

Determinación y validación de las curvas de absorción de nutrientes en papa (*Solanum tuberosum* L.) variedad Elbe-UCR

Eric Ulloa Calvo

TESIS PARA OPTAR AL GRADO PROFESIONAL DE INGENIERO AGRÓNOMO
CON EL GRADO DE LICENCIADO EN AGRONOMÍA

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROALIMENTARIAS
ESCUELA DE AGRONOMÍA

2021

Determinación y validación de las curvas de absorción de nutrientes en papa (*Solanum tuberosum* L.) variedad Elbe-UCR

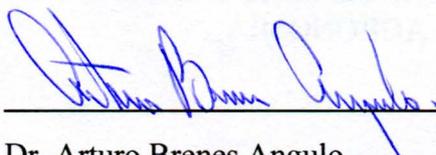
Eric Ulloa Calvo

TESIS PARA OPTAR AL GRADO PROFESIONAL DE INGENIERO AGRÓNOMO CON EL GRADO DE LICENCIADO EN AGRONOMÍA



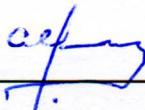
Dr. Luis Gómez Alpizar

Director Escuela



Dr. Arturo Brenes Angulo

Director de tesis



Dr. Alfredo Alvarado Hernández

Miembro del tribunal



Lic. Carlos Huertas Blanco

Miembro del tribunal



M.Sc. Gerardo Chacón Naranjo

Miembro del tribunal



Eric Ulloa Calvo

Sustentante

DEDICATORIA

A mi familia por toda la confianza y esfuerzo que me dedicaron durante toda mi vida estudiantil.

AGRADECIMIENTOS

Al director de tesis, Dr. Arturo Brenes, por los consejos, apoyo y motivación para concluir este estudio.

Al Dr. Luis Gómez, por su colaboración y motivación, como director de la Escuela de Agronomía.

Al Sr. Franklin Aguilar Serrano e hijos, por haber permitido y colaborado para la realización del estudio en sus fincas.

Al Ing. Orlando Ramírez Briceño, por sus consejos y confianza para aplicar mis conocimientos sobre papa en sus cultivos.

A Melissa Aragón Soto, la motivación, entusiasmo y admiración que me transmitió desde el primer día de trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTOS	3
ÍNDICE DE FIGURAS.....	6
ÍNDICE DE CUADROS.....	7
INDICE DE ANEXOS	8
RESUMEN	9
INTRODUCCIÓN	10
OBJETIVOS	13
ANTECEDENTES	14
Origen del cultivo.....	14
Taxonomía.....	15
Características de la variedad Elbe-UCR	15
Fenología de la planta de papa	16
Funciones de los nutrientes en la planta.....	19
Fósforo (P).....	19
Potasio (K).....	20
Calcio (Ca)	20
Magnesio (Mg).....	21
Azufre (S).....	21
Zinc (Zn)	21
Boro (B).....	22
Manganeso (Mn)	22
Hierro (Fe).....	23
Molibdeno (Mo)	23
Producción de papa en Costa Rica	24
Curvas de absorción de nutrientes.....	26
Curvas de absorción de nutrientes en papa	26
MATERIALES Y MÉTODOS	32
Ubicación	32
Generalidades de la siembra.....	32
Material experimental	33
Muestras	33
Muestras de plantas	34
Diseño experimental.....	35
RESULTADOS.....	37
Curvas de absorción de nutrientes.....	37
Curva de crecimiento	37
Curvas de acumulación de nutrientes.....	38

Validación de la curva de absorción de nutrientes	47
Presupuestos parciales.....	48
DISCUSIÓN	51
Curva de absorción de nutrientes	51
Absorción de nutrientes.....	52
Validación de la curva de absorción de nutrientes	58
Presupuestos parciales.....	59
CONCLUSIONES	61
RECOMENDACIONES.....	62
LITERATURA CITADA	63
ANEXOS	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Etapas de crecimiento fenológico y clave de identificación BBCH para papa (<i>Solanum tuberosum</i> L.). Tomado de Hack <i>et al.</i> 1993.....	18
Figura 2. Disposición del diseño experimental utilizado para la toma de muestras necesarias, para determinar la curva de absorción de nutrientes de la var. Elbe-UCR, en Guarumos, Cartago.....	35
Figura 3. Disposición del diseño experimental para la toma de muestras de la var. Elbe-UCR, en el ensayo de validación de las curvas de absorción, en la localidad de Guarumos, Cartago.	36
Figura 4. (A) Curva de crecimiento total y según órgano, para la var. Elbe-UCR, (B) incremento porcentual en la curva de crecimiento, según la absorción total.	37
Figura 5. Curvas de absorción de (A) nitrógeno, (B) fósforo y (C) potasio, en la var. Elbe-UCR, total y por órgano.	39
Figura 6. Incremento porcentual en la absorción de (A) nitrógeno, (B) fósforo y (C) potasio, para Elbe-UCR, con base en la absorción total de cada elemento.	40
Figura 7. Curvas de absorción para (A) calcio, (B) magnesio y (C) azufre, en la var. Elbe-UCR, total y por órgano.	42
Figura 8. Incremento porcentual en la absorción de (A) calcio, (B) magnesio y (C) azufre, para Elbe-UCR, con base en la absorción total de cada elemento.	43
Figura 9. Curvas de absorción de (A) hierro, (B) zinc, (C) manganeso, (D) cobre y (E) boro, para la var. Elbe-UCR, total y por órgano.....	45
Figura 10. Incremento porcentual en la absorción de (A) hierro, (B) zinc, (C) manganeso, (D) cobre y (E) boro, para Elbe-UCR, con base en la absorción total de cada elemento.	46
Figura 11. Número y peso de tubérculos por planta, y rendimiento potencial para la validación de las curvas de absorción de la var. Elbe-UCR, en Guarumos, Cartago.....	47
Figura 12. Número y peso de los tubérculos por planta, en kg ha ⁻¹ para la validación de las curvas de absorción de la var. Elbe-UCR, en Guarumos, Cartago.....	48

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Resultados del análisis nutricional de suelo de la parcela utilizada para determinar las curvas de absorción de papa Elbe-UCR, en la localidad de Guarumos, Alvarado, Cartago.	34
Cuadro 2. Resultados del análisis nutricional de suelo de la parcela utilizada para la validación de las curvas de absorción, en la localidad de Guarumos, Alvarado, Cartago. ...	34
Cuadro 3. Inversión y ganancia neta por hectárea para las dosis de fertilizante evaluadas en papa Elbe-UCR.....	49
Cuadro 4. Costos variables para los tratamientos de dosis de fertilizante en papa Elbe-UCR, para análisis de dominancia, en un área de 27 m ² definida para cada repetición de los tratamientos.	49
Cuadro 5. Análisis de dominancia aplicado para cada tratamiento en la validación de las curvas de absorción de la var. Elbe-UCR.....	50
Cuadro 6. Tasa de retorno marginal (TRM) según el análisis de dominancia para los tratamientos no dominados.	50

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Detalle de contenido de sólidos y gravedad específica en muestras de papa con hidrómetro digital	77
---	----

RESUMEN

Entre las hortalizas, en Costa Rica, el cultivo de papa es de los que más área ocupa, debido a su alto consumo. Del cultivo de papa dependen directamente miles de familias en las zonas altas del Valle Central, específicamente en la provincia de Cartago y el cantón de Zarcero, en la provincia de Alajuela.

La liberación de una nueva variedad de papa, al igual que para muchos otros cultivos, conlleva una serie de procesos que hay que ajustar para maximizar su rendimiento, como su adaptación a las diferentes zonas de producción, que puede diferir con respecto a variedades ya establecidas, lo cual incluye los requerimientos nutricionales y prácticas culturales.

En la presente investigación se determinó la curva de crecimiento y las curvas de absorción de nutrientes y su acumulación en la raíz, follaje y tubérculos, de la variedad de papa Elbe-UCR. La acumulación de materia seca en el sistema radical alcanzó 370 kg ha^{-1} , el follaje alcanzó 3247 kg ha^{-1} , mientras que los tubérculos llegaron a acumular 8399 kg ha^{-1} de materia seca. La acumulación total de biomasa llegó a 12016 kg ha^{-1} .

Se determinó que, durante los primeros 60 días después de siembra, las hojas y tallos son la fuente de acumulación primaria de materia seca. Después de los 60 días, son los tubérculos, la estructura que se convierte en el sumidero de nutrientes, los cuales continúan acumulando incluso hasta los 135 días. El sistema radical mantuvo niveles estables de acumulación de materia seca durante todo el ciclo.

Las curvas de absorción se determinaron por órgano de la planta, así como por el incremento porcentual de absorción para cada nutriente. El potasio fue el nutriente con los niveles más altos de consumo por parte de la planta (331 kg ha^{-1}), seguido del nitrógeno (171 kg ha^{-1}) y el calcio ($52,6 \text{ kg ha}^{-1}$). La absorción del resto de macronutrientes fue $\text{S} > \text{P} > \text{Mg}$, y de micronutrientes fue $\text{Fe} > \text{Zn} > \text{B} > \text{Mn} > \text{Cu}$.

Una vez determinadas las curvas de absorción de nutrientes, se establecieron tratamientos con dosis de 25% más respecto a la absorción determinada y 25% debajo de lo mostrado por la curva de absorción, y la dosis utilizada por el productor. Se probó que disminuyendo un 25% la cantidad de fertilizante aplicado se logran rendimientos similares a los obtenidos con un 25% más de fertilizante, con una menor inversión económica en el rubro de fertilizante granulado.

Palabras clave: Papa, Elbe-UCR, curvas de crecimiento, curvas de absorción de nutrientes

INTRODUCCIÓN

La papa es considerada uno de los cultivos más importantes a nivel mundial. Esta puede producirse desde zonas templadas hasta tropicales y ocupa el cuarto lugar en términos de producción mundial, superada únicamente por el maíz, trigo y arroz (Brenes *et al.* 2002, Añez y Espinoza 2004, Navarre *et al.* 2016, Oliveira *et al.* 2016, Xu *et al.* 2019)

La papa se considera en la actualidad un alimento de primera necesidad a nivel mundial (Ruiz, 2011). Nutricionalmente, la papa aporta bajas cantidades de calorías, grasas y colesterol y es una fuente importante de almidones, flavonoides, carotenoides, azúcares, minerales como el potasio, fenoles y vitaminas, incluida la vitamina C en alto porcentaje (Añez y Espinoza 2004, Muñoz 2014, Neshev y Manolov 2015, Beals 2019).

La papa es la hortaliza de mayor consumo en Costa Rica y sobre la cual gira la economía de cientos de familias en las zonas productoras de Cartago y Alajuela, tanto por la magnitud económica de la producción como por el aporte a la dieta nacional (Bolaños 2007). Este tubérculo, se ubica como el tercer producto más importante en la canasta básica, luego del arroz y el frijol (Brenes *et al.* 2002). Según el Boletín Estadístico Agropecuario (SEPSA 2014), el área cultivada con papa para el año 2013 alcanzó las 2125 ha, con una producción de 49500 TM. El cultivo ha ido en incremento hasta llegar en 2017 a las 3504 ha, con rendimiento anual de 89600 TM (CNP 2018) y un consumo per cápita de 18 kg lo cual ratifica que es un cultivo de alta importancia para el sector hortícola y la economía del país (INTA 2014).

El cultivo de la papa se ve limitado por múltiples estrés abióticos y bióticos como los cambios en temperatura, régimen de lluvias y plagas y enfermedades (Banik *et al.* 2016, INTA 2014, INIA 2017). Tanto las limitaciones por plagas y enfermedades en el cultivo de la papa, como los problemas de calidad y mercado de las variedades que actualmente se cultivan en nuestro país, obligan a la evaluación constante, tanto de materiales introducidos, como al mejoramiento genético local de nuevas variedades que satisfagan no solamente las necesidades del sector industrial sino también las del mercado de consumo fresco. También es imperioso que los materiales seleccionados se adapten a las condiciones de cultivo y manejo bajo las condiciones agroecológicas del país. Se requiere por lo tanto de variedades que tengan características superiores de resistencia a plagas y enfermedades propias del cultivo en las zonas productoras de Costa Rica, con altos rendimientos, para que garanticen el retorno económico a los productores, y satisfagan las necesidades de materia prima para el mercado de consumo fresco e industrial. Se requiere además de variedades cuyo cultivo disminuya el impacto ambiental ocasionado por el uso excesivo de pesticidas.

En un esfuerzo por dar una respuesta adecuada a las necesidades del sector papero costarricense, el Laboratorio de Biotecnología de Plantas del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica inició hace ya casi dos décadas, un programa de mejoramiento genético local de papa. A finales de 2015 se logró poner a disposición de la agrocadena de papa costarricense la primera variedad mejorada genéticamente en el país, denominada Elbe-UCR, la cual es una variedad con gran potencial para su cultivo en las zonas y épocas en las que se cultiva papa en el país. Esta variedad presenta mayor tolerancia

a plagas y enfermedades respecto a los materiales que actualmente se cultivan en las zonas paperas. Además, su alto contenido de sólidos y bajo contenido de azúcares reductores, la hacen un material apto para la industria de papas tostadas y bastones.

Uno de los factores que más influye sobre la expresión del potencial genético de una variedad, es el manejo agronómico, y dentro de éste, la fertilización ocupa una posición muy importante (Kato *et al.* 2015, Seifu y Deneke 2017). La introducción de un nuevo genotipo conlleva la necesidad de reevaluar las prácticas agronómicas asociadas, tales como los requerimientos nutricionales, ya que un manejo adecuado de la fertilización redundará en beneficios tanto económicos como edafológicos para la zona (Soto 2001). De ahí que la determinación de las curvas de absorción de nutrientes sea necesaria para conocer no solo las demandas nutricionales de la variedad, sino también los momentos en que estos son requeridos (Bertsch 1998). Al igual que para cada nueva variedad, es importante generar un paquete de fertilización adecuado, para que esta exprese su mayor potencial genético bajo las diferentes condiciones de cultivo (Avilés y Piedra 2017).

La importancia de desarrollar una curva de absorción para cada nuevo material radica en ajustar la fertilización a los momentos clave en que esta requiera los nutrientes, así como las cantidades adecuadas para la obtención de altos rendimientos (Bertsch 1998, Mendoza *et al.* 2015, Sifuentes *et al.* 2013). Las curvas de absorción permiten determinar las épocas de mayor absorción de nutrientes durante el ciclo de crecimiento del cultivo, lo que a su vez permite definir los mejores momentos de aplicación de los fertilizantes en los programas de fertilización, que generalmente deben aplicarse unas dos semanas antes del pico de alta demanda. Aunque en papa la adición de fertilizantes se realiza en las etapas de siembra y aporca, se debe maximizar el aprovechamiento de los nutrientes para un buen desarrollo y llenado de los tubérculos. Las curvas de absorción permiten también conocer la calidad nutritiva, en cuanto a contenidos de nutrientes, de las partes de la planta de consumo humano o animal (Sancho 1999, Mengel y Kirkby 2000).

La papa es un cultivo que demanda grandes cantidades de nutrimentos, principalmente nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) durante todo su ciclo y es una de las hortalizas de mayor rentabilidad, pero con altos costos de producción, asociados principalmente a una excesiva aplicación de insumos como pesticidas, agua y fertilizantes (Sifuentes *et al.* 2013, Bell y Dell 2008). En relación a su nutrición, no existe una dosis única, por lo que se debe determinar de acuerdo con factores como la altitud, clima predominante, tipo de suelo, su variedad y manejo agronómico, y de las características propias del agricultor. Todos estos factores interactúan entre sí, determinando las variables que definen una dosis de fertilización disponible, es decir, demanda de nutriente por el cultivo (INIA 2017, Nyiraneza *et al.* 2017).

Para la variedad de papa Elbe-UCR se requiere conocer y afinar un adecuado programa de fertilización, pues, aunque cada variedad requiere los mismos nutrientes, las cantidades y momentos de absorción varían entre las zonas y alturas donde se cultiven (Neshev y Manolov 2015). Elbe-UCR es un material que presenta mucho vigor y potencial de rendimiento, por lo cual la elaboración de una curva de absorción resulta imprescindible para dirigir mejor su cultivo, máxime que la mayoría de los productores de papa costarricenses acostumbran a

aplicar las mismas cantidades de fertilizante a todas las variedades que siembran, obteniendo rendimientos diferentes dependiendo de la época y zona de cultivo.

El objetivo principal de esta investigación fue desarrollar las curvas de absorción de nutrientes para la variedad Elbe-UCR en el sistema de producción en campo abierto, en la provincia de Cartago, para posteriormente validar estas curvas en un ensayo de dosificación de nutrientes y analizar los cambios en la productividad y rentabilidad del cultivo, mediante presupuestos parciales.

OBJETIVOS

Objetivo general

Elaborar y validar las curvas de absorción de nutrientes para la variedad de papa Elbe-UCR en la Zona Norte de Cartago, bajo sistema de cultivo a campo abierto.

Objetivos específicos

- Realizar la curva de absorción de nutrimentos para el cultivo de papa var. Elbe-UCR en campo.
- Validar las curvas determinadas en un ensayo en la zona media alta de Cartago con diferentes dosis de los elementos N, P y K, a partir de fórmulas granuladas comerciales.
- Elaborar un análisis de costos de producción en la etapa de validación de las curvas de absorción mediante presupuestos parciales para determinar la rentabilidad de los cambios en las dosis de fertilizante.

ANTECEDENTES

Origen del cultivo

El origen del cultivo de la papa se remonta a hace más de 7000 años, donde habitantes de los Andes se interesaron por plantas que formaban frutos muy redondos, pero que además producían tubérculos subterráneos (Brown y Henfling 2014). La implementación de sistemas de producción agrícola fue uno de los aspectos que encontraron los españoles al llegar a Suramérica, lo que incluía, además, una gran variedad de tipos de papa y maíz. (Brown y Henfling 2014). Actualmente se ha confirmado la existencia de mayor diversidad genética de los materiales procedentes de Chile, en lugar de los procedentes de Perú (Ríos *et al.* 2007).

A su llegada a España la papa no fue bien recibida por la realeza, por el tipo de cultivo, la forma de cosechar y el desconocimiento existente. Quienes la sembraban le atribuían propiedades curativas, pues los enfermos se recuperaban al comerlas. La papa era el cultivo de grupos humanos protestantes que huían de la represión en territorios controlados por Francia que fueron emigrando por Europa con el pasar de los años. La capacidad para alimentar a más personas con menor área de cultivo fue uno de los aspectos que los motivó a expandir el cultivo de papa. Este cultivo llegó a ser llamado “comida de pobres” y lo servían en cárceles y para el ejército, después de lo cual comenzó su auge en Europa (Brown y Henfling 2014).

El cultivo continuó su expansión por Europa y Norte América, y para 1845 se dio una epidemia de tizón tardío que terminó por desaparecer el cultivo de papa en Irlanda, y marcó una división entre las líneas genéticas para Norte América y Europa. El mejoramiento genético para buscar resistencia al tizón tardío y la adaptación a días largos fueron la base para la selección de genotipos nuevos que se dispersaron por Europa y Estados Unidos y hoy se les denomina variedades modernas. Sin embargo, en la década de 1910 se presentó otra gran infección por tizón tardío en Europa que destruyó las colecciones botánicas que se mantenían en el jardín botánico de Edimburgo, Escocia. De estos solo sobrevivieron materiales mexicanos (*S. demissum*) recién incorporados y de donde los genetistas tomaron los genes de resistencia a tizón tardío para los nuevos cultivares.

La predominancia de la selección para industrialización de los tubérculos ha prevalecido hasta el momento, pero el mantener la heterocigosis mediante la utilización de materiales silvestres, ha sido fundamental para incorporar resistencia a nuevos fitopatógenos y continuar con la expansión y utilización de la papa como una de las principales fuentes de alimentación a nivel mundial (Brown y Henfling 2014). Actualmente, la selección de nuevos híbridos se sigue enfocando mayoritariamente en la reducción de la longitud de los estolones, madurez precoz y dormancia corta en los tubérculos, tolerancias a estreses bióticos y abióticos y mayores rendimientos, se continúan dando en la actualidad y se continuará para introducir tolerancias y aspectos de calidad a las variedades actuales (Rodríguez 2010).

Taxonomía

En la actualidad existen divergencias sobre la cantidad de especies cultivadas y silvestres de papa (Rodríguez 2010, Ovchinnikova *et al.* 2011, Machida-Hirano 2015). Las especies de papas cultivadas se clasifican en la sección *Petota*, subgénero *Potatoe* serie *Tuberosa* (Jacobs y Van der Berg 2008). Al someterse a sucesivas hibridaciones con los materiales diploides del complejo de *Solanum brevicaule* durante el proceso de domesticación, se dio origen a las tetraploides cultivadas (Van der Berg y Jacobs 2007, Rodríguez 2010). Esta hibridación trajo consigo una enorme variabilidad y con esto dificultades para su correcta clasificación dentro de una serie, por lo que a las variantes cultivadas le llaman informalmente grupo de especies (Van der Berg y Jacobs 2007, Machida-Hirano 2015).

Los genotipos cultivados se clasifican en 7 especies, *Solanum ajanhuiri*, *Solanum chaucha*, *Solanum curtilobum*, *Solanum juzepczukii*, *Solanum phureja*, *Solanum stenotomum* y *Solanum tuberosum*, que se divide en las subespecies *tuberosum* y *andigena*. (Van der Berg y Jacobs 2007). Ambas subespecies de *S. tuberosum* son tetraploides ($2n=48$), pero la ssp. *tuberosum* es la más ampliamente cultivada a nivel mundial, mientras que la spp. *andigena* se limita a América Central y Sur América (Machida-Hirano 2015).

La existencia de especies silvestres en su centro de origen hace que el cultivo de papa cuente con una base genética enorme para generar variación y favorecer el mejoramiento genético que permita una mayor adaptación y resistencia de las variedades cultivadas existentes a los problemas bióticos y abióticos que en la actualidad le afectan al cultivo (Jacobs y Van der Berg 2008, Spooner *et al.* 2011, Machida-Hirano 2015).

Características de la variedad Elbe-UCR

La variedad de papa Elbe-UCR fue introducida al mercado de Costa Rica en el año 2015 a través del programa de mejoramiento genético de papa del Laboratorio de Biotecnología de Plantas del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica. Posee características que favorecen su adaptación a las condiciones agroecológicas de Costa Rica, especialmente su alta resistencia al tizón tardío de la papa, enfermedad causada por el oomycete *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary y al minador *Liriomyza* sp., además de su alto volumen radicular y su rendimiento comercial. Sus tubérculos poseen un menor contenido de azúcares reductores y son altos en sólidos, lo que los hace adecuados para la industria de papas tostadas y bastones. Por otro lado, la alta resistencia de los tubérculos a enfermedades del suelo y su consistencia a la cocción la hacen muy apta para el consumo fresco (Brenes, 2015 comunicación personal).

Fenología de la planta de papa

La papa es una planta herbácea, anual, conformada por una parte aérea y otra subterránea. Se compone de hojas, tallos, raíces y tubérculos, y algunas variedades en determinados ambientes pueden producir flores y frutos (CIP y FAO 2006, Struik 2007). El sistema radical emerge de los nudos entre los tallos principales y los estolones como raíces adventicias, es fibroso y puede alcanzar hasta 60 cm de longitud, pero la mayor concentración de raíces y pelos absorbentes se sitúa en los primeros 30 cm del suelo. Los tallos se originan de las yemas del tubérculo madre, son erectos y ramifican. Sus hojas son compuestas con folíolos laterales y uno terminal, con hojas pseudoestipulares. Los estolones, que son tallos laterales que crecen de forma horizontal y subterránea, son los que en sus extremos forman los tubérculos. Estos son considerados el órgano de reserva de la planta, donde la planta acumula nutrientes, y pueden variar en cantidad, forma y color dependiendo de la variedad. La inflorescencia es una cima terminal, simple o compuesta, con flores pentámeras, tetracíclica, con cinco estambres y un solo pistilo, con colores variables entre blanco, lila o rosado (Román y Hurtado 2002, Mansilla y Arribillaga 2013)

La fenología del cultivo de papa inicia con la brotación de las yemas del tubérculo, que se utiliza como medio de propagación asexual (CIP y FAO 2006). Esta etapa inicia en una bodega de almacenamiento, donde se le da a la semilla las condiciones de temperatura, humedad y luz que requiere para una adecuada brotación. La duración de la etapa dependerá de la variedad, del acondicionamiento de la bodega, de las condiciones de humedad y temperatura y de los tratamientos que se le realicen a la semilla de papa (Avilés y Piedra 2017). La semilla asexual de papa requiere de un periodo de dormancia, que comprende el tiempo entre la cosecha y la brotación. Este variará entre 2 a 3 meses, según las condiciones de almacenamiento que se le proporcionen (Román y Hurtado 2002).

