

Modelos predictivos de crecimiento y desempeño agronómico de lechuga (*Lactuca sativa* L.) para la costa central del Perú

*Predictive Models of Growth and Agronomic Performance of Lettuce (*Lactuca sativa* L.) for the Central Coast of Peru*

 Erick Quispe¹ Andrés Casas¹ Isabel Montes¹ Saray Siura¹ Mauricio Maguiña² Alexis Dueñas¹mamaguina@up.edu.pe 

1.- Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú

2.- Universidad del Pacifico. Lima, Perú

Recibido: 15/02/2026

Revisado: 10/03/2026

Aceptado: 03/05/2026

Publicado: 06/07/2026

RESUMEN

La lechuga (*Lactuca sativa* L.) es una de las hortalizas de hoja más consumidas en el país, y se destaca en la costa central debido a las condiciones climáticas favorables que facilitan su desarrollo y producción óptimos. El análisis del crecimiento es fundamental para predecir su crecimiento y desarrollo, ya que brinda información para la toma de decisiones agronómicas en la agricultura. El objetivo del estudio fue determinar el comportamiento en sus principales etapas fenológicas de cuatro tipos de lechuga, así como sus patrones de crecimiento en ocho cultivares (Waldman Green, Rouxai, Behn, Desirade, Gaugin, White Boston, Parris Island y Patagonia) durante las temporadas de invierno y primavera en la costa peruana. El estudio se llevó a cabo en el campo experimental de Horticultura del PIPS de la UNALM, utilizando un diseño de bloques incompletos equilibrados con cuatro bloques y ocho tratamientos, evaluando diez plantas por unidad experimental desde once días después del trasplante hasta la cosecha, registrando datos sobre el número de hojas, la longitud y el ancho de la hoja más grande en cada etapa de crecimiento, para determinar modelos predictivos y sus variables de cosecha. Los parámetros de crecimiento se determinaron utilizando el software RStudio. Se observó que las etapas fenológicas varían entre los distintos tipos y cultivares, lo cual puede verse influenciado por factores ambientales. Los rendimientos mostraron diferencias significativas: el cultivar Patagonia (6,2 kg/m²) resultó significativamente superior; los cultivares Parris Island y White Boston (2,87 y 2,85 kg/m²) no mostraron diferencias significativas entre sí; y todos los cultivares de tipo foliar (entre 1,21 y 2,11 kg/m²) tampoco mostraron diferencias significativas entre ellos. Se observó que los modelos predictivos ARIMA y de regresión proporcionaron un alto porcentaje de variabilidad explicable por el modelo, según la prueba de Ljung-Box.

Palabras clave: Estadios fenológicos, patrones de crecimiento, modelos predictivos de crecimiento.

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Rev. Investigaciones ULCB. Jul - Dic.13(2), 2026; ISSN: 2409 - 1537;117-130

ABSTRACT

Lettuce (*Lactuca sativa* L.) is one of the most consumed leafy vegetables in the country, standing out in the central coast due to favorable climatic conditions that facilitate its optimal development and production. Growth analysis is crucial to predict its growth and development, providing information for agronomic decision making in agriculture. The objective of the study was to determine the behavior in their main phenological stages of four types of lettuce, as well as their growth patterns in eight cultivars (Waldman Green, Rouxai, Behn, Desirade, Gaugin, White Boston, Parris Island and Patagonia) during the winter and spring seasons on the Peruvian coast. The study was carried out in the experimental field of Horticulture PIPS at UNALM, using a balanced incomplete block design with four blocks and eight treatments, evaluating ten plants per experimental unit from eleven days after transplanting until harvest, recording data on the number of leaves, length and width of the largest leaf at the growth stage, to determine predictive models and their harvest variables. Growth parameters were determined using RStudio software. It was observed that phenological stages vary between types and cultivars, which can be influenced by environmental factors. Yields showed significant difference, with the Patagonia cultivar (6.2 kg/m²) being significantly superior, Parris Island and White Boston (2.87 and 2.85 kg/m²) showing no significant difference, and all leaf type cultivars (between 1.21 and 2.11 kg/m²) showing no significant difference between them. It was found that the predictive ARIMA and regression models provided a high percentage of variability that can be explained by the model according to the Ljung-Box test.

Keyword: Phenological stages, growth patterns, predictive growth models.

INTRODUCCIÓN

En Perú, los tipos de lechuga de mayor relevancia son la acogollada, butterhead, hoja suelta y romana. La acogollada conocida como cabeza presenta hojas externas se disponen de manera abierta, mientras que las nuevas e internas forman un cogollo o cabeza compacta. El tipo butterhead forma una cabeza semiabierta, que no está compacta; con hojas lisas, suaves y algo aceitosas. La de hoja suelta forma una roseta y no cabeza (García, 2013). Para el tipo cos también conocida como romana, que no forma un cogollo verdadero, presenta hojas alargadas con nervaduras prominentes, con una destacada tolerancia al calor (Fontenot *et al.*, 2014 y García, 2013).

La importancia de la lechuga radica en que al ser una de las hortalizas más comunes y ampliamente consumidas a nivel

mundial (Saavedra *et al.*, 2017). En la costa central del Perú, toma importancia debido a su adaptación a las condiciones agroclimáticas que favorece un buen desarrollo (Floríndez y Siura, 2006). No obstante, debido al cambio climático algunos cultivares no están aclimatados en una zona con condiciones específicas, esto podría causar un efecto negativo en la producción. Por tanto, se emplean nuevos cultivares que se consideren aptos según los estándares climáticos requeridos del cultivo (Vásquez-Camacho, 2015) y a su vez los modelos predictivos de crecimiento. Estos modelos permiten no sólo anticipar el crecimiento en función del clima y otros factores, sino también identificar los cultivares más aptos para maximizar la producción en escenarios climáticos cambiantes.

