

Dinámica de la absorción de nutrimentos en el cultivo de papa (*Solanum tuberosum*) variedad Superchola, para la producción de semilla prebásica

Dynamics of the nutrient absorption in the potato crop (*Solanum tuberosum*) Superchola variety, for pre-basic seed production



Gustavo Alejandro Arteaga Chamorro¹, Randon Stalin Ortiz Calle²,
Yamil Everaldo Cartagena Ayala³

Siembra 9(2) (2022): e3481

Recibido: 21/11/2021 Revisado: 10/01/2022 / 06/06/2022 Aceptado: 05/07/2022

¹ Universidad Central del Ecuador. Facultad de Ciencias Agrícolas. Jerónimo Leiton y Gatto Sobral s/n. Ciudadela Universitaria. 170521. Quito, Ecuador.

✉ gaarteaga@uce.edu.ec

🌐 <https://orcid.org/0000-0002-8091-2450>

² Universidad Central del Ecuador. Facultad de Ciencias Agrícolas. Jerónimo Leiton y Gatto Sobral s/n. Ciudadela Universitaria. 170521. Quito, Ecuador.

✉ rsortiz@uce.edu.ec

🌐 <https://orcid.org/0000-0001-6172-4932>

³ Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias INIAP. Estación Experimental Santa Catalina. Departamento de Manejo de Suelos y Aguas. Panamericana Sur km 1. 170518. Mejía, Ecuador.

✉ yamil.cartagena@iniap.gob.ec

🌐 <https://orcid.org/0000-0003-2447-2769>

*Autor de correspondencia: gaarteaga@uce.edu.ec

Resumen

Las curvas de absorción de los nutrientes permiten elaborar planes de fertilización óptimos para alcanzar un mejor rendimiento y calidad de los tubérculos en papa. La investigación se desarrolló en la Estación Experimental Santa Catalina (EESC) del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP - Ecuador). El objetivo fue determinar las curvas de absorción de los nutrientes (N, P, K, Ca, Mg y S) en la producción de semilla de papa prebásica con diferentes soluciones nutritivas en condiciones de invernadero, en suelo como sustrato y con plántulas provenientes de esquejes de la variedad Superchola. Se estudiaron cinco soluciones nutritivas: Testigo (T1), Método Racional (T2), INIAP (T3), Steiner (T4) y Pilvicsa (T5). Se utilizó un diseño completamente al azar. Se evaluó la biomasa seca total, absorción de nutrientes (cuatro etapas fenológicas) y rendimiento. Los resultados principales mostraron que: i) la mayor cantidad de biomasa se obtuvo en T5 con 205.68 g planta⁻¹; ii) la absorción de nutrientes en T5 presentó los mayores valores de N, P, K, Ca, Mg y S, con 4.4, 0.97, 8.25, 1.57, 0.52 y 0.55 g planta⁻¹, respectivamente; iii) T5 presentó un rendimiento de 10.73 t ha⁻¹ y T4, 10.63 t ha⁻¹, y iv) el modelo logístico utilizado presentó coeficientes de determinación del 90%. En conclusión, el tratamiento T5 (Pilvicsa) presentó mejores resultados en biomasa, absorción de nutrientes y rendimiento.

Palabras clave: curvas de absorción, biomasa, nutrición, papa.

Abstract

Nutrient uptake curves are essential in fertilization planning to achieve high yield and production quality. The research was carried out at the Santa Catalina Experimental Station (EESC) of the National Institute of Agricultural Research (INIAP - Ecuador). The research objective was to determine the nutrient absorption curves (N, P, K, Ca, Mg and S) in the production of pre-basic potato seed with different nutrient solutions under greenhouse conditions, evaluated in soil as the substrate and with seedlings obtained from cuttings of the Superchola variety. Five nutritional solutions were evaluated: The control (T1), Rational Method (T2), INIAP method (T3), Steiner method (T4) and Pilvicsa method (T5). These treatments were implemented in a completely randomized design. Variables

SIEMBRA

<https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/SIEMBRA>

e-ISSN: 2477-8850

ISSN: 1390-8928

Periodicidad: semestral

vol. 9, núm. 2, 2022

siembra.fag@uce.edu.ec

DOI: <https://doi.org/10.29166/siembra.v9i2.3481>



Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-NoComercial

evaluated were: total dry plant biomass, nutrient absorption (in four phenological stages) and yield. The highest amount of plant biomass was obtained with the nutritional solution T5 with 205.68 mg plant⁻¹. The highest nutrient absorption of N, P, K, Ca, Mg and S of 4.4, 0.97, 8.25, 1.57, 0.52 and 0.55 g plant⁻¹, respectively, were also obtained with the nutritional solution T5. The highest yield of 10.73 t ha⁻¹ and 10.63 t ha⁻¹ were obtained with the nutrient solutions of T5 and T4, respectively. The logistic model presented a determination coefficient of around 90%. In conclusion, the nutrient solution T5 (Pilvicsa) presented the highest plant biomass, nutrient uptake and yield.

Keywords: macroelement uptake, biomass, nutrition, potatoes.

1. Introducción

La papa (*Solanum tuberosum* L.) es uno de los cuatro cultivos alimenticios más importantes del mundo junto con el trigo, arroz y maíz (Devaux *et al.*, 2010). Aproximadamente 1,4 mil millones de personas consumen papa y la producción total mundial anual del cultivo sobrepasa los 300 millones de toneladas (Centro Internacional de la Papa [CIP], 2015).

En Ecuador, el rendimiento promedio nacional fue de 16,28 t ha⁻¹, siendo la variedad Superchola la más cultivada con un 62 % (Ministerio de Agricultura y Ganadería [MAG], 2019b). La producción se concentra principalmente en las provincias de la Sierra, de las cuales Carchi tiene la mayor superficie cosechada, con alrededor de 6.145 ha y un rendimiento medio de 21,68 t ha⁻¹ (MAG, 2019a).