Los tubérculos se encuentran listos para la siembra cuando los brotes tienen de 2-3 cm de largo y se observen al menos 2-3 brotes por tubérculo. La etapa vegetativa comienza cuando los brotes emergen del suelo, donde previamente se ha dado un abundante y rápido crecimiento radicular, a partir de las reservas que aun contenía el tubérculo semilla (CIP y FAO 2006). La duración de esta etapa dependerá de aspectos como la temperatura del suelo, que debe rondar entre los 7 y 8 °C como mínimo, la humedad y el grado de brotación del tubérculo (Mansilla y Arribillaga 2013).

La etapa vegetativa o crecimiento de la parte aérea es acelerada, después de la emergencia de los brotes. Con condiciones de temperatura ideales, de 20-25°C en el día y 10-12°C en la noche, esta etapa puede extenderse hasta los 45 días después de emergencia (Mansilla y Arribillaga 2013). Paralelamente se da la etapa de la diferenciación de tubérculos, que iniciará de forma distinta según variedades, pero ya desde los 20 días después de siembra pueden distinguirse estolones. Esta etapa es corta, su duración es de 10-15 días (CIP y FAO 2006).

La etapa de llenado de tubérculos ocurre, dependiendo de la temperatura y disponibilidad de nutrientes, entre los 50-80 dds, cuando la planta ha cesado su crecimiento vegetativo (CIP y FAO 2006). Un déficit hídrico en esta etapa conlleva una senescencia temprana y por ende

una disminución considerable en el rendimiento (Mansilla y Arribillaga 2013). En esta etapa se produce expansión de células por acumulación de agua, nutrientes y carbohidratos, convirtiéndose en el sitio dominante de acumulación. La duración de esta etapa depende de la genética del material, de factores como la temperatura ambiental y del suelo, el diferencial de temperaturas entre el día y la noche, la sanidad y el tamaño del follaje (Pavlista 1995, Wohleb *et al.* 2014).

La etapa de maduración de los tubérculos se caracteriza por el amarillamiento del follaje, y el endurecimiento de la piel de los tubérculos, los tubérculos no aumentan más de peso y el contenido de materia seca llega a su máximo valor (Mansilla y Arribillaga 2013, Wohleb *et al.* 2014).

La codificación de las etapas fenológicas de un cultivo mediante números y letras permite un mejor ajuste y control en la planificación de labores de manejo del cultivo. Esta estandarización permite analizar mejor los datos que se presentan sobre temas agronómicos en aspectos de manejo fitosanitario o fertilización, pues facilita el replicar o analizar la información para la toma de decisiones de manejo en los cultivos. La escala fenológica más utilizada es la BBCH (Biologische Bundesanstalt and Chemical Industry) que se basa en códigos decimales que describen estadios o etapas de crecimiento del cultivo (Hack *et al.* 1993). Para el cultivo de papa, la escala describe con códigos desde la etapa de brotación del tubérculo hasta la senescencia, ya sea que se seleccione el formato de dos dígitos o el de tres dígitos (Figura 1).

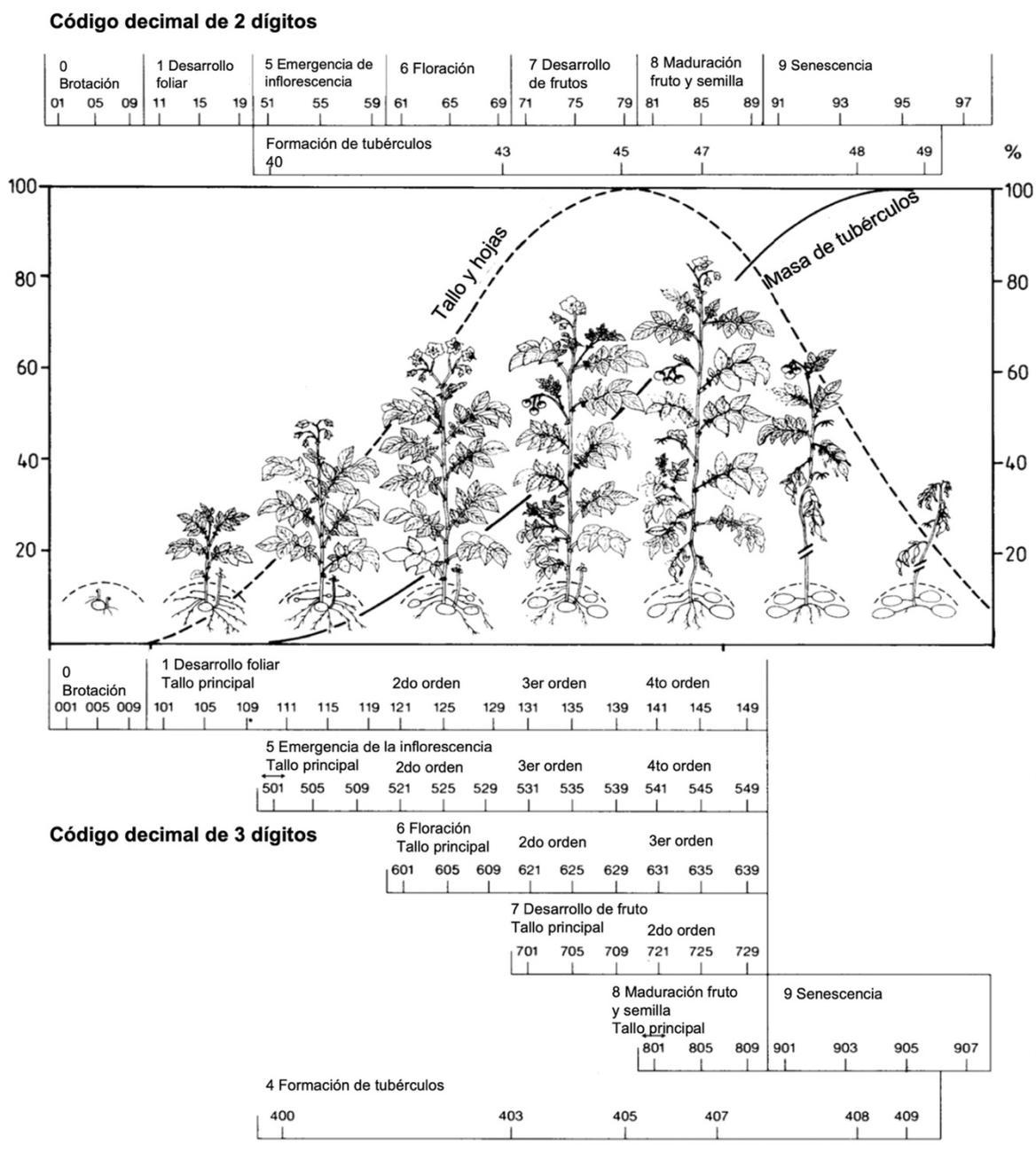


Figura 1. Etapas de crecimiento fenológico y clave de identificación BBCH para papa (*Solanum tuberosum* L.). Tomado de Hack *et al.* 1993

Funciones de los nutrientes en la planta

La nutrición adecuada es la base de una planta sana y por ende de buenos rendimientos y calidad de cosecha. Las plantas requieren de la aplicación de fertilizantes al suelo y de manera foliar, que le suplan sus requerimientos de los 14 elementos que se consideran esenciales para la producción agrícola, además de carbono, hidrógeno y oxígeno, que las plantas toman del medio ambiente. Estos elementos se dividen en macronutrientes y micronutrientes, según las cantidades que requiera la planta. Sin embargo, su importancia es la misma aunque se apliquen 300 o 5 kg ha⁻¹, todos tienen funciones indispensables para el adecuado funcionamiento de las plantas (Añez y Espinoza 2004, Kirkby y Romheld 2007, White *et al.* 2007, Maathuis 2009).

Nitrógeno (N)

El nitrógeno es uno de los elementos de mayor absorción por el cultivo de papa, pues forma parte de aminoácidos, enzimas, coenzimas, proteínas, ácidos nucleicos y clorofila; interfiere en los procesos de crecimiento, floración y fructificación e incrementa el contenido de proteína en los tubérculos (Molina 2002, CIP y FAO 2006, Bucher y Kossmann 2007, Maathuis 2009). Tiene un efecto directo sobre la acumulación de biomasa, al contribuir con el crecimiento de la parte aérea de las plantas y el aumento en el tamaño de los tubérculos (Koch *et al.* 2020).

La deficiencia de nitrógeno afecta en forma integral el desarrollo de la planta, pues reduce significativamente el crecimiento de la parte aérea y radicular, generando clorosis, hojas erectas, menor cantidad de follaje y maduración temprana; y debido a que el tamaño de las hojas en el dosel y la cantidad de luz que intercepten se relaciona con el rendimiento final, el cual disminuye radicalmente (Mengel y Kirkby 2000, Añez y Espinoza 2004, Bucher y Kossmann 2007). Excesos de nitrógeno pueden llevar a elevar las concentraciones de aminoácidos solubles que la planta no puede utilizar y, por el contrario, va en detrimento de la concentración de otros nutrientes, y del rendimiento (Mengel y Kirkby 2000, Firman y Allen 2007).

Fósforo (P)

El fósforo es un elemento importante para el cultivo de papa ya que interviene en los procesos de transferencia energética de ATP en la planta, así como en el desarrollo radical, en la activación metabólica, en transducción de señales y en la regulación enzimática (Molina 2002, Bucher y Kossmann 2007). Es componente estructural del ADN y el ARN, coenzimas, fosfolípidos de la pared celular y es necesario para la floración y el desarrollo de frutos y semillas (FAO 1984, Koch *et al.* 2020). Las plantas de papa lo requieren en todo el ciclo,

pero los puntos de mayor demanda son durante el crecimiento vegetativo y la iniciación de formación de tubérculos. (CIP y FAO 2006).

Aunque como fósforo total es un elemento abundante en los suelos de origen volcánico, la forma de ortofosfatos, que es la más asimilable para las plantas, no está totalmente disponible, debido a procesos de retención que ocurren en los suelos (CIP y FAO 2006, Bucher y Kossmann 2007), lo cual hace al fósforo un de los elementos limitantes en la producción de papa.

Una deficiencia de fósforo genera coloración rojiza en las hojas más viejas, baja producción de proteínas y azúcares y por ende crecimiento retardado y disminución en la producción de frutos y semillas (Ekelof 2007, Mengel y Kirkby 2000). Niveles altos de fósforo pueden causar reducción de crecimiento (Mengel y Kirkby 2000).

Potasio (K)

El potasio tiene múltiples funciones dentro de la planta, como regulador de presión osmótica, activador enzimático, así como en la translocación de agua y asimilados hacia los sumideros. Tiene relación directa con el llenado de frutos, tubérculos, semillas, así como con la calidad de estas, en cuanto a concentración de azúcares y calidad poscosecha (Molina 2002, CIP y FAO 2006, Maathuis 2009, Bishwoyog y Swarnima 2016).

La deficiencia de potasio no genera siempre síntomas visibles al inicio, pero en el cultivo de papa se presenta despigmentación y deshidratación de las hojas, además de afectar el llenado de tubérculos y el número y tamaño de las hojas (Inostroza 2009, Koch *et al.* 2020).

Un exceso de potasio interfiere con la absorción de elementos como el magnesio, y no necesariamente se va a traducir en un aumento en rendimiento, sino que puede generar un efecto adverso en concentración de azúcares en la planta (Mengel y Kirkby 2000).

Calcio (Ca)

El calcio se relaciona con la integridad de la pared celular de las plantas, en forma de pectatos de calcio, es activador enzimático en procesos de división celular, favorece crecimiento y germinación del polen, síntesis de proteínas y transferencia de carbohidratos, y tiene un rol importante en la calidad de frutos (Palta 1996, Molina 2002, Inostroza 2009, Maathuis 2009, Nookaraju *et al.* 2012, Torres-Olivar *et al.* 2014, Potarzycki y Grzebisz 2020).

El calcio puede contribuir a disminuir el estrés por calor en las plantas de papa, en conjunto con el nitrógeno, al mantener la funcionalidad de los estomas y la tasa de transpiración más constante, lo que se traduce en un mejor rendimiento (Tawfik *et al.* 1996, Kleinhenz y Palta 2002). Además, se le relaciona con una mejor respuesta de las plantas a condiciones ambientales que le generen estrés (Palta 1996). Puede actuar como desintoxicante en las plantas, al neutralizar ácidos orgánicos (FAO 1984, Palta 1996). Una deficiencia de calcio

producirá retardo en crecimiento en los tejidos meristemáticos, llevando a deformaciones, clorosis y posterior necrosis en los bordes de las hojas (Mengel y Kirkby 2000).

Es un elemento con limitada movilidad en la planta, sin embargo, mantener niveles adecuados de calcio en la planta se traducen en mayor calidad de la cosecha y poscosecha, menor susceptibilidad a enfermedades y menor tendencia a sufrir estrés abiótico (Flis 2019).

Magnesio (Mg)

El magnesio tiene un rol fundamental como componente central de la molécula de clorofila y por ende en la fotosíntesis. Es además cofactor de procesos enzimáticos y estabilizador de ácidos nucleicos y nucleótidos, así como en reacciones de transferencia de energía y de fosforilación. Interviene en síntesis de proteínas y la respiración celular (Molina 2002, Inostroza 2009, Maathuis 2009).

Debido a su alta movilidad dentro de la planta, una deficiencia de magnesio causa clorosis en las hojas más viejas las cuales presentan tonos brillantes, mientras que un exceso de magnesio conlleva a deficiencias en la concentración de calcio en las plantas de papa (CIP y FAO 2006).

Azufre (S)

El azufre está directamente ligado con la formación de los aminoácidos cisteína y metionina, y colabora en la estabilización de la estructura de las proteínas con la formación de enlaces disulfuro entre cadenas de polipéptidos, lo cual conforma enzimas. Además, es componente de sulfolípidos que participan en el transporte de iones (Bertsch 1998, Mengel y Kirkby 2000, Maathuis 2009, Koch *et al.* 2020).

La deficiencia de azufre conlleva inhibición de la síntesis proteica, retarda el crecimiento y genera clorosis y tallos débiles (FAO 1984, Mengel y Kirkby 2000, Inostroza 2009, Koch *et al.* 2020). El azufre afecta directamente con el contenido de nitrógeno en los tubérculos, a mayores contenidos de azufre mayor contenido de nitrógeno y, por ende, mayores rendimientos. Para el caso del calcio, al incrementar los contenidos de azufre los niveles de calcio en los tubérculos disminuyen (Barczak y Nowak 2015).

Zinc (Zn)

El zinc se destaca como un micronutriente crítico para los cultivos, pues cuando se presenta deficiencia las plantas no expresan completamente su potencial genético (Noulas *et al.* 2018). Su principal función es como activador enzimático en procesos de síntesis de proteínas, transcripción de ADN y procesamiento de ARN, fotosíntesis y transporte de electrones.

Forma parte de la anhidrasa carbónica, fundamental en el metabolismo de CO₂. Interfiere en la regulación del crecimiento vegetal, involucrado en la síntesis del ácido indolacético como precursor del triptófano (Bertsch 1998, Molina 2002, Alloway 2008, Noulas *et al.* 2018).

La deficiencia de zinc inhibe la acción de enzimas dependientes de zinc, que en su mayoría se encuentran en las hojas e intervienen con el metabolismo de los carbohidratos, proteínas y la fotosíntesis, así como la producción de auxinas y el metabolismo del nitrógeno, al disminuir la concentración de proteínas, además de la formación de mayor cantidad de radicales libres por parte de la SOD (superóxido dismutasa). Si aumenta la concentración de superóxidos, se da una reacción en cadena donde se pierden azúcares, aminoácidos, potasio, se destruye la clorofila, hay necrosis y atrofiamiento de tejidos (Kirkby y Romheld 2007, Bell y Dell 2008). La deficiencia por lo general se observa como una clorosis intervenal en la segunda o tercera hoja totalmente desarrollada (FAO 1984).

Boro (B)

Al boro en la planta se le asocia con la germinación y crecimiento del polen, así como con la elongación el tubo polínico (Salisbury y Ross 1994). Participa en la síntesis de proteínas, el transporte de compuestos orgánicos hacia los sumideros, en el metabolismo del nitrógeno, del fósforo, de los carbohidratos, ARN y ácido indolacético (Bertsch 1998, Molina 2002, Kirkby y Römheld 2007, Singh y Singh 2019) y en la estabilización de las paredes celulares (Bell y Dell 2008, Voxeur y Fry 2014).

La deficiencia de boro puede incluir crecimiento anormal de lo ápices, oscurecimiento y acucharamiento de las hojas nuevas y muerte de brotes cuando la deficiencia es severa. También se relaciona con aborto floral, el aumento en la síntesis de etileno y en varios cultivos a la malformación de frutos y semillas. (FAO 1984, Bell y Dell 2008).

Manganeso (Mn)

El manganeso está involucrado con la actividad de al menos 35 enzimas, entre las que se encuentra la SOD (superóxido dismutasa), que protege las células de los efectos negativos de los radicales libres y la ARN polimerasa. Participa en el metabolismo del nitrógeno, en la síntesis del ácido giberélico y ácido ascórbico Además tiene un rol importante en el transporte de electrones, y la formación de metaloproteínas. Se relaciona con el potencial redox en las células durante la fase oscura (FAO 1984, Bertsch 1998, Mengel y Kirkby 2000, Molina 2002).

La deficiencia leve de manganeso afecta la fotosíntesis, pues es requerida por la ARN polimerasa, por lo que provoca clorosis intervenal y hasta la formación de puntos necróticos (FAO 1984, Kirkby y Römheld 2007).

Hierro (Fe)

Este elemento interviene en múltiples procesos enzimáticos y de biosíntesis. Participa como parte de los citocromos en el transporte de electrones, en el proceso de respiración celular. Es importante en la biosíntesis de clorofila, la ferredoxina, hemoproteínas, participa en la asimilación del nitrógeno y en la síntesis de etileno, ácido giberélico y ácido jasmónico (Bell y Dell 2008).

La deficiencia de hierro puede ser desde una clorosis intervenal hasta decoloración y necrosis del follaje. (Bell y Dell 2008). Una deficiencia de hierro afecta en primera instancia la funcionalidad de los cloroplastos, debido a que se ve interferida la cadena de transporte de electrones y con esto la producción de compuestos como la ferredoxina (FAO 1984, Kirkby y Römheld 2007).

Molibdeno (Mo)

El molibdeno es el elemento que está presente en menor concentración en las plantas. Es constituyente de las enzimas nitrato reductasa y nitrogenasa, por lo que tiene una relación estrecha con el contenido de nitrógeno. Además, se relaciona con el metabolismo del azufre, la biosíntesis del ácido abscísico y el metabolismo del hierro (Kirkby y Römheld 2007, Bell y Dell 2008).

Los síntomas de deficiencias incluyen punteado intervenal, clorosis de hojas viejas por acumulaciones de nitrógeno y enrollamiento hacia arriba de los bordes de las hojas. Además, la deficiencia de molibdeno afecta la floración de ciertos cultivos y la viabilidad del polen (Bertsch 1998, Mengel y Kirkby 2000).

Cobre (Cu)

El cobre es absorbido por las plantas en cantidades muy pequeñas. La planta lo toma principalmente del suelo, tiene una alta afinidad con el nitrógeno y dentro de sus funciones metabólicas destacan la participación en las reacciones redox, es componente de la plastocianina, de la superóxido dismutasa y la citocromo oxidasa; por lo que interviene en procesos de fotosíntesis y respiración (Mengel y Kirkby 2000, Barona *et al.* 2015). Una deficiencia de cobre provoca clorosis y necrosis en las hojas apicales las cuales pueden enrollarse (Bertsch 1998), mientras que una toxicidad provoca clorosis en los brotes, donde pueden acumularse otros micronutrientes como el hierro. Su toxicidad también inhibe el crecimiento radical (Mengel y Kirkby 2000).

Producción de papa en Costa Rica

En Costa Rica se siembran anualmente alrededor de 3750 hectáreas de papa, distribuidas en las 7 provincias. Sin embargo, esta actividad se concentra en Cartago, con un 78% (2942 ha) del total del área cultivada en el país, las cuales se distribuyen en más de 1000 fincas o productores (INEC 2014).

La producción de papa ha incrementado desde el año 2013, presentándose cambios de hasta 18% en los volúmenes de papa comercializados entre los años 2014 y 2015 y con rendimientos que superan las 90 mil toneladas anualmente. Los cantones de Oreamuno y Alvarado concentran el 60% de la producción nacional de papa seguidos por Zarcero con un 22%. Las variedades que más utilizan los productores son: Floresta, que actualmente ocupa un 66% del área y Granola con un 32% (CNP 2016) y en menor porcentaje materiales de reciente liberación como las variedades Desirée, Durán, Pasquí, Maleque, Única, Yema de huevo, Kamuk y otros (Avilés y Piedra 2017).

Problemática actual del sector papero

Mercado

El mejoramiento genético es una herramienta necesaria para acelerar los procesos de selección de nuevos genotipos de plantas que se adapten a las condiciones cambiantes de clima y proveer variedades que garanticen una producción más eficiente en una menor área agrícola utilizable y para una población en constante crecimiento (Banik *et al.* 2016, González *et al.* 2003, Ordaz *et al.* 2010). Elbe-UCR podría resolver, de momento, una problemática de mercado que ha venido en aumento y que ha agobiado a los productores nacionales, pues la industria de papas tostadas y bastones importa la mayor parte de lo que requieren, justificándose en la falta de variedades con características adecuadas para estos fines.

Con la disponibilidad de una nueva variedad que ofrezca características adecuadas como materia prima para el procesado en hojuelas tostadas o bastones, debería minimizarse la importación de papa y la demanda sería solventada por los productores nacionales. Ello es importante, pues según Vindas (2013) el consumo de papa prefrita (bastones congelados) en Costa Rica es de 1100 toneladas mensuales, contra 4200 toneladas de papa fresca. Datos del CNP (2018) indican que para el año 2017 se importaron 2952 toneladas de papa fresca procedentes de Canadá (61%) y Estados Unidos (39%), la cual tenía como destino final el procesado para hojuelas. Ambos tipos de importación afectan la demanda a nivel nacional, marcándose más la tendencia al consumo de papa prefrita, que constituye el 90% de la papa que se importa, lo cual disminuye el consumo de producto fresco (Vindas 2013).

Manejo de la fertilización

La papa es un cultivo que posee una baja densidad radicular, lo que la hace poco hábil para explorar en el suelo por agua y nutrientes, característica que le genera alta capacidad de respuesta a la fertilización. De ahí la importancia de proveerle los nutrientes adecuados en el momento justo para su aprovechamiento (Sierra *et al.* 2002, Ruiz 2011, Sandaña 2016). Aunado a esto, las variedades de papa que se utilizan en Costa Rica se han vuelto más vulnerables a los incrementos en la temperatura y la inestabilidad en los regímenes de lluvias, lo cual trae consigo mayor presión de plagas y enfermedades y una disminución en los rendimientos (Westermann 1993, Ojeda *et al.* 2011, Brylinska *et al.* 2016, INIA 2017, Martín y Jerez 2017).

En el cultivo de papa el rendimiento y la calidad de los tubérculos dependen de las condiciones climáticas predominantes, las características de la variedad utilizada, el suelo y su fertilidad y manejo adecuado (White *et al.* 2007, Horneck y Rosen 2008, Ruza *et al.* 2013, Koch *et al.* 2020, Wang *et al.* 2019). El uso racional de los fertilizantes minerales asegura entre un 30 y 50% de incremento en rendimiento y calidad de los tubérculos, mientras se preserva o incluso incrementa la fertilidad del suelo (Yakimenko y Naumova 2018). De acuerdo con Ríos *et al.* (2010) el cultivo de papa es considerado como uno de los que más fertilizante por unidad de área consume, especialmente las fórmulas con alto contenido de fósforo. Esto debido a la baja eficiencia del sistema radical de la papa para absorber nutrientes (De Almeida *et al.* 2018), especialmente fósforo y potasio, por la fijación de estos elementos en las arcillas de los suelos dedicados al cultivo de papa pues la forma de ortofosfatos, en que las plantas asimilan el fósforo, es fácilmente retenida en suelos derivados de cenizas volcánicas (Bucher y Kossmann 2007, White *et al.* 2007).

