

**Efecto de la fertilización cálcica sobre el contenido de calcio y la incidencia de
corazón hueco en tubérculos de papa**

José Mario Jiménez Calvo

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

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROALIMENTARIAS
ESCUELA DE AGRONOMÍA

2023

Efecto de la fertilización cálcica sobre el contenido de calcio y la incidencia de corazón hueco en tubérculos de papa

José Mario Jiménez Calvo

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



Arturo Brenes Angulo, PhD.

DIRECTOR DE TESIS



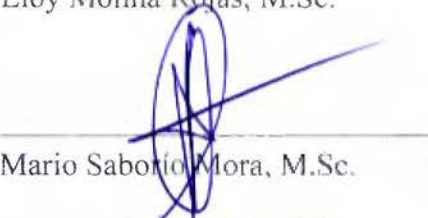
Manuel Ernesto Camacho Umaña, PhD.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL



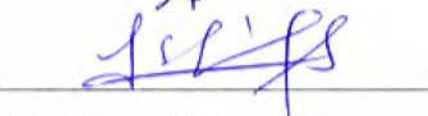
Eloy Molina Rojas, M.Sc.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL



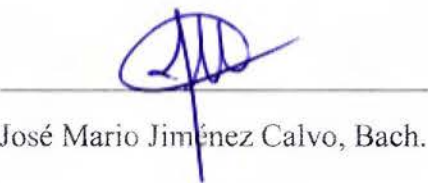
Mario Sabonido Mora, M.Sc.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL



Luis Gómez Alpizar, PhD.

DIRECTOR DE LA ESCUELA



José Mario Jiménez Calvo, Bach.

SUSTENTANTE

DEDICATORIA

A mi familia, en quienes encuentro día a día la motivación para seguir adelante.

A mis hijas Mariel y Sarah Leonor, mi mayor tesoro y fuente de alegría.

A todos los hombres y mujeres que se dedican su vida a una labor tan noble y difícil,
hacer producir la tierra.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Arturo Brenes Angulo, director de tesis, por apoyo para realizar este trabajo.

Al Dr. Manuel E. Camacho Umaña, miembro del tribunal, por su dedicación para con este trabajo en la parte de física de suelos y análisis estadístico de los datos.

Al Dr. Luis Gómez Alpízar, profesor consejero, por su guía durante los años de estudiante.

A los productores Sr. Adrián Leandro Leandro y Sr. Johnny Calvo Álvarez por permitimos realizar este trabajo en sus fincas.

Al Lic. Iván León González, por su ayuda en el análisis estadístico para este trabajo.

Al M.Sc. Eloy Molina Rojas y M.Sc. Mario Saborío Mora, miembros de comité asesor, por sus recomendaciones en la redacción de este documento

A los laboratorios de Recursos Naturales y Biotecnología de Plantas del Centro de Investigaciones Agronómicas por el aporte económico para la realización de este trabajo

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
LISTA DE CUADROS.....	VI
LISTA DE FIGURAS.....	VII
RESUMEN	IX
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	3
Objetivo general:	3
Objetivos específicos:	3
ANTECEDENTES	4
Corazón hueco en tubérculos de papa.....	4
Causas del corazón hueco de la papa	5
El contenido de agua del suelo y la incidencia de desórdenes fisiológicos en tubérculos de papa.....	7
Efecto de la temperatura sobre la incidencia de desórdenes fisiológicos en tubérculos de papa	8
Contenido y absorción de calcio en la planta de papa.....	9
Fertilización con calcio y su relación con la aparición de desórdenes fisiológicos	11
Dinámica de calcio en el suelo.....	13
Contenido de Calcio en suelos Andisoles de Costa Rica.....	14
METODOLOGÍA.....	15
Localización del ensayo	15
Material Vegetal.....	16
Siembra del cultivo y establecimiento del ensayo	17
Diseño experimental.....	19
Variables de estudio y cuantificación	19
Análisis estadístico.....	20
RESULTADOS	20
DISCUSIÓN	28
CONCLUSIONES.....	32
RECOMENDACIONES.....	33

LITERATURA CITADA	33
ANEXOS	44

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Análisis químico de suelos en las fincas donde se realizó el estudio.....	16
Cuadro 2. Fuentes, dosis y momento de aplicación de los fertilizantes utilizados en cada tratamiento.....	18
Cuadro 3. Resumen del análisis de varianza realizado para las variables corazón hueco, rendimiento y contenido de calcio en el tubérculo.....	21

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Variación en la incidencia del corazón hueco según la aplicación de calcio y su fraccionamiento al momento de la aporca y la localidad evaluada.....	22
Figura 2. Valores de rendimiento de la papa de según la aplicación de calcio y su fraccionamiento al momento de la aporca y la localidad evaluada.....	23
Figura 3. Variabilidad en el contenido de Ca en el tubérculo en función de la aplicación de calcio y su fraccionamiento al momento de la aporca y la localidad evaluada.....	23
Figura 4. Relación entre la concentración de calcio del tubérculo y la incidencia de corazón hueco en tubérculos de papa var. Floresta en la zona alta de Cartago, Costa Rica, 2022.....	24
Figura 5. Variables climáticas y edáficas monitoreadas y registradas en la finca Irazú, zona alta de Cartago, Costa Rica, 2022.....	26
Figura 6. Variables climáticas y edáficas monitoreadas y registradas en la finca Turrialba, zona alta de Cartago, Costa Rica, 2022.....	27

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Concentración de calcio en los tubérculos de papa (variedad Floresta) en una finca aledaña al Volcán Irazú, Cartago, Costa Rica, 2022.....	44
Anexo 2. Concentración de calcio en los tubérculos de papa (variedad Floresta) en una finca aledaña al Volcán Turrialba, Cartago, Costa Rica, 2022.....	45
Anexo 3. Valores promedio de temperatura del aire (Ta), temperatura del suelo (Ts) y contenido de agua en el suelo (humedad volumétrica (HV) y potencial hídrico (PH) en las dos fincas donde se realizó el experimento.....	45

RESUMEN

La incidencia de corazón hueco (CH) y la mancha marrón en tubérculos de papa en Costa Rica, se ha incrementado en la última década, en las zonas ubicadas entre los 2500 y los 3200 m.s.n.m. En otras latitudes, estos síntomas han sido relacionados con bajas temperaturas en el suelo y un bajo contenido de calcio en los tubérculos. El objetivo de este trabajo fue determinar el efecto de la fertilización con calcio sobre la incidencia del CH en tubérculos de papa de la variedad Floresta en dos fincas de la zona alta de Cartago: una cercana al Volcán Irazú (Irazú) y otra cercana al Volcán Turrialba (Turrialba). Para determinar el efecto de la fertilización con calcio, se aplicaron 170 kg ha⁻¹ de CaO, distribuidos en un 46 % al momento de la siembra como sulfato de calcio granulado y un 54 % al momento de la aporca como nitrato de calcio. La aplicación de nitrato de calcio al momento de la aporca también se realizó en dos formas de fraccionamientos: 1) a la aporca (45,5 kg ha⁻¹) y tres semanas después de la aporca (45,5 kg ha⁻¹) y 2) a la aporca (30,3 kg ha⁻¹), tres semanas después (30,3 kg ha⁻¹) y cinco semanas después de la aporca (30,3 kg ha⁻¹). Durante el ciclo de cultivo se monitoreó la temperatura del suelo y del aire, la radiación solar, el contenido y potencial del agua del suelo y al momento de la cosecha se evaluó la incidencia de CH, el contenido de calcio en los tubérculos y el rendimiento. Los resultados obtenidos mostraron que la fertilización con calcio al suelo disminuyó la incidencia de CH, pero no se determinó diferencia entre aplicar el nitrato de calcio a la aporca en una sola dosis o fraccionarlo. En cuanto al contenido de calcio en el tubérculo, los datos obtenidos mostraron que la concentración de este elemento fue significativamente menor en el tratamiento testigo que en los tratamientos en los cuales se fertilizó con calcio. También se determinó que entre más veces se fraccionó el calcio aplicado al momento de la aporca, había una tendencia al aumento del contenido del calcio en el tubérculo. Además, además en la finca Turrialba el contenido de calcio fue mayor que en la finca Irazú. Se determinó que la fertilización con calcio no tuvo efecto sobre el rendimiento, no obstante, al fertilizar con calcio se obtendría mejor calidad del tubérculo por una menor incidencia de CH. Los valores de contenido de calcio en el tubérculo e incidencia de CH no correlacionaron de forma significativa. Sin embargo, se observó una clara tendencia a una reducción del CH con el incremento del Ca en el tubérculo. Debido

a que naturalmente los tubérculos presentan contenidos bajos de calcio, aumentar el contenido de este elemento en los tubérculos mediante la fertilización al suelo, propiciaría una menor incidencia de CH.

INTRODUCCIÓN

La papa (*Solanum tuberosum* L.), es el cuarto cultivo en importancia a nivel mundial después del trigo, el arroz y el maíz (Andrade et al. 2015; Brenes et al. 2002; Earle, 2020; Struik & Wiersema, 1999). En Costa Rica, el cultivo de este tubérculo es una actividad económica ligada a pequeños y medianos productores y tiene un consumo anual per cápita de 20,8 kg (INTA, 2017). En el año 2022, se sembraron 2.963 ha, y se produjeron 77.784 t, para un rendimiento promedio de 26,2 t ha⁻¹ (SEPSA, 2023).

A pesar de que se han introducido a la agrocadena genotipos nuevos, se siguen cultivando las variedades Floresta y Granola principalmente. De estas variedades, la primera ocupa aproximadamente el 80% del área de siembra (INTA, 2017). Ambas variedades son susceptibles a las plagas y enfermedades más frecuentes en este cultivo, entre ellas el tizón tardío de la papa (*Phytophthora infestans* Mont. de Bary), la marchitez bacteriana (*Ralstonia solanacearum* Smith), el minador de la hoja (*Liriomyza huidobrensis* Blanchard), y diferentes tipos de virosis, entre otras (Brenes et al., 2002; Saborío, 2017). Además de los problemas bióticos antes mencionados, en el país se ha observado en los últimos años un incremento en la incidencia de problemas abióticos, como el corazón hueco y la mancha marrón, aunque esto último no se ha reportado ni cuantificado aún por las autoridades competentes. El incremento en la incidencia de desórdenes fisiológicos se asocia al aumento de estrés abiótico que enfrentan los cultivos debido al cambio climático (Luthra et al., 2020)

El incremento en la incidencia de este tipo de desórdenes fisiológicos en el cultivo de papa, provocó que uno de los compradores más grandes en el país, iniciara un protocolo de revisión interna de los tubérculos de papa que reciben, como parte del control de calidad que realizan a los productos que llegan a su centro de acopio. Esa revisión determina si se acepta o se rechaza el lote y producto de ella, se han incrementado las devoluciones por corazón hueco y mancha marrón, con las consecuentes pérdidas económicas para el productor (S. Ramírez, comunicación personal, 14 de noviembre, 2021).

El corazón hueco y la mancha marrón son desórdenes fisiológicos no infecciosos que se caracterizan por una lesión o cavidad en la médula del tubérculo. Ambos síntomas

pueden aparecer a la vez en el mismo tubérculo o en distintos tubérculos de una misma planta y son provocados por causas similares por lo que algunos autores los consideran como el mismo desorden fisiológico y han calificado la mancha marrón como una etapa inicial del CH (Zotarelli et al., 2012).

La incidencia de CH y mancha marrón están asociados usualmente a un rápido crecimiento del tubérculo que puede ser precedido o no por un periodo de estrés hídrico o nutricional (Bussan, 2007; Luthra et al., 2020). La probabilidad de que ocurran los síntomas de la mancha marrón y el corazón hueco depende la tasa de crecimiento del tubérculo, entre más grande el tubérculo y más rápido crezca este, mayor es la probabilidad de que se observen dichos desórdenes fisiológicos (Hiller et al., 1985; Ehlenfeldt, 1992). Por otro lado, estos síntomas pueden ser desencadenados por factores ambientales, especialmente condiciones de bajas temperaturas y agua en el suelo entre capacidad de campo y saturación. Sin embargo, en su incidencia y severidad pueden influir también otros factores como el genotipo de la planta, la fertilización del cultivo y la densidad de siembra (Rex & Mazza, 1989; Bussan, 2007, Tai, 2007).

Varios estudios han demostrado que el calcio es un factor clave en el control de estos desórdenes fisiológicos, debido a su función estructural en la pared celular y a su importante papel en las cascadas de señalización como respuesta de la planta a estímulos ambientales (Cosgrove, 2005; White & Broadley, 2003). A pesar de la importancia de este elemento, se ha demostrado que su paso desde la solución del suelo hacia el tubérculo es un proceso naturalmente poco eficiente (Hawkesford et al., 2012; Busse & Palta, 2006). Algunos autores han encontrado que fertilización al suelo con calcio durante el desarrollo del cultivo, disminuye la incidencia de estos desórdenes fisiológicos (Karlsson et al., 2006; Kleinhenz et al., 1999; Ozgen et al., 2006).

