayor acumulación diaria de biomasa (Wingler y Paul, 2012). Estudios recientes confirman que el estiércol de cuy mejora la eficiencia en el uso de nutrientes y el rendimiento de los cultivos (Calero-Rios et al., 2025).

Tasa de crecimiento relativa (TCR) de la planta de papa

La TCR de la planta de papa presenta el mismo comportamiento que TCA, ajustados los datos generan una función ($f(x)$) polinómica de segundo orden (Figura 5),

con coeficientes de determinación aceptables en los ocho tratamientos. El tratamiento EC se destacó por encima del tratamiento EB, en todos los niveles de H2Organix. El tratamiento ECN2 obtuvo la mayor eficiencia de crecimiento alcanzando 0.075 g/g día a los 70 días, con un coeficiente de determinación r^2 0.8321, seguido del tratamiento ECN1 con 0.065 g/g día con un r^2 0.8301. En tercer lugar, se encuentran el tratamiento ECN3 y ECT con 0.063 g/g día y 0.063 g/g día a los 70 días con r^2 0.6979 y 0.7563 respectivamente. Por debajo se encuentran los tratamientos con EB, en orden EBT, EBN2, EBN3 finalmente el EBN1 con 0.055 g/g día y un r^2 0.7271.

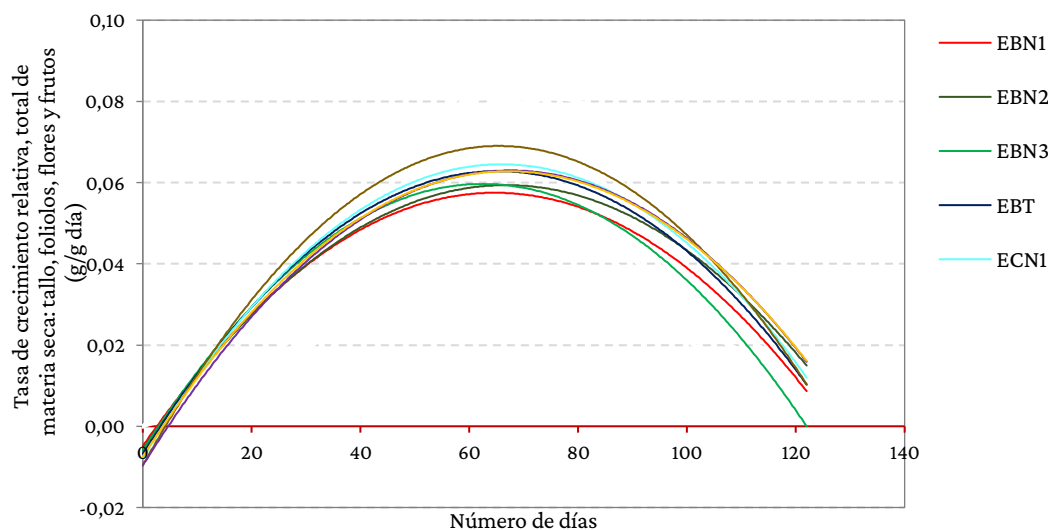


Figura 5. Tasa de crecimiento relativa (TCR) de la planta de papa (g/g día) en respuesta a dos tipos de estiércol (bovino y cuy) y cuatro niveles de H2Organix.

Para TE (Figura 6) las cajas que representan al EB y EC son prácticamente idénticas en posición, tamaño y forma. El EC presenta una mediana ligeramente superior, estadísticamente no significativa con 0.00407 g/g día. El EB y EC presentan una variabilidad y valores atípicos similares, lo que no influye en la eficiencia del crecimiento relativo. En todos los niveles de H2Organix incluido el testigo presentan medianas similares entre 0.037 y 0.038 g/g día, no presentan tendencia ascendente ni descendente con variabilidad similar. Por tanto, la incorporación de H2Organix no influye en la TCR,

posiblemente la población microbiana nativa del suelo y del estiércol son suficientes. La TCR en diferentes periodos presenta medianas diferentes, la más alta alcanza a los 63 días con 0.082 g/g día reduciendo a los 91 días con 0.0420 g/g día, con una diferencia 0.0404 g/g día. A los 122 días existen valores negativos de la TCR lo que coincide con la fase de senescencia, podría deberse a la caída de hojas y también que la respiración sea mayor a la tasa fotosintética. Asimismo, se puede observar valores atípicos a los 32 y 63 días.

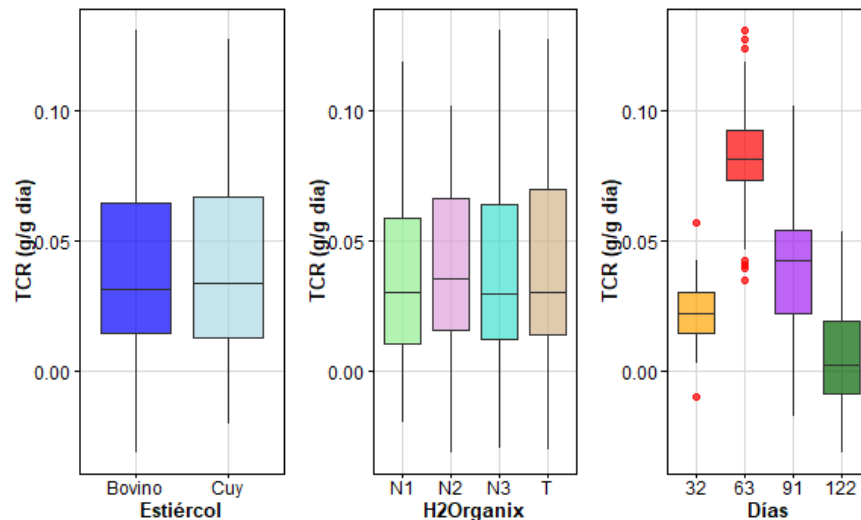


Figura 6. Diagrama de caja y bigote de la tasa de crecimiento relativa (TCR) de la planta de papa (g/g día) en respuesta a dos tipos de estiércol (bovino y cuy) y cuatro niveles de H2Organix.

La distribución de los datos (Figura 7) es aproximadamente simétrica con dos colas, con valores cercanos a cero, con bajo crecimiento y valores hasta 0.30 g/g día con el mayor crecimiento, con una variabilidad muy alta, con una media aproximada a la mediana, por lo tanto, presenta una distribución cercana a la normalidad en comparación a la TCA, con un rango intercuartílico aproximado de 0.0035 g/g día agrupando el 50 % de los datos. El valor más frecuente es 0.08 g/g día por lo que en

promedio las plantas incrementan TCR en un 8 % por día en el momento más óptimo. De acuerdo al análisis de Levene se cumple el supuesto de homocedasticidad con un valor $p = 0.2123$, además de la no distribución normal. El resultado del ajuste del modelo presenta un R^2_m de 0.6849, donde el 68.5% de la variabilidad de la TCR es debido a los efectos fijos, no se determinó el R^2_c porque la varianza del efecto aleatorio tiende a 0, confirmando la robustez del modelo estadístico.

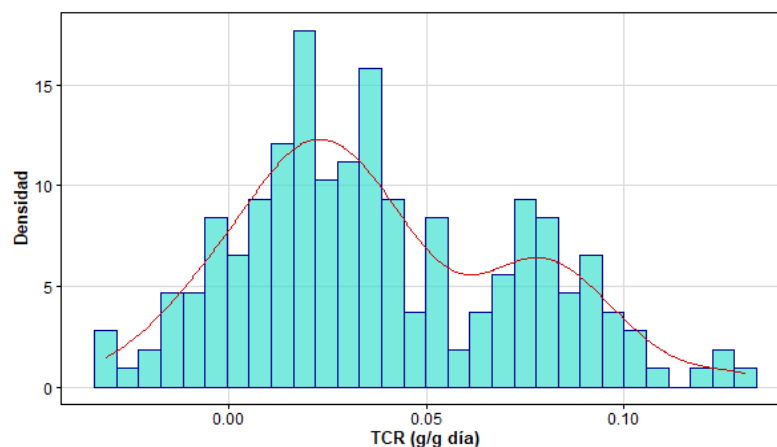


Figura 7. Histograma de distribución de la tasa de crecimiento relativa (TCR) de la planta de papa (g/g día) en respuesta a cuatro niveles de H2Organix.

Tabla 4. Análisis de varianza (modelo lineal mixto) de la tasa de crecimiento relativa (TCR) de la planta de papa (g/g día) en respuesta a dos tipos de estiércol (bovino y cuy) y cuatro niveles de H2Organix.