La nutrición mineral es un factor que contribuye a mejorar el rendimiento y calidad de la papa. Los nutrientes deben ser aplicados en función de las cantidades y épocas que se requiere. Es así que la extracción de nitrógeno está entre 100 a 290 kg ha⁻¹, para el fósforo de 20 a 65 kg ha⁻¹ y de potasio 150 a 480 kg ha⁻¹ para rendimientos entre 20 a 60 t ha⁻¹ (Inostroza *et al.*, 2017).

Una alternativa para suministrar los nutrientes de manera oportuna es la utilización de la “fertirrigación” que son los fertilizantes disueltos en el agua de riego, constituyéndose en una tecnología muy importante para el uso eficiente de los nutrientes y el agua (Santos Coello y Ríos Mesa, 2016). Esta aplicación de los fertilizantes debe sincronizarse con las épocas de mayor absorción del cultivo, para de esta manera lograr una mejor eficiencia en el uso de los mismos durante el ciclo, esto mediante la generación de planes de fertirrigación (Bertsch, 2005).

El conocimiento de la absorción de nutrientes en cada etapa fenológica del cultivo, proporciona información para realizar programas de fertilización. También se debe considerar en estos programas la oferta nutrimental del suelo, la eficiencia de recuperación del fertilizante, época de siembra, condiciones del clima, manejo del cultivo, sistema de irrigación, entre otros (Villas-Bôas, 2001).

Siendo la utilización de semilla de papa de calidad un factor primordial para la obtención de buenos rendimientos con la sanidad adecuada, se planteó como objetivo la determinación de las curvas de absorción de nutrientes en la variedad de papa Superchola con lo cual se podrá mejorar las recomendaciones de fertirrigación en la producción de semilla prebásica.

2. Materiales y Métodos

La investigación se realizó en condiciones de invernadero en el Departamento de Manejo de Suelos y Aguas (DMSA) de la Estación Experimental Santa Catalina (EESC) del Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), ubicado en las coordenadas geográficas 0° 22' 2" de latitud sur y 78° 33' 18" de longitud oeste y 3.058 m s. n. m.

El experimento se instaló en condiciones semihidropónicas, en el cual se utilizó como sustrato el suelo, el cual fue desinfectado con carboxin + captan. Las propiedades químicas del suelo se presentan en la Tabla 1.

Se utilizaron plántulas de papa provenientes de esquejes de la variedad Superchola. Como contenedor se utilizó una funda plástica de 15 litros de capacidad, colocándose una planta, para tener en cada tratamiento 36 fundas (180 fundas total), dándonos una densidad de 13.333 plantas ha⁻¹.

Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con cinco tratamientos: T1, Testigo; T2, Método Racional (Rodríguez Sanfuentes, 1990); T3, INIAP (Araujo Jaramillo *et al.*, 2021); T4, Steiner (Steiner, 1984); y T5, Pilvicsa. Las dosis aplicadas de macroelementos para cada tratamiento en estudio se presentan en la Tabla 2. La fertirrigación se aplicó con una frecuencia de tres veces por semana, con dosis crecientes de agua de 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 hasta 1,0 L planta⁻¹, durante el ciclo del cultivo.

Tabla 1. Análisis químico del suelo.
Table 1. Soil chemical analysis.

Nutriente	Unidad	Valor	Interpretación
N	mg kg ⁻¹	39,00	Medio
P	mg kg ⁻¹	65,00	Alto
K	meq 100 g ⁻¹	0,50	Alto
Ca	meq 100 g ⁻¹	6,33	Medio
Mg	meq 100 g ⁻¹	0,68	Bajo
S	mg kg ⁻¹	9,80	Bajo
M.O.	%	9,70	Alto
pH	unidad	5,17	Ácido

Tabla 2. Tratamientos experimentales.
Table 2. Experimental treatments.

Trat.	N	P	K	Ca	Mg	S
	kg ha ⁻¹					
T1	0	0	0	0	0	0
T2	151	0	0	0	0	0
T3	213	40	56	36	11	90
T4	115	17	92	89	24	38
T5	218	138	477	19	104	77

Tabla 3. Fases fenológicas para el muestreo de la semilla de papa.
Table 3. Phenological stages for seed potato sampling.

Muestreo	Fase	ddt
1	Trasplante	1
2	Desarrollo	47
3	Plena Floración	83
4	Engrose	103
5	Madurez	131

Para la determinación de la biomasa y los nutrientes se tomaron muestras en cuatro órganos de las plantas de papa (raíces, tallos con hojas y tubérculos). Los muestreos se realizaron considerando las fases fenológicas del cultivo (Tabla 3). Las plantas se secaron en una estufa con aire circulante forzado a una temperatura de 65 °C durante 72 horas. Luego se molieron y posteriormente se realizaron las determinaciones analíticas. El nitrógeno se determinó por semi Semimicro-Kjeldahl modificado (Alcántar González y Sandoval Villa, 1999). El fósforo por foto colorimétrico-metavandato de amonio en extracto de digestión húmeda nítrico-perclórica. Para el azufre por turbidimétrico-cloruro de bario en extracto de digestión húmeda nítrico-perclórica. Las bases cambiables como K, Ca y Mg por espectrometría de emisión atómica en extracto de digestión húmeda nítrico-perclórica (Díaz-Romeu y Hunter, 1978).

La cosecha se realizó en forma manual a los 131 días después del trasplante, en 12 plantas de cada tratamiento y se clasificaron en categorías (Tabla 4).

Tabla 4. Categoría de semilla prebásica de papa (Araujo Jaramillo *et al.*, 2021).
Table 4. Category of pre-basic potato seed (Araujo Jaramillo *et al.*, 2021).

