



CONTENIDO DE CLOROFILA EN HOJAS DE PAPAS DE ALTURA PARA ESTIMAR LA CALIDAD DE LOS TUBÉRCULOS

CHLOROPHYLL CONTENT IN LEAVES OF HIGHLAND POTATOES FOR ESTIMATING TUBERS QUALITY

Sebastián Yáñez-Segovia^{*1,2}, Leticia Silvestre³, e Ignacio Chamorro-
Warnken⁴

¹Carrera de Ingeniería Agronómica, Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Central del Ecuador, Quito, 170129, Ecuador.

²Centro de Ecología Molecular y Funcional (CEMF), Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad de Talca, Casilla 747, Talca, Chile.

³Instituto de Producción y Sanidad Vegetal, Facultad de Ciencias Agrarias y Alimentarias, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.

⁴School of Agriculture, Policy Development, University of Reading, UK.

*Autor para correspondencia: sgyanez@uce.edu.ec

Manuscrito recibido el 05 de mayo de 2022. Aceptado, tras revisión, el 24 de julio de 2023. Publicado el 1 de septiembre de 2023.

Resumen

En este estudio se evaluó la relación de la calidad de tubérculos de tres variedades de papa (INIAP Libertad, INIAP Josefina y Diacol Capiro) del Altiplano ecuatoriano y dos formulaciones de fertilizante de fuentes edáficas. El contenido de clorofila foliar (CCF) se evaluó con el medidor de clorofila SPAD-502Plus. Las muestras se tomaron a diferentes alturas en tres etapas fenológicas: crecimiento vegetativo, floración-formación de tubérculos y maduración-espesamiento. Se encontraron varias respuestas en las tres variedades de papa. El valor de SPAD y peso de tubérculos (W), materia seca (MS), densidad específica (GS) y buenas papas (GC) se correlacionaron significativamente con el contenido de clorofila en las hojas de papa. Para la variedad y formulación Libertad ($KNO_3 + NH_4H_2PO_4 + KCl$), en el crecimiento vegetativo en estratos superiores de la planta, la función matemática óptima para SPAD y W , DM , SG y GC fueron: $y = 0,262x - 9,460$ ($R^2 = 0,9938$), $y = 42,948e^{-0,01x}$ ($R^2 = 0,5240$), $y = 10^{0,13}x^{-0,05}$ ($R^2 = 0,3277$) e $y = 10^{-0,36}x^{1,41}$ ($R^2 = 0,8681$); en la etapa de floración-formación de la planta de tubérculo los modelos de función óptima fueron: $y = 10^{-1,57}x^{1,06}$ ($R^2 = 0,8553$), $y = 28,789e^{-0,0024x}$ ($R^2 = 0,9103$), $y = 10^{0,07}x^{-0,02}$ ($R^2 = 0,7543$) e $y = 0,468x + 64,361$ ($R^2 = 0,9935$); en la maduración-espesamiento de las plantas, los modelos de función óptima fueron: $y = 0,664e^{0,02x}$ ($R^2 = 0,7924$), $y = 29,370e^{-0,003x}$ ($R^2 = 0,9572$), $y = 10^{0,07}x^{-0,02}$ ($R^2 = 0,8247$) y $y = 0,576x + 62,675$ ($R^2 = 0,9690$), respectivamente. Los resultados mostraron que el uso de SPAD-520PLUS demostró ser un método rápido para determinar CCF como una herramienta efectiva para estimar la calidad del tubérculo de papa.

Palabras clave: Análisis de correlación, tierras altas del Ecuador, fotosíntesis, *Solanum tuberosum*, SPAD-502 plus[®].

Abstract

In this study, we assessed the relationship between tubers quality of three varieties (INIAP Libertad, INIAP Josefina and Diacol Capiro) of Ecuador highland early of potato and two formulations of edaphic fertilizer sources. Leaf chlorophyll content (LCC) was evaluated with Chlorophyll Meter SPAD-502Plus. Samples were taken at different heights in three phenological stages: vegetative grow, flowering–formation of tubers and ripening-thickening. Several responses were found in the three potato varieties. Correlation between SPAD value and weight of tubers (W), dry matter (DM), specific gravity (SG) and good chips (GC) were significantly correlated with potato leaves chlorophyll content. For Libertad variety and formulation ($\text{KNO}_3 + \text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 + \text{KCl}$), at vegetative grow in upper strata of plant, the optimal mathematic function for SPAD value and W, DM, SG and GC were: $y = 0.262x - 9.460$ ($R^2 = 0.9938$), $y = 42.948 e^{-0.01x}$ ($R^2 = 0.5240$), $y = 10^{0.13} x^{-0.05}$ ($R^2 = 0.3277$) and $y = 10^{-0.36} x^{1.41}$ ($R^2 = 0.8681$); at plant flowering-formation of tuber stage, the optimal function models were: $y = 10^{-1.57} x^{1.06}$ ($R^2 = 0.8553$), $y = 28.789 e^{-0.0024}$ ($R^2 = 0.9103$), $y = 10^{0.07} x^{-0.02}$ ($R^2 = 0.7543$) and $y = 0.468x + 64.361$ ($R^2 = 0.9935$); at plant ripening-thickening, the optimal function models were: $y = 0.664 e^{0.02x}$ ($R^2 = 0.7924$), $y = 29.370 e^{-0.003x}$ ($R^2 = 0.9572$), $y = 10^{0.07} x^{-0.02}$ ($R^2 = 0.8247$) and $y = 0.576x + 62.675$ ($R^2 = 0.9690$), respectively. Our results showed that the use of SPAD-520PLUS proved to be a rapid method for the determination of LCC, being an effective tool for estimating potato tuber quality.

Keywords: Correlation analysis, Ecuador highlands, photosynthesis, *Solanum tuberosum*, SPAD-502 plus®.

Forma sugerida de citar: Yáñez-Segovia, S., Silvestre, L. y Chamorro- Warnken, I. (2023). Contenido de clorofila en hojas de papas de altura para estimar la calidad de los tubérculos. La Granja: Revista de Ciencias de la Vida. Vol. 38(2):46-58. <http://doi.org/10.17163/lgr.n38.2023.04>.

IDs Orcid:

Sebastián Yáñez-Segovia: <https://orcid.org/0000-0002-2513-3913>

Leticia Silvestre: <https://orcid.org/0000-0003-4506-2582>

Ignacio Chamorro-Warnken: <https://orcid.org/0000-0002-5104-0956>

1 Introducción

La clorofila es un pigmento esencial para la fotosíntesis. En consecuencia, el contenido de clorofila es el indicador principal para determinar la capacidad fotosintética y el estado sanitario de la planta (Chou y col., 2020). Para medir el contenido de clorofila foliar (CCF) generalmente se necesita extraer el tejido foliar con solventes orgánicos como acetona, etanol o *N, N*-dimetilformamida (Lan y col., 2011). Aunque este método es relativamente preciso, la extracción es laboriosa, lenta y costosa. Durante este proceso, pueden ocurrir pérdidas de pigmento a través de la extracción y dilución, lo que conduce a resultados altamente variables (Kaspary y col., 2019). Las mediciones del CCF como las realizadas con el SPAD-502 plus® (Konica Minolta, Tokio, Japón) son una herramienta de diagnóstico no destructiva, simple y portátil que mide el verdor del contenido relativo de clorofila en las hojas (Padilla y col., 2019).