Para asegurar una producción adecuada y reducir costos de producción es necesario contar con variedades que demanden menor cantidad de fertilizantes, especialmente el fósforo, elemento para el cual se estima una importante disminución en su disponibilidad a partir del 2030, por escasez de fuentes de extracción (Soratto *et al.* 2015). Esto se logrará solo mediante un adecuado manejo agronómico y mejoramiento genético, que deben ser las puntas de lanza en los cambios tecnológicos de la agricultura moderna. Ello debido a que la agricultura dependerá de los fertilizantes minerales por muchos años más, pues la realidad es que la fertilización con fuentes orgánicas no ha comprobado el poder sustituir al 100% la fertilización convencional, debido a la gran cantidad requerida, su costo de transporte y aplicación y la baja mineralización de estas fuentes de nutrimentos (Kumar *et al.* 2011, Hernández *et al.* 2012). Por tanto, se debe ser eficiente y preciso en las cantidades de nutrientes que le aportamos a las plantas para obtener el mayor rendimiento, con el menor costo económico y ambiental (Bell y Dell 2008). De ahí la importancia de determinar las curvas de absorción de nutrientes en los cultivos.

Curvas de absorción de nutrientes

Según Bertsch (2003), el establecimiento de una curva de absorción de nutrientes es uno de los estudios más precisos para ajustar un programa de fertilización y consiste en lo siguiente:

1. Seleccionar una sola variedad.
2. Seleccionar lotes y plantas en las mejores condiciones posibles, a fin de potenciar la expresión genética del material.
3. Seleccionar lotes distintos para distintas edades, siempre que las características de suelo, manejo y rendimiento sean similares.
4. Definir las etapas fenológicas más importantes del cultivo.
5. Dividir la planta en los tejidos de importancia.
6. Tomar al menos 3 repeticiones por etapa y tejido, para medir peso fresco, peso seco y concentración de nutrientes.
7. Calcular el peso seco acumulado en cada etapa fenológica, en kilogramos por hectárea, y tomando en cuenta la cantidad de plantas por hectárea que se establecieron en el cultivo sometido a análisis.
8. Graficar la curva, con el factor tiempo en el eje X y los valores de peso (kg ha^{-1}) en el eje Y, para cada tejido.
9. Calcular la cantidad de nutrientes absorbida, con los datos de peso seco en una sola muestra por tejido, para bajar costos. La fórmula para realizar este cálculo es la siguiente:

$$\text{kg nut} = \frac{\text{PS} * \text{Cnut}}{100}$$

Donde:

kg nut: kilogramos del nutriente por tejido por hectárea.

PS: peso seco de la muestra.

Cnut: concentración del nutriente en el tejido, en porcentaje. Si la concentración se expresa en ppm, las unidades de Cnut se expresarán en mg kg^{-1} y se divide entre 1000.

Curvas de absorción de nutrientes en papa

Para ajustar la fertilización de una nueva variedad es indispensable contar con una curva de absorción de nutrientes, a fin de determinar cantidades y momentos de aplicación, pues cada variedad tiene un comportamiento diferente (Nyiraneza *et al.* 2017). Para obtener una curva de absorción de nutrientes se deben tomar datos de acumulación de nutrientes por tipo de tejido, desde el inicio de la etapa vegetativa hasta el momento de cosecha (Barrera *et al.* 2010, ProNAP 2014). Una curva de absorción va a estar siempre en función de la época de siembra, así como la fertilidad del suelo y las condiciones de clima que imperen en cada región donde

se cultive la variedad (Quispe *et al.* 1997, Caraspe-León *et al.* 2009, Da Silva *et al.* 2020). La curva de absorción se acompaña siempre de la curva de crecimiento, con la cual se puede determinar la distribución de la materia seca en los distintos órganos de la planta, y como se debe ajustar el programa de fertilización para obtener mayores rendimientos, según los momentos de mayor acumulación de materia seca en las plantas (Ñustez-Lopez *et al.* 2009, Sierra *et al.* 2013, Barrientos *et al.* 2015, Di Benedetto y Tognetti 2016).

En México, Mendoza-Pérez *et al.* (2015) determinaron las curvas de absorción para la variedad Fianna. Esta presentó una mayor absorción de NPK al inicio de la formación de estolones y su elongación, así como tasas de extracción muy similares entre el nitrógeno (270 kg ha⁻¹) y el potasio (300 kg ha⁻¹), mientras que el fósforo no sobrepasó los 30 kg ha⁻¹. Un comportamiento similar para la absorción de fósforo se determinó en Chile para la variedad Desirée, donde la extracción total de fósforo llegó a los 28 kg ha⁻¹, con la aplicación máxima de 300 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (Zec 2008). Arce (2002) definió como parámetro general, independiente de la variedad, extracciones de 5 kg N, 2 kg P₂O₅, 9 kg K₂O, 4 kg CaO y 1 kg MgO por tonelada de tubérculos producida. Flores *et al.* (2009) determinaron cantidades de 245 kg ha⁻¹ de nitrógeno, 28 kg ha⁻¹ de fósforo y 352 kg ha⁻¹ de potasio, para un rendimiento de 30,92 toneladas por hectárea, en la variedad Alpha, en Sinaloa, México. Xu *et al.* (2019) mediante el modelo QUEFTS, que funciona con bases de datos para simular rendimientos según las cantidades de nutrientes que absorbe la planta, determinaron en China, que se requieren 4 kg de nitrógeno, 0,7 kg de fósforo y 3,5 kg de potasio para producir una tonelada de papas.

La variedad Floresta, utilizada por un 66% de los productores de papa de Costa Rica (CNP 2016) presenta requerimientos de 380 kg de nitrógeno, 23 kg de fósforo, 316 kg de potasio, 41 kg de calcio y 35 kg de magnesio por hectárea, para lograr un rendimiento de 40 toneladas (Bertsch 2003). Estos requerimientos se suplen mediante la adición de fertilizantes granulados con fórmulas como la 12-24-12, 14-21-13 ó 12-27-8 para la primera fertilización y fórmulas como la 19-4-19, 15-3-14 ó 15-3-20 para la segunda fertilización. Los momentos de aplicación del fertilizante granulado son: al momento de siembra, donde se emplean las fórmulas altas en fósforo y al momento de aporca, donde se utilizan las fórmulas altas en nitrógeno y potasio (Cabalceta *et al.* 2005). En ocasiones, algunos productores realizan una mezcla de la fórmula completa con fertilizantes como el K-mag, compuesto por potasio, azufre y magnesio al momento de aporca, para aportar un “extra” de potasio. Además, mediante aspersión foliar se realizan aplicaciones de nutrientes como calcio, magnesio, nitrógeno, fósforo, potasio y elementos menores, que complementan la fertilización granular (Oyarzún *et al.* 2002).

La planta de papa es altamente demandante de nutrientes para un crecimiento y producción adecuados, con un período crítico en la etapa de inicio de tuberización y la finalización de formación de follaje (Kluge-Rudisile 2017). Entre los principales nutrimentos está el nitrógeno (N). Según Horneck y Rosen (2008), el nitrógeno es absorbido por la planta en más de un 50% previo al llenado del tubérculo y una vez iniciada la tuberización es deseable que las cantidades de nitrógeno disminuyan, a fin de favorecer el llenado de estos (Saldías *et al.* 2004). Estudios realizados por Havenkort y MacKerron (2000) y Rens *et al.* (2016) mencionan que aplicaciones excesivas de nitrógeno al inicio de la tuberización disminuyen

los rendimientos y generan un mayor desarrollo de follaje, lo cual también va en detrimento del rendimiento e incluso se puede afectar el almacenamiento de la semilla. Marouani y Harbeoui (2016) señalan que una deficiencia de nitrógeno al inicio de tuberización puede afectar negativamente el rendimiento final en suelos semiáridos, por lixiviación de nitratos a estratos inferiores del suelo, lo que reduce la disponibilidad de nitrógeno en la zona cercana a las raíces.

Para Arce (2002) la concentración de nitrógeno no es el único factor que se incide sobre la relación follaje/tubérculo, sino que temperaturas elevadas, así como, alta humedad y luminosidad inciden sobre el mayor desarrollo vegetativo y van en detrimento de la formación de tubérculos. Wang *et al.* (2019) determinaron correlaciones positivas entre el contenido de nitrógeno nítrico en el suelo y el contenido de fósforo disponible, y una correlación negativa con el contenido de potasio, con lo que concluyen un papel importante del nitrógeno en la absorción de otros nutrientes a nivel de suelo. Maltas *et al.* (2018) indican que las dosis y el fraccionamiento en las aplicaciones de nitrógeno deben ser distintas entre variedades, pues los ciclos y el comportamiento climático afectan la absorción del elemento, incluso para la misma variedad en años distintos. De ahí, la importancia de conocer la zona, la época, el ciclo del material que se va a sembrar, porque la eficiencia en la absorción de nitrógeno difiere además entre variedades, y según el cultivo que antecedió a la papa y el contenido de materia orgánica existente (Firman y Allen 2007).

En suelos Andisoles, por ejemplo, aunque la eficiencia en absorción del nitrógeno es de aproximadamente un 70%, las pérdidas por lixiviación son importantes debido, entre otras razones, a la mineralogía de arcillas de este tipo de suelo, al régimen de lluvias y al limitado sistema radicular de la planta de papa (Rens *et al.* 2016). Esto conlleva una problemática adicional de volatilización, por un lado, y de lixiviación de nitratos hacia los estratos inferiores del suelo por otro, contaminando los mantos acuíferos (Vos 2009). Wang *et al.* (2019) determinaron una correlación negativa entre el contenido de agua en el suelo, la concentración de materia orgánica y el contenido de potasio, con el rendimiento final. Con la implementación de sistemas como el riego por goteo, algunos países ya han establecido programas de fertirriego para el cultivo de papa, a fin de hacer más eficiente el uso del nitrógeno y disminuir las pérdidas por lixiviación de nitratos (Marouani y Harbeoui 2016), los cuales son aplicables a todos los tipos de suelo, siempre y cuando se tenga en cuenta la eficiencia del nitrógeno en cada uno (Zebarth *et al.* 2012).

Ríos *et al.* (2010) señalan que los rendimientos del cultivo de papa aumentan de manera lineal al incrementar las dosis de NPK desde 500 kg hasta 3000 kg ha⁻¹. Sin embargo, para Arce (2002) debe existir una relación general entre el NPK de 1:1:2, sujeta a modificarse en suelos con alto contenido de materia orgánica o en suelos que fijan mucho fósforo. En los suelos con mucha materia orgánica debe reducirse el uso de nitrógeno y en los que fijan fósforo debe aplicarse una mayor cantidad del elemento.

La papa requiere cantidades importantes de fósforo durante todo el ciclo para favorecer el desarrollo del sistema radicular y la formación de tubérculos (Arce 2002), pero factores como la fijación por parte de las arcillas del suelo hacen que la eficiencia de absorción sea incluso inferior al 40% y deban aplicarse cantidades muy superiores al requerimiento del cultivo (Liu

et al. 2015; Bertsch 1998). El fósforo cumple un papel fundamental en el metabolismo de las plantas, pero es uno de los elementos con la mayor fijación en los suelos puros de origen volcánico, por lo que según Mengel y Kirkby (2000) en estos suelos debe aplicarse entre un 10% y hasta un 50% más del fósforo de lo que extrae el cultivo.

Vhuthu (2017) evaluó una fuente de fósforo en forma de ortofosfatos y otra en forma de polifosfatos, resultando en una disponibilidad más inmediata de los ortofosfatos, en forma ya asimilable para las plantas, mientras que los polifosfatos requieren hidrólisis para ser asimilables, por lo que su absorción depende más de factores climáticos. Arce (2002) y Ekelof (2007) mencionan que plantas de papa con buen suministro de fósforo después de la emergencia, tanto al suelo como foliar, producen una mayor cantidad de tubérculos respecto a plantas con menor suministro del elemento. Zec (2008) también indica que el desarrollo vegetativo se ve disminuido conforme se reducen las dosis de fósforo aplicadas, lo cual ratifica la importancia del aporte de este elemento desde la siembra y hasta las etapas de llenado de tubérculos. Queiroz *et al.* (2013) determinaron para la variedad Agata que el mayor rendimiento se obtuvo con dosis de 693 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Concluyeron que aplicaciones de dosis altas de fósforo no necesariamente incrementaban la absorción del elemento en el follaje. Para las variedades Capiro y Supreme, Gómez *et al.* (2017) determinaron que las extracciones de fósforo variaron, por factores como la duración del ciclo, el tipo de suelo y la tuberización más concentrada, lo que genera mejor movilización de asimilados dentro de la planta.

El fósforo es considerado un elemento limitante en la producción de papa a pesar de encontrarse en abundancia en los suelos donde ésta se cultiva (Sandaña 2016) ya que la arcilla alofana lo puede fijar hasta en un 95% (Bertsch 2003). Fernández *et al.* (2015) mencionan que sólo del 4 al 6,5% del fósforo aplicado es absorbido por la planta, sin considerar lo que podría aportar el suelo. Otros nutrientes como el nitrógeno y el calcio son absorbidos por la planta en distintas cantidades y sus concentraciones finales en los tubérculos varían según la movilidad de cada uno dentro de la planta; el nitrógeno, por ejemplo, puede llegar a concentrarse hasta en un 90% en los tubérculos, mientras que el calcio ronda el 10-20% (Westermann 1993).

El potasio en el tubérculo de papa se relaciona con el desarrollo y crecimiento de los tubérculos, el contenido de materia seca, así como con la tolerancia a daños en la piel por manipulación mecánica y en postcosecha para alargar la vida en anaquel (Arce 2002). La absorción de potasio se incrementa al inicio de la etapa de tuberización, con una absorción diaria de 5-14 kg ha⁻¹. Núñez (2016) menciona que aplicaciones tempranas de potasio no generan aumentos en el desarrollo foliar ni en la tuberización, por lo que no afecta rendimiento y que resulta más aprovechable realizar la aplicación de potasio lo más cerca posible del inicio de llenado de tubérculos. Trehan *et al.* (2009) indican que la respuesta a la aplicación de potasio es distinta entre variedades y que está relacionada con la capacidad de rendimientos del material, por lo que variedades que formen tubérculos grandes inician con la absorción de potasio más rápido que las variedades que forman tubérculos pequeños.

Además del nitrógeno, fósforo y potasio, el suplemento vía suelo de nutrientes como el calcio es muy importante en el cultivo de papa. Este elemento es requerido por la planta para la

división y crecimiento celular, con un papel fundamental en la estructura de las membranas celulares (Palta 1996, Arce 2002, Maathuis 2009, Potarzycki y Grzebisz 2020). Estudios realizados por Palta (2010) mostraron que los tubérculos no reciben calcio del tallo principal de papa, sino que son las raíces adyacentes a los estolones las que proveen calcio a los tubérculos, lo cual hace ver la necesidad de utilizar fertilizantes granulados que contengan calcio al momento de aporcar, a fin de evitar problemas como el corazón hueco. Ozgen *et al.* (2003) señalan que aplicaciones de calcio dirigidas al surco durante el inicio de la tuberización aumentan las cantidades de este elemento en los tubérculos y favorecen el tamaño y cantidad de estos. Fallas y Bertsch (2014) encontraron que a nivel foliar para el cultivo de papa, que el calcio, el boro y el magnesio presentan condiciones de deficiencia, especialmente en suelos de origen volcánico. De ahí la importancia de ajustar la fertilización al suelo, para tratar de minimizar las posibles deficiencias de nutrientes. Una deficiencia de calcio incrementa la incidencia de daños internos como los puntos color café y centro hueco, así como malformaciones y reventaduras externas (Naumann *et al.* 2019, Potarzycki y Grzebisz 2020).

De acuerdo a Neshev y Manolov (2015) al ajustar o recomendar un programa de fertilización en el cultivo de papa, se debe tomar en cuenta el mercado al que estará destinada la producción, y a partir de ello elaborar el plan de fertilización, pues existen diferencias en las cantidades y fuentes de potasio que se deben aplicar si la cosecha es destinada a mercado fresco, o si será destinada a la industria para chips o bastones. Las características deseables para tostado se ven modificadas con aplicaciones excesivas de potasio, haciendo las hojuelas susceptibles a quemarse durante el proceso de tostado debido a los cambios en la composición de los azúcares en el tubérculo.

Los aspectos de calidad en los tubérculos de papa tienen que ver además con el pH predominante en el suelo al momento de siembra, o de cómo se maneje el pH del suelo durante el ciclo de producción de papa, el cual idealmente debe estar en valores entre 5 y 7 (Avilés y Piedra 2017). El pH afecta la actividad microbiana en el suelo, lo cual repercute en los procesos de absorción de nutrientes por parte de las raíces y, por tanto, al incrementar el pH, los contenidos de almidones, azúcares reductores y proteínas solubles serán mayores en los tubérculos (Xing *et al.* 2020).

La distancia de siembra juega un papel importante en el cultivo de papa. De Almeida *et al.* (2018), determinaron que una distancia de siembra de 90 cm entre surcos, se traducía en plantas más pequeñas, pero con mayor peso fresco y seco en los tubérculos, respecto a la distancia normal de 75 cm entre surcos, lo cual aumenta el porcentaje de intercepción de luz y con esto una mayor producción de fotoasimilados que garantiza mayor rendimiento. Además, a esta distancia de siembra, encontraron mayores concentraciones de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio a nivel foliar.

Junto a la evaluación de los rendimientos de la variedad y el ajuste de las curvas de absorción, debe realizarse un estudio económico, para determinar cómo los cambios en las cantidades de fertilizantes utilizadas incrementan o disminuyen los costos y relacionarlos con aumentos o disminuciones en el rendimiento de la variedad. Los presupuestos parciales permiten observar los cambios en el flujo financiero, que se generan por la implementación de una

medida o tratamiento específico (Horton 1982, Harper *et al.* 2014; Reyes 2001, Avalos y Villalobos 2018), es decir, evalúan el impacto de un cambio en las prácticas de manejo del cultivo.

Muchos factores técnicos intervienen en la producción comercial de papa, de ahí que contar con herramientas como las curvas de absorción de nutrientes junto con otros datos de suelo y clima, las fuentes de nutrientes y momentos idóneos en los que deben ser aplicados permitan tomar decisiones con mayor certeza, a la vez que se favorecen mejores rendimientos y disminución de los costos de producción. El cultivo de papa debe especializarse, no debe estar limitado únicamente a aplicaciones de fertilizante sin criterio técnico, sin mantener el balance nutricional. Se debe dar un manejo según la variedad, la época del año, la altitud, el potencial de rendimiento y el destino de la producción (Villamil 2005, Sifuentes 2014).

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación

Los ensayos para determinar las curvas de absorción, así como su validación se llevaron a cabo en la localidad de Guarumos, en la provincia de Cartago, cantón de Alvarado. Las siembras de papa var. Elbe-UCR fueron comerciales, pertenecientes al Sr. Franklin Aguilar Serrano e hijos.

Las coordenadas de la finca donde se realizó la curva de absorción de nutrientes son: 9°58'06"N 83°49'02"W, a 2846 msnm. Las coordenadas de la finca donde se realizó la validación de la curva de absorción son: 9°58'01"N 83°49'15"W, a 2883 msnm.

Suelos

Los suelos que caracterizan la zona son de origen volcánico, son profundos de color oscuro, con alofana como arcilla predominante, presentan un buen contenido de materia orgánica y baja densidad aparente. Su textura por lo general es franca o franco arenosa. Son moderadamente fértiles, pero con fijación de fósforo de alrededor de 70%, así como limitaciones en la concentración de boro, azufre y zinc (Bertsch 1998). Los suelos Andisoles se caracterizan por la capacidad para fijar fosfatos, boratos y molibdatos, la presencia de magnesio conduce a un desbalance con el calcio y son deficientes en manganeso (FAO 1984).

La pluviosidad promedio en la zona varía entre 1800 y 2300 mm anuales. Las temperaturas varían entre los 9 y 12°C.

Generalidades de la siembra

La primera siembra, en la cual se determinaron las curvas de absorción, se inició en abril 2017. Todas las labores, desde la siembra hasta la aplicación de fertilizante, se realizaron manualmente. La distancia de siembra fue de 35 cm entre plantas y 75 cm entre surcos. La aporca se realizó a los 45 dds. A los 135 dds se realizó la aplicación de herbicida para defoliar el cultivo y acelerar el proceso de suberización de los tubérculos.

Las fórmulas de fertilizante utilizadas en la siembra fueron:

- Siembra: 14-21-13-3-7,2 (S) de Abopac, mezcla física, a una dosis de 964 kg ha⁻¹.
- Aporca: una mezcla en relación 2:1 de Hidrocomplex (12-11-18-3-8(S)-0,02(B)-0,2(Fe)-0,02(Mn)-0,02(Zn)) con Kmag (0-0-22-18-22 (S)), a una dosis de 1285 kg ha⁻¹.

La segunda siembra, donde se realizó la validación de las curvas de absorción, inició en agosto 2018, siguiendo los mismos lineamientos de siembra, fertilización y densidad que en la primera siembra. La aporca se realizó a los 48 dds y la eliminación del follaje con herbicida se realizó a los 138 dds.

Las fórmulas de fertilizante granulado utilizadas en el ensayo de validación de las curvas de absorción fueron:

- Siembra: 12-27-8-2,5-4,3(S) de Yara, mezcla química.
- Aporca: una mezcla en relación 2:1 de Kmag (0-0-22-18(Mg)-22(S)) con 19-4-19 de Yara, mezcla química

Material experimental

Para determinar las curvas de absorción se utilizó semilla básica II de papa de la variedad Elbe-UCR, obtenida de semilla básica I, cultivada el ciclo anterior en la finca del productor Franklin Aguilar Serrano. Para la validación de las curvas se utilizó semilla básica III de la misma variedad obtenida de semilla básica II, cultivada el ciclo anterior por el mismo productor.

Muestreos

Para la determinación de las curvas de absorción se realizó muestreo de suelo antes de la siembra, para determinar el estado nutricional del terreno en la finca donde se determinaron las curvas de absorción. Para ello se tomó una muestra siguiendo el protocolo de muestreo de suelo con un barreno a 20 cm de profundidad y en forma aleatoria, para un tamaño total de muestra de 0,5 kg. Estas se llevaron al Laboratorio de Suelos y Foliar del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA-UCR) para su análisis químico completo. Para el ensayo de validación se realizó el mismo procedimiento.

Las condiciones de fertilidad del suelo donde se realizó el ensayo para la curva de absorción de nutrientes se determinaron mediante un análisis nutricional de suelo realizado un mes previo a la siembra. Los resultados indican un pH de 6,3, adecuado para el cultivo de papa, así como niveles de bases con valores por encima del mínimo requerido para una adecuada producción (Cuadro 1). Basado en este análisis de suelos se recomendó no aplicar ninguna enmienda previo a la siembra del ensayo.

Cuadro 1. Resultados del análisis nutricional de suelo de la parcela utilizada para determinar las curvas de absorción de papa Elbe-UCR, en la localidad de Guarumos, Alvarado, Cartago.

Curva absorción	pH	cmol (+)/L					%	mg/L				
	H ₂ O	ACIDEZ	Ca	Mg	K	CICE	SA	P	Zn	Cu	Fe	Mn
Nivel crítico	5,5	0,50	4,00	1,00	0,20	5,00		10	3	1	10	5
Guarumos	6,3	0,14	7,15	1,18	0,37	8,84	2	81	11,1	19	214	7
Relaciones catiónicas	Rangos		2_5			5_25		2,5-15			10_40	
	Ca/Mg		6,1	Ca/K		19,3	Mg/K		3,2	Ca+Mg/K		22,5

En el Cuadro 2 se muestran los resultados del análisis de suelos realizado para el ensayo donde se validaron las curvas de absorción de Elbe-UCR. En este se observa un valor de pH similar al del primer análisis, por encima del mínimo requerido, así como niveles de bases adecuados y una acidez de 0,12, lo que indica pocos problemas por acidez en el suelo. Al igual que para el primer ensayo, el productor decidió no aplicar ninguna enmienda previo a la siembra de papa.

Cuadro 2. Resultados del análisis nutricional de suelo de la parcela utilizada para la validación de las curvas de absorción, en la localidad de Guarumos, Alvarado, Cartago.

Validación curva	pH	cmol (+)/L					%	mg/L				
	H ₂ O	ACIDEZ	Ca	Mg	K	CICE	SA	P	Zn	Cu	Fe	Mn
Nivel crítico	5,5	0,50	4,00	1,00	0,20	5,00		10	3	1	10	5
Guarumos 2	6,4	0,12	4,96	1,62	0,30	7,00	2	90	10,4	23	225	7
Relaciones catiónicas	Rangos		2_5			5_25		2,5-15			10_40	
	Ca/Mg		3,1	Ca/K		16,5	Mg/K		5,4	Ca+Mg/K		21,9

Muestreos de plantas

Para llevar a cabo los análisis nutricionales de hojas, tallo, raíz y tubérculos se procedió a tomar muestras de plantas completas cada 15 días a partir de la emergencia y hasta que se completó el ciclo del cultivo, a los 135 días después de siembra. Se llevaron al laboratorio de suelos y foliares del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA-UCR), donde se tomó el peso fresco, el peso seco y se determinó la concentración de nutrientes en cada uno de los órganos analizados. El procedimiento de toma de las muestras se explica a continuación.