En Costa Rica no se ha cuantificado la incidencia de estos desórdenes fisiológicos en las plantaciones de papa. Tampoco existe información acerca del efecto de la fertilización con calcio sobre la calidad interna del tubérculo, ni se han monitoreado variables físicas del suelo relacionadas con el desarrollo de estos dos desórdenes en la papa. Generar información acerca del efecto de esa práctica agronómica sobre la incidencia de desórdenes fisiológicos en el cultivo, facilitaría el manejo adecuado de los mismos y

reduciría este problema que afecta la cosecha de muchos productores de papa de la zona alta del país.

OBJETIVOS

Objetivo general:

Determinar el efecto de la fertilización con calcio sobre el contenido de calcio y la incidencia de corazón hueco en tubérculos de papa variedad Floresta, en la zona alta de Cartago.

Objetivos específicos:

- 1- Determinar el efecto de la fertilización con calcio sobre la incidencia de corazón hueco en tubérculos de papa al momento de la cosecha.
- 2- Establecer el efecto de la fertilización con calcio sobre el contenido de calcio en tubérculos de papa al momento de la cosecha.
- 3- Analizar la relación entre el contenido de calcio y la incidencia corazón hueco en tubérculos de papa al momento de la cosecha.

ANTECEDENTES

Corazón hueco en tubérculos de papa

El corazón hueco (CH) de la papa es un desorden fisiológico en el interior de los tubérculos. Es caracterizado por una o más cavidades de forma irregular en la médula del tubérculo y comúnmente las paredes de esas cavidades son de color rosado-parduzco. Esta cavidad es seca, corchosa y mientras no sea expuesta al exterior por heridas o cortes, no se generan pudriciones en ella (Hiller et al., 1985; Mogen & Nelson, 1986; Rex & Mazza, 1989; Sowokinos, 2007; Bussan, 2007). Hoehn (1977) mencionó algunos factores que determinan que el CH sea un desorden fisiológico: a) ningún patógeno ha sido asociado a este como agente causal, b) no es transmisible a la siguiente generación, por lo que plantas de papa que crecen de tubérculos afectados pueden producir tubérculos sanos c) el tamaño del síntoma no aumenta después que el tubérculo ha alcanzado su madurez fisiológica, d) no se observan signos externos asociados a la ocurrencia del síntoma en el interior del tubérculo.

Muchas veces el corazón hueco es precedido por el desorden denominado como centro marrón (CM) (Hiller et al., 1985; Van Denburgh et al., 1986). Ambos síntomas pueden aparecer a la vez en distintos tubérculos de una misma planta. Estos síntomas son provocados por causas similares por lo que algunos autores los consideran el mismo desorden fisiológico y califican la mancha marrón como una etapa inicial del CH (Van Denburgh et al., 1979; Bussan, 2007; Zotarelli et al., 2012). El CM, es una acumulación de tejido color café en la médula del tubérculo, provocada por la oxidación y muerte celular de ese tejido. Si las condiciones son propicias para su desarrollo, el centro marrón inicia cuando los tubérculos son aún pequeños (<60 g) (Luthra et al., 2020).

Los síntomas del corazón hueco de la papa no se detectan en ningún momento durante el crecimiento de la planta, pues esta se desarrolla con normalidad y solo se determina la

presencia de este desorden fisiológico al momento de partir los tubérculos para su consumo o procesamiento (Palta, 2010; Sowokinos, 2007). Además, la distribución en el campo de los tubérculos afectados no sigue un patrón definido, sino un comportamiento aleatorio. En un mismo campo se pueden cosechar plantas con todos sus tubérculos afectados, otras con solo una parte de estos con el síntoma y otras con todos los tubérculos sanos (Hiller et al., 1985; Rex & Mazza, 1989).

Si se utilizan tubérculos afectados con CH como semilla, se obtienen igualmente plantas que producen tubérculos completamente sanos y plantas que presentan tubérculos afectados. Se conoce poco acerca del engranaje genético y bioquímico que conlleva a este síntoma por lo que su heredabilidad ha sido poco estudiada y a través del mejoramiento genético no se ha podido aportar al control de estos desórdenes fisiológicos (Sowokinos, 2007). Estudios recientes, sin embargo, han encontrado indicios del componente genético y su efecto sobre el desarrollo del CH. Por ejemplo, al evaluar una progenie resultado del cruce entre la variedad Superior (con baja incidencia de CH) y la variedad Atlantic (altamente susceptible al CH) Zorrilla et al. (2021), encontraron cinco LOCI de rasgos cuantitativos (QTL), que controlan el contenido de calcio en el tubérculo y cinco QTLs que determinan la incidencia del CH. Estos autores concluyeron que estas regiones del genoma de la papa podrían ser utilizados para el desarrollo de marcadores moleculares en programas de mejoramiento genético para el control del CH así como el aumento del contenido de calcio en el tubérculo.

Causas del corazón hueco de la papa

Al ser un desorden fisiológico, en el desarrollo del síntoma de CH intervienen múltiples factores fisiológicos, genéticos, ambientales y agronómicos (Bussan, 2007).

Desde hace casi un siglo, Moore (1925) describió el síntoma del CH y lo reportó como un problema que se daba de forma tardía en los tubérculos más grandes. De forma similar, Nylund y Lutz (1950) asociaron los tubérculos grandes (> 88 cm de diámetro dorsal) con una mayor incidencia de este daño fisiológico.

Existen dos hipótesis clásicas para explicar la ocurrencia de CH en tubérculos de papa, según una revisión realizada por Hiller et al. (1985). La primera sugiere que este desorden

aparece cuando ocurre un estrés abiótico, luego de que inicia la tuberización. En periodos de estrés, la papa reabsorbe agua, minerales y carbohidratos desde la médula de los tubérculos jóvenes, lo cual lesiona las células de esta y esta no se vuelve a recuperar o a crecer normalmente, iniciando la pequeña cavidad que después se agranda conforme crece el tubérculo (Peterson et al., 1985)

La segunda teoría, propone que no es estrictamente necesaria una condición de estrés, sino que el principal factor inductor del CH es el crecimiento acelerado de los tubérculos. Esta teoría se basa en algunos trabajos como el realizado por Nelson et al., (1979), quienes luego de 10 años continuos de evaluaciones en la variedad Norgold Russet, encontraron que condiciones como una baja densidad de siembra ($>0,90$ m entre surcos y $> 0,4$ m entre semillas) y agua disponible durante todo el periodo de llenado del tubérculo fueron los principales factores inductores de un crecimiento acelerado, factores que correlacionaron con una mayor incidencia de CH. De igual forma, Crumbly et al. (1973), evaluaron la tasa de crecimiento de los tubérculos (g día^{-1}) y su relación con la incidencia de CH, en tres variedades. El promedio de ganancia diaria de peso fresco de los tubérculos fue 1,5; 3,6 y 4,4 g día^{-1} para la Norgold Russet, Viking e Irish Cobbler respectivamente. Al evaluar la incidencia de CH, no encontraron el síntoma en las primeras variedades, mientras que en variedad Irish Cobbler en la cual la tasa de crecimiento de los tubérculos fue mayor encontraron un 21% de incidencia de CH.

La literatura más reciente se inclina hacia la segunda teoría, el efecto del crecimiento rápido. Al respecto, Luthra et al., (2020), señalan de forma general que factores como el exceso de fertilización, bajas densidades de siembra, exceso de irrigación o lluvia propician un rápido crecimiento de la planta y por tanto del tubérculo, con lo cual se incrementa la posibilidad de que ocurra corazón hueco.

En adición a lo anterior, en la literatura se reporta una correlación positiva entre la expansión de la médula del tubérculo y la incidencia de CH. Según los resultados reportados por Ehlenfeldt (1992), el 73 % de la variación total de CH fue explicado como una función lineal de la expansión de la médula ($R^2 = 0,82$). Otro resultado importante de este trabajo es que el 88% de la variación total de CH fue explicada como una función cuadrática de la transpiración:

$$\text{CH} = 0,22 T^2 - 0,62 T - 47. \quad R^2 = 0,88$$

donde,

CH = frecuencia de corazón hueco

T = transpiración ($\mu\text{m H}_2\text{O cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)

Lo anterior sugiere que los tubérculos de las variedades con mayor tasa de transpiración enfrentarían más ciclos de hidratación/deshidratación, lo cual genera gran tensión en el tejido medular del tubérculo y por tanto sería más susceptible a la lesión inicial de MM o CH. Además, en aquellas variedades con mayor tasa de transpiración foliar se acumularía más calcio en las hojas en detrimento del contenido de calcio en el tubérculo, ya que el calcio solo se mueve por la corriente de transpiración, como se detalla más adelante.

El contenido de agua del suelo y la incidencia de desórdenes fisiológicos en tubérculos de papa

El contenido de humedad del suelo es un factor que influye sobre la calidad de los tubérculos de papa. Hay evidencia de que el estrés hídrico, déficit o exceso de agua, y las fluctuaciones en el contenido de agua en el suelo durante el ciclo de cultivo disminuyen tanto la calidad del tubérculo como el rendimiento de la cosecha (Rex & Mazza, 1989). Nelson et al. (1979), colectaron datos durante 10 años consecutivos y observaron que la incidencia de CH en la variedad Norglot Russet fue más alta en periodos de mayor crecimiento, propiciado por elevados valores de precipitación pluvial (110-160 mm mensuales), en conjunto con una baja densidad de plantas (0,9 m entre surcos). Los autores determinaron también, un descenso en la incidencia de CH en años con menos lluvia (<110 mm mensuales) y en aquellas parcelas con mayor densidad de plantas (0,5 m entre surcos). De este estudio se concluyó que si las condiciones de agua disponible y la baja densidad de plantas propiciaban el crecimiento acelerado de las plantas de papa, el tubérculo también lo hacía, y en consecuencia, la tensión en el área central del tubérculo se incrementaba y aumentaba así también la probabilidad del desarrollo de CH en los tubérculos.

Hiller y Koller (1982), observaron una alta incidencia de CH en tubérculos de la variedad Lemhi Russet, luego de aplicar riegos intensos en la etapa final de llenado, para corregir estrés hídrico en plantaciones de papa. Los mismos autores reportaron en 1984

que la mayor incidencia de CH en la variedad Russet Burbank se dio en los tratamientos donde se mantuvo la humedad del suelo a capacidad de campo (333 cm H₂O) durante el ciclo de cultivo, y la menor incidencia de CH se dio en el tratamiento cuyo contenido de humedad se mantuvo entre 20 y 40% del valor correspondiente a la capacidad de campo (Hiller & Koller, 1984). Estos autores observaron además que, si bien un bajo contenido de humedad en el suelo redujo la incidencia de CH, también redujo el rendimiento, por lo que no recomiendan seguir esta práctica para controlar el CH.

En la variedad Lemhi Russet, Miller y Martin (1985), determinaron que la incidencia de desórdenes internos en los tubérculos aumentó conforme se adicionó agua luego de un estrés hídrico inducido en la etapa inicial de la tuberización. Silva et al. (1991) también evaluaron el efecto de tres regímenes de riego sobre la incidencia de CH en la variedad Atlantic, durante tres años consecutivos. Los tres tratamientos de riego fueron; sin riego, riego de precisión y exceso de riego. Los autores concluyeron que un exceso de riego en la etapa de tuberización fue el factor que más incrementó la incidencia de CH.

Efecto de la temperatura sobre la incidencia de desórdenes fisiológicos en tubérculos de papa

En Costa Rica se ha observado que la incidencia de CH y mancha marrón ha aumentado únicamente en los alrededores de los volcanes Irazú y Turrialba, donde la temperatura tiende a ser más baja. En general, existe poca documentación acerca del efecto de la temperatura del aire o la temperatura del suelo sobre la aparición de desórdenes fisiológicos en tubérculos de papa. Hiller et al. (1985), Mencionan que en Estados Unidos la incidencia de CH se da principalmente en los estados del norte donde la temperatura del aire desciende por debajo de 0°C en otoño - invierno a lo largo del límite con Canadá, y que rara vez se observa el síntoma en los cultivos de papa en los estados del sur, aun cuando se use semilla con presencia de CH traída del norte.

Nelson et al. (1979) midieron durante 10 años la incidencia de CH y variables climáticas como la temperatura del aire y la precipitación pluvial. Los autores determinaron una correlación negativa entre grados días temperatura (GDT) y la

incidencia de CH. Es decir, que entre menos GDT se acumularon durante la tuberización (debido a una menor temperatura) se incrementó el número de días de la temporada de llenado y hubo mayor incidencia de CH (valores >20%).

Van Denburgh et al. (1979) mostraron que la incidencia de centro marrón incrementó significativamente (35%) después se sometieron plantas de papa a un tratamiento de tres semanas de crecimiento en condiciones de temperatura de 18°C día/10°C noche, mientras que el control que se mantuvo a temperatura de 23°C día/18°C noche no presentó el síntoma.

Van Denburgh et al. (1980) en condiciones de invernadero, expusieron plantas de papa que estaban iniciando de la tuberización a diferentes tratamientos de temperatura de suelo en condiciones de invernadero. El ensayo se repitió por tres años y los autores comprobaron que aquellas plantas de papa que crecieron a temperaturas entre 10 y 15°C presentaron mayor incidencia de centro marrón que aquellas que crecieron a 4 o 21°C.

