

## Relación de los factores ambientales con la productividad de *Eucalyptus globulus* en los Andes norperuanos

Relationship of environmental factors with the productivity of *Eucalyptus globulus* in the northern Peruvian Andes

Juan Rodrigo Baselly-Villanueva <sup>a\*</sup> , Fátima Elizabeth Marcelo Bazán <sup>b</sup> ,  
Gianmarco Goycochea Casas <sup>c</sup> , Andrés Ibernón Lozano Lozano <sup>d</sup> ,  
Fernando Castedo-Dorado <sup>e</sup> , Pedro Álvarez-Álvarez <sup>f</sup> 

\*Autor de correspondencia: <sup>a</sup>Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA),  
Dirección de Desarrollo Tecnológico Agrario, Lima, Perú, tel.: 51 961881084, [jrbasellyv@gmail.com](mailto:jrbasellyv@gmail.com)

<sup>b</sup>Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), Estación Experimental Agraria Baños del Inca, Cajamarca, Perú.

<sup>c</sup>Federal University of Viçosa, Department of Forest Engineering, University Campus, Minas Gerais, Brazil.

<sup>d</sup>Universidad Nacional de Cajamarca, Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Ingeniería Forestal, Cajamarca, Perú.

<sup>e</sup>Universidad de León, Campus de Ponferrada, Departamento de Ingeniería y Ciencias Agrarias,  
Escuela de Ingeniería Agraria y Forestal, Ponferrada, España.

<sup>f</sup>Universidad de Oviedo, Escuela Politécnica de Mieres, Departamento de Biología de Organismos y Sistemas,  
Área Ingeniería Agroforestal, Mieres, España.

### SUMMARY

The South American Andes are a set of mountains that generate a diversity of climates. *Eucalyptus globulus* has been planted on many slopes of the northern Peruvian Andes at high altitudes (for example, in Cajamarca, Peru), but its growth and productive viability remain unknown. In the present study, the following objectives were established: i) to develop Site Index curves for stands of *Eucalyptus globulus* located in the Peruvian Andes above 3,000 meters of altitude, ii) to analyze the relationship between environmental variables and Site Index, and iii) to evaluate the potential effect of cold on the growth of these stands compared to those in other regions. The Site Index (SI) was estimated using three base growth models (Bertalanffy-Richards, Hossfeld and Korf) and two derivation methods (Algebraic Differences - ADA and Generalized Algebraic Differences - GADA). The relationship between environmental factors and SI was determined by Spearman's correlation coefficient. The potential effect of altitude was evaluated by comparing the site quality curves obtained with those of other regions. The dynamic equation, derived from the Bertalanffy-Richards model using GADA, explained much of the variability of the dominant height growth. The SI was well correlated with distance to water bodies and to a lesser degree with solar radiation, effective depth and base saturation. In addition, compared to other regions, slow growth was evident in the initial stage of planting, probably due to the effect of cold acclimatization (derived from the high altitude).

**Keywords:** growth, Site Index, dominant height, GADA, biophysical variables.

### RESUMEN

Los Andes sudamericanos son un conjunto de montañas, generan una diversidad de climas. *Eucalyptus globulus* ha sido instalado en muchas laderas de los Andes norperuanos a elevadas altitudes (como por ejemplo en Cajamarca - Perú), desconociéndose su crecimiento y viabilidad productiva. En el presente estudio se establecieron los siguientes objetivos: i) elaborar curvas de Índice de Sitio para masas de *Eucalyptus globulus* situadas en los Andes peruanos sobre los 3.000 metros de altitud, ii) analizar la relación entre variables ambientales y el Índice de Sitio y iii) evaluar el efecto potencial del frío en el crecimiento de estas masas en comparación con las de otras regiones. El Índice de Sitio (IS) fue estimado usando tres modelos base de crecimiento (Bertalanffy-Richards, Hossfeld y Korf) y dos métodos de derivación (Diferencias Algebraicas – ADA y Diferencias Algebraicas Generalizadas – GADA). La relación entre los factores ambientales y el IS se determinó mediante el coeficiente de correlación de Spearman. El efecto potencial de la altitud se evaluó comparando las curvas de calidad de sitio obtenidas con las de otras regiones. La ecuación dinámica derivada del modelo de Bertalanffy-Richards mediante GADA explicó gran parte de la variabilidad del crecimiento en altura dominante. El IS presentó buena correlación con la distancia a cuerpos de agua y en menor grado con la radiación solar, profundidad efectiva y saturación de bases. Además, en comparación con otras regiones, se evidenció un lento crecimiento en la etapa inicial de la plantación, probablemente debido al efecto de aclimatación al frío (derivado de la elevada altitud).

**Palabras claves:** crecimiento, Índice de Sitio, altura dominante, GADA, variables biofísicas.

## INTRODUCCIÓN

Las plantaciones forestales se instalan con la finalidad de proveer materia prima como madera o para brindar servicios ambientales. Las áreas plantadas aumentan en el mundo y Sudamérica no es la excepción, pero son realizadas en su mayoría con especies exóticas (FAO 2020). Las principales especies forestales usadas en la instalación de plantaciones en las laderas de los Andes peruanos son de los géneros *Eucalyptus* y *Pinus*. *Eucalyptus globulus* Labill. fue introducido en el Perú en 1860 para la producción de durmientes, para luego ser usado en construcciones rurales, postes y leña (Jacobs 1979); para el año 2020 su producción anual de madera rolliza y aserrada fue de 34.107 y 1.571 m<sup>3</sup>, respectivamente (SERFOR 2020).

La calidad de sitio es la capacidad potencial de un determinado sitio de brindar los recursos que contribuyan a la producción de madera para una especie o un grupo de especies (Clutter *et al.* 1983). Una de las primeras tareas que enfrenta el manejador o gestor es determinar la calidad de sitio para una determinada especie en una determinada zona (Vanclay 1994, Gadow *et al.* 2007). En general, existen dos formas de evaluar la calidad de sitio: las medidas fitocéntricas y las medidas geocéntricas, basadas en métricas del rodal y propiedades biofísicas del sitio, respectivamente (Weiskittel *et al.* 2011). El Índice del Sitio (IS) es una medida fitocéntrica de la calidad de sitio, y se define como el promedio de las alturas de los árboles dominantes ( $H$ ) a una determinada edad de referencia, llamada también edad base ( $t_0$ ) (Burkhart y Tomé 2012). El uso de  $H$  como variable de referencia se debe a que no es afectada por la densidad poblacional y se correlaciona con la productividad del sitio (Clutter *et al.* 1983). Debido a que es poco habitual que las mediciones de la  $H$  coincidan a la edad  $t_0$  (por lo general se efectúan antes o después), se requiere de un medio para proyectar la medida hacia adelante o hacia atrás hasta la edad  $t_0$  (Burkhart y Tomé 2012). Estas relaciones altura-edad se denominan tradicionalmente curvas o ecuaciones de Índice de Sitio.

Los patrones de crecimiento en los árboles varían, fundamentalmente, debido a las características del suelo, clima y fisiografía (Vanclay 1994). A escalas amplias, el crecimiento arbóreo está muy influenciado por la altitud, por la relación que esta variable guarda con el clima (Gworek *et al.* 2007). A mayores altitudes, por lo general, existe una baja tasa de crecimiento asociado a la presencia de frío y heladas (Howe *et al.* 2003, Mondino *et al.* 2019).

Los Andes sudamericanos son un conjunto de montañas que se extienden en el continente de norte a sur, cada sitio andino presenta particularidades diferenciales. En los Andes norperuanos entre los 2.536 y 3.595 m s.n.m. se encuentra el valle cajamarquino. Sus laderas están pobladas por plantaciones de *E. globulus*, instaladas mediante diversos proyectos, con el fin de obtener leña y madera. El crecimiento y viabilidad productiva de las plantaciones de esta especie en la región no ha sido cuantificado hasta el

momento, habiéndose manejado en un uso tradicional antes que en aspectos técnicos. En la mayor parte del mundo las plantaciones de *E. globulus* se encuentran en cotas bajas, habitualmente entre el nivel del mar y los 800 m s.n.m. (e.g. Tomé *et al.* 2006, García-Villabrille 2015). Por tanto, las plantaciones localizadas en unas condiciones estacionales tan distintas como los Andes sudamericanos ofrecen una excelente oportunidad para evaluar el impacto que las variables climáticas (muy relacionadas con la altitud) tienen sobre la productividad de las masas de *E. globulus*.

En el presente trabajo se analizan los datos de crecimiento en altura dominante procedentes de dos plantaciones realizadas en el valle de Cajamarca con los siguientes objetivos: i) elaborar curvas de IS para masas de *E. globulus* situadas en los Andes peruanos sobre los 3.000 metros de altitud, ii) analizar la relación entre variables ambientales y el IS y iii) evaluar el efecto potencial del frío en el crecimiento de estas masas en comparación con las de otras regiones.

## MÉTODOS

*Área de estudio.* La investigación se desarrolló al norte del Perú en el departamento, provincia y distrito de Cajamarca; a los 7° 10,799' de latitud sur y 78° 31,729' de longitud oeste (figura 1A). Se trata de una plantación de *E. globulus* ubicada en la ladera suroeste del valle interandino de la ciudad de Cajamarca, en un rango altitudinal de 3.098 a 3.220 m s.n.m. El área de estudio se encuentra en la zona de vida bosque húmedo Montano Tropical (bh-MT); de acuerdo a la clasificación Köppen se encuentra bajo un tipo de clima "Cw", templado cálido "C" (zona tropical en altitud) con verano lluvioso e invierno seco "w". La precipitación anual es de 505 mm, distribuida principalmente de octubre a abril, y la temperatura mínima y máxima es de 9,9 y 20,2 °C (figura 1B), respectivamente. Con carácter general, los suelos son franco-arenosos, superficiales, ácidos, con bajos niveles de materia orgánica y fósforo.

