



Fundación
Miguel Lillo
Tucumán
Argentina

doi

Modelización de la distribución potencial de *Gentianella weberbaueri* (Gentianaceae) en Perú

Modelling the potential distribution of *Gentianella weberbaueri* (Gentianaceae) in Peru

Santos-Linares, Victor ; Jehoshua Macedo-Bedoya*

Red de Investigadores en Biodiversidad, Ecología y Conservación (RIBEC).

* Autor correspondal: <jehoshua.macedo@unmsm.edu.pe>

Resumen

Este estudio modela la distribución potencial de *Gentianella weberbaueri*, una especie endémica de los Andes peruanos, mediante algoritmos Boosted Regression Trees (BRT). Se emplearon 35 registros georreferenciados y 19 variables bioclimáticas extraídas de WorldClim v2.1. El modelo presentó una alta capacidad predictiva ($AUC = 0,994 \pm 0,001$), siendo la temperatura máxima del mes más cálido, la precipitación anual y la del cuatrimestre más húmedo las variables más influyentes. La proyección espacial reveló una distribución concentrada en Áncash, Huánuco, La Libertad, Lima y Junín, abarcando aproximadamente 15784 km². Estas áreas corresponden a ecosistemas altoandinos entre los 3000 y 4900 m s.n.m., caracterizados por climas fríos y suelos bien drenados. El análisis sugiere que, pese a su clasificación como especie de preocupación menor, *G. weberbaueri* enfrenta riesgos por fragmentación del hábitat y cambio climático. Se recomienda fortalecer las estrategias de conservación en zonas de alta idoneidad ecológica, como el Parque Nacional Huascarán, e implementar corredores biológicos que garanticen la conectividad entre subpoblaciones.

Palabras clave: Andes peruanos; conservación; endemismo; fitogeografía.

► Ref. bibliográfica: Santos-Linares, V.; Macedo-Bedoya, J. 2025. Modelización de la distribución potencial de *Gentianella weberbaueri* (Gentianaceae) en Perú. *Lilloa* 62 (2): 747-761. doi: <https://doi.org/10.30550/j.lil/2235>

► Recibido: 2 de julio 2025 – Aceptado: 22 de septiembre 2025 – Publicado: 10 de noviembre 2025.

► URL de la revista: <http://lilloa.lillo.org.ar>

► Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución – No Comercial – Sin Obra Derivada 4.0 Internacional.



Abstract

This study models the potential distribution of *Gentianella weberbaueri*, an endemic species of the Peruvian Andes, using the Boosted Regression Trees (BRT) algorithms. Thirty-five georeferenced occurrence records and 19 bioclimatic variables extracted from WorldClim v2.1 were used. The model showed a high predictive capacity ($AUC = 0.994 \pm 0.001$), with the maximum temperature of the warmest month, annual precipitation, and precipitation of the wettest quarter being identified as the most influential variables. The spatial projection revealed a concentrated distribution in Áncash, Huánuco, La Libertad, Lima, and Junín, covering approximately 15784 km². These areas correspond to high Andean ecosystems between 3000 and 4900 m asl, characterized by cold climates and well-drained soils. The analysis suggests that, despite its classification as a species of least concern, *G. weberbaueri* faces risks from habitat fragmentation and climate change. It is recommended that conservation strategies be strengthened in areas of high ecological suitability, such as Huascarán National Park, and that biological corridors be implemented to ensure connectivity between subpopulations.

Palabras clave: Conservation; endemism; Peruvian Andes; phytogeography.

INTRODUCCIÓN

La flora de los Andes peruanos es reconocida como una de las principales concentraciones de endemismos vegetales a nivel mundial (Tejedor, 2017; Aquino *et al.*, 2018), resultado de una evolución en condiciones extremas de altitud, baja temperatura y alta radiación solar (Pérez-Escobar *et al.*, 2022). Este entorno ha favorecido la aparición de una alta tasa de especies únicas que presentan adaptaciones morfológicas (Kessler, 2006) y fisiológicas (Huamaní-Sulca, 2020; Romoleroux *et al.*, 2023) altamente especializadas para prosperar en suelos pobres y en condiciones climáticas extremas. Los endemismos andinos no solo constituyen un valor intrínseco para la biodiversidad global (León *et al.*, 2006; Kantún-Balam *et al.*, 2013), sino que desempeñan funciones ecológicas clave (Fernández-Cisternas *et al.*, 2021) y proveen recursos vitales para fauna igualmente especializada (Servat *et al.*, 2002; Meneses Ortegón y Herrera-Martínez, 2013).

Dentro de la rica diversidad andina, se encuentra *Gentianella weberbaueri* (Gentianaceae), una especie herbácea endémica de los Andes peruanos, adaptada a altitudes entre 3900 y 5100 m snm (Castillo *et al.*, 2006; León *et al.*, 2006). Crece en los departamentos de Ancash y Cajamarca (Castillo *et al.*, 2006; Castillo y Trinidad, 2019) en la zona norte del Perú, dentro de la vertiente occidental de los Andes. Fue descrita por el botánico argentino Humberto Fabris en 1958 en el Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica (Fabris, 1958). Es reconocible por sus grandes corolas rojas, lisas y sin pelos, con lóbulos que son el doble de largos que el tubo de la corola,

mientras que los lóbulos del cáliz tienen una longitud similar a la del tubo (Fabris, 1958). Son de porte bajo, con raíces fibrosas, adventicias, carnosas y tallos semileñosos con tejidos de reserva (Roca, 2012). Aunque el uso medicinal de *G. weberbaueri* no está ampliamente documentado, otras especies del género *Gentianella* son valoradas por sus propiedades en el tratamiento de trastornos digestivos (Tamariz-Angeles *et al.*, 2018).

