

# Análisis del Balance Hídrico y Rendimiento del Cultivo de Papa (Variedad Amarilis) durante la campaña agrícola 2024-2025 en La Encañada, Cajamarca, Perú

Deniss Malpica, DZ-3, Senamhi

Mayo 2025

## Resumen

El presente documento analiza el balance hídrico, las fases fenológicas y el rendimiento del cultivo de papa (variedad Amarilis, no certificada) en una parcela en la localidad de La Encañada, provincia de Cajamarca, en Perú; durante la campaña agrícola 2024-2025. En la campaña se obtuvo rendimiento de 8.4 t/ha, significativamente menor al rendimiento potencial teórico de 30 t/ha (INIA). El proceso se realizó utilizando datos de evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>), coeficiente de cultivo (K<sub>c</sub>), precipitación, parámetros del suelo y variables climáticas (temperatura máxima, mínima y precipitación). Se evalúan los impactos climáticos e hídricos en las fases fenológicas (emergencia, brotes laterales, botón floral, floración, maduración). Se identifican probables causas de la brecha de rendimiento y se proponen recomendaciones basadas en literatura especializada y análisis previos.

## I. Introducción

La papa (*Solanum tuberosum* L.) es un cultivo fundamental en las zonas altoandinas de Perú, como La Encañada, Cajamarca, donde las condiciones climáticas y edáficas presentan desafíos para maximizar el rendimiento. La variedad Amarilis, desarrollada por el Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), tiene un potencial de rendimiento de 25–35 t/ha bajo condiciones óptimas (8). Sin embargo, durante la campaña agrícola 2024-2025, el cultivo instalado en la localidad de La Encañada reportó un rendimiento aproximado de 8.4 t/ha, utilizando 500 kg de semilla (no certificada) en una parcela de 0.55 ha. Este análisis integra datos de balance hídrico y variables climáticas (temperatura máxima, mínima y precipitación) para evaluar los impactos en las fases fenológicas del cultivo y proponer estrategias para cerrar la brecha de rendimiento.

## II. Metodología

### 2.1 Datos Utilizados

Se emplearon datos de la campaña agrícola 2024-2025, recopilados para la estación

meteorológica C.O. La Encañada:

- a. Fechas fenológicas: Siembra (12/10/2024), emergencia (06/11/2024, 10 días), brotes laterales (15/11/2024, 28 días), botón floral (13/12/2024, 28 días), floración (11/01/2025, 17 días), maduración (29/01/2025 al 23/04/2025, 83 días).
- b. Variables climáticas: Temperatura máxima ( $T_{max}$ ), mínima ( $T_{min}$ ) y precipitación acumulada ( $P_p$ ) por fase fenológica, promediadas desde la estación C.O. La Encañada.
- c. Balance hídrico: Evapotranspiración de referencia ( $E_{To}$ , 2.2–5.8 mm/día, promedio 3.48 mm/día), coeficiente de cultivo ( $K_c$ , 0.06–1.05), precipitación diaria (614.7 mm acumulados), capacidad de campo ( $\vartheta_{cc}$ ), punto de marchitez permanente ( $\vartheta_{pmp}$ ), densidad aparente ( $D_g$ ), profundidad de raíces ( $Z_r$ ), y agua disponible ( $AD$ , 4.86–51.65 mm).
- d. Rendimiento: 8.4 t/ha (observado) frente a 30 t/ha (teórico, INIA).

## 2.2 Análisis del Balance Hídrico

El balance hídrico se calculó como la diferencia entre la precipitación ( $P_p$ ) y la evapotranspiración del cultivo ( $E_m = E_{To} \times K_c$ ), ajustada por la capacidad de almacenamiento del suelo ( $AD$ ). Las fases fenológicas se analizaron según:

- Emergencia:  $K_c$  de 0.06–0.68,  $AD = 4.86$  mm.
- Brotes laterales:  $K_c$  de 0.69–1.01,  $AD = 16.66$  mm.
- Botón floral:  $K_c$  de 1.01–1.05,  $AD = 30.99$  mm.
- Floración:  $K_c$  de 1.05–0.97,  $AD = 30.99$  mm.
- Maduración:  $K_c$  de 0.97–0.76,  $AD = 51.65$  mm.