No	Categoría	Peso por tubérculo (g)
1	Gruesa	mayor o igual a 60
2	Grande	entre 41 y 59
3	Mediana	entre 21 y 40
4	Pequeña	menor o igual a 20

Para modelar la absorción de cada nutriente se utilizó la función logística normal (Alonso Báez *et al.*, 2002), de acuerdo con la ecuación [1]

$$W = \frac{A}{1+n*e^{-kt}} \quad [1]$$

donde:

- W = Representa el tamaño en el tiempo t .
- A = Es el valor límite de crecimiento.
- k = Tasa constante que determina la amplitud de la curva.
- n = No tiene significado biológico y sólo toma lugar en el tiempo $t = 0$.

Los resultados obtenidos de biomasa (seca), absorción de nutrientes (N, P, K, Ca, Mg y S) y rendimiento total fueron sometidos a análisis estadísticos, utilizándose el programa R versión 3.6.1 del 2019, así como el análisis de comparación medias por Tukey ($p < 0,05$).

3. Resultados y Discusión

De acuerdo con la fenología del cultivo de papa, la acumulación y distribución de la biomasa en la planta total en los tratamientos evaluados, las curvas de crecimiento tuvieron una tendencia similar durante el ciclo del cultivo, además de presentar diferencias estadísticas en todas las fechas evaluadas. Los mayores valores de biomasa se obtuvieron en los tratamientos T3, T4 y T5 a los 131 ddt, con 175,82, 185,93 y 205,68 g planta⁻¹; respectivamente, lo cual se refleja en el crecimiento del follaje y altura de la planta (Tabla 5). Estos resultados son superiores a los reportados por Flores-López *et al.* (2009); quienes realizaron una investigación similar en hidroponía con sustrato de perlita, encontrando valores entre 44,58 y 67,56 g planta⁻¹, la diferencia se debe a que usaron la papa variedad Gigant de la subespecie *tuberosum* con densidades de siembra de 8 a 45 plantas m⁻².

La absorción de N total en las etapas iniciales fue baja (Figura 1), la cual se incrementó a medida que se formaron los tubérculos, lo que concuerda con lo reportado por Koch *et al.* (2019) quienes sostienen que la necesidad de N del cultivo de papa es baja en las primeras cuatro a cinco semanas de crecimiento, y que además entre el 58 y 70 % del N total se absorbe durante la etapa de desarrollo del tubérculo. Se presentaron diferencias estadísticas entre tratamientos, siendo superiores a los 131 ddt T3 y T5 con 4,6 y 4,4 g planta⁻¹ (60,75 y 58,72 kg ha⁻¹), respectivamente; valores similares a los reportados por Goins *et al.* (2004) con medias de 4,19 g planta⁻¹ bajo un sistema hidropónico de flujo permanente de nutrientes (NFT). Las cuantificaciones fueron inferiores a las publicadas por Koch *et al.* (2019) quienes reportaron una absorción de 113,0 kg ha⁻¹ de N.

La absorción de N total en T3 y T5 fue superior a lo reportado por Cayambe Terán (2010) para la variedad Superchola, quien obtuvo un valor de 2,93 g planta⁻¹ de N a la finalización del ciclo (185 ddt) bajo la técnica de aeroponía para la obtención de semilla prebásica.

Los resultados obtenidos con el modelo logístico, demostraron que el tratamiento que presentó la mayor tasa de absorción de N fue T3, con tres fases: una lineal que presentó un incremento lento hasta los 40 ddt con una tasa de absorción de 12,58 mg planta⁻¹ día⁻¹; la siguiente fase de crecimiento fue más rápida con 46,10 mg planta⁻¹ día⁻¹ y se extendió hasta los 95 ddt; finalmente, hasta la culminación del ciclo la tasa de absorción disminuyó a un promedio de 40,52 mg planta⁻¹ día⁻¹ (Figura 1 y Tabla 6).

Tabla 5. Biomasa por órgano y total a los 131 días después del trasplante en el cultivo de papa.
Table 5. Organ and total biomass at 131 days after transplanting.

Tratamientos	Biomasa (g planta ⁻¹)*			
	Raíz	Tallos y hojas	Tubérculo	Total
T1	3,25	21,48 b	117,37 b	142,09 b
T2	3,68	25,85 ab	131,68 ab	161,20 ab
T3	4,47	29,80 ab	141,55 ab	175,82 ab
T4	4,03	27,48 ab	154,43 ab	185,93 ab
T5	4,25	38,48 a	162,95 a	205,68 a

* Promedios con letra diferente en la misma columna indican diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey ($p < 0,05$).

Tabla 6. Parámetros de la función logística normal para N, P y K.
Table 6. Normal logistic function parameters for N, P and K.

Tratamientos	Parámetros	Macronutrientes		
		N	P	K
T1	A	4.309,0	584,1	6.754,4
	n	45,10	260,30	168,20
	k	0,0297	0,0533	0,0476
	R ²	0,90	0,96	0,93
T2	A	5.197,0	655,4	6.013,4
	n	32,00	124,00	66,62
	k	0,0314	0,0458	0,0445
	R ²	0,92	0,95	0,91
T3	A	5.372,4	604,5	5.472,6
	n	42,12	108,30	12.317.290
	k	0,0432	0,0487	0,1951
	R ²	0,94	0,95	0,91
T4	A	4.307,8	639,6	7.039,4
	n	24,21	144,50	1.334,00
	k	0,0346	0,0520	0,0821
	R ²	0,88	0,93	0,89
T5	A	5.745,1	1.598,4	11.493,8
	n	67,02	173,60	126,70
	k	0,0413	0,0427	0,0441
	R ²	0,97	0,98	0,98

En la dinámica de la absorción de P total, se encontró diferencias estadísticas, con valores pequeños en su primera etapa (Figura 2), lo cual coincide con lo escrito por Koch *et al.* (2019), quien mencionó que la absorción de P es similar al N, es decir, pequeña en sus primeras semanas de crecimiento y que la mayor cantidad de este elemento se absorbe durante la fase de maduración de los tubérculos, este crecimiento se mantuvo hasta los 103 ddt para todos los tratamientos, a partir de los 131 ddt el tratamiento T5 acumuló el mayor valor con 0,97 g planta⁻¹ (12,91 kg ha⁻¹), esto se encuentra por debajo de lo reportado por Koch *et al.* (2019) con una absorción de 19,62 kg ha⁻¹, pero siendo superior a lo encontrado por Neshev y Manolov (2015), quienes obtuvieron absorción de 0,40 g planta⁻¹ para la papa variedad Picasso en una investigación desarrollada en macetas con suelo como sustrato.

