

MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE TIEMPO TÉRMICO PARA DETERMINAR FECHA DE PLANTACIÓN DE PAPA PARA LA AGROINDUSTRIA

THERMAL TIME EVALUATION METHODS FOR DETERMINING PLANTING DATE OF POTATOES FOR AGROINDUSTRY

Rodrigo Callejas-Rodríguez^{1*}, Rodrigo Reyes-Sánchez²,
Ismael Plácido-Tomielis³ e Hilario Flores-Gallardo⁴

¹Universidad de Chile, Campus Antumapu, Facultad de Ciencias Agronómicas, Santa Rosa, La Pintana, Santiago, Chile. ²UchileCrea, Campus Antumapu, Facultad de Ciencias Agronómicas, Santa Rosa, La Pintana, Santiago, Chile. ³Empresa HC Ltda, Los Carreras, La Serena, Chile. ⁴Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Valle del Guadiana, Durango, Durango, México.

*Autor de correspondencia (rcallejas@uchile.cl)

RESUMEN

En el norte de Chile, Región de Coquimbo, la plantación de papa para la agroindustria se realiza en otoño-invierno. Todos los años, los productores tienen que reprogramar la fecha de plantación para cumplir con el cronograma de entrega de las papas en forma prorrata. El cumplimiento de esta exigencia está sujeta a una gran incertidumbre debido a la variabilidad climática, principalmente entre cierre de melga y cosecha; por lo tanto, en este estudio se propone evaluar tres métodos basados en el tiempo térmico que permitan optimizar la fecha de plantación. Utilizando una base de datos de cuatro años con información de rendimientos, calidad, temperatura ambiental, días a cosecha, fechas de estados fenológicos y manejos, se evaluaron los siguientes métodos: 1) método de la temperatura media o unidades de calor con temperatura base de 4 y 7 °C, 2) modelo grados día ($^{\circ}D$) con intervalo de temperatura entre 2 y 29 °C, y 3) Potato days (P -days) o días fenológicos de papa con temperaturas base de 4 y 7 °C. El mejor método para estas condiciones correspondió al P -days con 4 °C; sin embargo, y a diferencia de otros estudios, se determinó que el momento relevante para dar comienzo a la acumulación de tiempo fisiológico (*Biofix*) debe ser la emergencia de las plantas y no la fecha de plantación. Se registró un total de 723 P -days a cosecha y una oscilación entre plantación y emergencia de 34 a 66 días, con una alta relación con los rendimientos finales del cultivo.

Palabras clave: *Solanum tuberosum*, grados día, P -days, variabilidad climática.

SUMMARY

In Northern Chile, Coquimbo Region, potato planting for agro-industry takes place in Autumn-Winter. Every year, growers have to reschedule the planting date to meet the potato delivery schedule on a pro-rata basis. Compliance with this requirement is subject to great uncertainty due to climatic variability, mainly between planting closure and harvest; therefore, in this study it is proposed to evaluate three methods based on thermal time to optimize the planting date. Using a four-year database with information on yields, quality, ambient temperature, days to harvest, dates of phenological stages and management, the following methods were evaluated: 1) mean temperature method or heat units with base temperatures of 4 and 7 °C, 2) degree days ($^{\circ}D$) model with temperature range between 2 and 29 °C, and 3) Potato days (P -days) or phenological potato days with base temperatures of 4 and 7 °C. The best method for these conditions corresponded to P -days with

4 °C; however, and unlike other studies, it was determined that the relevant moment to start the accumulation of physiological time (*Biofix*) should be at plant emergence and not the planting date. A total of 723 P -days to harvest and an oscillation between planting and emergence of 34 to 66 days were recorded, with a close relationship with final crop yields.

Index words: *Solanum tuberosum*, climate variability, degree days, P -days.

INTRODUCCIÓN

En Chile se cultivan alrededor de 50 mil hectáreas de papa (*Solanum tuberosum* L.) abarcando casi todo el país, con una producción total de 1.28 millones de toneladas durante el año 2020 y un rendimiento promedio de 29.18 t ha⁻¹ (FAO, 2021). De acuerdo con ODEPA (2021), en el norte de Chile, Región de Coquimbo, se cultivan 2,137 ha con un rendimiento promedio de 24 t ha⁻¹, plantadas tempranamente en otoño-invierno entre los meses de mayo y julio (hemisferio sur).

Los productores tienen que reprogramar los volúmenes a producir y, por ende, la superficie a plantar en función de los nuevos contratos con la agroindustria. Una de las principales exigencias es cumplir con el cronograma de entrega de la producción en forma prorrata, dado que el pago final de las papas cosechadas depende de la calidad, el respeto por las cuotas y el cumplimiento del momento de entrega previamente definido (Bernet et al., 2002). En la actualidad, esta coordinación se hace con base en los días de plantación a cosecha sin considerar la variabilidad climática en la zona productora, tanto en las temperaturas mínimas y máximas, nubosidad, así como el número de días cálidos (Santibáñez, 2014). Por tales razones, es normal tener una superficie importante donde se requiere adelantar las cosechas para cumplir el programa del

contrato, pero no cumpliendo con el óptimo desarrollo del cultivo, bajando la acumulación de azúcares, almidones, carbohidratos, tamaño y peso específico de los tubérculos, afectando directamente los rendimientos (INIA, 2017), que se estima son entre 20 y 30 % inferiores con respecto a un cultivo óptimo, cuyos niveles esperables para la zona son mayores de 35 t ha⁻¹ para la variedad Atlantic.