- Tratamiento 1: dosis de fertilizante recomendadas a partir de la elaboración de las curvas de absorción de Elbe-UCR (2,4 kg en siembra y 7,3 kg en aporca).
- Tratamiento 2: dosis recomendadas más un 25% de incremento de la dosis de NPK de las curvas de absorción (3 kg en siembra y 9,1 kg en aporca).
- Tratamiento 3: dosis recomendadas menos un 25% de la dosis de NPK de las curvas de absorción (1,8 kg en siembra y 5,5 kg en aporca).
- Tratamiento 4: dosis y fuentes de fertilizante utilizada por el productor, que en este caso resultó similar al T1, pues el productor ya tenía experiencia con el manejo de la variedad Elbe (2,5 kg en siembra y 7 kg en aporca).
- La unidad experimental constó de 6 surcos de 0,75 m de ancho por 6 m de largo, con un área aproximada de 27 m².
- Al momento de la cosecha, para cada uno de los tratamientos y sus repeticiones se determinó el número y peso de tubérculos por planta de un total de 10 plantas por tratamiento, tomadas del surco central.



Figura 3. Disposición del diseño experimental para la toma de muestras de la var. Elbe-UCR, en el ensayo de validación de las curvas de absorción, en la localidad de Guarumos, Cartago.

- **Análisis de presupuesto parcial**

Para analizar si el cambio en la producción de papa, al momento de la validación de las curvas genera un cambio en la estructura de costos, se realizó un estudio de presupuestos parciales, donde se determinó el cambio en los costos de producción al variar las cantidades y dosis de fertilizante, y cómo influyó este aspecto sobre el rendimiento final.

- **Análisis estadístico**

A los datos obtenidos con la validación de la curva de absorción se realizó un análisis de dominancia, para establecer el tratamiento con el mayor beneficio neto.

RESULTADOS

Curvas de absorción de nutrientes

Curva de crecimiento

La acumulación de biomasa en la var. Elbe-UCR se documentó desde los 30 días después de siembra (dds). Se determinó un incremento constante y sostenido hasta prácticamente el final del ciclo de cultivo (Figura 4A). Después de la segunda fertilización granulada (45 dds) el incremento quincenal fue en promedio de un 5% respecto a la quincena anterior, por lo que la acumulación de materia seca llegó hasta los 105 dds sin disminuciones. Ya para los 120 dds se observaron plantas con follaje amarillento, debido al inicio de la etapa de maduración. Sin embargo, la acumulación de materia seca se mantuvo con valor positivo, aunque disminuyó un 15% respecto a la quincena que le antecedió (Figura 4B). A los 135 dds volvió a incrementar el contenido de materia seca, debido a la fase final de llenado de tubérculos.

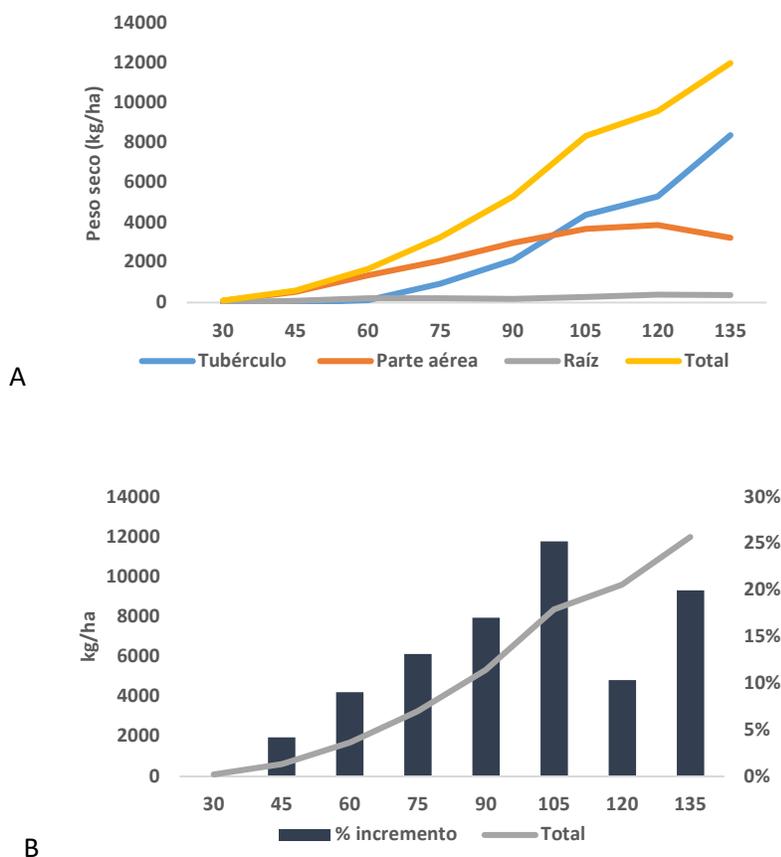


Figura 4. (A) Curva de crecimiento total y según órgano, para la var. Elbe-UCR, (B) incremento porcentual en la curva de crecimiento, según la absorción total.

Curvas de acumulación de nutrientes

Para el caso del nitrógeno, en la Figura 5A se observa como el nitrógeno incrementó de manera constante hasta incluso los 90 dds, llegando a 172 kg ha^{-1} a los 120 dds. Posteriormente tiende a disminuir durante la etapa final de llenado y maduración de los tubérculos. Sin embargo, la planta se mantuvo verde y vigorosa casi hasta el final del ciclo, lo que determina una absorción muy constante de nitrógeno aun en las etapas finales del ciclo. La absorción en la parte aérea llegó a un máximo de 133 kg ha^{-1} , según el órgano evaluado y, en dos picos, a los 90 y 120 dds, después de lo cual disminuyó hasta los 87 kg ha^{-1} (Figura 4A). El sistema radical absorbió un máximo de 8 kg ha^{-1} , a los 120 dds, pero mantuvo un promedio durante el ciclo de $5,2 \text{ kg ha}^{-1}$, lo que indica una absorción constante. Los tubérculos llegaron a absorber $77,3 \text{ kg ha}^{-1}$ de nitrógeno, y esta curva se mantuvo en incremento desde los 70 dds. Los picos de mayor incremento en absorción de nitrógeno se presentaron a los 45 y 75 dds (Figura 6A), coincidiendo el primer pico de incremento con la aporca, momento en el cual se realizó la segunda fertilización granulada y el segundo pico con el inicio de llenado de tubérculos.

Respecto al fósforo, el incremento en la absorción fue constante desde los 30 hasta incluso los 135 dds, alcanzando un máximo de $20,5 \text{ kg ha}^{-1}$ de fósforo total (Figura 5B). En los tubérculos se inicia la absorción ascendente y constante de P a partir de los 60 dds, llegando a $14,3 \text{ kg ha}^{-1}$, y con tendencia a incrementar. Esto equivale a que un 70% del fósforo aplicado quedo en los tubérculos. La parte aérea presentó un pico de absorción a los 90 dds de $9,3 \text{ kg ha}^{-1}$, pero finalizó en $5,5 \text{ kg ha}^{-1}$. Las raíces absorbieron un máximo de $0,8 \text{ kg ha}^{-1}$ de fósforo, pero este valor fue constante durante el ciclo. Sin embargo, es interesante notar como el pico de mayor incremento en absorción de fósforo se dio a los 75 dds, con un 27% respecto a la quincena anterior (Figura 6B). El resto del ciclo los incrementos fueron estables.

El potasio fue el elemento absorbido en mayor cantidad por la var. Elbe-UCR, iniciando en la parte aérea incluso desde el primer muestreo, y en los tubérculos después de los 70 dds (Figura 5C). La absorción total de potasio para Elbe-UCR llegó a $331,6 \text{ kg ha}^{-1}$. La absorción de la parte aérea se mostró desde los 30 dds con tendencia creciente, llegando a un máximo de 211 kg ha^{-1} a los 120 dds, y decreció a 188 kg ha^{-1} al momento en que se eliminó el follaje, reflejando un remanente importante de potasio que permaneció en el follaje. Los tubérculos absorbieron $135,2 \text{ kg ha}^{-1}$ de potasio, con un comportamiento creciente de la curva de acumulación, e iniciando aproximadamente a los 60 dds (Figura 6C). El sistema radical llegó a absorber $9,6 \text{ kg ha}^{-1}$ de potasio, a los 120 dds, y decreció a 8 kg ha^{-1} a los 135 dds. El mayor incremento en la absorción de potasio se dio a los 75 dds (Figura 6C), lo cual coincide con los picos de mayor incremento en absorción de nitrógeno y fósforo. Solo el 41% de potasio que absorbió la planta se destinó a la cosecha, el restante 59% quedó en tejido vegetativo.

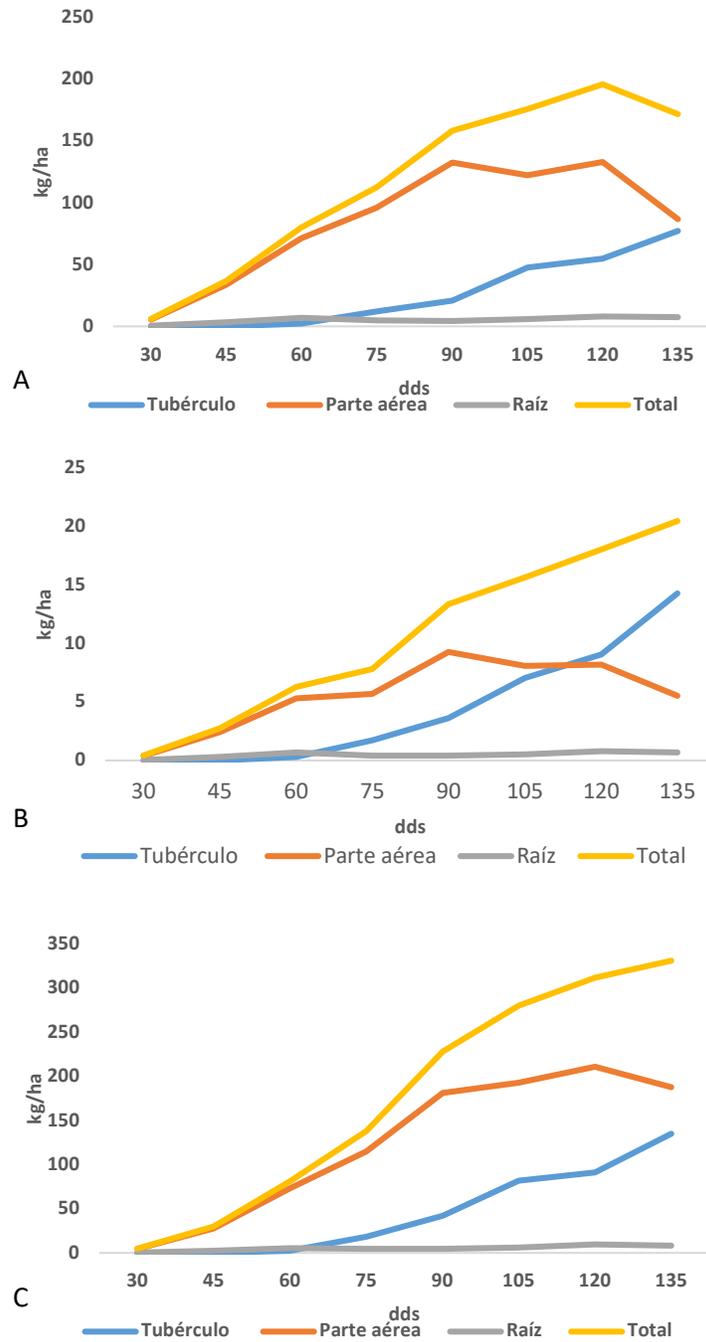


Figura 5. Curvas de absorción de (A) nitrógeno, (B) fósforo y (C) potasio, en la var. Elbe-UCR, total y por órgano.

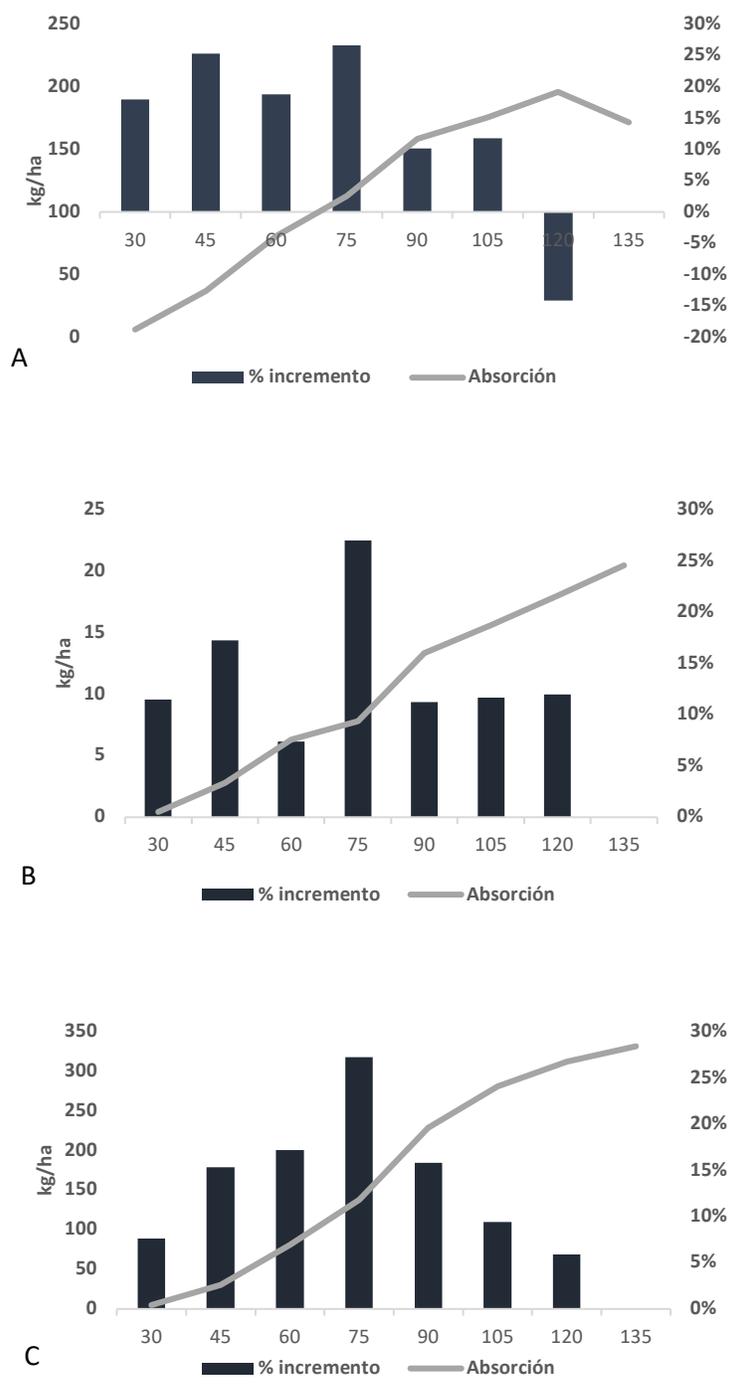


Figura 6. Incremento porcentual en la absorción de (A) nitrógeno, (B) fósforo y (C) potasio, para Elbe-UCR, con base en la absorción total de cada elemento.

La absorción total de calcio (Figura 7A) por parte de la var. Elbe-UCR tuvo un comportamiento ascendente durante 105 dds, después de lo cual tendió a estabilizarse, llegando a $52,6 \text{ kg ha}^{-1}$. El mayor porcentaje de incremento en absorción ocurrió a los 75 dds (Figura 8A), como ha sido la tendencia con el NPK. Al ver la absorción por órganos de la planta, la parte aérea llegó a absorber $45,5 \text{ kg ha}^{-1}$, con un comportamiento ascendente durante todo el ciclo de cultivo. El sistema radical absorbió $4,6 \text{ kg ha}^{-1}$ y los tubérculos llegaron a $2,3 \text{ kg ha}^{-1}$, con comportamiento ascendente durante el ciclo. Solo el 5% del total del calcio aplicado forma parte de la cosecha, el restante 95% queda en los órganos vegetativos.

La absorción total de magnesio en Elbe-UCR fue de $15,2 \text{ kg ha}^{-1}$ (Figura 7B), con comportamiento ascendente hasta incluso los 105 dds, después de lo cual inició un leve descenso. La distribución del magnesio correspondió a un pico de $12,5 \text{ kg ha}^{-1}$ a los 105 dds, terminando con $8,4 \text{ kg ha}^{-1}$ de absorción a los 135 dds. El sistema radical absorbió $0,9 \text{ kg ha}^{-1}$, de manera constante y sostenida en el ciclo, mientras que los tubérculos absorbieron un máximo de $5,9 \text{ kg ha}^{-1}$, hacia los 135 dds. El mayor porcentaje de incremento en absorción se dio a los 75 dds con un 34% y disminuyó en a partir de los 120 dds, cuando la planta se encontraba en la etapa final de llenado de tubérculos (Figura 8B). El 39% del magnesio aplicado se acumuló en la cosecha, y el restante 61% en los órganos vegetativos.

En la Figura 7C se observa la acumulación de azufre en la var. Elbe-UCR, que llegó a $21,1 \text{ kg ha}^{-1}$, con un comportamiento ascendente, sostenido, desde los 30 dds. La parte aérea de la planta presentó un pico máximo de $13,6 \text{ kg ha}^{-1}$, a los 120 dds y terminando en $11,7 \text{ kg ha}^{-1}$. El sistema radical llegó a un valor de absorción de 1 kg ha^{-1} , manteniendo estable este valor durante el ciclo. Los tubérculos absorbieron $8,4 \text{ kg ha}^{-1}$, presentándose el mayor incremento entre los 120 y 135 dds. En la Figura 8C se nota como a los 75 dds, el incremento en el porcentaje de absorción de azufre llega a 27%, el máximo de la curva de absorción total. El 40% del azufre queda en la cosecha y un 60% en las partes vegetativas.

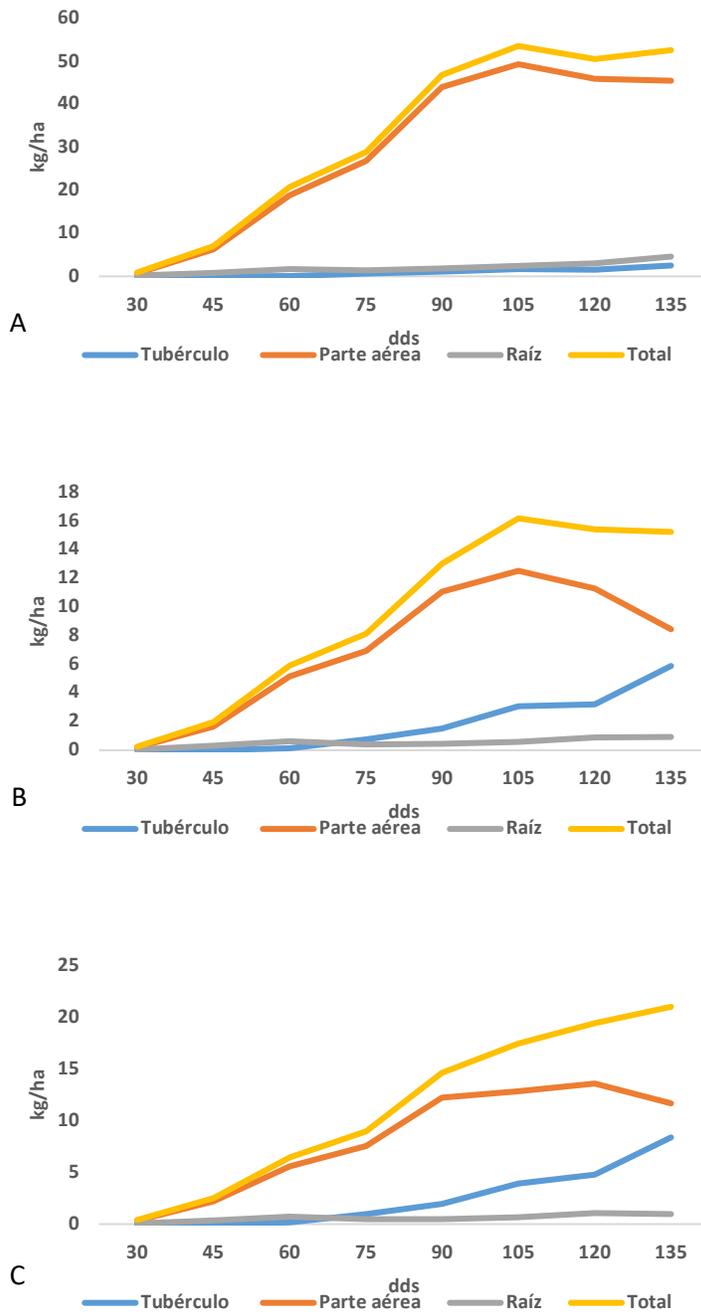


Figura 7. Curvas de absorción para (A) calcio, (B) magnesio y (C) azufre, en la var. Elbe-UCR, total y por órgano.

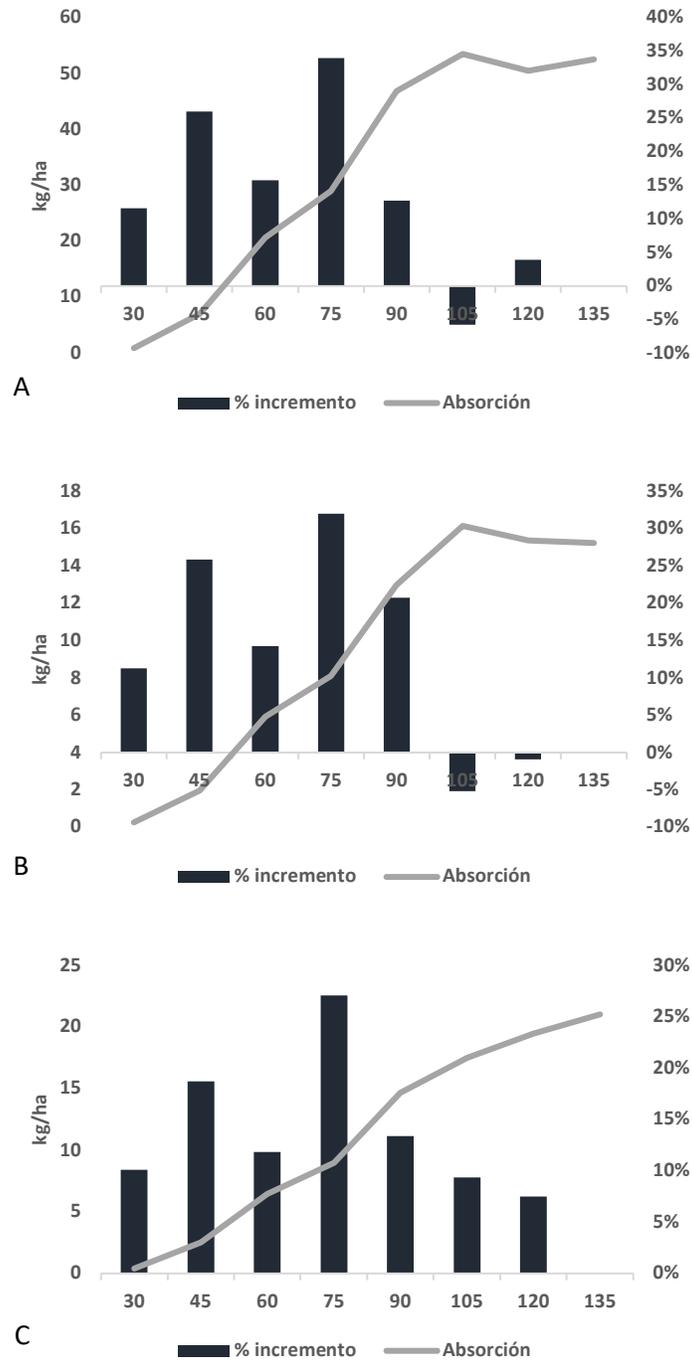


Figura 8. Incremento porcentual en la absorción de (A) calcio, (B) magnesio y (C) azufre, para Elbe-UCR, con base en la absorción total de cada elemento.

Los micronutrientes se comportaron de distinta manera en la planta, con momentos de mayor absorción en distintas etapas del ciclo, según como las plantas lo requirieran. Las concentraciones de hierro y zinc tendieron a disminuir con el avance del ciclo, manganeso, cobre y boro aumentaron en las últimas etapas de desarrollo.