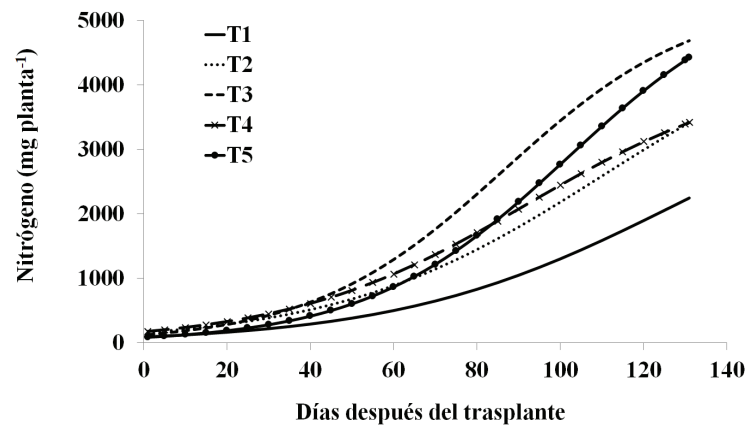


Figura 1. Absorción de N.
Figure 1. N uptake.

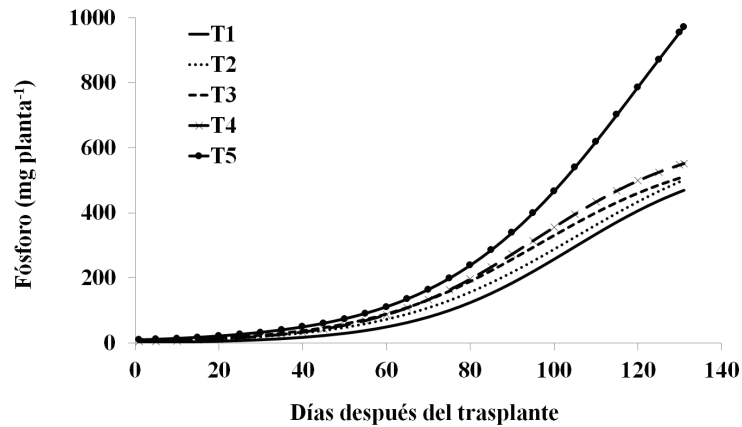


Figura 2. Absorción de P.
Figure 2. P uptake.

Los $0,97 \text{ g planta}^{-1}$ de P alcanzados en esta investigación fueron superiores a lo reportado por Cayambe Terán (2010) para la variedad Superchola, quien tuvo un valor de $0,46 \text{ g planta}^{-1}$ de P a los 185 ddt en la producción de semilla prebásica bajo la técnica de aeroponía.

Los resultados de la aplicación del modelo logístico indican que T5 presentó la mayor tasa de absorción de P, con 3 fases: la primera con un incremento lento hasta los 40 ddt y una absorción de $0,99 \text{ mg planta}^{-1} \text{ día}^{-1}$; la siguiente de crecimiento rápido con $5,79 \text{ mg planta}^{-1} \text{ día}^{-1}$ y se extendió hasta los 90 ddt, hasta la finalización del ciclo (131 ddt), donde la tasa de absorción de P fue más acelerada con $15,50 \text{ mg planta}^{-1} \text{ día}^{-1}$ (Figura 2 y Tabla 6).

La absorción de K total presentó diferencias estadísticas, con un crecimiento constante hasta los 103 ddt (Figura 3), luego de lo cual aumentó su tasa hasta los 131 ddt, T5 extrajo el mayor valor con $8,25 \text{ g planta}^{-1}$ ($110,05 \text{ kg ha}^{-1}$), este valor se encuentra por debajo de lo publicado por Koch *et al.* (2019) con $162,68 \text{ kg ha}^{-1}$, contrariamente, los $8,25 \text{ g planta}^{-1}$ de K fueron superiores a los obtenidos por Neshev y Manolov (2015), quienes tuvieron la absorción de $3,77 \text{ g planta}^{-1}$ en la papa variedad Picasso.

El valor encontrado de $8,25 \text{ g planta}^{-1}$ de K fue superior a lo reportado por Cayambe Terán (2010) quien trabajó en la producción de semilla prebásica en aeroponía con la variedad Superchola y reportó un valor de $3,16 \text{ g planta}^{-1}$ a la finalización del ciclo.

La alta disponibilidad del potasio en el suelo de estudio y la absorción concuerda con lo publicado por Horneck y Rosen (2008) y Burke (2012) en cuanto a que el K es el elemento que mayor cantidad remueve el cultivo de papa, llegando a extraer alrededor de 415 kg ha^{-1} al final del ciclo, con una tasa de absorción máxima de $15,6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$.

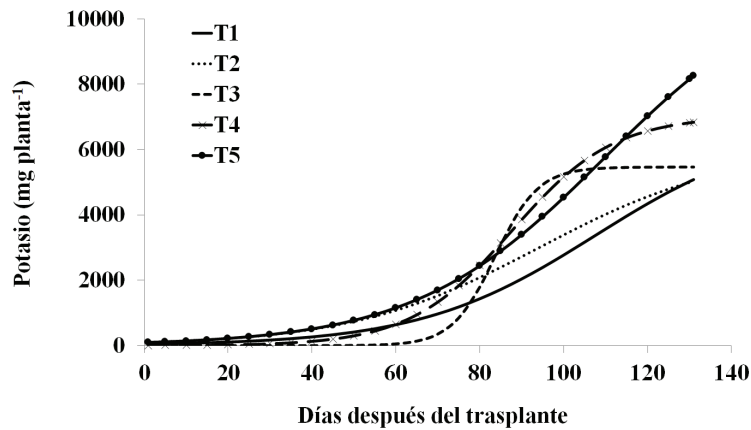


Figura 3. Absorción de K.
Figure 3. K uptake.