## 2.3 Análisis Climático

Las variables climáticas ( $T_{max}$ ,  $T_{min}$ ,  $P_p$ ) obtenidas de la estación Climática Ordinaria (C.O.) La Encañada, se promediaron por fase fenológica (ver: Figura 1 y Figura 2). Los impactos fisiológicos se evaluaron con base en literatura especializada, descrita en el acápite VII. Referencias (principalmente 1, 3 y 6)

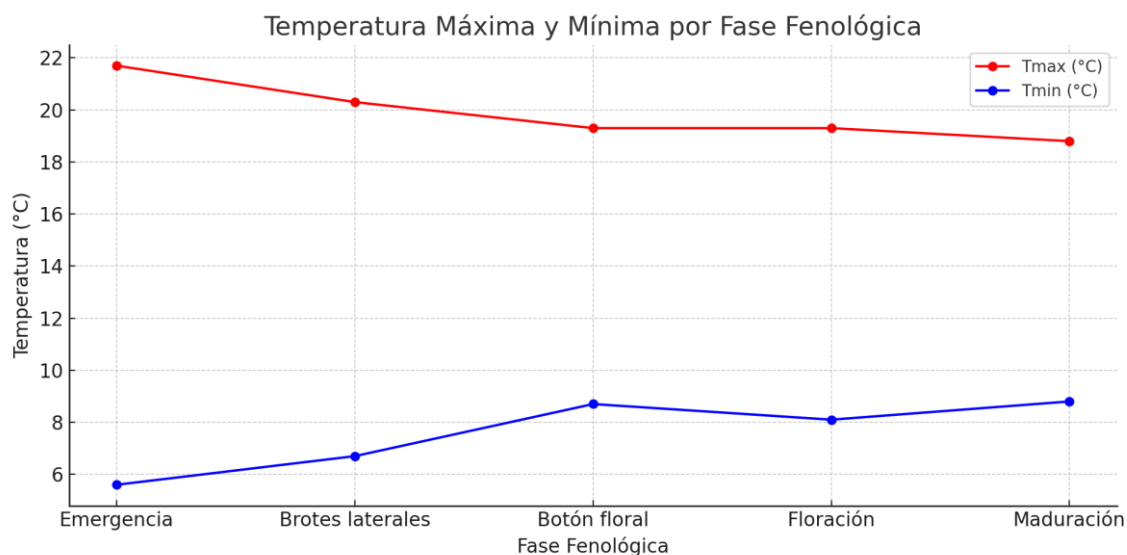


Figura 1: Temperatura promedio (máxima y mínima) durante ciclo del cultivo de papa