Bussan (2007) menciona que la ocurrencia de centro marrón y CH, se incrementan si la parte subterránea de la planta se expone a temperaturas de suelo entre 10 °C y 15 °C durante el inicio de la tuberización, cuando los tubérculos tienen entre 1,5 – 3 cm de diámetro. Adicionalmente, Van Denburgh et al. (1986) mencionan que el periodo de exposición a las temperaturas mencionadas como inductoras del síntoma de centro marrón podría ser tan corto como siete días.

Contenido y absorción de calcio por los tubérculos

El calcio es un elemento esencial para el desarrollo de las plantas, dentro de sus principales funciones en el metabolismo vegetal, destaca la de mantener la estabilidad de la pared celular, al formar pectatos de calcio en la lámina media (Cosgrove, 2005; White & Broadley, 2003). Este elemento se mueve dentro de la planta disuelto en agua, a través del flujo xilemático, lo cual hace que órganos con altas tasas de transpiración como las hojas tengan contenidos altos de calcio (entre 1000 y 50000 mg kg⁻¹). Por otro lado, órganos subterráneos como los tubérculos los cuales están generalmente rodeados de suelo húmedo, tienen tasas de transpiración bajas y por tanto su contenido de calcio es

relativamente bajo (entre 75-300 mg kg⁻¹) (Cosgrove, 2005; Hawkesford et al., 2012; Palta, 1996; Simmons et al., 1988; White & Broadley, 2003).

Conforme avanza el llenado de órganos sumidero con fotosintatos y nutrimentos, el floema se va convirtiendo en el tejido vascular predominante, y debido a la poca movilidad del calcio en el floema, muy poco de este elemento llega a sumideros como los tubérculos (White, 2012). De acuerdo con Hawkesford et al. (2012), en los tubérculos es muy común que los contenidos de calcio sean muy bajos y propensos a caer hasta niveles donde se pone en riesgo la integridad de la membrana y la estabilidad de la pared celular.

Otro hecho que contribuye al bajo contenido de calcio en los tubérculos es el mecanismo por el cual la planta de papa absorbe este elemento. En un estudio realizado bajo condiciones controladas, Busse y Palta (2006), usaron calcio radio-marcado (⁴⁵Ca⁺²) y Safranina-O para observar la absorción de calcio en tubérculos de papa. Estos autores determinaron que a la médula del tubérculo solo llega el calcio que es tomado del suelo a través de las raíces que salen de los estolones y de las yemas axilares de los tubérculos. Además, encontraron que si el calcio es absorbido por el sistema radicular principal es llevado hacia la parte aérea de la planta y no se transporta al tubérculo vía floema.

Lo anterior indica que la cantidad de calcio que llega al tubérculo depende en gran medida de los gradientes de potencial hídrico entre la parte aérea y la parte subterránea de la planta. Al respecto, Win et al., (1991) demostraron esa dinámica en el cultivo de la papa, por medio de la aspersion de una solución cerosa con efecto antitranspirante sobre las plantas en condiciones controladas. Los autores encontraron que al aplicar el antitranspirante, el potencial hídrico de las hojas aumentó (-0,4 MPa) con respecto al testigo (-0,8 MPa), por lo cual el gradiente de potencial hídrico entre las hojas y el tubérculo disminuyó. Lo anterior resultó una concentración más alta de calcio en la médula del tubérculo y además se redujo el desorden fisiológico llamado necrosis interna, que ocurre durante el almacenamiento.

De acuerdo con Habib y Donnelly (2002) y Palta (2010), es necesario conocer los mecanismos por medio de los cuales el calcio llega al tubérculo, para así diseñar mejores estrategias de fertilización con calcio y aumentar el contenido de este nutrimento en el tubérculo.

Fertilización con calcio y su relación con la aparición de desórdenes fisiológicos

Se ha demostrado que la fertilización foliar no es una práctica eficiente para incrementar la concentración de calcio en los tubérculos (van der Zaag & French, 1987), sin embargo, es una práctica ampliamente utilizada por los productores de papa en Costa Rica para suplir elementos secundarios como calcio o magnesio y menores como hierro, zinc, boro, molibdeno y manganeso sin evaluar si efectivamente aporta incrementos en el rendimiento u otros beneficios (Bolaños, 2007; INTA, 2017).

Se ha reportado que la fertilización al suelo con calcio sí aumenta el contenido de este elemento en los tubérculos y además mejora la calidad interna del tubérculo y de productos procesados a base de papa (Bussan, 2007; Murayama et al., 2019). Gondwe et al., (2019) encontraron que un incremento en el contenido de calcio en la solución del suelo aumentaba el contenido de calcio en el tubérculo, y establecieron que es necesario mantener un contenido de calcio en la médula del tubérculo por encima de 150 mg kg^{-1} para reducir la incidencia de desórdenes fisiológicos. También se propuso un rango óptimo de $200\text{-}250 \text{ mg kg}^{-1}$ de contenido de calcio en el tubérculo (Karlsson et al., 2006).

Para que la fertilización con calcio durante el ciclo de cultivo sea efectiva, debe realizarse preferiblemente con fuentes de alta solubilidad como el nitrato de calcio, especialmente al momento de la aporca (Kleinhenz et al., 1999, Ozgen et al., 2006).

Varios autores han evaluado el efecto de la fertilización con calcio al suelo sobre el contenido de calcio en el tubérculo y su relación con la incidencia de desórdenes fisiológicos. Simmons y Kelling (1987), evaluaron las respuestas de la papa a la fertilización con calcio en suelos con bajo y alto contenido de este elemento. Estos autores determinaron que en suelos con un bajo contenido de calcio intercambiable ($255\text{-}375 \text{ mg kg}^{-1}$), la aplicación de 300 kg ha^{-1} de calcio, aportados como sulfato de calcio, más 100 kg ha^{-1} de nitrato de calcio en la aporca, incrementaron el rendimiento de tubérculos de primera categoría en 5 ton ha^{-1} respecto al testigo sin aplicación de calcio. A la vez, esa combinación de fertilizantes cálcicos aumentó el contenido de calcio en la médula del tubérculo hasta 100 mg kg^{-1} respecto al testigo.

Simmons et al. (1988) también evaluaron el efecto de distintas dosis, fuentes y momentos de aplicación de calcio sobre el contenido de este elemento en el tubérculo. Los

autores determinaron que la incorporación pre-siembra de 252 kg ha⁻¹ de calcio como sulfato de calcio, incrementó el contenido de calcio en el tubérculo hasta en 45 mg kg⁻¹ respecto al testigo. Estos autores también analizaron el contenido de calcio en los folíolos y no determinaron una correlación entre el contenido de calcio en estos y el de los tubérculos. Los autores concluyeron que medir el contenido de calcio a nivel foliar no revela el estado nutricional del tubérculo en cuanto a contenido de calcio, además de las razones fisiológicas ya mencionadas.

Silva et al. (1991), evaluaron, durante tres años, el efecto de la aplicación de sulfato de calcio en pre-siembra sobre la calidad interna de los tubérculos. Estos autores observaron que la aplicación de calcio como sulfato de calcio, aumentó el contenido de este nutriente en los tubérculos y su gravedad específica, y se redujo la incidencia de desórdenes fisiológicos. De forma contraria, Ozgen et al. (2006), concluyeron que la aplicación pre-siembra de sulfato de calcio no tuvo efecto sobre el contenido de calcio en el tubérculo ni sobre la incidencia de mancha parda interna en el mismo. Sin embargo, los mismos autores encontraron que la fertilización con calcio después de la aporca incrementó el contenido de calcio hasta en un 35%, lográndose una reducción de la incidencia de desórdenes fisiológicos internos hasta en un 30% respecto al testigo sin fertilización con calcio.

Karlsson et al. (2006), realizaron un experimento de fertilización con calcio durante tres años consecutivos, en cinco variedades de papa: Russet Burbank, Atlantic, Snowden, Dark Red Norlan y Superior. Los autores aplicaron un total de 168 kg ha⁻¹ de calcio, fraccionado en tres aplicaciones posteriores a la aporca. Luego de un análisis de la información de los tres años, los autores concluyeron que la incidencia de mancha marrón disminuyó hasta en 45% en los tratamientos de la fertilización con calcio en las variedades Burbank, Atlantic y Snowden, mientras que la aparición de este síntoma en las variedades Dark Red Norlan y Superior fue baja y no tuvo relación con la fertilización con calcio. Además, los mismos autores observaron que la incidencia de mancha marrón fue menor cuando el contenido de calcio en el tubérculo se encontraba entre 200-250 mg kg⁻¹ de materia seca.

La fertilización con calcio en la papa es necesaria sobre todo en suelos con bajo contenido de calcio (255 - 375 mg kg⁻¹) (Simmons & Kelling, 1987). Sin embargo, aún

en suelos con alto contenido de calcio intercambiable (530 - 1340 mg kg⁻¹), la fertilización con calcio aumenta el contenido de ese nutriente en los tubérculos. Gunter y Palta (2008), observaron luego de 45 repeticiones de un mismo experimento, realizado en dos tipos de suelo y por un periodo de 10 años, que el contenido de calcio en el suelo analizado antes de la siembra (extraído con acetato de amonio) no influye en el contenido de calcio en el tubérculo, y que el contenido de este nutriente en los tubérculos solo aumentó cuando se fertilizó con calcio durante el ciclo de cultivo. Incluso en suelos con alto contenido de calcio intercambiable (>1340 mg kg⁻¹) el contenido de calcio en el tubérculo aumentó con la aplicación de 168 kg ha⁻¹ de calcio como nitrato de calcio.

Por otro lado, hay reportes de que la fertilización con calcio al suelo incrementa la calidad de productos procesados a base de papa. Murayama et al., (2019) aplicaron un total de 342 kg ha⁻¹ de calcio en drench, después de iniciada la floración, fraccionado en tres momentos de aplicación. Los autores reportaron que concentración promedio de calcio en el tejido interno del tubérculo pasó de 110 mg kg⁻¹ en el testigo a 171 mg kg⁻¹ en el tratamiento con aplicación del elemento. Estos mismos autores encontraron además que la firmeza de los bastones de papas fritas aumentó hasta en un 37% al aplicar el calcio durante el ciclo de crecimiento.

Dinámica de calcio en el suelo

El calcio presente en el suelo se deriva de la meteorización de rocas y minerales primarios, principalmente la anortita y la augita (Kass, 1996). Otros autores mencionan también otros minerales que liberan calcio, por ejemplo la calcita, la dolomita, la apatita, la biotita, los borosilicatos y los anfíboles (de Mello, 2021).

El calcio está presente en las distintas fracciones del suelo y la interacción de estas es lo que se conoce como la dinámica del calcio (de Mello, 2021). La fracción más importante desde el punto de vista de fertilidad es la fracción soluble o solución del suelo, pues en la misma, el calcio se encuentra disponible para las plantas en forma de catión divalente (Ca⁺²), que es la forma en la cual es absorbido por las raíces (Kass, 1996). Generalmente, el calcio se encuentra en la solución del suelo en concentraciones que

fluctúan entre 3 y 50 mg l⁻¹ y constituye entre el 20 y el 50% de la solución del suelo (Bertsch, 1998).

Otra fracción importante es el calcio intercambiable o complejo coloidal, ya que es la fuente inmediata de cationes hacia la solución del suelo. Estas dos fracciones, la soluble y la intercambiable se encuentran en equilibrio dinámico a través del intercambio catiónico. Conforme ocurren pérdidas de calcio en la solución del suelo, sea por lixiviación o absorción por parte de las raíces, se reponen iones calcio de los que se encuentran adsorbidos al complejo coloidal (Kass, 1996, Bertsch, 1998).

Por último, la fracción orgánica constituye la menos estudiada en la dinámica del calcio ya que el principal proceso que define la disponibilidad de este elemento está en su mayoría asociada a la fracción mineral del suelo (Bertsch, 1998).

El calcio proveniente de los minerales primarios y los fertilizantes y las enmiendas constituyen entradas de calcio al sistema, mientras que la lixiviación y la absorción de este elemento por parte de las raíces se consideran pérdidas.

Contenido de Calcio en suelos Andisoles de Costa Rica

Los suelos del orden Andisol son suelos jóvenes, profundos, de morfología uniforme, cuyo material parental proviene principalmente de cenizas volcánicas. Poseen alto contenido de materia orgánica y pH de ácido a moderadamente ácido (Alvarado et al., 2001). Se considera que los suelos clasificados dentro de este orden presentan una fertilidad de mediana a baja y que su potencial varía de un sitio a otro en función de la composición mineralógica de las cenizas que formaron el suelo (Bertsch, 1998). Alvarado et al. (2001) por ejemplo, mencionan que es común encontrar suelos en las faldas del Volcán Poas con contenidos de calcio y materia orgánica menores que en los suelos formados en las laderas del Volcán Irazú.

La fertilidad potencial de los Andisoles puede estimarse por la suma de cationes intercambiables (Ca, Mg, K) y entre mayor sea esta, los suelos ofrecen mayor capacidad para el desarrollo de cultivos. Sin embargo, generalmente los suelos Andisoles en Costa Rica están en zonas de media a alta pluviosidad, lo cual hace que estos suelos sean

susceptibles a la lixiviación de bases y como consecuencia es frecuente encontrar niveles bajos de bases (Bertsch, 1998; Molina, 1998).

