

Ensemble modeling of *Begonia octopetala* in the coastal lomas of Peru under CMIP6 scenarios projected to 2065.

Huerta Lidia¹; Suarez Rashell² and Astete Samuel³

^{1,2,3}Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u20211c395@upc.edu.pe, u202119535@upc.edu.pe,
pcigsast@upc.edu.pe

Abstract– This study evaluates the impact of climate change on the endemic species *Begonia octopetala* in the coastal hills ecosystem of Peru up to the 2065 horizon, using an ensemble modeling approach that integrates machine learning algorithms and statistical methods (MaxEnt, Random Forest, BIOCLIM, and GLM). The models were parameterized with bioclimatic variables derived from CMIP6 to estimate habitat suitability under Shared Socioeconomic Trajectories (SSP1-2.6 and SSP5-8.5). The results show a critical contraction of suitable habitat under the SSP5-8.5 scenario, a trajectory of high greenhouse gas emissions and high radiative forcing according to the IPCC, projecting its total disappearance by 2065. In contrast, the SSP1-2.6 scenario shows the persistence of suitable, albeit highly fragmented microclimates. These findings quantify the species' high sensitivity to radiative forcing and underline the need to implement adaptive conservation strategies focused on climate refuges.

Keywords-- *Begonia octopetala*, Climate Change, Species Distribution Modeling, Coastal Hills, Shared Socioeconomic Pathways

Modelado por ensamble de *Begonia octopetala* en las lomas costeras del Perú ante escenarios CMIP6 al 2065.

Huerta Lidia¹; Suarez Rashell² y Astete Samuel³

^{1,2,3}Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u20211c395@upc.edu.pe, u202119535@upc.edu.pe, pcigsast@upc.edu.pe

Resumen— Esta investigación evalúa el impacto del cambio climático sobre la especie endémica *Begonia octopetala* en el ecosistema de lomas costeras del Perú al horizonte 2065, mediante un enfoque de modelado por conjuntos que integra algoritmos de aprendizaje automático y métodos estadísticos (MaxEnt, Random Forest, BIOCLIM y GLM). Los modelos fueron parametrizados con variables bioclimáticas derivadas de CMIP6 para estimar la idoneidad del hábitat bajo Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP1-2.6 y SSP5-8.5). Los resultados evidencian una contracción crítica del hábitat idóneo bajo el escenario SSP5-8.5, trayectoria de altas emisiones de gases de efecto invernadero y elevado forzamiento radiativo según el IPCC, proyectando su desaparición total hacia 2065. En contraste, el escenario SSP1-2.6 muestra la persistencia de microclimas aptos, aunque altamente fragmentados. Estos hallazgos cuantifican la elevada sensibilidad de la especie al forzamiento radiativo y subrayan la necesidad de implementar estrategias de conservación adaptativas orientadas a refugios climáticos.

Palabras clave—*Begonia octopetala*, Modelo de Distribución de Especies, Lomas Costeras, Trayectorias Socioeconómicas Compartidas

I. INTRODUCCIÓN

El cambio climático constituye una de las principales amenazas globales del siglo XXI, proyectándose incrementos de la temperatura media global, entre 1.5 °C y 2 °C, que podrán intensificar la frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos y comprometen la estabilidad ecológica a escala planetaria [1],[2]. Los ecosistemas áridos y semiáridos, que abarcan entre el 41% y 45% de la superficie terrestre y concentran una proporción significativa de la diversidad vegetal global, presentan una elevada vulnerabilidad debido a su limitada resiliencia estructural y funcional frente a perturbaciones climáticas [3].

Dentro de estos sistemas se desarrollan las lomas costeras (oasis de niebla), ecosistemas altamente frágiles distribuidos entre Perú y Chile que abarcan aproximadamente 17 093 km² [2],[4]. Cerca del 70% de estas formaciones se localizan en territorio peruano y albergan 537 especies vegetales, de las cuales el 41.89% son endémicas [5],[6],[7]. Estas unidades ecológicas desempeñan funciones ecosistémicas críticas, tales como la provisión de hábitat, regulación climática local, captura de carbono (hasta 260 090 t CO₂-eq), almacenamiento hídrico en zonas áridas y estabilización del suelo, lo que resalta su relevancia estratégica para la conservación ambiental [8],[9].