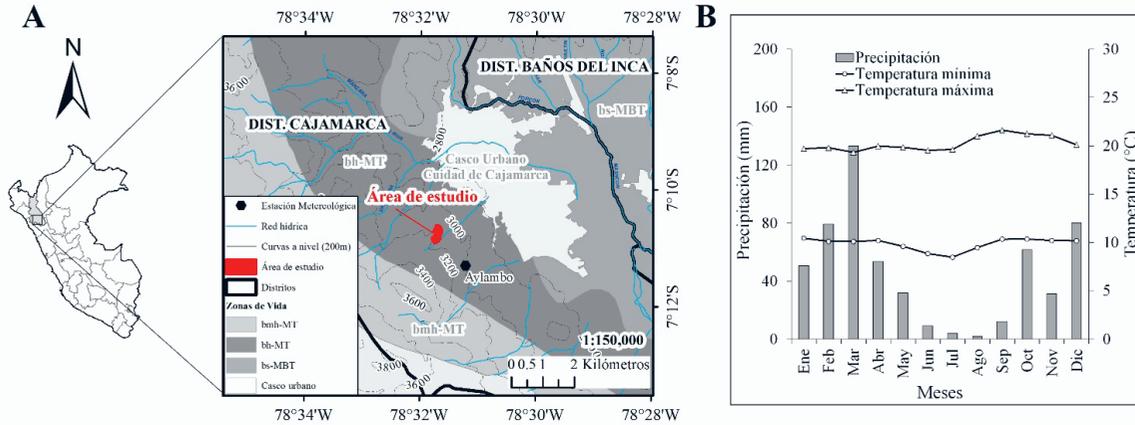
La plantación es propiedad de la Comunidad Campesina Calispuquio, tiene una extensión de 10,7 ha y está compuesta de dos rodales, Carhuacasha y Magallpa, que se instalaron en los años 2007 y 2006, respectivamente. La distribución de los pies se realizó bajo el sistema de tresbolillo con un distanciamiento de 3 m entre plantas, aplicándose medio kilo de gallinaza en cada planta en el momento de la plantación.

*Colecta de datos.* Se establecieron 21 parcelas de evaluación en los dos rodales, 9 permanentes y 12 temporales. La distribución de las parcelas se hizo de forma sistemática, con un lado de malla de 70 m. Las parcelas tienen forma rectangular (20 × 10 metros) e incluyen un mínimo de 17 árboles.

Las parcelas permanentes fueron evaluadas todos los años desde el 2012 hasta el 2020, en los meses de mayo y

noviembre, después y antes del periodo de lluvias, respectivamente; y las parcelas temporales fueron evaluadas en noviembre del 2020 (cuadro 1). En todos los individuos se

midió el diámetro normal (a 1,3 m sobre el nivel del suelo) con corteza ( $d$ ) y la altura total ( $h$ ), usando forcípula e hipsómetro Suunto, respectivamente. A partir de los datos de los



**Figura 1.** A) Ubicación del área de estudio dentro de Perú, bhm-MT: bosque muy húmedo Montano Tropical, bh-MT: bosque húmedo Montano Tropical, Bs-MBT: Bosque seco Montano Bajo Tropical; B) Climograma de la zona de vida bh-MT. Elaborado con datos de la estación meteorológica Aylambo de SENAMHI para el periodo 2006-2020 (2.908 m s.n.m.).

A) Location of the study area within Peru, bhm-MT: very humid montane tropical forest, bh-MT: humid montane tropical forest, Bs-MBT: low montane tropical dry forest; B) Climogram of the bh-MT life zone. Elaborated with data from the Aylambo meteorological station of SENAMHI for the period 2006-2020 (2,908 m a.s.l.).

**Cuadro 1.** Características de las parcelas y estadísticos descriptivos de las variables de masa forestal en la zona de estudio. Las variables de árboles y poblacionales se refieren al periodo 2012 - 2020.

Plot characteristics and descriptive statistics of forest stand variables in the study area. The individual-tree and stand variables are referred to the period 2012 - 2020.

Variables	Magallpa				Carhuacasha			
	Mínimo	Media	Máximo	Desviación estándar	Mínimo	Media	Máximo	Desviación estándar
<b>Parcelas</b>								
Año de plantación			2006				2007	
Extensión (ha)			3,9				6,8	
Número de parcelas permanentes y temporales			7 - 7				2 - 5	
Número de evaluaciones	1	5	14	6,3	1	7	14	6,6
<b>Árboles</b>								
$d$ (cm)	4,30	11,90	29,40	4,02	4,90	10,40	22,00	3,69
$h$ (m)	4,50	14,30	26,00	3,97	4,00	11,20	24,00	3,77
<b>Poblacionales</b>								
$N$ (pies ha <sup>-1</sup> )	850,00	1.111,00	1.350,00	179,93	950,00	1.079,00	1.250,00	118,52
$H$ (m)	8,80	17,30	26,00	4,10	4,40	13,20	24,00	4,60
$t$ (meses)	74,00	119,00	161,00	26,69	62,00	110,00	150,00	29,48
$G$ (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	2,01	13,03	29,67	6,04	0,53	7,99	18,94	5,08

$d$ : diámetro normal con corteza a 1,3 m sobre el nivel del suelo medidos desde la parte superior de la ladera,  $h$ : altura total,  $N$ : número de pies ha<sup>-1</sup>,  $H$ : altura dominante,  $t$ : edad,  $G$ : área basimétrica.

árboles individuales se calcularon, para cada parcela y para cada inventario, el número de pies  $ha^{-1}$  ( $N$ ), la altura dominante ( $H$ ), la edad ( $t$ ) y el área basimétrica ( $G$ ) (cuadro 1). La altura dominante fue calculada bajo el criterio del promedio de las alturas de los 100 árboles dominantes en diámetro por hectárea (Assmann 1970, Clutter *et al.* 1983).

Por otra parte, dado que se pretende relacionar el IS con variables ambientales, fue necesaria la obtención de datos de estas para cada parcela. Así, las variables fisiográficas fueron obtenidas mediante el programa ArcGis

(ESRI 2011) a partir de un ráster de 12,5 m de resolución espacial, descargado del servidor de la NASA (NASA 2021). El ráster fue reescalado a una resolución espacial de 10 metros, los valores de los pixeles que se encontraban en el área de la parcela fueron promediados. Las variables fisiográficas derivadas fueron la elevación, la pendiente, la radiación solar y la distancia a cuerpos de agua (cuadro 2). La radiación solar fue obtenida con la herramienta radiación solar de áreas de la caja herramientas de análisis espacial, mientras que la distancia de cuerpos de agua se determinó usando las herramientas hidrología y distancia

**Cuadro 2.** Descripción de las características ambientales (fisiográficas y edáficas) de las 21 parcelas evaluadas.  
Description of the environmental characteristics (physiographic and edaphic) of the 21 evaluated plots.

Variables	Mínimo	Promedio	Máximo	Desviación estándar
<b>Fisiográficas</b>				
Elevación (m)	3.098,00	3.185,00	3.220,00	29,14
Pendiente (%)	18,44	30,86	48,04	8,30
Radicación solar (Whatts $m^{-2}$ )	196,05	205,79	214,42	5,4
Distancia a cuerpos de agua (m)	10,60	153,58	286,67	76,74
<b>Edáficas</b>				
Profundidad efectiva (cm).	20,10	30,48	48,10	7,92
Pedregosidad (%)	1,50	5,89	16,64	3,67
Arena (%)	59,00	70,24	75,00	4,67
Limo (%)	10,00	14,95	20,00	2,50
Arcilla (%)	9,00	14,81	23,00	3,52
Concentración de iones de hidrógeno – pH	4,60	5,00	6,36	0,45
Conductividad Eléctrica ( $dS m^{-1}$ )	0,03	0,09	0,32	0,07
Carbonatos de Calcio (%)	0,00	0,01	0,29	0,06
Materia Orgánica (%)	0,21	0,99	2,41	0,56
Fósforo (ppm)	1,70	5,89	16,10	3,51
Potasio (ppm)	59,00	160,29	260,00	40,61
Capacidad de Intercambio Catiónico	8,64	10,65	12,96	1,15
Cationes cambiables $Ca^{+2}$ (meq $100g^{-1}$ )	3,90	5,66	8,45	1,15
Cationes cambiables $Mg^{+2}$ (meq $100g^{-1}$ )	1,03	1,80	2,62	0,43
Cationes cambiables $K^{+}$ (meq $100g^{-1}$ )	0,17	0,43	0,83	0,14
Cationes cambiables $Na^{+}$ (meq $100g^{-1}$ )	0,06	0,10	0,14	0,03
Cationes cambiables $Al^{+3} + H^{+}$ (meq $100g^{-1}$ )	0,00	0,24	0,65	0,16
Suma de Cationes	5,82	8,23	11,52	1,49
Suma de Bases	5,42	7,99	11,52	1,55
Saturación de bases (%)	57,40	74,80	100,00	10,29

$dS m^{-1}$ : decisiemens por metro, ppm: parte por millón, meq: Miliequivalentes.

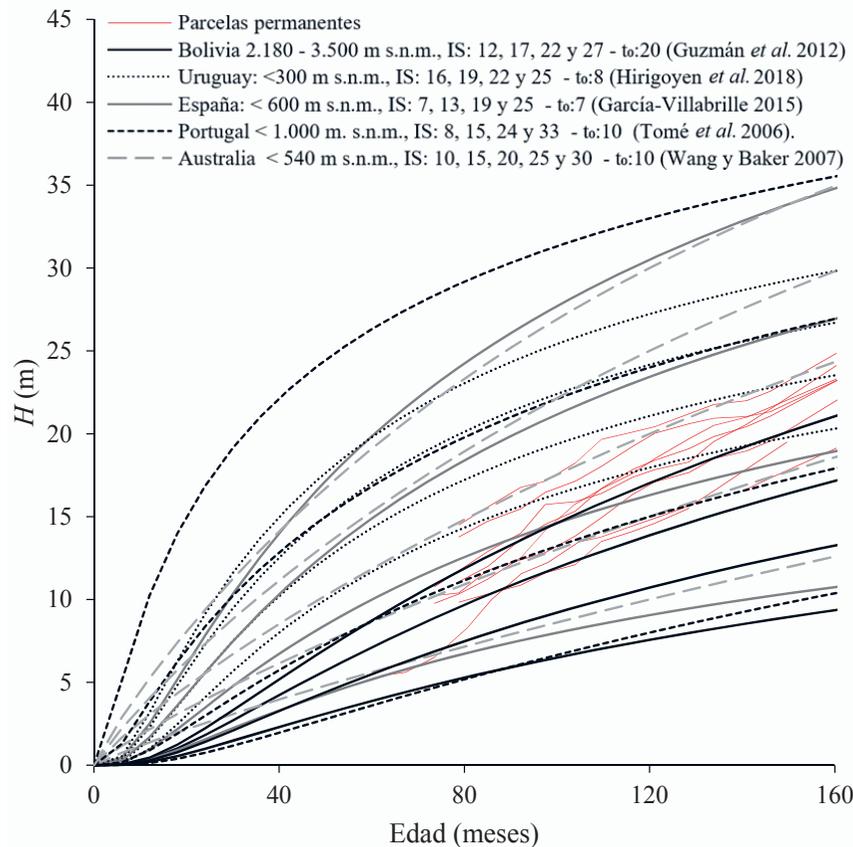
euclidiana. Por otra parte, en febrero del 2020 se determinó en campo la profundidad efectiva del suelo y se colectaron muestras del mismo, siguiendo la metodología usada por Menéndez *et al.* (2015). Las muestras fueron analizadas en el Laboratorio de Análisis de Suelos Plantas Aguas y Fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima - Perú. Las variables analizadas fueron tanto físicas como químicas (cuadro 2).