Efecto	Suma de cuadrados	Grados de libertad	F	p-valor	Significancia
Tipo estiércol	0.0008	1	1.98	0.1612	ns
Nivel H2Organix	0.0003	3	0.23	0.8724	ns
Periodo (días)	0.1602	3	132.94	<0.0001	***
T estiércol × Nivel (H2Organix)	0.0001	3	0.08	0.9695	ns
T estiércol × periodo (días)	0.0031	3	2.61	0.0533	ns
Nivel H2Org x periodo (días)	0.0022	9	0.61	0.7836	ns

Ns = no significativo ($p > 0.05$); * = $p < 0.05$; ** = $p < 0.01$; *** = $p < 0.001$

En el análisis de varianza del modelo lineal con efectos mixtos (Tabla 4), el efecto periodo de evaluación es altamente significativo con valor ($F_{3,169} = 132.94$; $p < 0.0001$), donde la TCR varía a través de los periodos de evaluación. El TE ($F_{1,169} = 1.98$; $p = 0.1612$), el nivel H2Organix ($F_{3,169} = 0.23$; $p = 0.8724$) y sus interacciones ($p > 0.05$) no mostraron diferencias significativas. La mayor TCR ocurre a los 63 días con un promedio de

materia seca de 0.0824 g/g día posteriormente el crecimiento baja por la fase de senescencia.

De acuerdo al mapa de calor (Figura 8), la mayor TCR se concentra a los 63 días en ambos TE. Con una mayor concentración en el ECN3, ECT y EBN3, la TCR antes de 63 días y posterior a los 63 días presentan menor concentración.

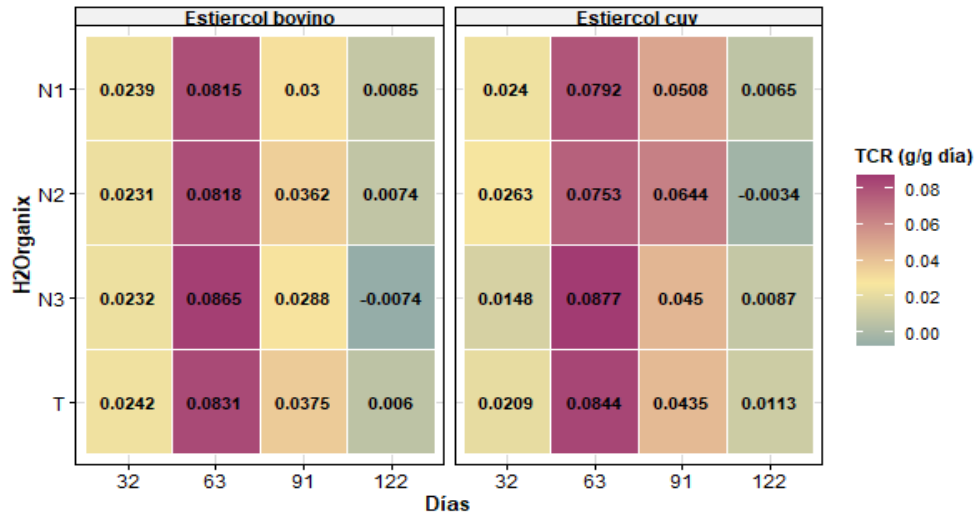


Figura 8. Mapa de calor de la tasa de crecimiento relativa (TCR) de la planta de papa (g/g día) en respuesta a dos tipos de estiércol (bovino y cuy) y cuatro niveles de H2Organix.

Tabla 5. Promedio por periodo de evaluación (días) de la tasa de crecimiento relativa (TCR) de la planta de papa (g/g día) en respuesta a dos tipos de estiércol (bovino y cuy) y cuatro niveles de H2Organix.

Periodo (días)	Tasa de crecimiento relativa media (g/g día)	Intervalo de confianza (95 %)	Error estándar	Tukey
32	0.0226	0.0168-0.0283	0.00289	a
63	0.0824	0.0767-0.0882	0.00289	b
91	0.0420	0.0636-0.0478	0.00289	c
122	0.0047	0.0011-0.0105	0.00289	a

La comparación de medias (Tabla 5), la TCR se incrementa significativamente hasta alcanzar su máximo valor con 0.0824 g/g día a los 63 días, disminuyendo a los 91 días con 0.0420 g/g día y continúa su descenso hasta los 122 días. El crecimiento coincide con las fases de crecimiento, fase exponencial de los 32 a 63 días con 0.0226 g/g día hasta 0.0824 g/g día con un máximo aprovechamiento de nutrientes, de los 63 a 91 días la fase de maduración con 0.0824 g/g día hasta 0.0420 g/g día reduciendo la eficiencia del crecimiento e inicio de la senescencia de la planta, a los 122 días la TCR es prácticamente cero con 0.0047 g/g día lo que se traduce en el fin de crecimiento vegetativo.

La TCR mostró una variación temporal significativa ($p < 0.001$ para todas las comparaciones entre periodos), alcanzando su valor máximo a los 63 días (0.0824 ± 0.0029 g/g día). La TCR a los 32 días fue de 0.0226

± 0.0029 g/g día, mientras que a los 91 y 122 días disminuyó a 0.0420 ± 0.0029 y 0.0047 ± 0.0029 g/g día, respectivamente. No se observaron diferencias significativas entre los niveles de microorganismos ($p > 0.88$).

Effa et al. (2020), evaluaron el efecto de la aplicación de estiércol orgánico y cal agrícola sobre la tasa de crecimiento relativo (TCR) y la tasa de asimilación neta (TAN) en frijol común. Ambas enmiendas incrementaron significativamente la TCR y la TAN en comparación con el tratamiento control, evidenciando que el abono orgánico mejora las tasas de crecimiento y asimilación en cultivos de grano. Ratna et al. (2016), con NPK y estiércol de aves hallaron la mayor tasa de crecimiento del cultivo (TCC) y mayor tasa de crecimiento relativo con 0.086 y 0.218 g/g día, respectivamente. Laguado et al. (2002), en frutos de guayaba reportaron que la curva de crecimiento

acumulado de masa fresca y seca correspondió a una doble función sigmoidea, encontrando que la mayor tasa de crecimiento relativo (TCR) ocurrió en las etapas I y III, mientras que disminuyó significativamente en la etapa II, asociada a un crecimiento más lento, las etapas de mayor actividad metabólica (división y expansión celular activa) preceden naturalmente a una fase de crecimiento más lento o de maduración. Esta similitud entre especies sugiere que el pico de TCR observado a los 63 días en el presente estudio corresponde precisamente a una de esas etapas de alta actividad metabólica. Sousa et al. (2024), en un estudio con 12 progenies de *Genipa americana* creciendo bajo condiciones de 65 % de luz solar plena durante 198 días, reportaron valores de tasa de crecimiento relativo (TCR) que oscilaron entre 0.029 y 0.038 g/g día, valores comparables a los observados en las etapas tempranas del ensayo (0.0226 g/g día a los 32 días). Asimismo, Martínez et al. (2005), al evaluar tres cultivares de piña (*Ananas comosus* L.) bajo diferentes condiciones de cultivo, documentaron que la tasa de crecimiento relativo (TCR) varió significativamente según la fase fenológica (vegetativa vs. reproductiva). Estos hallazgos respaldan que la variación temporal de la TCR fue altamente significativa ($p < 0.001$), confirmando que la fase de desarrollo es un factor determinante en la dinámica del crecimiento vegetal.

Es importante destacar que, en el presente estudio, no se observaron diferencias significativas en la TCR asociadas a los niveles de H2Organix evaluados ($p > 0.88$). Este resultado es coherente con lo reportado por Lazo y Ascencio (2016), quienes, al evaluar la interferencia entre frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) y la maleza *Amaranthus dubius* Mart., concluyeron que la tasa de crecimiento relativo (RGR) no fue un buen indicador de la capacidad competitiva entre especies, siendo otros parámetros

fisiológicos como la duración del área foliar (LAD) y la tasa de asimilación neta (NAR) más determinantes en la interacción. Los autores señalaron que, en ciertos contextos experimentales, la TCR puede ser más sensible a factores temporales (edad, fase fenológica) que, a tratamientos específicos, lo cual explica por qué en el ensayo los tratamientos con microorganismos no mostraron un efecto significativo sobre este indicador.

Bastías et al. (2014), reportaron que el valor máximo de TCR en cerezo se alcanzó tempranamente, a los 23 días después de plena floración (coincidiendo con la reducción de la división celular), la tendencia general de un incremento seguido de una disminución de la tasa es consistente con la fisiología del desarrollo de frutos. Grisafi (2023), en un estudio sobre avellano (*Corylus avellana*), destaca la importancia de analizar cómo los cambios en la TCR impactan en la respiración y el crecimiento de frutos y tallos, subrayando que este indicador es clave para entender la fisiología de cultivos.