A pesar de que la especie se encuentra clasificada como de Preocupación Menor (LC) (Castillo y Trinidad, 2019) en la Lista Roja de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN), su condición de ser una especie de altura y de distribución restringida la hace susceptible a diversas amenazas (Escudero *et al.*, 2012, Körner, 2007). Entre estas, el cambio climático representa una de las más significativas para las especies tropicales y de alta montaña (Deutsch *et al.*, 2008; Feeley y Silman, 2010; Dullinger *et al.*, 2012), ya que a medida que las condiciones climáticas continúan cambiando y aumenta la temperatura (Colwell *et al.*, 2008), las especies se ven obligadas a ascender en busca de hábitats más adecuados (Parmesan y Yohe, 2003; Colwell *et al.*, 2008), proceso conocido como la termofilización (Fadrique *et al.*, 2018). Sin embargo, cuando no hay más elevaciones a las que puedan desplazarse, la especie enfrenta un alto riesgo de extinción local debido a la falta de hábitats adecuados (Larsen *et al.*, 2012).

La modelación de la distribución potencial de especies se fundamenta en la Teoría del Nicho Ecológico de Hutchinson (1957), que concibe el nicho como el conjunto de condiciones ambientales (bióticas y abióticas) en las que una especie puede subsistir. Es una herramienta clave en ecología, ya que permite identificar áreas de hábitat potencial basándose en registros de presencia y condiciones ambientales, contribuyendo a la planificación de estrategias de conservación y la evaluación de amenazas como el cambio climático y la transformación del paisaje (Naoki *et al.*, 2006; Pliscoff y Fuentes-Castillo, 2011). En este estudio, se modeló la distribución potencial de *G. weberbaueri* en los Andes peruanos con el uso de datos georreferenciados. Este análisis permitió identificar áreas prioritarias para la conservación de esta especie y proponer estrategias para mitigar riesgos asociados con la fragmentación y otros factores ambientales, proporcionando información crucial no solo para la gestión de esta especie endémica sino para otras especies con distribución altoandina.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para modelar la distribución potencial de *G. weberbaueri*, se emplearon 35 registros de presencia obtenidos de la base de datos del Global Biodiversity Information Facility [GBIF] (2024) junto con 19 variables bioclimáticas con resolución de 30 segundos ($\sim 1 \text{ km}^2$) (Tabla 1), derivadas de WorldClim (Version 2.1) (Fick y Hijmans, 2017). Las variables bioclimáticas sintetizan información de temperatura y precipitación en distintas escalas temporales,

Tabla 1. Variables bioclimáticas obtenidas de WorldClim (Versión 2.1).**Table 1.** Bioclimatic variables obtained from WorldClim (Version 2.1).

Código	Variable bioclimática
Bio1	Temperatura media anual
Bio2	Rango de temperatura anual
Bio3	Temperatura media del mes más cálido
Bio4	Temperatura media del mes más frío
Bio5	Temperatura máxima del mes más cálido
Bio6	Temperatura mínima del mes más frío
Bio7	Precipitación anual total
Bio8	Precipitación del mes más húmedo
Bio9	Precipitación del mes más seco
Bio10	Precipitación en el cuatrimestre más húmedo
Bio11	Precipitación en el cuatrimestre más seco
Bio12	Precipitación estacional (coeficiente de variabilidad)
Bio13	Relación de precipitación/temperatura (ratio anual)
Bio14	Precipitación en el cuatrimestre más seco, con correlación a la temperatura
Bio15	Precipitación media anual
Bio16	Media mensual de los días con precipitación
Bio17	Número de días de helada
Bio18	Número de días cálidos
Bio19	Número de días fríos

como promedios anuales o estacionales, lo que las hace más relevantes que los datos climáticos mensuales para modelar distribuciones de especies, ya que reflejan mejor sus requerimientos fisiológicos (Deblauwe *et al.*, 2016; Title y Bemmels, 2018).

En este estudio, el área de calibración fue delimitada por el territorio político del Perú, dado que *G. weberbaueri* es una especie endémica exclusivamente reportada en la zona andina en departamentos como Ancash y Cajamarca (Castillo *et al.*, 2006; Castillo y Trinidad, 2019). Esta restricción geográfica se adoptó bajo el supuesto de que la especie ha tenido oportunidad de dispersarse dentro de este territorio y que no existen registros fuera de él. El análisis se llevó a cabo utilizando Boosted Regression Trees (BRT), implementados mediante el uso del paquete *dismo* con el software RStudio (2023.12.1+402) (Hijmans *et al.*, 2017). El modelo fue ajustado con un total de 350 árboles, optimizados mediante validación cruzada k-fold para maximizar su capacidad predictiva.

La importancia de las variables se evaluó a través de dos métricas: la reducción de la desviación explicada y la importancia de la permutación. El desempeño del modelo se evaluó mediante el Área Bajo la Curva (AUC), categorizando los valores como “excelente” (0,90–1,00), “bueno” (0,80–0,90) o “moderado” (0,70–0,80) (Allouche *et al.*, 2006).