Begonia octopetala constituye una especie endémica clave distribuida en los flancos occidentales de las lomas y yungas sudamericanas [6],[10]. Su amplio rango altitudinal (0–3527 m.s.n.m.) la posiciona como un bioindicador relevante del estado de conservación ecosistémico, permitiendo inferir respuestas ecológicas frente a perturbaciones naturales y antropogénicas [5],[11]. Esta especie presenta una alta dependencia de la humedad proveniente de la niebla, por lo que variaciones en este recurso afectan directamente su establecimiento, desarrollo y persistencia poblacional [12],[13]. No obstante, actualmente enfrenta un alto nivel de amenaza asociado a la pérdida y fragmentación de su hábitat, procesos intensificados por el cambio climático [5],[6]. Así pues, resulta necesario emplear herramientas que permitan evaluar estos impactos.

Los modelos de distribución de especies (MDE) se han consolidado como marcos analíticos fundamentales al permitir identificar áreas con condiciones ambientales adecuadas para el desarrollo biológico [14]. Sin embargo, la complejidad climática de las lomas costeras, caracterizada por la dinámica de advección de nieblas, introduce incertidumbres que limitan el desempeño de modelos individuales [15],[16]. En este contexto, el modelado por conjuntos (ensemble modeling), como un nuevo enfoque dentro de los MDE, emerge como una estrategia computacional robusta que integra múltiples algoritmos para generar predicciones más consistentes, reduciendo sesgos inherentes a cada técnica [15],[16].

Bajo este enfoque, el entorno estadístico del programa R permite la integración de modelos y el procesamiento de variables bioclimáticas bajo diferentes Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP) [17]. Estas trayectorias representan escenarios de desarrollo global que proyectan distintos niveles de emisiones de gases de efecto invernadero y forzamiento radiativo, abarcando desde condiciones de sostenibilidad (SSP1-2.6) hasta escenarios intensivos en carbono (SSP5-8.5) [17]. Su incorporación permite simular la respuesta del nicho ecológico frente a futuros climáticos contrastantes.

En este contexto, esta investigación tiene como objetivo evaluar el impacto del cambio climático al horizonte 2065 sobre la distribución potencial de *Begonia octopetala* en las lomas costeras del Perú mediante un enfoque de modelado por conjuntos [15] que integra los algoritmos MaxEnt, Random Forest, BIOCLIM y Modelos Lineales Generalizados (GLM)

(GLM) [17]. Este estudio genera evidencia cuantitativa y cartográfica orientada al diseño de estrategias de conservación adaptativa en ecosistemas altamente vulnerables.

II. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio corresponde a la franja costera del Perú, delimitada latitudinalmente desde el departamento de Tumbes hasta Tacna (Fig. 1), constituyendo el dominio geográfico para la modelación del nicho ecológico de *Begonia octopetala*. Esta región se caracteriza por condiciones climáticas áridas y semiáridas, cuya dinámica ambiental está fuertemente influenciada por la interacción entre la cordillera de los Andes y la corriente de Humboldt [7],[8],[9]. Esta configuración geográfica origina las lomas costeras, formaciones vegetales estacionales distribuidas entre los 100 y 1000 m s. n. m., cuya existencia depende de la condensación de nieblas provenientes del océano Pacífico [8],[9]. Dicha especificidad hídrica las convierte en ecosistemas altamente sensibles a variaciones climáticas.

En este contexto, tenemos a *Begonia octopetala*, especie cuya distribución, fenología y supervivencia están estrechamente condicionadas por los ciclos estacionales de humedad [5],[11]. Esta dependencia, delimita su nicho ecológico a espacios altamente restringidos, lo que incrementa su vulnerabilidad frente a perturbaciones ambientales y cambios en la dinámica climática regional.