Mediante la medición de la transmitancia foliar en dos bandas de longitud de onda (400-500 nm y 600-700 nm), este dispositivo cuantifica la cantidad relativa de clorofila con una lectura arbitraria (Índice de Clorofila SPAD-502 plus®) que es proporcional a la concentración de clorofila en la hoja (Sim y col., 2015), lo que supone un ahorro sustancial de tiempo y recursos. Las altas correlaciones entre el valor de SPAD 502 y el contenido de clorofila foliar se han observado en especies de arroz (Yuan y col., 2016), soja (Kühling y col., 2018), trigo (Yue y col., 2019), melón (Azia y Stewart, 2001), maíz (Casa y col., 2015), café (Netto y col., 2005) y tomate (Padilla y col., 2018), mientras que la correlación en papa fue comparativamente baja (Uddling y col., 2007). Se presentaron relaciones matemáticas entre las lecturas de SPAD-502 plus® y las lecturas de clorofila foliar con plantas en etapas de crecimiento (Yuan y col., 2016; Roslan y col., 2019), condiciones de crecimiento (Giletto y Echeverría, 2013; Kühling y col., 2018) y genotipo (Noulas y col., 2018).

La papa (*Solanum tuberosum* L.) es un importante cultivo para la nutrición humana junto con el trigo y el arroz (De Jong, 2016). La papa tiene mejor rendimiento en climas fríos, pero los suelos elevados reducen su rendimiento (Zommick y col., 2014). Desde la década de 1950, se han seleccionado las papas fritas por su alto contenido de materia se-

ca y por su capacidad para producir papas de color claro (Lulai y Orr, 1979). El contenido de materia seca (MS) del tubérculo, que consiste principalmente en almidón, también disminuye cuando la papa se cultiva en niveles superiores al óptimo (Raymundo y col., 2018). El alto contenido de materia seca del tubérculo es beneficioso porque reduce la absorción de aceite durante la fritura y la cocción, y mejora la obtención de mejores papas fritas (Camps y Camps, 2019). Nissen (1955) analizó los datos recopilados de aproximadamente 18 años y concluyó que el contenido de MS de las papas es una función lineal de su peso en agua y no depende de la gravedad específica (SG) del tubérculo. Los azúcares reductores, glucosa y fructosa se acumulan después de la cosecha como resultado de la hidrólisis de la sacarosa con una fuerte relación negativa de la actividad de la invertasa ácida vacuolar, estos azúcares reaccionan con grupos amino en la reacción no enzimática de Maillard para producir pigmentos de color oscuro durante la fritura de las papas (Wiberley-Bradford y Bethke, 2018). Los tubérculos de baja calidad producen papas fritas de mala calidad que pueden ser rechazadas en plantas de producción, lo que representa un riesgo financiero para los productores y pueden provocar problemas en el suministro (Busse, Wiberley-Bradford y Bethke, 2019).

Las correlaciones matemáticas entre el valor de SPAD y el rendimiento y la calidad de los tubérculos pueden ser importantes para optimizar las interpretaciones de los datos del medidor de clorofila. Este estudio se realizó para determinar si se encontró una correlación de CCF (valor SPAD) de tres variedades de papa con diferentes fuentes de fertilización. Se utilizó la información para construir una función matemática que describiera la relación entre CCF de diferentes etapas de la planta y la calidad de los tubérculos con el fin de optimizar un modelo para proporcionar un método más preciso, confiable y fácil para estimar la calidad de los tubérculos en el proceso industrial.

2 Materiales y Métodos

2.1 Material vegetal y condiciones de crecimiento

Se usaron las variedades comerciales de papa (V), incluyendo INIAP Libertad (v1) (cruce 380479.15 x

Bk Precoz-84), INIAP Josefina (v2) (cruce entre la variedad Bolona con un híbrido de *S. phureja* y *S. pausissectum*) y Diacol Capiro (v3) (cruce con Tukurreña (CCC 61) x 1967 (C) (9) (CCC751), de la colección de germoplasma del Centro Internacional de Papa - Quito. De igual forma, se utilizaron dos formulaciones de fertilizantes edáficos (F). La composición de las formulaciones fue la siguiente: (f1:23-24-45) y (f2: 20-31-40) con las fuentes: $\text{KNO}_3 + \text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ (MAP) + KCl (MOP) and $\text{NH}_4\text{NO}_3 + \text{MAP} + \text{K}_2\text{SO}_4$ (SOP) respectivamente. La primera fertilización ocurrió 25 días después de la siembra (DAP) a una dosis de 90 kg ha^{-1} de N, 198 kg ha^{-1} de P y 180 kg ha^{-1} de K. La segunda fertilización fue 60 DAP a dosis de 130 kg ha^{-1} de N, 20 kg ha^{-1} de P y 250 kg ha^{-1} of K.

En marzo de 2018, las parcelas experimentales se ubicaron en Pujilí, Cotopaxi, región montañosa central del Ecuador, a 3.060 m.s.n.m. ($01^\circ 03' 0.7''$ Sur / $78^\circ 41' 29.8''$ Oeste). El suelo era arenoso limoso, de tipo Inceptisol, con pendiente del 2% y la frecuencia del riego fue semanal por surcos. Durante el experimento, la temperatura fue de $16 \pm 1.2^\circ\text{C}$, 6 h luz^{-1} día⁻¹ average annual. promedio anual. La humedad relativa media se mantuvo por encima del 60%. El pH de la solución del suelo y la conductividad eléctrica se monitorizó periódicamente y se mantuvo aproximadamente entre 6,5 y 2,0-3,0 dSm^{-1} , respectivamente. Se evaluaron seis tratamientos que resultaron de la interacción de los factores de estudio (variedades y formulaciones). Se realizaron tres repeticiones. En cada bloque, los seis tratamientos (F x V) se distribuyeron al azar. No se aplicaron plaguicidas durante el experimento. El experimento se implementó en 900 m^2 . Cada parcela estuvo compuesta de $41,25 \text{ m}^2$. En cada parcela se hicieron seis hileras de 1,1 m entre ellas y 30 cm entre plantas. Las filas se plantaron de este a oeste. Las plantas se seleccionaron al azar de los cuatro surcos centrales de cada parcela, y se evaluaron para evitar el efecto de borde de los tratamientos. Las plantas estaban en su total desarrollo, situadas dentro de cada parcela y completamente rodeadas de otras plantas.

2.2 Medición del valor de SPAD-502 Plus®

Después de la selección, se evaluó el contenido de clorofila de las plantas con un SPAD-502 plus® KORNICA MINOLTA, en lecturas consecutivas entre las 10 y las 12 de la mañana. Antes de la medición,

el SPAD-502 plus® se calibró utilizando el comprobador de lectura suministrado por el fabricante. Se realizaron lecturas en folíolos completamente irradiados a 30, 60 y 90 DAP en el tercio inferior, medio y superior de la planta. Cada valor de SPAD foliar obtenido fue el promedio de treinta lecturas en folíolos terminales maduros (Matsuda y Fujiwara, 2014).

2.3 Parámetros de rendimiento y calidad de los tubérculos

En la cosecha se realizaron 120 DAP, una clasificación por tamaño y/o categorías del tubérculo de acuerdo con su diámetro (Huaraca, Montesdeoca y Pumisacho, 2009). Esta variable se expresó en kg de tubérculos totales por planta⁻¹, con sus respectivas categorías (primera, segunda y tercera). También, se utilizó un peso Mettler Toledo (SB 8001) de 0,1 g de precisión.