Tasa de asimilación neta (TAN) de la planta de papa

La TAN de la planta de papa (Figura 9) presenta una eficiencia máxima al principio del crecimiento a los 32 días, una tendencia de declinación exponencial entre los 32 y 63 días, reduciendo la formación de biomasa entre 63 y 91 días continuando con la fase de senescencia. A los 122 días disminuye a un valor de 0.000137 g/cm² día. Significa que al inicio la planta tiene la máxima eficiencia de asimilación, la mayor producción de área foliar por biomasa incrementada, posteriormente la eficiencia disminuye rápidamente por un posible autosombreamiento del dosel foliar, crecimiento de mayor tejido estructural que tejido fotosintético, además del envejecimiento foliar.

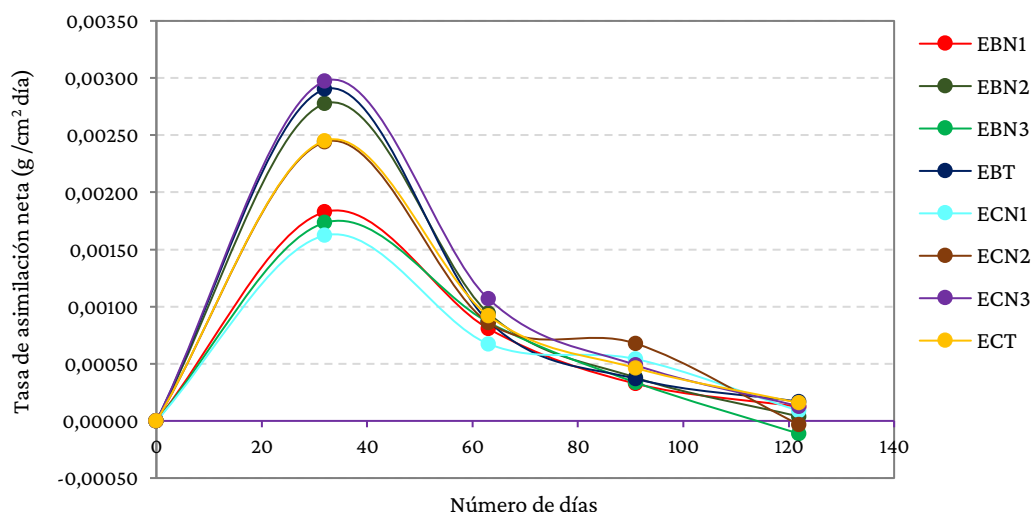


Figura 9. Tasa de asimilación neta (TAN) de la planta de papa (g/cm² día) en respuesta a dos tipos de estiércol (bovino y cuy) y cuatro niveles de H2Organix.

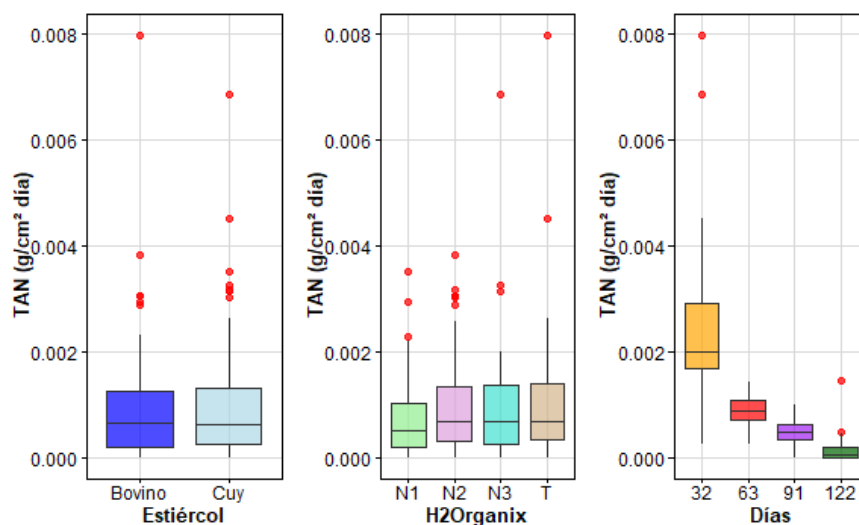


Figura 10. Diagrama de caja y bigote de la tasa de asimilación neta (TAN) de la planta de papa ($\text{g/cm}^2 \text{ día}$) en respuesta a dos tipos de estiércol (bovino y cuy) y cuatro niveles de H2Organix.

La comparación de la TAN entre TE (Figura 10), presentan medianas similares con $0.00093 \text{ g/cm}^2 \text{ día}$ para EB y $0.00098 \text{ g/cm}^2 \text{ día}$ para EC, el rango intercuartil entre $0.00077\text{-}0.00109 \text{ g/cm}^2 \text{ día}$ para EB, $0.00082\text{-}0.00114 \text{ g/cm}^2 \text{ día}$ para EC, las cajas son similares por lo que el tipo de estiércol no influye en la TAN. La distribución respecto a los niveles de H2Organix presenta valores similares entre niveles por lo tanto no existe efecto de los niveles. La TAN

frente a los periodos de evaluación presenta grandes diferencias, por lo tanto, el periodo tiene fuerte influencia en la TAN, a los 32 días presenta una mediana de $0.00234 \text{ g/cm}^2 \text{ día}$ con un rango intercuartil entre $0.0021\text{-}0.0025 \text{ g/cm}^2 \text{ día}$, a los 63 días la TAN reduce drásticamente con una mediana de $0.00087 \text{ g/cm}^2 \text{ día}$ y un rango intercuartil entre $0.00067\text{-}0.00108 \text{ g/cm}^2 \text{ día}$, a los 91 y 122 días la tasa de asimilación va disminuyendo.

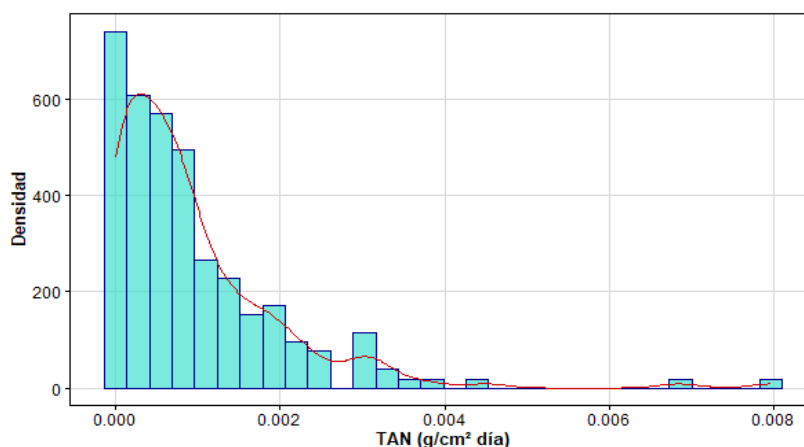


Figura 11. Histograma de distribución de la tasa de asimilación neta (TAN) de la planta de papa ($\text{g/cm}^2 \text{ día}$) en respuesta a cuatro niveles de H2Organix.

De acuerdo a la Figura 11 la distribución de los datos presenta una asimetría positiva con una cola hacia la derecha con $0.008 \text{ g/cm}^2 \text{ día}$, el pico principal muy alto con valores cercanos a cero, se observa una media de $0.000953 \text{ g/cm}^2 \text{ día}$ y una mediana de $0.000647 \text{ g/cm}^2 \text{ día}$, la media es mayor a la mediana donde el 50 % de los datos están por debajo de $0.000647 \text{ g/cm}^2 \text{ día}$ y la media es dominada hacia la derecha con pocos valores altos de la TAN, presenta una alta variabilidad, con un coeficiente de variación $>100 \%$, de acuerdo a la prueba de Shapiro-Wilk

$p < 0.0001$ no cumple el supuesto de normalidad y se aproxima a una distribución exponencial o gamma. De acuerdo a la prueba de Levene el valor $F = 2.2255$ y el valor $p = 0.0007$ presenta varianzas heterogéneas con un valor $p < 0.05$, por lo tanto, no cumplen el supuesto de homocedasticidad. De acuerdo a los resultados para el ajuste del modelo, el $R^2 \text{ m}$ es 0.6050 , donde el 60.5% es debido a la variabilidad de los efectos fijos. Al igual que la TCR no es posible estimar el $R^2 \text{ c}$ con una varianza del efecto aleatorio cercana a cero, donde el periodo de

evaluación fue el principal factor explicativo. Las repeticiones no aportan variabilidad adicional significativa.