El raster generado por el modelo de distribución potencial fue importado a QGIS 3.40.1 'Bratislava' para su análisis y edición. En esta fase, se integraron los registros de presencia con el mapa de idoneidad obtenido en la modelación correspondiente al archivo generado en formato ASC, ajustando la visualización para resaltar las áreas con mayor probabilidad de presencia de *G. weberbaueri*. Para estimar el área de distribución potencial, se reclasificó el ráster de idoneidad generado por el modelo BRT, conservando exclusivamente las celdas con valores entre 0,5 y 1, correspondientes a zonas de alta probabilidad de presencia. Esta reclasificación se realizó con base en un umbral ecológicamente significativo, a fin de excluir áreas marginales de baja idoneidad. Un umbral de idoneidad $\geq 0,5$ es comúnmente utilizado en modelos de distribución de especies, ya que marca el punto donde la probabilidad predicha supera el azar y ofrece un equilibrio adecuado entre sensibilidad y especificidad en ausencia de datos de no presencia (Liu *et al.*, 2005). Posteriormente, se calculó la superficie total de estas celdas seleccionadas multiplicando su número por el área individual de cada celda (en función de la resolución espacial del ráster), y se expresó el resultado en kilómetros cuadrados. Este procedimiento se llevó a cabo utilizando el paquete *raster* en el software RStudio (versión 2023.12.1+402) (Hijmans, 2023), lo que permitió obtener una estimación precisa y confiable de la extensión espacial potencial de distribución.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La validación cruzada del modelo desarrollado a partir de 35 registros y 19 predictores ambientales mostró un excelente desempeño predictivo, con un Área Bajo la Curva (AUC) de $0,994 \pm 0,001$, lo que indica una alta capacidad de discriminación. El modelo final, conformado por 350 árboles según la configuración establecida, mostró un desempeño sólido, con una desviación media residual de 0,019.

Las variables ambientales más determinantes en la distribución de la especie fueron la temperatura máxima del mes más cálido (Bio 5), la precipitación anual total (Bio 7) y la precipitación en el cuatrimestre más húmedo (Bio 10), las cuales explican una proporción significativa de la varianza en el modelo (Tabla 2).

Tabla 2. Análisis de contribución de variables para el modelo logístico.**Table 2.** Analysis of the contribution of variables to the logistic model.

Variable	Porcentaje de Contribución	Importancia de permutación
Bio1	0,1	0
Bio2	0,8	1,6
Bio3	2,9	1,3
Bio4	0,9	2,5
Bio5	21,1	0
Bio6	0	0
Bio7	19,5	16,4
Bio8	0,6	70,2
Bio9	1,8	0
Bio10	38,6	0
Bio11	0	0
Bio12	5,4	2,8
Bio13	0	0
Bio14	3,3	0
Bio15	1,2	1,9
Bio16	1,7	1,8
Bio17	0,6	0,3
Bio18	0,6	0,3
Bio19	1	0,7

Proyección Espacial

La proyección del modelo en el área de estudio (Perú) identificó zonas potenciales de distribución para *G. weberbaueri*. Las áreas con mayor probabilidad de presencia se localizaron en los departamentos de Áncash, Huancavelica, Huánuco, Junín y Lima (Fig. 1). Estas zonas coinciden con hábitats previamente reportados para la especie, validando la precisión del modelo y su capacidad para identificar zonas de alta idoneidad ecológica.

El modelamiento de la distribución potencial de *G. weberbaueri* en Perú, revela que su área es aproximadamente 15783,85 km². Estos resultados subrayan la relación estrecha de la especie con los ecosistemas altoandinos, donde predominan condiciones de altitud elevada (3000-4900 m snm, Fig. 2), climas fríos y suelos relativamente bien drenados, características fundamentales para su persistencia.

El análisis indica que Áncash es el departamento con la mayor concentración de registros y áreas de alta idoneidad, especialmente en provincias como Huaraz, Carhuaz y Huari. Este departamento alberga ecosistemas altoandinos bien conservados, como los del Parque Nacional Huascarán (Zelada *et al.*, 2010; Fuentealba y Mejía, 2016), que ofrecen refugio a la especie y garantizan la estabilidad de las subpoblaciones locales. Sin embargo, el uso intensivo del suelo en otras zonas del departamento podría fragmentar parte de su hábitat (Mullu, 2016; Sztár *et al.*, 2023), lo que refuerza la importancia de las áreas protegidas como pilares de conservación (Sánchez, 2011).