Se realizaron análisis de parámetros de calidad en los laboratorios de Raíces y Tubérculos del Programa Nacional de Nutrición y Calidad de los Alimentos (NRTP) y en el Departamento de Nutrición y Calidad de los Alimentos del Instituto de Investigación Nacional de Agricultura (INIAP) ubicados en el Campo Experimental Santa Catalina, Quito, Ecuador. Todas las variables de calidad se evaluaron a los 20 y 40 días después de la cosecha (DAD). El porcentaje de materia seca (MS) y la gravedad (GS) en tubérculos se determinaron en el laboratorio. La calibración del equipo siguió el protocolo establecido por el manual del usuario del sistema de pesaje PW-2050 (Weltech International Limited, Cambridgeshire, Reino Unido). Se utilizaron cinco tubérculos por tratamiento para evaluar la reducción del azúcar (RS). Se llevó a cabo el método Clerget (método micro colorimétrico con inversión de ácido clorhídrico) y el manual de protocolos para evaluar la genética de la papa (Cuesta, Rivadeneira y Monteros, 2015). Los resultados se expresaron en $\text{mg } 100\text{g}^{-1}$. Se seleccionó una muestra de cinco tubérculos que fueron lavados, pelados y cortados. Se seleccionaron las mejores 100 y se frieron (ECO-SERV 25 lb min^{-1} pelador industrial de papas, 10 Lb ROBOT COUPLE CL 50 cortadores, y freidora eléctrica CROYDON de 11 litros) a una temperatura de $175^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ por 2,5 minutos. Después de freír, las papas se clasificaron en tres categorías: buenas, regulares y malas (Cuesta, Rivadeneira y Monteros,

2015).

2.4 Análisis Estadístico

El análisis de correlación y regresión se realizó con Excel 2019 (v19.0) (Microsoft, USA) y Prueba de software y análisis de varianza (ANOVA) de InfoStat versión 2016 a un nivel de significancia $\alpha = 0,05$. De igual forma, se utilizó la prueba Tukey cuando se encontraron diferencias en la interacción, dependiendo del número de tratamientos. Se realizaron pruebas de correlación de Pearson y análisis de regresión entre el peso de tubérculos, materia seca, densidad específica, azúcares reductores, buenas papas y el contenido de clorofila de las hojas. Con el fin de determinar la tendencia y establecer el mejor modelo se usaron los modelos lineales, logarítmicos, de potencia e índice, en los casos significativos.

3 Resultados

3.1 Valor SPAD

En la Tabla 1 se pueden observar las relaciones entre la edad fenológica del cultivo y la LCC (SPAD-502

plus®). Hubo un aumento en la edad fenológica, y los valores de SPAD mostraron una tendencia en el incremento cuadrático. El valor de SPAD fue constante e incremental en hojas de los tres estratos evaluados hasta un DAP de 60, independiente de la variedad y formulación edáfica. Se observó un efecto altamente significativo ($p < 0,01$) en las formulaciones de fertilizante edáfico con CCF en 30 DAP en los estratos inferiores de la planta y efecto significativo ($p < 0,05$) a 90 DAP en los estratos medios; es decir, durante las etapas de desarrollo vegetativo y el engrosamiento del tubérculo. Se observaron diferencias significativas entre las variedades de papa y CCF a los 30 y 60 DAP en todos los estratos, y a los 90 DAP, solo en los estratos medios de las plantas. Se encontraron diferencias significativas en el CCF en la interacción (FxV) en hojas a 60 DAP en el estrato medio de las plantas (Tabla 1). La prueba de Tukey $\alpha = 0,05$ presentó tres rangos de significación. El tratamiento con f1v1 mantuvo los valores más altos, mientras que el tratamiento con f1v2 presentó los contenidos más bajos de clorofila.

Tabla 1. Valor SPAD y estadística descriptiva de los factores de estudio en la fenología del cultivo

Factores	CONTENIDO EN CLOROFILA DE LA HOJA (SPAD)							
	30 DAP		60 DAP			90 DAP		
	inferior	superior	inferior	medio	superior	inferior	medio	superior
Formulación (F)	$p < 0,001$		$p = 0,453$			$p = 0,349$		
f1	42.31 ± 2.83 b	44.5 ± 2.29 b	49.83 ± 3.18 a	54.69 ± 3.67 a	52.72 ± 5.16 a	42.82 ± 2.24 a	43.75 ± 2.80 b	46.00 ± 4.97 a
f2	44.52 ± 2.52 a	45.93 ± 3.04 a	50.77 ± 2.62 a	53.48 ± 1.83 a	52.06 ± 3.19 a	44.49 ± 2.62 a	46.39 ± 2.77 a	47.56 ± 2.90 a
Variety (V)	$p < 0,001$		$p = 0,041$			$p < 0,01$		
v1	41.02 ± 1.45 c	44.12 ± 1.07 b	48.55 ± 2.22 b	55.13 ± 2.79 a	55.48 ± 4.12 a	45.83 ± 1.85 a	48.11 ± 2.22 a	50.01 ± 3.25 a
v2	42.62 ± 1.81 b	42.86 ± 0.87 b	49.59 ± 2.18 ab	51.36 ± 2.27 b	53.85 ± 2.00 b	42.73 ± 2.80 a	43.27 ± 2.18 b	43.89 ± 3.77 b
v3	46.61 ± 1.43 a	48.67 ± 1.62 a	52.77 ± 2.18 a	55.77 ± 1.43 a	47.85 ± 1.51 a	42.41 ± 1.23 a	43.82 ± 2.18 b	46.44 ± 2.82 ab
Interacción (FxV)	$p = 0,387$		$p = 0,224$			$p = 0,195$		
f1v1	40.08 ± 0.74 d	43.75 ± 0.72 c	49.39 ± 1.96 a	57.67 ± 0.56 a	57.57 ± 4.79 a	44.97 ± 1.63 a	46.51 ± 2.10 ab	49.75 ± 3.85 a
f1v2	41.08 ± 1.05 d	42.35 ± 0.15 c	47.69 ± 3.09 a	50.06 ± 2.06 c	47.50 ± 1.82 a	41.73 ± 2.23 a	42.33 ± 2.48 b	40.99 ± 2.16 a
f1v3	45.77 ± 1.32 ab	47.41 ± 1.26 ab	52.42 ± 2.35 a	56.33 ± 1.67 ab	53.08 ± 1.66 a	43.06 ± 0.71 a	42.39 ± 1.22 b	47.25 ± 3.74 a
f2v1	41.95 ± 1.39 cd	44.49 ± 1.22 bc	47.71 ± 2.18 a	52.58 ± 1.50 bc	53.38 ± 1.48 a	46.69 ± 1.64 a	49.71 ± 0.64 a	50.26 ± 2.48 a
f2v2	44.15 ± 0.88 bc	43.37 ± 0.98 c	51.49 ± 0.52 a	52.68 ± 1.65 bc	48.19 ± 2.11 a	43.73 ± 2.95 a	44.21 ± 1.25 b	46.79 ± 2.64 a
f2v3	47.46 ± 0.96 a	49.94 ± 0.70 a	53.11 ± 0.58 a	55.2 ± 0.80 ab	54.62 ± 0.77 a	43.06 ± 1.30 a	45.25 ± 1.99 ab	45.64 ± 0.72 a
MEAN	43.42 ± 2.83	45.22 ± 2.78	50.3 ± 2.95	54.08 ± 2.96	52.39 ± 4.30	43.66 ± 2.58	45.07 ± 3.08	46.78 ± 4.15
CV	2.07	2.59	5.06	3.19	3.76	5.72	3.92	7.20