Alvarado et al. (2001) señalan que el contenido medio de calcio en Andisoles de Costa Rica es de 1,95 % como Ca total. En cuanto a calcio disponible, Alvarado (1975) determinó que muestras de suelos de zonas aledañas al Volcán Irazú presentan un ámbito de concentración de calcio, extraído con acetato de amonio pH 7, entre 0,2 y 5,1 cmol (+) kg⁻¹, con un promedio de 2,9 cmol (+) kg⁻¹. Este valor en el contenido de calcio en los alrededores del Volcán Irazú, es menor a los encontrados por Salas y Pacheco (1985) en Andisoles (anteriormente clasificados como Andepts) de la zona alta de Heredia, donde el promedio de contenido de calcio fue 4,8 cmol (+) kg⁻¹.

METODOLOGÍA

Localización del ensayo

El trabajo de campo se llevó a cabo en terrenos en los que se realizó siembra comercial y de producción de semilla, en dos fincas ubicadas en la parte alta de la provincia de Cartago, en las cercanías de los volcanes Irazú y Turrialba. El primer ensayo se estableció en las cercanías del Volcán Irazú (Finca Irazú) (Latitud: N9°58'27.1", Longitud: O83°50'05.9"), a una altura de 3.000 m.s.n.m. El segundo ensayo se sembró en una finca en las cercanías del Volcán Turrialba (Finca Turrialba) (Latitud: N9°58'37.2", Longitud: O83°48'04.9"), a una altura de 2.700 m.s.n.m. En ambas fincas se realizó un análisis químico completo del suelo previo a la siembra (Cuadro 1).

El suelo en ambas fincas se clasifica dentro del orden Andisol, suborden Udands y de acuerdo con las zonas de vida de Holdridge (1982) ambos sitios se clasifican como Bosque Pluvial Montano (bp-M). En los alrededores del volcán Irazú se reporta una precipitación media anual de 2387 mm con una temperatura media anual que oscila entre 5 y 17°C. En los alrededores del volcán Turrialba se presenta una media anual de precipitación de 3500 mm con temperaturas entre 8 y 16 °C (Mora, 2010).

Cuadro 1. Análisis químico de suelos en las fincas donde se realizó el estudio.

Finca	pH (H ₂ O)	Acidez	Ca	Mg	K	CICE*	SA**	P	Zn	Cu	Fe	Mn	MO***
Irazú	5,4	0,78	1,27	0,37	0,18	2,60	30	36	2,7	21	225	2	4,16
Turrialba	5,7	0,24	1,53	0,54	0,13	2,44	10	51	6,9	16	272	7	5,50
Nivel crítico	5,5	0,5	4	1	0,2	5	10	10	3	1	10	5	5

Acidez, Ca y Mg en KCl 1M; pH en agua; P, K, Zn, Fe, Mn y Cu en Olsen (modificado pH 8,5). Carbono total (MO) por combustión seca en auto analizador.

** CICE: Capacidad de intercambio catiónica efectiva

** SA: Porcentaje de saturación de acidez

***MO: Porcentaje de materia orgánica

Material Vegetal

La variedad que se sembró en ambas localidades fue Floresta y la semilla utilizada fue categoría básica. En el campo se utilizó una distancia de siembra de 0,75 m entre surcos y 0,30 m entre plantas para una densidad de siembra de aproximadamente 33 000 plantas hectárea⁻¹. Para facilitar el tránsito dentro del área de cultivo, se dejó un surco sin sembrar por cada seis surcos sembrados.

La variedad Floresta fue liberada por el Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica en el año 1996. Fue recibida como material para evaluación en un grupo de materiales promisorios introducidos desde el Centro Internacional de la Papa. La planta de Floresta es de porte medio-alto, con hojas alternas de color verde pálido, la floración es abundante y la flor es de color blanco con el cáliz verde oscuro. Su ciclo de producción es de 100 a 120 días y produce tubérculos ovalados, de piel y pulpa blancas, con ojos superficiales. Su rendimiento potencial es de 40 t ha⁻¹ (INTA, 2017). Según datos recopilados Bertsch, (2009) el momento de mayor absorción de calcio en este material se da entre los 60-75 DDS.

Siembra del cultivo y establecimiento del ensayo

Ambas parcelas se establecieron durante campaña de siembra del año 2022. En la finca Irazú, se sembró el 26 de mayo y se cosechó el 09 de noviembre. En la finca Turrialba se sembró el 1° de junio y se cosechó el 1° de noviembre. Las prácticas de manejo cultural y control de plagas y enfermedades las realizó cada productor de acuerdo con su plan de manejo. Se usó cimoxanil, mancozeb, propamocarb y fenamidona para el control de *Phytophthora infestans*. Para el control de *Liriomyza* spp se utilizó cartap y avamectina y para el manejo de la polilla de la papa (*Tecia solanivora* y *Phthorimaea operculella*) se utilizó naled y carbaryl. Las dos aplicaciones de fertilizante que hizo el productor a la siembra y a la aporca con fórmulas N - P - K se realizaron también en el área experimental, pero en esta no se aplicó al suelo ningún fertilizante o enmienda a base de calcio.

Se aplicaron en total 121 kg ha⁻¹ de calcio (170 kg ha⁻¹ de CaO) en cada tratamiento, excepto en el testigo. La dosis se seleccionó con base en las dosis utilizadas en los trabajos de Karlsson et al. (2006) y Ozgen y Palta (2004).

El calcio aplicado se distribuyó de la siguiente forma: 46 % al momento de la siembra como sulfato de calcio granulado (Nutrical GR Promoagro, Guatemala; 35% CaO, 15% MgO, 15 % SO₄). Al momento de la aporca se aplicó el restante 54% de la dosis de calcio utilizando como fuente el nitrato de calcio (Disagro, Costa Rica; 15,5 % N, 26,5% CaO). La dosis de nitrato de calcio se fraccionó según cada tratamiento (Cuadro 2). En el tratamiento 1 (F1) no se fraccionó, mientras que en los tratamientos 2 y 3, la cantidad total de esta fuente se fraccionó de forma respectiva en dos (F2) o tres (F3) aplicaciones espaciadas en el tiempo.

El tratamiento testigo no llevó ninguna aplicación de fertilizante con calcio al momento de siembra o aporca, pero se aplicó nitrato de amonio (Disagro, Costa Rica; 33,5% N) para igualar la cantidad de nitrógeno aportada por el nitrato de calcio. La dosis total de nitrato de calcio (350 kg ha⁻¹) aporta 54,2 kg ha⁻¹ de nitrógeno, por lo que se aplicaron 162 kg ha⁻¹ de nitrato de amonio en el testigo, fraccionado en 81 kg al momento de la aporca y 81 kg tres semanas después (Cuadro 2).

Cuadro 2. Fuentes, dosis y momento de aplicación de los fertilizantes utilizados en cada tratamiento.

Tratamiento	Fuentes	Siembra	Aporca	3 SDA	5 SDA
F1	Nombre	CaSO ₄	Ca(NO ₃) ₂		
	% CaO	35	26		
	kg ha ⁻¹ de la fuente	225	350	-	-
	kg ha ⁻¹ CaO	79	91		
F2	Nombre	CaSO ₄	Ca(NO ₃) ₂	Ca(NO ₃) ₂	
	% CaO	35	26	26	
	kg ha ⁻¹ de la fuente	225	175	175	-
	kg ha ⁻¹ CaO	79	45,5	45,5	
F3	Nombre	CaSO ₄	Ca(NO ₃) ₂	Ca(NO ₃) ₂	Ca(NO ₃) ₂
	% CaO	35	26	26	26
	kg ha ⁻¹ de la fuente	225	116,7	116,7	116,7
	kg ha ⁻¹ CaO	79	30,33	30,33	30,33
Testigo	Nombre		NH ₄ NO ₃	NH ₄ NO ₃	
	% N	-	33,5	33,5	-
	kg ha ⁻¹ de la fuente		81	81	
	kg ha ⁻¹ N		27,1	27,1	

*SDA: semanas después de la aporca

En ambas fincas, se midió el contenido de humedad y el potencial hídrico del suelo a dos profundidades: 5 y 20 cm. También se midió la temperatura del suelo a 1, 5, 10, 20 y 50 cm de profundidad, además de la radiación solar y a la temperatura del aire a 1 y 2m de altura desde el suelo. Para el monitoreo de la temperatura del suelo y del aire, se utilizaron termocuplas del tipo T (Omega Engineering Inc., Norwalk, CT). La humedad del suelo se midió mediante sensores TDR Teros 10 y el potencial hídrico del suelo mediante un sensor Teros 21 (Meter Group Inc., Pullman WA). Dichos sensores y termocuplas se conectaron a un datalogger CR1000 (Campbell Scientific, Inc. Logan, UT), con el que se registraron y almacenaron los datos con una frecuencia de 30 minutos.

Con los datos de radiación solar y temperatura del aire se calculó la evapotranspiración potencial mediante la fórmula de Hargreaves y Samani (Hargreaves & Samani, 1985) de la siguiente forma:

$$ET_0 = 0,0135 (T_{med} + 17,78) R_s \text{ (Ecuación 1)}$$

Donde:

ET_0 = es la evapotranspiración potencial (mm día⁻¹)

T_{med} = es la temperatura media (°C), y

R_s = es la radiación solar (MJ m⁻² día⁻¹)

Diseño experimental

En cada finca, se utilizó un diseño de bloques completos al azar (DBCA), con cuatro tratamientos y cuatro repeticiones. Cada repetición fue una unidad experimental, es decir una parcela de 4 m de largo por 4,8 m de ancho con seis surcos, para un total de 19,2 m². La parcela útil consistió en los cuatro surcos centrales, menos 0,5 m a cada lado, para un área útil de 9,6 m².

VARIABLES EVALUADAS

Al momento de la cosecha se pesaron los tubérculos de 10 plantas dentro de la parcela útil en cada repetición, con lo cual se obtuvo el rendimiento, definido en kg ha⁻¹ o lo que es igual kg planta⁻¹ x 33 000 plantas ha⁻¹. Además, se contaron los tubérculos por planta y estos se partieron de forma longitudinal para evaluar la presencia de corazón hueco y estimar así la incidencia de este. Esta variable se calculó como un porcentaje de incidencia mediante la siguiente ecuación:

$$CH (\%) = \frac{\text{Tubérculos con síntoma}}{\text{Total de tubérculos}} \times 100 \quad \text{(Ecuación 2)}$$

Además, se tomó una muestra compuesta de 1 kg de tubérculos de cada tratamiento y se le midió el contenido de calcio [Ca] (mg kg⁻¹) en el Laboratorio de Suelos y Foliar del Centro de Investigaciones Agronómicas (LSF-CIA), Universidad de Costa Rica. Para ello, se consultó la metodología descrita por Gondwe et al. (2019). Sin embargo, se hicieron dos cambios en esta metodología: 1) Para la digestión del tejido se utilizó el ácido

nítrico en lugar de ácido sulfúrico y 2) En lugar de ICP-AES se utilizó ICP-MS por considerarse más sensible para las concentraciones de calcio en este tipo de tejido.

Análisis estadístico

Para el análisis de los datos obtenidos en el presente estudio, se ajustó un modelo lineal (LM por sus siglas en inglés) para cada una de las variables dependientes %CH, rendimiento y [Ca], incluyendo los factores de clasificación tratamiento y localidad. Se probaron los supuestos de normalidad y homocedasticidad de los residuos para cada modelo ajustado. Una vez verificados estos supuestos, se identificó el efecto de las variables de clasificación del modelo con un nivel de significancia del 5% (p-value <0,05) para cada una de las variables evaluadas. Para la separación de las medias se utilizó la prueba de LSD-Fisher (diferencia mínima significativa, por sus siglas en inglés) a un nivel de p-value <0,05.

Se generó un modelo de regresión lineal, con los datos de las dos fincas juntas, para determinar si existía correlación entre las variables incidencia de CH (%) y contenido de calcio en el tubérculo (mg kg^{-1}).

Los procedimientos anteriormente mencionados se realizaron mediante el uso del programa R Studio (R version 4.3.0 (2023-04-21) "Already Tomorrow") (RStudio Core Team, 2023 mediante los paquetes Agricolae).

RESULTADOS

Para la variable CH (%) se encontró significancia estadística para el factor “tratamiento” ($p < 0,05$), no así para el factor “localidad” (Cuadro 3). Por el contrario, para la variable rendimiento, se obtuvo significancia estadística para el factor “localidad” más no se observó un efecto significativo de los tratamientos ($p > 0,05$). En cuanto a [Ca], el modelo lineal indica que ambos factores tienen significancia estadística en los resultados, pero se observó que es mayor el efecto del factor tratamiento (Cuadro 3).

Cuadro 3. Resumen de los factores dentro del modelo lineal realizado para las variables de interés evaluadas en el presente estudio.

Factor	gl	SC	CM	F	p-value
CH (%)					
Tratamiento	3	351,51	117,17	3,91	0,0192
Localidad	1	109,23	109,23	3,65	0,0668
Residuos	27	808,11	29,93		
Rendimiento (kg ha⁻¹)					
Tratamiento	3	37635159	12545053	0,46	0,7138
Localidad	1	316575703	316575703	11,56	0,0021
Residuos	27	739359534	27383686		
[Ca] (mg kg⁻¹)					
Tratamiento	3	68709	22903	8,37	0,0004
Localidad	1	18673	18673	6,82	0,0145
Residuos	27	73889	2737		

gl: grados de libertad; SC: suma de cuadrados; CM: cuadrado medio; F: Valor de F.