El modelo predictivo de crecimiento en las plantas son herramientas fundamentales para la toma de decisiones en el campo, además de evaluar las condiciones meteorológicas. Estos modelos han sido utilizados ampliamente en el estudio de los factores que influyen en el desarrollo y el rendimiento a través del seguimiento durante un tiempo (Santos *et al.*, 2010). El análisis de regresión se enfoca en examinar la relación entre dos variables cuantitativas, buscando determinar si existe una asociación mediante la prueba de la hipótesis de independencia estadística. Además, permite medir la intensidad de dicha asociación a través del coeficiente de correlación y proponer un modelo que prediga el valor de una variable en función de la otra (Orellana, 2008).

Los modelos predictivos establecen una relación entre el pronóstico de un objeto de estudio y uno o más atributos conocidos de ese objeto, en la búsqueda por entender y predecir el resultado específico, basándose en características que ya se conoce sobre él (Espino, 2017). De ese modo, a la fecha se disponen de modelos matemáticos tradicionales, también conocidos como sigmoidales, siendo los más utilizados el modelo de Gompertz y los modelos logístico y exponencial, estos últimos aplicables al crecimiento temprano. También se usan los modelos basados en inteligencia artificial, tales como estimación por Imágenes RGB-D, redes neuronales convolucionales (CNN) y Árboles de Decisión Potenciados (ADP) (Liang *et al.*, 2025), estos últimos integran datos climáticos (temperatura, humedad) y de suelo para optimizar la toma de decisiones en sistemas hortícolas (Jiménez *et al.*, 2014). La mayoría de los modelos utilizan variables clave en el modelado, como: temperatura, nive-

les de fertilización, y el tipo de sistema de conducción. En nuestro caso, se emplearán modelos probabilísticos basados en la técnica de series de tiempo.

El objetivo principal del presente artículo es presentar los resultados observados y modelados del comportamiento de cuatro tipos de lechuga (acogollada, cos, semi compacta y hoja) en las etapas fenológicas principales, identificando patrones de crecimiento, en las condiciones climáticas de la costa central – La Molina, que como se sabe es un contexto de hiper aridez. La utilidad de contar con modelos alométricos ha sido destacada ampliamente en la literatura internacional, dada su elevada utilidad para la estimación de rendimientos en periodos críticos como de invierno - primavera en la costa central.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del ensayo

El experimento se desarrolló a lo largo de 96 días y la fase experimental se llevó a cabo en “Campo Alegre 3”, el cual forma parte del Programa de Investigación en Hortalizas- UNALM (PIH), que se observa en la Figura 1a, con coordenadas -12.08372, -76.94286.

Diversas fuentes indican que el desarrollo óptimo de la lechuga ocurre en climas frescos y templados, con temperaturas diurnas entre 18 a 23 °C y nocturnas entre 7° a 15°C (Suclla, 2023). Cabe señalar que las condiciones meteorológicas, durante el desarrollo del ensayo que se aprecia en el agroclimatograma de la Figura 1b, se caracterizaron por presentar temperaturas que oscilaron entre 15,5 y 23,7 °C, de 77,3 a 90,2 % de humedad relativa del aire y precipitaciones concentradas en el periodo mayo a septiembre en un rango de 0,2 a 1,2 mm.mes-1. Según la clasificación de Brack

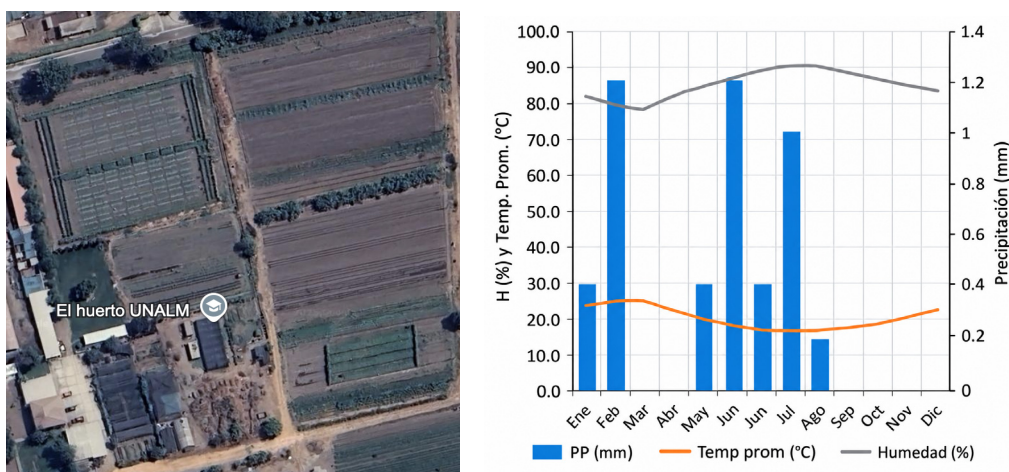


Figura 1: Ubicación y condiciones climáticas del experimento en el Programa de Investigación en Hortalizas-UNALM (PIH).

Nota: a. Imagen satelital de la ubicación del Programa de Investigación en Hortalizas con la parcela experimental. Fuente (Google Earth, 2025) Agroclimatograma anual con temperatura máxima y mínima (°C), humedad relativa (%) y precipitación (mm). Fuente: Estación climática Von Humbolt-UNALM.

(2009), el área experimental corresponde al ecosistema de desierto costero, más precisamente ubicado en el valle costero desértico, en condiciones de extrema aridez.