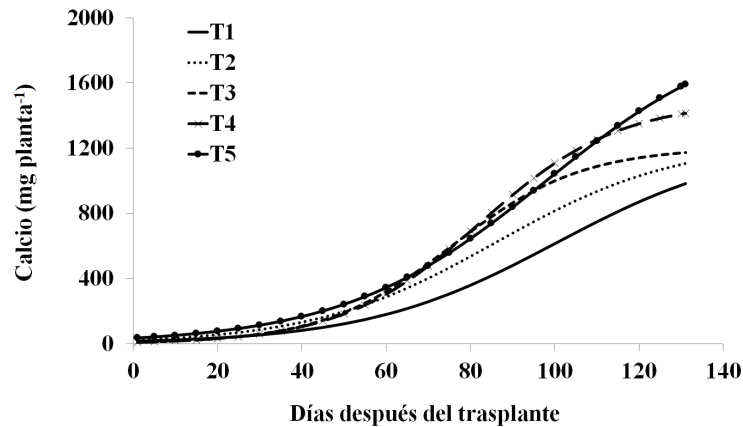


Figura 4. Absorción de Ca.
Figure 4. Ca uptake.

Con la aplicación del modelo logístico, T5 obtuvo la mayor tasa de absorción de K con tres fases, la primera de bajo incremento con $10,30 \text{ mg planta}^{-1} \text{ día}^{-1}$ y una duración de 40 ddt, la siguiente de crecimiento rápido con $78,64 \text{ mg planta}^{-1} \text{ día}^{-1}$ y se extendió hasta los 120 ddt, la tasa de absorción se incrementó a $109,96 \text{ mg planta}^{-1} \text{ día}^{-1}$ hasta la finalización del ciclo. Esta respuesta coincide con lo reportado por Alonso Báez *et al.* (2002) (Figura 3 y Tabla 6).

En la dinámica de absorción de Ca se encontró diferencias estadísticas, con un crecimiento lento hasta los 83 ddt (Figura 4), luego subió rápidamente a los 103 ddt obteniendo en T5 la mayor absorción a los 131 ddt con $1,57 \text{ g planta}^{-1}$ ($20,88 \text{ kg ha}^{-1}$), lo cual se encuentra por arriba de los $9,29 \text{ kg ha}^{-1}$ publicado por Koch *et al.* (2019) y de los $0,177 \text{ g planta}^{-1}$ reportado por Coraspe-León *et al.* (2009), quienes trabajaron en la producción de tubérculos-semilla prebásica de papa en condiciones de invernadero en macetas con arcilla expandida como sustrato y con la variedad Atlantic, misma que es de la subespecie *tuberosum*.

Los $20,88 \text{ kg ha}^{-1}$ de Ca encontrados, fueron superiores a los 12 kg ha^{-1} reportados por Cabalceta *et al.* (2005) quien trabajó a campo abierto, a una densidad de $33.300 \text{ plantas ha}^{-1}$ y con la variedad MNF-80 de la subespecie *tuberosum*. Por otro lado, los $1,57 \text{ g planta}^{-1}$ de Ca total reportados fueron inferiores a los $1,94 \text{ g planta}^{-1}$ que obtuvo Cayambe Terán (2010) en la producción de semilla prebásica de papa variedad Superchola.

Los resultados obtenidos para el modelo logístico para Ca, mostraron que T5 presentó la mayor tasa de absorción en tres etapas: la primera de bajo incremento con una tasa de $4,12 \text{ mg planta}^{-1} \text{ día}^{-1}$ y 50 ddt de duración, la siguiente más rápida con $16,43 \text{ mg planta}^{-1} \text{ día}^{-1}$ y se extendió hasta los 105 ddt, la tercera se mantuvo a un promedio de $16,48 \text{ mg planta}^{-1} \text{ día}^{-1}$ hasta la finalización del ciclo (Figura 4 y Tabla 7).

Tabla 7. Parámetros de la Función logística normal para Ca, Mg y S.
Table 7. Normal logistic function parameters for Ca, Mg and S.

Tratamientos	Parámetros	Macronutrientes		
		Ca	Mg	S
T1	A	1.236,5	504,0	792,8
	n	82,60	103,7	74,45
	k	0,0440	0,0422	0,0305
	R ²	0,87	0,94	0,94
T2	A	1.247,1	484,9	514,2
	n	53,28	61,00	37,34
	k	0,0460	0,0435	0,0342
	R ²	0,84	0,92	0,93
T3	A	1.204,4	444,7	598,1
	n	136,6	486,7	74,72
	k	0,0650	0,0760	0,0475
	R ²	0,85	0,92	0,96
T4	A	1.448,8	529,4	553,2
	n	146,7	381,60	72,93
	k	0,0606	0,0693	0,0485
	R ²	0,83	0,86	0,91
T5	A	1.992,7	630,4	844,7
	n	57,75	74,74	54,84
	k	0,0415	0,0452	0,0353
	R ²	0,95	0,97	0,97

La absorción de Mg total presentó diferencias estadísticas, con un crecimiento lento hasta los 83 ddt (Figura 5), luego se incrementó hasta los 103 ddt obteniendo T5 la mayor absorción a los 131 ddt con 0,52 g planta⁻¹ (6,92 kg ha⁻¹) siendo superior a los 4,22 kg ha⁻¹ de Koch *et al.* (2019), y de los 0,054 g planta⁻¹ reportados por Coraspe-León *et al.* (2009), quienes evaluaron la producción de tubérculos semilla prebásica de papa en invernadero en macetas con arcilla expandida como sustrato y con la papa variedad Atlantic, fue también inferior a los 10 kg ha⁻¹ reportados por Cabalceta *et al.* (2005) quienes experimentaron a campo abierto, con una densidad de 33.300 plantas ha⁻¹ y variedad MNF-80 de la subespecie *tuberosum*.