Se encontró que los tratamientos de fertilización con calcio al suelo disminuyeron la incidencia de CH (%) en comparación con el tratamiento testigo (Figura 1A), más no se observó diferencia entre aplicar el nitrato de calcio a la aporca en una sola dosis o fraccionado. También se observó que la incidencia de CH fue similar en ambas fincas evaluadas (Figura 1B).

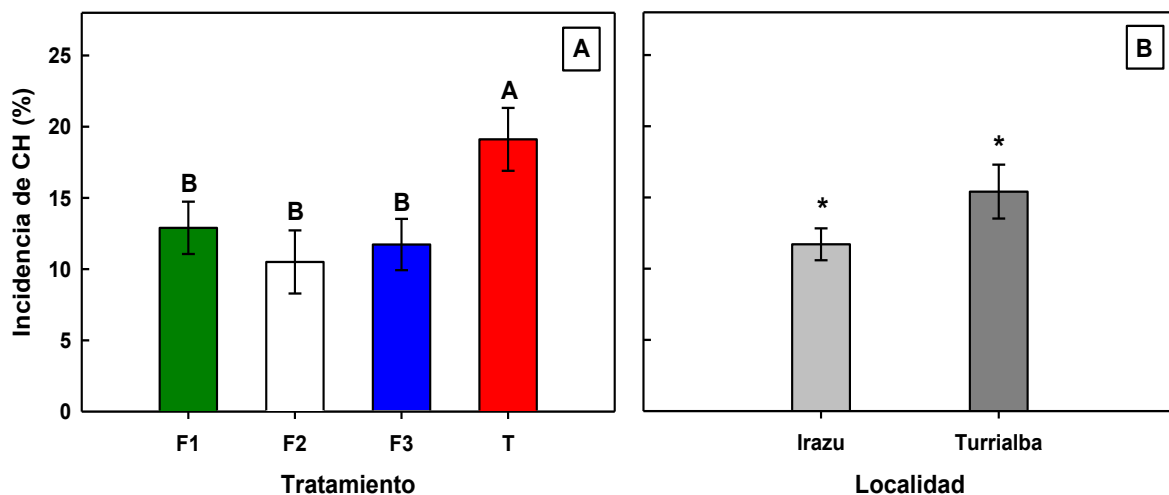


Figura 1. Variación en la incidencia del corazón hueco (CH) según: A) la aplicación de calcio y su fraccionamiento al momento de la aporca, y B) la localidad evaluada. Letras distintas denotan diferencias significativas de acuerdo con la prueba LSD Fisher ($p < 0,05$). *: Sin diferencias significativas entre las medias

Al evaluar la variable rendimiento, se observó que la fertilización con calcio no tuvo ningún efecto sobre el mismo, pues no se encontró diferencia significativa entre los tratamientos a los que se les fertilizó con calcio y el testigo sin aplicación (Figura 2A). Por otro lado, se determinó que el rendimiento fue significativamente mayor en la finca Irazú que en la finca Turrialba (Figura 2B).

En cuanto al contenido de calcio en el tubérculo, los datos obtenidos mostraron que la concentración de este elemento fue significativamente mayor al fertilizar con calcio en comparación con el tratamiento testigo (Figura 3A). Se observó la tendencia a que, entre más veces se fraccionó el calcio aplicado al momento de la aporca aumentó el contenido del calcio en el tubérculo (Figura 3A). En adición, en la finca Turrialba el contenido de calcio en el tubérculo fue mayor que en la finca Irazú (Figura 3B)

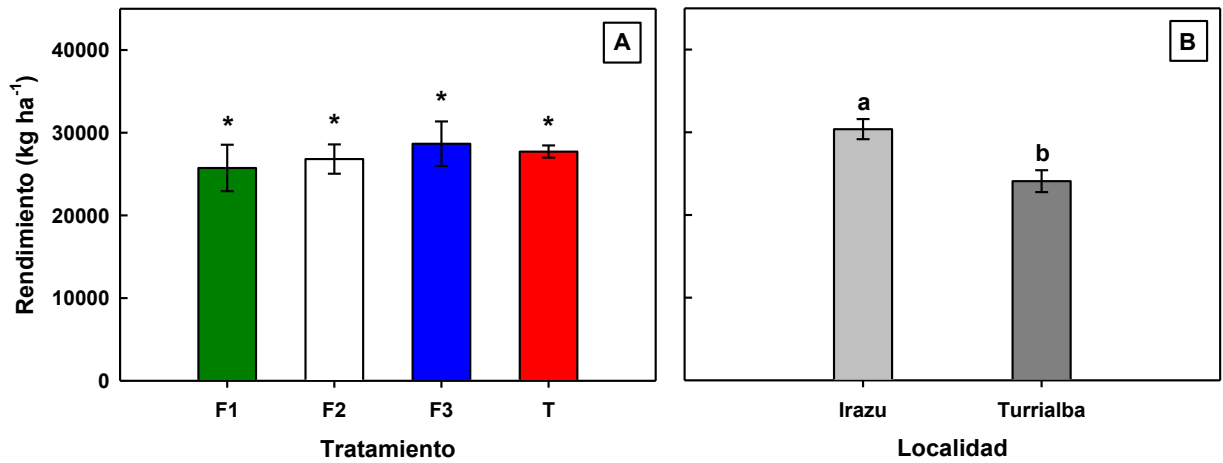


Figura 2. Valores de rendimiento de la papa obtenidos según: A) la aplicación de calcio y su fraccionamiento al momento de la aporca, y B) la localidad evaluada. Letras distintas denotan diferencias significativas de acuerdo con la prueba LSD Fisher ($p < 0,05$). *: Sin diferencias significativas entre las medias.

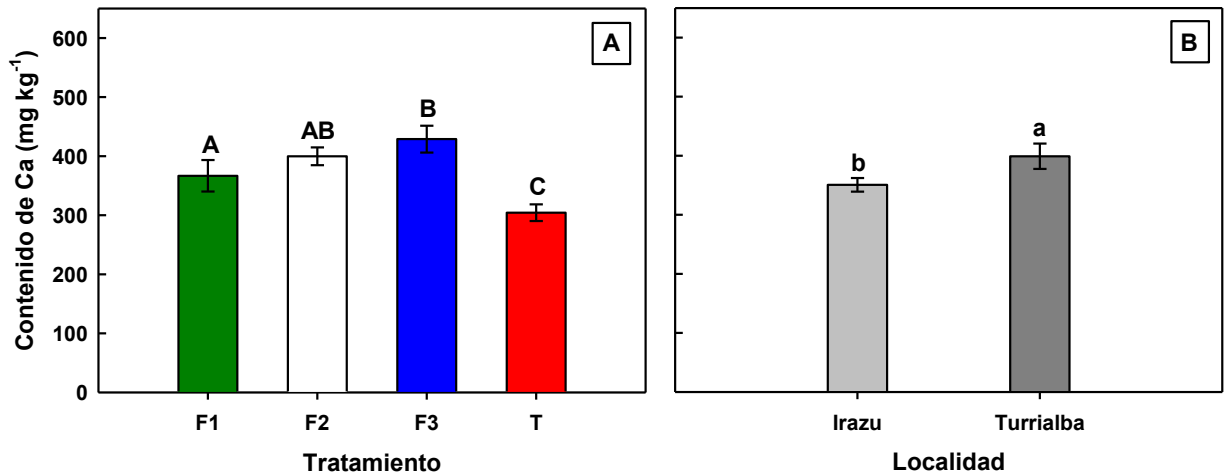


Figura 3. Variabilidad en el contenido de Ca en el tubérculo en función de: A) la aplicación de calcio y su fraccionamiento al momento de la aporca, y B) la localidad evaluada. Letras distintas denotan diferencias significativas entre las medias por tratamiento o localidad de acuerdo con la prueba LSD Fisher ($p < 0,05$).

El modelo de regresión ajustado para estimar la incidencia de CH a partir del contenido de Ca en el tubérculo, así como el comportamiento de ambas variables se

resume en la Figura 4. El modelo de regresión no presentó significancia estadística, lo cual no permite relacionar la incidencia de CH y el contenido de Ca en el tubérculo.

La pendiente de la curva es negativa, por lo que se observa una tendencia a que entre más contenido de calcio tengan los tubérculos podrían presentar una menor incidencia de CH. Sin embargo, dicha tendencia no fue estadísticamente significativa ($p > 0,05$).

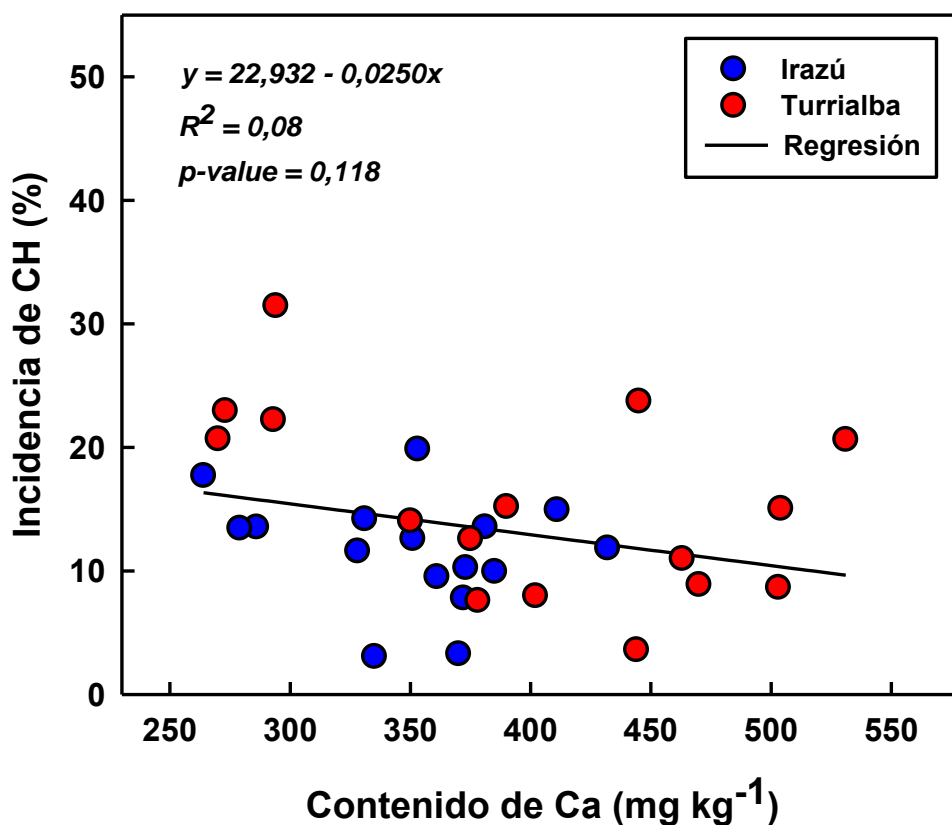


Figura 4. Relación entre la concentración de calcio del tubérculo y la incidencia de corazón hueco en tubérculos de papa (variedad Floresta) en la zona alta de Cartago, Costa Rica, 2022.

Se observó que la dinámica en el contenido de agua en el suelo estuvo mediada por abundantes eventos de precipitación pluvial que ocurrieron a lo largo del experimento en ambas fincas (Figuras 5 y 6). Por ejemplo, en la finca Irazú, el contenido de humedad volumétrica en el suelo medido a 5 y a 20 cm de profundidad se mantuvo de forma respectiva entre 0,22 y 0,38 m³m³ y entre 0,27 y 0,41 m³m³ (Figura 5). En la finca Turrialba estos valores de humedad volumétrica en el suelo oscilaron entre 0,29 y 0,48

m^3m^3 a 5 cm y entre 0,32 y 0,45 m^3m^3 a 20 cm de profundidad (Figura 6). De forma general, estos valores de humedad del suelo observados en ambas fincas ocuparon entre 25 y 60% del espacio poroso total del suelo.

Los valores del potencial del agua en suelo evaluados en ambas fincas se mantuvieron por debajo de -33 kPa, valor de potencial que se define comúnmente como potencial del agua del suelo a capacidad de campo. En específico, en la finca Irazú los valores de potencial presentaron un rango de variación entre -17,4 y -0,10 kPa a 5cm de profundidad, mientras que a 20 cm, estos valores oscilaron entre -12,90 y -0,10 kPa (Figura 5). De forma similar, en la finca Turrialba, valores de potencial del agua en el suelo medidos a 5 cm se mantuvieron entre -18,08 y 0 kPa. A 20 cm de profundidad, estos valores de potencial hídrico variaron entre -4,61 y 0 kPa (Figura 6).

El comportamiento de la radiación solar (R_s) y la evapotranspiración potencial (ET_0) también se evaluó para ambas fincas. En el caso de la finca Irazú los valores de R_s oscilaron entre 3,09 y 29,70 $MJ m^{-2} dia^{-1}$ (Figura 5), mientras que los valores de ET_0 variaron entre 0,1 y 2,1 $mm dia^{-1}$. En la finca Turrialba los valores de R_s variaron entre 3,2 y 27,04 $MJ m^{-2} dia^{-1}$ mientras que los valores de ET_0 oscilaron entre 0,9 y 2,01 $mm dia^{-1}$ (Figura 6).