Material vegetativo

El material vegetal utilizado se compuso de ocho cultivares de lechuga (Tabla 1) proporcionados por el PIH, cuyas semillas se sembró en almácigos, durante 24 días en una casa malla, utilizando un sustrato compuesto por 75 % del sustrato Premix, 10 % de arena y 15 % de musgo. No habiéndose presentado plagas o enfermedades que afecten la calidad de los plantines, que luego se dispusieron a campo abierto, las parcelas experimentales del ensayo.

Estadios fenológicos principales

Conforme a lo señalado por Bleiholder *et al.* (2001) se utilizó la codificación BBCH de los estadios fenológicos de hortalizas que forman cabeza y aquellas que no forman cabeza (Tabla 2), considerando el 50% más 1 de la población de

cada unidad experimental para determinar que el cultivar, bajo evaluación, ha alcanzado esa etapa.

Análisis estadístico y tratamiento de la data

El diseño experimental utilizado fue de Bloques Incompletos Balanceados, Con $b=4$ bloques y $k=2$ tratamientos por bloque, cada cultivar tiene sólo $r=2$ repeticiones ($\lambda=1$) Cada unidad experimental constó de 40 plantas sembradas en tres bolillos (doble hilera en una cinta de riego), de las cuales se seleccionaron diez plantas de forma aleatoria para realizar las evaluaciones.

Las evaluaciones semanales incluyeron como variables de interés: el número de hojas, el largo y ancho de las hojas más grandes, con el fin de desarrollar un modelo predictivo y una ecuación para pronosticar su tamaño. Además, se determinaron sus etapas fenológicas principales y el peso con el fin de calcular el rendimiento (kg/m²) durante su cosecha.

Tabla 1.

Cultivares de lechuga evaluados en el ensayo

Cultivar	Tipo	Característica	Fuente
Waldman Green	Hoja	Presenta hojas grandes crespas y sueltas	Saavedra <i>et al.</i> , 2017
Rouxai	Hoja	Es de color roja intenso, hojas sueltas, es un cultivo de época de invierno	Rijk Zwaan, 2023
Behn	Hoja	Presenta hoja de roble verde intenso brillante, cultivares de base erecta	Rijk Zwaan, 2023
Desirade	Hoja	Presenta hojas sueltas crespas	Rijk Zwaan, 2023
Gaugin	Hoja	Sus hojas son muy robustas con muy buen contraste de color	Rijk Zwaan, 2023
White Boston	Butterhead	Sus hojas son grandes alargadas, forman cogollo, es blanda con forme se acerca al interior	Rijk Zwaan, 2023
Parris Island	Cos	No forman verdadero cogollo, hojas oblongas con bordes enteros	Saavedra <i>et al.</i> , 2017
Patagonia	Arrepollada	Estas lechugas forman un cogollo apretado de hojas	Rijk Zwaan, 2023

Tabla 2.

Estado fenológico de la lechuga que forman cabeza y los que no forman cabeza

Lechuga que forma cabeza	
Estadio 0: (germinación)	Desde la semilla seca hasta la emergencia de los cotiledones.
Estadio 1: (desarrollo de hojas)	Desde que los cotiledones están completamente desarrollados hasta que tengan nueve (9) hojas verdaderas desplegadas.
Estadio 4: (desarrollo de los órganos de almacenamiento vegetativo)	Desde la formación de la cabeza hasta que presente un tamaño, forma y firmeza de la cabeza.
Lechuga que no forman cabeza	
Estadio 0: (germinación)	Desde la semilla seca hasta la emergencia de los cotiledones.
Estadio 1: (desarrollo de hojas)	Desde que los cotiledones están completamente desarrollados hasta que tengan nueve (9) hojas verdaderas desplegadas.
Estadio 3: (crecimiento de la roseta)	Desde que la roseta alcanza el 30% del diámetro típico hasta que la roseta esté completamente desarrollada.

Nota: Tomado de Bleiholder *et al.* (2001)

Se emplearon tres modelos predictivos (regresión, ARIMA y redes neuronales), definidos mediante ecuaciones que incluyen parámetros y estados de ajuste iniciales con estimación de parámetros para minimizar el error de cada modelo, que permitió encontrar valores más ajustados a los datos observados (IBM, 2024a). Se evaluó la presencia de autocorrelación significativa de residuales mediante la prueba de Ljung-Box. Con base en los resultados obtenidos, se formularon ecuaciones predictivas para el crecimiento de las plantas de cada cultivar evaluado. Además, en el caso del modelo de regresión, se calculó el coeficiente de determinación (R^2) para verificar qué proporción de la variabilidad es explicada por el modelo, así como el p-valor de la prueba de t-student para determinar si las variables independientes tienen una relación significativa con la variable de respuesta.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fenología comparada

En la lechuga tipo hoja, el estado fenológico 0 (germinación) abarcó desde el día 0 hasta el día 4, mientras que el estado fenológico 1 (desarrollo de hojas) se extendió desde el día 5 hasta el día 39 después de la siembra (DDS) o el día 15 después del trasplante (DDT). Para el tipo cos, el estado fenológico 0 abarcó desde el día 0 hasta el día 4, mientras que el estado fenológico 1 se dio desde el día 5 hasta el día 35 DDS o el día 11 DDT.

En el caso del tipo butterhead, el estado fenológico 0 se extendió desde el día 0 hasta el día 6 DDS, mientras que el estado fenológico 1 se inició en el día 7 hasta el día 53 DDS o el día 29 DDT. Por último, para el tipo arrepollada, el estado fenológico 0 se desarrolló desde el día 0 hasta el

día 7, mientras que el estado fenológico 1 abarcó desde el día 8 hasta el día 60 DDS o el día 36 DDT (Figura 2).