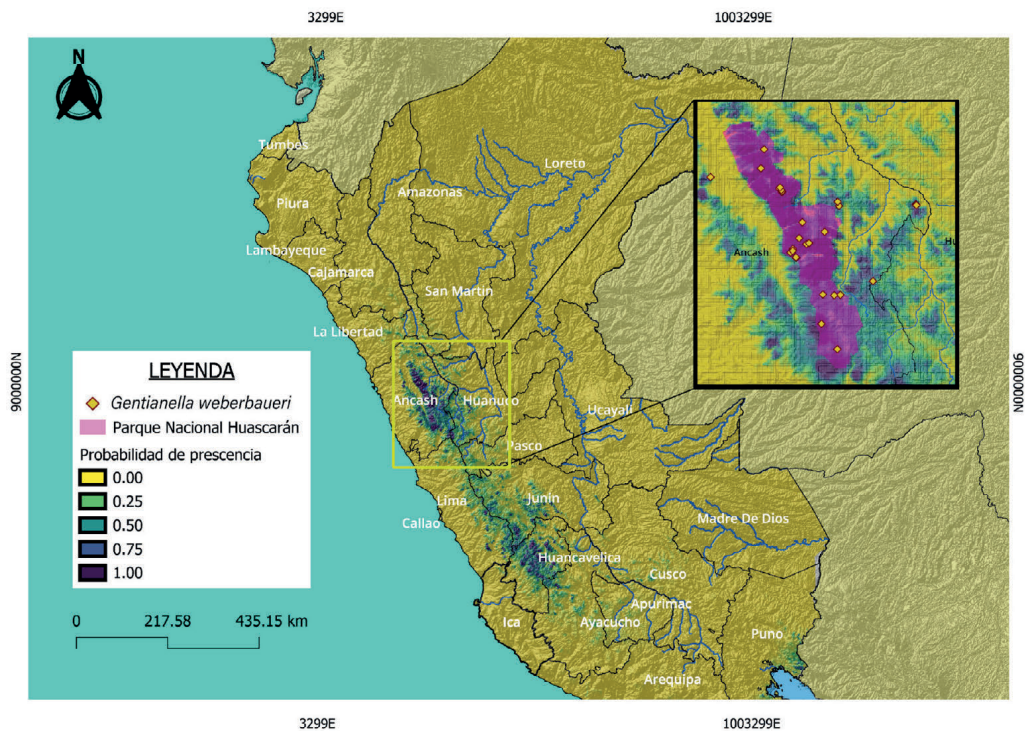


Fig. 1. Mapa de Distribución Potencial de *G. weberbaueri* en el Perú. Los puntos representan registros de ubicación de la especie obtenidos de GBIF.

Fig. 1. Potential Distribution Map of *G. weberbaueri* in Peru. Points represent species occurrence records obtained from GBIF.

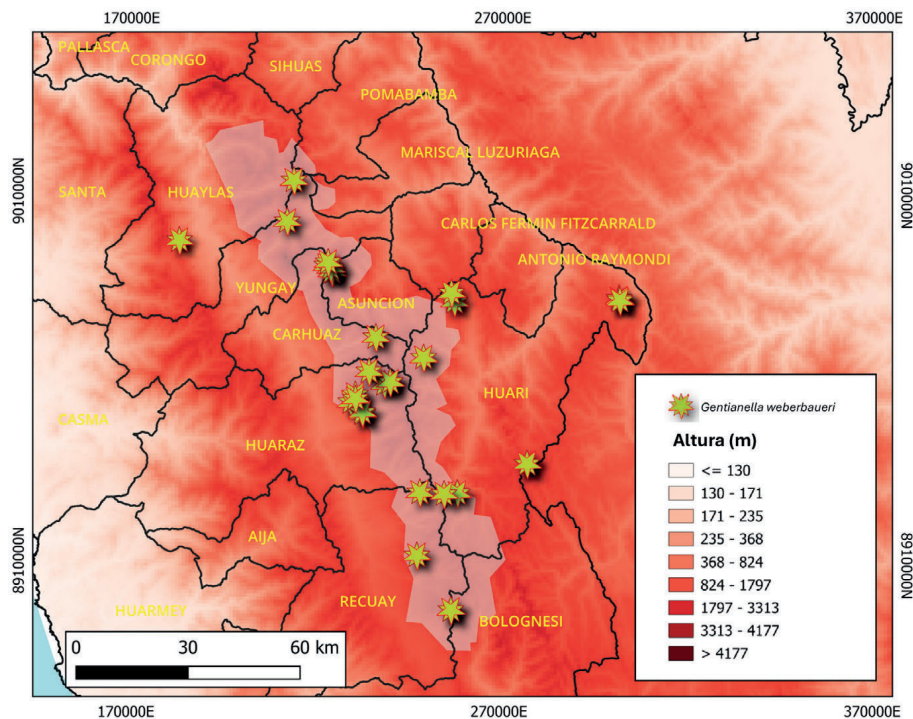


Fig. 2. Distribución de *G. weberbaueri* en las provincias de Áncash, destacando el gradiente altitudinal y la ubicación del Parque Nacional Huascarán (área sombreada).

Fig. 2. Distribution of *G. weberbaueri* in the provinces of Ancash, highlighting the altitudinal gradient and the location of the Huascarán National Park (shaded area).

En la región de Huánuco se evidencia una idoneidad intermedia para la especie, atribuible a la presencia de ecosistemas altoandinos que resultan ambientalmente favorables (Chuquichaico, 2016; Gallardo, 2018). No obstante, la fragmentación del hábitat ocasionada por actividades antrópicas, como la agricultura y el pastoreo, podría restringir la conectividad entre subpoblaciones, afectando negativamente su dinámica poblacional (Mora *et al.*, 2005; Szitár *et al.*, 2023).

En Huancavelica, el modelo predice zonas de idoneidad intermedia a alta, principalmente en el centro-norte del departamento; sin embargo, esta idoneidad puede verse comprometida por el pastoreo extensivo que altera la estructura vegetal y propicia efectos de borde desfavorables (Verzijl y Guerrero Quispe, 2013; Whitlock *et al.*, 2023). Estas perturbaciones pueden facilitar transiciones hacia estados ecológicos alternativos menos favorables para especies especializadas (Dantas *et al.*, 2016).