La absorción de hierro en la var. Elbe-UCR (Figura 9A) presentó dos picos de máxima absorción, a los 60 y los 105 dds. En total, la planta absorbió $2,5 \text{ kg ha}^{-1}$ de hierro. La parte aérea llegó a absorber $5,9 \text{ kg ha}^{-1}$, a los 105 dds y disminuyó a $1,8 \text{ kg ha}^{-1}$ hacia los 135 dds. El sistema radical absorbió un máximo de $0,53 \text{ kg ha}^{-1}$, en los 60 dds, después de lo cual se mantuvo en valores entre $0,1-0,3 \text{ kg ha}^{-1}$. La absorción por parte de los tubérculos alcanzó los $0,31 \text{ kg ha}^{-1}$, con una curva ascendente hasta el final de ciclo. En la Figura 10A se observa como los porcentajes de incremento en el ciclo, sobre la curva total de absorción de hierro, no presentó tendencia a ascender, sino que de un máximo valor de 184% siguió a un descenso de 132% en la absorción de hierro. El 12% del hierro queda en la cosecha, mientras que el restante 88% en las partes vegetativas, especialmente en raíces, con un 71% del total en las partes vegetativas.

La absorción de cobre de la var. Elbe-UCR presentó dos picos de absorción, a los 60 y los 105 dds, con un valor total de $0,12 \text{ kg ha}^{-1}$ (Figura 9D). La parte aérea presentó solo un pico de absorción, a los 105 dds, de $0,051 \text{ kg ha}^{-1}$, y terminando a los 135 dds con $0,078 \text{ kg ha}^{-1}$. El sistema radical tuvo solo un pico de absorción, pero a los 60 dds de $0,0062 \text{ kg ha}^{-1}$ y llegando a $0,007 \text{ kg ha}^{-1}$ a los 135 dds. En los tubérculos se observa un pico de absorción, a los 60 dds de $0,034 \text{ kg ha}^{-1}$ y luego de los 75 dds inicia un ascenso en la curva, hasta llegar a $0,04 \text{ kg ha}^{-1}$ a los 135 dds. El 32% del cobre queda en la cosecha, y el restante 68% en la parte vegetativa. En la Figura 10D se observa como el mayor porcentaje de incremento en absorción se dio a los 120 dds, con un 47%.

La curva de absorción de zinc presentó una tendencia distinta a los demás microelementos, al ser totalmente ascendente sin picos de absorción y alcanzando un máximo de $0,35 \text{ kg ha}^{-1}$ (Figura 9B). Al distribuir su absorción según los órganos de la planta, la parte aérea alcanzó un valor de $0,24 \text{ kg ha}^{-1}$, a los 135 dds, mientras que el sistema radical alcanzó un máximo de $0,032 \text{ kg ha}^{-1}$ y en los tubérculos la absorción llegó a $0,19 \text{ kg ha}^{-1}$. En la Figura 10B se observa como para el zinc se presentaron tres puntos donde el incremento en absorción fue elevado, a los 75, 90 y 120 dds. El 24% del zinc que absorbió Elbe-UCR quedó en los tubérculos y el restante 76% en el follaje y raíces.

En la Figura 9C se muestra la curva de absorción del manganeso para la var. Elbe-UCR, donde se observa un incremento constante en absorción, que llega a $0,35 \text{ kg ha}^{-1}$ a los 105 dds, e inicia un descenso pronunciado que finaliza en $0,16 \text{ kg ha}^{-1}$ a los 135 dds. La parte aérea de la planta alcanzó una absorción de $0,14 \text{ kg ha}^{-1}$ a los 135 dds, pero con un pico a los 105 dds de $0,31 \text{ kg ha}^{-1}$. El sistema radical llegó a un valor de $0,015 \text{ kg ha}^{-1}$ con un pico a los 60 dds. En los tubérculos no se detectó este elemento. En la Figura 10C se observa como el porcentaje de mayor incremento en absorción se dio a los 75 dds, con un 84%. El 100% del manganeso quedó en follaje y raíces.

La absorción de boro presentó incrementos constantes desde los 30 dds hasta incluso los 135 dds llegando en total a los $2,18 \text{ kg ha}^{-1}$ (Figura 9E). La parte aérea alcanzó una absorción

máxima de 1,82 kg ha⁻¹ a los 105 dds y descendiendo levemente hasta 1,76 kg ha⁻¹ a los 135 dds. El sistema radicular absorbió 0,0065 kg ha⁻¹ de manera constante durante el ciclo. Los tubérculos alcanzaron un máximo de 0,036 kg ha⁻¹ a los 135 dds, iniciando con incrementos más constantes luego de los 90 dds. El porcentaje de mayor incremento en la absorción de boro se dio a los 90 dds, con un 53% (Figura 10E). El 16% del boro forma parte de los tubérculos y el restante 84% queda en follaje y raíces.

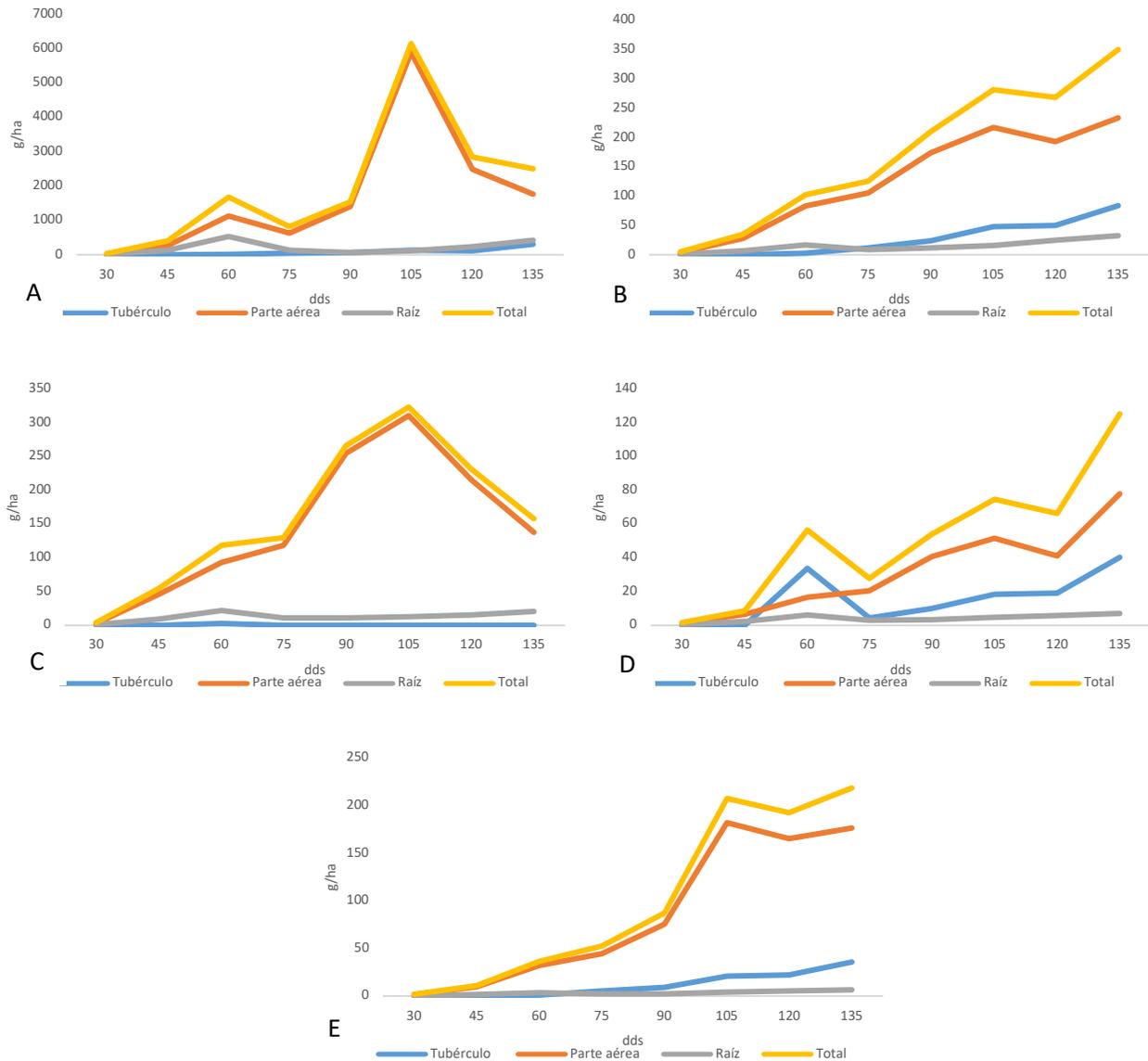


Figura 9. Curvas de absorción de (A) hierro, (B) zinc, (C) manganeso, (D) cobre y (E) boro, para la var. Elbe-UCR, total y por órgano.

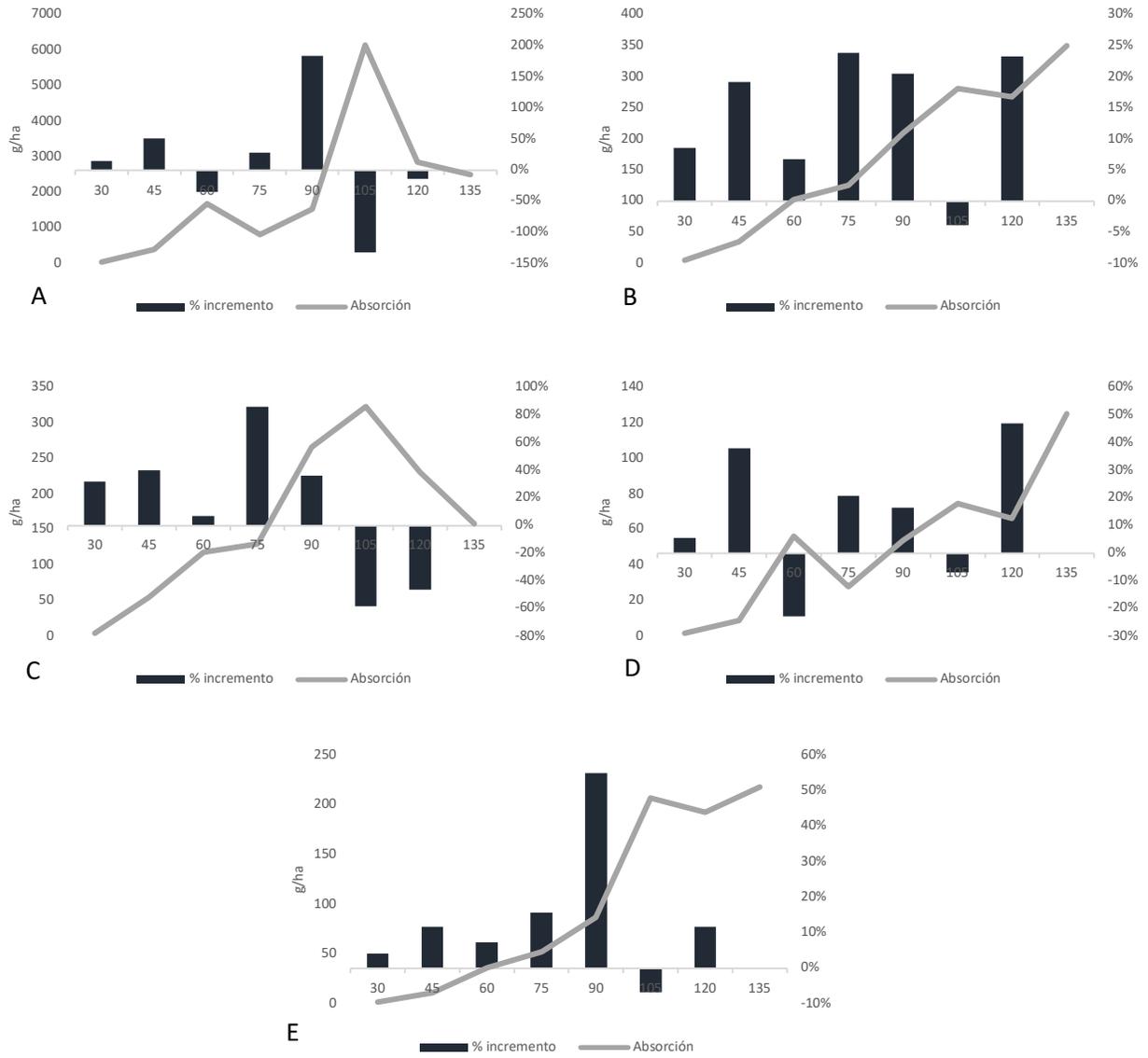


Figura 10. Incremento porcentual en la absorción de (A) hierro, (B) zinc, (C) manganeso, (D) cobre y (E) boro, para Elbe-UCR, con base en la absorción total de cada elemento.

Validación de la curva de absorción de nutrientes

En la Figura 11 se muestra que el aumentar o disminuir en un 25% la cantidad de fertilizante aplicado al cultivo no se genera un cambio significativo en el rendimiento, a pesar de observarse un ligero aumento en la cantidad de tubérculos por planta en el tratamiento 3, con 25% menos de fertilizante. Entre el T1, que corresponde a la curva de absorción, y el T3 (curva -25%) existió diferencia de 2,9 tubérculos más por planta en el T3. El T1 y el T4 (Tratamiento agricultor) resultaron iguales en cantidad de tubérculos por planta pero con mayor peso en el T4 respecto a T1. Entre T2 (curva + 25%) y T3 (curva -25%) la cantidad de tubérculos por planta fue de uno más en T3, pero el peso de los tubérculos fue ligeramente mayor en el T2.

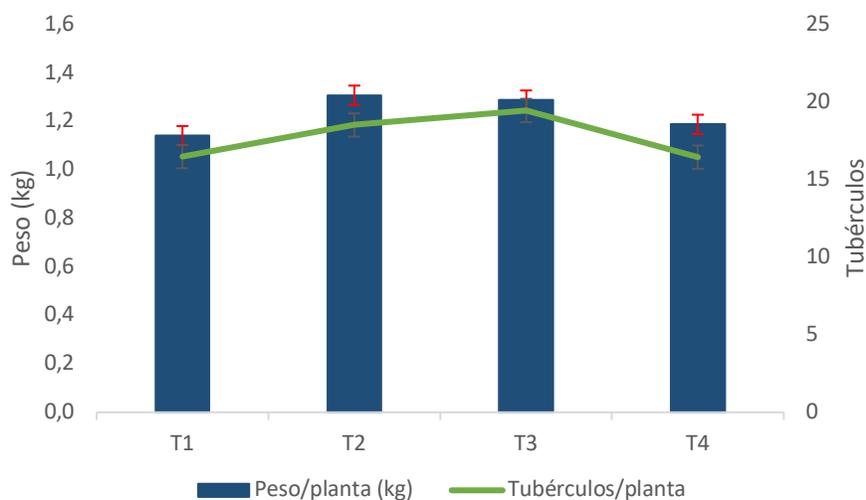


Figura 11. Número y peso de tubérculos por planta, y rendimiento potencial para la validación de las curvas de absorción de la var. Elbe-UCR, en Guarumos, Cartago.

Al extrapolar los valores de la validación a kilogramos y tubérculos por hectárea (Figura 12), los valores se hacen más significativos, pues el volumen crea mayores diferencias entre los tratamientos. El tratamiento T1 (curva) presentó el menor rendimiento con $39\ 900\ \text{kg ha}^{-1}$, mientras que el tratamiento T2 presentó el mayor rendimiento con $45\ 733\ \text{kg ha}^{-1}$ con una diferencia de $5833\ \text{kg}$. Respecto a la cantidad de tubérculos, la menor cantidad por hectárea la produjo el tratamiento T4, con $575\ 167$, mientras que el tratamiento T3 presentó la mayor cantidad de tubérculos con $680\ 167$, una diferencia de $105\ 000$ tubérculos.

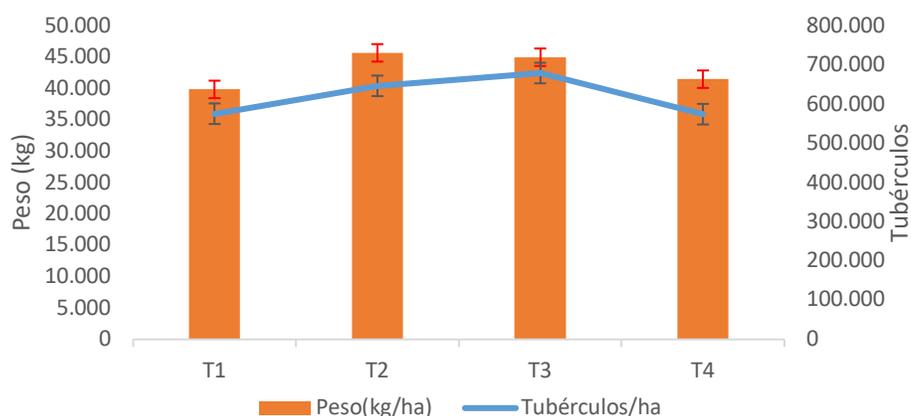


Figura 12. Número y peso de los tubérculos por planta, en kg ha^{-1} para la validación de las curvas de absorción de la var. Elbe-UCR, en Guarumos, Cartago.

Presupuestos parciales

En el Cuadro 3 se presentan los costos variables, extrapolados a kg ha^{-1} , generados por la fertilización granulada para cada tratamiento así como los valores de rendimiento e ingresos generados en cada tratamiento. La menor inversión económica y el mayor retorno por rendimiento lo presentó el tratamiento T3, que correspondió a la fertilización recomendada por la curva de absorción menos un 25% de fertilizante. Entre las fórmulas fertilizantes para siembra y aporca y los respectivos jornales para aplicarlos, se invirtió un total de $\text{C}\$1\,092\,469$ y el rendimiento aumento un 9,8% respecto al manejo de fertilización habitual del agricultor. Para el tratamiento de la curva de absorción más 25% de fertilizante se invirtieron $\text{C}\$1\,820\,748$, con un rendimiento extra de 8,5% sobre lo que se obtuvo con el tratamiento agricultor. En el tratamiento de la curva de absorción se invirtieron $\text{C}\$1\,456\,608$, con un rendimiento un 4,3% por debajo del tratamiento agricultor, el cual invirtió en fertilizante y mano de obra la suma de $\text{C}\$1\,431\,210$, que corresponde a un 1,8% menos que el tratamiento de la curva de absorción (T1), mientras que el tratamiento de curva de absorción produjo $\text{C}\$1\,075\,398$ menos de ingresos que el tratamiento testigo (agricultor). Se debe resaltar que el programa de fertilización que aplicó el agricultor a la variedad Elbe-UCR fue muy similar al obtenido a partir del análisis de la curva de absorción. El mejor tratamiento, por tener un mayor retorno económico, fue el de aplicar 25% menos fertilizante (curva-25%), con el que se obtuvo un incremento de $\text{C}\$2\,438\,741$ respecto al testigo. El tratamiento de la curva más 25% de fertilizante igual presentó una ganancia de $\text{C}\$2\,130\,462$, pero la inversión en fertilizante adicional lo colocó como el tratamiento de mayor costo de inversión.

Cuadro 3. Inversión y ganancia neta por hectárea para las dosis de fertilizante evaluadas en papa Elbe-UCR.

Tratamiento	Siembra	Aporca	Peso (kg)	Total	Jornales	Inversión total	Diferencia	Ingresos*	Ingresos +diferencia en inversión	Diferencia en ganancia respecto a T4
T1	€401.422	€1.004.336	39.900	€1.405.758	€50.850	€1.456.608	-€25.398	€23.940.000	€23.914.602	-€1.075.398
T2	€501.778	€1.255.420	45.850	€1.757.198	€63.550	€1.820.748	-€389.538	€27.510.000	€27.120.462	€2.130.462
T3	€301.067	€753.252	45.150	€1.054.319	€38.150	€1.092.469	€338.741	€27.090.000	€27.428.741	€2.438.741
T4	€418.148	€963.062	41.650	€1.381.210	€50.000	€1.431.210		€24.990.000	€24.990.000	

*El precio de venta promedio en el momento de cosecha fue de €600/kg

En el Cuadro 4 se presentan los costos variables para el análisis de dominancia, que corresponden a los valores del fertilizante empleado para la siembra y aporca, así como los jornales utilizados para su aplicación, en un área de 27 m² por tratamiento. El valor más bajo de costos variables se presentó en el tratamiento T3, que corresponde a la dosis determinada con las curvas menos 25% de fertilizante, seguido del T4, correspondiente al testigo comercial.

Cuadro 4. Costos variables para los tratamientos de dosis de fertilizante en papa Elbe-UCR, para análisis de dominancia, en un área de 27 m² definida para cada repetición de los tratamientos.

Tratamiento	Costo fertilizante siembra	Costo fertilizante aporca	Jornales aplicaciones	Cantidad utilizada siembra (kg)	Cantidad utilizada aporca (kg)	Costo unitario fertilizante siembra	Costo unitario fertilizante aporca	Costos variables de ensayo
T1	€20.322	€33.432	€137	2,4	7,3	€452	€371	€3.933
T2	€20.322	€33.432	€172	3	9,1	€452	€371	€4.916
T3	€20.322	€33.432	€103	1,8	5,5	€452	€371	€2.949
T4	€20.322	€33.432	€135	2,5	7	€452	€371	€3.864

En el Cuadro 5 se observa como el único tratamiento dominado, con el cual el productor obtuvo menores beneficios netos, fue el tratamiento T1, correspondiente a la dosis recomendada por la curva de absorción. Con los otros tres tratamientos existió beneficio neto. La TRM más alta se obtuvo con el T2, o tratamiento de la curva de absorción más 25% de fertilizante. Contrario a lo obtenido en el tratamiento de la curva menos un 25%, que fue el que generó la mayor ganancia (Cuadro 6). Se aplicó además un análisis de varianza, que indicó una significancia menor a 0,05, por lo que si existió diferencia entre tratamientos producto de los cambios en las dosis de fertilizante.

Cuadro 5. Análisis de dominancia aplicado para cada tratamiento en la validación de las curvas de absorción de la var. Elbe-UCR.

Tratamiento	Costos que varían (CV)	Beneficio neto (BN)	Observación del cambio de tratamientos	Conclusión de la observación
T3	2949,40	37948,9		No dominado
T4	3864,27	45856,0	De T3 a T4	No dominado
T1	3932,84	44834,4	De T4 a T1	Dominado
T2	4916,02	64236,0	De T1 a T2	No dominado

Cuadro 6. Tasa de retorno marginal (TRM) según el análisis de dominancia para los tratamientos no dominados.

Tratamiento	Análisis de dominancia				TRM (%)
	CV	BN	Δ BN	Δ CV	$(\Delta$ BN/ Δ CV)*100
T3	2949,4	37948,9			
T4	3864,3	45856,0	7907,1	914,87	864
T2	4916,0	64236,0	18380,0	1051,75	1748

DISCUSIÓN

Curva de absorción de nutrientes

La var. Elbe-UCR presenta un gran potencial de rendimiento, ya que posee un sistema radical y vigor de planta que la hacen una gran extractora de nutrientes, lo cual se ve reflejado en la curva de crecimiento (Figura 4). Además, su capacidad de acumulación de nutrientes implica que se debe ser cuidadoso con el balance nutricional que se le debe aportar, a fin de evitar desbalances entre la parte aérea y los tubérculos.

La fase de llenado de los tubérculos presentó la mayor acumulación de materia seca a partir de los 60 días después de la siembra, lo cual también ha sido reportado en evaluaciones de otros materiales (Badillo-Tovar *et al.* 2004, Oliveira *et al.* 2016, De Almeida *et al.* 2018), para los cuales en la etapa de llenado de tubérculo se presentan los mayores incrementos en acumulación de materia seca (Figura 4B). Sin embargo, para el caso de la var. Elbe-UCR se observó que es a partir de los 100 dds cuando se presenta la mayor concentración de nutrientes en los tubérculos, alcanzando el 70% del total de materia seca, mientras que la parte aérea solamente alcanzó un 27,8% del total de materia seca (Figura 4). En Colombia Santos (2010) determinó que en los tubérculos se presenta la mayor acumulación de materia seca a partir de la mitad del ciclo de cultivo, entre los 45 y 55 días después de siembra (dds) para *Solanum phureja*. Observó que la mayor acumulación de materia seca se presentó en tubérculos cultivados en localidades de mayor altitud, con un máximo de 279 g pl⁻¹ para la variedad criolla Guaneña. Da Silva *et al.* (2020) observaron el mismo patrón de incremento en acumulación de materia seca a partir de los 55 dds en 5 variedades de papa en Brasil. Para Woli y Hoogenboom (2018) la fase de llenado de tubérculo es la más sensible a altas temperaturas, que puede reducir el rendimiento, por lo que se debe tomar en cuenta este factor al momento de elegir la época de siembra. Sierra *et al.* (2013) determinaron que el mayor incremento en la materia seca de la parte aérea se da a los 45 dds en la variedad Karú y que posteriormente los tubérculos se vuelven el mayor sumidero de materia seca, además de que las hojas y tallos no incrementan biomasa.