De acuerdo a la Figura 12, el mapa de calor para TAN la mayor concentración es a los 32 días tanto para el EB y

EC, en cuanto a los niveles se destaca el ECN3 seguido ECN2 y ECN1. Para EB el EBN2 y EBT, son los que se destacan con mayor eficiencia. En ambos tratamientos EB y EC después de los 32 días la TAN baja hasta alcanza valores de cero en el día 122.

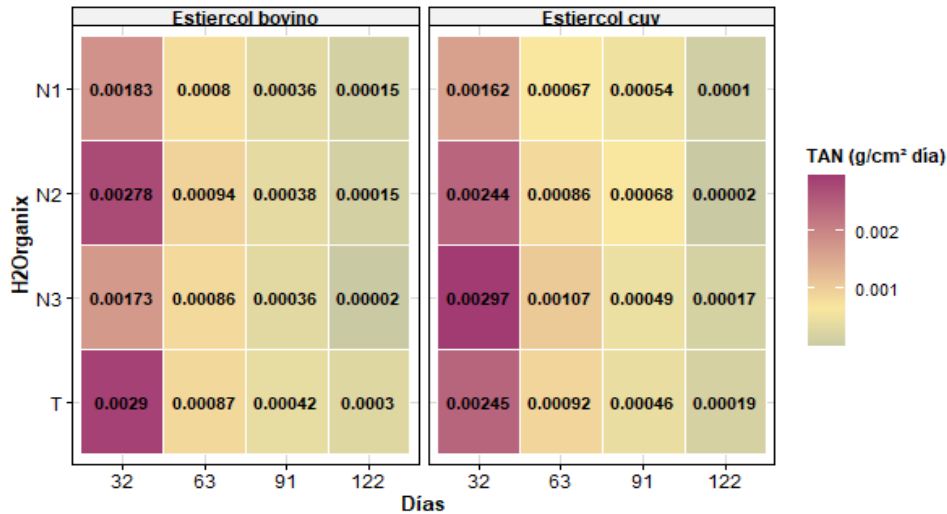


Figura 12. Mapa de calor de la tasa de asimilación neta (TAN) de la planta de papa (g/cm² día) en respuesta a dos tipos de estiércol (bovino y cuy) y cuatro niveles de H2Organix.

Tabla 6. Análisis de varianza (modelo lineal mixto) de la tasa de asimilación neta (TAN) de la planta de papa (g/cm² día) en respuesta a dos tipos de estiércol (bovino y cuy) y cuatro niveles de H2Organix.

Efecto	Suma de cuadrados	Grados de libertad	F	p-valor	Significancia
Tipo estiércol	0.00000012	1	0.24	0.6253	ns
Nivel H2Organix	0.000003	3	1.81	0.1479	ns
Periodo (días)	0.000136	3	90.78	<0.0001	***
T estiércol × nivel (H2Organix)	0.000002	3	1.58	0.1966	ns
T estiércol × periodo (días)	0.00000026	3	0.17	0.9168	ns
Nivel H2Org x periodo (días)	0.000005	9	1.04	0.4142	ns

ns = no significativo ($p > 0.05$); * = $p < 0.05$; ** = $p < 0.01$; *** = $p < 0.001$

De acuerdo a la Tabla 6, el análisis de varianza solo el periodo tiene un efecto altamente significativo con un valor ($F_{3,164} = 90.78$; $p < 0.0001$). El tipo de abono

($F_{1,164} = 0.24$; $p = 0.6253$), el nivel de microorganismos ($F_{3,164} = 1.81$; $p = 0.1479$) y sus interacciones ($p > 0.05$) no mostraron diferencias significativas.

Tabla 7. Promedio por periodo (días) de la tasa de asimilación neta TAN de la planta de papa (g/cm² día) en respuesta a dos tipos de estiércol (bovino y cuy) y tres niveles de H2Organix.

Periodo (días)	Tasa de asimilación neta media (g/cm² día)	Intervalo de confianza (95 %)	Error estándar	Tukey
32	0.002341	0.002133-0.002549	0.000104	a
63	0.000875	0.000667-0.001083	0.000104	b
91	0.000461	0.000253-0.000668	0.000104	c
122	0.000137	-0.000071-0.000345	0.00104	a

La TAN (Tabla 7) es la máxima a los 32 días con 0.002341 g/cm² día al principio del crecimiento. A los 63 disminuye con un promedio 0.000875 g/cm² día, disminuyendo hasta los 122 días. La TAN mostró una variación significativa en el periodo de evaluación, con el

valor máximo a los 32 días (0.002341 ± 0.000104 g/cm² día). La TAN disminuyó drásticamente a los 63 días (0.000875 ± 0.000104 g/cm² día), continuando su descenso a los 91 días (0.000461 ± 0.000104 g/cm² día) hasta alcanzar valores cercanos a cero a los 122 días

(0.000137 ± 0.000104 g/cm² día). Todas las comparaciones entre periodos fueron significativas ($p < 0.05$), excepto entre 91 y 122 días ($p = 0.1173$).

López y Alvarado (1977), reportaron que en el altiplano de Pasto, los valores máximos de índice de área foliar se alcanzan entre los 91 y 98 días después de la siembra, la disminución de área foliar es debido a que la planta redirige sus recursos hacia el engrose de tubérculos y se inicia la senescencia del aparato foliar.

Rendimiento de tubérculos (RT) del cultivo de papa

El rendimiento de tubérculos (Figura 13), en promedio el EC frente al EB presenta rendimientos más altos, entre niveles de H2Organix, el ECN2 alcanza el mayor rendimiento con 1.51 kg/planta, seguido del ECT con 1.46 kg/planta, seguido de EBN2 con 1.42 kg/planta, ECN1 con 1.43 kg/planta por debajo de estos rendimientos se encuentran los demás tratamientos.

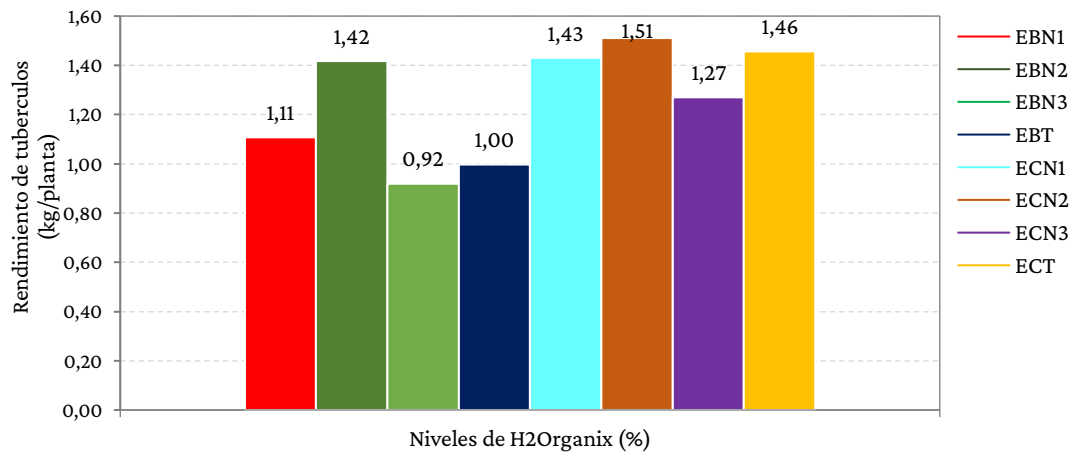


Figura 13. Rendimiento de tubérculos (kg/planta) de la planta de papa en respuesta a dos tipos de estiércol (bovino y cuy) y cuatro niveles de H2Organix.

La comparación entre tipos de estiércol EB y EC (Figura 14), presentan medianas entre 700-800 g/planta y 1 000-1 100 g/planta, donde el EC se destaca por encima de EB con mayor rendimiento con un valor $p = 0.0003$, con promedios de 794 g/planta y 1 075 g/planta respectivamente. Comparando los niveles de H2Organix las diferencias entre medianas no son significativas con un valor $p = 0.9258$, presentan una amplia superposición entre todas las cajas. Particularmente el testigo alcanza una media más con 952 g/planta su mediana es inferior a

N2 con una media de 890 g/planta y una mediana entre 800-900 g/planta, lo que indica una distribución asimétrica con una cola de valores altos que influye en la media sin modificar la mediana. Por lo tanto, la incorporación de H2Organix no afecta el rendimiento. El rendimiento por periodos, las cajas son completamente diferentes y no se solapan entre periodos ($p < 0.0001$) para todas las comparaciones resulta extremadamente significativo.