Dinámicas productivas

Se determinó que el rendimiento en kg./m² entre cultivares fue altamente significativo para prueba de Tukey para un alfa de 0,05, presentando un p-valor inferior a $2,21 \times 10^{-16}$. Esto permite concluir que existe una variación significativa en el rendimiento entre los cultivares. Además, el coeficiente de variabilidad fue del 9,432 %, que sugiere que el error estándar es bajo y que los resultados de la inferencia estadística son precisos y robustos (Figura 3). El cultivar Patagonia destaca por presentar el mayor promedio en comparación con los demás cultivares. Por su parte, Parris Island y White Boston no presentan diferencias significativas entre sí, pero sus promedios son cercanos al del cultivar Waldman Green. Por otro lado, los cultivares Rouxaï, Desirade, Behn, Gaugin y Waldman Green no muestran diferencias significativas entre ellos.

Modelos predictivos: Tendencia de crecimiento de la biomasa comercial

En la Figura 4 se muestra el pronóstico del crecimiento de lechuga en términos del número de hojas para los cultivares en evaluación, utilizando modelos predictivos de regresión lineal, ARIMA y redes neuronales.

Con base en el modelo predictivo de regresión lineal, se determina que la ecuación de regresión permite predecir adecuadamente el número de hojas, el largo y el ancho de la hoja más grande de la planta, que son las variables dependientes, en función del tiempo, que es la variable independiente. La prueba de Ljung-Box indica que los modelos regresión y ARIMA

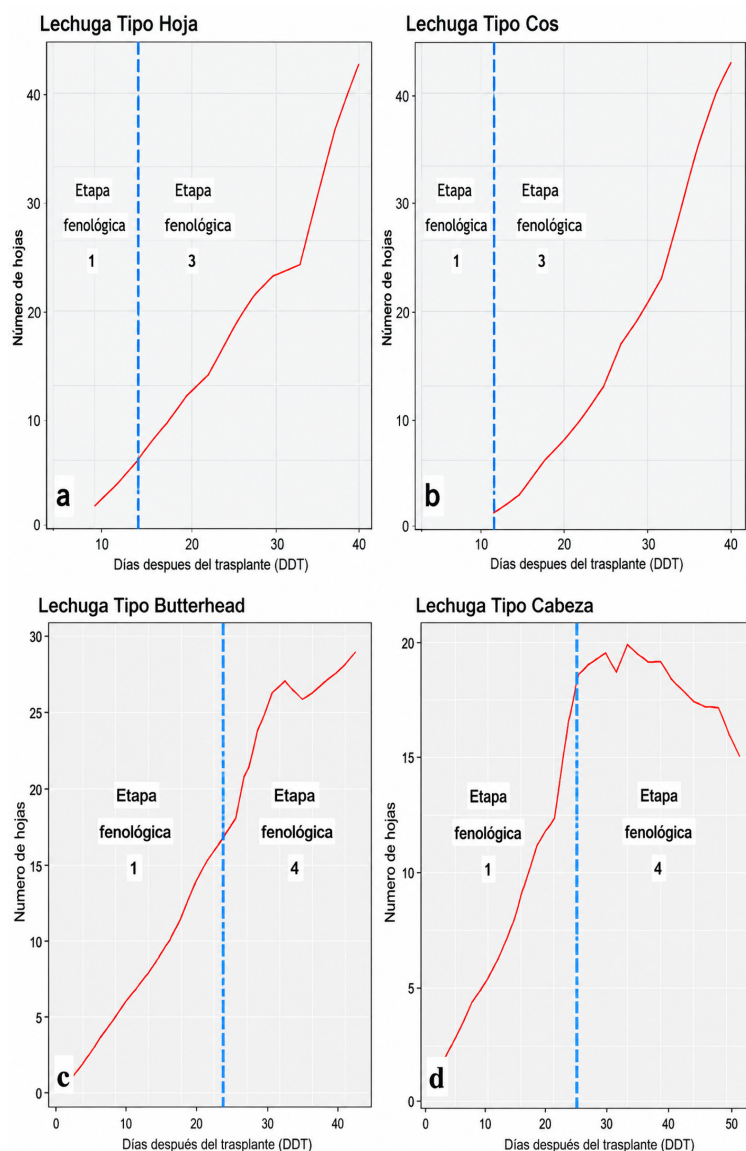


Figura 2: Etapas fenológicas principales de cuatro tipos de lechugas para el periodo julio- octubre en la costa central del Perú

Nota: (a) estado fenológico de tipo hoja, (b) estado fenológico de tipo cos, (c) estado fenológico de tipo butterhead, (d) estado fenológico de tipo arrepollada.

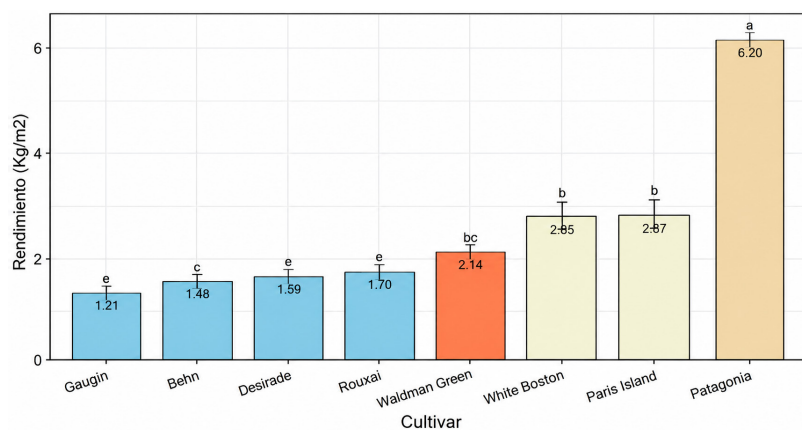


Figura 3: Prueba de Tukey al 0.05, para el promedio del rendimiento de los ocho cultivares de lechuga