Uno de los principales factores que determinan el crecimiento y desarrollo de las plantas es la temperatura (Cao y Tibbitts, 1995; Taiz y Zieger, 1991) y cada genotípico tiene una respuesta diferenciada para alcanzar los diferentes estados fenológicos (Sikder, 2009). Por tales razones, y dado que el tiempo calendario no es adecuado para caracterizar la fenología de los cultivos, se ha estudiado el uso del tiempo fenológico y el efecto de la temperatura sobre el desarrollo de las plantas, por medio de modelos que emplean el concepto de acumulación de temperatura o calor para cuantificar el desarrollo fenológico de los cultivos (Íñiguez-Covarrubias et al., 2011; Soltani y Sinclair, 2012). En muchas especies se han generado y utilizado modelos para predecir la fenología (Parent y Tardieu, 2014), existiendo una profunda revisión para el caso de la papa realizada por Raymundo et al. (2014). Se plantea que uno de los modelos más conocidos es el de grados día de desarrollo (°D) (Ojeda-Bustamante et al., 2004), pero también se hace hincapié sobre las diferencias que se pueden encontrar debido a la temperatura base que cada uno de ellos considera para determinar la acumulación térmica de los modelos (Raymundo et al., 2014). En esta misma línea, Flores-Magdaleno et al. (2014) probaron varios modelos y encontraron que el mejor método con base en el tiempo térmico para predecir la fenología de esta especie fue el Potato days (P-days) o días fenológicos de papa.

Otro factor que puede generar diferencias en la determinación de los estados fenológicos usando modelos térmicos, de acuerdo con Sevacherian et al. (1977), sería la determinación de un período o momento relevante para dar comienzo a la acumulación de calor o temperatura (*Biofix*). Adicionalmente, el método de cálculo podría afectarse por otras variables climáticas que alteren el comportamiento de la temperatura en un sitio específico (Snyder et al., 2001), así como las características de manejo implementadas en el cultivo; por lo tanto, es fundamental evaluar los modelos en las zonas productivas específicas para determinar el que estima de mejor forma los diferentes estados fenológicos de un cultivo o hito de interés comercial, siendo de gran apoyo en la toma de decisiones al momento de realizar labores agronómicas en los cultivos (Flores et al., 2016).

Debido a que en el cultivo de la papa en Chile no se utilizan

modelos específicos, el objetivo de esta investigación fue determinar una metodología con base en métodos de evaluación de tiempo térmico, que permita establecer las fechas de plantación para obtener producción calendarizada de tubérculo de papa, de acuerdo con las exigencias agroindustriales sin perder calidad del producto.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del área de estudio

El estudio se llevó a cabo en la Región de Coquimbo, La Serena, en el norte de Chile (Figura 1), en parcelas comerciales contiguas de la Empresa HC Ltda. (29° 58.844' LS, 71° 13.486' LW, a una altitud de 100 msnm), entre otoño y primavera de las temporadas 2018, 2019, 2020 y 2021, cultivo certificado por Global G.A.P. y Rainforest Alliance. La clasificación del clima de Köppen-Geiger es BWk, desértico, temperatura media anual de 16.0 °C, con una precipitación aproximada de 104 mm al año concentrada en el invierno. Los suelos son uniformes, de texturas medias, sobre todo en los primeros 40 cm luego de su preparación. El riego es tecnificado por cintas (1 L ha⁻¹), gestionado con sondas de capacitancia Sentek® en plataforma Irrimax Live® y la aplicación de los fertilizantes vía fertirrigación, similar para todas las parcelas. La plantación se realizó con semilla de tercera generación certificada y tratada (Vibrance Gold®), utilizando una plantadora J. J. Broch® (Madrid, España) de dos líneas en forma mecanizada, con desinfección y fertilización directa en la melga. Para la cosecha se utilizaron cosechadoras semi mecanizadas de la marca Grimme® (Damme, Alemania), tipo hileradora de dos líneas. Para el registro de las temperaturas se utilizaron dos estaciones meteorológicas (Davis Vantage Pro2, Davis Instruments, Hayward, California, EUA) ubicadas en los predios, conectadas a una plataforma DropControl (Wiseconn, Fresno, California, EUA).

Métodos de cálculo del tiempo térmico

El método de la temperatura media o unidades de calor con temperatura base de 4 y 7 °C (Ecuación 1) (Flores-Magdaleno et al., 2014; Narayan et al., 2014; O'Brien et al., 1983) requiere datos de la temperatura mínima diaria (T_{\min}) y temperatura máxima diaria (T_{\max}).

$$^{\circ}D = \frac{T_{\min} + T_{\max} - T_b}{2} \quad (\text{Ec.1})$$

El siguiente método evaluado (Ecuación 2) fue el de grados día (°D) con intervalo de temperatura entre 2 y 29 °C (Flores-Gallardo et al., 2012; Ojeda-Bustamante et al., 2004).

$$^{\circ}D = T_a - T_{c \min}, T_a < T_{c \max}$$

$$^{\circ}D = T_{c \max} - T_{c \min}, T_a \geq T_{c \max}$$

$$^{\circ}D = 0, T_a \leq T_{c \min} \quad (\text{Ec.2})$$

Donde T_a es la temperatura media ambiental, $T_{c \min}$ es la temperatura mínima de desarrollo (2 °C) y $T_{c \max}$ la temperatura óptima de desarrollo (29 °C).