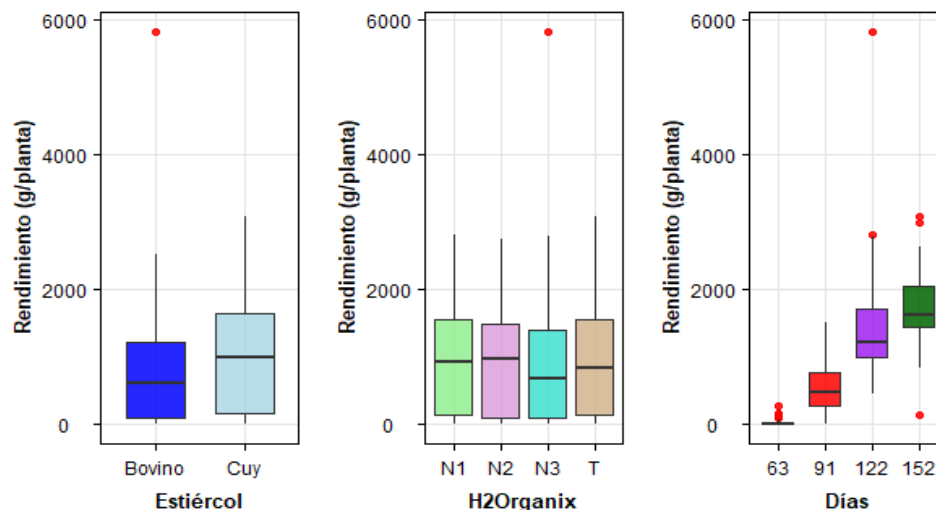


Figura 14. Diagrama de caja y bigote del rendimiento de tubérculos (RT) de la planta de papa (g/planta en respuesta a dos tipos de estiércol (bovino y cuy) y cuatro niveles de H2Organix.

La distribución de los resultados (Figura 15) presenta una tendencia asimétrica positiva con una cola hacia la derecha con un pico muy alto en valores cercanos a cero y valores hacia la derecha hasta 5 800 g/planta, con una media = 934.82 g/planta y una mediana = 822 g/planta, la

media>mediana confirmando la asimetría positiva. El 50 % de las plantas presentan un rendimiento menor a 822 g/planta. La media es dominada hacia la derecha por pocos valores con altos rendimientos, la mayoría de las observaciones están concentradas en valores bajos.

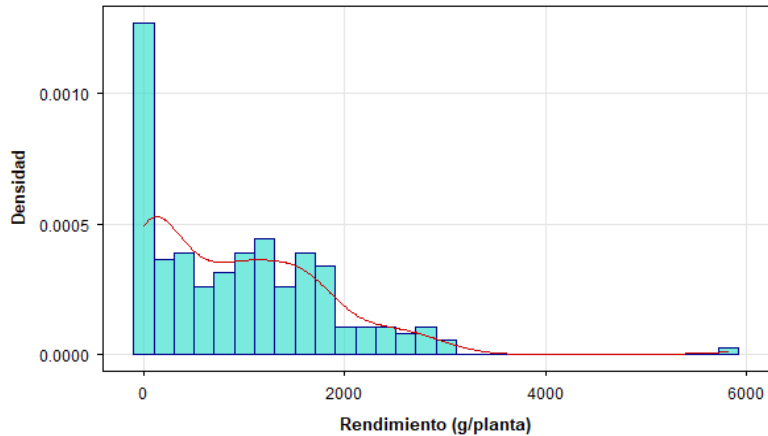


Figura 15. Histograma de distribución del rendimiento de tubérculos (RT) de la planta de papa (g/planta) en respuesta a cuatro niveles de H2Organix.

La distribución del mapa de calor (Figura 16), todos los niveles de H2Organix dentro el mismo periodo de evaluación presentan colores similares por lo que no existe efecto del H2Organix. Asimismo en el TE, ambos

muestran el mismo patrón de colores. Los colores cálidos reflejan mayor rendimiento y los colores oscuros menor rendimiento.

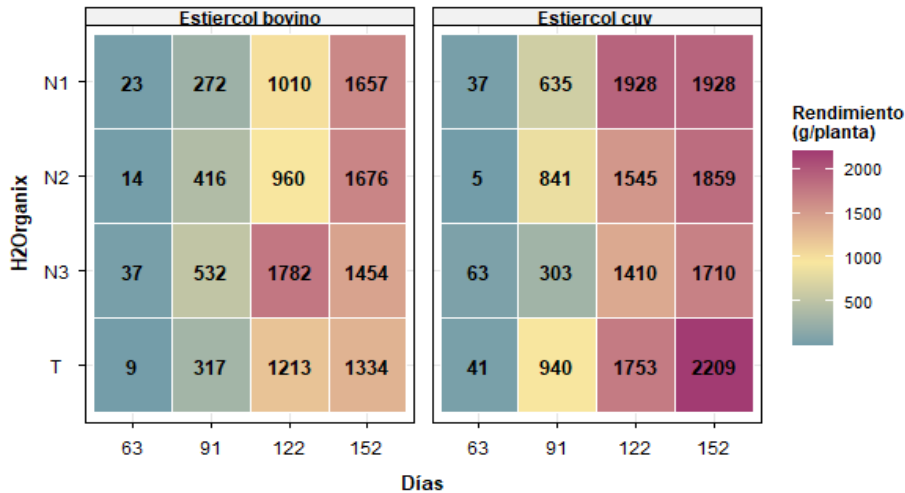


Figura 16. Mapa de calor del rendimiento de tubérculos (RT) de la planta de papa (g/planta) en respuesta a dos tipos de estiércol (bovino y cuy) y cuatro niveles de H2Organix.

De acuerdo a los resultados en la verificación de supuestos la prueba de Shapiro-Wilk con un valor $p < 0.0001$ los datos no cumplen el supuesto de normalidad. La prueba de Levene con un valor $F = 1.5776$ y un valor $p = 0.0373$ las varianzas no cumplen el supuesto de homocedasticidad, por lo tanto el modelo lineal de efectos mixtos resulta adecuado para el análisis de las

varianzas. El ajuste del modelo donde el R^2 m alcanza a 0.6428, donde el 64.3 % de la varianza es debido a los efectos fijos y el R^2 c alcanza 0.6489, donde el 64.89 % explica los efectos fijos y variables, una mínima diferencia de 0.6 % que refleja una excelente homogeneidad experimental.

Tabla 8. Análisis de varianza (modelo lineal mixto) del rendimiento de tubérculo (RT) de la planta de papa (g/planta) en respuesta a dos tipos de estiércol (bovino y cuy) y cuatro niveles de H2Organix.

Efecto	Suma de cuadrados	Grados de libertad	F	p-valor	Significancia
Tipo estiércol	3 795.272	1	13.38	0.0003	***
Nivel H2Organix	132 553	3	0.16	0.9258	ns
Periodo (días)	90 202.530	3	106.03	0.0001	***
T estiércol × nivel (H2Organix)	2 383.798	3	2.8	0.0416	*
T estiércol × periodo (días)	1 229.419	3	1.45	0.2316	ns
Nivel H2Org x periodo (días)	1 419.385	9	0.56	0.8313	ns

De acuerdo al análisis de varianza (Tabla 8) los resultados mostraron efecto significativo en el TE con un valor ($F_{1,164} = 13.38$; $p = 0.0003$). La aplicación de H2Organix no tiene influencia en el rendimiento de acuerdo al valor $p = 0.9258$. El rendimiento en los periodos de evaluación es determinante al resultar significativo

con un valor ($F_{3,164} = 106.03$; $p < 0.0001$). La interacción TE * Nivel H2Organix es significativa con un valor ($F_{3,164} = 2.80$; $p = 0.0416$) donde el efecto del estiércol depende del nivel de H2Organix. Las demás interacciones resultan no significativas.

Tabla 9. Promedio ajustado por tipo de estiércol del rendimiento del tubérculo (RT) de papa (g/planta) en respuesta a dos tipos de estiércol (bovino y cuy).

Tipo estiércol	Rendimiento medio (g/planta)	Error estándar	Intervalo de confianza (95 %)
Bovino	794	61.5	662-927
Cuy	1 075	61.5	943-1 208

El EC (Tabla 9) produjo un rendimiento superior (1075 ± 61.5 g/planta) comparado con EB (794 ± 61.5 g/planta), representando un incremento del 35 %. El rendimiento máximo se alcanzó a los 152 días

(1728 ± 82.1 g/planta), sin diferencias significativas a los 122 días ($p = 0.0549$). Se concluye que el EC es más efectivo para maximizar el rendimiento de papa, con cosecha óptima a partir de los 122 días.