*Análisis de datos.* El IS se usó como indicador de la calidad de sitio para cada parcela, por ello es necesario disponer de unas curvas de calidad de sitio adecuadas para la especie en la zona de trabajo. No existen curvas de calidad de sitio para *E. globulus* desarrolladas para la zona de los Andes peruanos. Por ello, en primer lugar, se superpusieron las curvas de calidad de sitio desarrolladas para *E. globulus* en otros lugares del mundo sobre los datos observados de crecimiento en *H* de las 9 parcelas permanentes. Los modelos usados para generar las curvas fueron desarrollados por Tomé *et al.* (2006), Wang y Baker (2007), Guzmán *et al.* (2012), García-Villabrille (2015) e Hirigoyen *et al.* (2018) para Portugal, Australia, Bolivia, España

y Uruguay, respectivamente. Estos modelos se derivan de diferentes funciones base (Schumacher, Bertalanffy-Chapman Richards y Korf), siendo la  $t_0$  de 10, 10, 20, 7 y 8 años, respectivamente. Se determinó que ninguna de ellas describe bien la evolución de *H* observada en las parcelas de los Andes peruanos, incluso tampoco las desarrolladas para plantaciones en Bolivia (Guzmán *et al.* 2012), ubicadas a altitudes relativamente similares a las de este estudio (entre 2.180 y 3.590 m s.n.m.) (figura 2). En general, se observa que para una misma edad las alturas dominantes son mucho menores que las correspondientes a la calidad media de otros países ubicados a menor altitud.

Por tanto, dado que las curvas desarrolladas hasta el momento no describen adecuadamente la evolución de la altura para las parcelas de estudio, fue necesario ajustar funciones de crecimiento en *H* con la edad para los datos experimentales del presente estudio. En este trabajo se usaron los modelos base de crecimiento de Bertalanffy-Richards (Bertalanffy 1957, Richards 1959), Hossfeld (Hossfeld 1822) y Korf (Lundqvist 1957).

La alternativa más empleada para el desarrollo de modelos predictivos del crecimiento de variables forestales es



**Figura 2.** Superposición de las curvas de calidad de sitio desarrolladas para *E. globulus* en otros lugares del mundo sobre la evolución de la altura dominante (*H*) en las parcelas permanentes (color rojo).

Superimposition of site quality curves developed for *E. globulus* elsewhere in the world on the evolution of the dominant height (*H*) in the permanent plots (red color).

**Cuadro 3.** Ecuaciones base y formulaciones ADA y GADA para las funciones de crecimiento en  $H$ .  
 Base equations and ADA and GADA formulations for growth functions in  $H$ .

Ecuación base	Método de derivación	Parámetro relacionado con el sitio	Solución para con valores iniciales ()	Ecuación dinámica	Modelo
		$a_1 = X$	$X_0 = \frac{H_1}{(1 - \exp(-b_2 \cdot t_1))^{b_3}}$	$H_2 = H_1 \cdot \left( \frac{(1 - \exp(-b_2 \cdot t_2))}{(1 - \exp(-b_2 \cdot t_1))} \right)^{b_3} + e_{ij}$	[1]
Bertalanffy-Richards	ADA	$a_2 = X$ $a_3 = X$	$X_0 = \frac{-\ln(1 - (H_1/b_1)^{1/b_3})}{t_1}$ $X_0 = \ln \left( \frac{H_1/b_1}{1 - \exp(-b_2 \cdot t_1)} \right)$	$H_2 = b_1 \cdot \left( 1 - \left( 1 - \left( \frac{H_1}{b_1} \right)^{1/b_3} \right)^{e_2/t_1} \right)^{b_3} + e_{ij}$ $H_2 = b_1 \cdot (1 - \exp(-b_2 \cdot t_2))^{\ln \left( \frac{H_1/b_1}{1 - \exp(-b_2 \cdot t_1)} \right)} + e_{ij}$	[2] [3]
		$H = a_1 \cdot (1 - \exp(-a_2 \cdot t))^{a_3}$	$X_0 = \frac{(\ln H_1 - b_2 \cdot L_1) \pm \sqrt{(\ln H_1 - b_2 \cdot L_1)^2 - 4 \cdot b_3 \cdot L_1}}{2}$ $L_1 = \ln(1 - \exp(-b_1 \cdot t_1))$	$H_2 = H_1 \cdot \left( \frac{(1 - \exp(-b_1 \cdot t_2))}{(1 - \exp(-b_1 \cdot t_1))} \right)^{(b_2 + b_3/X_0)} + e_{ij}$	[4]
	GADA	$a_1 = \exp(X)$ $a_3 = b_2 + b_3/X$	$X_0 = \frac{(\ln H_1 - b_2 \cdot L_1) \pm \sqrt{(\ln H_1 - b_2 \cdot L_1)^2 - 4 \cdot b_3 \cdot L_1}}{2}$ $L_1 = \ln(1 - \exp(-b_1 \cdot t_1))$	$H_2 = H_1 \cdot \left( \frac{(1 - \exp(-b_1 \cdot t_2))}{(1 - \exp(-b_1 \cdot t_1))} \right)^{(b_2 + b_3/X_0)} + e_{ij}$	[4]
Hossfeld	ADA	$a_1 = X$ $a_2 = X$ $a_3 = X$	$X_0 = H_1 \cdot (1 + b_2 \cdot t_1^{-b_3})$ $X_0 = \left( \frac{b_1}{H_1} - 1 \right) \cdot t_1^{b_3}$ $X_0 = \frac{-\ln((b_1/H_1 - 1)/b_2)}{\ln(t_1)}$	$H_2 = H_1 \cdot \left( \frac{1 + b_2 \cdot t_1^{-b_3}}{1 + b_2 \cdot t_2^{-b_3}} \right) + e_{ij}$ $H_2 = \frac{b_1}{1 - \left( 1 - \frac{b_1}{H_1} \right) \cdot \left( \frac{t_1}{t_2} \right)^{b_3}} + e_{ij}$ $H_2 = \frac{b_1}{1 + b_2 \cdot t_2} \cdot \frac{b_1}{\ln((b_1/H_1 - 1)/b_2)} + e_{ij}$	[5] [6] [7]
		$H = \frac{a_1}{1 + a_2 \cdot t^{-a_3}}$	$X_0 = \frac{H_1 - b_1 \pm \sqrt{(H_1 - b_1)^2 + 4 \cdot b_2 \cdot H_1 \cdot t_1^{-b_3}}}{2}$	$H_2 = \frac{b_1 + X_0}{1 + \frac{b_2}{X_0} \cdot t_2} + e_{ij}$	[8]
	GADA	$a_1 = b_1 + X$ $a_2 = b_2/X$	$X_0 = \frac{H_1 - b_1 \pm \sqrt{(H_1 - b_1)^2 + 4 \cdot b_2 \cdot H_1 \cdot t_1^{-b_3}}}{2}$	$H_2 = \frac{b_1 + X_0}{1 + \frac{b_2}{X_0} \cdot t_2} + e_{ij}$	[8]
Korf	ADA	$a_1 = X$ $a_2 = X$ $a_3 = X$	$X_0 = \frac{H_1}{\exp(-b_2 \cdot t_1^{-b_3})}$ $X_0 = -\ln \left( \frac{H_1}{b_1} \right) \cdot t_1^{b_3}$ $X_0 = \frac{-\ln(\ln(H_1/b_1)/-b_2)}{\ln t_1}$	$H_2 = H_1 \cdot b_1 \cdot \frac{\exp(-b_2 \cdot t_2^{-b_3})}{\exp(-b_2 \cdot t_1^{-b_3})} + e_{ij}$ $H_2 = b_1 \cdot \left( \frac{H_1}{t_2} \right)^{b_3} + e_{ij}$ $H_2 = b_1 \cdot \exp(-b_2 \cdot t_2^{\ln(\ln(H_1/b_1)/-b_2)}) + e_{ij}$	[9] [10] [11]
		$H = a_1 \cdot \exp(-a_2 \cdot t^{-a_3})$	$X_0 = \frac{1}{2} t_1^{-b_3} (b_1 + t_1^{b_3} \cdot \ln(H_1) \pm \sqrt{4 \cdot b_2 \cdot t_1^{b_3} + (-b_1 - t_1^{b_3} \cdot \ln(H_1))^2})$	$H_2 = \exp(X_1) \cdot \exp \left( - \left( b_1 + \frac{b_2}{X_1} \right) \cdot t_2^{-b_3} \right) + e_{ij}$	[12]
	GADA	$a_1 = \exp(X)$ $a_3 = b_2 + b_3/X$	$X_1 = \frac{1}{2} t_1^{-b_3} (b_1 + t_1^{b_3} \cdot \ln(H_1) \pm \sqrt{4 \cdot b_2 \cdot t_1^{b_3} + (-b_1 - t_1^{b_3} \cdot \ln(H_1))^2})$	$H_2 = \exp(X_1) \cdot \exp \left( - \left( b_1 + \frac{b_2}{X_1} \right) \cdot t_2^{-b_3} \right) + e_{ij}$	[12]