Lima y Junín muestran registros dispersos y zonas de baja a moderada idoneidad. Esto podría deberse a diferencias en los factores climáticos y edáficos que limitan el desarrollo de *G. weberbaueri* (Paredes, 2023). Aunque no constituye un núcleo importante de distribución, estas áreas marginales pueden desempeñar una función relevante en la expansión o adaptación de la especie a futuros cambios ambientales (Morente *et al.*, 2021). La conectividad entre poblaciones de *G. weberbaueri* podría estar amenazada por la conversión de ecosistemas naturales en áreas agrícolas (de Moraes *et al.*, 2017; Szitár *et al.*, 2023), especialmente en departamentos como Huánuco y La Libertad en donde las actividades como la agricultura y ganadería son vitales para su economía (Lescano y Lescano, 2014; Pérez-Trujillo *et al.*, 2022). Esto incrementa el riesgo de aislamiento de subpoblaciones, reduciendo el flujo genético y aumentando su vulnerabilidad a eventos estocásticos (De Vriendt *et al.*, 2017; Van Rossum *et al.*, 2022). En contraste, las áreas protegidas en Áncash, como el Parque Nacional Huascarán, podrían actuar como refugios clave para la especie, pero su efectividad depende de la preservación de los ecosistemas adyacentes (Dávalos-Sotelo, 2016; Rossini, 2021). Estos hallazgos subrayan la necesidad de implementar estrategias de conservación integrales que prioricen las áreas de alta idoneidad en Áncash y fomenten la creación de corredores ecológicos hacia departamentos vecinos, como Huánuco y La Libertad. Además, en los departamentos con menor idoneidad, como Junín, se recomienda promover la restauración ecológica y monitorear las subpoblaciones existentes para evaluar su viabilidad a largo plazo.

En escenarios de alta intervención antrópica, la relación entre las variables bioclimáticas empleadas en el modelo y la presencia real de la especie puede debilitarse (Pielke *et al.*, 2002; Pielke *et al.*, 2011). Actividades como la agricultura, el pastoreo y la expansión urbana generan alteraciones microclimáticas, incluyendo cambios en la temperatura superficial, la humedad edáfica y los regímenes locales de precipitación (Pielke *et al.*, 2002; Pielke *et al.*, 2011; Zhou *et al.*, 2014).

Es probable que los efectos negativos del clima sean aún más graves en el futuro, ya que se prevé que las temperaturas globales aumenten de 2,6 a 4 °C antes de finales de este siglo (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2014; Rogelj *et al.*, 2016). Además de la temperatura, también se prevé que en el futuro cambien las precipitaciones y las concentraciones de CO₂ (IPCC, 2014). Los escenarios climáticos proyectan un continuo aumento de la concentración de CO₂. El Observatorio de Mauna Loa, estación de referencia mundial para el monitoreo de gases de efecto invernadero ubicada en la isla de Hawái, registró una media mensual de aproximadamente 430 ppm en mayo de 2025, lo que representa un incremento anual de ~3,6 ppm respecto a 2024 (NOAA Global Monitoring Laboratory, 2025), alcanzando niveles no vistos en millones de años. En los Andes peruanos, se proyecta hasta un 20% menos de precipitación anual (De la Cruz *et al.*, 2025). Además, Vuille *et al.* (2018) y Pabón-Caicedo *et al.* (2020) coinciden en señalar un acelerado retroceso de los glaciares en los Andes tropicales, lo que compromete la estabilidad hídrica y ecológica de los ecosistemas altoandinos.

En los trópicos, a diferencia de las regiones templadas, los gradientes de temperatura a lo largo de la altitud son mucho más pronunciados que los gradientes latitudinales, lo que hace que el desplazamiento de las especies hacia altitudes mayores sea la respuesta más probable ante el calentamiento climático (Colwell *et al.*, 2008; Larsen *et al.*, 2012). En particular, las especies que habitan en sistemas montañosos tropicales podrían ser aún más vulnerables que aquellas que se encuentran en áreas de menor altitud, dado que las alteraciones climáticas tienden a ser más marcadas en las elevaciones superiores (Bradley *et al.*, 2006; Vuille *et al.*, 2008).

CONCLUSIÓN

El presente estudio permitió identificar la distribución potencial de *G. weberbaueri* en los Andes peruanos, revelando que las zonas de mayor idoneidad se concentran principalmente en los departamentos de Áncash, Huancavelica, Huánuco, Junín y Lima. Estos resultados reflejan la estrecha asociación de la especie con los ecosistemas altoandinos, caracterizados por altitudes elevadas, climas fríos y suelos bien drenados. A pesar de estar catalogada como una especie de “Preocupación menor”, su rango de distribución restringido, junto con el avance sostenido de actividades humanas como la agricultura extensiva, el pastoreo y la expansión urbana, incrementan su riesgo de fragmentación y aislamiento poblacional. Asimismo, los escenarios de cambio climático proyectan aumentos significativos de temperatura y reducciones de precipitación en los Andes, así como un acelerado retroceso de los glaciares tropicales, condiciones que podrían reducir la idoneidad de su hábitat futuro y limitar la capacidad adaptativa de la especie.

Frente a este panorama, se recomienda implementar estrategias de conservación integrales, que incluyan la consolidación de áreas protegidas, la restauración de hábitats degradados y la creación de corredores ecológicos que aseguren la conectividad entre subpoblaciones.

CONFLICTOS DE INTERÉS

Declaramos que no existen conflictos de intereses entre los autores ni con terceros.