Badillo-Tovar *et al.* (2004) mencionan que la biomasa radical permanece constante una vez finalizada la etapa de crecimiento vegetativo, representando apenas de un 1,1% de la materia seca total. Para el caso de Elbe-UCR, la masa radical representó el 3% del total de materia seca, lo cual es característico y distintivo del material, una mayor masa radicular (Figura 4), lo cual puede representar ventajas bajo condiciones de cultivo hostiles, con respecto al contenido de humedad en el suelo.

Absorción de nutrientes

Los elementos mayormente absorbidos por en el cultivo de papa son el N, P, K, Ca y Mg. El 50% del total de su absorción ocurre entre la emergencia y el inicio de la floración. Neshev y Manolov (2015) realizaron un estudio en Bulgaria, donde indican que la mayor concentración de nutrientes para la variedad Picasso se localizó en la parte aérea, con un 74% de N, un 66% de P y un 83% de K, seguido de las raíces (17% N, 23% P y 11% K) y en los tubérculos (9% N, 11% P y 6% K). Añez y Espinoza (2004) reportaron que el 30% de la absorción total de nitrógeno en el cultivo de papa ocurre en la fase de crecimiento. Según Villamil (2005) y Westermann (2005) la disponibilidad de nutrientes en el momento adecuado determinará el rendimiento final, pues de esta disponibilidad dependerá la formación de estolones y de ahí en adelante el llenado de tubérculos y el rendimiento. El orden de absorción de estos elementos, de mayor a menor, para la var. Elbe-UCR fue K, N, Ca, S, Mg y P (Figuras 5 y 7).

La investigación mostró que Elbe-UCR es una variedad que no requiere grandes cantidades de nitrógeno para su desarrollo, pues si se aplican las cantidades de fertilizante que se utilizan en otras variedades como Floresta, Única o Granola, provocan en esta variedad una extensión del ciclo vegetativo, un crecimiento excesivo de follaje y se reduce el rendimiento. Adhikari (2009) en Nepal, encontró respuesta positiva a aplicaciones de 150 kg ha⁻¹ de nitrógeno, con la variedad Kufri Sinduri, mientras que con la variedad Desirée, los rendimientos comenzaron a declinar cuando se aplicaron hasta 100 kg ha⁻¹ de nitrógeno. Singh *et al.* (2016) determinaron que aplicaciones de nitrógeno y azufre a razón de 180 kg ha⁻¹ y 50 kg ha⁻¹ respectivamente, generaron una mayor cantidad de tallos y un mejor índice de área foliar, lo que lleva a un mayor número de tubérculos por planta, con contenido de materia seca aceptable para mercado fresco. Añez y Espinoza (2004) determinaron un rango amplio, entre los 67 y 134 kg ha⁻¹ de nitrógeno, para una formación temprana de tubérculos. La curva de absorción indicó que Elbe-UCR llega a absorber como máximo 172 kg ha⁻¹ de nitrógeno (Figura 5A), 55% menos que la cantidad de nitrógeno absorbida por la var. Floresta, que absorbe 381 kg ha⁻¹ de N y 25% menos de lo que absorbe la var. Granola, con 228 kg ha⁻¹ (Bertsch 2003). Esta cantidad de nitrógeno absorbida por Elbe-UCR fue suficiente para favorecer el vigor del área foliar, así como un rendimiento por encima de la media de 25 toneladas por hectárea que se reporta para Costa Rica (Avilés y Piedra 2017).

Ruza *et al.* (2013) recomiendan distintas cantidades de fertilizante según variedad y destino del tubérculo. Mencionan que altos niveles de nitrógeno en papa para mercado de consumo fresco llevan a oscurecimiento de la piel y menor sabor. Giletto *et al.* (2013) y Ruza *et al.* (2013) también señalan que al exceso de absorción de nitrógeno se le asocian también aspectos en la calidad de los tubérculos, ya que a mayores cantidades de este elemento se reduce su concentración de almidón, lo cual puede causar problemas de corazón hueco, oscurecimientos internos y retrasos en la maduración (Horneck y Rosen 2008). Dosis elevadas de nitrógeno promueven también una mayor tendencia al verdeo de tubérculos (Tanios *et al.* 2020), mayor número de tallos, mayor duración de la fase vegetativa y menor contenido de materia seca, así como prolongación de los días a floración y por ende el tiempo a madurez fisiológica (Giletto *et al.* 2003, Trawczyński 2019). Para Workineh *et al.*(2017)

en Etiopía, la dosis idónea de nitrógeno, para las variedades Gudane y Belete fue de 69 kg ha⁻¹, pues se obtiene el mayor rendimiento de tubérculos comerciales.

Con respecto al fósforo, como ya se mencionó anteriormente, es un elemento cuya disponibilidad es crucial en las etapas iniciales del cultivo, ya que promueve el crecimiento de raíces y la rápida formación de tubérculos (Oyarzún *et al.* 2002, Barona *et al.* 2015). Su deficiencia retarda el crecimiento apical y se reduce la formación de almidones en los tubérculos. Vhuthu (2017) menciona que la fertilización fosfatada en papa incide sobre el rendimiento pero no sobre la calidad de los tubérculos. La absorción de fósforo en la var. Elbe-UCR alcanzó un total de 20,5 kg ha⁻¹ (Figura 5B), y de estos, un 70% fue absorbido por los tubérculos (14,35 kg ha⁻¹), para un rendimiento de 40 ton ha⁻¹. Este resultado varía respecto al determinado por Gómez *et al.* (2017) en Colombia, donde el fósforo se acumuló en el tubérculo entre 30 y 40 kg ha⁻¹ para las variedades Supreme y Capiro respectivamente, lo que indica absorciones mayores para este elemento en estas variedades respecto a Elbe-UCR. Sierra *et al.* (2013) también determinaron una extracción total de fósforo de 32 kg ha⁻¹ para un rendimiento de 60 ton ha⁻¹, para la variedad Karú. Aguilar *et al.* (2004) determinaron para la var. Monserrat, mediante el sistema de riego por goteo, dosis de P₂O₅ de 80 kg ha⁻¹, para un rendimiento de 40 ton ha⁻¹, con acumulación de materia seca de 897 g p⁻¹ a los 72 días después de emergencia. Shiferaw *et al.* (2019) observaron incrementos en tamaño y peso de tubérculos en papa con dosis de fósforo y potasio de 60 y 110 kg ha⁻¹ respectivamente, para la var. Jalanne en Etiopía.

Horneck y Rosen (2008) indican que la mayor absorción de fósforo ocurre entre los 40 y los 60 días después de siembra. Sin embargo, aunque la planta de papa absorbe fósforo en cantidades relativamente similares durante la mayor parte del ciclo de cultivo, en Elbe-UCR se presentaron dos picos de absorción, a los 45 y 75 días después de siembra (Figura 5). Con el uso de ³²P, Covarrubias *et al.* (2005) determinaron que los momentos de mayor absorción comprenden las etapas de inicio de tuberización y el inicio de desarrollo del tubérculo, lo que coincide con el periodo crítico del cultivo de papa. Fernandes *et al.* (2017) y Nyiraneza *et al.* (2017) indican que independientemente de la cantidad de fósforo aplicado al cultivo de papa, siempre va a existir una respuesta positiva, aunque la planta va a absorber solo las cantidades que requiere del elemento. Por otro lado, no se recomienda aplicar altos niveles de fósforo, ya que pueden también inducir deficiencias de otros elementos como calcio (Barona *et al.* 2015).

En lo que respecta al potasio, este elemento tiene efecto sobre el contenido de materia seca en los tubérculos, ya que a mayor contenido de potasio, mayor porcentaje de materia seca (Horneck y Rosen 2008, Yakimenko y Naumova 2018). Los porcentajes de materia seca determinados para Elbe-UCR la definen como una variedad con características adecuadas para la industria de hojuelas y bastones de papa ya que presenta valores superiores a 20% de sólidos totales (Anexo 1) en tubérculos cosechados a más de 2500 msnm (Cacace *et al.* 1994). Niveles adecuados de potasio tienen efectos, además, sobre la calidad interna del tubérculo y disminuyen el riesgo de decoloraciones u oscurecimientos de la piel y además mantienen la turgencia de las células en los tubérculos (Trehan *et al.* 2009, Naumann *et al.* 2019).

Cada variedad de papa presenta requerimientos distintos de potasio, según el ciclo, altitud a la que se cultiva, tipo y fertilidad de suelo, época de siembra e incluso condiciones climáticas (Bishwoyog y Swarnima 2016). La var. Elbe-UCR absorbió de 331,6 kg ha⁻¹ de potasio (Figura 5C), lo cual está por encima de las absorciones registradas en otras variedades de papa en el país, como Granola y Floresta, que absorben 284 kg ha⁻¹ y 316 kg ha⁻¹ respectivamente (Bertsch 2003). Zhang *et al.* (2018) encontraron para la variedad Zhongshu 5, que la aplicación de 270 kg ha⁻¹ de potasio favoreció un mayor contenido de almidones. Gómez *et al.* (2017) encontraron absorciones de potasio similares para las variedades Supreme y Choconta, en tres localidades de Colombia, llegando a máximo 373 kg ha⁻¹ de potasio. Sin embargo, con la variedad Supreme las extracciones variaron según la localidad, llegando al máximo de 429 kg ha⁻¹ en Choconta, 335 kg ha⁻¹ en Subachoque y 232 kg ha⁻¹ en Facatativa, por variaciones en tipo de suelo. Zeru *et al.* (2016) indican que para las variedades Ajiba, Zafira y Picasso, se obtiene el mayor rendimiento, así como la mayor cantidad y peso de tubérculos por planta con una dosis de 300 kg ha⁻¹ de K₂O. Añez y Espinoza (2004) recomiendan aplicaciones de 150 kg ha⁻¹ de nitrógeno y 300 kg ha⁻¹ de potasio para la variedad Granola, fraccionadas entre siembra y aporca, con las mayores cantidades de nitrógeno y potasio en la aporca. Por lo tanto, adaptar los valores de la curva de absorción a la localidad y la época de siembra siempre es importante, pues, aunque sea la misma variedad, su comportamiento respecto a absorción de nutrientes puede diferir por factores de altitud, clima y suelo, en la mayoría de los casos.

Respecto al potasio, se determinó que de los 331,6 kg ha⁻¹ absorbidos por Elbe-UCR, solo el 41% del potasio aplicado fue a los tubérculos, mientras que el restante 59% se absorbió por parte del follaje y raíces. Esta acumulación de potasio en el follaje podría relacionarse a un consumo de lujo. Kang *et al.* (2014) comprobaron que en papa existe este fenómeno, pues al aplicar hasta el triple de dosis de potasio en tres diferentes variedades de papa, no encontraron un incremento significativo en el rendimiento, aunque la planta absorba el elemento. Además, en el ensayo de validación de las curvas de absorción, se comprobó que dosis 25% por encima de la recomendada por las curvas, no tienen influencia sobre el incremento en rendimiento (Figura 12).

En papa se reportan asociaciones entre elementos, tanto de sinergismo como de antagonismo. Grzebisz *et al.* (2017) reportan una estrecha relación entre potasio y nitrógeno, en la cual, la aplicación de potasio tiende a aumentar la eficiencia en la absorción de nitrógeno por parte de las plantas de papa, pero requiriendo un balance, para que un exceso de alguno de los dos elementos no genere el efecto contrario. Da Silva *et al.* (2020) mencionan que debe ajustarse adecuadamente la fertilización con nitrógeno y potasio, pues el rendimiento varía en forma positiva o negativa según las dosis aplicadas. Para el caso de Elbe-UCR, se tenía una noción sobre la tendencia a generar tubérculos pequeños por desbalances con el nitrógeno, por lo que se redujeron considerablemente las aplicaciones de fuentes nitrogenadas y se incrementaron las aplicaciones con fuentes altas en potasio, como el Kmag (0-0-22-18-22 (S)), generando un excelente rendimiento de tubérculos de tamaño comercial. Esto debido a que las dosis elevadas de nitrógeno prolongan la fase vegetativa y afectan las propiedades poscosecha de la papa (Giletto *et al.* 2013 y Ruza *et al.* 2013). Alonso (2002) menciona que el potasio y el nitrógeno juntos incrementan el rendimiento de tubérculos grandes. Koch *et*

al. (2020) determinaron antagonismos entre el magnesio y el potasio, e indican que niveles elevados de potasio inducen deficiencias de magnesio, debido entre otros aspectos a que los transportadores de potasio no movilizan magnesio, por lo que la planta asegura el movimiento de potasio al existir alta disponibilidad, pero no asegura el del magnesio. Es importante por lo tanto, tomar en cuenta estas posibles relaciones, para balancear adecuadamente un programa de fertilización y evitar deficiencias de algún elemento por aplicación excesiva de otro. En Elbe-UCR no se observaron síntomas de deficiencias de alguno de estos elementos, al menos en el follaje. Las plantas siempre mostraron un color verde oscuro y los tubérculos resultaron en su mayoría, de tamaño comercial para el mercado de Costa Rica, es decir, papas medianas, de peso superior a los 150 g por unidad.

El calcio es un elemento muy importante para el cultivo de papa, sin embargo, no siempre se le da la importancia que requiere. De acuerdo con los resultados observados para la var. Elbe-UCR en esta investigación, el calcio fue el tercer elemento más absorbido (Figura 7A), después del potasio y nitrógeno. El calcio es un elemento poco móvil en las plantas, por lo que órganos subterráneos como los tubérculos son susceptibles a deficiencias de calcio, tanto por la baja transpiración que poseen como por efecto de los suelos franco-arenosos donde se cultiva la mayor parte de la papa que se consume en el país, y los cuales normalmente presentan bajos niveles de calcio intercambiable (Palta 2010, Koch *et al.* 2020).

Para la var. Elbe-UCR se determinó que la concentración de calcio en los tubérculos llegó a un 5%, lo cual se aproxima a lo encontrado también por Subramanian *et al.* (2011), quienes determinaron que las concentraciones de calcio en los tubérculos no excedían el 3%. Por tanto, al ser un elemento cuya movilidad desde la parte aérea hacia las raíces y tubérculos es escasa o prácticamente nula (Da Silva *et al.* 2020) y dependiente de las variaciones climáticas para su absorción por parte de los tubérculos (Potarzycki y Grzebisz 2020). Se deben utilizar fórmulas de fertilizantes que incluyan calcio en su composición, para que sea absorbido directamente por las raíces y los estolones. Al respecto, Ozgen *et al.* (2006) evaluaron el efecto de aplicaciones solubles de calcio de 168 kg ha⁻¹ durante la fase de llenado de los tubérculos, resultando en una mejor absorción y por ende en una mayor concentración de calcio en los tubérculos, respecto a un testigo sin aplicación del elemento. Seifu y Deneke (2017) encontraron una respuesta de hasta 77% de incremento en rendimiento de tubérculos comerciales bajo condiciones de invernadero, al realizar aplicaciones foliares de nitrato de calcio, a una dosis de 15 g por maceta, para las variedades Shenkola y Gera.

Por otro lado, Habib y Donnelly (2002) realizaron un estudio donde se determinó que además del sistema radical basal, la absorción de calcio puede darse por pequeñas raíces secundarias en los tubérculos y en los estolones, lo que contribuye a mejorar la absorción de este elemento. Murayama *et al.* (2016) determinaron que dosis de 147 kg ha⁻¹ de calcio incrementan la calidad de los tubérculos para la elaboración de bastones de papa y también que una mayor consistencia a la cocción es atribuible a una mayor concentración de calcio en la pared celular de los tubérculos. Sierra *et al.* (2013) indican una absorción total de 75 kg ha⁻¹ de calcio para la variedad Karú, a los 73 días después de emergencia. En Elbe-UCR la absorción total llegó a 52,6 kg ha⁻¹, con picos de absorción a los 45 y 75 días después de siembra (Figura 8A). Sin embargo, lo importante para el caso del calcio, es buscar una fuente fertilizante que pueda incorporarse a los programas de fertilización en papa, ya que a este

elemento no se le da la importancia que se le da al nitrógeno, al fósforo y al potasio y para la var. Elbe-UCR es un elemento prioritario.

Se debe poner especial atención a relación nitrógeno/calcio, por lo que debe ajustarse muy bien el programa de fertilización para utilizar una fuente como nitrato de calcio para un programa de nutrición para la var. Elbe-UCR, porque a pesar de ser una buena fuente de calcio, aporta un 15% de nitrógeno, lo cual sería contraproducente para el rendimiento de la variedad, de no ajustarse correctamente y analizar el resto de fuentes de nitrógeno a utilizar. Como se mencionó anteriormente, Elbe-UCR no requiere niveles altos del nitrógeno, debido a que este elemento prolonga el ciclo del cultivo al favorecer el crecimiento excesivo del follaje. Además, la cantidad de nitrógeno requeridos por Elbe-UCR llegan apenas a 171 kg ha⁻¹, lo cual puede suplirse con las fórmulas de fertilizante granulado utilizadas en siembra y aporca, como por ejemplo el 12-27-8 y el 12-11-18 (Figura 7A).

El magnesio tiene un rol fundamental en la fotosíntesis, como elemento central de la clorofila y como cofactor de procesos enzimáticos (Salisbury y Ross 1994, Barona *et al.* 2015). Como se observa en la Figura 7B para la var. Elbe-UCR, la absorción de magnesio fue de 15,2 kg ha⁻¹, de los cuales un 6,7 kg ha⁻¹, que corresponden a un 39% del total de magnesio es absorbido por los tubérculos. La absorción de magnesio en la var. Floresta, es de 35 kg ha⁻¹, casi el doble de lo que absorbió Elbe-UCR (Bertsch 2003), y de estos el 23% es absorbido por los tubérculos. El magnesio también es importante en aspectos de calidad de los tubérculos, ya que influye sobre la formación de fotoasimilados y por ende incrementa el potencial de rendimiento, a través de una mayor gravedad específica y acumulación de almidones (Gerendás y Fühns 2013). La aplicación de 100 kg ha⁻¹ de magnesio junto con 100 kg ha⁻¹ de nitrógeno y 80 kg ha⁻¹ de potasio mejoraron el contenido de materia seca en las variedades Bila y Triada, según reportaron Pobereźny y Wszelaczyńska (2011). Los picos de mayor incremento en absorción de magnesio en Elbe-UCR fueron a los 45 y 75 días después de siembra, lo que coincide con las etapas de diferenciación y llenado de tubérculos. Ello indica que el magnesio es importante para el desarrollo del follaje y tiene funciones en el llenado de tubérculos y la calidad de estos.

También Bari *et al.* (2001) y Singh *et al.* (2016) mencionan que el azufre promueve una mejor partición de fotosintatos en los tallos y tubérculos de papa, contribuyendo a mejorar los rendimientos. Ali Muthanna *et al.* (2017) indican que dosis de azufre de 40 kg ha⁻¹ acompañadas con 2 kg ha⁻¹ de boro, se relacionaron con un mayor contenido de materia seca, almidones y sólidos totales, así como menor incidencia de enfermedades y estrés en etapas a nivel poscosecha. También, Klikocka *et al.* (2015) concluyeron que el contenido y la absorción de fósforo aumenta en los tubérculos al aplicar al menos 25 kg ha⁻¹ de azufre en forma elemental, mientras que la absorción de potasio aumenta al aplicar 50 kg ha⁻¹ de azufre, independientemente de la fuente. Islam *et al.* (2014) concluyeron que dosis de azufre entre 29 y 34 kg ha⁻¹ son ideales para obtener el mayor potencial de desarrollo en la planta y el mayor rendimiento, pero siempre asociado con una dosis balanceada de potasio, no menor a los 130 kg ha⁻¹. Moussa *et al.* (2018) describen una interacción positiva entre el nitrógeno y el azufre, donde características como la cantidad de tallos, altura de planta, rendimiento y calidad de tubérculos incrementan respecto a la no utilización de azufre y recomiendan a dosis máximas de 126 kg ha⁻¹ de azufre y 84 kg ha⁻¹ de nitrógeno. La var. Elbe-UCR absorbió

durante su ciclo 21,1 kg ha⁻¹ de azufre (Figura 7C), lo cual está ligeramente por debajo de lo reportado en la literatura. Sin embargo, se rescatan los sinergismos con el nitrógeno y potasio como positivos para las adecuada absorción y expresión de las funciones del azufre en una variedad como Elbe-UCR, donde el 40% del total de azufre fue extraído por los tubérculos, lo cual asegura su calidad.

La aplicación de los micronutrientes hierro, zinc, manganeso, boro y cobre se realizaron foliarmente, debido a que las fórmulas fertilizantes utilizadas en el cultivo de papa por lo general carecen de microelementos, y las aplicaciones foliares son eficientes para suplir los requerimientos de la papa. La concentración foliar de los micronutrientes tiende a ser errática y difícil de explicar, como lo expresa Alvarado *et al.* (2015) al evaluar esta variable en 203 especies arbóreas de Costa Rica. Sin embargo, hay estudios que contrastan en cuanto a la efectividad de las aplicaciones foliares de micronutrientes para suplir los requerimientos de la papa, como los realizados por Horvat *et al.* (2014), quienes encontraron que aplicaciones foliares de nutrientes no incrementan significativamente la intensidad de la fotosíntesis en la fase de tuberización. Sin embargo, para el caso de los micronutrientes, la aplicación foliar fue el principal método para suplir los elementos a las plantas. Singh *et al.* (2018b) reportaron incrementos en contenido de materia seca y almidón, con aplicaciones foliares de los micronutrientes boro y azufre a los 30 y 60 dds.

La absorción de los micronutrientes se dio de diferente manera en la var. Elbe-UCR (Figura 9), presentándose picos de absorción en distintas etapas del ciclo. El manganeso y el zinc en se comportaron de manera similar, con picos de absorción en momentos similares, a los 45 y 75 dds, y con niveles de absorción similares. Esto debido a sus funciones como activadores enzimáticos y participación en fotosíntesis (Singh y Singh 2019), durante la etapa de desarrollo vegetativo especialmente. Los aumentos en la absorción de cobre y boro se observaron hacia el final del ciclo, después de los 90 días de siembra, ello debido a que estos elementos se aplican en las fases finales del ciclo de la papa para generar estrés en la planta y así translocar los fotoasimilados presentes en el follaje hacia los tubérculos.

En el caso del hierro, los valores elevados en ciertos momentos del ciclo de cultivo (Figura 9A) se relacionan con las altas concentraciones del elemento en el suelo. (Subramanian *et al.* 2011), pues el 71% del hierro absorbido por Elbe-UCR correspondió a absorción en el sistema radical.

Trehan (2005) menciona que, entre variedades de papa la absorción de elementos como el zinc y el potasio varían, según la relación que exista entre la parte aérea y las raíces, donde una baja relación desfavorece la absorción de zinc bajo condiciones de poca disponibilidad del elemento. En la Figura 9B se observa como la curva de absorción del zinc se comportó con una tendencia similar a la del nitrógeno, fósforo y potasio para la var. Elbe-UCR.

Ierna *et al.* (2017) realizaron aplicaciones foliares de los micronutrientes boro, hierro, manganeso, molibdeno, cobre y zinc en plantas de papa para posteriormente analizar las propiedades postcosecha de los tubérculos, respecto a las plantas control. Concluyeron que la aplicación de los 6 micronutrientes mejora los valores de acidez titulable, sólidos totales y sólidos solubles, así como la firmeza, lo cual le confiere mayor vida anaquel a los tubérculos. Al-Jobori y Al-Hadithy (2014) determinaron que aplicaciones de los microelementos zinc,

manganeso, hierro y cobre durante la etapa de floración, tienen un efecto positivo sobre el rendimiento final aumentando el peso y la cantidad de tubérculos. Mousavi *et al.* (2007) también determinaron que aplicaciones foliares de zinc y manganeso incrementan el rendimiento, el contenido de proteína y de almidón en los tubérculos. Singh *et al.* (2018a) determinaron que la aplicación foliar de 300 ppm de $ZnSO_4$ a los 50 dds, favoreció la altura de planta, y la cantidad y peso de los tubérculos respecto al control. Gómez *et al.* (2006) también encontraron que, aplicaciones al suelo de hasta 6 kg ha^{-1} de manganeso, incrementan hasta en un 17% el rendimiento de papa de primera calidad, en suelos de baja fertilidad, respecto al testigo comercial. En esta investigación solo se evaluaron los sólidos totales de Elbe-UCR, los cuales estuvieron por encima del 20%, ideal para su industrialización (Cacace *et al.* 1994). Aspectos de vida anaquel no se evaluaron. Sin embargo, es importante mencionar que las relaciones de los micronutrientes con los demás elementos aplicados en el cultivo de papa cumplen funciones importantes como mejorar la vida anaquel de los tubérculos, y deben aplicarse en los momentos y en las dosis adecuadas, según como lo indican las curvas de absorción.