ADA: Ecuaciones en Diferencias Algebraicas, GADA: Ecuaciones en Diferencias Algebraicas Generalizadas,  $t$ : Edad,  $t_1$ : Edad inicial,  $t_2$ : Edad final,  $H_1$ : Altura inicial,  $H_2$ : Altura final, exp: Exponencial, ln: Logaritmo natural,  $a_1, a_2, a_3; b_1, b_2, b_3$ : parámetros de las ecuaciones base y dinámicas.

utilizar ecuaciones dinámicas de la forma  $H_2 = f(H_1, t_1, t_2)$ , donde  $H_2$  es el valor de la altura dominante a la edad de proyección  $t_2$  e  $H_1$  es el valor de la altura dominante a la edad inicial  $t_1$ . Existen dos metodologías para obtener ecuaciones dinámicas, conocidas en la literatura forestal como Algebraic Difference Approach (ADA) (Bailey y Clutter 1974) y Generalized Algebraic Difference Approach (GADA) (Cieszewski y Bailey 2000). Ambas metodologías permiten modelizar el crecimiento de una determinada variable con una familia de curvas originadas por un modelo de crecimiento base con todos los parámetros comunes excepto uno, que es un parámetro específico del sitio (ADA) o con varios parámetros que sean específicos del sitio (GADA) (Burkhart y Tomé 2012). Con la finalidad de estimar con mayor precisión el IS, en este trabajo se usaron para cada modelo de crecimiento base, tres ecuaciones dinámicas derivadas mediante ADA (tantas como parámetros tienen dichos modelo base) y una ecuación dinámica derivada mediante GADA con dos parámetros dependientes del sitio. Es decir, en total se consideraron 12 ecuaciones dinámicas (cuadro 3), que han sido usadas para estimar el IS en diversos estudios para la especie (Wang y Baker 2007, García-Villabrille 2015).

El ajuste de las ecuaciones dinámicas fue realizado a partir de los datos de las remediciones de las 9 parcelas permanentes, que se corresponden con 244 pares de observaciones de edad-altura dominante. Los datos fueron estructurados considerando todos los intervalos posibles de crecimiento, incluyendo los descendentes, para generar datos más estables y consistentes (Huang 1999).

La bondad de ajuste se determinó mediante el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), la raíz del error cuadrático medio (REMC), el sesgo ( $\bar{E}$ ) y el criterio de información de Akaike (AIC).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad [13]$$

$$REMC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n}} \quad [14]$$

$$\bar{E} = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)}{n} \quad [15]$$

$$AIC = n \cdot \text{Log} \hat{\sigma}^2 + 2 \cdot K \quad [16]$$

donde,  $Y_i$ ,  $\hat{Y}_i$  y  $\bar{Y}$  los valores de las alturas dominantes observadas, predichas y promedio, respectivamente,  $n$  el número total de datos usados en el ajuste del modelo,  $K = p + 1$ ;  $p$  el número de parámetros a estimar y  $\sigma^2$  la varianza del error del modelo expresado por  $\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2/n$ .

Además de los estadísticos de bondad de ajuste, se consideró el realismo biológico de las curvas y el análisis gráfico de los residuos frente a los valores predichos, las curvas ajustadas de evolución de altura dominante con la edad superpuestas sobre los datos experimentales y el

valor del IS estimado para cada parcela permanente en cada inventario. El ajuste de las ecuaciones dinámicas se efectuó mediante la función “nls” del software R (R Core Team 2020).

La determinación de  $t_0$  se llevó a cabo representando el error relativo (ER %) con la edad, la expresión del error relativo es la siguiente (Huang *et al.* 2003).

$$ER\% = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2/n - p}{\bar{Y}}} \cdot 100 \quad [17]$$

Para relacionar la calidad de sitio con las variables ambientales, se estimó el valor del IS de cada parcela permanente como la media de las tres mediciones de  $H$  realizadas temporalmente más próximas a  $t_0$  (tanto anteriores como posteriores a  $t_0$ ). En el caso de las parcelas temporales, el IS se estimó a partir de los datos puntuales de  $H$  y edad medidos en noviembre de 2020. Posteriormente, la correlación de las variables ambientales con el IS se evaluó a través la prueba no paramétrica de Spearman ( $\rho$ , nivel de significación  $\alpha = 0,05$ ).

Por otra parte, se estimó la distribución espacial del IS y de las variables edáficas que presentaron correlaciones significativas con el mismo, con finalidad de determinar su relación espacial. El método usado para estimar la distribución espacial fue el kriging ordinario y el modelo de semivariograma exponencial (Filho *et al.* 2023) y fue realizado en el programa ArcGis (ESRI 2011). En el caso de las variables fisiográficas que presentaron correlación significativa, se usó la distribución espacial obtenida del geoprocamiento para analizar dicha relación.

Finalmente, se compararon las curvas de calidad de sitio desarrolladas en este trabajo (a 3.000 m de altitud) con las reportadas para la especie a otras cotas en el mundo, de lo que se puede desprender el efecto potencial que tiene el frío (relacionado con la altitud) en el crecimiento de las masas de los Andes peruanos.

## RESULTADOS

*Curvas de Índice de Sitio.* Las ecuaciones del crecimiento en  $H$  presentaron estimaciones de los parámetros altamente significativas ( $p < 0,001$ ) y un porcentaje de variabilidad explicada superior al 93 % en todos los casos (cuadro 4). Las ecuaciones dinámicas de Bertalanffy-Richards y Hossfeld derivadas mediante la metodología GADA (ecuaciones [4] y [8]) presentaron mejores indicadores estadísticos que las ecuaciones obtenidas mediante la derivación con ADA. En el caso del modelo base de Korf solo consiguió convergencia para las ecuaciones dinámicas obtenidas mediante ADA, siendo la ecuación que consideró al parámetro  $b_2$  específico del sitio (ecuación [10]) la que presentó mejores ajustes para este modelo base.

Los indicadores estadísticos de estos tres modelos ([4], [8] y [10] en el cuadro 4), presentaron los valores

**Cuadro 4.** Estimación de los parámetros y estadísticos de bondad de ajuste para las ecuaciones dinámicas de crecimiento en altura dominante analizadas.

Parameter estimation and goodness-of-fit statistics for the dynamic dominant height growth equations analyzed.

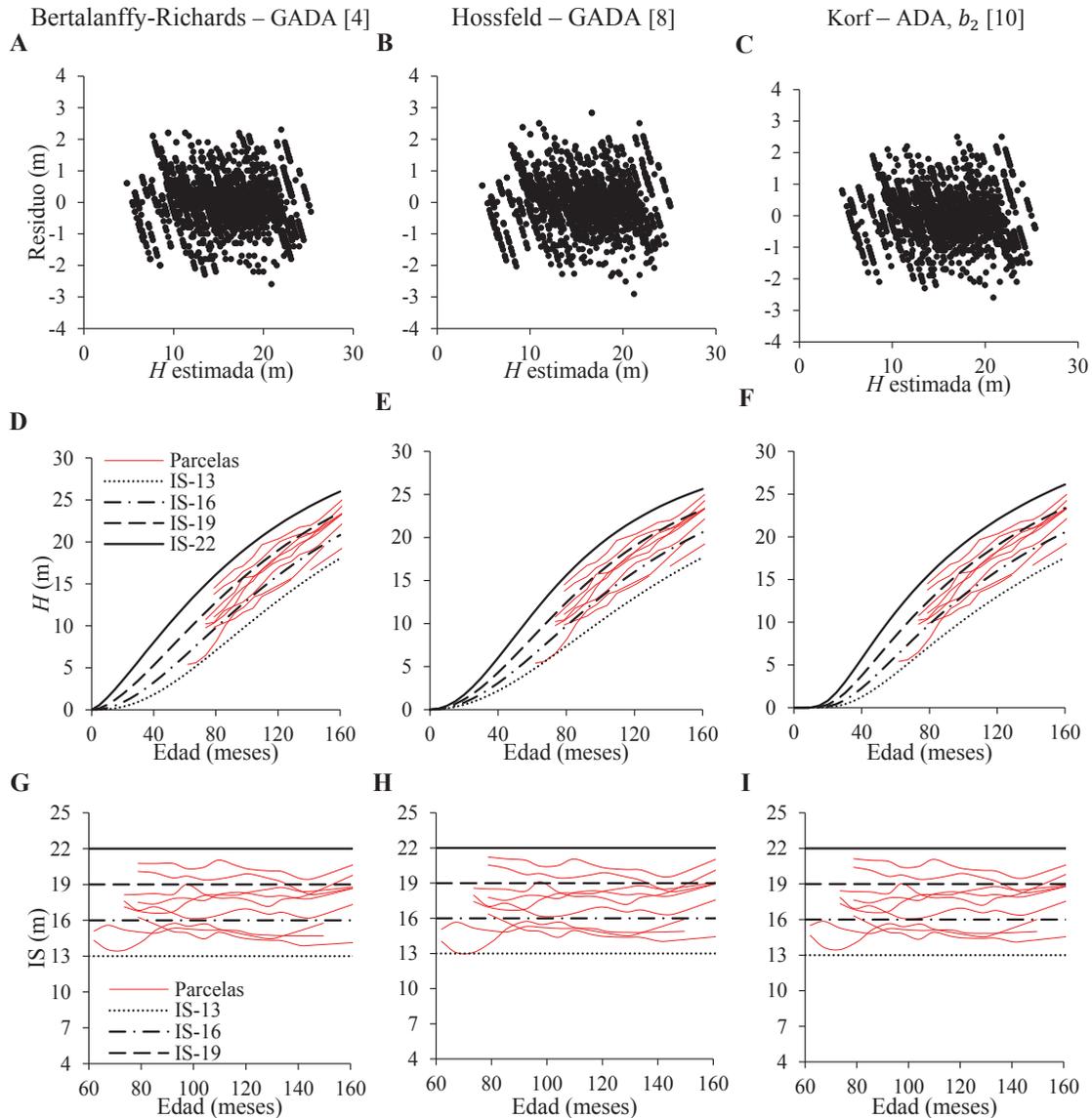
Ecuación base	Modelo dinámico	Estimación de los parámetros			Estadísticos de bondad de ajuste			
		$b_1$	$b_2$	$b_3$	R <sup>2</sup>	REMC	$\bar{E}$	AIC
Bertalanffy-Richards	[1]	-	0,017 ***	2,883 ***	0,932	1,141	0,022	182,091
	[2]	28,877 ***	-	2,463 ***	0,964	0,826	0,003	-248,434
	[3]	35,256 ***	0,009 ***	-	0,964	0,828	0,175	-245,278
	[4]	0,011 ***	-34,877 ***	127,326 ***	0,967	0,798	0,002	-295,049
Hossfeld	[5]	-	26.345,041 ***	2,210 ***	0,932	1,139	0,021	179,776
	[6]	32,387 ***	-	2,028 ***	0,964	0,823	0,003	-252,850
	[7]	30,713 ***	22.869,316 ***	-	0,962	0,848	0,005	-214,398
	[8]	32,388 ***	32,403 ***	2,028 ***	0,964	0,822	0,003	-254,450
Korf	[9]	-	223,519 ***	1,196 ***	0,935	1,115	0,018	151,005
	[10]	44,641 ***	-	0,969 ***	0,966	0,799	0,001	-292,461
	[11]	39,951 ***	151,482 ***	-	0,965	0,819	-0,001	-260,063
	[12]	-	-	-	-	-	-	-