Por otro lado, los 0,52 g planta⁻¹ de Mg que se obtuvieron fueron superiores a los 0,38 g planta⁻¹ encontrados por Cayambe Terán (2010) en la producción de semilla prebásica en la papa variedad Superchola con la técnica de aeroponía.

Con los resultados de la absorción de Mg se construyó la curva de absorción bajo el modelo logístico obteniéndose que, T5 presentó la mayor tasa de absorción en tres fases: la primera de bajo incremento con 1,26 mg planta⁻¹ día⁻¹ hasta los 50 ddt; la siguiente de crecimiento más rápido con 5,65 mg planta⁻¹ día⁻¹ y se extendió hasta los 105 ddt; posteriormente, hasta la finalización del ciclo la tasa se mantuvo a un valor promedio de 5,30 mg planta⁻¹ día⁻¹ (Figura 5 y Tabla 7).

En la dinámica de la absorción del S total se obtuvo diferencias estadísticas, con un crecimiento regular a lo largo del ciclo sin mayores variaciones hasta los 103 ddt (Figura 6) luego de lo cual presentó un incremento notable, T5 absorbió 0,55 g planta⁻¹ (7,30 kg ha⁻¹), valor que fue superior a los 0,36 g planta⁻¹ reportado por Coraspe-León *et al.* (2009), quienes estudiaron la producción de tubérculos semilla prebásica de papa en condiciones de invernadero en macetas con arcilla expandida como sustrato y la papa variedad Atlantic de la subespecie *tuberosum*; inferiores a los 11,0 kg ha⁻¹ reportados por Cabalceta *et al.* (2005), quienes experimentaron a campo abierto con una densidad de 33.300 plantas ha⁻¹ y variedad MNF-80 de la subespecie *tuberosum*.

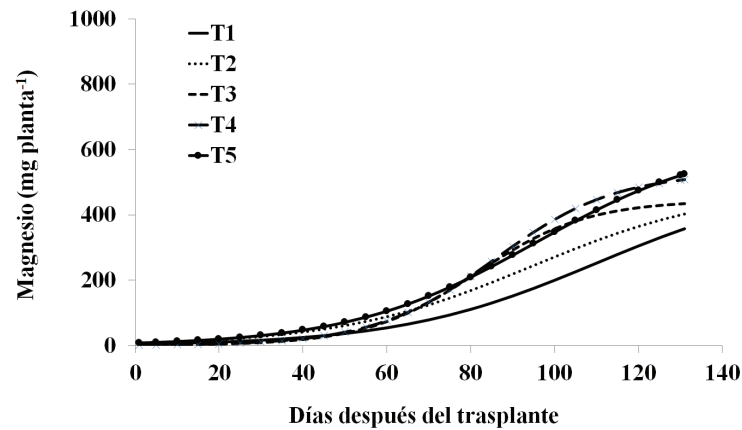


Figura 5. Absorción de Mg.
Figure 5. Mg uptake.

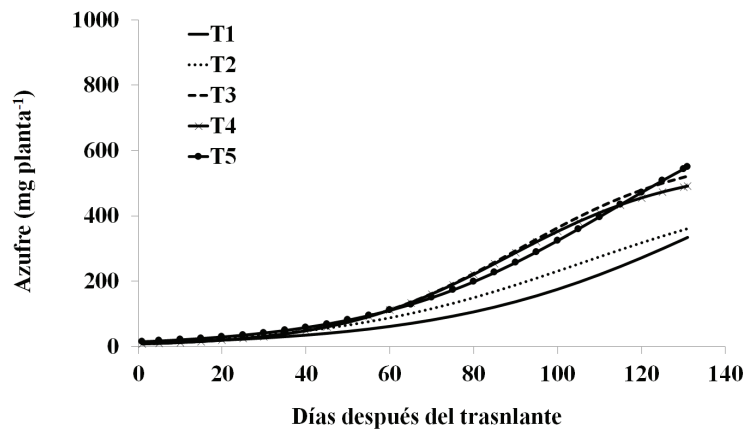


Figura 6. Absorción de S.
Figure 6. S uptake.

Los 0,55 g planta⁻¹ obtenidos en esta investigación fueron superiores a los 0,20 g planta⁻¹ reportados por Cayambe Terán (2010) en la obtención de semilla prebásica de la variedad Superchola, bajo la técnica de aeroponía.

Los valores de S total obtenidos se utilizaron en el modelo logístico, el cual presentó para T5 una tasa de absorción de S con tres fases: la primera con un incremento lento hasta los 55 ddt y una absorción de 1,45 mg planta⁻¹ día⁻¹; la siguiente de crecimiento rápido con 5,57 mg planta⁻¹ día⁻¹ y se extendió hasta los 120 ddt; de aquí en adelante y hasta la finalización del ciclo la tasa de absorción aumentó a 7,03 mg planta⁻¹ día⁻¹ (Figura 6 y Tabla 7).

El rendimiento de la semilla prebásica de papa, para T5 presentó un valor promedio de 10,73 t ha⁻¹ (804,92 g planta⁻¹) fue superior a lo publicado por Cayambe Terán (2010) quien reportó un valor promedio de 377,22 g planta⁻¹ y Mullo Panoluisa (2014) con 107,89 g planta⁻¹, que trabajaron con la variedad Superchola (Figura 7).