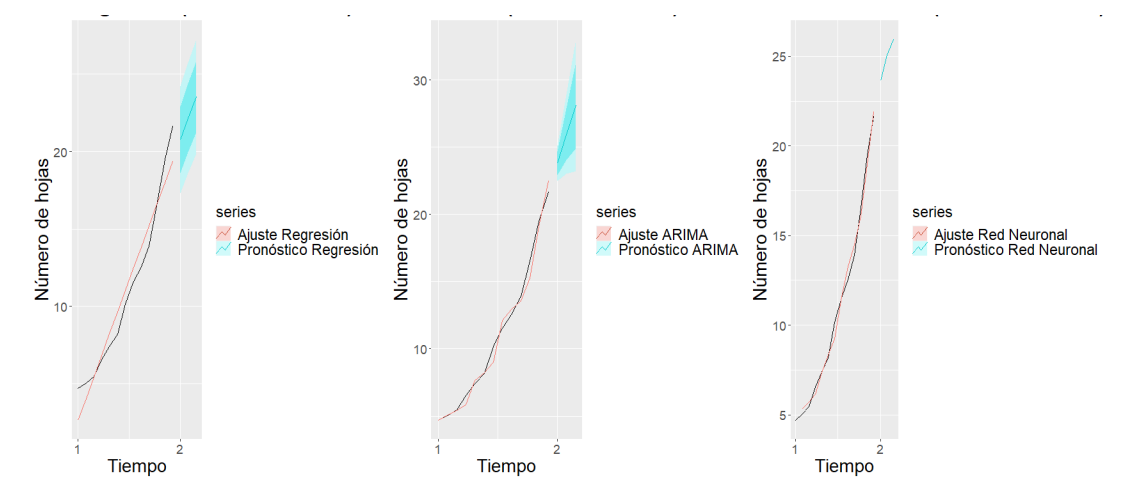


Figura 4: Serie de tiempo, ajuste y pronóstico de modelos (regresión simple, ARIMA y redes neurales) para el número de hojas en los ocho cultivares

Nota: a. Método de regresión, b. Método ARIMA y c. Método Redes Neuronales para el caso del cultivar Waldman Green en una siembra de invierno-primavera en la costa central del Perú.

presentan, en su mayoría, un p-valor superior al 0,05 en comparación con el modelo de redes neuronales, lo que sugiere que los modelos de regresión y ARIMA se ajustan mejor a los datos observados.

Las ecuaciones de los ocho cultivares para las variables: número de ho-

jas, largo y ancho de la hoja más grande, en función al tiempo se aprecia en la Tabla 3; según el coeficiente determinación (R^2 -ajustado) es superior al 0,90, luego, el estadístico de F es significativamente alto, con p-valor inferior a 0,05, 0,01 y 0,001, respectivamente. Por tanto, los modelos

Tabla 3.
Ecuaciones alométricas del crecimiento en términos del número de hoja, largo y ancho de la hoja más grande de ocho cultivares de lechuga, sembrados en la época de invierno-primavera en la costa central del Perú

Cultivar	Número de hojas	Largo de hoja	Ancho de hoja
Waldman Green	$Y = 1.248 + 1.395T + 1.355$	$Y = 6.401 + 0.838T + 0.538$	$Y = 3.037 + 1.177T + 0.441$
	$R^2 = 0.9461$	$R^2 = 0.9757$	$R^2 = 0.9916$
	$R^2 \text{ adj} = 0.9411$	$R^2 \text{ adj} = 0.9735$	$R^2 \text{ adj} = 0.9908$
	F-valor = 192.9	F-valor = 442.4	F-valor = 1299
	gl = 11	gl = 11	gl = 11
	p-valor = $2.56 e^{-08}$	p-valor = $3.11 e^{-10}$	p-valor = $9.01 e^{-13}$
Rouxai	$Y = 0.475 + 1.637T + 2.039$	$Y = 5.499 + 0.397T + 0.464$	$Y = 3.242 + 0.64T + 0.911$
	$R^2 = 0.9597$	$R^2 = 0.9643$	$R^2 = 0.948$
	$R^2 \text{ adj} = 0.9575$	$R^2 \text{ adj} = 0.9624$	$R^2 \text{ adj} = 0.9451$
	F-valor = 428.8	F-valor = 486.7	F-valor = 328.1
	gl = 18	gl = 18	gl = 18
	p-valor = $5.28 e^{-14}$	p-valor = $1.76 e^{-14}$	p-valor = $5.29 e^{-13}$