Tabla 10. Promedio por periodo (días) del rendimiento de tubérculos (RT) de la planta de papa (g/planta) en respuesta a dos tipos de estiércol (bovino y cuy) y cuatro niveles de H2Organix.

Periodo (días)	Rendimiento medio (g/planta)	Intervalo de confianza (95 %)	Error estándar	Tukey
63	28.5	-138-195	82.1	a
91	532.1	366-698	82.1	b
122	1 450.3	1 284-1 616	82.1	c
152	1 728.5	1 562-1 895	82.1	c

De acuerdo a la (Tabla 10-11), el rendimiento aumenta progresivamente con el tiempo, no hay diferencia significativa entre 122 y 152 días con valor marginal

$p = 0.0549$, donde el rendimiento se estabiliza después de los 122 días. El máximo rendimiento alcanza a los 152 días con 1 728 g/planta.

Tabla 11. Fases del desarrollo del cultivo (g/planta) de la planta de papa en respuesta a dos tipos de estiércol (bovino y cuy) y cuatro niveles de H2Organix.

Fase	Tiempo (días)	Rendimiento (g/planta)	Tasa de acumulación (g/días)	Estado del cultivo
Adaptación	63	29	Muy baja	Establecimiento del cultivo
Exponencial	63-91	29-532	503 (28 días)	Rápido crecimiento vegetativo
Lineal	91-122	532-1 450	918 (31 días)	Acumulación en tubérculos
Senescencia	122-152	1 450-1728	278 (30 días)	Maduración crecimiento lento

El rendimiento con EC (1075 ± 61.5 g/planta) fue significativamente superior al obtenido con EB (794 ± 61.5 g/planta), con una diferencia de 281 g/planta (IC 95 %: 129-433; $p = 0.0003$). El rendimiento aumentó de forma progresiva con el periodo de cosecha ($p < 0.001$ para todas

las comparaciones), alcanzando su máximo a los 152 días (1728 ± 82.1 g/planta). No se observaron diferencias significativas entre los rendimientos de 122 y 152 días ($p = 0.0549$). Los niveles de H2organix no afectaron el rendimiento ($p = 0.9258$).

Calero-Ríos et al. (2025), evaluaron el efecto del estiércol de cuy en el cultivo de maíz amarillo duro (híbrido INIA 619), con dosis de 5 y 10 t/ha de estiércol de cuy en combinación con diferentes niveles de fertilización mineral (0 %, 50 %, 75 % y 100 %), permitió reducir hasta en un 50 % la dosis de fertilizante mineral, manteniendo rendimientos similares o incluso superiores al tratamiento con fertilización completa (8.8 t/ha con 50 % de fertilizante mineral frente a 8.7 t/ha con 100 %).

Klopper et al. (2025), señalaron que la inoculación con rizobacterias promotoras del crecimiento (PGPR) y hongos micorrícicos arbusculares (HMA) constituye una herramienta clave para potenciar el crecimiento y rendimiento de la papa, Aislaron cepas fluorescentes de *Pseudomonas* spp. de papa que generaron aumento del crecimiento aéreo de hasta 500 % en invernadero e incrementos del rendimiento de tubérculos de hasta 17 % en campo, efectos asociados a una colonización persistente de la rizosfera y a una mayor elongación de los estolones en etapas tempranas. Rodrigues et al. (2001), con el objetivo de la mineralización e incorporando materia orgánica, el rendimiento aumentó ligeramente el peso seco de la papa (PSP) por encima del tratamiento control (entre un 9 % y un 25 %). Tiwari et al. (2022), en base a un tratamiento con: 67 % N a través de urea + 33 % N a través de estiércol + bacterias solubilizadoras de fósforo (PSB), hallaron un rendimiento de tubérculos de 38.41 t/ha. Raghav et al. (2008), en combinación de abonos orgánicos y fertilizantes químicos, reportaron peso de tubérculos por planta de 626.66 g. Ngabirano (2025), con abonos orgánicos y fertilizantes artificiales sobre la productividad del crecimiento y rendimiento de la papa irlandesa, encontró tasas de aplicación más altas, como

10, 15 y 20 t/ha, mostraron un aumento en el peso total medio de tubérculos. Shi et al. (2023), en un experimento de rotación arveja, trigo y papa de 15 años, la fertilización conjunta con estiércol ovino, N, P inorgánico incrementó el rendimiento total del sistema respecto a las aplicaciones individuales y al testigo, mostrando efectos sinérgicos sobre el rendimiento en los primeros años, asociados a aumentos rápidos de nitrógeno inorgánico y fósforo disponible y de biomasa microbiana del suelo.

Correlación de Pearson TCA, TCR, TAN, Rendimiento

La correlación (Figura 17) TCA vs rendimiento ($r = 0.117$, $p = 0.1618$), no presenta correlación significativa aunque el estiércol de cuy produce mayor TCA esto no se traduce en mayor rendimiento, el cual depende más de la eficiencia que el crecimiento absoluto. TCR vs rendimiento ($r = -0.559$, $p < 0.0001$) correlación negativa moderada a fuerte, a mayor TCR en etapas tempranas (63-91 días) menor es el rendimiento de tubérculos que en etapas tardías (122-152 días), por lo que el crecimiento rápido en biomasa vegetativa invierte menos en la formación de recursos para la formación de tubérculos. La TAN vs rendimiento ($r = -0.531$, $p < 0.0001$) presenta una correlación negativa moderada, mayor eficiencia de asimilación temprana se asocia con menor rendimiento de tubérculos, al igual que la TCR refleja una compensación entre crecimiento vegetativo y productivo. La correlación TCR vs TAN ($r = 0.885$, $p < 0.0001$) existe una correlación positiva fuerte al medir procesos fisiológicos similares. En la correlación TE, TCR y TAN vs rendimiento el EC muestran correlaciones ligeramente más fuertes, el EB muestra una correlación prácticamente nula.

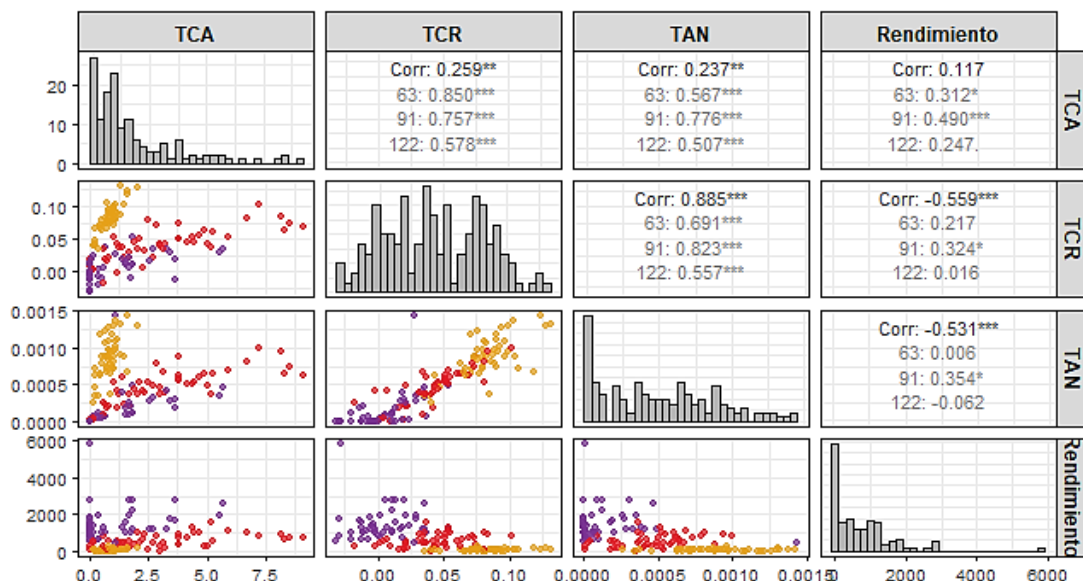


Figura 17. Matriz de correlación de rendimiento de tubérculos de la planta de papa vs. variables fisiológicas en respuesta a dos tipos de estiércol (bovino y cuy) y cuatro niveles de H2Organix.

La TCA (Figura 18) a los 63 días es baja y el rendimiento muy bajo con tendencia positiva, con dispersión reducida, la planta crece moderadamente y no hay acumulación significativa de tubérculos. A los 91 días la TCA es máxima con un rendimiento medio tendencia positiva con datos dispersos, la TCA máxima coincide con la acumulación activa del rendimiento, plantas con mayor TCA a los 91 días tienden a producir más tubérculos. A los 122 días TCA intermedia con rendimiento alto tendencia positiva, reduce la TCA y el rendimiento ya está definido, la TCA ya no es el mejor predictor, en general en tiempos cortos (63 días) con una TCA baja el rendimiento también es bajo, para tiempos largos (122 días) con TCA intermedia el rendimiento alto es alto. La TCA no es buen predictor del rendimiento solo a los 91 días.