En general, estos valores de contenido y potencial del agua en el suelo, así como la evapotranspiración potencial, sugieren una gran disponibilidad del agua en el ambiente edáfico durante todo el periodo de evaluación del cultivo en ambas localidades. El comportamiento en ambos sitios de los parámetros físicos del suelo y los ambientales como la radiación y evapotranspiración potencial coinciden con la distribución de las lluvias diarias y los subsecuentes periodos de déficit o superávit del agua en el suelo (Figuras 5 y 6).

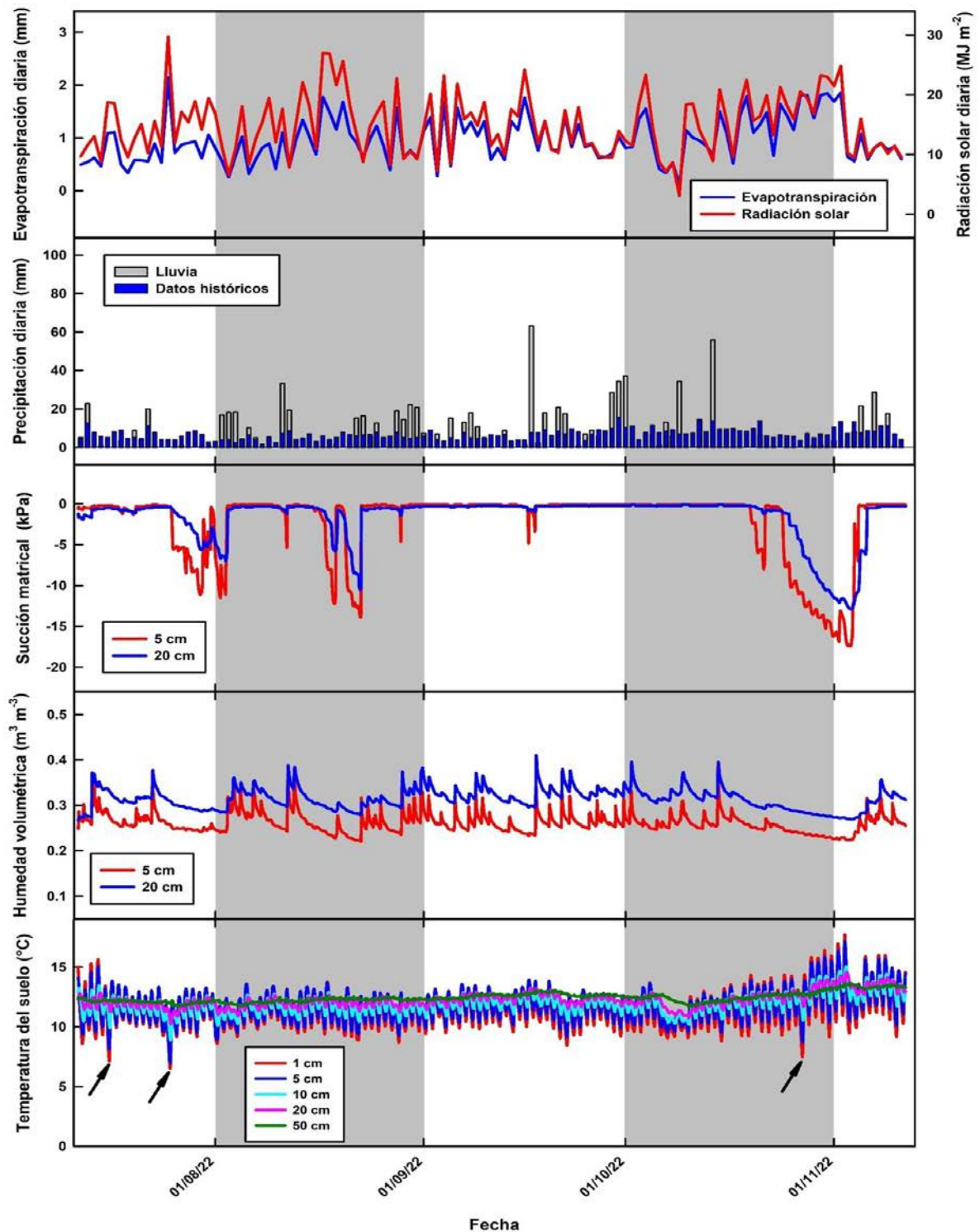


Figura 5. Variables climáticas y edáficas monitoreadas y registradas en la finca Irazú, zona alta de Cartago, Costa Rica. 2022. Flechas negras señalan eventos de muy baja temperatura en el suelo.

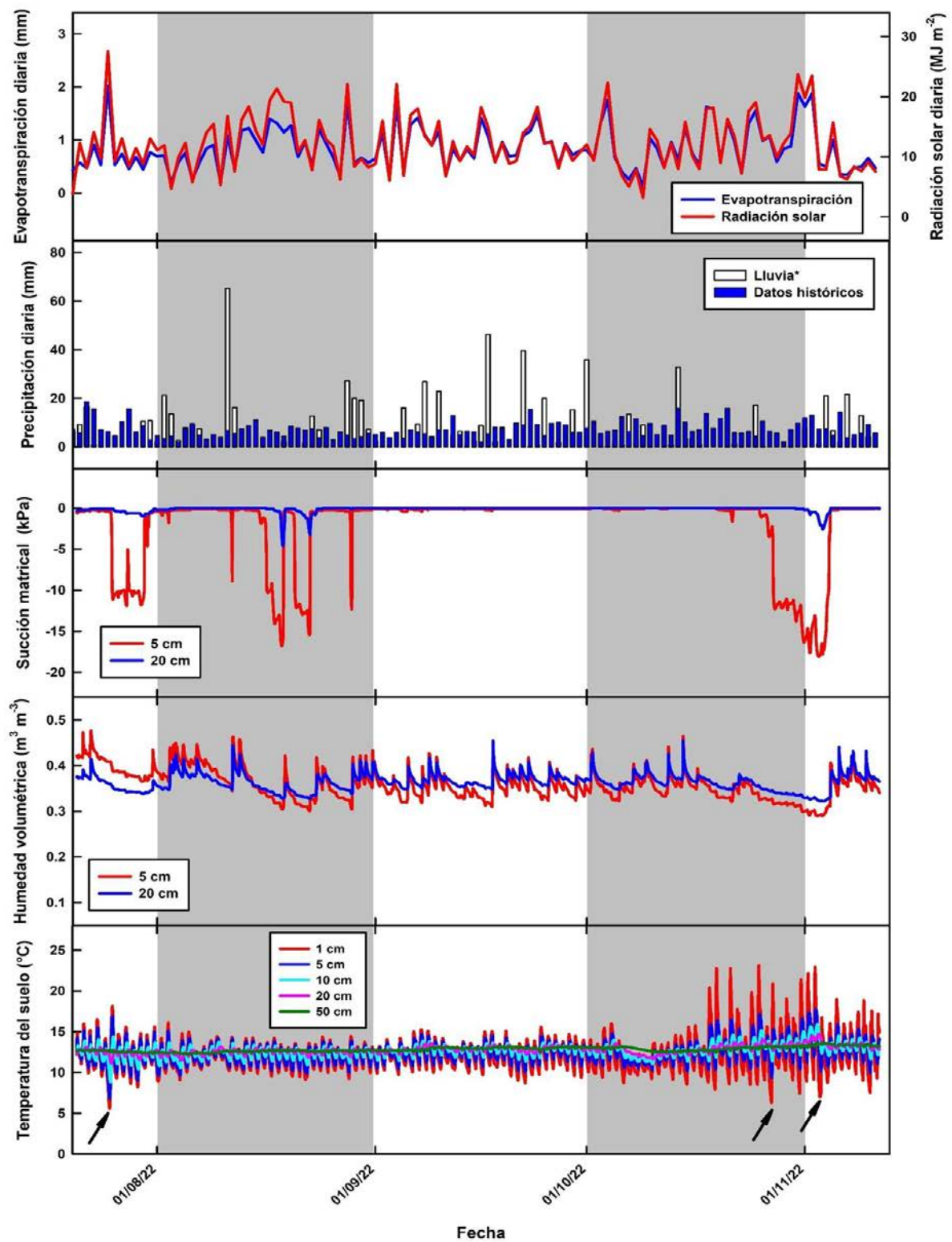


Figura 6. Variables climáticas y edáficas monitoreadas y registradas en la finca Turrialba, zona alta de Cartago, Costa Rica. 2022. *Datos de una estación meteorológica cercana. Flechas negras señalan eventos de muy baja temperatura en el suelo.

Al evaluar el comportamiento de la temperatura del suelo (T_s) durante el ciclo de cultivo en ambas fincas, se observó de forma general que a medida que se profundiza en el perfil del suelo, entre 1 – 50 cm, la temperatura presenta un descenso marcado en la variabilidad asociada a fluctuaciones en la temperatura ambiental. En la finca Irazú se observaron dos eventos durante el mes de julio donde la temperatura medida entre 1 y 5 cm presentó valores menores a los 8°C (Figura 5). En la finca Turrialba se observó un comportamiento similar en la variabilidad de la temperatura en el perfil del suelo, alcanzando un valor cercano a 12,5° C a los 50 cm. Durante el mes de julio se registraron temperaturas menores a 8,5° C en los primeros 10 cm del suelo en al menos una ocasión.

En general en ambas fincas se registraron valores de temperatura en el suelo entre 10° y 15°C en las profundidades cercanas al área de formación de los tubérculos, 5-20 cm de profundidad. Estos eventos de baja temperatura en el suelo podrían explicar en el desarrollo de CH en la zona alta de Cartago

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en este trabajo demostraron que, bajo las condiciones del cultivo de la papa en dos localidades de la zona alta de Costa Rica, la incorporación de calcio en el plan de fertilización de la variedad Floresta, disminuyó la incidencia del desorden fisiológico CH. Estos resultados coinciden con los reportados por Clough (1994) y Ozgen et al. (2006), quienes encontraron que al aplicar fuentes solubles de calcio al suelo durante el ciclo de cultivo de la papa se redujo la incidencia de CH y otros desórdenes fisiológicos que afectaron la calidad interna del tubérculo. Al fertilizar con calcio al suelo se enriquece la solución del suelo con este elemento, especialmente si su contenido se considera bajo (Cuadro1), esto permite que las raíces de los estolones y las raíces que tienen las yemas de los tubérculos absorban ese calcio y pueda ser transportado al tubérculo (Kratzke & Palta. 1986; Busse & Palta, 2006; Palta, 2010). Habib y Donnelly (2002) encontraron también que el calcio puede ser absorbido por la epidermis del tubérculo y alcanzar la médula si este elemento se encuentra en una concentración mayor a los 120 ppm en la solución del suelo.

La incidencia de CH según el fraccionamiento de la segunda fuente de calcio, aplicado como nitrato de calcio, fue estadísticamente similar en los tres tratamientos. Es decir que, bajo las condiciones de este estudio con aplicar una sola vez toda la dosis de nitrato de calcio se lograría reducir el síntoma. Estos resultados anteriormente descritos deben contemplarse considerando el modelo de siembra de nuestro país, donde la aplicación del fertilizante se realiza de forma manual. Desde el punto de vista práctico, realizar el fraccionamiento del calcio más allá de la aporca implicaría costos económicos adicionales en mano de obra. Estos resultados obtenidos al fraccionar la dosis de calcio a la aporca difieren con lo reportado en la literatura, pues algunos autores como Ozgen & Palta (2004), Ozgen et al. (2006) y Karlsson et al. (2006) encontraron que al fraccionar el calcio después de la aporca hubo reducción de la incidencia de desórdenes fisiológicos comparado con una sola aplicación. Sin embargo, estos estudios fueron realizados en condiciones de cultivo diferentes y bajo manejos agronómicos distintos que permitían el fertirriego o la micro-aspersión, por lo que se podía fraccionar el calcio tantas veces como se deseara, práctica no viable bajo nuestras condiciones de cultivo.

De forma general, se observó una mayor incidencia de CH en la finca Turrialba. Las mediciones de contenido de agua en el suelo en esa finca mostraron que hubo un mayor contenido volumétrico de agua, así como una mayor disponibilidad de esta en términos energéticos (potencial del agua), pues este valor se mantuvo siempre en valores muy cercanos a 0 kPa (Figura 6), lo cuales se asocian con agua libre y saturación del espacio poroso del suelo (Hillel, 1998; Radcliffe y Šimůnek, 2010). Además, en esta localidad se observó una reducción en la densidad de siembra debido a la pérdida de plantas por exceso de precipitación durante la siembra y en días posteriores. Estos dos factores, agua en el suelo cerca de saturación durante el llenado y baja densidad de siembra, en conjunto con valores de temperatura de suelo que fluctuaron entre los 10-15°C, son mencionados en la literatura como los tres principales desencadenantes de mancha marrón y CH (Hiller et al., 1985; Luthra et al., 2020), lo que podría explicar por qué se presentó mayor incidencia de CH en la finca Turrialba aun cuando los tubérculos cosechados en esta finca tuvieron mayores contenidos de calcio.