El tercer método evaluado (Ecación 3) fue *Potato days* (*P-days*) o días fenológicos de papa para una temperatura base de 7 °C (Flores-Magdaleno *et al.*, 2014; Sands *et al.*, 1979), agregando una temperatura base de 4 °C, de acuerdo con O'Brien *et al.* (1983) y Narayan *et al.* (2014), para el cultivo de papa, donde T_{\min} es la temperatura mínima diaria, T_{\max} la temperatura máxima diaria y T la temperatura media diaria.

$$P\text{-days} = \frac{1}{24} \left(5P_{\min} + 8P\left(\frac{2T_{\min} + T_{\max}}{3}\right) + 8P\left(\frac{T_{\min} + 2T_{\max}}{3}\right) + 3P(T_{\max}) \right) \quad (\text{Ec.3})$$

$$P = 0, \text{ si } T < 7 \text{ o } T \geq 30 \quad (\text{Ec.4})$$

$$P = 10 \left(1 - \frac{(T - 21)^2}{(21 - 7)^2} \right), \text{ si } 7 \leq T < 21 \quad (\text{Ec.5})$$

$$P = 10 \left(1 - \frac{(T - 21)^2}{(30 - 7)^2} \right), \text{ si } 21 \leq T < 30 \quad (\text{Ec.6})$$

Análisis de datos

Los datos experimentales provinieron de 33 parcelas de entre 1.7 y 3.5 ha cultivadas con la variedad Atlantic (Cuadro 1). Se utilizó una base de datos de cuatro años con información de rendimientos, calidad, temperatura ambiental, días a cosecha, fechas de estados fenológicos y manejos. La descripción de los estados fenológicos y denominaciones comerciales (Cuadro 2) se realizó de acuerdo con Flores-Magdaleno *et al.* (2014), con base en la descripción propuesta por Jefferies y Lawson (1991). Esta información se utilizó en el establecimiento de las fases fenológicas utilizadas en el estudio.

Determinación del *Biofix* y método de índice bioclimático con mejor comportamiento

Se procedió a definir el momento óptimo del inicio de la acumulación de temperatura (*Biofix*), entre la fecha de plantación o la fecha de emergencia. Se eligieron 11 parcelas caracterizadas por presentar altos rendimientos, excelente desarrollo del cultivo y sin daños causados por plagas o enfermedades. Utilizando los datos de la estación meteorológica se procedió a estimar el tiempo térmico para cada método durante la fase de plantación a cosecha y emergencia a cosecha. Se calcularon las desviaciones estándar (σ) y los coeficientes de variación (CV) para cada etapa evaluada. Se eligió el *Biofix* que presentó la menor σ y CV; posteriormente, se utilizó el mismo criterio estadístico para determinar el mejor método de índice bioclimático entre el *Biofix* y la cosecha, de forma similar a Flores-Magdaleno *et al.* (2014) y Perry *et al.* (1986).

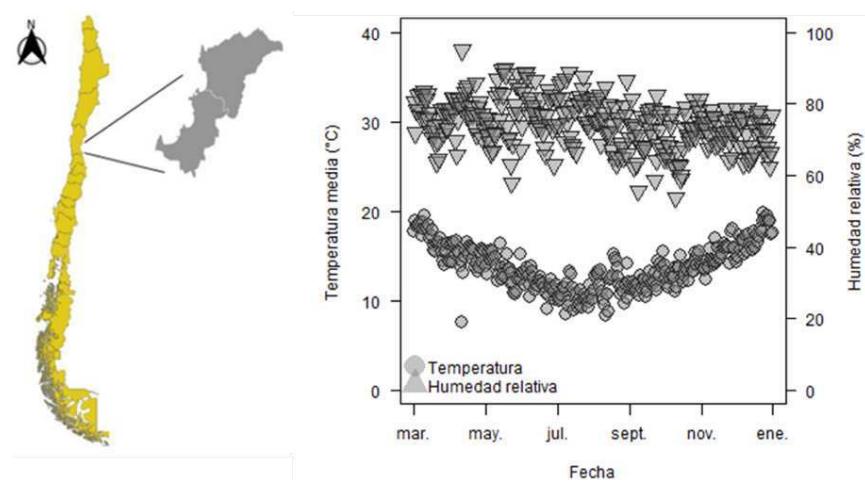


Figura 1. Ubicación y características climáticas del área de estudio. Atlas de cambio climático de la zona semiárida de Chile.

Cuadro 1. Descripción de sectores comerciales consideradas en el estudio.

Año	Nº de sectores	Fecha de inicio de la plantación	Fecha de inicio de la cosecha, primer sector
2018	8	18-jun	21-nov
2019	9	01-jun	18-dic
2020	8	14-jul	15-dic
2021	8	08-jul	10-nov

Cuadro 2. Principales estados fenológicos y denominaciones comerciales de la papa variedad Atlantic, adaptado de Flores-Magdaleno et al. (2014) y basado en la descripción propuesta por Jefferies y Lawson (1991).