Validación de la curva de absorción de nutrientes

Corroborar los resultados de las curvas de absorción de nutrientes es importante para determinar que los rendimientos obtenidos se ajusten a lo establecido con el programa de fertilización elaborado a partir de la misma. Al observar los resultados de la Figura 11, podemos corroborar que el aumentar o disminuir en un 25% la cantidad de fertilizante (fórmulas completas) aplicado al cultivo, no se genera un cambio en el rendimiento, a pesar de observarse un ligero aumento en la cantidad de tubérculos por planta con la aplicación de 25% más de fertilizante.

Al validar la curva se determinó que la variedad Elbe-UCR presentó mayor rendimiento con un 25% menos de fertilizante que el obtenido con base en los resultados de la curva de absorción (Figura 12). Esto puede indicar que existió un consumo excesivo de nutrientes como el nitrógeno, lo cual puede reducir la tuberización al promover el desarrollo vegetativo, además de reducir la materia seca de los tubérculos (Arce 2002, Zelalem *et al.* 2009, Ruza *et al.* 2013, Gathungu *et al.* 2015, Duguma y Chewaka 2019). En Elbe-UCR no se observó reducción en el número de tubérculos ni disminución en la cantidad de materia seca, pero la tendencia mostrada fue que, el elevar las dosis de fertilizante no contribuye a aumentar rendimiento, ya que las fórmulas de fertilizante granulado disponibles son altas en nitrógeno. Shunka *et al.* (2017) determinaron para las zonas altas de Etiopía, que la aplicación de dosis altas de nitrógeno (133 kg ha^{-1}) no incrementan necesariamente la absorción del elemento por parte de las plantas y que la eficiencia en la absorción de este elemento difiere entre variedades y localidades de siembra. Zelalem *et al.* (2009) obtuvieron resultados similares a Shunka *et al.* (2017) con dosis de 138 kg ha^{-1} de nitrógeno.

Ruza *et al.* (2013) indican que el manejo del nitrógeno está muy relacionado con las condiciones climáticas que prevalezcan y que los rendimientos van a variar, aunque se

apliquen cantidades similares en los diferentes años, pues la disponibilidad de nitrógeno varía dependiendo de las condiciones climáticas y la retención de humedad en los distintos tipos de suelo, que favorece o impide la absorción de nitratos (NO_3^-) (Woli y Hoogenboom 2018), e incluso las cantidades de NO_3^- presentes en el suelo y las aportadas por el balance de fertilizantes a utilizar (Nurmanov *et al.* 2019). Por tanto, siempre es importante revisar el contenido de nutrientes en el suelo y en el follaje, antes y durante el ciclo de cultivo, porque incluso en siembras consecutivas en una misma zona se pueden presentar diferencias en la absorción de nutrientes (Xu *et al.* 2019), tal y como se determinó para Elbe-UCR en el ensayo de las curvas de absorción y su posterior validación, en la misma zona de guarumos, en las dos épocas de siembra evaluadas.

Sharma *et al.* (2011) realizaron un estudio con dosis crecientes de azufre en 4 variedades de papa de la India. Encontraron un mayor tamaño y calidad de tubérculos con dosis crecientes de azufre hasta los 45 kg ha^{-1} , pero los rendimientos se redujeron a dosis de azufre de 60 kg ha^{-1} , por lo que se concluye que las aplicaciones de este elemento, al igual que la mayoría, tienen un límite. Hamdi *et al.* (2015) determinaron que la papa responde significativamente al adicionarse dosis crecientes de calcio (hasta 120 kg ha^{-1}) junto con el NPK, incrementando rendimiento y porcentaje de materia seca. Sin embargo, es importante tomar en cuenta los beneficios o perjuicios de aumentar o disminuir las dosis de fertilizante, pues conlleva una serie de consecuencias en rendimiento y calidad poscosecha que muchos productores no consideran.

Presupuestos parciales

El presupuesto parcial tiene como fin comparar una práctica o cambio tecnológico específico sobre los costos de producción y el rendimiento final, sin necesidad de analizar el total de costos del cultivo (Horton 1982, Reyes 2001). Como complemento a la elaboración de las curvas de absorción de nutrientes y su validación en la misma zona donde se realizó el estudio, fue importante la realización de un análisis parcial del cambio en los costos, especialmente por la aplicación de fertilizantes granulados de alto costo, es importante, puesto que se debe tener siempre en cuenta, que la mayor expresión de vigor y rendimiento no se relaciona necesariamente con un mayor beneficio económico. Ello debido a que la aplicación de fertilizante llegará a un punto donde no se incrementa más el rendimiento, y el margen de ganancia tenderá a decrecer por aplicación excesiva de fertilizante, es decir, incremento en costos de producción (Pavek 2014, Morales *et al.* 2015). El costo de la fertilización granulada por lo general representa un 20% de los costos de producción (Morales *et al.* 2013). Para el caso de los tratamientos presentados en el Cuadro 3, se observa que el mayor beneficio económico se dio con el tratamiento al que se le aplicó un 25% menos de fertilizante respecto a lo recomendado por la curva de absorción. Estos datos concuerdan con lo observado por Punina (2013) quien realizó un estudio con dosis crecientes de fórmulas completas para el cultivo de papa, variedad Fri papa, en Ecuador, y determinó que el tratamiento con mejor tasa marginal de retorno no fue al que se le aplicó la mayor cantidad de fertilizante, sino al que se le aplicó un 25% menos de la dosis máxima ensayada.

Sin embargo, hay también estudios que contrastan estos resultados, que fueron similares a lo encontrado para la var. Elbe-UCR. Blas (2019) por ejemplo, utilizó dosis crecientes de NPK, con la variedad de papa Yungay, hasta un máximo de 200 kg ha⁻¹ de nitrógeno, 200 kg ha⁻¹ de fósforo y 160 kg ha⁻¹ de potasio, donde los resultados indicaron incrementos de hasta 400% respecto al testigo comercial. Díaz (2018) también reportó para la variedad INIA 302 Amarilis, que dosis máximas de 250 kg ha⁻¹ de nitrógeno, 150 kg ha⁻¹ de fósforo y 300 kg ha⁻¹ de potasio mejoraron los rendimientos. Sin embargo, la respuesta a la fertilización puede variar entre variedades, dependiendo del clima, calidad de la semilla utilizada, época de siembra, condiciones del suelo y del paquete de manejo que aplique el productor.

CONCLUSIONES

- Los requerimientos nutricionales de Elbe-UCR son distintos a los de las variedades que los productores utilizan actualmente en Costa Rica.
- Elbe-UCR es una variedad con gran capacidad de extracción de calcio y potasio, pero no requiere los niveles altos de nitrógeno que se aplican regularmente los productores en nuestro país.
- Las fuentes de fertilizante granulado que se comercializan actualmente no se adaptan completamente a los requerimientos de Elbe-UCR, pues se requiere mayor cantidad de calcio y menor cantidad de nitrógeno, y es difícil conseguir esas proporciones en el mercado, por lo que se debe buscar la forma de aplicar la fuente de calcio en mezcla con el fertilizante a base de NPK, aunque sea en mezcla física o de forma separada.
- Aplicaciones excesivas de nitrógeno conllevan un incremento del ciclo vegetativo de la var. Elbe-UCR, lo que paralelamente va en detrimento del rendimiento, por disminución en los tamaños de los tubérculos.
- Los resultados obtenidos en la validación de las curvas de absorción y el análisis de presupuesto parcial para la var. Elbe-UCR, mostraron cambios en la estructura de costos de producción con los cambios en las dosis de fertilizante, sin embargo, la tendencia de reducción de costos con la utilización de menos fertilizante no fue clara, pero sí la de que el aumento de dosis de fertilizante no siempre conlleva a mejores rendimientos.
- La var. Elbe-UCR presentó un gran potencial de rendimiento, características destacables en vigor, sanidad de follaje, así como propiedades industriales para la elaboración de bastones y chips, lo cual la hace promisoría para el mercado de Costa Rica.

RECOMENDACIONES

- Se debe realizar una curva de absorción de nutrientes para la var. Elbe-UCR en zona media, entre los 1600 y 2500 msnm, para validar el comportamiento de la variedad a estas altitudes.
- Utilizar fuentes de calcio dentro del programa de fertilización con fertilizante granulado, como el Tigsamag (23 CaO - 14 MgO - 2 ZnO - 0,6 B₂O₃) o Calcimag (23 CaO - 14 MgO - 2 ZnO - 0,6 B₂O₃).
- Minimizar el uso de fuentes de fertilizantes nitrogenados, como el 19-4-19 o el nitrato de calcio; especialmente en la etapa de aporca.
- Para la primera fertilización se recomienda utilizar fórmulas como el 12-27-8-2,5-4,3 (S) o 12-24-12-2-1(S)-0,04(B)-0,02(Zn).
- Para la segunda fertilización granulada se recomiendan fórmulas como Kmag (0-0-22-18-22(S) o 10-20-20).
- Las aplicaciones de fertilizantes foliares deben ser optimizadas, analizando la composición de cada producto a utilizar, de manera que se reduzca la utilización de nitrógeno, especialmente durante la etapa de tuberización.
- El Hidrocomplex, cuya fórmula es 12-11-18-3-8(S)-0,02(B)-0,2(Fe)-0,02(Mn)-0,02(Zn), puede utilizarse para siembra o aporca, por el contenido de micronutrientes que aporta. Sin embargo, debe tenerse cuidado de balancear la aplicación con alguna fuente alta el potasio, si se utiliza en la etapa de aporca.

LITERATURA CITADA

- ADHIKARI R. 2009. Effect of NPK on vegetative growth and yield of Desiree and Kufri Sindhuri potato. Nepal. Agric. Res. J. 9: 67-75.
- AGUILAR J., MARTINEZ J., VOLKE V., ETCHEVERS J., GRAJEDA O., SOLIS E. 2004. Rendimiento, materia seca y absorción de fósforo del cultivo de papa bajo fertirriego por goteo. Revista Chapingo Serie Horticultura 10(2): 111-117.
- AL-JOROB K., AL-HADITHY S. 2014. Response of potato (*Solanum tuberosum*) to foliar application of iron, manganese, copper and zinc. International Journal of Agriculture and Crop Science 7(7): 358-363.
- ALI MUTHANNA M., SINGH A., SINGH R., TIWARI A. 2017. Effect of boron and sulphur application on postharvest quality after storage and reconditioning of potato (*Solanum tuberosum* L.). Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci 6(10): 1028-1035.
- ALLOWAY B. 2008. Zinc in soils and crop nutrition. 2ed. Bruselas, BEL. International Zinc Association. 135 p.
- ALVARADO A., CAMACHO M., FERNÁNDEZ M., MEZGER J., MATA R., BERTSCH F., VAIDES E. 2015. (Memorias) Interpretación del análisis foliar de varias especies forestales latifoliadas del trópico americano. In (VIII, 2015, San José, Costa Rica). San José, Costa Rica, s.e. p. 68.
- AÑEZ B., ESPINOZA W. 2004. Producción de papa en respuesta a la fertilización química y orgánica. Agricultura Andina 9: 42-64.
- ARCE F. 2002. El cultivo de la patata. Grupo Mundi Prensa. 2^{da} edición. España. 53-64 pp.
- AVALOS J., VILLALOBOS A. 2018. Análisis económico: un estudio de caso de *Jatropha curcas* L. mediante la metodología de presupuestos parciales. Agron. Mesoam 29(1): 95-104.
- AVILÉS J., PIEDRA R. 2017. Manual del cultivo de papa en Costa Rica (*Solanum tuberosum* L.) INTA (Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria). San José, Costa Rica. 92 p.
- BADILLO-TOVAR V., CASTELLANOS RAMOS J., MUÑOZ RAMOS J., SÁNCHEZ GARCIA P., VILLALOBOS-REYES S., VARGAS-TAPIA P. 2004. Demanda nutricional del cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) cv. Alpha, en la región del bajo. Revista Chapingo Serie Hortícola 10(1): 67-74.
- BANIK P., WIEPENG Z., TAI H., BIZIMUNGU B., TANINO K. 2016. Effects of drought acclimation on drought stress resistance in potato (*Solanum tuberosum* L.) genotypes. Environmental and Experimental Botany 126: 76-89.

- BARCZAK B., NOWAK K. 2015. Effect of sulphur fertilization on the content of macroelements and their ionic ratios in potato tubers. *Journal of Elementology* 20(1): 37-47
- BARI M.S., RABBANI M.G., RAHMAN S.SQ., ISLAM M.J., HOQUE A.T.M.R.2001. Effect of zinc, boron, sulphur and magnesium on the growth and yield of potato. *Pakistan Journal of Biological Sciences* 4(9):1090-1093.
- BARONA D., MATEUS-RODRIGUEZ J., MONTESDEOCA F. 2015. La planta de papa: ecofisiología y nutrición mineral. *In* ANDRADE-PIEDRA J.L., KROMANN P., OTAZÚ V. (Eds.). Manual para la producción de semilla de papa usando aeroponía: diez años de experiencias en Colombia, Ecuador y Perú. Centro Internacional de la Papa (CIP), Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA). Quito, Ecuador. 109-130 p.
- BARRERA J., SUAREZ D., MELGAREJO L. 2010. Análisis de crecimiento en plantas. Laboratorio de fisiología y bioquímica vegetal. Departamento de biología. Universidad Nacional de Colombia. 25-37 p.
- BARRIENTOS H., DEL CASTILLO C., GARCIA M. 2015. Análisis de crecimiento funcional, acumulación de biomasa y translocación de materia seca de ocho hortalizas cultivadas en invernadero. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales, La Paz* 2(1): 76-86.
- BEALS K. 2019. Potatoes, nutrition and health. *American Journal of Potato Research* 96: 102-110.
- BELL R.W., DELL B. 2008. Micronutrients for sustainable food, feed, fibre and bioenergy production. International Fertilizer Industry Association. Paris, Francia. 29-51 pp.
- BERTSCH F. 1998. La fertilidad de los suelos y su manejo. ACCS. 1ª edición. San José, Costa Rica. 9-16 pp.
- BERTSCH F. 2003. Absorción de nutrimentos por los cultivos. ACCS. San José, Costa Rica. 184-189 pp.
- BISHWOYOG B., SWARNIMA K. 2016. Effect of potassium on quality and yield of potato tubers – a review. *International Journal of Agriculture and Environmental Science* 3(6): 7-12.
- BLAS M. 2019. Efecto de tres niveles de fertilización en el rendimiento del cultivo de papa (*Solanum tuberosum*), variedad Yungay, en el centro poblado de Huaripampa, distrito de San Marcos, Provincia de Huari, Ancash, 2017. Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo. Huaraz, Perú. 60 p.
- BOLAÑOS A. 2007. Introducción a la olericultura. 2 reimpr. EUNED. San José, Costa Rica. 116-137 pp.
- BRENES A., RIVERA C., VÁSQUEZ V. 2002. Principales enfermedades y plagas de la papa en Costa Rica. 1 ed. EUNED. San José, Costa Rica. 98 p.

- BROWN C., HENFLING J-W. 2014. A history of the potato. *In* The Potato: Botany, Production and Uses. NAVARRE R., PAVEK M. eds. CAB International. USDA. 1-11 pp.
- BRYLINSKA M., SOBKOWIAK S., STEFANCZYK E., SLIWKA J. 2016. Potato cultivation system affects population structure of *Phytophthora infestans*. *Fungal Ecology* 20: 132-143.
- BUCHER M., KOSSMANN J. 2007. Molecular physiology of the mineral nutrition of the potato. *In* Potato Biology and Biotechnology: Advances and Perspectives. VREUGDENHIL D eds. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands. 311-329 pp.
- CABALCETA G., SALDIAS S., ALVARADO A. 2005. Absorción de nutrientes en el cultivar de papa MNF-80. *Agronomía Costarricense* 29(3): 107-123.
- CACACE J., HUARTE M., MONTI M. 1994. Evaluation of potato cooking quality in Argentina. *American Potato Journal* 71: 145-153.
- CARASPE-LEÓN H., MURAOKA T., FRANZINI V., DE STEFANO S., PRADO N. 2009. Absorción de macronutrientes por plantas de papa (*Solanum tuberosum* L.) en la producción de tubérculo-semilla. *Interciencia* 34(1): 57-63.
- CIP (Centro Internacional de la Papa)., FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2006. All about potatoes: an ecological guide to potato integrated crop management. Bangkok, Thailand. 82 p.
- CIP (Centro Internacional de la Papa).2015. Cómo crecen las papas. (*en línea*). Consultado el 21/04/2019. Disponible en: <https://cipotato.org/es/lapapa/como-crecen-las-papas/>
- CNP (Consejo Nacional de la Producción). 2016. Análisis de mercados: papa. Boletín N°1 junio. Sistema de Información Agroalimentaria. 6 p.
- CNP (Consejo Nacional de la Producción). 2018. Análisis y monitoreo de mercados: Papa. Boletín N°1 abril. Servicio de información de mercados. 8 p.
- COVARRUBIAS RAMIREZ J., CASTILLO-AGUILAR S., VERA-NUÑEZ J., NUÑEZ-ESCOBAR R., SANCHEZ-GARCIA P., AVELDAÑO-SALAZAR R., PEÑA-CABRIALES J. Absorción y eficiencia de uso de fósforo en papa cultivar Alpha con ³²P. *Agrociencia* 39(2): 127-136.
- DA SILVA C., SOARES M., FERREIRA M., CAVALCANTE A., DE ANDRADE G., DE AQUINO L. 2020. Dry matter and macronutrient extraction curves of potato varieties in the Alto Paranaíba region, Brazil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 24(3): 176-186.
- DE ALMEIDA F., TORRES W., CABRERA J., ARZUAGA J. 2018. Crecimiento de plantas de papa (*Solanum tuberosum* L., cv Romano), en la provincia de Huambo, Angola, bajo dos densidades de plantación. *Cultivos Tropicales* 39(3): 31-40.

- DI BENEDETTO A., TOGNETTI J. 2016. Técnicas de análisis de crecimiento de plantas: su aplicación a cultivos intensivos. Argentina. RIA. Sin número de página.
- DIAZ O. 2018. Efecto de 12 niveles de fertilización N-P-K en el rendimiento del cultivo de papa, variedad INIA 302 Amarilis (*Solanum tuberosum* L.), en el sector San Juan, distrito de Cutervo 2017. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. Lambayeque, Perú. 88 p.
- DUGUMA H., CHEWAKA M. 2019. Role of nitrogen on potato production: a review. *Journal of Plant Sciences* 7(2): 36-42.
- EKELOF J. 2007. Potato yield and tuber set as affected by phosphorus fertilization. SLU. Master Project *In* The Horticultural Science Programme. 30 p.
- FALLAS R., BERTSCH F. 2014. Análisis del estado nutrimental del cultivo de la papa en Costa Rica con base en información existente. *Agronomía Costarricense* 38(1): 199-206.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 1984. Fertilizer and plant nutrition guide. Bulletin 9. Roma, Italia. 173 p.
- FERNANDES AM., SORATTO R., PILON C. 2015. Soil phosphorus increases dry matter and nutrient accumulation and allocation in potato cultivars. *American Journal of Potato Research* 92: 117-127.
- FERNANDES AM., SORATTO RP., SOUZA EFC, JOB ALG. 2017. Nutrient uptake and removal by potato cultivars as affected by phosphate fertilization of soils with different levels of phosphorus availability. *Rev Bras Cienc Solo* 41: e0160288.
- FIRMAN D.M., ALLEN E.J. 2007. Agronomic practices. *In* *Potato Biology and Biotechnology: Advances and Perspectives*. VREUGDENHIL D *eds*. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands. 719-738 pp.
- FLIS S. 2019. Calcium: Improved plant health and nutrition through 4R management. *Crop and Soils Magazine*. American Society of Agronomy. July-August. 3 p.
- FLORES H., SIFUENTES E., OJEDA W., GOMEZ H., MACIAS J., FLORES H. 2009. Obtención de curvas para estimar la extracción de macronutrientes en el cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L. var. Alpha) en el norte de Sinaloa, México. *Memorias XII Congreso Internacional en Ciencias Agrícolas*. ICA-UABC. 267-271 pp.
- GATHUNGU G.K., AGUYOH J.N., ISUTSA D.K. 2015. Optimization of seed potato specific density, starch and dry matter contents and tuberization capacity of resultant plants through integrated irrigation, nitrogen and phosphorus management. *Journal of plant sciences* 3(4): 225-233.
- GERENDÁS J., FÜHRS H. 2013. The significance of magnesium for crop quality. *Plant Soil* 368: 101-128.

- GILETTO CM., ECHEVERRIA HE., SADRAS V. 2003. Fertilización nitrogenada de cultivares de papa (*Solanum tuberosum*) en el sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo* 21(2): 44-51.
- GILETTO C., MONTI M., CEROLI P., ECHEVERRIA H. 2013. Efecto de la fertilización con nitrógeno sobre la calidad de tubérculos de papa (var. Innovator) en el sudeste Bonaerense. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha* 14(2):217-222.
- GÓMEZ M., LOPEZ M., CIFUENTES Y. 2006. El manganeso como factor positivo en la producción de papa (*Solanum tuberosum* L.) y arveja (*Pisum sativum* L.) en suelos del altiplano Cundiboyacense. *Agronomía Colombiana* 24(2): 340-347.
- GÓMEZ M., MAGNITSKIY S., RODRIGUEZ L., DARGHAN A. 2017. Accumulation of N, P and K in the tubers of potato (*Solanum tuberosum* L. ssp. *andigena*) under contrasting soils of the Andean region of Colombia. *Agronomía Colombiana* 35(1): 59-67.
- GONZÁLEZ M., JURADO E., GONZÁLEZ S., AGUIRRE O., JIMÉNEZ J., NAVAR J. 2003. Cambio climático mundial: origen y consecuencias. *Ciencia UANL* 6(3): 377-385.
- GRZEBISZ W., ČERMÁK P., RROCO E., SZCZEPANIAK W., POTARZYCKI J., FÜLEKY G. 2017. Potassium impact on nitrogen use efficiency in potato – a case study from the central – east Europe. *Plant Soil Environ* 63(9): 422-427.
- HABIB A., DONNELLY D. 2002. Calcium translocation and accumulation into potato tubers. *Potato Research* 45: 17-24.
- HACK H., GALL H., KLEMKE TH., KLOSE R., MEIER U., STAUSS R., WITZENBERGER A. 1993: Phänologische Entwicklungsstadien der Kartoffel (*Solanum tuberosum* L.). Codierung und Beschreibung nach der erweiterten BBCH-Skala mit Abbildungen. *Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutz* 45(1): 11-19.
- HAMDY W., HELALI L., BEJI R., ZHANI K. 2015. Effect of levels calcium nitrate addition on potatoes fertilizer. *International Research Journal of Engineering and Technology* 2(3): 2006-2013.
- HARPER J., CORNELISSE S., KIME L. 2014. Presupuestos para tomar decisiones agrícolas. *Alternativas agrícolas*. Penn State Extension. 5-6 pp
- HAVERKORT A.J., MACKERRON D.K.L. 2000. Management of nitrogen and water in potato production. Wageningen Pers. The Netherlands. 97 pp.
- HERNÁNDEZ H., FORERO F., OTÁROLA D., SERRANO P. 2012. Respuesta agroeconómica del cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) bajo diferentes fuentes de fósforo, en Villapinzón, Cundinamarca. *Ciencia y Agricultura* 9(2): 97-104.
- HORNECK D., ROSEN C. 2008. Measuring nutrient accumulation rates of potatoes-tools for better management. *Better Crops* 92(1):4-6 pp.