Fisher's Test for factors and Tukey for interaction at $\alpha = 0.05$
 Means with different letters are statistically different (p-value)
 Coefficient of variation (CV)
 Standard error (\pm)

3.2 Rendimiento y calidad de los tubérculos después de la cosecha

En cuanto al rendimiento de los tubérculos, el peso por categoría presentó los siguientes valores medios: f1: 1,54 y f2: 1,84 kg planta⁻¹. Las formula-

ciones f1:1,05 en la primera categoría; 0,62 en la segunda categoría y 0,17 kg planta⁻¹ en la tercera categoría; mientras que los fertilizantes f2 obtuvieron rendimientos por categoría de 1,01 en la primera categoría; 0,38 en la segunda categoría y 0,15 kg planta⁻¹ en la tercera categoría. La diferen-

cia en los tubérculos de segunda categoría se refleja en los valores estadísticos significativos (Figura 1A). El INIAP Libertad presentó la mejor respuesta

con 2,18, seguido por el INIAP Josefina con 1,51, y el DIACOL Capiro con 1,39 kg planta⁻¹ (Figura 1B).

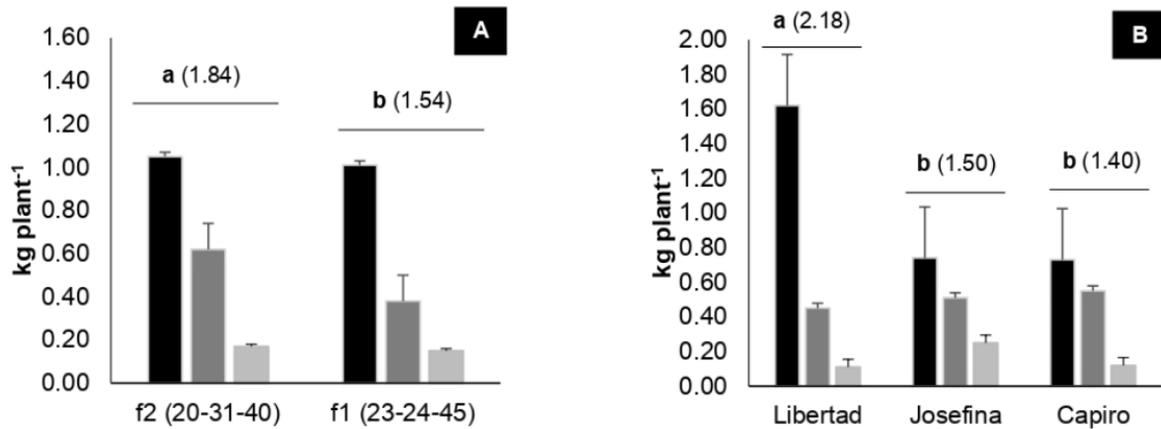


Figura 1. Effect of the fertilizer formulations and varieties on tuber yields.

A) Test: LSD Fisher $\alpha = 0.05$ DMS = 0.19. B) Test: LSD Fisher $\alpha = 0.05$ DMS = 0.24.

Means with different letters are statistically different ($p < 0.05$). Values in parentheses are totals. Black bars: first, gray: second and clearer: third category.

Las diferencias estadísticas encontradas entre las variedades se presentan principalmente en el rendimiento expresado en el peso de los tubérculos de la primera y tercera categoría. La mayor relevancia la aportan los tubérculos de la primera categoría. No se observó significancia para las interacciones FxV.

En general, hay una tendencia en el aumento de la MS y SG con el almacenamiento para todos los

tratamientos. Sin embargo, no hubo diferencia estadística significativa. El contenido de RS y papas buenas para procesamiento industrial de tubérculos disminuye de 20 a 40 DCA ($p < 0,01$). No se encontró significancia en las formulaciones de fertilizantes para el porcentaje de MS a los 20 y 40 DAD. La presencia de MS en las variedades de papa es significativa a los 20 DCA ($p < 0,01$) y a los 40 DCA ($p < 0,05$) (Figura 2A).

La variedad INIAP Libertad presentó los mayores porcentajes de MS con una media de 24,45%. Las variedades Capiro e INIAP Josefina son estadísticamente similares, con un contenido de MS de 22,29 y 21,82%, respectivamente (Figura 2A). La prueba de Tukey para la interacción ($\alpha = 0,05$) presentó tres rangos de significancia. El tratamiento f1v1 presentó el mayor contenido de MS, con una media de 25,17%. El tratamiento f1v2 presentó el menor contenido de MS, con una media de 21,50%.

la mayor especificidad valor gravimétrico (1,101) seguido de la variedad Capiro (1,091) e INIAP Josefina (1,088), en el mismo rango de significancia (Figura 2B). Se encontraron diferencias significativas para la interacción a los 20 DDA, como se evidenció para la variable MS. Según la prueba de Tukey se observaron dos rangos de significancia $\alpha = 0,05$ en los tratamientos.

No hubo diferencia significativa entre las formulaciones en SG. Se observaron efectos significativos entre las variedades de papa y SG en los valores a 20 y 40 DDA. La variedad INIAP Libertad presentó

El tratamiento f1v1 presentó el mayor SG, con una media de 1,104; mientras que el tratamiento f1v2 presentó el menor SG con 1,086. No se observó significancia para las formulaciones, variedades e interacción en el contenido de RS.

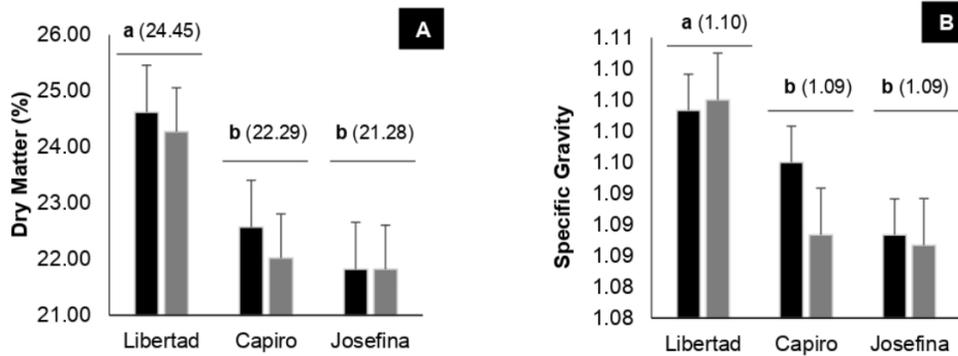


Figura 2. Materia seca y gravedad específica para el efecto de las variedades de papas

A) Test: LSD Fisher $\alpha = 0.05$ DMS = 3.93. B) Test: LSD Fisher $\alpha = 0.05$ DMS = 0.06.

Means with different letters are statistically different ($p < 0.05$). Values in parentheses are totals. Black bars: 20 days after harvest; gray: 40 days after harvest.