$b_1, b_2, b_3$ : parámetros de las ecuaciones dinámicas a determinar en el ajuste, R<sup>2</sup>: Coeficiente de determinación, REMC: raíz del error cuadrático medio,  $\bar{E}$ : Sesgo, AIC: Criterio de Información de Akaike. \*\*\* =  $p < 0,001$ .

más adecuados, siendo muy similares entre ellos, por lo cual la evaluación gráfica fue fundamental en la elección del mejor. En este sentido, los residuos de los tres modelos presentaron homogeneidad de varianza y una dispersión no sesgada en torno a la media (figura 3A, 3B y 3C). Las ecuaciones dinámicas [4] y [8] derivadas de los modelos de Bertalanffy-Richards y Hossfeld mediante la metodología GADA dieron lugar a curvas mejor conformadas, que recogen mejor la tendencia de las trayectorias de las alturas observadas en las parcelas permanentes (figura 3D y 3E). La ecuación dinámica derivada

del modelo Bertalanffy-Richards [4] en comparación con la derivada de Hossfeld mediante GADA [8]), presentó valores más altos para el R<sup>2</sup> (0,967), así como más bajos para REMC (0,798), E (0,002) y AIC (-295,049). Asimismo, presentó una mayor estabilidad en la predicción del IS para cada parcela permanente en los diferentes inventarios (figura 3G); por lo cual fue el modelo seleccionado para estimar el IS de la plantación.

La  $t_0$  seleccionada fue de 120 meses (10 años), porque presentó menor error relativo (ER %) en la predicción de la altura dominante a diferentes edades (figura 4), y ade-



**Figura 3.** A, B y C) Distribución de los residuos para los valores predichos de la altura dominante estimada; D, E y F) Curvas de crecimiento de la altura dominante para un IS de 13, 16, 19 y 22 m a la edad índice de 120 meses; las trayectorias de las alturas observadas en las parcelas permanentes se presentan en color rojo; G, H y I) Variación de IS en el tiempo para las 9 parcelas permanentes (color rojo).

A, B and C) Distribution of residuals for predicted values of estimated dominant height; D, E and F) Growth curves of dominant height for an SI of 13, 16, 19 and 22 m at the index age of 120 months; trajectories of heights observed in the permanent plots are presented in red; G, H and I) Variation of SI over time for the 9 permanent plots (red color).

más presentó un elevado número de observaciones para esa edad.

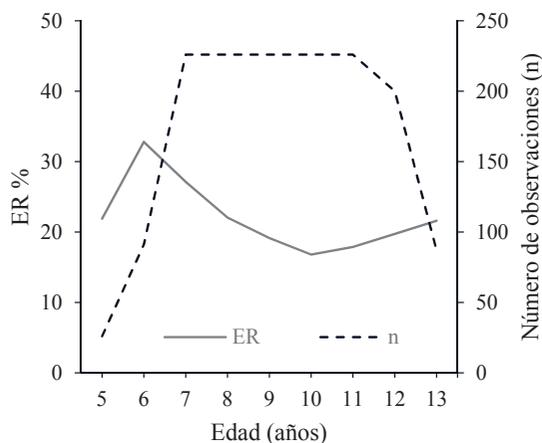
El IS se estimó sustituyendo  $H_2$  por IS y  $t_2$  por  $t_0$  en la ecuación dinámica [4]; expresándose de la siguiente forma:

$$IS = H_1 \cdot \left( \frac{(1 - \exp(-0,011 \cdot t_0))}{(1 - \exp(-0,011 \cdot t_1))} \right)^{(-34,877 + 127,326/X_0)} \quad [18]$$

donde:

$$X_0 = \frac{(\ln H_1 - (-34,877 \cdot \ln(1 - \exp(-0,011 \cdot t_1)))) \pm \sqrt{(\ln H_1 - (-34,877 \cdot \ln(1 - \exp(-0,011 \cdot t_1))))^2 - 4,127,326 \cdot \ln(1 - \exp(-0,011 \cdot t_1))}}{2}$$

*Relación entre las variables ambientales y el Índice de Sitio.* Entre las variables fisiográficas, solo dos presentaron relación con el IS: la radiación solar y la distancia a cuerpos de agua. La distancia a cuerpos de agua fue la variable ambiental que tuvo mayor correlación con IS con un  $\rho$  de -0,538 (figura 5B). En cuanto a la radiación solar, presentó asociación inversamente proporcional con IS con un  $\rho$  de -0,438, indicando que el crecimiento de los árboles fue mayor en áreas con menor energía



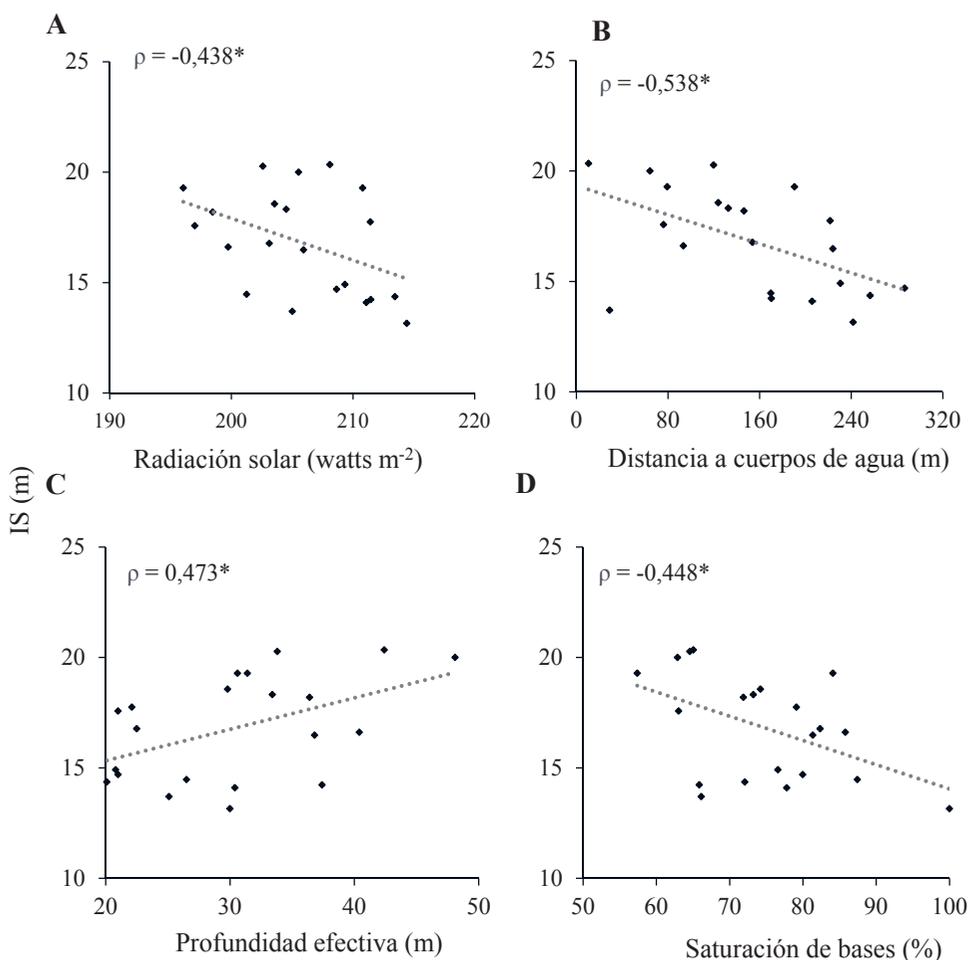
**Figura 4.** Error relativo (ER %) y número de observaciones (n) en la predicción de alturas dominantes en relación con la elección de la edad de referencia mediante la ecuación [4].

Relative error (ER%) and number of observations (n) in the prediction of dominant heights in relation to the choice of reference age using Equation [4].

solar recibida (figura 4A). En cuanto a las variables edáficas, la profundidad efectiva y la saturación de bases presentaron correlaciones significativas con el IS, siendo del tipo positivas y negativas, respectivamente (figuras 5C y 5D).