Clave	Estados fenológicos	Comentario o denominación comercial
P [†]	Plantación	Plantación
V1	Crecimiento de yemas y raíces	15 días antes de emergencia
V2	Emergencia	Emergencia
V3	Desarrollo vegetativo e inicio de formación de tubérculos	Cierre de hilera
R1	Desarrollo de tubérculos (inicio de tuberización)	Cierre de melga
R2	Madurez fisiológica de la planta y tubérculos	100 % floración
R3	Tuberización de tubérculos	75 a 100 % de senescencia
C [†]	Cosecha	Cosecha

[†]Plantación y cosecha no son consideradas como estados fenológicos.

Evaluación del mejor método para la estimación de la fecha de cosecha

Se eligieron 22 parcelas diferentes a las anteriores para evaluar el método con mejor comportamiento como índice bioclimático, determinando posteriormente los tiempo térmicos asociados con las diferentes etapas fenológicas (Flores-Magdaleno et al., 2014). Se seleccionó como el mejor método al que presentó el menor error evaluado como la raíz cuadrada del cuadrado medio del error, (RMSE) y el error medio absoluto (MAE), descritos por Willmott y Matsuura (2005). Los valores de RMSE y MAE fueron calculados tanto en °D como en porcentaje. Con base en la elección del mejor método como índice bioclimático, se propone una metodología para estimar el momento de la plantación en función de las fechas de entrega a la agroindustria.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Inicio del proceso de acumulación de tiempo térmico (Biofix)

La mayoría de los modelos utilizados en el cultivo de papa inician la acumulación de tiempo térmico, independientemente del método, a partir de la plantación

en adelante (Flores-Gallardo et al., 2012; Flores-Magdaleno et al., 2014; Raymundo et al., 2014; Sands et al., 1979; Worthington y Hutchinson, 2005); sin embargo, el análisis de las diferentes parcelas de la base de datos señala una importante variabilidad entre el día de plantación (P) y el de emergencia (V2); ésto también se comprobó en los resultados del presente estudio, donde independiente del método evaluado, la fase fenológica que mostró menor error fue la de emergencia a cosecha (C) (Cuadro 3). Adicionalmente, se encontró una relación entre los días que tardan enemerger los brotes de los tubérculos y el rendimiento (Figura 2A), detectándose que las parcelas que presentaron un rendimiento mayor de 45 t ha⁻¹ requirieron, en general, menor tiempo calendario entre P y V2, presentando a su vez una menor dispersión de los datos (Figura 2B).

Si bien se señala que en la variedad Atlantic los brotes emergen rápida y homogéneamente después de 21 días a partir de la plantación, a una temperatura entre 12.8 y 15.6 °C (Cropwatch, 2021), existen reportes donde se registraron retrasos en la brotación en temporadas bajo condiciones cálidas (Webb et al., 1978). La literatura es amplia al referirse a las alteraciones en la brotación (Essah y Honeycutt, 2004; Johansen y Molteberg, 2012; O'Brien et al., 1983; Otrosky y Struik, 2010), con una interesante

Cuadro 3. Análisis estadístico usando tres métodos de contabilización del tiempo térmico.

Clave	Fase fenológica	Temperatura base	Método		
			P-days	Temperatura media	°D
V1 a C	Plantación a cosecha	2 °C	Promedio	-	-
			CV	-	-
			σ	-	149
V1 a C	Plantación a cosecha	4 °C	Promedio	1045	1298
			CV	0.111	0.092
			σ	116	119
V1 a C	Plantación a cosecha	7 °C	Promedio	851	845
			CV	0.105	0.097
			σ	90	82
V2 a C	Emergencia a cosecha	2 °C	Promedio	-	-
			CV	-	-
			σ	-	106
V2 a C	Emergencia a cosecha	4 °C	Promedio	759	971
			CV	0.085	0.096
			σ	64	93
V2 a C	Emergencia a cosecha	7 °C	Promedio	648	671
			CV	0.096	0.114
			σ	62	77

revisión de la fisiología de la brotación realizada por Mani y Hannachi (2015), donde estos autores manifiestan que el tiempo de brotación puede ser afectado por: a) factores intrínsecos del tubérculo "semilla", tales como la edad fisiológica, antecedentes genéticos, balance hormonal interno, condiciones edafoclimáticas durante la generación de los tubérculos "semilla", tamaño de los mismos, etc., b) manejos específicos previos a la plantación, tales como pre-brotación de los tubérculos, uso de fitohormonas

como ácido giberélico, condiciones de almacenamiento del tubérculo, sanidad, etc., y c) condiciones de plantación, como temperatura ambiental y del suelo, fotoperíodo, preparación y humedad de suelo, etc.