No se observó diferencia significativa en los fertilizantes. Sin embargo, si se observaron diferencias altamente significativas para las variedades en el porcentaje de papas buenas y regulares, y diferencias significativas para el porcentaje de papas malas. Las variedades Capiro e INIAP Libertad obtuvieron los menores porcentajes de pérdidas por fritura con 4,4 y 4,6% respectivamente, dejando un total aproximado del 95,5% de papas utilizables. La variedad INIAP Josefina presentó las mayores pérdidas por fritura, con 19,4% de papas malas. Hubo efectos significativos para la interacción en los porcentajes de papas buenas y regulares. La prueba de Tukey $\alpha = 0,05$, mostró que el tratamiento f1v1 mantuvo los valores más altos y el tratamiento f1v2 presentó los porcentajes más bajos.

3.3 Correlación y análisis de regresión del valor SPAD con el rendimiento y calidad de los tubérculos

Se observaron efectos dependientes entre otras variables en los estratos superiores de la planta (Fig. 3-4). La correlación de los análisis de rendimiento (kg planta^{-1}) fueron mayores ($p < 0,01$) a 90 DAP, independientemente de la altura de planta. Se observaron diferencias significativas en la variedad y formulación INIAP Libertad ($\text{KNO}_3 + \text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 + \text{KCl}$), en diferentes etapas del cultivo, en dife-

rentes funciones de modelado matemático, correlaciones entre CCF (valor SPAD), como x , en el peso de tubérculos (kg planta^{-1}); MS, SG, GC (datos 20 DAP), como y ; las correlaciones cambian con un ajuste diferente para el modelo (Tabla 2). Para W (kg planta^{-1}), la mayor correlación se presentó en función del modelo diferente. A 30 DAP de función de modelo lineal con $y = 0.262x - 9.460$ ($R^2 = 0.9938$); a 60 DAP de función de modelo de potencia con $y = 10^{-1,57} x^{1,06}$ ($R^2 = 0.8553$) y función de modelo de índice DAP 90 con $y = 0.664 e^{0,02x}$ ($R^2 = 0.7924$).

Para la MS, la mayor correlación se presentó en la tercera etapa en la función del modelo de índice. En 30 DAP con $y = 42.948 e^{-0,01x}$ ($R^2 = 0.5240$); $y = 28.789 e^{-0,0024x}$ ($R^2 = 0.9103$) a 60 DAP e $y = 29.370 e^{-0,003x}$ ($R^2 = 0.9572$) a 90 DAP. Para SG, la mayor correlación ocurrió en las terceras etapas en la función del modelo de potencia. A los 30 DAP con $y = 10^{0,13} x^{-0,05}$ ($R^2 = 0.3277$); $y = 10^{0,07} x^{-0,02}$ ($R^2 = 0.7543$) a 60 DAP e $y = 10^{0,07} x^{-0,02}$ ($R^2 = 0.8247$) a 90 DAP. Para GC, la correlación más alta ocurrió en diferentes funciones del modelo. A la función de modelo de potencia de 30 DAP, con $y = 10^{-0,36} x^{1,41}$ ($R^2 = 0.8681$). Para 60 y 90 DAP la mayor correlación ocurrió en la función del modelo lineal, con $y = 0.468x + 64.361$ ($R^2 = 0.9935$) and $y = 0.576x + 62.675$ ($R^2 = 0.9690$) respectivamente.

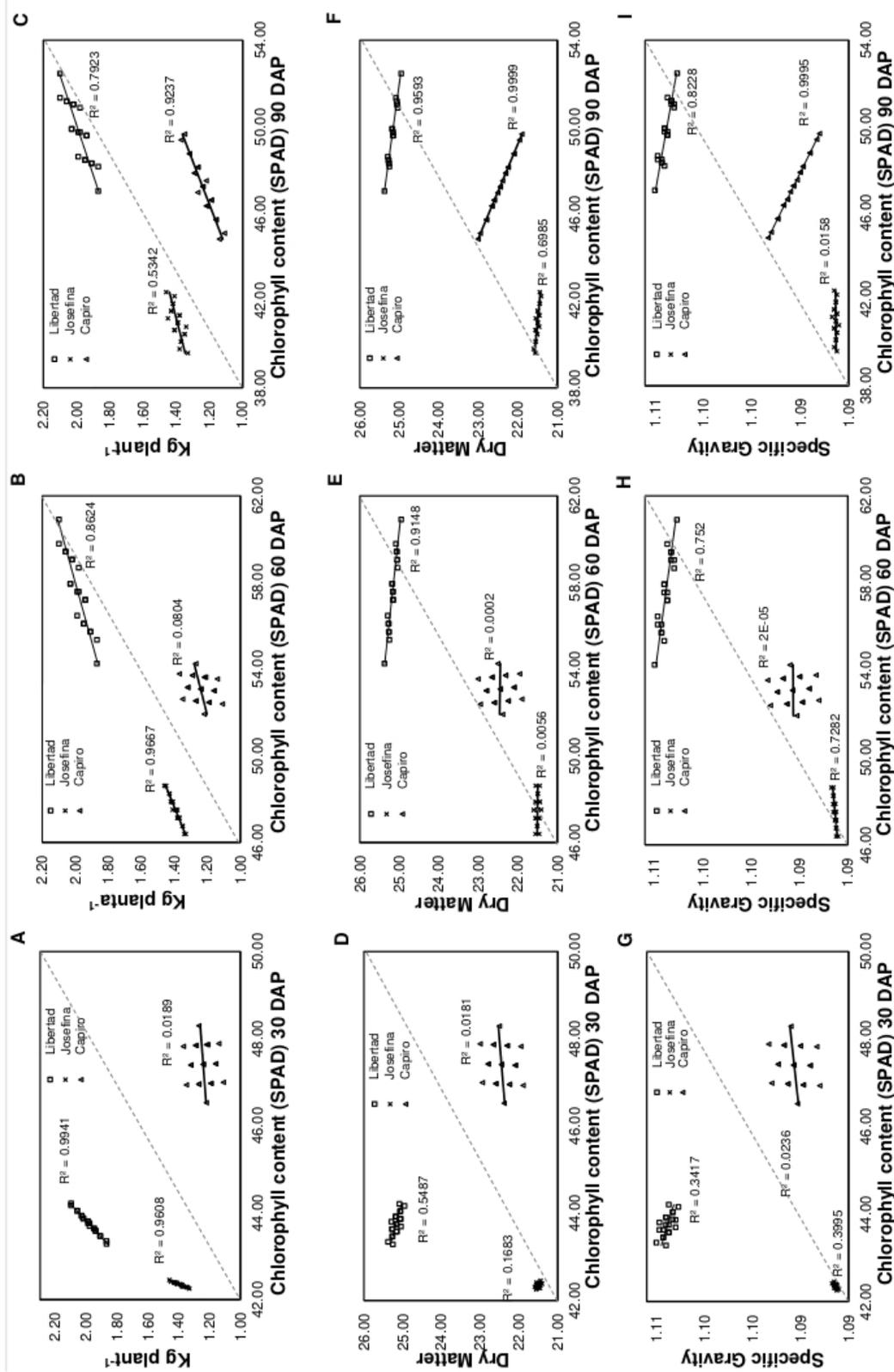


Figura 3. Coeficiente de correlación del valor SPAD con kg planta⁻¹ (A, B, C), materia seca (D, E, F) y densidad específica (G, H, I).