Fig. 1. Mapa del área de estudio: región costera del Perú.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se fundamentó en registros de presencia de *Begonia octopetala* obtenidos de bases de datos

globales y literatura especializada, incluyendo Global Biodiversity Information Facility (GBIF), iNaturalist, Trópicos, el Herbario Virtual Austral Americano (HVAA) y la revisión taxonómica de Moonlight et al. [11]. A partir de estas fuentes, se compiló un total de 454 registros georreferenciados, los cuales fueron validados espacialmente mediante el software QGIS 3.44.3 para asegurar la consistencia y precisión de las coordenadas. Posteriormente, con el fin de mitigar sesgos de muestreo y autocorrelación espacial, se aplicó un proceso de rarefacción espacial (distancia mínima de 1 km), lo que redujo el conjunto a 95 puntos únicos, garantizando una sola observación por celda ambiental (1 km²) [18].

Para la simulación de la idoneidad del hábitat actual, se emplearon datos ambientales con resolución espacial de 30 segundos (~1 km²), correspondientes a 19 variables bioclimáticas del periodo 1970–2000, obtenidas de WorldClim versión 2.1 [19],[20]. Adicionalmente, se incorporaron variables topográficas de pendiente (slope) y orientación (aspect), derivadas a partir de modelos digitales de elevación, con el objetivo de capturar gradientes microambientales relevantes para la distribución de la especie.

Con el fin de evitar el sobreajuste del modelo, fenómeno en el cual el ajuste excesivo de los datos de entrenamiento conduce a la captura de ruido en lugar de patrones generales reduciendo su rendimiento, se evaluó la multicolinealidad de las 22 variables iniciales [18]. El análisis de la distribución de los datos determinó que solo una variable cumplía con la normalidad [18]. Por consiguiente, se aplicó el coeficiente de correlación de Spearman, identificando variables con alta colinealidad ($r_s > 0.8$) [21]. Tras este filtrado, se seleccionaron ocho variables predictoras (Tabla 1).

TABLA 1

VARIABLES PREDICTORAS APLICADAS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE *BEGONIA OCTOPETALA*

Variable	Descripción
BIO2	Intervalo medio diurno
BIO4	Temporalidad de la temperatura
BIO6	Temperatura mínima del mes más frío
BIO7	Rango de temperatura anual
BIO15	Estacionalidad de las precipitaciones
BIO16	Precipitación del ¼ anual más húmedo
Aspect	Orientación cardinal de la pendiente
Slope	Pendiente del terreno

Se implementó un enfoque de modelado por conjuntos (ensemble modeling) mediante la integración de los algoritmos MaxEnt, Random Forest, BIOCLIM y Modelos Lineales Generalizados (GLM), debido a que los ensambles incrementan la capacidad predictiva y reducen la incertidumbre asociada a modelos individuales [22]. Se ejecutaron diez iteraciones independientes por cada

algoritmo, generando un total de 40 modelos individuales posteriormente integrados en un esquema de ensamble para maximizar la robustez estadística del modelo final.

El algoritmo MaxEnt (v.3.4.3) fue ejecutado en R mediante el paquete dismo, empleando el 80% de los registros (76 puntos) para entrenamiento y el 20% (19 puntos) para validación. Se utilizaron 1000 puntos de fondo (background) y pseudoausencias, cantidad suficiente para representar la heterogeneidad ambiental del área de estudio sin introducir ruido que afecte la convergencia del modelo [23].

Por su parte, Random Forest se implementó mediante el paquete biomod2 en R, generando 1000 pseudoausencias a una distancia mínima de 5 km de los puntos de presencia real [24]. Este buffer espacial permite evitar la inclusión de condiciones ambientales similares a las áreas ocupadas, reduciendo el riesgo de falsos negativos y mejorando la discriminación del modelo [25].

El modelo BIOCLIM fue entrenado utilizando exclusivamente datos de presencia y variables seleccionadas, evaluando su desempeño con datos independientes [26]. Debido a su naturaleza de envolvente climática, este modelo delimita el nicho fundamental de la especie, aunque presenta tendencia a sobreestimar la idoneidad, la cual es corregida mediante el ensamble [27],[28].

El GLM fue configurado como un modelo de regresión con términos cuadráticos, permitiendo capturar relaciones no lineales entre las variables predictoras y la probabilidad de presencia [29]. Para evitar extrapolaciones irreales, se aplicaron restricciones en la fase de proyección, limitando la respuesta del modelo a rangos ambientalmente plausibles bajo los escenarios SSP1-2.6 y SSP5-8.5 [30]. La inclusión del GLM contribuye a estabilizar el ensamble al incorporar una aproximación paramétrica complementaria [17],[14].