En ambas localidades, la aplicación de nitrato de calcio incrementó la concentración de este elemento en el tubérculo con respecto al testigo sin aplicación

(Figura 3). Se observó una tendencia al incremento de este elemento en el tubérculo conforme se fraccionó más veces la dosis. Estos resultados concuerdan con lo encontrado por Kleinhenz et al., (1999), quienes mencionan que al usar una fuente soluble de calcio como el nitrato de calcio o el cloruro de calcio, y fraccionar la dosis después de la aporca, se encontraron mayores contenidos de este nutriente en el tubérculo, en comparación con los tubérculos producto de una sola aplicación a la aporca. Además, estos mismos autores encontraron que los tubérculos con un contenido de calcio menor a 100 mg kg^{-1} , presentaron 5,8% más de incidencia de desórdenes fisiológicos que aquellos con un contenido de calcio mayor a esa concentración.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo no coinciden con los obtenidos por Clough (1994), quien evaluó el efecto de distintas dosis de sulfato de calcio antes de la siembra y distintas dosis de nitrato de calcio en la aporca, sobre el contenido de calcio en el tubérculo y la incidencia de desórdenes fisiológicos. El autor concluyó que la aplicación de 68 kg ha^{-1} de calcio pre-siembra y de 68 kg ha^{-1} al momento de la aporca, sin fraccionar, incrementó el contenido de calcio en el tubérculo hasta 300 mg kg^{-1} , un 23% más que en el tratamiento testigo). También hay reportes de que una sola dosis de calcio a la aporca incrementa el contenido de calcio en el tubérculo, por lo que la variación entre los resultados de los estudios anteriormente mencionados pudo deberse a las distintas condiciones agroecológicas del sitio de ensayo.

Los valores de concentración de calcio en el tubérculo medidos en el presente trabajo, fueron superiores a los reportados en la literatura como óptimos, aun considerando que el suelo evaluado en ambas fincas presentó niveles de calcio considerados como bajos (Cuadro 1) de acuerdo con las recomendaciones de Bertsch (1998). El tratamiento testigo por ejemplo, presentó en promedio una concentración de 304 mg kg^{-1} de calcio, mientras que Gondwe et al. (2019) establecieron que para reducir la incidencia de desórdenes fisiológicos en los tubérculos la concentración de este elemento en el tubérculo debe estar por encima de 150 mg kg^{-1} . Karlsson et al. (2006) propusieron un rango óptimo de $200\text{-}250 \text{ mg kg}^{-1}$ de calcio en el tubérculo, valores inferiores al promedio obtenido en el presente estudio para el tratamiento testigo, el cual fue estadísticamente más bajo que los tratamientos con aplicación de calcio.

Las diferencias observadas se podrían asociar a la metodología empleada en cada estudio para medir el calcio en el tubérculo. Karlsson et al. (2006), mencionan que la preparación de los tubérculos previo al análisis de contenido de Ca, lleva un paso adicional, el cual es pelar los tubérculos quitando la cáscara y una capa más que incluya el anillo vascular, dejando solamente el tejido medular para analizar. Gondwe et al. (2019) pelaron los tubérculos pero de manera más superficial ya que dejaron la corteza y el anillo vascular junto con la médula. En ambos trabajos, se midió el contenido de calcio mediante ICP-AES, mientras que en el presente trabajo se usó una metodología más sensible (ICP-MS).

A pesar de las diferencias en la metodología de análisis, es de considerar que este método de análisis de calcio en el tubérculo aplicado en este estudio ha sido pionero en Costa Rica, y fue realizado bajo métodos sometidos a los estándares de calidad, calibración de métodos y verificación de niveles de precisión (5-10%) requeridos en un laboratorio acreditado (Corrales et al. 2005)

Otro aspecto importante de considerar es que la variedad Floresta se considera como una variedad extractora de calcio, por lo que podría necesitar mayores concentraciones del elemento en el tejido del tubérculo para contrarrestar los factores ambientales y de manejo que propician el CH. Al respecto, INTA (2017), encontró en Potrero Cerrado de Oreamuno, que para una producción de 25 t ha^{-1} esta variedad extrajo en total 29 kg ha^{-1} de calcio, de los cuales 6 kg ha^{-1} fueron extraídos por la cosecha ($0,24 \text{ kg Ca ton}^{-1}$). Cabalceta et al. (2005), encontraron que la variedad MNF-80 en una finca aledañas al Volcán Irazú, extrajo en total 12 kg ha^{-1} de calcio para una producción de 36 ton ha^{-1} , de los cuales la cosecha representó 4 kg ha^{-1} es decir $0,11 \text{ kg Ca ton}^{-1}$. En la variedad Granola, Bertsch (2009), encontró que para un rendimiento de 38 ton ha^{-1} la planta de papa extrajo 25 kg ha^{-1} de calcio en total, de los cuales, 4 kg ha^{-1} fueron acumulados en los tubérculos, lo que significa que esta variedad necesitó $0,10 \text{ kg Ca ton}^{-1}$. Ulloa (2021), encontró en la variedad Elbe-UCR que para un rendimiento promedio de 43 ton ha^{-1} se extrajeron $52,6 \text{ kg ha}^{-1}$ de calcio, de los cuales $2,4 \text{ kg ha}^{-1}$ fueron acumulados por la cosecha ($0,05 \text{ kg Ca ton}^{-1}$).

Si bien estos datos de extracción y acumulación de calcio por parte de los tubérculos de cada variedad dependen mucho de las condiciones en las cuales se realizó

el estudio de absorción de nutrimentos, un mayor requerimiento de calcio en la variedad Floresta podría estar relacionado a una mayor susceptibilidad al CH de esta, como se ha observado bajo condiciones de campo en el presente estudio.

Los resultados obtenidos para las variables contenido de calcio e incidencia de CH mostraron que existe una ligera tendencia a una reducción de la incidencia de CH asociada a un mayor contenido de calcio en el tubérculo. Al respecto, Ozgen et al. (2006), sí encontraron una correlación significativa entre el contenido de calcio en la médula del tubérculo y la incidencia de un desorden fisiológico conocido como mancha parda interna.

Los datos obtenidos durante la medición de la temperatura del suelo (Figuras 5 y 6) mostraron que en las fincas ubicadas en la zona alta de la provincia de Cartago, en los alrededores de los volcanes Irazú y Turrialba, presentaron valores muy similares a los rangos reportados en la literatura (10-15°C) como inductores de los síntomas de CM y CH (Van Denburgh et al. 1980; Hiller & Koller, 1984; Hiller et al. 1985). Esto podría explicar por qué los productores han reportado un aumento en la incidencia de dichos desórdenes fisiológicos solo en la zonas de siembra por encima de los 2500 m.s.n.m. y no en las zonas intermedia y baja.

Las condiciones edáficas que conducen a la expresión de los síntomas de CH, como temperatura de suelo entre 10-15°C, no pueden ser controladas de forma directa, por lo que es deseable introducir a la agrocadena de papa cultivares con tolerancia a este desorden fisiológico y otros desórdenes que se presentan en la papa, según lo recomendado en la literatura (Jansky & Thompson, 1990; Bamberg et al., 1998; Zorrilla et al. 2012).

CONCLUSIONES

1. La fertilización con calcio en el cultivo de papa var. Floresta en la zona alta de Cartago, disminuyó la incidencia de CH, independientemente del fraccionamiento de las fuentes de fertilizante con calcio.
2. La fertilización con calcio en el cultivo de papa var. Floresta en la zona alta de Cartago, incrementó la concentración de este elemento en los tejidos del tubérculo.
3. Al fraccionar la segunda aplicación de calcio se incrementó la concentración del elemento en el tubérculo.
4. Bajo las condiciones de este estudio, un aumento en el contenido de calcio en el tubérculo, no necesariamente redujo la incidencia de CH. Sin embargo, debido a que los tubérculos presentan contenidos bajos de calcio de forma natural, aumentar el contenido de este elemento en los tubérculos mediante la fertilización al suelo propiciaría una menor incidencia de CH.
5. Los valores medidos de temperatura y contenido y disponibilidad de agua en el suelo fueron propicios para el desarrollo del desorden fisiológico CH.

RECOMENDACIONES

Se recomienda en los futuros estudios sobre desórdenes fisiológicos en papa, evaluar otras dosis y combinaciones de fuentes de calcio.

También se sugiere continuar con el monitoreo de las variables ambientales y edáficas en las fincas de las zonas productoras de papa en Cartago, de modo que esta información pueda ser utilizada por los productores e investigadores para la toma de decisiones técnicas, como en estudios de modelado de variables edáficas y predicción de la ocurrencia de desórdenes fisiológicos en el cultivo de la papa.

LITERATURA CITADA

- Alvarado, A.; Bornemisza, E., Cabalceta, G., Forsythe, W., Henríquez, C., Mata, R.; Molina, E.; Salas, R.; Bertsch, F. (2001). *Suelos derivados de cenizas volcánicas (Andisoles) de Costa Rica*. (1° ed.). Asociación Costarricense de Ciencias del Suelo (ACCS), San José, Costa Rica.
- Alvarado, A. (1975). Fertilidad de algunos Andepts dedicados a potreros en Costa Rica. *Turrialba* 25, (3): 265-270.
- Andrade, J. L., Kromann, P., & Otazú, V. (Eds.). (2015). *Manual para la producción de semilla de papa usando aeroponía: diez años de experiencias en Colombia, Ecuador y Perú*. Centro Internacional de la Papa.
- Bamberg, J. B., Palta, J. P., Peterson, L. A., Martin, M., & Krueger, A. R. (1998). Fine screening potato (*Solanum*) species germplasm for tuber calcium. *American Journal of Potato Research*, 75(4), 181-186. <https://doi.org/10.1007/BF02853571>
- Bertsch, F. (1998). *La fertilidad de los suelos y su manejo*. (1° ed.). Asociación Costarricense de Ciencias del Suelo (ACCS), San José, Costa Rica.
- Bertsch, F. (2009). *Absorción de nutrimentos por los cultivos* (1° ed.). Asociación Costarricense de Ciencias del Suelo (ACCS), San José, Costa Rica.
- Brenes, A., Rivera C., & Vásquez, V. (2002). *Principales enfermedades y plagas de la papa en Costa Rica* (1° ed.). EUNED.
- Bolaños, A. (2007). *Introducción a la olericultura* (1° ed.) EUNED
- Bussan, A. J. (2007). Brown centre and hollow heart. The canon of potato science. *Potato Research*, 50(3-4), 395-398. <https://doi.org/10.1007/s11540-008-9088-z>

- Busse, J. S. & Palta, J. P. (2006). Investigating the in vivo calcium transport path to developing potato tuber using ^{45}Ca : a new concept in potato tuber calcium nutrition. *Physiologia Plantarum*, 128(2), 313-323. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2006.00741.x>
- Cabalceta, G., Saldias, M., & Alvarado, A. (2005). Absorción de nutrimentos en el cultivar de papa MNF-80. *Agronomía Costarricense* 29(3): 107-123.
- Clough, G. H. (1994). Potato tuber yield, mineral concentration, and quality after calcium fertilization. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 119(2), 175-179. <https://doi.org/10.21273/jashs.119.2.175>
- Corrales, M., Bertsch, F., & Bejarano, J. A. (2005). Los laboratorios de análisis de suelos y foliares en Costa Rica: Informe del comité de laboratorios de análisis de suelos, plantas y aguas. *Agronomía Costarricense* 29(3): 125-135.
- Cosgrove, D. J. (2005). Growth of the plant cell wall. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 6(11), 850-86. <https://doi.org/10.1038/nrm1746>
- Crumbly, I. J., Nelson, D. C., Duysen, M. E. (1973). Relationships of hollow heart in Irish potatoes to carbohydrate reabsorption and growth rate of tubers. *American Potato Journal*, 50, 266-274. <https://doi.org/10.1007/BF02851866>
- de Mello P, R. (2021). Calcium. In R. de Mello (Ed.), *Mineral nutrition of tropical plants*. (1st ed., pp. 149-164). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-71262-4_8
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., Gonzalez, L., Tablada, M., Robledo, C.W. (2017). InfoStat version 2017. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <https://www.infostat.com.ar/>

- Earle, R. (2020). *Feeding the People: The Politics of the Potato*. (1 ed). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781108688451.001>
- Ehlenfeldt, M. K. (1992). Evaluation of differential tuber tissue expansion and plant transpiration as methods for early hollow heart screening. *American Potato Journal*, 69(9), 537-546. <https://doi.org/10.1007/BF02852126>
- Gondwe, R. L., Kinoshita, R., Suminoe, T., Aiuchi, D., Palta, J., & Tani, M. (2019). Soil and tuber calcium affecting tuber quality of processing potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivars grown in Hokkaido, Japan. *Soil Science and Plant Nutrition*, 65(2), 159-165. <https://doi.org/10.1080/00380768.2019.1579044>
- Gunter, C. C., & Palta, J. P. (2008). Exchangeable soil calcium may not reliably predict in-season calcium requirements for enhancing potato tuber calcium concentration. *American Journal of Potato Research*, 85(5), 324-331. <https://doi.org/10.1007/s12230-008-9025-3>
- Habib, A., & Donnelly, D. J. (2002). Calcium translocation and accumulation into potato tubers. *Potato Research*, 45(1), 17-24. <https://doi.org/10.1007/BF02732215>
- Hargreaves, G.H., Samani, Z.A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Eng. in Agric.*, 1(2): 96-99.
- Hawkesford, M., Horst, W., Kichey, T., Lambers, H., Schjoerring, J., Skrumsager, I. & White, P. (2012). Functions of macronutrients. In: P. Marschner, (Ed.), *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. (3rd ed., pp. 135-189). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00006-6>
- Hillel, D. (1998). *Environmental Soil Physics*. Academic Press. San Diego, USA. 771 p

- Hiller, L.K., Koller, D.C. & Thornton, R. (1985). Physiological disorders of potato tubers. In: P. Li (Ed.), *Potato Physiology*. (1st ed., pp. 389-443). Academic Press.
- Hiller, L. K., & Koller, D. C. (1982). Brown center and hollow heart as a quality factor. In Proc Washington State Potato Conference (Vol. 21, pp. 101-108).
- Hiller, L.K. & Koller, D.C. (1984). Effect of early season soil moisture levels and growth regulator applications on internal quality of Russet Burbank potato tubers. Proc. Washington State Potato Conference (Vol. 23, pp. 67-73).
- Hoehn, E. (1977). *The effects of root zone temperature on plant development and the occurrence of hollow heart and brown streak necrosis in the potato*. Tesis M.Sc. University of Saskatchewan. <http://hdl.handle.net/10388/etd-07052012-120322>.
- Holdridge, L. (1982). *Ecología basada en zonas de vida*. (1° ed.). IICA.
- INTA (Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria). (2017). *Manual del Cultivo de papa (Solanum tuberosum L.) en Costa Rica*. (1°ed.) INTA
- .
- Jansky, S. H., & Thompson, D. M. (1990). Expression of hollow heart in segregating tetraploid potato families. *American Potato Journal*, 67, 695-703.
- Karlsson, B., Palta, J. & Crump, P. (2006). Enhancing tuber calcium concentration may reduce incidence of blackspot bruise injury in potatoes. *HortScience*, 41(5), 1213-1221. <https://doi.org/10.21273/hortsci.41.5.1213>
- Kass, D. C. (1996). *Fertilidad de suelos*. (1° ed.). EUNED. San José, Costa Rica.