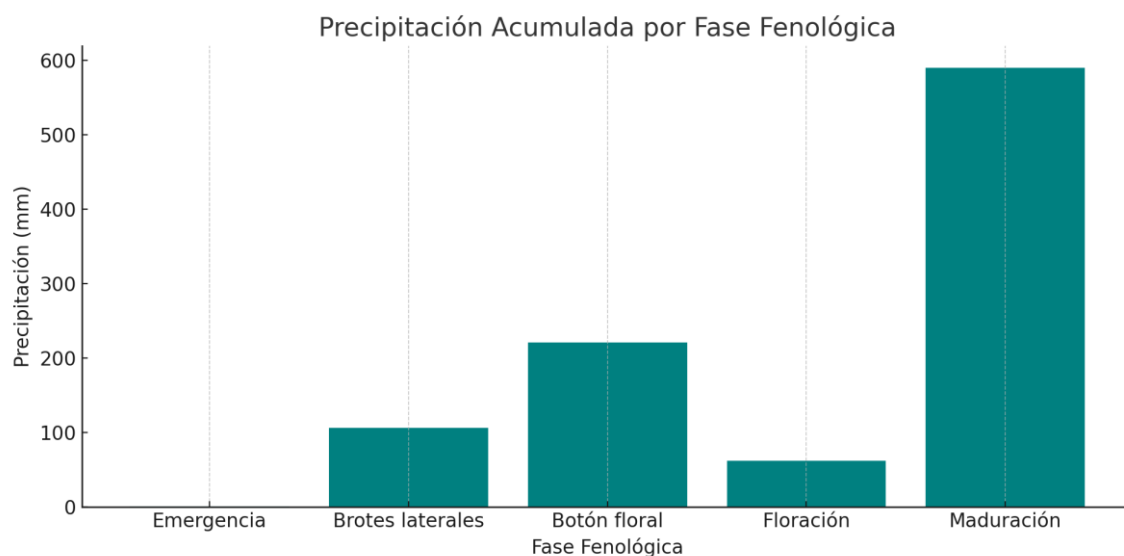


Figura 2: Precipitación registrada por fase fenológica del cultivo papa

### III. Resultados

#### 3.1 Condiciones Climáticas

El distrito de La Encañada (Alt.: 2980 m, Lat.: 7°7' S, Long.: 78°19' W), ubicado en la provincia de Cajamarca, presenta clima templado-frío, con temperaturas máximas de 18.7 °C a 19.8 °C, temperaturas mínimas de 4.2 °C a 8.5 °C y precipitación media acumulada anual de 949.3 mm (normal para el periodo 1991-2020).

La precipitación registrada durante el ciclo de producción del cultivo 2024-2025 (194 días) fue de 1108 mm, con distribución irregular. Así, se tuvieron picos de precipitación en el tercer periodo decadiario de octubre (87.4 mm) y diciembre (77.7 mm); en el primer periodo decadiario de enero (120.1 mm) y en el primero y tercero periodo decadiario de febrero (108.5 mm y 101.6 mm).

Además, se tuvieron períodos deficitarios de precipitaciones –respecto de sus normales de temporada- durante el segundo periodo decadiario de octubre (2.7 mm) y noviembre (0.0 mm); y en el tercer periodo decadiario de enero de 2025 (17.3 mm). La humedad relativa osciló entre 68.7% y 95.1%, con valores altos en diciembre–marzo.

### 3.2 Balance Hídrico

El balance hídrico revela déficits significativos en varias fases:

| Fase Fenológica  | Periodo           | Tmax (°C) | Tmin (°C) | Pp (mm) |
|------------------|-------------------|-----------|-----------|---------|
| Emergencia       | Oct–Nov 2024      | 21.7      | 5.6       | 0.9     |
| Brotes laterales | Nov–Dic 2024      | 20.3      | 6.7       | 106.4   |
| Botón floral     | Dic 2024–Ene 2025 | 19.3      | 8.7       | 221.1   |
| Floración        | Ene–Feb 2025      | 19.3      | 8.1       | 62.0    |
| Maduración       | Feb–Abr 2025      | 18.8      | 8.8       | 590.4   |