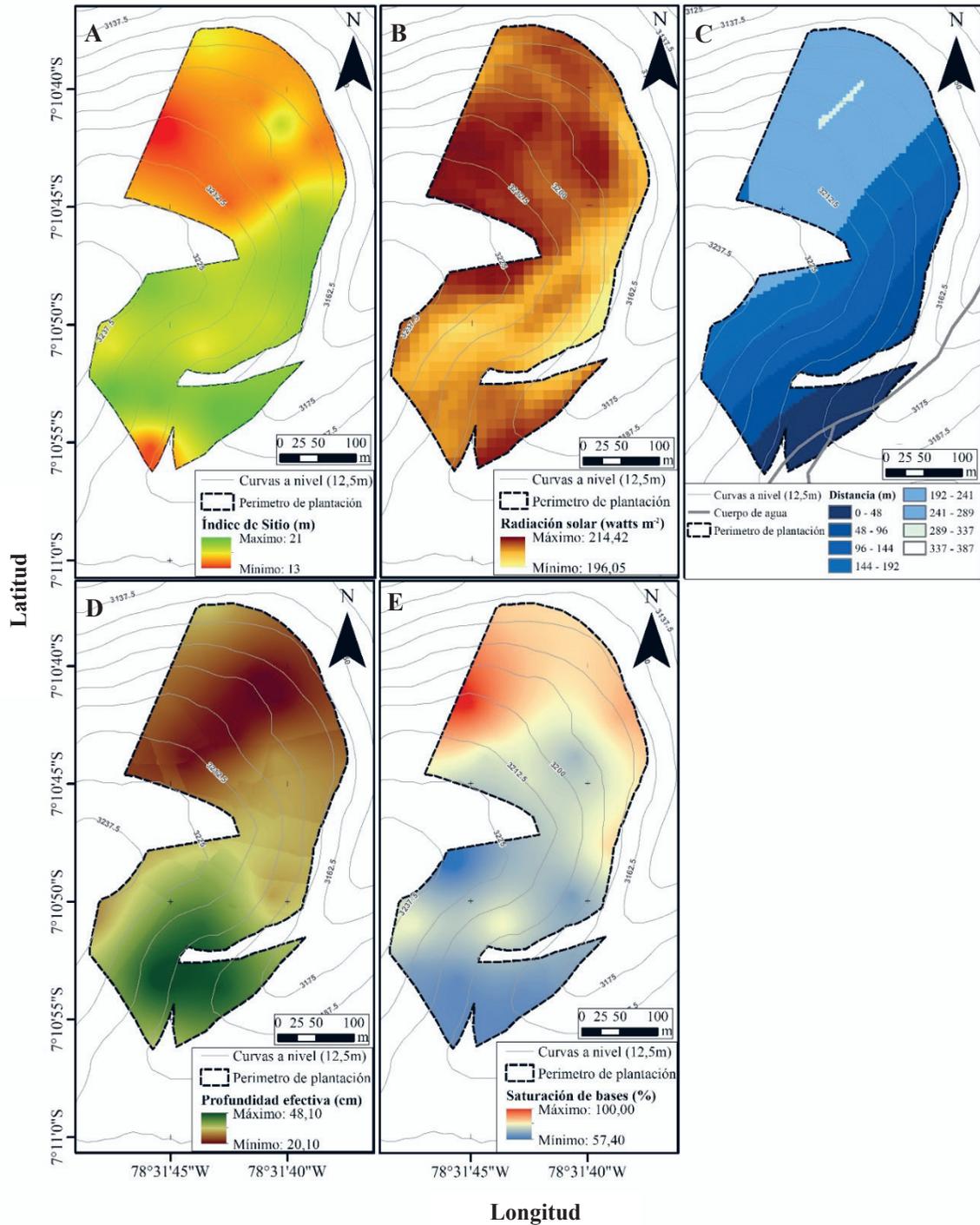
En definitiva, las principales variables que explican la variación de IS para *E. globulus* en la zona de estudio son la radiación solar, la distancia a cuerpos de agua, la profundidad efectiva y la saturación de bases. Estas cuatro variables que presentaron también alta relación espacial con la distribución espacial estimada del IS (figura 6).

*Efecto potencial del frío en el crecimiento.* Las curvas de calidad de sitio generadas para *E. globulus* (3.098 a 3.220 m s.n.m.), presentaron diferentes tendencias de crecimiento con respecto a las obtenidas para otras altitudes. La tasa de crecimiento es mayor en países donde el eucalipto vegeta en cotas más bajas (figura 7).



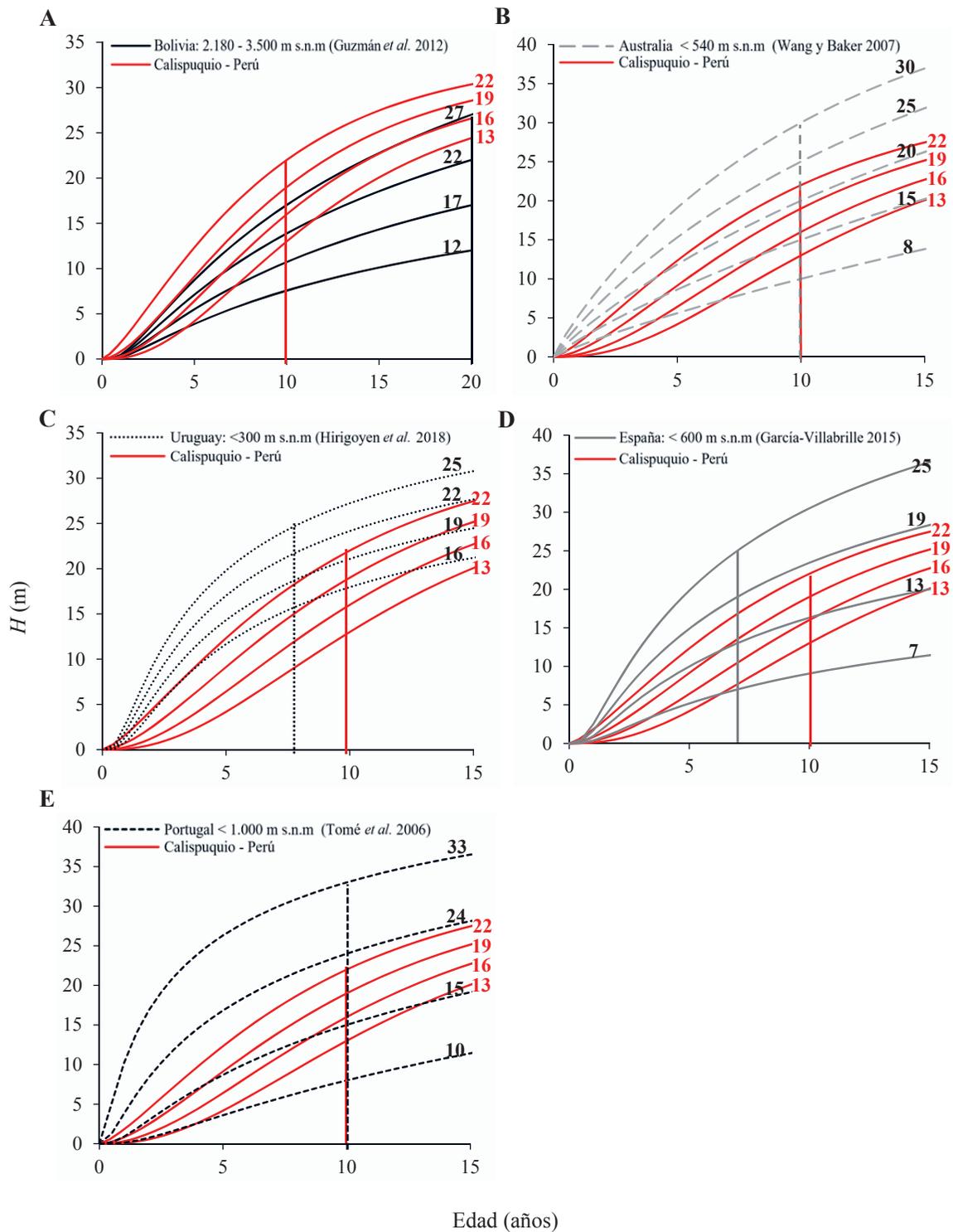
**Figura 5.** Correlación de Spearman, entre el IS con A) Radiación solar; B) Distancia a cuerpos de agua; C) Profundidad efectiva y D) Saturación de bases. \* =  $p < 0,05$ .

Spearman correlation; between SI with A) Solar radiation; B) Distance to water bodies; C) Effective depth; D) Base saturation. \* =  $p < 0.05$ .



**Figura 6.** A) Distribución espacial del IS; B) Radiación solar; C) Distancia a cuerpos de agua; D) Profundidad efectiva; E) Saturación de bases.

A) Spatial distribution of SI; B) Solar radiation; C) Distance to water bodies; D) Effective depth; E) Base saturation.



**Figura 7.** Comparación del crecimiento de la altura dominante de *E. globulus* sobre los 3.000 metros de altitud en los Andes peruanos respecto, color rojo (Modelo – Derivación: Bertalanffy-Richards y GADA); A) Bolivia (Modelo – Derivación: Schumacher y ADA); B) Australia (Modelo – Derivación: Bertalanffy-Chapman Richards y ADA); C) Uruguay (Modelo – Derivación: Korf y GADA); D) Galicia, España (Modelo – Derivación: Korf y GADA); E) Portugal (Modelo – Derivación – Días de precipitación: Korf, ADA y 100 días). Líneas verticales representa la  $t_0$ , tanto la usada en este trabajo (10 años y color rojo), como la usada en otros trabajos previos (tonalidades grises).

Comparison of dominant height growth of *E. globulus* above 3,000 m altitude in the Peruvian Andes, red color (Model - Derivation: Bertalanffy-Richards and GADA); A) Bolivia (Model - Derivation: Schumacher and ADA); B) Australia (Model - Derivation: Bertalanffy-Chapman Richards and ADA); C) Uruguay (Model - Derivation: Korf and GADA); D) Galicia, Spain (Model - Derivation: Korf and GADA); E) Portugal (Model - Derivation - Days of precipitation: Korf, ADA and 100 days). Vertical lines represent the  $t_0$ , both the one used in this work (10 years and red color) and the one used in previous works (gray shades).

## DISCUSIÓN

*Curvas de índice de sitio.* *E. globulus* cada año es instalado en más superficies alrededor del mundo, expansión que genera una gran diversidad de sitios para la especie. De acuerdo con los factores edáficos y climáticos de cada sitio las tasas de crecimiento varían, siendo necesario modelar la calidad de sitio para cada zona (e.g. Wang y Baker 2007, García-Villabrille 2015). Las curvas generadas para *E. globulus* en condiciones de sitio más similares al presente estudio son las reportadas para los andes bolivianos, entre los 2.180 y 3.590 m s.n.m. (Guzmán *et al.* 2012). Sin embargo, tampoco describen adecuadamente el crecimiento en altura observado para las parcelas de estudio, motivo por el cual fue necesario realizar el modelamiento de IS para el área en investigación.

De acuerdo con la evaluación estadística (Cuadro 4), las ecuaciones dinámicas obtenidas mediante la metodología GADA a partir de las ecuaciones base de Bertalanffy-Richards y Hossfeld (ecuaciones [4] y [8], respectivamente), presentaron mejores indicadores estadísticos que las derivadas mediante ADA (ecuaciones [1], [2] y [3] y [5], [6] y [7], respectivamente), lo que coincide con los resultados obtenidos para la misma especie por García-Villabrille (2015) y Hirigoyen *et al.* (2018). Esto se debe a que las ecuaciones dinámicas obtenidas mediante GADA presentan más de un parámetro específico del sitio, lo que se traduce en curvas más flexibles, que generan mayor variedad de tendencias de altura dominante-edad (Cieszewski y Bailey 2000).