Estos mismos factores estarían afectando el tiempo de brotación y el potencial productivo en Chile, tal como lo mencionaron Mansilla y Arribillaga (2013), Sierra *et al.* (2013) e INIA (2017). En este caso, y no encontrando

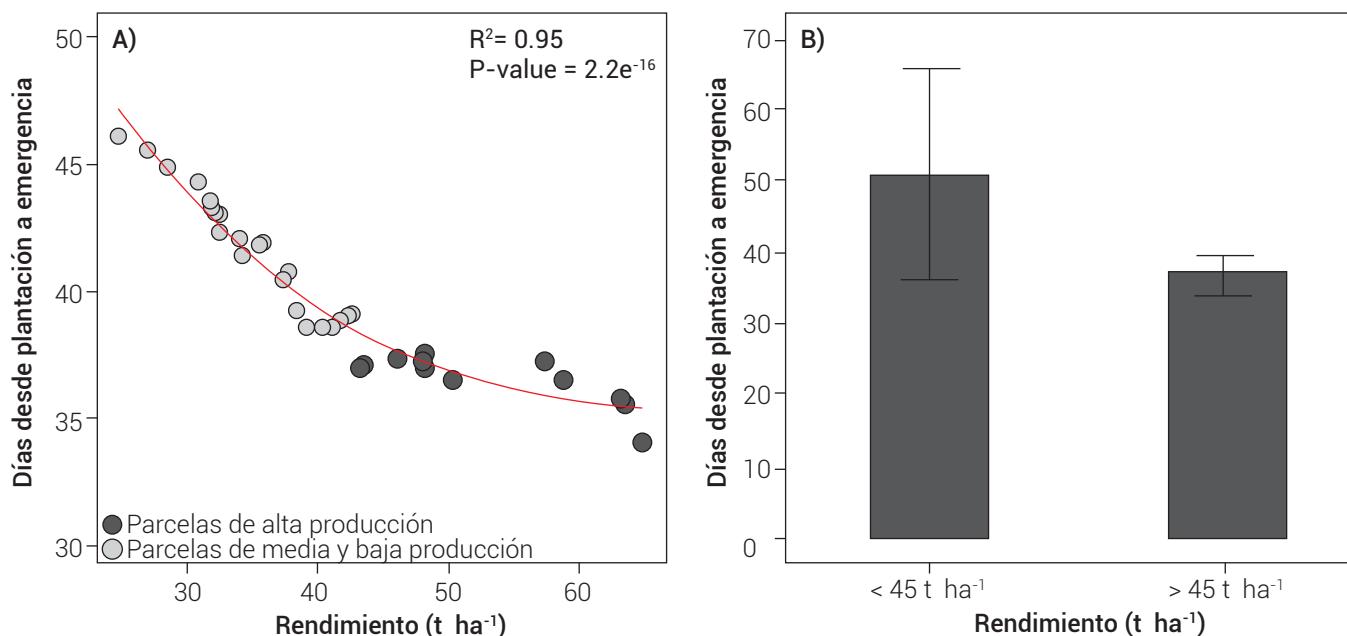


Figura 2. Relación entre los días requeridos entre plantación y cosecha, de acuerdo con los rendimientos finales. A) registros del tiempo promedio y su desviación estándar (σ) entre plantación y emergencia para 33 parcelas de acuerdo con su rendimiento ($t \text{ ha}^{-1}$) (B).

grandes diferencias de temperatura ambiental, de suelo o utilización de reguladores de crecimiento, se infiere que la principal limitante estaría dada por la calidad de la "semilla" entregada cada año, o por la variabilidad de lotes individuales en la misma temporada. Es probable que los altos rendimientos y el menor tiempo de brotación estén manifestando óptimas condiciones del cultivo, que parten desde un tubérculo "semilla" certificada con la mejor calidad, mejores condiciones de almacenamiento y transporte. Con base en esta información y para mitigar el efecto del tiempo entre plantación y cosecha sobre los métodos de contabilización del tiempo térmico, se procedió a elegir el estado de emergencia (V2) como el Biofix para iniciar los recuentos.

Definición del método de índice bioclimático de mejor comportamiento

Se observaron diferencias entre los métodos (Cuadro 3), concluyendo, de acuerdo con Perry *et al.* (1986), que el mejor método correspondió a *P-days*, lo que corrobora lo señalado por Flores-Magdaleno *et al.* (2014), quienes trabajaron con la variedad Alpha. El mismo análisis es válido para determinar que la temperatura umbral más adecuada es 4 °C, de acuerdo con lo señalado por O'Brien *et al.* (1983) y Narayan *et al.* (2014). Lo anterior se basa en la observación de los valores de σ y del CV, que fueron menores para *P-days* en comparación con los otros dos métodos, y también fueron menores para la temperatura umbral de 4 °C al compararlas dentro del mismo *P-days*.

Evaluación del mejor método para estimación de la fecha de cosecha

En el Cuadro 4 se presenta la comparación del cálculo del tiempo térmico para el período V2-C. Los resultados indicaron que el método *P-days* es el mejor para predecir el momento de la cosecha al arrojar menores valores de RMSE y MAE en comparación con los otros. En cuanto al error como porcentaje del tiempo térmico total requerido, no se obtuvo gran diferencia entre métodos. En el Cuadro 5 se expone la estimación del tiempo térmico requerido para cada fase fenológica del cultivo.