Cultivar	Número de hojas	Largo de hoja	Ancho de hoja
Behn	$Y = 2.344 + 2.162T + 2.111$	$Y = 4.726 + 0.57T + 0.205$	$Y = 1.818 + 0.674T + 0.392$
	$R^2 = 0.9521$	$R^2 = 0.9932$	$R^2 = 0.9825$
	$R^2 \text{ adj} = 0.9481$	$R^2 \text{ adj} = 0.9926$	$R^2 \text{ adj} = 0.981$
	F-valor = 238.6	F-valor = 1752	F-valor = 674
	gl = 12	gl = 12	gl = 12
Desirade	$p\text{-valor} = 2.78 e^{-09}$	$p\text{-valor} = 2.24 e^{-14}$	$p\text{-valor} = 6.51 e^{-12}$
	$Y = 2.548 + 1.298T + 2.276$	$Y = 5.198 + 0.338T + 0.944$	$Y = 3.85 + 0.748T + 0.79$
	$R^2 = 0.8432$	$R^2 = 0.9439$	$R^2 = 0.9369$
	$R^2 \text{ adj} = 0.829$	$R^2 \text{ adj} = 0.9388$	$R^2 \text{ adj} = 0.9311$
	F-valor = 59.16	F-valor = 185	F-valor = 163.3
Gaugin	gl = 11	gl = 11	gl = 11
	$p\text{-valor} = 9.48 e^{-06}$	$p\text{-valor} = 3.18 e^{-08}$	$p\text{-valor} = 6.08 e^{-08}$
	$Y = 1.057 + 4.1186T + 3.897$	$Y = 4.413 + 0.408T + 0.212$	$Y = 2.779 + 0.748T + 0.14$
	$R^2 = 0.9549$	$R^2 = 0.9859$	$R^2 = 0.9912$
	$R^2 \text{ adj} = 0.9511$	$R^2 \text{ adj} = 0.9848$	$R^2 \text{ adj} = 0.9904$
White Boston	F-valor = 254.1	F-valor = 841.7	F-valor = 1344
	gl = 12	gl = 12	gl = 12
	$p\text{-valor} = 1.94 e^{-09}$	$p\text{-valor} = 1.75 e^{-12}$	$p\text{-valor} = 1.09 e^{-13}$
	$Y = 4.361 + 1.584T + 1.462$	$Y = 4.855 + 0.517T + 0.328$	$Y = 1.295 + 0.743T + 0.455$
	$R^2 = 0.9696$	$R^2 = 0.9854$	$R^2 = 0.9864$
Parris Island	$R^2 \text{ adj} = 0.9676$	$R^2 \text{ adj} = 0.9844$	$R^2 \text{ adj} = 0.9855$
	F-valor = 478.9	F-valor = 1012	F-valor = 1087
	gl = 15	gl = 15	gl = 15
	$p\text{-valor} = 8.53 e^{-13}$	$p\text{-valor} = 3.49 e^{-15}$	$p\text{-valor} = 2.05 e^{-15}$
	$Y = 0.361 + 1.743T + 1.984$	$Y = 6.236 + 0.912T + 0.48$	$Y = 1.726 + 0.963T + 0.506$
Patagonia	$R^2 = 0.9361$	$R^2 = 0.9856$	$R^2 = 0.9857$
	$R^2 \text{ adj} = 0.9307$	$R^2 \text{ adj} = 0.9844$	$R^2 \text{ adj} = 0.9845$
	F-valor = 175.7	F-valor = 822.5	F-valor = 824.9
	gl = 12	gl = 12	gl = 12
	$p\text{-valor} = 1.58 e^{-08}$	$p\text{-valor} = 2.01 e^{-12}$	$p\text{-valor} = 1.97 e^{-12}$
	$Y = 5.061 + 0.518T + 1.996$	$Y = 3.367 + 0.949T + 0.694$	$Y = 0.611 + 1.27T + 0.594$
	$R^2 = 0.7489$	$R^2 = 0.9881$	$R^2 = 0.9951$
	$R^2 \text{ adj} = 0.7363$	$R^2 \text{ adj} = 0.9875$	$R^2 \text{ adj} = 0.9948$
	F-valor = 59.63	F-valor = 1655	F-valor = 4049
	gl = 20	gl = 20	gl = 20
	$p\text{-valor} = 2.01 e^{-07}$	$p\text{-valor} = < 2.2 e^{-16}$	$p\text{-valor} = < 2.2 e^{-16}$

evaluados son robustos y representativos para este grupo de variables.

Los cambios observados en el comportamiento fisiológico de los cultivares de lechuga, según tipos de agrupación (hoja, arrepollada y romana), se manifestaron en el periodo de duración de diferentes estadios fenológicos. Por ejemplo, en los cultivares de tipo hoja, el cambio del estado fenológico 1 (desarrollo de hojas) ocurrió a los 15 días después del trasplante (DDT) con un promedio de 8,55 hojas, que es superior a lo reportado por Carguachi (2022), quien observó este cambio a los 13 DDT con 8,28 hojas en condiciones de invernadero, es decir en condiciones controladas y no de campo abierto, como en nuestro caso, donde factores como la temperatura y la radiación influyen en el crecimiento (número de hojas), por un lado, y en el desarrollo (cambio de estadio fenológico), por otro lado. En los cultivares de tipo romana o cos, el estado fenológico 1 ocurrió a los 11 DDT, a pesar de que el número de hojas fue menor a las nueve (9) establecidas por los descriptores de la BBCH (2001); esta diferencia es atribuible al proceso de adaptación del cultivar Parris Island a las condiciones de hiperaridez de la costa central del Perú.

En los cultivares tipo butterhead, el estado fenológico 1 se alcanzó a los 29 DDT, con un promedio de 18,5 hojas, coincidiendo con el inicio de la formación de la cabeza, conforme a la clasificación BBCH. El crecimiento de nuevas hojas se desaceleró durante la formación de la cabeza, alcanzando la etapa de compactación semicompleta próximo a los 72 días, después de la siembra (DDS). Por otro lado, la lechuga tipo arrepollada mostró un cambio a la formación de la cabeza a los 60 DDS con 14 hojas, supe-

rando lo reportado por INATEC (2018), que indicaba la formación a los 50-55 DDS con 13 hojas. Las variaciones, en el tiempo de formación, pueden depender de la época del año y debido a la firmeza y compactación de la cabeza, las etapas fenológicas que, en este tipo de lechuga, tienden a ser más prolongadas.