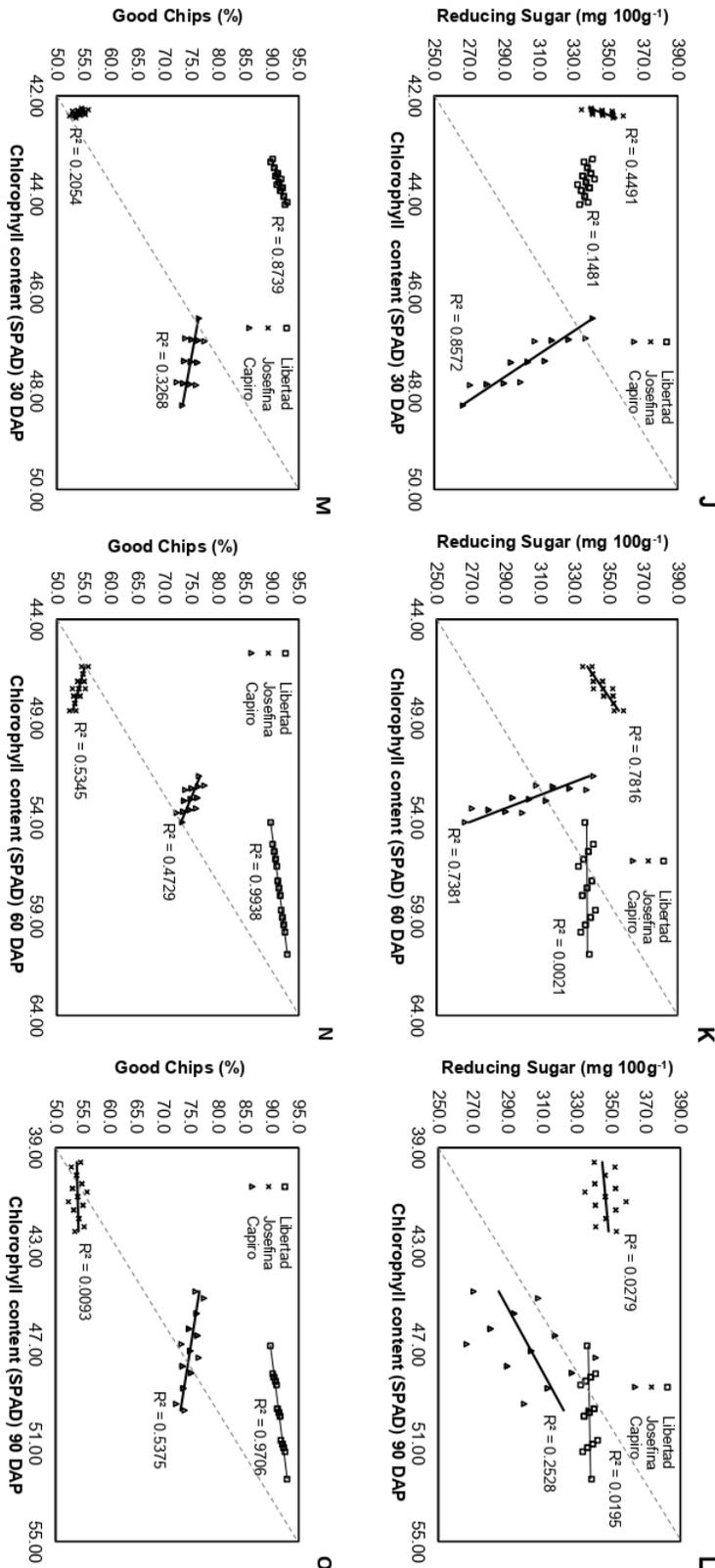


Figura 4. Coeficiente de correlación del valor SPAD con azúcar reductor (J, K, L) y papas buenas (M, N, O).

Tabla 2. Análisis de regresión de correlaciones del valor SPAD con varios modelos matemáticos de rendimiento y calidad de tubérculos en diferentes etapas vegetativas

Días después de la siembra	Componente	Modelo lineal, $y = ax + b$	Modelo logarítmico, $y = a \ln(x) + b$	Modelo de potencia, $y = ax^b$	Modelo exponencial, $y = ae^{bx}$
crecimiento vegetativo (30 DAP)	Peso de los tubérculos (kg planta ⁻¹)	$y = 0,262x - 9,460$ $R^2 = 0,9938$ $p < 0,0001$	$y = 11,430 \ln(x) - 41,203$ $R^2 = 0,9937$ $p < 0,0001$	$y = 10^{-9,22} x^{5,80}$ $R^2 = 0,9936$ $p < 0,0001$	$y = 0,0062e^{0,13x}$ $R^2 = 0,9934$ $p < 0,0001$
	Buenas para patatas fritas (%)	$y = 2,934x - 37,041$ $R^2 = 0,8669$ $p < 0,0001$	$y = 128,200 \ln(x) - 339,070$ $R^2 = 0,8669$ $p < 0,0001$	$y = 10^{-0,36} x^{1,41}$ $R^2 = 0,8681$ $p < 0,0001$	$y = 22,421e^{0,03x}$ $R^2 = 0,8675$ $p < 0,0001$
	Materia seca de tubérculos (%)	$y = -0,309x + 38,670$ $R^2 = 0,5236$ $p = 0,0002$	$y = -13,480 \ln(x) + 76,104$ $R^2 = 0,5235$ $p = 0,0002$	$y = 10^{2,28} x^{-0,54}$ $R^2 = 0,5181$ $p = 0,0002$	$y = 42,948e^{-0,01x}$ $R^2 = 0,5240$ $p = 0,0002$
	Peso específico de los tubérculos	$y = -1,4E^{-03}x + 1,164$ $R^2 = 0,3052$ $p = 0,0068$	$y = -0,061 \ln(x) + 1,333$ $R^2 = 0,3050$ $p = 0,0068$	$y = 10^{0,13} x^{-0,05}$ $R^2 = 0,3277$ $p = 0,0049$	$y = 1,162e^{-0,0012x}$ $R^2 = 0,2898$ $p = 0,0084$
	Peso de los tubérculos (kg planta ⁻¹)	$y = 0,036x - 0,115$ $R^2 = 0,8548$ $p < 0,0001$	$y = 2,098 \ln(x) - 6,517$ $R^2 = 0,8543$ $p < 0,0001$	$y = 10^{-1,57} x^{1,06}$ $R^2 = 0,8553$ $p < 0,0001$	$y = 0,691e^{0,02x}$ $R^2 = 0,8548$ $p < 0,0001$
	Buenas para patatas fritas (%)	$y = 0,468x + 64,361$ $R^2 = 0,9935$ $p < 0,0001$	$y = 26,944 \ln(x) - 17,868$ $R^2 = 0,9931$ $p < 0,0001$	$y = 10^{1,44} x^{0,30}$ $R^2 = 0,9928$ $p < 0,0001$	$y = 68,033e^{0,01x}$ $R^2 = 0,9933$ $p < 0,0001$
	Materia seca de tubérculos (%)	$y = -0,060x + 28,605$ $R^2 = 0,9101$ $p < 0,0001$	$y = -3,431 \ln(x) + 39,076$ $R^2 = 0,9099$ $p < 0,0001$	$y = 10^{1,64} x^{-0,14}$ $R^2 = 0,9074$ $p = 0,0002$	$y = 28,789e^{-0,0024x}$ $R^2 = 0,9103$ $p < 0,0001$
	Peso específico de los tubérculos	$y = -3,1E^{-04}x + 1,122$ $R^2 = 0,7382$ $p < 0,0001$	$y = -0,018 \ln(x) + 1,176$ $R^2 = 0,7384$ $p < 0,0001$	$y = 10^{0,07} x^{-0,02}$ $R^2 = 0,7543$ $p < 0,0001$	$y = 1,116e^{-0,00027x}$ $R^2 = 0,7210$ $p < 0,0001$
	Peso de los tubérculos (kg planta ⁻¹)	$y = 0,043x - 0,179$ $R^2 = 0,7808$ $p < 0,0001$	$y = 2,161 \ln(x) - 6,456$ $R^2 = 0,7804$ $p < 0,0001$	$y = 10^{-1,57} x^{1,09}$ $R^2 = 0,7818$ $p < 0,0001$	$y = 0,664e^{0,02x}$ $R^2 = 0,7924$ $p < 0,0001$
	Buenas para patatas fritas (%)	$y = 0,576x + 62,675$ $R^2 = 0,9690$ $p < 0,0001$	$y = 28,610 \ln(x) - 20,444$ $R^2 = 0,9686$ $p < 0,0001$	$y = 10^{1,43} x^{0,31}$ $R^2 = 0,9680$ $p < 0,0001$	$y = 66,686e^{0,01x}$ $R^2 = 0,9687$ $p < 0,0001$
	Materia seca de tubérculos (%)	$y = -0,076x + 28,951$ $R^2 = 0,9570$ $p < 0,0001$	$y = -3,775 \ln(x) + 39,919$ $R^2 = 0,9567$ $p < 0,0001$	$y = 10^{1,66} x^{-0,15}$ $R^2 = 0,9548$ $p < 0,0001$	$y = 29,370e^{-0,003x}$ $R^2 = 0,9572$ $p < 0,0001$
	Peso específico de los tubérculos	$y = -4,0E^{-04}x + 1,124$ $R^2 = 0,8129$ $p < 0,0001$	$y = -0,020 \ln(x) + 1,182$ $R^2 = 0,8128$ $p < 0,0001$	$y = 10^{0,07} x^{-0,02}$ $R^2 = 0,8247$ $p < 0,0001$	$y = 1,127e^{-0,00036x}$ $R^2 = 0,7967$ $p < 0,0001$
maduración-engrosamiento (90 DAP)					