La integración de estos algoritmos en un modelo de ensamble permite combinar enfoques determinísticos y estocásticos, reduciendo el sesgo individual y mejorando la robustez de las predicciones espaciales [31].

La evaluación del desempeño de los modelos se realizó mediante el Área Bajo la Curva (AUC) de la Característica Operativa del Receptor (ROC), una métrica que cuantifica la capacidad del modelo para discriminar entre condiciones ambientales asociadas a presencia y ausencia/pseudoausencia de la especie a lo largo de múltiples umbrales de clasificación [32]. Se consideraron aceptables valores de AUC superiores a 0.70 [33]. El modelo de ensamble final se construyó mediante un promedio ponderado basado en el rendimiento de cada algoritmo, utilizando la función de pesos $w = (AUC - 0.5)^2$, normalizada para que la suma total sea igual a 1, lo que penaliza modelos cercanos al azar y prioriza aquellos con mayor capacidad predictiva [34].

Se excluyeron del ensamble aquellos modelos con AUC inferior a 0.70 para garantizar la calidad de las predicciones [33]. En este estudio, todos los algoritmos superaron dicho umbral: Random Forest (0.9349), MaxEnt (0.9037), BIOCLIM (0.7839) y GLM (0.7627).

Para la proyección futura de la distribución potencial al año 2065, se utilizaron datos climáticos del proyecto CMIP6 [18],[21], considerando los escenarios SSP1-2.6 y SSP5-8.5, que representan distintas trayectorias de emisiones de gases de efecto invernadero y forzamiento radiativo. En este contexto, el escenario SSP1-2.6 se asocia a un incremento aproximado de 1.5–2 °C en la temperatura media global, mientras que SSP5-8.5 proyecta aumentos superiores a 4 °C hacia finales de siglo, según el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), junto con tres Modelos de Circulación Global (GCM): ACCESS-CM2, CMCC-ESM2 y MIROC6 [21]. Los datos correspondientes al periodo 2061–2080 fueron obtenidos de WorldClim 2.1 con resolución de 30 segundos [35].

El uso de este intervalo temporal responde a la representación estándar de condiciones de mediados de siglo, lo que permite reducir la variabilidad interanual y obtener proyecciones climáticas más estables [36].

Se implementó un control riguroso de extrapolación en todos los algoritmos del ensamble para evitar predicciones fuera del rango ambiental observado [37]. En MaxEnt se utilizó la técnica de clamping, mientras que BIOCLIM restringe intrínsecamente la idoneidad a su rango climático. Random Forest limita sus predicciones por la estructura de árboles de decisión, evitando extrapolaciones fuera del dominio de entrenamiento [38].

Finalmente, los resultados fueron procesados en R para su estandarización y posteriormente exportados a QGIS 3.44.3 para análisis espacial, recorte del área de estudio y cálculo de superficies [19],[20]. Los mapas de idoneidad se reclasificaron en cuatro categorías (0–0.25, 0.25–0.50, 0.50–0.75 y 0.75–1) mediante intervalos iguales, con el fin de facilitar la interpretación cartográfica y su aplicación en estrategias de conservación.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo final se fundamentó en una muestra depurada de 95 registros únicos, cuya distribución espacial homogénea permitió capturar con precisión los gradientes ambientales reales de la especie y evitar sobreestimaciones por sesgos de agregación [39],[40].

La distribución final de los puntos evidencia una dispersión espacial homogénea, lo que valida la efectividad del proceso de depuración y garantiza una representación robusta del nicho ecológico sin sesgos de agregación [15]. Asimismo, la integración de 40 modelos individuales permitió alcanzar la estabilidad predictiva necesaria para reducir la variabilidad por partición aleatoria de datos, minimizando la incertidumbre

inherente a los modelos individuales [41].