BIBLIOGRAFÍA

- Allouche, O., Tsoar, A. y Kadmon, R. (2006). Assessing the accuracy of species distribution models: Prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *Journal of Applied Ecology* 43 (6): 1223-1232.
- Aquino, W., Condo, F., Romero, J., Yllaconza, R. y La Torre, M. I. (2018). Composición florística del distrito de Huarochirí, provincia de Huarochirí (Lima, Perú). *Arnaldoa* 25 (3): 877-922.
- Bradley, R. S., Vuille, M., Diaz, H. F. y Vergara, W. (2006). Threats to water supplies in the tropical Andes. *Science* 312 (5781): 1755-1756.
- Castillo, S., Salinas, N., León, B. y Sánchez, I. (2006). Gentianaceae endémicas del Perú. *Revista Peruana de Biología* 13 (2): 339-354.
- Castillo, R. S. y Trinidad, P. H. (2019). *Gentianella weberbaueri*. *The IUCN Red List of Threatened Species* 2019: e.T133312885A133313245. <https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2019-3.RLTS.T133312885A133313245.en>
- Chuquichaico, L. A. (2016). *Impacto de la reforestación en la recuperación de los suelos degradados en la microcuenca del río Monzón-Región Huánuco*. (Tesis doctoral), Universidad Inca Garcilaso de la Vega, Perú.
- Colwell, R. K., Brehm, G., Cardelús, C. L., Gilman, A. C. y Longino, J. T. (2008). Global warming, elevational range shifts, and lowland biotic attrition in the wet tropics. *Science* 322 (5899): 258-261.
- Dantas, V. D. L., Hirota, M., Oliveira, R. S. y Pausas, J. G. (2016). Disturbance maintains alternative biome states. *Ecology Letters* 19 (1): 12-19.
- Dávalos-Sotelo, R. (2016). El papel de la investigación científica en la creación de las áreas naturales protegidas. *Madera y Bosques* 22 (1): 7-13.
- Deblauwe, V., Droissart, V., Bose, R., Sonké, B., Blach-Overgaard, A., Svenning, J. C., Wieringa, J. J., Ramesh, B. R., Stévant, T. y Couvreur, T. L. (2016). Remotely sensed temperature and precipitation data improve species distribution modelling in the tropics. *Global Ecology and Biogeography* 25 (4): 443-454.

- de Moraes, M. C. P., de Mello, K. y Toppa, R. H. (2017). Protected areas and agricultural expansion: Biodiversity conservation versus economic growth in the Southeast of Brazil. *Journal of Environmental Management* 188: 73-84.
- De La Cruz, G., Huerta, A., Franco-León, P. y Lavado, W. (2025). Future climate projections for Tacna, Peru: Assessing changes in temperature and precipitation. *Atmosphere* 16 (2): 144. <https://doi.org/10.3390/atmos16020144>
- Deutsch, C. A., Tewksbury, J. J., Huey, R. B., Sheldon, K. S., Ghalambor, C. K., Haak, D. C. y Martin, P. R. (2008). Impacts of climate warming on terrestrial ectotherms across latitude. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105 (18): 6668-6672.
- De Vriendt, L., Lemay, M. A., Jean, M., Renaut, S., Pellerin, S., Joly, S., Belzile, F. y Poulin, M. (2017). Population isolation shapes plant genetics, phenotype and germination in naturally patchy ecosystems. *Journal of Plant Ecology* 10 (4): 649-659.
- Dullinger, S., Gattringer, A., Thuiller, W., Moser, D., Zimmermann, N. E., Guisan, A., Willner, W., Plutzer, C., Leitner, M., Mang, T., Caccianiga, M., Dirnböck, T., Ertl, S., Fischer, A., Lenoir, J., Svenning, J.-C., Psomas, A., Schmatz, D. R., Silc, U., Vittoz, P. y Hülber, K. (2012). Extinction debt of high-mountain plants under twenty-first-century climate change. *Nature Climate Change* 2 (8): 619-622.
- Escudero, A., García-Camacho, R., García-Fernández, A., Gavilán, R. G., Giménez-Benavides, L., Iriondo, J. M. y Pescador, D. S. (2012). Vulnerabilidad al cambio global en la alta montaña mediterránea. *Ecosistemas* 21 (3): 63-72.
- Fabris, H. A. (1958). Notas sobre *Gentianella* del Perú. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica* 7 (2): 86-93.
- Fadrique, B., Báez, S., Duque, Á., Malizia, A., Blundo, C., Carilla, J., Osinaga-Acosta, O., Malizia, L., Silman, M., Farfán-Ríos, W., Malhi, Y., Young, K. R., Cuesta, F., Homeier, J., Peralvo, M., Pinto, E., Jadan, O., Aguirre, N., Aguirre, Z. y Feeley, K. J. (2018). Widespread but heterogeneous responses of Andean forests to climate change. *Nature* 564 (7735): 207-212.
- Feeley, K. J. y Silman, M. R. (2010). Biotic attrition from tropical forests correcting for truncated temperature niches. *Global Change Biology* 16 (6): 1830-1836.
- Fernández-Cisternas, I., Majlis, J., Avila-Thieme, M. I., Lamb, R. W. y Pérez-Matus, A. (2021). Endemic species dominate reef fish interaction networks on two isolated oceanic islands. *Coral Reefs* 40 (4): 1081-1095.
- Fick, S. E. y Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 37 (12): 4302-4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>