4 Discusión

Es importante estudiar la correlación entre el CCF y los espectros del dosel, pues podría reflejar las características de los grupos de cultivos y la información completa de los espectros (Guo y col., 2018). En cuanto a la estructura vegetal de las papas, las partes superiores del dosel constituyen aproximadamente el 50% de la biomasa aérea y junto con las diferentes etapas de crecimiento, determinarían el mejor contenido de clorofila en la parte superior del dosel (Clevers, Kooistra y Brande, 2017). Por otro lado, la clorofila es sensible a altas temperaturas (clorofila "a" más que clorofila "b"), pues desintegran la estructura celular, dejando el pigmento expuesto a diversas enzimas y reacciones celulares no enzimáticas. Los informes indican que la temperatura óptima para la actividad de la clorofilasa (la enzima que cataliza la degradación de la clorofila) oscila entre 60 y 82,2 °C (Todorov y col., 2003). Qiige y col. (2017) y (Kamrani, Rahimi y Hosseiniya, 2019) han determinado una relación positiva de CCF con la MS de los tubérculos y el rendimiento de la planta bajo diferentes niveles. Además, se demuestra que, en algunas variedades tempranas, existe una correlación entre la SG y las papas buenas.

El análisis de regresión presentó un modelo de función matemático óptimo de correlaciones entre el valor de SPAD con el rendimiento y la calidad de los tubérculos basado en el valor del coeficiente de R^2 . Las investigaciones previas reportan una regresión matemática simple. El modelo lineal en su mayoría se utiliza para realizar análisis de regresión de relaciones entre valores SPAD y rendimiento (Netto y col., 2005; León y col., 2007; Hawkins, Gardiner y Comer, 2009). Uddling y col. (2007), determinaron que las relaciones en papa fueron no lineales con una pendiente creciente con mayores unidades SPAD. Las relaciones de la papa fueron comparativamente bajas ($R^2 = 0,5$).

El efecto de la clorofila no uniformemente distribuida podría explicar la no linealidad en las relaciones empíricas, ya que se predijo que el efecto de la dispersión era comparativamente bajo. Se determinó que el coeficiente entre el valor de SPAD y el rendimiento (kg planta^{-1}) fue significativo en los tres estratos de la planta en la evaluación 90 DAP (Tabla 2). Nuestros resultados confirmaron que la

edad de la planta afectaría la exactitud del análisis de correlación (Retta y col., 2016; Ucar y col., 2018).

Nuestros resultados sugieren que la papa de montaña tiene un comportamiento diferente al de otros cultivos en cuanto al ajuste matemático de las relaciones estudiadas, por lo que resulta necesario ajustar los medios de investigación de acuerdo con una planta específica y una fase de crecimiento. Mientras tanto, la diferencia significativa de los valores de los coeficientes sugiere la importancia y necesidad del método de cálculo en la estimación.

5 Conclusiones

Se encontró una relación significativa entre el valor de SPAD-520 plus[®] en hojas de papa con rendimiento y calidad de los tubérculos. Sin embargo, el modelo matemático optimizado para la estimación de la calidad de los tubérculos con el valor de SPAD de las hojas en diferentes etapas de crecimiento y alto rendimiento de planta resultaron diferentes.

Se mostró la mayor eficiencia de correlación de cuatro funciones de modelado matemático en diferentes etapas de crecimiento. En general, para la variedad y formulación INIAP Libertad ($\text{KNO}_3 + \text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 + \text{KCl}$), los resultados demostraron que el modelo óptimo de rendimiento fue la función lineal a 30 DAP; el modelo de índice para DM a 90 DAP; modelo de potencia para SG a 90 DAP y el modelo lineal para GC a 60 DAP.

Se planea seguir trabajando para evaluar las variedades tardías y la densidad de siembra para obtener una correlación adecuada.

Agradecimientos

Esta investigación contó con el apoyo de ECUAQUIMICA [N° 2-229], Instituto Nacional de Agricultura Investigación (INIAP) [Programa raíces y tubérculos] y EGEEMIP-YAinnova. Los autores agradecen al profesor Guillermo Schmeda-Hirschmann (Universidad de Talca, Talca 3460000, Chile) por la lectura crítica del manuscrito.