Tabla 1: Condiciones climáticas por fase fenológica

- Emergencia (10 días): Em de 1.61–3.09 mm/día, Kc 0.45–0.55, la precipitación de 0.9 mm generó un déficit acumulado de 19.2 mm. La baja AD (4.86 mm) limitó la disponibilidad de agua, afectando la emergencia uniforme (3).
- Brotes laterales (28 días): Em de 2.48–4.01 mm/día, Kc 0.57–0.83, con precipitación de 106.4 mm. Se registraron déficits en 18 días (déficit acumulado: 39.77 mm). Precipitaciones puntuales (ej., 10.3 mm el 28/11/2024 o 18.5 mm el 04/12/2024) no evitaron procesos de estrés hídrico.
- Botón floral (30 días): Em de 2.83–4.43 mm/día, Kc 0.85–1.00, con precipitación acumulada de 221.1 mm. Deficiencias hídricas acumuladas de 14.38 mm durante los primeros días de la fase, junto con excesos hídricos de 102.16 mm registrados durante finales de diciembre e inicios de enero, podrían haber afectado el desarrollo reproductivo.
- Floración (19 días): Em de 2.84–4.96 mm/día, Kc 1.01–1.04, con precipitación acumulada de 62 mm. Durante la fase se registró deficiencia acumulada de 30.4 mm, hecho que tendría correlato con la reducción en la acumulación de materia seca y por ende en la afectación en el tamaño y la calidad de los tubérculos (4).
- Maduración (83 días): Em de 2.23–4.82 mm/día, Kc 1.04–0.76, con precipitación acumulada de 590.4 mm. Excesos hídricos significativos (ej., 63.1 mm entre el 01 y 02/03/2025) y déficits en 18 días (24.77 mm acumulados) afectaron la calidad del tubérculo, propiciando escenarios favorables para la presencia de insectos plaga y retrasando las actividades de cosecha.

El déficit hídrico total fue de 138.47 mm, con períodos críticos en noviembre (emergencia, brotes laterales), en diciembre (botón floral), en enero (floración) y marzo (maduración). Los excesos hídricos en diciembre-enero (botón floral) y entre febrero-marzo (maduración) probablemente causaron lixiviación de nutrientes y favorecieron pudriciones (6).