- Kleinhenz, M. D., Palta, J. P., Gunter, C. C. & Kelling, K. A. (1999). Impact of Source and Timing of Calcium and Nitrogen Applications on Atlantic Potato Tuber Calcium Concentrations and Internal Quality. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 124(5), 498-506. <https://doi.org/10.21273/JASHS.124.5.498>
- Kratzke, M. G., & Palta, J. P. (1986). Calcium accumulation in potato tubers: role of the basal roots. *HortScience*, 21(4), 1022-1024.
- Luthra, S. K., Gupta, V.K., Lal, M. (2020). Screening for hollow heart in potato (*Solanum tuberosum* L.) genotypes. *Potato Journal*, 47(1), 54-58.
- Miller, D., & Martin, M. (1985). Effect of water stress during tuber formation on subsequent growth and internal defects in Russet Burbank potatoes. *American Potato Journal*, 62(2), 83-89. <https://doi.org/10.1007/BF02903465>
- Mogen, K. L. & Nelson, D. C. (1986). Some anatomical and physiological potato tuber characteristics and their relationship to hollow heart. *American Potato Journal*, 63(11), 609-617. <https://doi.org/10.1007/BF02852922>
- Molina, E. A. (1998). *Encalado para la corrección de la acidez del suelo*. (1° ed.). Asociación Costarricense de Ciencias del Suelo (ACCS), San José, Costa Rica
- Moore, H. (1925). Some studies in hollow heart of potatoes. *Proc. Potato Association of America for 1925*. (41–46).
- Mora M., O. (2010). *Caracterización del ecosistema Páramo y evaluación de variables que lo afectan en los volcanes Irazú y Turrialba*. Tesis de Graduación. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Repositorio del SIBDI.

- Murayama, D., Koaze, H., Ikeda, S., Palta, J. P., Kasuga, J., Pelpolage, S. W., ... & Tani, M. (2019). In-season calcium fertilizer application increases potato cell wall calcium and firmness of french fries. *American Journal of Potato Research*, *96*, 472-486. <https://doi.org/10.1007/s12230-019-09736-5>
- Nelson, D. C., Jones, D. A., & Thoreson, M. C. (1979). Relationships between weather, plant spacing and the incidence of hollow heart in Norgold Russet potatoes. *American Potato Journal*, *56*(12), 581-586. <https://doi.org/10.1007/bf02853988>
- Nylund, R. E., & Lutz, J. M. (1950). Separation of hollow heart potato tubers by means of size grading, specific gravity, and x-ray examination. *American Potato Journal*, *27*(6), 214-222. <https://doi.org/10.1007/BF02850188>
- Ozgen, S., Karlsson, B. H., & Palta, J. P. (2006). Response of potatoes (cv Russet Burbank) to supplemental calcium applications under field conditions: Tuber calcium, yield, and incidence of internal brown spot. *American Journal of Potato Research*, *83*(2), 195-204. <https://doi.org/10.1007/BF02872155>
- Ozgen, S., & Palta, J. P. (2004). Supplemental calcium application influences potato tuber number and size. *HortScience*, *40*(1), 102-105.
- Palta, J. P. (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*(4), 267-275. <https://doi.org/10.1007/s11540-010-9163-0>
- Palta, J. P. (1996). Role of calcium in plant responses to stresses: linking basic research to the solution of practical problems. *HortScience*, *31*(1), 51-57. <https://doi.org/10.21273/hortsci.31.1.51>

- Peterson R., Barker, W., & Howarth, M. (1985). Development and structure of tubers. In: P. Li (Ed.), *Potato Physiology*. (1st ed., pp. 124-148). Academic Press.
- Radcliffe, D., & Šimůnek, J. (2010). Soil physics with HYDRUS: Modeling and applications. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL. 373 p.
- R Core Team (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Rex, B. L. & Mazza, G. (1989). Cause, control and detection of hollow heart in potatoes: A review. *American Potato Journal*, 66(3), 165–183. <https://doi.org/10.1007/BF02853679>.
- Saborío, M., M. (2017). *Olericultura*. (1 ed.) EUNED.
- Salas, R.; Pacheco, R. (1985). Estudio de la fertilidad de suelos dedicados a potreros en la zona norte de Heredia mediante la técnica del elemento faltante. *Agronomía Costarricense* 9, (2):181-185.
- SEPSA (Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria) (2023). *Boletín Estadístico Agropecuario N°33, 2019-2022*. Ministerio de Agricultura y Ganadería <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/BEA-0033.pdf>
- Silva, G. H., Chase, R. W., Hammerschmidt, R., Vitosh, M. L., & Kitchen, R. B. (1991). Irrigation, nitrogen and gypsum effects on specific gravity and internal defects of Atlantic potatoes. *American Potato Journal*, 68(11), 751-765. <https://doi.org/10.1007/BF02853806>

- Simmons, K. E., Kelling, K. A., Wolkowski, R. P., & Kelman, A. (1988). Effect of calcium source and application method on potato yield and cation composition. *Agronomy Journal*, 80(1), 13-21. <https://doi.org/10.2134/agronj1988.00021962008000010004x>
- Simmons, K. E., & Kelling, K. A. (1987). Potato responses to calcium application on several soil types. *American Potato Journal*, 64(3), 119-136. <https://doi.org/10.1007/BF02854208>
- Sowokinos, J.R. (2007). Internal physiological disorders and nutritional compositional factors that affect market quality. In D. Vreugdenhil (Ed.), *Potato Biology and Biotechnology: advances and perspectives*. (1st ed., pp. 501-518). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-044451018-1/50065-8>
- Struik, P. C. & Wiersema, S. G. (1999). *Seed potato technology*. (1st ed.) Wageningen Academic Pub.
- Tai, G. C. (2007). Genotype-by-Environment Interaction. The Canon of Potato Science. *Potato Research*, 50(3-4), 395-398. <https://doi.org/10.1007/s11540-008-9036-y>
- Ulloa C., E. (2021). *Determinación y validación de las curvas de absorción de nutrientes en papa (Solanum tuberosum) variedad Elbe-UCR*. Tesis Lic. Universidad de Costa Rica. Repositorio del SIBDI.
- Van Denburgh, R. W., Hiller, L. K., & Koller, D. C. (1979). Cool Temperature Induction of Brown Center in ‘Russet Burbank’ Potatoes. *HortScience*, 14(3), 259-260. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.14.3.259>

- Van Denburgh, R. W., Hiller, L. K., & Koller, D. C. (1980). The effect of soil temperatures on brown center development in potatoes. *American Potato Journal*, 57(8), 371-375. <https://doi.org/10.1007/BF02854328>
- Van Denburgh, R. W., Hiller, L. K., & Koller, D. C. (1986). Ultrastructural changes in potato tuber pith cells during brown center development. *Plant Physiology*, 81(1), 167-170. <https://doi.org/10.1104/pp.81.1.167>
- van der Zaag, K., & French, S. (1987). Preliminary evaluations of foliar calcium applications with respect to yield and processing quality of the potato cultivars Atlantic and Norchip. *Ontario Potato Cultivar Evaluation Association Bulletin*, (2), 3-5.
- White, P. (2012). Long-distance Transport in the Xylem and Phloem. In: P. Marschner (Ed.) *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*, (3rd., pp. 49-70). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00003-0>
- White, P. J., & Broadley, M. R. (2003). Calcium in plants. *Annals of Botany*, 92(4), 487-511. <https://doi.org/10.1093/aob/mcg164>.
- Win, K., Berkowitz, G. A., & Henninger, M. (1991). Antitranspirant-induced increases in leaf water potential increase tuber calcium and decrease tuber necrosis in water-stressed potato plants. *Plant Physiology*, 96(1), 116-120.
- Zorrilla, C., Navarro, F., Vega-Semorile, S., & Palta, J. (2021). QTL for pitted scab, hollow heart, and tuber calcium identified in a tetraploid population of potato derived from an Atlantic× Superior cross. *Crop Science*, 61(3), 1630-1651. <http://dx.doi.org/10.1002/csc2.20388>

Zotarelli, L., Hutchinson, C., Byrd, S., Gergela, D., & Rowland, D. (2012). Potato physiological disorders—brown center and hollow heart [Brochure]. University of Florida. <https://edis.ifas.ufl.edu/publication/HS197>

ANEXOS

Anexo 1. Concentración de calcio en los tubérculos de papa (variedad Floresta) en una finca aledaña al Volcán Irazú, Cartago, Costa Rica, 2022.

Muestra	Identificación LSF*	Ca (mg kg⁻¹)
B1 - T1	P-22-04850	286
B1 - T2	P-22-04851	335
B1 - T3	P-22-04852	432
B1 - T4	P-22-04853	279
B2 - T1	P-22-04854	373
B2 - T2	P-22-04855	385
B2 - T3	P-22-04856	381
B2 - T4	P-22-04857	264
B3 - T1	P-22-04858	331
B3 - T2	P-22-04859	372
B3 - T3	P-22-04860	370
B3 - T4	P-22-04861	351
B4 - T1	P-22-04862	328
B4 - T2	P-22-04863	411
B4 - T3	P-22-04864	361
B4 - T4	P-22-04865	353

*: Laboratorio de Suelos y Foliare, CIA-UCR

Anexo 2. Concentración de calcio en los tubérculos de papa (variedad Floresta) en una finca aledaña al Volcán Turrialba, Cartago, Costa Rica, 2022.

Muestra	Identificación LSF *	Ca (mg kg⁻¹)
B5 - T1	P-22-04703	444
B5 - T2	P-22-04704	378
B5 - T3	P-22-04705	463
B5 - T4	P-22-04706	270
B6 - T1	P-22-04707	293
B6 - T2	P-22-04708	470
B6 - T3	P-22-04709	503
B6 - T4	P-22-04710	273
B7 - T1	P-22-04711	375
B7 - T2	P-22-04712	402
B7 - T3	P-22-04713	531
B7 - T4	P-22-04714	294
B8 - T1	P-22-04715	504
B8 - T2	P-22-04716	445
B8 - T3	P-22-04717	390
B8 - T4	P-22-04718	350

*: Laboratorio de Suelos y Foliaves, CIA-UCR

Anexo 3. Valores promedio de temperatura del aire (Ta), temperatura del suelo (Ts) y contenido de agua en el suelo (humedad volumétrica (HV) y potencial hídrico (PH) en las dos fincas donde se realizó el experimento.

	Ta	Ts_1cm	Ts_5cm	Ts_10cm	Ts_20cm	Ts_50cm	HV	HV	PH	PH	
	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	5cm	20cm	5cm	20cm	
							(m ³ m ⁻³)	(m ³ m ⁻³)	(kPa)	(kPa)	
Irazú	Máximo	19,7	17,7	17,1	15,0	14,6	13,7	0,38	0,41	-0,10	-0,10
	Mínimo	4,2	6,5	7,0	8,9	10,2	11,7	0,22	0,27	-17,40	-12,90
	Promedio	9,8	11,4	11,7	11,9	12,2	12,4	0,26	0,31	-2,19	-1,60
Turrialba	Máximo	18,9	23,1	17,8	15,9	14,7	13,6	0,48	0,45	0,00	0,00
	Mínimo	5,6	5,6	6,8	8,8	11,1	12,2	0,29	0,32	-18,08	-4,61
	Promedio	10,7	12,2	12,4	12,7	12,8	12,8	0,36	0,36	-2,11	-0,12