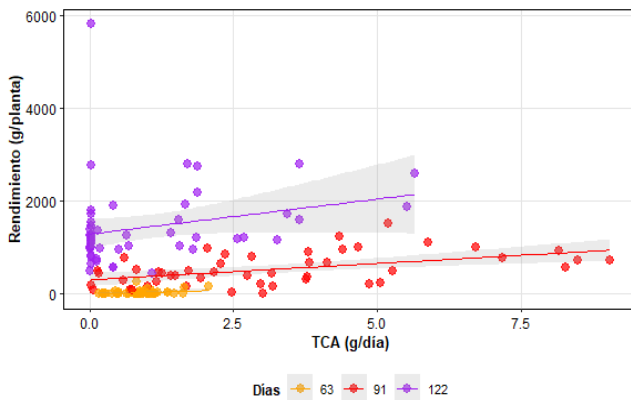


Figura 18. Relación TCA vs. rendimiento segmentado por periodo de evaluación de tubérculos de la planta de papa en respuesta a dos tipos de estiércol (bovino y cuy) y cuatro niveles de H2Organix.

De acuerdo a la Figura 19, a los 63 días la TCR alcanza su máxima eficiencia y un rendimiento bajo, la eficiencia temprana no se traduce directamente en rendimiento final con una dispersión moderada. A los 91 días la TCR su eficiencia es intermedia y el rendimiento medio con una dispersión mayor, presenta una tendencia positiva moderada, el rendimiento tiende a acumularse. A los 122 días la TCR es baja y el rendimiento es alto con una tendencia nula cesa el crecimiento relativo y el rendimiento no depende la TCR, mayor dispersión de datos. En forma general a mayor TCR (63 días) menor rendimiento, a menor TCR (122 días) mayor rendimiento.

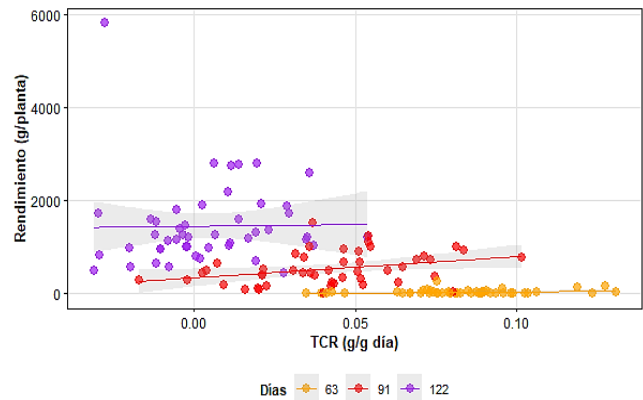


Figura 19. Relación TCR vs. Rendimiento segmentado por periodo de evaluación de tubérculos de la planta de papa en respuesta a dos tipos de estiércol (bovino y cuy) y cuatro niveles de H2Organix.

La TAN (Figura 20) a los 63 días la TAN es intermedia con rendimiento bajo, tendencia nula, la TAN no explica la variabilidad del rendimiento. A los 91 días la TAN baja y el rendimiento es medio, tendencia positiva leve, cada valor de las unidades experimentales están dispersas, algunos con TAN alta pueden asociarse a mayor rendimiento, disminuye la TAN y el rendimiento empieza acumularse por lo tanto las plantas mantienen una ligera eficiencia. A los 122 días muestran una TAN baja y se incrementa el rendimiento con tendencia negativa débil, con valores dispersos y presencia de valores atípicos, la TAN cesa y el rendimiento ya está completamente definido, la TAN en este tiempo no tiene poder predictivo. En general con una TAN baja el rendimiento es alto y con una TAN alta el rendimiento es bajo.

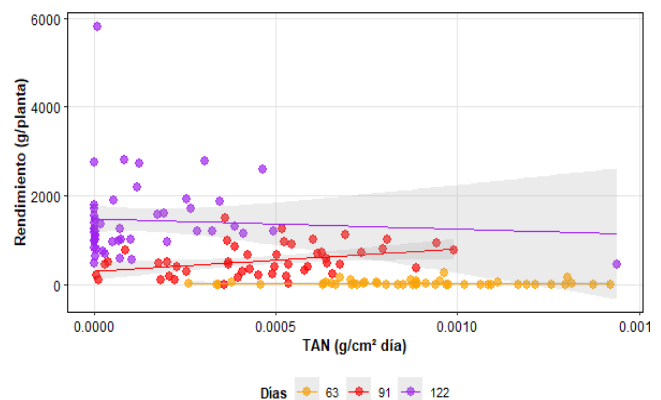


Figura 20. Relación TAN vs. Rendimiento segmentado por periodo de evaluación de tubérculos de la planta de papa en respuesta a dos tipos de estiércol (bovino y cuy) y cuatro niveles de H2Organix.

CONCLUSIONES

El estiércol de cuy superó al estiércol bovino en la tasa de crecimiento absoluto (TCA: 1.55 vs 1.04 g/día; $p = 0.0102$) y rendimiento final (1 075 vs 794 g/planta; $p = 0.0003$), con una interacción significativa estiércol $\times$ Tiempo ($p = 0.0078$) que evidencia su ventaja a los 91 días. La eficiencia de conversión (TCR, TAN) no es diferente entre tipos de estiércol ($p > 0.05$), indicando que el estiércol de cuy promueve mayor crecimiento bruto, no mayor eficiencia.

El periodo de evaluación fue el factor con mayor significancia en todas las variables ($p < 0.0001$). La secuencia temporal de picos fue: TAN (32 días) $\rightarrow$ TCR (63 días) $\rightarrow$ TCA (91 días) $\rightarrow$ Rendimiento (152 días). Esta progresión refleja la transición natural del cultivo desde la máxima eficiencia de asimilación hasta el máximo rendimiento de tubérculos.

Ninguno de los tres niveles de H2Organix evaluados (N1, N2, N3, Testigo) afectó significativamente las variables analizadas ($p > 0.05$). El testigo presentó valores similares o superiores a los tratamientos, lo que sugiere que la población microbiana nativa del suelo o del estiércol fue suficiente para sostener los procesos de mineralización.

Las correlaciones globales negativas de TCR y TAN con el rendimiento ($r = -0.559$ y -0.531) reflejan exclusivamente el desfase temporal entre la máxima eficiencia temprana (32-63 días) y el rendimiento tardío de tubérculos (122-152 días).

El modelo mixto explicó el 64.9 % de la variabilidad del rendimiento (R^2 condicional = 0.6489). El estiércol ($p = 0.0003$) y el tiempo ($p < 0.0001$) fueron los factores significativos, junto con la interacción estiércol $\times$ nivel ($p = 0.0416$). La incorporación de H2Organix no fue significativa.

BIBLIOGRAFÍA

Aiysha, D., & Latif, Z. (2019). Insights of organic fertilizer micro flora of bovine manure and their useful potentials in sustainable agriculture. *Plos one*, 14(12), e0226155. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0226155>

Ansabayeva, A., Makhambetov, M., Rebouh, N. Y., Abdelkader, M., Saady, H. S., Hassan, K. M., Nasser, M. A., Ali, M. A. A., & Ebrahim, M. (2025). Plant growth-promoting microbes for resilient farming systems: Mitigating environmental stressors and boosting crops productivity—A review. *Horticulturae*, 11(3), 260. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11030260>

Bastías, R. M., Diez, F., & Finot, V. L. (2014). Tasa de crecimiento absoluto y relativo como indicadores de fases de desarrollo del fruto en cerezo (*Prunus avium*). *Chilean Journal of Agricultural and Animal Sciences*, 30(2), 89-98. <https://revistas.udec.cl/index.php/chjaas/article/view/10524>

Calderan-Rodrigues, M. J., & Caldana, C. (2024). Impact of the TOR pathway on plant growth via cell wall remodeling. *Journal of Plant Physiology*, 294, 154202. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2024.154202>

Calero-Rios, E., Borbor-Ponce, M., Lastra, S., & Solórzano, R. (2025). Guinea pig manure and mineral fertilizers enhance the yield and nutritional quality of hard yellow maize on the Peruvian coast. *Agrochemicals*, 4(2), 6. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/agrochemicals4020006>

Cavalcante, L. F., Bezerra, F. T. C., Souto, A. G. de, Bezerra, M. A. F., Lima, G. S. de, Gheyi, H. R., Pereira, J. F. da S., & Beckmann-Cavalcante, M. Z. (2019). Biofertilizers in horticultural crops. *Comunicata Scientiae*, 10(4), 415-428. <https://doi.org/10.14295/cs.v10i4.3058>