El desempeño de los modelos fue clasificado entre bueno y excelente según métricas complementarias (AUC, TSS y CBI), evidenciando una mayor capacidad predictiva de los enfoques de aprendizaje automático para capturar relaciones no lineales en comparación con modelos estadísticos tradicionales. Random Forest alcanzó un AUC de 0.9349 y un TSS de 0.8040, mientras que MaxEnt obtuvo un AUC de 0.9037 y un TSS de 0.7989. En contraste, BIOCLIM registró un AUC de 0.7839 y un índice de Boyce de 0.666, y GLM un AUC de 0.7627 con TSS de 0.4223. La incorporación de métricas como TSS y CBI permitió corregir las limitaciones del AUC en modelos de presencia únicamente, reduciendo el sesgo por autocorrelación espacial y evitando interpretaciones sobreoptimistas del desempeño [42],[43].

El modelo de distribución actual (Fig. 2) evidencia un nicho ecológico altamente restringido, dominado por áreas de idoneidad media (1280.09 km²) y baja (1134.71 km²), mientras que las zonas de alta idoneidad (74.71 km²) son marginales y espacialmente fragmentadas. Este patrón sugiere una alta dependencia de condiciones ambientales específicas, lo que limita la amplitud del nicho ecológico de la especie [3]. Asimismo, la concentración de áreas óptimas en regiones como Lima, Huancavelica y Áncash sugiere una fuerte dependencia de condiciones microclimáticas locales.

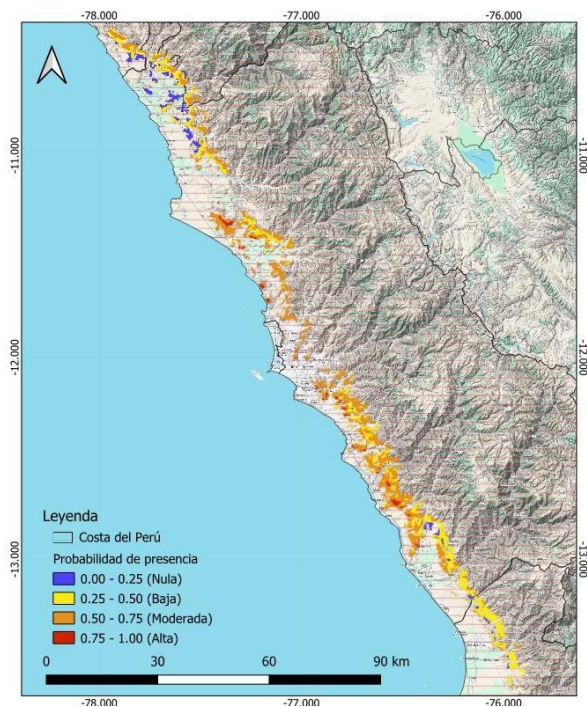


Fig. 2. Mapa de distribución actual de *Begonia octopetala* en la costa peruana

Esta fragmentación implica una baja resiliencia ecológica, ya que la predominancia de idoneidad media limita la capacidad de respuesta frente a perturbaciones ambientales [10],[6]. La especialización ecológica observada es consistente con patrones descritos en especies endémicas de zonas áridas con nichos estrechos, las cuales presentan alta sensibilidad a variaciones térmicas y disponibilidad hídrica [44]. Asimismo, estudios comparables reportan que más del 70% del hábitat potencial se concentra en categorías intermedias de idoneidad, con áreas óptimas reducidas y fragmentadas, lo que incrementa la vulnerabilidad frente a cambios climáticos moderados [45].

Desde una perspectiva metodológica, la resolución espacial de 1 km² de WorldClim introduce limitaciones relevantes en ecosistemas de lomas. La dinámica hídrica de estos sistemas depende de procesos de advección de niebla a escala sub-kilométrica, lo que implica que la interpolación climática puede subestimar la heterogeneidad microclimática. En este contexto, la estacionalidad de la precipitación (Bio15) se emplea como proxy funcional de la disponibilidad hídrica [35],[46]. Sin embargo, esta aproximación debe interpretarse con cautela, dado que la humedad en lomas costeras está dominada por la condensación de niebla, proceso no representado explícitamente en las variables climáticas [3],[47]. Estudios recientes confirman que estas formaciones funcionan como “oasis de niebla”, activados estacionalmente entre 200–800 msnm, lo que refuerza la dependencia de variables atmosféricas no capturadas directamente en los GCM [48].