Propuesta metodológica para la determinación de la fecha de siembra

Si bien Cropwatch (2021) menciona que la variedad Atlantic emerge rápido y de forma homogénea a los 21 días después de la plantación (ddp), el registro de las poblaciones utilizadas para este estudio muestra discrepancias con respecto a tal información, independientemente de la condición climática de la temporada o entre temporadas. Los altos rendimientos presentados en este caso ($> 45 t \text{ ha}^{-1}$) arrojan un promedio de 37 días ($\sigma = 3$) entre *P* y *V2* (Figura 2b), mientras que para un rendimiento menor de 45 $t \text{ ha}^{-1}$ se registró un promedio de 51 días ($\sigma = 15$); esta información es aplicable para temperaturas medias de 12 °C en el mes de plantación (junio), con mínimas de 10.7 °C y máximas de 14.1 °C; por lo tanto, la fecha de plantación se puede establecer adicionando a los *P-days*

Cuadro 4. Análisis estadístico para determinar el mejor método de requerimiento térmico entre las 11 parcelas de estimación y 22 parcelas de validación.

Modelo	Temperatura base	Clave	RMSE	MAE	RMSE (%)	MAE (%)
<i>P</i> -days	4 °C	V2 a C	73	62	10	8
°D			106	88	9	7
Temperatura media			96	77	10	8

Cuadro 5. Estimación de *P*-days para las fases fenológicas.

Clave	Fase fenológica		<i>P</i> -days
V2 a V3	Emergencia a cierre de hileras	Promedio	96
		CV	0.221
		σ	21
V2 a R1	Emergencia a cierre de melga	Promedio	181
		CV	0.084
		σ	15
V2 a R2	Emergencia a 100 % floración	Promedio	343
		CV	0.216
		σ	74
V2 a R3	Emergencia a senescencia	Promedio	639
		CV	0.080
		σ	51
V2 a C	Emergencia a cosecha	Promedio	723
		CV	0.089
		σ	64

entre emergencia y cosecha los días propuestos para cada intervalo de rendimientos históricos obtenidos en el predio (Figura 3). Se recomienda considerar modificaciones en años posteriores al periodo entre P y V2; por ejemplo, por la optimización de la calidad de las semillas u otro factor no considerado en el análisis.

Para determinar la fecha de plantación se debe generar una base de datos con las temperaturas máxima y mínima diaria de al menos cuatro años, como en este estudio, y posteriormente se debe estimar el promedio, la temperatura media promedio y los *P*-days. Dado que el momento de la cosecha se conoce con anterioridad, de acuerdo con las especificaciones del contrato, se debe comenzar a acumular el tiempo térmico *P*-days en forma reversa

desde esa fecha sumando días previos y consecutivos. Así, se acumula una cantidad de *P*-days que se iguala con los requerimientos encontrados en este trabajo (723 *P*-days), determinando el período tentativo entre la emergencia y la cosecha; posteriormente, se suman los días requeridos entre P y V2, de acuerdo con los rendimientos históricos del predio, obteniendo así la fecha estimada de plantación. Finalmente, los resultados de este procedimiento fueron validados con las 22 parcelas de prueba, obteniéndose una relación estadísticamente significativa entre los valores predichos y los observados con un nivel de significancia de 0.05 ($Y = 0.3608X + 87.75$; $R^2=0.85$).

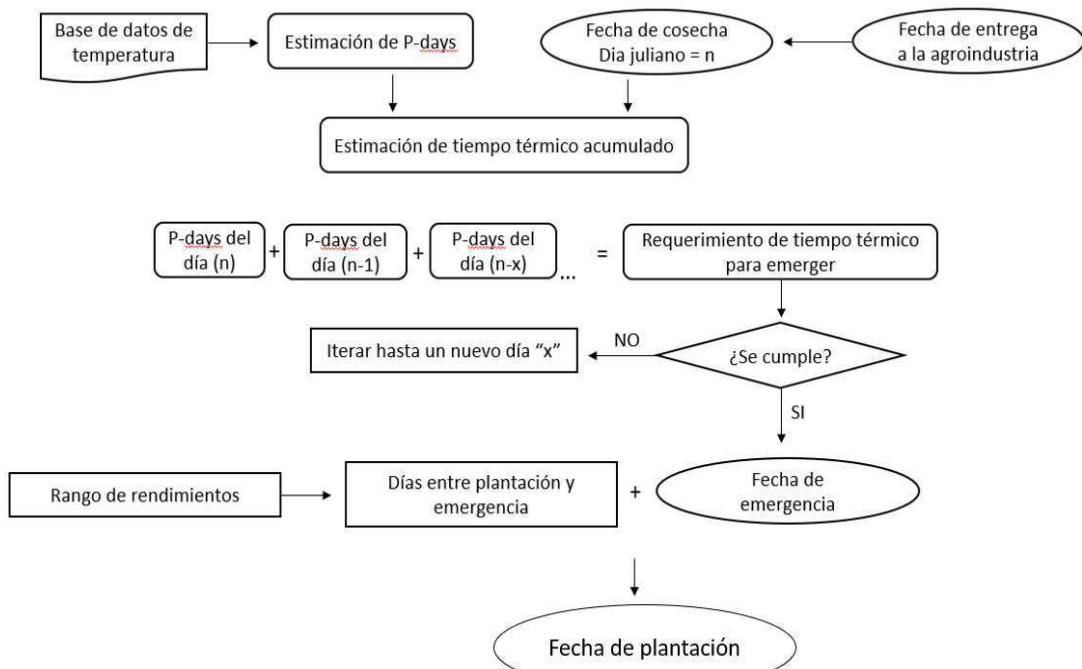


Figura 3. Procedimiento para definir la fecha de plantación conociendo la fecha de entrega a la agroindustria.