En el presente estudio, el modelo dinámico de Bertalanffy-Richards derivado mediante la metodología GADA presentó la mejor performance estadística para estimar el IS (Cuadro 4). Algunos de los estudios para *E. globulus*, han obtenido que esta ecuación base fue la más adecuada para modelar el IS (e.g. Wang *et al.* 2007, Filho *et al.* 2023). La capacidad predictiva del modelo seleccionado se considera adecuada, explicando un porcentaje de variabilidad (96,7 %) superior a la de otros trabajos previos para la especie (88 % por Wang y Baker (2007) en Australia, 94 % por Hirigoyen *et al.* (2018) en Uruguay). En el presente estudio la  $t_0$  seleccionada fue de 10 años pues fue la edad que presentó menor error en la estimación de la  $H$  a otras edades. Esta edad es ligeramente más elevada que la usada en las curvas desarrolladas para España y Uruguay (7 y 8 años, respectivamente). Es importante resaltar que, en la elección de  $t_0$ , una edad temprana ayudará a una pronta estimación de IS (y por tanto favorecerá la toma de decisiones acerca del manejo), pero, por otra parte, a edades jóvenes el crecimiento puede ser errático, pudiendo inducir a errores en la estimación de IS (Diéguez-Aranda *et al.* 2009).

*Relación entre IS y variables fisiográficas y edáficas.* En el presente estudio, a escala local se determinó que las variables que presentaron correlación con el IS fueron fisiográficas y edáficas. Estudiar la relación existente entre la

productividad (IS) y los factores abióticos depende de la escala espacial. Por lo general a escala local las variables explicativas son las edáficas antes que las climáticas (Domingo-Santos *et al.* 2009) y el efecto que generan sobre el crecimiento es más evidente cuando es más limitado su disponibilidad (Gadow *et al.* 2007). Se ha demostrado que variables micro-topográficas influyeron directamente en la supervivencia y crecimiento en altura de árboles juveniles del género *Eucalyptus* (Salekin *et al.* 2019); reportes que concuerdan con los resultados obtenidos en este trabajo.

En el presente estudio la variable distancia a cuerpos de agua fue la que presentó mayor correlación con el IS ( $\rho = -0,538$ ); indicando que el crecimiento en altura de *E. globulus* depende en mayor grado de este recurso, a mayor distancia el crecimiento en altura disminuyó. Cajamarca se caracteriza por presentar un clima seco con dos periodos marcados de precipitación, lluvias y sequía, por lo cual las parcelas más distantes a los cuerpos de agua dependen en su gran mayoría del recurso proveniente de las precipitaciones, que se dan principalmente de octubre a abril (figura 1B). Se ha reportado que el recurso hídrico influye directamente el crecimiento de la especie, pues es susceptible al déficit hídrico (Cerasoli *et al.* 2016). Asimismo, y debido a su importancia, la precipitación es usada para mejorar las predicciones de la calidad de sitio de *E. globulus* (e.g. Tomé *et al.* 2006, Wang *et al.* 2007). Otros autores (Merino *et al.* 2003) han encontrado también una correlación negativa entre el periodo de sequía y el IS para la especie.

La radiación solar se correlacionó negativamente con el IS ( $\rho = -0,438^*$ ), indicando que en áreas con mayor exposición solar el crecimiento en altura fue menor. La radiación influye directamente el crecimiento de las plantas mediante la fotosíntesis, pero la reducción del agua disponible en el suelo genera el cierre de los estomas, disminuyendo la captación de  $\text{CO}_2$  y la fotosíntesis (Chen *et al.* 2021). Los resultados obtenidos en este trabajo se podrían explicar porque en los periodos secos las parcelas que reciben mayor radiación solar sufrieron un estrés hídrico más marcado, pues presentaron mayor distancia a cuerpos de agua (figuras 6B y 6C).

A nivel edáfico, la profundidad efectiva del suelo presentó relación positiva con el IS ( $\rho = 0,473^*$ ) (figura 6C), asociación similar a la obtenida para la misma especie en España (Domingo-Santos *et al.* 2009). Esta correlación corrobora que el crecimiento de los árboles está relacionado positivamente con el volumen de suelo ocupado por sus raíces y por la disponibilidad de agua (Gadow *et al.* 2007) y que el rendimiento en plantaciones es bajo en suelos poco profundos (Viera *et al.* 2016). Por otro lado, se ha reportado que variables como pH, Ca y P influyen positivamente en la productividad (Merino *et al.* 2003); pero con respecto a la saturación de bases que presentó correlación negativa con el IS no existen reportes de su influencia en el crecimiento de la especie. A la vista de las variables ambientales anteriores, en los rodales objeto de estudio, el mayor crecimiento en altura se dio en zonas que

presentaron mayor disponibilidad de agua aún en tiempos de sequía, es decir en área cercanas a los cuerpos de agua, con menor exposición solar y con más volumen de suelos para el desarrollo de sus raíces (figura 6).

*Efecto potencial del frío en el crecimiento.* En el crecimiento de los árboles influye su actividad fotosintética y la absorción de nutrientes, pero también influye las restricciones como la limitación de los recursos y el estrés (Kiviste *et al.* 2002). Las fluctuaciones térmicas, las bajas temperaturas y las heladas son los principales factores ambientales que generan estrés en las plantas de eucalipto (Josse *et al.* 2009, Cerasoli *et al.* 2016, Oberschelp *et al.* 2020, Aguayo *et al.* 2023). Asimismo, se sabe que las plantas jóvenes de *E. globulus* son menos tolerantes a las condiciones de estrés por frío que las adultas (Costa e Silva *et al.* 2008). Existen diferentes mecanismos fisiológicos y moleculares de aclimatación (Oberschelp *et al.* 2020), siendo el cese precoz de crecimiento uno de ellos (Turnbull *et al.* 1993, Howe *et al.* 2003). Por tanto, esta aclimatación conlleva una disminución de la productividad (Aguayo *et al.* 2023). Los resultados obtenidos en el presente estudio sugieren que estos mecanismos de aclimatación están presentes, ya que el crecimiento en *H* en la zona de estudio fue muy reducido en los primeros años, y a partir de los 7 años la tasa de crecimiento aumentó (figura 7).

Resultados de estudios previos apuntan en la misma dirección de la importancia del frío (indirectamente de la altitud) en el crecimiento. Así, en plantaciones realizadas en España entre los 70 y 580 m s.n.m. se determinó que el IS presentó correlación negativa con la altitud ( $\rho = -0,39^*$ ) (Merino *et al.* 2003). Asimismo, en Ecuador entre los 2.755 y 2.929 m s.n.m. se estableció que el volumen de los individuos fue menor a mayores cotas ( $\rho = -0,857^*$ ) (Guallpa *et al.* 2016). Por otra parte, la evolución del crecimiento en *H* de la especie en Bolivia a cotas similares al área de estudio (Guzmán *et al.* 2012), evidencia tasas de crecimiento menores, en promedio, a las obtenidas en la presente investigación (figura 7A). Sin embargo, en plantaciones instaladas a altitudes inferiores en Australia, Uruguay, España y Portugal (Tomé *et al.* 2006, Wang y Baker 2007, García-Villabrille 2015, Hirigoyen *et al.* 2018), se observa que su crecimiento es muy superior al observado en los andes peruanos ya desde las primeras edades de la plantación (figuras 7B, 7C, 7D y 7E).

## CONCLUSIONES

Los resultados establecen un precedente en el modelamiento en la región de Cajamarca y aportan a conocer el efecto de los factores ambientales sobre los 3.000 metros de altitud en la productividad del *E. globulus* en los Andes norperuanos. La ecuación dinámica derivada del modelo Bertalanffy-Richards mediante la metodología GADA explica mejor la variabilidad de la *H* (96,7 % de variabilidad explicada). A nivel local, el IS presenta buena correlación

con la distancia a cuerpos de agua y en menor grado con la radiación solar, profundidad efectiva y saturación de bases. Además, en comparación con otros países, se evidencia un lento crecimiento en altura en las etapas iniciales de la plantación debido, probablemente, al efecto de aclimatación al frío.

Los resultados obtenidos ayudarán en la elección de las zonas más adecuadas para plantaciones de *E. globulus* en la zona en función a las características edáficas y fisiográficas del sitio. Por último, este estudio pone de manifiesto la necesidad de instalación y mantenimiento de redes de parcelas permanentes para evaluar el crecimiento de las principales especies forestales en la región de los Andes peruanos.

## CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

JRBV diseñó el estudio, analizó los datos y redactó el manuscrito, FEMB realizó la toma de datos y apoyó en la redacción, GGC apoyó en la redacción, AILLL realizó la toma de datos y apoyó en la redacción, FCD diseñó el estudio, analizó los datos y redactó el manuscrito, y PAA diseñó el estudio, analizó los datos y redactó el manuscrito.

## FINANCIAMIENTO

El estudio fue financiado por el Programa Nacional de Innovación Agraria (PNIA) y el Programa Nacional Forestal del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA).

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Programa Nacional de Innovación Agraria y al equipo técnico del Programa Nacional Forestal de la Estación Experimental Agraria Baños del Inca por el apoyo brindado. Así mismo a los alumnos de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Forestal de la Universidad Nacional de Cajamarca (UNC) por el apoyo en las evaluaciones.

## REFERENCIAS

- Aguayo P, M Fernández, C Balocchi, S Valenzuela. 2023. An overview of cold stress responses in *Eucalyptus globulus*. *Trees* 37: 211-222. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00468-022-02355-4>
- Assmann E. 1970 The principles of forest yield study. Oxford. Pergamon Press. 144 p.
- Bailey RL, JL Clutter. 1974. Base-age invariant polymorphic site curves. *Forest Science* 20(2): 155-159.
- Burkhardt HE, M Tomé. 2012. Modeling forest trees and stands. Berlin. Springer. 457 p.
- Cerasoli S, MC Caldeira, JS Pereira, G Caudullo, D de Rigo. 2016. *Eucalyptus globulus* and other eucalypts in Europe: distribution, habitat, usage and threats. In Ayanz SM, D de Rigo, G Caudullo, T Houston, A Mauri eds. European Atlas of Forest Tree Species. Luxembourg. Exion. p. 90-91.