En lo referente a los rendimientos, se observa que los cultivares de lechuga tipo hoja no presentan diferencias significativas entre sí, con valores que oscilan entre 1,21 y 2,11 kg/m² (equivalente a 12,12 y 21,13 t/ha, respectivamente). Estos resultados coinciden con lo reportado por López (2019), quien encontró un rendimiento promedio de 18,0 t/ha para el cultivar Waldman Green. Por otro lado, el cultivar Parris Island alcanzó un rendimiento de 2,87 kg/m² (28,71 t/ha), superior a lo informado por Alvario (2018), que reportó un rendimiento de 5,71 t/ha para la lechuga tipo cos. De forma similar, el cultivar White Boston logró 28,53 t/ha, superando los rendimientos registrados por López (2019) de 11,50 t/ha. Aunque el ciclo de cosecha de White Boston es 7 días más largo, esto no afecta significativamente su rendimiento; situación que alude a un mayor tiempo de crecimiento, pero que no implica mayores rendimientos. Finalmente, el cultivar Patagonia, de tipo arrepollada, mostró el mayor rendimiento con 6,2 kg/m² (62,00 t/ha), superando lo reportado por Yucra (2019), quien encontró 56,37 t/ha en la misma zona de La Molina. Este mayor rendimiento puede atribuirse a la acumulación de biomasa durante el periodo de crecimiento extendido y a su característica de formar una cabeza compacta, aspecto que incrementa el peso por planta e influye en el rendimiento que, para este caso, resulta ser una variable solo relativa.

El comportamiento del crecimiento y el desarrollo de una especie vegetal puede ser incierto, por ello es evaluó diversos modelos probabilísticos para contar con una herramienta que permita pronosticar los efectos de la formación de biomasa (Li *et al.*, 2022 y Valencia-Islas *et al.*, 2023). En ese contexto, el uso de modelos de regresión simple, ARIMA y redes neuronales, para predecir el crecimiento del número de hojas en los ocho cultivares de lechuga ha sido demostrado como viable y útil (Moon *et al.*, 2022). La prueba de Ljung-Box se utilizó para evaluar la presencia de autocorrelaciones significativas en los residuos de estos modelos, confirmando que, en la mayoría de los casos, el p-valor fue superior a 0.05. Esto sugiere que los modelos de regresión y ARIMA capturan adecuadamente las estructuras temporales presentes en los datos, y que los residuos pueden considerarse como ruido blanco, es decir, son independientes entre sí y no presentan patrones de autocorrelación (Romero, 2021). Como resultado, estos modelos se consideran adecuados, lo que refuerza la fiabilidad de sus predicciones, más aún por la linealidad del crecimiento en el tiempo.

El coeficiente de determinación (R^2) obtenido en los modelos de regresión indica una alta proporción de la variabilidad explicada por las variables predictoras. Por su parte, el R^2 ajustado ofrece una medida más precisa del ajuste del modelo, dado que corrige el impacto del número de variables, penalizando la inclusión de variables no significativas (IBM, 2024b). Un R^2 ajustado más alto refleja un mejor ajuste del modelo, considerando su complejidad (Marco, 2018). Además, un p-valor menor a 0,05 sugiere que las variables indepen-

dientes tienen un efecto significativo en la variable de respuesta, validando así la capacidad predictiva de los modelos. Por el contrario, un p-valor alto indicaría que los cambios en la variable independiente no están asociados con la variable de respuesta (Addlink, 2015).

CONCLUSIONES

Los tiempos de transición entre las etapas fenológicas varían significativamente según los tipos, pero también pueden variar dependiendo las características de cada cultivar, en especial para cultivares del tipo de hoja; debido principalmente a la dinámica de crecimiento de las hojas. Sin embargo, estos cambios pueden ser ocasionados por factores externos como las condiciones climáticas. De otro lado, los cultivares que permanecen más tiempo en campo, su crecimiento no garantiza necesariamente mayores rendimientos, como es el caso de cultivares con los tipos de lechuga cos, butterhead y hoja. No obstante, los cultivares que forman cabezas compactas tienden a mostrar rendimientos significativamente superiores. Por último, se concluye que, entre los tres modelos de crecimiento utilizados, tanto ARIMA como la regresión simple mostraron una adaptación destacada. Por lo tanto, son modelos básicos para construir la ecuación alométrica para predecir los futuros crecimientos con una efectividad superior al 90 %.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Programa de Investigación Hortícola de la Universidad Nacional Agraria La Molina por permitirles utilizar las instalaciones de campo, así como por los materiales y insumos proporcionados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Addlink. (2015). Cómo interpretar los resultados del análisis de regresión: p-valores y coeficientes. <https://www.addlink.es/noticias/minitab/2540-como-interpretar-los-resultados-del-analisis-de-regresion-p-valores-y-coeficientes>
- Alvario, A. G. (2018). *Influencia de tres bioestimulantes aplicados al follaje sobre el rendimiento de la lechuga “romana” (Lactuca sativa L.) en la zona de Pueblo Viejo* [Tesis de grado, Universidad Técnica de Babahoyo]. Repositorio de la Universidad Técnica de Babahoyo. <https://redi.cedia.edu.ec/document/505252>
- Bleiholder, H., Buhr, L., Feller, C., Hack, H., Hess, M., Klose, R., Meier, U., Stauß, R., van den Boom, T., y Weber, E. (2001). Compendio para la identificación de los estadios fenológicos de especies mono- y dicotiledóneas cultivadas: Escala BBCH extendida.
- Carguachi, L. (2022). *Evaluación del rendimiento de lechuga crespa (Lactuca sativa L.) var. Batavia, en dos tipos de invernaderos, parroquia Calpi, cantón Riobamba, provincia de Chimborazo* [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. Repositorio de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/17454/1/13T01022.pdf>
- Espino, C. (2017). *Análisis predictivo: Técnicas y modelos utilizados y aplicaciones del mismo: Herramientas open source que permiten su uso* [Trabajo de fin de grado, Universidad Abierta de Catalunya]. Repositorio de la Universidad Abierta de Catalunya. <https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/59565/6/caresptimTFG-0117mem%C3%B2ria.pdf>
- Floríndez, J., y Siura, S. (2006). *Evaluación de cultivares de lechuga (Lactuca sativa L.) para producción de lechuga miniatura y madura bajo cultivo orgánico*. [Tesis, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio Institucional de la Universidad Agraria La Molina.
- Fontenot, K., Johnson, C., Williams, B., Afton, W., Lewis, M., y Morgan, A. (2014). Vegetable gardening tips. Louisiana State University AgCenter.
- García, M. (2013). El cultivo de la lechuga [The lettuce growing]. Universidad de Valladolid. https://www5.uva.es/guia_docente/backup/2013/446/42109/1/Documento2.pdf
- IBM. (2024a, 29 de febrero). Modelos de previsión. IBM Documentation. <https://www.ibm.com/docs/es/cognos-analytics/11.1.0?topic=forecasting-models>
- IBM. (2024b, 22 de enero). R cuadrado ajustado. IBM Documentation. <https://www.ibm.com/docs/es/cognos-analytics/11.2.0?topic=terms-adjusted-r-squared>
- Instituto Nacional Tecnológico. (2018). Cultivos de hortalizas. https://www.tecnacional.edu.ni/media/Hortalizas_3X2OH2y.pdf