Por medio de los métodos de estimación de tiempo térmico empleados en este estudio, sólo es posible tener una idea de la magnitud de la variable de interés (rendimiento) al momento de la cosecha, lo que limita la aplicación de acciones correctivas en el campo (Hernández et al., 2017). Se cree que la incorporación de modelos dinámicos que establezcan relaciones o flujos entre las distintas variables de estado de interés (tubérculos, tallos, raíces, hojas) podrían enriquecer con más información la toma de decisiones en el manejo del cultivo de la papa, sobre todo en la identificación de factores limitantes durante el periodo crítico para la estimación del rendimiento.

CONCLUSIONES

Bajo las condiciones en que se realizó el estudio, se puede concluir que el *Biofix* definido para iniciar la acumulación del índice térmico, debería ser la emergencia de los brotes (V2). Para este estudio, el tiempo requerido entre plantación y emergencia se encuentra relacionado con los rendimientos, determinándose para altos rendimientos ($> 45 \text{ t ha}^{-1}$) un promedio de 37 días y para menores de 45 t ha^{-1} un promedio de 51 días. Se sugiere continuar ajustando en temporadas posteriores el promedio de tiempo entre P y V2, de acuerdo con los eventuales cambios que se registren en el cultivo. Se determinó que el método P-days con temperatura umbral de 4°C es más preciso para realizar las predicciones del tiempo térmico necesario para la cosecha, requiriéndose 723 P-days.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo otorgado a través del convenio Universidad de Chile – Empresa HC Ltda., así como Evercrisp Snack S.A. (Filial PepsiCo) para la obtención de los datos y ejecución del estudio de la presente investigación.

BIBLIOGRAFÍA

- Bernet T., M. Lara, P. Urday y A. Devaux (2002) El reto de vincular a los pequeños productores de papa con la agroindustria. *Revista Latinoamericana de la Papa* 13:1-23, <https://doi.org/10.37066/ralap.v13i1.119>
- Cao W. and T. W. Tibbitts (1995) Leaf emergence on potato stems in relation to thermal time. *Agronomy Journal* 87:474-477, <https://doi.org/10.2134/agronj1995.00021962008700030013x>
- Cropwatch (2021) Atlantic: management profile. Institute of Agriculture and Natural Resources, University of Nebraska-Lincoln. Lincoln, Nebraska, USA. https://cropwatch.unl.edu/potato/atlantic_management (May 2023).
- Essah S. Y. C. and C. W. Honeycutt (2004) Tillage and seed-sprouting strategies to improve potato yield and quality in short season climates. *American Journal of Potato Research* 81:177-186, <https://doi.org/10.1007/BF02871747>
- FAO, Food and Agriculture Organization (2021) World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2021. Food and Agriculture Organization. Rome, Italy. <https://doi.org/10.4060/cb4477en>
- Flores G. H., P. A. Domínguez M., M. P. Narváez M., F. Zavala E., S. Santana E. y R. V. García H. (2016) Predicción fenológica en cultivos agrícolas bajo tiempo térmico. Folleto Técnico Núm. 85. Campo Experimental Valle del Guadiana, INIFAP. Durango, México. 32 p.
- Flores-Gallardo H., W. Ojeda-Bustamante, H. Flores-Magdaleno, E. Mejía-Sáenz y E. Sifuentes-Ibarra (2012) Grados día y la programación integral del riego en el cultivo de papa. *Terra Latinoamericana* 30:59-67.
- Flores-Magdaleno H., H. Flores-Gallardo y W. Ojeda-Bustamante (2014)