- Chen X, P Zhao, X Zhao, Q Wang, L Ouyang, M Larjavaara, L Zhu, G Ni. 2021. Involvement of stem cortical photosynthesis in hydraulic maintenance of *Eucalyptus* trees and its effect on leaf gas Exchange. *Environmental and Experimental Botany* 186: 104451. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104451>
- Cieszewski CJ, RL Bailey. 2000. Generalized algebraic difference approach: a new methodology for derivation of biologically based dynamic site equations. *Forest Science* 46(1): 116-126.
- Clutter JL, JC Fortson, LV Pienaar, GH Brister, RL Bayley. 1983. Timber management: a quantitative approach. New York, Estados Unidos. Wiley. 333 p.
- Costa e Silva F, A Shvaleva, F Broetto, MF Ortuño, ML Rodrigues, MH Almeida, MM Chaves, JS Pereira. 2009. Acclimation to short-term low temperatures in two *Eucalyptus globulus* clones with contrasting drought resistance. *Tree Physiology* 29: 77-86. DOI: <https://doi.org/10.1093/treephys/tpn002>
- Diéguez-Aranda U, A Rojo Alboreca, F Castedo-Dorado, JG Álvarez González, M Barrio-Anta, F Crecente-Campo, JM González González, C Pérez-Cruzado, R Rodríguez Soalleiro, CA López-Sánchez, MA Balboa-Murias, JJ Gorgoso Varela, F Sánchez Rodríguez. 2009. Herramientas selvícolas para la gestión forestal sostenible en Galicia. Lugo, España. Universidad de Santiago de Compostela. 259 p.
- Domingo-Santos JM, AV López-Fernández, P Corral Pazos, J Sevilla Sánchez, F Ruiz Fernández, J Lago Macía. 2009. Calidad de estación de eucalipto y factores edafoclimáticos en la provincia de Huelva. 5º Congreso Forestal Español 1-11. Consultado 25 jul. 2021. Disponible en: [https://secforesta.org/publicaciones/index.php/congresos\\_forestales/article/view/16836](https://secforesta.org/publicaciones/index.php/congresos_forestales/article/view/16836)
- ESRI. 2011. ArcGIS Desktop: Release 10. Redlands, United States.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2020. Global Forest Resources Assessment 2020: Main report. 164 p.
- Filho AM, SP Netto, SA Machado, APD Corte, A Behling. 2023. Site classification for *Eucalyptus* sp. in a tropical region of Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 95(1): e20200038. DOI: <https://doi.org/10.1590/0001-3765202320200038>
- Gadow KV, S Sánchez Orios, JG Álvarez González. 2007. Estructura y Crecimiento del Bosque. Lugo, España. UNICOPIA. 280 p.
- García-Villabrille JD. 2015. Modelización del crecimiento y la producción de plantaciones de *Eucalyptus globulus* Labill. en el Noroeste de España. Tesis doctoral en Ingeniería Forestal. Lugo, España. Departamento de Enxeñaría Agroforestal, Universidade de Santiago de Compostela. 181 p.
- Guallpa M, S Rosero, M Samaniego, E Cevallos. 2016. Caracterización edáfica y dasométrica de una plantación de *Eucalyptus globulus* Labill y propuesta de manejo en la zona estepa espinosa Montano Bajo, Riobamba, Ecuador. *Enfoque UTE* 7(3): 26-40. DOI: <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v7n3.103>
- Guzmán G, M Morales, T Pukkala, S de-Miguel. 2012. A model for predicting the growth of *Eucalyptus globulus* seedling stands in Bolivia. *Forest Systems* 21(2): 205-209. DOI: <https://doi.org/10.5424/fs/2012212-02398>
- Gworek JR, SB Vender Wall, PF Brussard. 2007. Changes in biotic interactions and climate determine recruitment of Jeffrey pine along an elevation gradient. *Forest Ecology and Management* 239(1-3): 57-68. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.11.010>
- Hirigoyen A, J Franco, U Diéguez. 2018. Modelo dinámico de rodal para *Eucalyptus globulus* (L.) en Uruguay. *Agrociencia Uruguay* 22(1): 63-80. DOI: <https://doi.org/10.31285/agro.22.1.7>
- Hossfeld JW. 1822. *Mathematik für Forstmänner, Ökonomen und Cameralisten*. Gotha, Alemania. Bd.,S. 310 p.
- Howe G, S Aitken, D Neale, K Jermstad, N Wheeler, T Chen. 2003. From genotype to phenotype: unraveling the complexities of cold adaptation in forest trees. *Canadian Journal of Botany* 81(12): 1247-1266. DOI: <https://doi.org/10.1139/b03-141>
- Huang S. 1999. Development of compatible height and site index models for young and mature stands within an ecosystem-based management framework. Oeiras, Portugal. Proceedings of IUFRO Congress "Empirical and process-based models for forest tree and stand growth simulation". 99 p.
- Huang S, Y Yang, Y Wang Y. 2003. A critical look at procedures for validating growth and yield models. In Amaro A, D Reed, P Soares eds. *Modelling forest systems*. Oxfordshire, United Kingdom. CAB International. p. 271-292.
- Jacobs MR. 1979. *Eucalypts for planting*. Roma, Italia. FAO. 677 p.
- Josse C, F Cuesta, G Navarro, V Barrena, E Cabrera, E Chácon-Moreno, W Ferreira, M Peralvo, J Saito, A Tovar. 2009. Ecosistemas de los Andes del Norte y Centro. Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela. Lima, Perú. Secretaría General de la Comunidad Andina, Programa Regional ECOBONA-Intercooperation, CONDESAN-Proyecto Páramo Andino, Programa BioAndes, EcoCiencia, NatureServe, IAvH, LTA-UNALM, ICAE-ULA, CDC-UNALM, RUMBOL SRL. 96 p.
- Kiviste A, JG Álvarez González, A Rojo Alboreca, AD Ruiz González. 2002. Funciones de crecimiento de aplicación en el ámbito forestal. Madrid, España. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. 190 p.
- Lundqvist B. 1957. On the height growth in cultivated stands of pine and spruce in northern Sweden. *Medd Fran Statens Skogforsk Band* 47(2): 1-64.
- Menéndez-Miguélez M, P Álvarez-Álvarez, J Majada, E Canga. 2015. Effects of soil nutrients and environmental factors on site productivity in *Castanea sativa* Mill. coppice stands in NW Spain. *New Forests* 46: 217-233. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-014-9456-2>
- Merino A, A Rodríguez, J Brañas, R Rodríguez-Soalleiro. 2003. Nutrition and growth in newly established plantations of *Eucalyptus globulus* in northwestern Spain. *Annals of Forest Science* 60(6): 509-517. DOI: <https://doi.org/10.1051/forest:2003044>
- Mondino VA, MJ Pastorino, LA Gallo. 2019. Variación altitudinal de caracteres fenológicos y crecimiento inicial en condiciones controladas entre poblaciones de *Nothofagus pumilio* provenientes del Centro-Oeste de Chubut, Argentina. *Bosque* 40(1): 87-94. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002019000100087>
- NASA. 2021. Earthdata. Consultado 15 sept. 2021. Disponible en <https://search.asf.alaska.edu>

- Oberschelp GPJ, AB Guarnaschelli, N Teson, LE Harrand, F Podesta, E Margarit. 2020. Cold acclimation and freezing tolerance in three *Eucalyptus* species: A metabolomic and proteomic approach. *Plant Physiology and Biochemistry* 154: 316-327. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.05.026>
- R Core Team. 2020. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Consultado 20 jul. 2021. Disponible en <http://www.R-project.org>
- Richards FJ. 1959. A flexible growth function for empirical use. *Journal of Experimental Botany* 10 (29): 290-300.
- Salekin S, EG Mason, J Morgenroth, M Bloomberg, DF Meason. 2019. Modelling the effect of microsite influences on the growth and survival of juvenile *Eucalyptus globoidea* (Blakely) and *Eucalyptus bosistoana* (F. Muell) in New Zealand. *Forests* 10(10): 857. DOI: <https://doi.org/10.3390/f10100857>
- SERFOR (Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre, PE). 2020. Anuario Forestal y de Fauna Silvestre 2019. 131 p.
- Tomé M, T Oliveira, P Soares. 2006. O modelo GLOBULUS 3.0 dados e equações. Lisboa, Portugal. Universidade Técnica de Lisboa. 23 p.
- Turnbull CR, DE Mcleod, CL Beadle, DA Ratkowsky, D Mumery, T Bird. 1993. Comparative early growth of *Eucalyptus* species of the subgenera *Monocalyptus* and *Symphomyrtus* in intensively-managed plantations in southern Tasmania. *Australian Forestry* 56(3): 276-286. DOI: <https://doi.org/10.1080/00049158.1993.10674615>
- Vanclay JK. 1994. Modelling forest growth and yield: applications to mixed tropical forests. Wallingford, Reino Unido. CAB International. 312 p.
- Viera M, F Ruíz-Fernández, R Rodríguez-Soalleiro. 2016. Nutritional prescriptions for *Eucalyptus* plantations: lessons learned from Spain. *Forests* 7(4): 84. DOI: <https://doi.org/10.3390/f7040084>
- von Bertalanffy L. 1957. Quantitative laws in metabolism and growth. *Quarterly Review of Biology*. 32: 217-231.
- Wang Y, TG Baker. 2007. A regionalised growth model for *Eucalyptus globulus* plantations in south-eastern Australia. *Australian Forestry* 70(2): 93-107. DOI: <https://doi.org/10.1080/00049158.2007.10675008>
- Wang Y, VM LeMay, TG Baker. 2007. Modeling and prediction of dominant height and site index of *Eucalyptus globulus* plantations using a nonlinear mixed-effects model approach. *Canadian Journal of Forest Research* 37(8): 1390-1403. DOI: <https://doi.org/10.1139/X06-282>
- Weiskittel AR, DW Hann, JA Kershaw, JK Vanclay. 2011. Forest Growth and Yield Modeling. West Sussex, Reino Unido. John Wiley & Sons. 415 p.

Recibido: 27.06.23  
Aceptado: 12.11.23