Al comparar con otras variedades de papa de la subespecie *tuberosum*, se encontró que el rendimiento total (804,92 g planta⁻¹) es superior a lo publicado por Chang *et al.* (2011), quienes bajo la técnica de aeroponía estudiaron diferentes valores de conductividad eléctrica de la solución nutritiva y tuvieron rendimientos para la categoría prebásica de 193, 227 y 281 g planta⁻¹ en las variedades Jayoung, Haryeong y Superior (*Solanum tuberosum*), respectivamente, a los 90 ddt. El rendimiento total también fue superior al reportado por Corrêa *et al.* (2008), quienes compararon tres sistemas de producción de semilla prebásica (camas, macetas y el sistema NTF) y encontraron valores para la variedad Monalisa a los 90 ddt de 43,15, 27,27 y 25,07 g planta⁻¹, respectivamente.

Estas diferencias con sistemas similares de producción de semilla prebásica se atribuyen a que esta investigación utilizó como sustrato suelo donde frecuentemente se cultiva papa, lo cual incidió en el incremento del rendimiento. Esto es importante ya que al comparar con el rendimiento del testigo T1 (377,17 g planta⁻¹) es mayor a los autores citados, quienes trabajaron con este tipo de producción de semilla.

Los rendimientos de cada categoría (Tabla 8) indican que T5 alcanzó la mayor cantidad de semilla en las categorías Gruesa, Grande y Mediana que son las que se considera como aptas para pasar a la siguiente categoría (básica) con el 88,75% de la producción; de otro lado T4 presentó un buen rendimiento total (Figura 7), el porcentaje de las tres categorías fue de 69,52%.

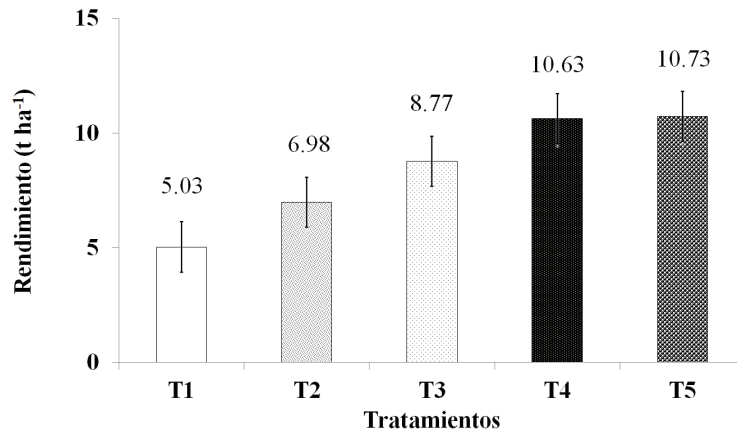


Figura 7. Rendimiento de semilla prebásica de papa.
Figure 7. Pre-basic seed potato yield.

Tabla 8. Rendimiento por categoría de semilla prebásica de papa.
Table 8. Yield by category of pre-basic seed potato.

Tratamiento	Categorías (%)			
	Gruesa	Grande	Mediana	Pequeña
T1	26,34	21,83	29,61	22,23
T2	34,27	33,82	18,56	13,35
T3	27,89	28,46	27,92	15,74
T4	18,57	20,93	30,02	30,48
T5	35,77	29,38	23,59	11,25

4. Conclusiones

La absorción de nutrientes fue mayor con el T5 (Pilvicsa), considerando una densidad de 13.333 plantas ha⁻¹ con 58,72, 12,91, 110,05, 20,88, 6,92 y 7,30 kg ha⁻¹, para N, P, K, Ca, Mg y S, respectivamente.

En el rendimiento de semilla prebásica de papa el mejor fue T5 (Pilvicsa) con 10,73 t ha⁻¹ siendo mayor con un 46,87% que el T1 (Testigo), demostrando el efecto de la aplicación de la solución nutritiva en fertirriego.

La generación de curvas de absorción de nutrientes para el cultivo de papa variedad Superchola se ajustó con los datos experimentales del modelo logístico obteniendo coeficientes de determinación (R²) mayores a 0,8.

Las funciones obtenidas permiten predecir la demanda nutricional total por etapa en función del tiempo de crecimiento, por lo tanto pueden ser utilizados para programar la aplicación de N, P, K, Ca, Mg y S en el cultivo de papa variedad Superchola en condiciones de invernadero y utilizando fertirrigación.

Contribuciones de los autores

- Gustavo Alejandro Arteaga Chamorro: Conceptualización, investigación, curación de datos, metodología, recursos, redacción, visualización, análisis formal, redacción - borrador original.
- Randon Stalin Ortiz Calle: Validación, redacción – borrador original, análisis formal.
- Yamil Everaldo Cartagena Ayala: Adquisición de fondos, validación, redacción – revisión y edición, análisis formal.