- Predicción fenológica del cultivo de papa mediante tiempo térmico. *Revista Fitotecnia Mexicana* 37:149-157, <https://doi.org/10.35196/rfm.2014.2.149>
- Hernández D.A. C., J. Martínez V. y H. Calvete S. (2011) Modelos para la simulación dinámica del crecimiento y desarrollo de pastos. *Pastos* 41:127-162.
- INIA, Instituto de Investigaciones Agropecuarias (2017) Manual del Cultivo de la Papa en Chile. Boletín INIA No. 10. V. Kramm M. (ed.). INIA-INDAP. Santiago, Chile. 143 p.
- Íñiguez-Covarrubias M., W. Ojeda-Bustamante y A. Rojano-Aguilar (2011) Metodología para la determinación de la evapotranspiración integrada y la capacidad de canales en una zona de riego. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCUYO* 43:175-191.
- Jefferies R. A. and H. M. Lawson (1991) A key for the stages of development of potato (*Solanum tuberosum*). *Annals of Applied Biology* 119:387-399, <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1991.tb04879.x>
- Johansen T. J. and E. L. Molteberg (2012) Effect of storage and pre-sprouting regimes on seed potato performance in Norway. *Potato Research* 55:279-292, <https://doi.org/10.1007/s11540-012-9226-5>
- Mani F. and C. Hannachi (2015) Physiology of potato sprouting. *Journal of New Sciences, Agriculture and Biotechnology* 17:591-602.
- Mansilla G. M. y D. Arribillaga G. (2013) Antecedentes técnicos para el cultivo de la papa (*Solanum tuberosum* L.), en la Región de Aysén. Boletín N° 272. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. INIA Tamel Aike. Coyhaique, Chile. 88 p.
- Narayan S., R. H. Kanth, R. Narayan, F. A. Khan, A. Saxena and T. Hussain (2014) Effect of planting dates and integrated nutrient management on productivity and profitability of potato (*Solanum tuberosum*) in Kashmir valley. *Indian Journal of Agronomy* 59:145-150.
- O'Brien P. J., E. J. Allen, N. Bean, R. L. Griffith, S. A. Jones and J. L. Jones (1983) Accumulated day-degrees as a measure of physiological age and the relationships with growth and yield in early potato varieties. *The Journal of Agricultural Science* 101:613-631, <https://doi.org/10.1017/S002185960003865X>
- ODEPA, Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (2021) Región de Coquimbo, Informativo Regional. ODEPA, Ministerio de Agricultura. Santiago, Chile. <https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2019/04/Region-de-Coquimbo.pdf> (Diciembre 2022).
- Ojeda-Bustamante W., E. Sifuentes-Ibarra, D. C. Slack and M. Carrillo (2004) Generalization of irrigation scheduling parameters using the growing degree days concept: application to a potato crop. *Irrigation and Drainage* 53:251-261, <https://doi.org/10.1002/ird.134>
- Otroshy M. and P. C. Struik (2010) Effects of size of normal seed tubers and growth regulator application on dormancy, sprout behaviour, growth vigour and quality of normal seed tubers of different potato cultivars. *Research Journal of Seed Science* 3:200-209, <https://doi.org/10.3923/rjss.2010.200.209>
- Parent B. and F. Tardieu (2014) Can current crop models be used in the phenotyping era for predicting the genetic variability of yield of plants subjected to drought or high temperature? *Journal of Experimental Botany* 65:6179-6189, <https://doi.org/10.1093/jxb/eru223>
- Perry K. B., T. C. Wehner and G. L. Johnson (1986) Comparison of 14 methods to determine heat unit requirements for cucumber harvest. *HortScience* 21:419-423, <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.21.3.419>
- Raymundo R., S. Asseng, D. Cammarano and R. Quiroz (2014) Potato, sweet potato, and yam models for climate change: a review. *Field Crops Research* 166:173-185, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.06.017>
- Sands P. J., C. Hackett and H. A. Nix (1979) A model of the development and bulking of potatoes (*Solanum tuberosum* L.) I. Derivation from well-managed field crops. *Field Crops Research* 2:309-331, [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(79\)90031-5](https://doi.org/10.1016/0378-4290(79)90031-5)
- Santibáñez O. F. (2014) Variabilidad y tendencias climáticas. In: *Atlas del Cambio Climático en las Zonas de Régimen Árido y Semárido. Regiones de Coquimbo, Valparaíso y Metropolitana (Chile)*. F. Santibáñez O., P. Santibáñez V., C. Caroca T., P. Morales P., P. González M., N. Gajardo A., ... y C. Melillán F. (eds.). Universidad de Chile. Santiago, Chile. pp:18-31.
- Sevacherian V., V. M. Stern and A. J. Mueller (1977) Heat accumulation for timing *Lygus* control measures in a safflower-cotton complex. *Journal of Economic Entomology* 70:399-402, <https://doi.org/10.1093/jee/70.4.399>
- Sierra B. C., J. Santos R., A. France I., J. Kalazich B. y C. Contreras S. (2013) El cultivo de la papa en la región de Coquimbo. Manejo del suelo, fertilización y algunos otros factores de manejo agronómico. Boletín INIA No. 266. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional Intihuasi. La Serena, Chile. 134 p.
- Sikder S. (2009) Accumulated heat unit and phenology of wheat cultivars as influenced by late sowing heat stress condition. *Journal of Agriculture & Rural Development* 7:57-64, <https://doi.org/10.3329/jard.v7i1.4422>
- Snyder R. L., D. Spano, P. Duce and C. Cesaraccio (2001) Temperature data for phenological models. *International Journal of Biometeorology* 45:178-183, <https://doi.org/10.1007/s004840100103>
- Soltani A. and T. R. Sinclair (2012) Phenology-temperature. In: *Modeling Physiology of Crop Development, Growth, and Yield*. A. Soltani and T. R. Sinclair (eds.). CABI. Wallingford, UK. pp:55-72.
- Taiz L. and E. Zeiger (1991) *Plant Physiology*. The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc. Redwood City, California. 559 p.
- Webb R. E., D. R. Wilson, J. R. Shumaker, B. Graves, M. R. Henninger, J. Watts, ... and J. Murphy (1978) Atlantic: a new potato variety with high solids, good processing quality, and resistance to pests. *American Potato Journal* 55:141-145, <https://doi.org/10.1007/BF02852087>
- Willmott C. J. and K. Matsuura (2005) Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research* 30:79-82, <https://doi.org/10.3354/cr030079>
- Worthington C. M. and C. M. Hutchinson (2005) Accumulated growing degree days as a model to determine key developmental stages and evaluate yield and quality of potato in northeast Florida. *Proceedings of the Florida State Horticultural Society* 118:98-101.