- Jiménez-Morales, V. D., Trejo-Téllez, L. I., Gómez-Merino, F. C., y Volke-Haller, V. H. (2014). Modelos de simulación del crecimiento de lechuga en respuesta a la fertilización orgánica y mineral. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 37(3), 249–254. <https://doi.org/10.35196/rfm.2014.3.249>
- Li, Q., Gao, H., Zhang, X., Ni, J., y Mao, H. (2022). Describing lettuce growth using morphological features combined with nonlinear models. *Agronomy*, 12(4), 860. <https://doi.org/10.3390/agronomy12040860>
- Liang, S., Duc Long, N. V., Parvin, M. I., Escribà-Gelonch, M., Lantin, S., y Hessel, V. (2025). Digital twin for lettuce growth in six climate zones (“Climate 2050”). *Computers and Electronics in Agriculture*, 238, 110880. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.110880>
- López, Y. C. (2019). *Efecto de las dosis de bioestimulante y variedades de lechuga (Lactuca sativa L.) sobre las características morfológicas y rendimiento cultivadas en dos zonas de la provincia de Chincheros - Apurímac*. [Tesis de grado, Universidad José Carlos Mariátegui]. Repositorio Institucional de la Universidad José Carlos Mariátegui. <https://hdl.handle.net/20.500.12819/608>
- Marco, F. (2018). R cuadrado ajustado (coeficiente de determinación ajustado). *Economipedia*. <https://economipedia.com/definiciones/r-cuadrado-ajustado-coeficiente-de-determinacion-ajustado.html>
- Moon, T., Choi, W.J., Jang, S.H., Choi, D.S., y Oh, M.M. (2022). Growth analysis of plant factory-grown lettuce by deep neural networks based on automated feature extraction. *Horticulturae*, 8(12), 1124. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8121124>
- Orellana, L. (2008). Regresión lineal simple. Universidad de Buenos Aires. https://www.dm.uba.ar/materias/estadistica_Q/2011/1/clase%20regresion%20simple.pdf
- Romero, R. (2021). Apuntes de macroeconometría. <https://randall-romero.github.io/econometria/teoria/01-intro/06-pruebas.html>
- Saavedra, G., Corradini, F., Antúnez, A., Felmer, S., Estay, P., y Sepúlveda, P. (2017). Manual de producción de lechuga (Boletín INIA N.º 374). Instituto de Investigaciones Agropecuarias. https://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/20.500.13082/29500/INIA_Libro_0051.pdf
- Santos, M., Segura, M., y Núñez, C. E. (2010). Análisis de crecimiento y relación fuente-demanda de cuatro variedades de papa (*Solanum tuberosum* L.) en el municipio de Zipaquirá (Cundinamarca, Colombia). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 63(1), 5253–5266.
- Suella, X. (2023). *Comparativo de tres frecuencias de riego en el crecimiento y desarrollo de lechuga hidropónica (Lactuca sativa) var. Waldman's Green, en el distrito de Paucarpata, Arequipa-2022*. [Tesis de grado, Universidad Católica de Santa María]. Repositorio Institucional de la Universidad Católica de Santa María. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/items/2c4fdea8-173c-44bb-9887-10ce9b9640ec>

- Valencia-Islas, J. O., López-Cruz, I. L., Ruíz-García, A., Fitz-Rodríguez, E., y Ramírez-Arias, M. (2023). Global sensitivity and uncertainty analyses of a dynamic model for the biosystem lettuce (*Lactuca sativa* L.) crop-greenhouse. *Biosystems Engineering*, 236, 16–26. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2023.10.005>
- Vásquez-Camacho, J. G. (2015). *Evaluación agronómica de cinco variedades de lechuga (Lactuca sativa L.) en tres ciclos de siembra consecutivos en San Miguel de la Tigrá, San Carlos, Alajuela, C. R.* [Proyecto de graduación de licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica]. Repositorio Institucional del Instituto Tecnológico de Costa Rica. <https://hdl.handle.net/2238/6469>
- Yucra, C. M. (2019). *La carbonatita en el rendimiento y calidad de lechuga (Lactuca sativa) cv. Patagonia*. [Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio Institucional de la Universidad Agraria La Molina. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/4096>

Declaración de roles de autores:

- Erick Quispe: Redacción, metodología, investigación.
- Andrés Casas: Redacción, revisión y edición.
- Isabel Montes: Metodología, investigación, análisis formal.
- Saray Siura: Revisión y edición, supervisión.
- Mauricio Maguiña: Análisis y procesamiento de datos.
- Alexis Dueñas: Redacción, metodología, investigación, análisis formal, conceptualización.