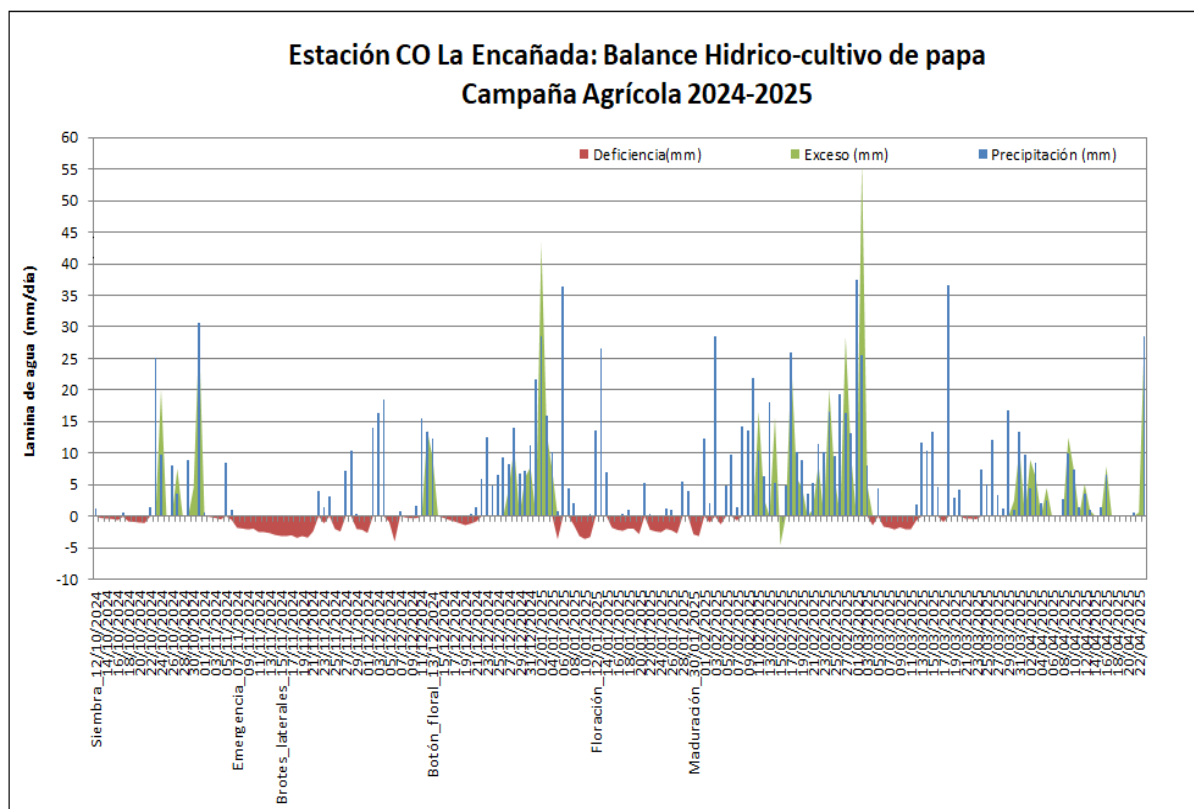


Figura 3: Balance hídrico del cultivo de papa Amarilis en La Encañada, campaña 2024-2025. Se muestra la evapotranspiración del cultivo (Em), precipitación (Pp), y déficits/excesos hídricos por etapa fenológica.

### 3.3 Impactos Climáticos por Fase Fenológica

- **Emergencia:** La baja precipitación (0.9 mm) y la AD limitada (4.86 mm) causaron estrés hídrico, afectando la uniformidad de la emergencia (3). Las temperaturas ( $T_{max}$  21.7 °C,  $T_{min}$  5.6 °C) fueron adecuadas, pero los contrastes térmicos pudieron inducir estrés inicial.
- **Brotes laterales:** Precipitaciones de 106.4 mm y temperaturas moderadas ( $T_{max}$  20.3 °C,  $T_{min}$  6.7 °C) favorecieron el desarrollo vegetativo. Sin embargo, suelos mal drenados pudieron incrementar el riesgo de enfermedades radicales (9), como lo reportado por el observador el 25 de noviembre sobre presencia de “Gorgojo de los Andes” (*Premnotrypes sp*) en el 5 % de la parcela, lo que obligó a la aplicación de tratamientos preventivos.
- **Botón floral:** Altas precipitaciones (221.1 mm) y temperaturas moderadas ( $T_{max}$  19.3 °C,  $T_{min}$  8.7 °C) fueron óptimas para el desarrollo reproductivo, pero la alta humedad relativa (>90%) aumentó el riesgo de tizón tardío (*Phytophthora infestans*) (7). En efecto, entre los días 15 y 21 de diciembre de 2024 se realizaron aplicaciones preventivas ante la posible presencia de tizón tardío o “ranchar”.
- **Floración:** Precipitaciones reducidas (62 mm) y temperaturas estables ( $T_{max}$  19.3 °C,  $T_{min}$  8.1 °C) crearon condiciones limitantes para el cuaje y la tuberización, con riesgo de patógenos (4). Esto se puede evidenciar en el cuadro de Balance hídrico (ver: Figura 3) donde se nota un periodo de déficit de precipitaciones.
- **Maduración:** Excesos hídricos (590.4 mm) y temperaturas nocturnas elevadas ( $T_{min}$  8.8 °C) probablemente causaron lixiviación de nutrientes, pudriciones y retrasos en la senescencia, afectando la calidad del tubérculo (6).

### 3.4 Rendimiento y Factores Limitantes

El rendimiento de 8.4 t/ha (4.6 t en 0.55 ha) representa solo el 28.6 % del potencial teórico de 30 t/ha (8). Los factores limitantes incluyen:

- Estrés hídrico: Déficits en emergencia (33.66 mm) y brotes laterales (49.29 mm) afectaron el establecimiento y desarrollo vegetativo (1).
- Excesos hídricos: Precipitaciones de 590.4 mm en maduración causaron lixiviación y pudriciones, reduciendo la calidad del tubérculo (6).
- Riesgo sanitario: Alta humedad en botón floral y maduración incrementó la incidencia de tizón tardío y enfermedades radiculares (7).
- Manejo agronómico: La falta de riego suplementario durante fases fundamentales, fertilización inadecuada y control insuficiente de plagas/enfermedades probablemente limitaron el rendimiento.
- Condiciones edáficas: La baja AD (4.86 mm en emergencia) restringió la disponibilidad de agua en fases críticas.