- HORTON D. 1982. Análisis de presupuesto parcial para investigación en papa a nivel de finca. Boletín de información técnica 16. CIP (Centro Internacional de la Papa). Lima, Perú. 15 p.
- HORVAT T., POLJAK M., LAZAREVIĆ B., SVEČNJAK Z., HANAČEK K. 2014. Effect of foliar fertilizers on physiological characteristics of potato. Romanian Agricultural Research 31: 159-165 p.
- HOSAKA K., SANETOMO R. 2020. Broadening genetic diversity of the Japanese potato gene pool. American Journal of Potato Research 97: 127-142.
- IERNA A., PELLEGRINO A., MALVUCCIO A. 2017. Effects of micronutrient fertilization on the overall quality of raw and minimally processed potatoes. Postharvest Biology and Technology 134: 38-44.
- INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos). 2015. VI Censo Nacional Agropecuario: Resultados Generales. INEC. 1 ed. San José, Costa Rica. 146 p.
- INIA (Instituto de Investigaciones Agropecuarias). 2017. Manual del cultivo de papa en Chile. Santiago, Chile. Boletín INIA N°10. 30-46 pp.
- INOSTROZA J. 2009. Manual de papa para la Araucanía: manejo y plantación. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Boletín INIA 193. Temuco, Chile. 59-75 pp.
- INTA (Instituto Nacional de Innovación y Transferencia Agropecuaria). 2014. Cultivares de papa (*Solanum tuberosum* L.) para la mejora de la producción de la agricultura familiar y la disponibilidad de alimentos. Validación de variedades de papa liberadas por el INTA en el año 2011 (Pasquí, Kamuk y Duran) y el testigo Floresta en fincas de la zona media de Cartago (Tierra Blanca). Informe de avance. PRIICA-IICA. 26 p.
- ISLAM M., ROY T., RAHMAN M., PULOK M., HUSSAIN M. 2014. Influence of potassium and sulfur on growth and yield of potato crop derived from TPS seeding tuber. Int. J. Sustain. Agril. Tech 10(8): 15-21.
- JACOBS M., VAN DER BERG R. 2008. Molecular studies on the origin of the cultivated potato: a review. Acta Hort 799: 105-109.
- KANG W., FAN M., MA Z., SHI X., ZHENG H. 2014. Luxury absorption of potassium by potato plants. Am. J. Potato Res 91: 573-578.
- KATOH A., ASHIDA H., KASAJIMA I., SHIGEOKA S., YOKOTA A. 2015. Potato yield enhancement through intensification of sink and source performances. Breeding Science 65: 77-84.
- KIRKBY E.A., RÖMHELD V. 2007. Micronutrients in plant physiology: functions, uptake and mobility. Proceedings 543. The International Fertilizer Society. United Kingdom.
- KLEINHENZ M., PALTA J, 2002. Root zone calcium modulates the response of potato plants to heat stress. Physiologia Plantarum 115: 111-118.

- KLIKOCA H., KOBIALKA A., JUSZCZAK D., GLOWACKA A. 2015. The influence of sulphur on phosphorus and potassium content in potato tubers (*Solanum tuberosum* L.). *Journal of Elementology* 20(3): 621-629.
- KLUGE-RUDISILE O. 2017. Determinación del periodo crítico en papa. Tesis Ing.Agr. Valdivia, Chile. Universidad Austral de Chile. 31 p
- KOCH M., NAUMANN M., PAWELZIK E., GRANSEE A., THIEL H. 2020. The importance of nutrient management for potato production part I: plant nutrition and yield. *Potato Research* 63: 97-119.
- KUMAR M., BAISHYA L.K., GHOSH D.C., GUPTA V.K. 2011. Yield and quality of Potato (*Solanum tuberosum*) tubers as influenced by nutrient sources under rainfed conditions of Meghalaya. *Indian Journal of Agronomy* 56(3):105-111.
- LIU C., RUBAEK G., LIU F., ANDERSEN M. 2015. Effect of partial root zone drying and deficit irrigation on nitrogen and phosphorus uptake in potato. *Agricultural Water Management* 159: 66-76.
- MAATHUIS F. 2009. Physiological functions of mineral macronutrients. *Current Opinion in Plant Biology* 12: 250-258.
- MACHIDA-HIRANO R. 2015. Diversity of Potato genetic resources. *Breeding Science* 65:26-40.
- MALTAS A., DUPUIS B., SINAJ S. 2018. Yield and quality response of two potato cultivars to nitrogen fertilization. *Potato Research* 61: 97-114.
- MANSILLA M., ARRIBILLAGA D. 2013. Antecedentes técnicos para el cultivo de la papa (*Solanum tuberosum* L.) en la región de Aysen. Coyhaique, Chile. Boletín INIA N° 272. 88 p.
- MARTÍN R., JEREZ E. 2017. Efecto de las temperaturas en el rendimiento de la papa (*Solanum tuberosum* L.) variedad Romano. *Cultivos Tropicales* 38(1): 75-80.
- MAROUANI A., HARBEoui Y. 2016. Eficiencia del uso del nitrógeno en el cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.). *Acta Agronómica* 65(2): 164-169.
- MENDOZA-PÉREZ C., SIFUENTES-IBARRA E., RAMÍREZ-AYALA C. 2015. Curvas de demanda nutrimental del cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) de la variedad Fianna. *Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica*. Año 3, N° 16. 8 p.
- MENGEL K., KIRKBY E.A. 2000. Principios de nutrición vegetal. 4 ed. Instituto Internacional de la Potasa. Basilea, Suiza. 535 p.
- MOLINA E. 2002. Fertilización foliar en los cultivos frutícolas. *In Fertilización foliar: principios y aplicaciones*. CIA-UCR y ACCS. San José, Costa Rica. 82-100 pp.

- MORALES J., HERNÁNDEZ J., REBOLLAR S. 2013. Rendimiento de papa con fuentes de fertilización mineral en un andisol del estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 4(6): 881-893.
- MORALES J., REBOLLAR S., HERNÁNDEZ J., GONZÁLEZ F. 2015. Determinación del óptimo técnico y económico en el cultivo de papa de temporal. *Paradigma Económico* 7(1): 87-106.
- MOUSAVI S., GALAVI M., AHMADVAND G. 2007. Effect of zinc and manganese foliar application on yield, quality and enrichment on potato (*Solanum tuberosum* L.). *Asian Journal of Plant Sciences* 6(8): 1256-1260.
- MOUSSA S., HAFEZ L., ABO EL-FADL N. 2018. Effect of different levels of Sulphur and nitrogen fertilizers on potato productivity, acrylamide formation and aminoacids content in processed potatoes. *Middle East Journal of Agriculture* 7(4): 1626-1646.
- MUÑOZ M. 2014. Composición y aportes nutricionales de la papa. *Revista Agrícola*. Octubre. 36-37 p.
- MURAYAMA D., SKASHITA Y., YAMAZAWA T., NAKATA K., SHINBAYASHI Y., PALTA J., TANI M., YAMAUCHI H., KOAZE H. 2016. Effect of calcium fertilization on processing properties and storability of frozen french fries. *Food Science and Technology Research* 22(4): 451-459.
- NAUMANN M., KOCH M., THIEL H., GRANSEE A., PAWELZIK E. 2019. The importance of nutrient management for potato production part II: plant nutrition and tuber quality. (*en línea*). *Potato Research*. <https://doi.org/10.1007/s11540-019-09430-3>
- NAVARRÉ D., SHAKYA R., HELLMAN H. 2016. Vitamins, phytonutrients and Minerals in Potato *In: Advances in potato chemistry and technology*. p 117-166.
- NESHEV N., 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.
- NOOKARAJU A., PANDEY S., UPADHYAYA C., HEUNG J., KIM H.S., CHUN S.C., KIM D.H., PARK S.W. 2012. Role of Ca²⁺-mediated signaling in potato tuberization: an review. *Botanical Studies* 53: 177-189.
- NOULAS C., TZIOUVALEKAS M., KARYOTIS T. 2018. Zinc in soils, water and food crops. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology* 49: 252-260.
- NÚÑEZ P. 2016. Fuentes y dosis de fertilización potásica en el crecimiento, tuberización y calidad de fritura de la papa (*Solanum tuberosum* L.) variedad única. Grado de licenciatura en agronomía. Lima, Perú. Universidad Nacional Agraria La Molina. 110 p.

- NURMANOV Y., CHERNENOK V., KUZDANOVA R. 2019. Potato in response to nitrogen nutrition regime and nitrogen fertilization. *Field Crops Research* 231: 115-121.
- ÑUSTEZ-LOPEZ C., SANTOS-CASTELLANOS M., SEGURA-ABRIL M. 2009. Acumulación y distribución de materia seca de cuatro variedades de papa (*Solanum tuberosum* L.) en Zipaquirá, Cundinamarca (Colombia). *Revista Facultad Nacional de Agronomía-Medellín* 62(1): 4823-4834.
- NYIRANEZA J., BIZIMUNGU B., MESSIGA A.J., FULLER K.D., FILLMORE S.A.E., JIANG Y. 2017. Potato yield and phosphorus use efficiency of two new potato cultivars in New Brunswick, Canada. *Can. J. Plant Sci* 97: 784-795.
- OJEDA W., SIFUENTES E., ÍÑIGUEZ M., MONTERO M. 2011. Impacto del cambio climático en el desarrollo y requerimientos hídricos de los cultivos. *Agrociencia* 45(1): 1-11.
- OLIVEIRA J.S., BROWN H.E., GASH A., MOOT D.J. 2016. An explanation of yield in three potato cultivars. *Agronomy Journal* 108 (4): 1434-1446.
- ORDAZ J., RAMÍREZ D., MORA J., ACOSTA A., SERNA B. 2010. Costa Rica: efectos del cambio climático sobre la agricultura. CEPAL. México D.F. 76 p.
- OVCHINNIKOVA A., KRYLOVA E., GAVRILENKO T., SMEKALOVA T., ZHUK M., KNAPP S., SPOONER D. 2011. Taxonomy of cultivated potatoes (*Solanum* section *Petota*: Solanaceae). *Botanical Journal of the Linnean Society* 165: 107-155.
- OYARZUN P., CHAMORRO F., CORDOVA J., MERINO F., VALVERDE F., VELAZQUEZ J. 2002. Manejo agronómico. *In* El cultivo de la papa en Ecuador. INIAP.CIP. Quito, Ecuador. 51-83 pp.
- OZGEN S., PALTA J., KLEINHENZ M. 2003. Influence of supplemental calcium fertilization on potato tuber size and tuber number. *Proc. XXVI IHC, Potatoes- Healthy food for humanity. Acta Hort* 619: 329-336.
- OZGEN S., KARLSSON B., PALTA J. 2006. Response of potatoes (cv Russet Burbank) to supplemental calcium applications under field conditions: tuber calcium, yield, and incidence of internal brown spot. *Amer J of Potato Res* 83: 195-204.
- PALTA J. 1996. Role of calcium in plant responses to stresses: linking basic research to the solution of practical problems. *HortScience* 31(1): 51-57.
- PALTA J. 2010. Improving potato tuber quality and production by targeted calcium nutrition: the discovery of tuber roots leading to a new concept in potato nutrition. *Potato Research* 53: 267-275.
- PAVEK M. 2014. Commercial potato production and cultural management. *In* The Potato: botany, production and uses. NAVARRE R., PAVEK M *eds*. CAB International. U.S.A. 83-102 p

- PAVLISTA A. 1995. Potato production stages: scheduling key practices. Historical materials from University of Nebraska-Lincoln Extension. 7 p.
- POBEREŽNY J., WSZELACZYŃSKA E. 2011. Effect of bioelements (N, K, Mg) and long-term storage of potato tubers on quantitative and qualitative losses. Part II. Content of dry matter and starch. *Journal of Elementology* 16(2):237-246.
- POTARZYCKI J., GRZEBISZ W. 2020. The in-season variability in the calcium concentration in potato organs and its relationship with the tuber yield. *Journal of Elementology* 25 (1): 107-124.
- PRONAP (Programa Nacional Sectorial de Producción Agrícola Bajo Ambientes Protegidos). 2014. Importancia del análisis de crecimiento: El caso del tomate tipo cherry. APB-068. 2 p.
- PUNINA E. 2013. Evaluación agronómica del cultivo de papa (*Solanum tuberosum*) c.v “Fripapa” a la aplicación de tres abonos completos. Universidad Técnica de Ambato. Ecuador. 54 p.
- QUEIROZ J., ARAUJO A., BORGES M., CAMARGOS R., SOARES S., RIBEIRO R. 2013. Influence of phosphate fertilization on phosphorus levels in foliage and tuber yield of the potato cv. Agata. *Semina Ciencias Agrarias* 34(2): 649-656.
- QUISPE C., DEVAUX A., GONZALEZ S., TOURNEUX C., HIJMANS R. 1997. Evaluación comparativa del desarrollo y crecimiento de papa, oca e isaño en Cochabamba, Bolivia. *Revista Latinoamericana de la papa* 9/10: 140-155.
- RENS L., ZOTARELLI L., ALVA A., ROWLAND D., LIU G., MORGAN K. 2016. Fertilizer nitrogen uptake efficiencies for potato as influenced by application timing. *Nutr Cycl Agroecosyst* 104: 175-185.
- REYES M. 2001. Análisis económico de experimentos agrícolas con presupuestos parciales: re-enseñando el uso de este enfoque. Guatemala. Universidad de San Carlos. Boletín informativo 1. 31 p.
- RIOS D., GHISLAIN M., RODRÍGUEZ F., SPOONER D. 2007. What is the origin of the european potato? Evidence from Canary island landraces. *Crop Science* 47: 1271-1280.
- RIOS J., JARAMILLO S., GONZÁLEZ L., COTES J. 2010. Determinación del efecto de diferentes niveles de fertilización en papa (*Solanum tuberosum* ssp. andigena) DIACOL Capiro en un suelo con propiedades ándicas de Santa Rosa de Osos, Colombia. *Rev.Fac. Nal.Agr. Medellín* 63(1):5225-5237.
- RODRÍGUEZ L. 2010. Origen y evolución de la papa cultivada. Una revisión. *Agronomía Colombiana* 28(1): 9-17.
- ROMÁN M., HURTADO G. 2002. Guía técnica: cultivo de la papa. Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal. San Salvador, El Salvador. 36 p.

- RUIZ I. 2011. Respuesta de la aplicación de un fertilizante foliar sobre el rendimiento y la calidad industrial de papa cv. Innovator. Universidad Nacional de mar de platas. Argentina. 38 p.
- RUZA A., SKRABULE I., VAIVODE A. 2013. Influence of nitrogen on potato productivity and nutrient use efficiency. Proc. Latvian Acad. Sci. 67(3): 247-253.
- SALDIAS M. 2004. Curva de absorción de nutrimentos en papa, *Solanum tuberosum* cv. MNF 80. San José, Costa Rica. 67 p.
- SALISBURY F., ROSS C. 1994. Fisiología Vegetal. Grupo Editorial Interamérica. México D.F. 127-175 pp.
- SANCHO H. 1999. Curvas de absorción de nutrientes: importancia y uso en los programas de fertilización. Informaciones Agronómicas N° 36 (INPOFOS). San José, Costa Rica. 36:11-13.
- SANDAÑA P. 2016. Phosphorus uptake and utilization efficiency in response to potato genotype and phosphorus availability. European Journal of Agronomy 76: 95-106.
- SANTOS M. 2010. Evaluación del crecimiento, desarrollo y componentes de rendimiento de cuatro cultivares de papa criolla en dos localidades del departamento de Cundinamarca. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 31-79 pp.
- SEIFU Y., DENEKE S. 2017. Effect of calcium chloride and calcium nitrate on potato (*Solanum tuberosum* L.) growth and yield. Journal of Horticulture 4(3): 207
- SEPSA (Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria).2014. Boletín estadístico agropecuario No 24. San José, Costa Rica.
- SHARMA D.K., KUSHWAH S.S., NEMA P.K., RATHORE S.S. 2011. Effect of sulphur on yield and quality of potato (*Solanum tuberosum* L.). international Journal of Agricultural Research 6(2): 143-148.
- SHIFERAW M., LAL S., NEBIYU A. 2019. Mineral fertilization of Potato crop and quantitative and qualitative characteristics in southwestern Ethiopia. Journal of Agricultural Research 4(3): 1-8.
- SHUNKA E., CHINDI A., W/GIORGIS G., SEID E., TESSEMA L. 2017. Effect of nitrogen and potassium application rates on nitrogen use efficiency and tuber minerals content in central high lands of Ethiopia. Journal of Horticulture and Forestry 9(1):1-8.
- SIERRA C., SANTOS J., KALAZICH J. 2002. Manual: fertilización del cultivo de papa en la zona sur de Chile. Instituto de investigaciones agropecuarias (INIA). Boletín INIA N° 76. Santiago, Chile. 104 p.
- SIERRA B.C., SANTOS A., FRANCE I., KALAZICH B., CONTRERAS S. 2013. El cultivo de la papa en la región de Coquimbo. Manejo del suelo, fertilización y algunos otros factores de manejo agronómico. Boletín INIA N°266. La Serena, Chile. 134 p.

- SIFUENTES E., OJEDA W., MENDOZA C., MACIAS J., RUELAS J., INZULZA M. 2013. Nutrición del cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) considerando variabilidad climática en el “Valle del Fuerte” Sinaloa, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 4(4): 585-597.
- SIFUENTES E. 2014. Demandas nutricionales de las principales variedades de papa producidas en Sinaloa. Fundación Produce Sinaloa A.C. México. 3 p.
- SINGH H., SHARMA M., GOYAL A., BANSAL M. 2016. Effect of nitrogen and Sulphur on growth and yield attributes of potato (*Solanum tuberosum* L.). *International Journal of Plant and Soil Science* 9(5): 1-8.
- SINGH M., KUMAR A., KUMAR TRIPATHI S., KUMAR S., SINGH K. 2018. Effect of foliar application of zinc and manganese on growth parameters and yield of potato (*Solanum tuberosum* L.). *Int.J.Curr.Microbiol.App.Sci* 7(7): 1390-1394.
- SINGH S., SHARMA M., REDDY K., VENKATESH T. 2018. Integrated application of boron and sulphur to improve quality and economic yield in potato. *Journal of Environmental Biology* 39:204-210.
- SINGH P., SINGH K. 2019. Role of micronutrients in potato cultivation. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry* 4: 128-130.
- SORATTO R., PILON C., FERNANDES AM., MORENO L. 2015. Phosphorus uptake, use efficiency, and response of potato cultivars to phosphorus levels. *Potato Research* 58: 121-134.
- SOTO J.A. 2001. Valores críticos de fósforo, potasio y azufre, y respuesta al nitrógeno para papa en la zona norte de Cartago. Resultados de investigación 1999- 2000; difusión para agricultores. MAG, San José, Costa Rica. Plegable. 2 p.
- SPOONER D., MCLEAN K., RAMSAY G., WAUGH R., BRYAN G. 2011. A single domestication for potato based on multilocus amplified fragment length polymorphism genotyping. *PNAS* 102 (41): 14694-14699.
- STRUIK P. 2007. Above-ground and below-ground plant development. *In* *Potato Biology and Biotechnology: Advances and Perspectives*. VREUGDENHIL D *eds*. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands. 219-236 pp.
- SUBRAMANIAN N., WHITE P., BROADLEY M., RAMSAY G. 2011. The three-dimensional distribution of minerals in potato tubers. *Annals of Botany* 107: 681-691.
- TANIOS S., TEGG R., EYLES A., THANGAVEL T., WILSON C. 2020. Potato tuber greening risk is associated with tuber nitrogen content. *American Journal of Potato research* 97: 360-366.
- TAWFIK A., KLEINHENZ M., PALTA J. 1996. Application of calcium and nitrogen for mitigating heat stress effects on potatoes. *American Potato Journal* 73:261-273

- TORRES-OLIVAR V., VILLEGAS-TORRES O., DOMINGUEZ-PATIÑO M., SOTELO-NAVA H., RODRIGUEZ-MARTINEZ A., MELGOZA-ALEMAN R., VALDEZ-AGUILAR L., ALIA-TEJACAL I. 2014. Role of nitrogen and nutrients in crop nutrition. *Journal of Agricultural Science and Technology* 4: 29-37.
- TRAWCZYŃSKI C. 2019. Assessment of the nutrition of potato plants with nitrogen according to the NNI test and SPAD indicator. *Journal of Elementology* 24(2): 687-700.
- TREHAN S. 2005. Nutrient management by exploiting genetic diversity of potato – a review. *Potato J* 32(1-2):1-15.
- TREHAN S., PANDEY S., BANSAL S. 2009. Potassium nutrition of the potato crop – the Indian scenario. *E-ife* 19: 2-9
- VAN DER BERG R., JACOBS M. 2007. Molecular taxonomy. *In* *Potato Biology and Biotechnology: Advances and Perspectives*. VREUGDENHIL D *eds*. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands. 55-76 pp.
- VHUTHU N. 2017. Phosphorus fertilizer source and its effect on potato (*Solanum tuberosum* L.) production. Thesis Mag. Sc. Stellenbosch, South Africa. Stellenbosch University. 120 p.
- VILLAMIL H. 2005. Fisiología de la nutrición en papa. In *Memorias “I taller nacional sobre suelos, fisiología y nutrición vegetal en el cultivo de papa”*. CEVIPAPA. Bogotá, Colombia. 17-25 pp.
- VINDAS L. 2013. Demanda por papa congelada obliga a empresas a importar más. (en línea). *El Financiero*, San José, Costa Rica. 5 de mayo. Consultado el 1 de mayo 2018. Disponible en: <https://www.elfinancierocr.com/negocios/demanda-por-papa-congelada-obliga-a-empresas-a-importar-mas/X2K7JXLE2RCALA5PT57H6OCNZI/story/>
- VOS J. 2009. Nitrogen response and nitrogen management in potato. *Potato Research* 52: 305-317.
- VOXEUR A., FRY S. 2014. Glycosylinositol phosphorylceramides from *Rosa* cell cultures are boron-bridged in the plasma membrane and form complexes with rhamnogalacturonan II. *The Plant Journal* 79: 139-149.
- WANG N., XING Y., WANG X. 2019. Exploring options for improving potato productivity through reducing crop yield gap in loess plateau of China based on grey correlation analysis. *Sustainability* 11: 5621
- WESTERMANN D.T. 1993. Fertility management. In *Potato health management*. APS press. 77-86 p.
- WESTERMANN D.T. 2005. Nutritional requirements of potatoes. *Amer J of Potato Res* 82: 301-307.

- WHITE P., WHEATLEY R., HAMMOND J., ZHANG K. 2007. Minerals, soils and roots. *In* Potato Biology and Biotechnology: Advances and Perspectives. VREUGDENHIL D *eds.* Elsevier. Amsterdam, The Netherlands. 739-752 pp.
- WOHLEB C., KNOWLES R., PAVEK M. 2014. Plant growth and development. *In* The Potato: Botany, Production and Uses. NAVARRE R., PAVEK M. *eds.* CAB International. USDA. 64-81 pp.
- WOLI P., HOOGENBOOM G. 2018. Simulating weather effects on potato yield, nitrate leaching, and profit margin in the US Pacific Northwest. *Agricultural Water Management* 201: 177-187.
- WORKINEH G., LOHA G., HIDOTO L. 2017. Response of potato (*Solanum tuberosum* L.) to nitrogen fertilizer application at Angecha, southern Ethiopia. *Journal of Natural Sciences Research* 7(3): 5-14.
- XING Y., NIU X., WANG N., JIANG W., GAO Y., WANG X. 2020. The correlation between soil nutrient and potato quality in loess plateau of China based on PLSR. *Sustainability* 12(4): 1588.
- XU Y., HE P., XU X., QIU S., ULLAH S., GAO Q., ZHOU W. 2019. Estimating nutrient uptake requirements for potatoes based on QUEFTS analysis in China. *Agronomy Journal* 111(5): 2387-2394.
- YAKIMENKO V., NAUMOVA N. 2018. Potato tuber yield and quality under different potassium application rates and forms in west Siberia. *Agriculture (Pol'nohospodárstvo)* 64(3): 128-136.
- ZEBARTH B., BÉLANGER G., CAMBOURIS A., ZIADI N. 2012. Nitrogen fertilization strategies in relation to potato tuber yield, quality, and crop N recovery. *In* Sustainable potato production: global case studies. He Z., Larkin Z., Honeycutt W *eds.* 165-186 pp.
- ZEC M. 2008. Evolución de los parámetros de nutrición fosforada en el cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) bajo distintos niveles de fertilidad fosforada en un suelo trumao. Universidad Austral de Chile, Tesis de grado licenciatura en agronomía. 124 p.
- ZELALEM A., TEKALIGN T., NIGUSSIE D. 2009. Response of potato (*Solanum tuberosum* L.) to different rates of nitrogen and phosphorus fertilization on vertisols at Debre Berhan, in the central highlands of Ethiopia. *African Journal of Plant Science* 3(2): 16-24.
- ZERU D., LAL S., KIDANE T., MESFIN B. 2016. Effect of potassium levels on growth and productivity of potato varieties. *American Journal of Plant Sciences* 7: 1629-1638.
- ZHANG W., LIU X W., WANG Q., ZHANG H., LI M., SONG B., ZHAO Z. 2018. Effects of potassium fertilization on potato starch physicochemical properties. *International Journal of Biological Macromolecules* 117: 467-472.

ANEXOS

Anexo 1. Contenido de sólidos y gravedad específica en muestras de papa medidos con hidrómetro digital

Tratamiento	Gravedad específica	Promedio GE	Materia Seca (%)	Promedio MS (%)
T1R1	1,074	1,081	19,04	20,44
T1R2	1,084		21,06	
T1R3	1,085		21,23	
T2R1	1,099	1,086	24,18	21,55
T2R2	1,070		18,09	
T2R3	1,090		22,39	
T3R1	1,071	1,077	18,32	19,51
T3R2	1,081		20,37	
T3R3	1,078		19,84	
T4R1	1,083	1,083	20,89	20,84
T4R2	1,087		21,61	
T4R3	1,079		20,01	