Referencias

- Alcántar González, G., y Sandoval Villa, M. (1999). *Manual de análisis químico de tejido vegetal: Guía de muestreo, preparación, análisis e interpretación*. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C.
- Alonso Báez, M., Tijerina Chávez, L., Sánchez García, P., Martínez Garza, Á., Aceves Navarro, L. A., y Escalante Estrada, A. (2003). Modelo logístico: Herramienta para diagnosticar el cuánto y cuándo fertilizar. *Terra Latinoamericana*, 21(2), 225-231. <https://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/issue/view/78>
- Araujo Jaramillo, M., Cartagena Ayala, Y., Castillo Carrillo, C., Cuesta Subía, H., Monteros Jácome, J., Paula Caicedo, N., Racines Jaramillo, M., Rivadeneira Ruales, J., Velásquez Carrera, J., León Ruíz, J., Panchi Umaginga, N., y Andrade Piedra, J. (2021). *Manual del cultivo de papa para pequeños productores. Manual No. 78* (3^{ra} ed.). INIAP. <https://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/5672>
- Bertsch, F. (2005). Estudios de absorción de nutrientes como apoyo a las recomendaciones de fertilización. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica (Northern Latin America, Mexico and Central America)*, (57), 1-10. <http://www.ipni.net/publication/ia-laahp.nsf/issue/IA-LAHP-2005-2>
- Burke, J. J. (2012). *Growing the potato crop*. Vita, Equity House, Upper Ormond Quay. <https://www.iverkproduce.com/wp-content/uploads/Growing-the-Potato-Crop.pdf>
- Cabalceta, G., Saldias, M., y Alvarado, A. (2005). Absorción de nutrimentos en el cultivar de papa MNF-80. *Agronomía Costarricense*, 29(3), 107-123. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost/article/view/6785>
- Cayambe Terán, J. M. (2010). *Evaluación de soluciones nutritivas dinámicas para la producción de tubérculo-semilla categoría prebásica en dos variedades de papa bajo el sistema aeropónico*. Universidad Central del Ecuador. <https://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/1353>
- Centro Internacional de la Papa [CIP]. (2015). *Dato y Cifras de la Papa*. CIP. <https://cipotato.org/es/lapapa/dato-y-cifras-de-la-papa/>
- Chang, D. C., Cho, I. C., Suh, J. T., Kim, S. J., y Lee, Y. B. (2011). Growth and yield response of three aeroponically grown potato cultivars (*Solanum tuberosum* L.) to different electrical conductivities of nutrient solution. *American Journal of Potato Research*, 88, 450-458. <https://doi.org/10.1007/s12230-011-9211-6>
- Coraspe-León, H. M., Muraoka, T., Franzini, V. I., De Stefano, S. M., y Do Prado, N. (2009). Absorción de macronutrientes por plantas de papa (*Solanum tuberosum* L.) en la producción de tubérculo-semilla. *Interciencia*, 34(1), 57-63. <https://www.interciencia.net/volumen-34/numero-01-8/>
- Corrêa, R. M., Pinto, J. E. B. P., Pinto, C. A. B. P., Faquin, V., Reis, É. S., Monteiro, A. B., y Dyer, W. E. (2008). A comparison of potato seed tuber yields in beds, pots and hydroponic systems. *Scientia Horticulturae*, 116(1), 17-20. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2007.10.031>
- Devaux, A., Ordinola, M., Híbon, A., y Flores, R. (eds.). (2010). *El sector papa en la región andina. Diagnóstico y elementos para una visión estratégica (Bolivia, Ecuador y Perú)*. Centro Internacional de la Papa. <https://doi.org/10.4160/9789290603849>
- Díaz-Romeu, R., y Hunter, A. (1978). *Metodologías de muestreo de suelos, análisis químico de suelos y tejido vegetal y de investigaciones en invernadero*. CATIE. <https://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/handle/11554/3115>
- Flores-López, R., Sánchez-del Castillo, F., Rodríguez-Pérez, J. E., Colinas-León, M. T., Mora-Aguilar, R., y Lozoya-Saldaña, H. (2009). Densidad de población en cultivo hidropónico para la producción de tubérculo-semilla de papa (*Solanum tuberosum* L.). *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 15(3), 251-258. <http://doi.org/10.5154/r.rchsh.2009.15.035>
- Goins, G. D., Yorio, N. C., y Wheeler, R. M. (2004). Influence of nitrogen nutrition management on biomass partitioning and nitrogen use efficiency indices in hydroponically grown potato. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 129(1), 134-140. <https://doi.org/10.21273/JASHS.129.1.0134>
- Horneck, D., y Rosen, C. (2008). Measuring nutrient accumulation rates of potatoes-tools for better management. *Better Crops with Plant Food*, 92(1), 1-6. <http://www.ipni.net/publication/bettercrops.nsf/issue/BC-2008-1>
- Inostroza, J., Méndez, P., Espinoza, N., Acuña, I., Navarro, P., Cisternas, E., y Larráin, P. (2017). *Manual del cultivo de la papa en Chile*. Boletín INIA N° 10. Instituto de Investigaciones [INIA]. <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/6706/Bolet%C3%ADn%20INIA%20N%C2%B0%20375?sequence=1&isAllowed=y>
- Koch, M., Naumann, M., Pawelzik, E., Gransee, A., y Thiel, H. (2019). The importance of nutrient management for potato production Part I: Plant nutrition and yield. *Potato Research*, 63, 97-119. <https://doi.org/10.1007/s11540-019-09431-2>

- Ministerio de Agricultura y Ganadería [MAG]. (2019a). *Boletín Situacional. Papa. 2018*. Sistema de Información Pública Agropecuaria, Ministerio de Agricultura y Ganadería. http://sipa.agricultura.gob.ec/boletines/situacionales/2018/boletin_situacional_papa_2018.pdf
- Ministerio de Agricultura y Ganadería [MAG]. (2019b). *Informe de rendimientos objetivos de papa 2019*. Sistema de Información Pública Agropecuaria, Ministerio de Agricultura y Ganadería. <http://sipa.agricultura.gob.ec/index.php/papa/rendimiento-de-la-papa-ecuador>
- Mullo Panoluisa, F. M. (2014). Producción de semilla prebásica de papa (*Solanum tuberosum* L.) de dos variedades para la agroindustria, utilizando el sistema de inmersión temporal. Universidad Central del Ecuador. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/2483>
- Neshev, N., y Manolov, I. (2015). Content and Uptake of nutrients with plant biomass of potatoes depending on potassium fertilization. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 6, 63-66. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.08.039>
- Rodríguez Sanfuentes, J. (1990). *La fertilización de los cultivos: un método racional* (1ª ed.). Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Santos Coello, B., y Ríos Mesa, D. (2016). *Cálculo de soluciones nutritivas en suelo y sin suelo*. Cabildo Insular de Tenerife. https://www.agrocabildo.org/publicaciones_detalle.asp?id=622
- Steiner, A. A. (1984). The Universal Nutrient Solution. En *Sixth International Congress on Soilless Culture* (pp. 633-650). Wageningen.
- Villas-Bôas, R. L. (2001). *Doses de nitrogênio para o pimentão aplicadas de forma convencional e através da fertirrigação*. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.