- Fuentealba, B. y Mejía, M. (2016). Caracterización ecológica y social de humedales altoandinos del Parque Nacional Huascarán. *Aporte Santiaguino* 9 (2): 303-316.
- Gallardo, M. E. (2018). Variabilidad de tuberosas andinas en comunidades altoandinas tradicionales. Caso: Oca (*Oxalis tuberosa* Molina), Cuenca de Mito, Provincia de Huánuco, Región Huánuco (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú.
- Global Biodiversity Information Facility [GBIF]. (2024). Registros de presencia de *G. weberbaueri*. Recuperado de <https://www.gbif.org/>
- Hijmans, R. J. (2023). *raster: Geographic data analysis and modeling* (Versión 3.6-20). [R package]. <https://cran.r-project.org/web/packages/raster/index.html>
- Hijmans, R. J., Phillips, S., Leathwick, J. y Elith, J. (2017). *dismo: Species distribution modeling* (Version 1.1-4) [R package]. <https://cran.r-project.org/web/packages/dismo/index.html>
- Huamaní-Sulca, R. E., De La Cruz-Arango, J., Chuchón-Martínez, S. y Pelaez-Pelaez, F. (2020). Comunidades endémicas de cactáceas en peligro de extinción. Una necesidad de conservación de los recursos naturales del distrito de Pacaycasa, Ayacucho-Perú. *Journal of the Selva Andina Biosphere* 8 (2): 92-109.
- Hutchinson, E. G. (1957). Concluding remarks. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology* 22: 415-427.
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2014). Summary for policymakers. En: V. R. Barros, C. B. Field, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea y L. L. White (Eds.), *Climate change 2014, impacts, adaptation and vulnerability: Regional aspects* (p. 34). Cambridge University Press.
- Kantún-Balam, J., Flores, J. S., Tun-Garrido, J., Navarro-Alberto, J., Arias-Reyes, L. y Martínez-Castillo, J. (2013). Diversidad y origen geográfico del recurso vegetal en los huertos familiares de Quintana Roo, México. *Polibotánica* 36: 163-196.
- Kessler, M. (2006). Bosques de *Polylepis*. *Botánica Económica de los Andes Centrales* 11: 110-120.
- Körner, C. (2007). The use of 'altitude' in ecological research. *Trends in Ecology and Evolution* 22 (11): 569-574.
- Larsen, T. H., Brehm, G., Navarrete, H., Franco, P., Gómez, H., Mena, J. L., Morales, V., Argollo, J., Blacutt, L. y Canhos, V. (2012). Desplazamientos de los rangos de distribución y extinciones impulsados por el cambio climático en los Andes tropicales: síntesis y orientaciones. En: R. Martinez, P. M. Jørgensen y H. Tiessen (Eds.), *Cambio climático y biodiversidad en los Andes tropicales* (pp. 57-82). MacArthur Foundation.
- León, B., Pitman, N. y Roque, J. (2006). Introducción a las plantas endémicas del Perú. *Revista Peruana de Biología* 13 (2): 9-22.

- Lescano San Martín, L. A. y Lescano Bocanegra, L. C. (2014). Situación y perspectivas de la agroindustria no alimentaria en la Región La Libertad. *Tecnología y Desarrollo (Trujillo)* 12 (1): 7-18. <https://doi.org/10.18050/td.v12i1.686>
- Liu, C., Berry, P. M., Dawson, T. P. y Pearson, R. G. (2005). Selecting thresholds of occurrence in the prediction of species distributions. *Ecography* 28 (3): 385-393.
- Meneses Ortégón, L. A. y Herrera-Martínez, Y. (2013). Estudio preliminar de la avifauna asociada a parches de *Polylepis quadrijuga* (Rosaceae) del páramo de la Rusia, Duitama (Boyacá-Colombia). *Luna Azul* 36: 40-54.
- Mora, A. M. G., Anaya, J. A. y Dávila, E. Á. (2005). Análisis de fragmentación de los ecosistemas boscosos en una región de la cordillera central de los Andes colombianos. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín* 4 (7): 13-27.
- Morente, J., Romero, C. L., Fernández, A. G., Teso, M. L. R., Prieto-Benítez, S. y Iriondo, J. M. (2021). Áreas marginales en ecosistemas alpinos: definición y valor evolutivo en un contexto de cambio climático. *Ecosistemas* 30 (1): 2178-2178.
- Mullu, D. (2016). A review on the effect of habitat fragmentation on ecosystem. *Journal of Natural Sciences Research* 6 (15): 1-15.
- Naoki, K., Gómez, M. I., López, R. P., Meneses, R. I. y Vargas, J. (2006). Comparación de modelos de distribución de especies para predecir la distribución potencial de vida silvestre en Bolivia. *Ecología en Bolivia* 41 (1): 65-78.
- NOAA Global Monitoring Laboratory. (2025). Trends in atmospheric carbon dioxide. Recuperado de <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>
- Pabón-Caicedo, J. D., Arias, P. A., Carril, A. F., Espinoza, J. C., Fita Borrel, L., Goubanova, K., Lavado-Casimiro, W., Masiokas, M., Solman, S. y Villalba, R. (2020). Observed and projected hydroclimate changes in the Andes. *Frontiers in Earth Science* 8: 61. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00061>
- Paredes, V. (2023). Variabilidad climática sobre el rendimiento de los cultivos de seguridad alimentaria en la sierra-Junín (Tesis doctoral). Universidad Nacional del Centro del Perú, Perú.
- Parmesan, C. y Yohe, G. (2003). A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature* 421 (6918): 37-42. <https://doi.org/10.1038/nature01286>
- Pérez-Escobar, O. A., Zizka, A., Bermúdez, M. A., Meseguer, A. S., Condamine, F. L., Hoorn, C., Hooghiemstra, H., Pu, Y., Bogarín, D., Boschman, L. M., Pennington, R. T., Antonelli, A. y Chomicki, G. (2022). The Andes through time: evolution and distribution of Andean floras. *Trends in Plant Science* 27 (4): 364-378.
- Pérez-Trujillo, E., Asado-Hurtado, A. M. y Vega-Jara, L. (2022). Relación del contenido de materia orgánica con el pH de los análisis de suelo en cinco provincias de Huánuco. *Revista Investigación Agraria* 4 (2): 46-54.