Referencias

- Azia, F. y K. Stewart (2001). «Relationships between extractable chlorophyll and SPAD values in muskmelon leaves». En: *Journal of Plant Nutrition* 24.6, 961-966. Online: <https://n9.cl/jf8i1>.
- Busse, J., A. Wiberley-Bradford y P. Bethke (2019). «Transient heat stress during tuber development alters post-harvest carbohydrate composition and decreases processing quality of chipping potatoes». En: *Journal of the Science of Food and Agriculture* 99.5, 2579-2588. Online: <https://n9.cl/ah7rz>.
- Camps, C. y Z. Camps (2019). «Optimized prediction of reducing sugars and dry matter of potato frying by FT-NIR spectroscopy on peeled tubers». En: *Molecules* 24.5, 967. Online: <https://n9.cl/2wokl>.
- Casa, R. y col. (2015). «Chlorophyll estimation in field crops: an assessment of handheld leaf meters and spectral reflectance measurements». En: *The Journal of Agricultural Science* 153.5, 876-890. Online: <https://n9.cl/7n60q>.
- Chou, S. y col. (2020). «Estimation of leaf photosynthetic capacity from the photochemical reflectance index and leaf pigments». En: *Ecological Indicators* 110, 105867. Online: <https://n9.cl/x6mo9>.
- Clevers, J., L. Kooistra y M. Van den Brande (2017). «Using Sentinel-2 data for retrieving LAI and leaf and canopy chlorophyll content of a potato crop». En: *Remote Sensing* 9.5, 405. Online: <https://n9.cl/2zd17>.
- Cuesta, X., J. Rivadeneira y C. Monteros (2015). *Mejoramiento Genético de papa: Conceptos, procedimientos, metodologías y protocolos*. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias.
- De Jong, H. (2016). «Impact of the potato on society». En: *American journal of potato research* 93, 415-429. Online: <https://n9.cl/tok4h>.
- Giletto, C. y H. Echeverría (2013). «Chlorophyll meter for the evaluation of potato N status». En: *American journal of potato research* 90, 313-323. Online: <https://n9.cl/9bnoc>.
- Guo, T. y col. (2018). «Estimating leaf chlorophyll content in tobacco based on various canopy hyperspectral parameters». En: *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing* 10, 3239-3247. Online: <https://n9.cl/h19dvc>.
- Hawkins, T., E. Gardiner y G. Comer (2009). «Modeling the relationship between extractable chlorophyll and SPAD-502 readings for endangered plant species research». En: *Journal for Nature Conservation* 17.2, 123-127. Online: <https://n9.cl/88936>.
- Huaraca, H., F. Montesdeoca y M. Pumisacho (2009). *Guía para facilitar el aprendizaje sobre el manejo del tubérculo-semilla de papa*. INIAP, Estación Experimental Santa Catalina.
- Kamrani, M., A. Rahimi y H. Hosseiniya (2019). «Effects of different growing media on yield and growth parameters of potato minitubers (*Solanum tuberosum* L.)». En: *Communications in soil science and plant analysis* 50.15, 1838-1853. Online: <https://n9.cl/2rt8l>.
- Kaspary, T. y col. (2019). «Non-destructive analysis of photosynthetic pigments in 'Avena strigosa' and 'Avena sativa'». En: *Australian Journal of Crop Science* 13.3, 354-359. Online: <https://n9.cl/fb6wr>.
- Kühling, I. y col. (2018). «Soybeans in high latitudes: effects of Bradyrhizobium inoculation in Northwest Germany and southern West Siberia». En: *Organic Agriculture* 8, 159-171. Online: <https://n9.cl/mlzf4>.
- Lan, S. y col. (2011). «Ethanol outperforms multiple solvents in the extraction of chlorophyll-a from biological soil crusts». En: *Soil Biology and Biochemistry* 43.4, 857-861. Online: <https://n9.cl/etx1o>.
- León, A. y col. (2007). «Estimation of chlorophyll contents by correlations between SPAD-502 meter and chroma meter in butterhead lettuce». En: *Communications in soil science and plant analysis* 38.19-20, 2877-2885. Online: <https://n9.cl/vn15k>.
- Lulai, E. y P. Orr (1979). «Influence of potato specific gravity on yield and oil content of chips». En: *American Potato Journal* 56, 379-390. Online: <https://n9.cl/dfarc>.
- Matsuda R., Ozawa N. y K. Fujiwara (2014). «Leaf photosynthesis, plant growth, and carbohydrate accumulation of tomato under different photoperiods and diurnal temperature differences». En: *Scientia Horticulturae* 170, 150-158. Online: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.03.014>.
- Netto, A. y col. (2005). «Photosynthetic pigments, nitrogen, chlorophyll a fluorescence and SPAD-502 readings in coffee leaves». En: *Scientia Horticulturae* 104.2, 199-209. Online: <https://n9.cl/hgafm>.
- Nissen, M. (1955). «The weight of potatoes in water». En: *American Potato Journal* 32, 332-339. Online: <https://n9.cl/9rh3a>.
- Noulas, C. y col. (2018). «Agronomic assessment of nitrogen use efficiency in spring wheat and interrelations with leaf greenness under field conditions». En: *Communications in soil science and plant analysis* 49.7, 763-781. Online: <https://n9.cl/km8ys>.
- Padilla, F. y col. (2018). «Reference values for phenological phases of chlorophyll meter readings and reflectance indices for optimal N nutrition of fertigated tomato». En: *V International Symposium on Ecologically Sound Fertilization Strategies for Field Vegetable Production* 1192, 65-72. Online: <https://n9.cl/xg11j>.
- Padilla, F. y col. (2019). «Influence of time of day on measurement with chlorophyll meters and canopy reflectance sensors of different crop N status». En: *Precision Agriculture* 20, 1087-1106. Online: <https://n9.cl/s1j29>.
- Qiqige, S. y col. (2017). «Effects of different nitrogen forms on potato growth and development». En: *Journal of Plant Nutrition* 40.11, 1651-1659. Online: <https://n9.cl/d09iw>.

- Raymundo, R. y col. (2018). «Climate change impact on global potato production». En: *European Journal of Agronomy* 100, 87-98. Online: <https://n9.cl/anli9>.
- Retta, M. y col. (2016). «Impact of anatomical traits of maize (*Zea mays* L.) leaf as affected by nitrogen supply and leaf age on bundle sheath conductance». En: *Plant science* 252, 205-214. Online: <https://n9.cl/s88vm>.
- Roslan, N. y col. (2019). «Growth Monitoring of Harumanis Mango Leaves (*Mangifera Indica*) at Vegetative Stage Using SPAD Meter and Leaf Area Meter». En: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 557. 1, 012010. Online: <https://n9.cl/1oku5>.
- Sim, C. y col. (2015). «Rapid determination of leaf chlorophyll concentration, photosynthetic activity and NK concentration of *Elaeis guineensis* via correlated SPAD-502 chlorophyll index.» En: *Asian Journal of Agricultural Research* 9.3, 132-138. Online: <https://n9.cl/25fhu>.
- Todorov, D. y col. (2003). «Chlorophyllase activity and chlorophyll content in wild and mutant plants of *Arabidopsis thaliana*». En: *Biologia plantarum* 46, 125-127. Online: <https://n9.cl/hz5df>.
- Ucar, E. y col. (2018). «The effect of the plant age and growth period on the nutritional substance, chlorophyll and steviol glycoside rates in Stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni) leaves». En: *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 49.3, 291-302. Online: <https://n9.cl/z42or>.
- Uddling, J. y col. (2007). «Evaluating the relationship between leaf chlorophyll concentration and SPAD-502 chlorophyll meter readings». En: *Photosynthesis research* 91, 37-46. Online: <https://n9.cl/iagn0>.
- Wiberley-Bradford, A. y P. Bethke (2018). «Suppression of the vacuolar invertase gene delays senescent sweetening in chipping potatoes». En: *Journal of the Science of Food and Agriculture* 98.1, 354-360. Online: <https://n9.cl/29jcz>.
- Yuan, Z. y col. (2016). «Indicators for diagnosing nitrogen status of rice based on chlorophyll meter readings». En: *Field crops research* 185, 12-20. Online: <https://n9.cl/zxqxjo>.
- Yue, X. y col. (2019). «Evaluation of both SPAD reading and SPAD index on estimating the plant nitrogen status of winter wheat». En: *International Journal of Plant Production* 14, 67-75. Online: <https://n9.cl/pfdjh>.
- Zommick, D. y col. (2014). «In-season heat stress compromises postharvest quality and low-temperature sweetening resistance in potato (*Solanum tuberosum* L.)» En: *Planta* 239, 1243-1263. Online: <https://n9.cl/k14er>.