Effa, E. A., Mofunanya, A. A. J., & Ngele, B. A. (2020). Influence of Soil Amendment on the Relative Growth Rate and Net Assimilation Rate of *Phaseolus vulgaris* and *Vigna aconitifolia*. *Journal of Applied Life Sciences International*, 22(4), 1-13. <https://doi.org/10.9734/jalsi/2019/v22i430136>

Graves, C. (Ed.). (2006). La papa, tesoro de los Andes (2.ª ed.). Centro Internacional de la Papa. http://cipotato.org/wp-content/uploads/2014/05/la_papa_tesoro_de_los_andess.pdf

Grisafi, F. (2023). Modelling the architecture of *Corylus avellana* and parametrization of the functional structural plant model L-Hazelnut. <https://hdl.handle.net/20.500.14242/159892>

Ierna, A., & Distefano, M. (2024). Crop nutrition and soil fertility management in organic potato production systems. *Horticulturae*, 10(8), 886. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10080886>

Kloepper, J. W., Schroth, M. N., & Miller, T. D. (1980). Effects of rhizosphere colonization by plant growth-promoting rhizobacteria on potato plant development and yield. *Phytopathology*, 115(8V), 1078-1082. https://scholar.google.com/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=Effects+of+Rhizosphere+Colonization+by+Plant+Growth-Promoting+Rhizobacteria+on+Potato+Plant+Development+and+Yield&btnG=

Kour, D., Rana, K. L., Yadav, A. N., Yadav, N., Kumar, M., Kumar, V., Vyas, P., Dhaliwal, H. S., & Saxena, A. K. (2020). Microbial biofertilizers: Bioresources and eco-friendly technologies for agricultural and environmental sustainability. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 23, 101487. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101487>

Kumar, S., Sindhu, S. S., & Kumar, R. (2022). Biofertilizers: An ecofriendly technology for nutrient recycling and environmental sustainability. *Current Research in Microbial Sciences*, 3, 100094. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2021.100094>

Laguado, N., Marín, M., Arenas de Moreno, L., Araujo, F., Castro de Rincón, C., & Rincón, A. (2002). Crecimiento del fruto de guayaba (*Psidium guajava* L.) del tipo Criolla Roja. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 19(4), 273-283. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-78182002000400003

Lazo, J. V., & Ascencio, J. (2016). Interferencia entre *Phaseolus vulgaris* L. y *Amaranthus dubius* Mart.: Análisis funcional del crecimiento vegetal en un modelo de serie de reemplazo. *Bioagro*, 28(3), 151-162. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612016000300002

- Lee, J., Jo, N. Y., Shim, S. Y., Linh, L. T. Y., Kim, S. R., Lee, M. G., & Hwang, S. G. (2023). Effects of Hanwoo (*Korean cattle*) manure as organic fertilizer on plant growth, feed quality, and soil bacterial community. *Frontiers in plant science*, 14, 1135947. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1135947>
- López, G., & Alvarado, L. (1977). Comparación del crecimiento foliar de dos variedades de papa (*Solanum tuberosum* ssp *andigena*), en el altiplano de Pasto. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 7(1-2), 19-28. <https://revistas.udenar.edu.co/index.php/rfacia/article/view/1340>
- Martínez, A., del Ángel-Pérez, A. L., Becerril-Román, A. E., & Rebolledo-Martínez, L. (2005). Análisis de crecimiento de tres cultivares de piña cultivados sobre mantillo plástico y suelo desnudo. *Interciencia*, 30(12), 758-763. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442005001200007
- Mitter, E. K., Tosi, M., Obregón, D., Dunfield, K. E., & Germida, J. J. (2021). Rethinking crop nutrition in times of modern microbiology: innovative biofertilizer technologies. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 606815. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.606815>
- Morales A., N. V., & Quiroga S., M. (2019). Capacidad de retención de agua en un suelo arenoso con adición de hojas de sábila (*Aloe barbadensis* Miller) y pencas de tuna (*Opuntia ficus-indica* sp.) deshidratadas y su influencia en el desarrollo fisiológico de la acelga (*Beta vulgaris* var. cicla). *CIBUM SCIENTIA*, 1(1), 32-40. <https://doi.org/10.53287/atxm7443ag47h>
- Ngabirano, A. (2025). Assessing the effect of organic manure and artificial fertilizers on the productivity of Irish potato (*Solanum tuberosum*) growth and yield as well as profitability. Uganda Christian University. <https://scholar.ucu.ac.ug/browse/author?value=Amos%20Ngabirano>
- Naqqash, T., Hameed, S., Imran, A., Hanif, M. K., Majeed, A., & van Elsas, J. D. (2016). Differential response of potato toward inoculation with taxonomically diverse plant growth promoting rhizobacteria. *Frontiers in Plant Science*, 7, 144. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00144>
- Nosheen, S., Ajmal, I., & Song, Y. (2021). Microbes as biofertilizers, a potential approach for sustainable crop production. *Sustainability*, 13(4), 1868. <https://doi.org/10.3390/su13041868>
- Raghav, M., Kumar, T., & Kamal, S. (2008). Effect of organic sources on growth, yield and quality of potato. *Annals of Horticulture*, 1(1), 67-70. <https://www.semanticscholar.org/paper/Effect-of-Organic-Sources-on-Growth%2C-Yield-and-of-Raghav-Kumar/2380ff27cc0b000f7f4e5a80e083364d11883069>
- Ratna, S. A., Howlader, M. H. K., Hasan, M. M., Mallick, M. R., & Shanta, U. K. (2016). Effect of integrated use of manure and fertilizer on the growth and yield of potato. *Progressive Agriculture*, 27(4), 435-443.
- Rodrigues, M. A., Coutinho, J., & Martins, F. (2001). Efficiency of organic nitrogen fertilization of potato in Northeast Portugal. *Acta Horticulturae*, (563), 179-186. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2001.563.22>
- Santos Castellanos, M., Segura Abril, M., & Núñez López, C. E. (2010). Análisis de crecimiento y relación fuente-demanda de cuatro variedades de papa (*Solanum tuberosum* L.) en el municipio de Zipaquirá (Cundinamarca, Colombia). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 63(1), 5253-5266. <https://www.redalyc.org/pdf/1799/179914617004.pdf>
- Statsclimat.com. (2025). Comprehensive climate report: Viacha (Bolivia Plurinational State of). https://statsclimat.com/Latin-America-and-the-Caribbean/Bolivia_Plurinational_State_of/report_Viacha
- Sousa-Santos, C., Lima, TM, Cerqueira, AF, Dalmolin, Â. C., Almeida, Á. A., Santos, MS y Mielke, MS (2024). Determinantes de las tasas de crecimiento de toda la planta y de las hojas en progenies de *Genipa americana* L. (Rubiaceae). *Revista Brasileña de Biología*, 84, e281793. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.281793>
- Shi, X., Song, X., Yang, J., Zhao, Y., Yuan, Z., Zhao, G., ... & Li, F. M. (2023). Yield benefits from joint application of manure and inorganic fertilizer in a long-term field pea, wheat and potato crop rotation. *Field Crops Research*, 294, 108873. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378429023000667>
- Swaminathan, M. S., & Magoon, M. L. (1961). Origin and cytogenetics of the commercial potato. *Advances in genetics*, 10, 217-256. <https://www.sciencedirect.com/science/chapter/bookseries/abs/pii/S0065266008601182?via%3Dihub>
- Tiwari, A., Kumar, R., Sachan, R., Tiwari, H., & Pandey, S. R. (2022). Effect of organic and inorganic manure on yield, quality trait and economics of potato (*Solanum tuberosum* L.) under indo gangetic plain of Eastern uttar pradesh. *Journal of Experimental Agriculture International*, 44(3), 10-14. <https://doi.org/10.9734/jeai/2022/v44i330808>
- Tueros, M., Vilcapoma, M., Pillaca, G., Velásquez, J., Campos, H., Paitamala, O., & Matsusaka, D. (2025). Sinergias entre microorganismos y fertilización mineral en la calidad de semilla de papa (*Solanum tuberosum* L.). *Revista de Investigación Agroproducción Sustentable*, 7(1), 15-26. <https://repositorio.inia.gob.pe/server/api/core/bitstreams/bd92476-f24f-439f-9263-52c7770a4126/content>
- Wingler, A., & Paul, M. (2012). Preface: resource allocation and growth. *Journal of Experimental Botany*, 63(9), 3321-3323. <https://doi.org/10.1093/jxb/ers087>