- Pielke, R. A., Marland, G., Betts, R. A., Chase, T. N., Eastman, J. L., Niles, J. O., Niyogi, D. S. y Running, S. W. (2002). The influence of land-use change and landscape dynamics on the climate system: relevance to climate-change policy beyond the radiative effect of greenhouse gases. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 365 (1850): 1705-1719.
- Pielke Sr, R. A., Pitman, A., Niyogi, D., Mahmood, R., McAlpine, C., Hos-sain, F., Goldewijk, K. K., Nair, U., Betts, R., Fall, S., Reichstein, M., Kabat, P. y de Noblet, N. (2011). Land use/land cover changes and climate: Modeling analysis and observational evidence. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 2 (6): 828-850. <https://doi.org/10.1002/wcc.144>
- Pliscoff, P. y Fuentes-Castillo, T. (2011). Modelación de la distribución de especies y ecosistemas en el tiempo y en el espacio: una revisión de las nuevas herramientas y enfoques disponibles. *Revista de Geografía Norte Grande* 48: 61-79.
- Roca, B. E. (2012). Descripción morfohistológica de tres especies de plantas altoandinas de Chacas Asunción. (Tesis de grado), Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú.
- Rogelj, J., Den Elzen, M., Höhne, N., Fransen, T., Fekete, H., Winkler, H., Schaeffer, R., Sha, F., Riahi, K. y Meinshausen, M. (2016). Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 °C. *Nature* 534 (7609): 631-639. <https://doi.org/10.1038/nature18307>
- Romoleroux, K., Muriel, P., Sklenář, P., Ulloa-Ullua, C., Espinel, D. y Romoleroux, C. (2023). La flora de los páramos ecuatorianos: orígenes, diversidad y endemismo. En: P. Mena-Vásconez, R. Hofstede y E. Suárez Robalino (Eds.), *Los páramos del Ecuador: Pasado, presente y futuro* (pp. 104-125). Quito: USFQ Press.
- Rossini, G. F. I. (2021). Aspectos jurídicos del Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas. *Revista Derecho Público* 59: 67-92.
- Sánchez, J. L. (2011). Geoparques y Áreas Naturales Protegidas: Una visión desde la conservación, identidad y participación social. En: G. Bocco Verdinelli, E. Ezcurra, A. Gómez Pompa, E. Provencio, G. Quadri de la Torre y S. Reyes Luján (Eds.), *Investigación ambiental: Ciencia y política pública* (pp. 44-51). Ciudad de México: SEMARNAT-INE.
- Servat, G. P., Mendoza, W. y Ochoa, J. A. (2002). Flora y fauna de cuatro bosques de *Polylepis* (Rosaceae) en la Cordillera del Vilcanota (Cusco, Perú). *Ecología Aplicada* 1 (1-2): 25-35.
- Szitar, K., Tölgyesi, C., Deák, B., Gallé, R., Korányi, D. y Batáry, P. (2023). Connectivity and fragment size drive plant dispersal and persistence traits in forest steppe fragments. *Frontiers in Ecology and Evolution* 11: 1155885. <https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1155885>

- Tamariz-Angeles, C., Olivera-Gonzales, P. y Santillán-Torres, M. (2018). Antimicrobial, antioxidant and phytochemical assessment of wild medicinal plants from Cordillera Blanca (Ancash, Perú). *Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas* 17 (3): 270-285.
- Tejedor, A. (2017). Diversity and endemism of tree ferns (Cyatheaceae: Polypodiopsida) in the Central Andes along latitudinal and elevation gradients. *Acta Botanica Malacitana* 42 (1): 41-47.
- Title, P. O. y Bemmels, J. B. (2018). ENVIREM: An expanded set of bioclimatic and topographic variables increases flexibility and improves performance of ecological niche modeling. *Ecography* 41 (2): 291-307. <https://doi.org/10.1111/ecog.02880>
- Van Rossum, F., Le Pajolec, S., Raspé, O. y Godé, C. (2022). Assessing population genetic status for designing plant translocations. *Frontiers in Conservation Science* 3: 829332. <https://doi.org/10.3389/fcsc.2022.829332>
- Verzijl, A. y Guerrero, S. (2013). The system nobody sees: Irrigated wetland management and alpaca herding in the Peruvian Andes. *Mountain Research and Development* 33 (3): 280-293.
- Vuille, M., Carey, M., Huggel, C., Buytaert, W., Rabatel, A., Jacobsen, D., Soruca, A., Villacis, M., Yarleque, C., Elison, O., Condom, T., Salzmann, N. y Jean-Emmanuel, S. (2018). Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes – Impacts, uncertainties and challenges ahead. *Earth-Science Reviews* 176: 195-213.
- Vuille, M., Francou, B., Wagnon, P., Juen, I., Kaser, G., Mark, B. G. y Bradley, R. S. (2008). Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future. *Earth-Science Reviews* 89 (3-4): 79-96.
- Whitlock, B., Van Valkenburgh, P. y Wernke, S. A. (2023). Managing pastoral landscapes: remote survey of herding infrastructure in Huanca-velica, Peru. *Antiquity* 98 (397): 229-244.
- Zelada, W., Mejía, F. y Castillo, H. (2010). Abundancia relativa y diversidad de la ornitofauna de la quebrada Escalón, Parque Nacional Huascarán, época seca, 2010. *Aporte Santiaguino* 3 (2): 231-239.
- Zhou, D., Zhao, S., Liu, S., Zhang, L. y Zhu, C. (2014). Surface urban heat island in China's 32 major cities: Spatial patterns and drivers. *Remote Sensing of Environment* 152: 51-61.