## IV. Discusión

El balance hídrico confirmaría que el estrés hídrico en fases de emergencia y brotes laterales, combinado con excesos hídricos en maduración, fueron los principales limitantes del rendimiento. La variedad Amarilis requiere 400–600 mm de agua distribuida uniformemente (1), pero la precipitación irregular (614.7 mm totales, con 590.4 mm en maduración) no satisfizo esta demanda. La alta humedad relativa y la falta de drenaje adecuado incrementaron el riesgo de enfermedades fúngicas, especialmente tizón tardío (7). Además, la ausencia de riego suplementario y un manejo agronómico poco adecuado (ej., fertilización y control fitosanitario) contribuyeron a la brecha de rendimiento.

## V. Conclusiones

El rendimiento de 8.4 t/ha del cultivo de papa de la variedad Amarilis en La Encañada, durante la campaña 2024-2025, fue limitado por déficits hídricos en emergencia y brotes laterales (déficit total: 164.81 mm), excesos hídricos en maduración (590.4 mm), y riesgos sanitarios asociados a la alta humedad.

Las condiciones climáticas fueron también limitantes durante la floración y las precipitaciones mostraron alta variabilidad a lo largo del ciclo del cultivo. La baja capacidad de retención de agua del suelo y el limitado manejo agronómico marcaron la brecha de rendimiento.

La implementación de riego suplementario, mejoramiento del suelo, fertilización balanceada y control fitosanitario puede acercar el rendimiento al potencial teórico de 30 t/ha.



Figura 4: Fotografías del cultivo, se muestra calibre de tubérculos, afectaciones por pudrición y condiciones de la parcela efecto de las precipitaciones.

## VI. Recomendaciones

Para mejorar el rendimiento en futuras campañas, se proponen las siguientes medidas:

1. Riego suplementario: Implementar riego por goteo o aspersión en fases críticas como emergencia, brotes laterales y maduración; para cubrir posibles déficits hídricos (1).
2. Manejo del suelo: Incorporar materia orgánica (ej., compost) para aumentar la AD, especialmente en fases críticas como emergencia (actualmente 4.86 mm).
3. Fertilización balanceada: Aplicar 120–150 kg/ha de N, 80–100 kg/ha de  $P_2O_5$ , y 100–120 kg/ha de  $K_2O$ , ajustados a las necesidades del suelo y de la variedad a instalar (8).
4. Control fitosanitario: Monitorear y controlar tizón tardío en botón floral y maduración, utilizando fungicidas y variedades resistentes (7).
5. Drenaje: Mejorar el drenaje en suelos para evitar encharcamientos durante períodos de alta precipitación (ej., maduración).
6. Ajuste de siembra: Reestructurar los calendarios agrícolas en función de los procesos de variabilidad climática, alineando la maduración con los periodos de menor precipitación.

## VII. Referencias Bibliográficas

- [1] Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper 56). Food and Agriculture Organization of the United Nations.

- [2] Barreda, C., Gavilán, C., & Flores, J. (2020). Impacto de la temperatura y precipitación en el rendimiento de papa. *Revista AgroClima*, 12(2), 45–60.
- [3] Centro Internacional de la Papa (CIP). (2019). Manual de cultivo de papa. <https://repositorio.inia.gob.pe/server/api/core/bitstreams/bbf189d2-31ec-4a87-9b69c654d7aedcfc/content>
- [4] Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). (2020). Factores ambientales y su efecto en el rendimiento de papa. CIAT.
- [5] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2008). Efectos del clima en los cultivos andinos. FAO.
- [6] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2019). Guía técnica del cultivo de papa en zonas altoandinas. FAO.
- [7] Hijmans, R. J. (2001). Global distribution of the potato crop. *American Journal of Potato Research*, 78 (6), 403–412. <https://vcru.wisc.edu/spoonerlab/pdf/Hijmans%20and%20Spooners%202001%20geography.pdf>
- [8] Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). (2019). Catálogo de variedades de papa nativa y mejorada. INIA.
- [9] Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). (2020). Manual de buenas prácticas agrícolas en papa. INIA.