Las proyecciones hacia 2065 evidencian una contracción drástica del nicho ecológico, con desaparición total del hábitat idóneo bajo el escenario SSP5-8.5 (Fig. 4). Este proceso se cuantifica en la expansión de áreas no aptas desde 958.72 km² (SSP1-2.6) hasta 1744.42 km² (SSP5-8.5), acompañado de una reducción significativa de las categorías de idoneidad media (323.09 km² a 64.38 km²) y baja (1549.61 km² a 1035.85 km²). Este patrón indica un incremento en la vulnerabilidad de la especie frente a escenarios de calentamiento global, al evidenciar una reducción generalizada de las condiciones ambientales adecuadas para su persistencia.

La robustez de estas proyecciones se sustenta en el control de extrapolación aplicado en los algoritmos del ensamble, lo que garantiza que la desaparición del hábitat no es un artefacto matemático, sino una respuesta consistente a la pérdida de microclimas adecuados [49]. El uso del periodo 2061–2080 como aproximación a condiciones de mediados de siglo es coherente con prácticas estándar en modelamiento climático, permitiendo interpretar los resultados como escenarios de cambio a mediano plazo.

Un hallazgo clave es la relación entre la estacionalidad de la precipitación (Bio15) y la contracción del hábitat, lo cual confirma la dependencia crítica de *B. octopetala* de los ciclos de humedad [5],[8]. Este comportamiento valida que la

disponibilidad hídrica, mediada por la dinámica de niebla, constituye el principal factor limitante del nicho ecológico [7]. Bajo escenarios de calentamiento, se observa un proceso de “estrujamiento térmico”, en el cual las condiciones óptimas se desplazan altitudinalmente; sin embargo, estas nuevas zonas presentan limitaciones edáficas y geomorfológicas que restringen la colonización efectiva [7].

La reducción de áreas de alta idoneidad es particularmente crítica: apenas 13.23 km² en SSP1-2.6 (~1.8°C de calentamiento) y completamente ausente en SSP5-8.5 (>4.4°C de calentamiento). En todos los escenarios futuros, la distribución queda dominada por valores bajos de idoneidad (0–0.50), concentrándose en SSP5-8.5 en la categoría más desfavorable (0–0.25). Este patrón es consistente con proyecciones CMIP6 (revalidadas por el IPCC), que indican un incremento del índice de aridez en regiones áridas, incluso bajo escenarios de bajas emisiones, debido a la reducción de precipitación efectiva y el aumento de la evapotranspiración [50].

Finalmente, la persistencia limitada observada únicamente en SSP1-2.6 evidencia que los esfuerzos de mitigación global son determinantes para la conservación de la especie. No obstante, incluso bajo este umbral de calentamiento moderado, la fragmentación del hábitat sugiere que las áreas naturales protegidas actuales podrían resultar insuficientes frente al desplazamiento del nicho, lo que implica la necesidad de estrategias dinámicas de conservación basadas en refugios climáticos [51].

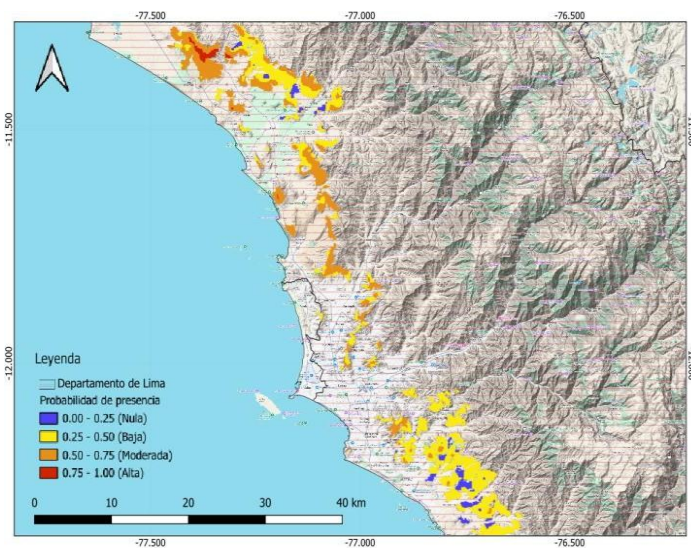


Fig. 3. Distribución al 2065 de *Begonia octopetala* bajo el escenario climático SSP1-2.6

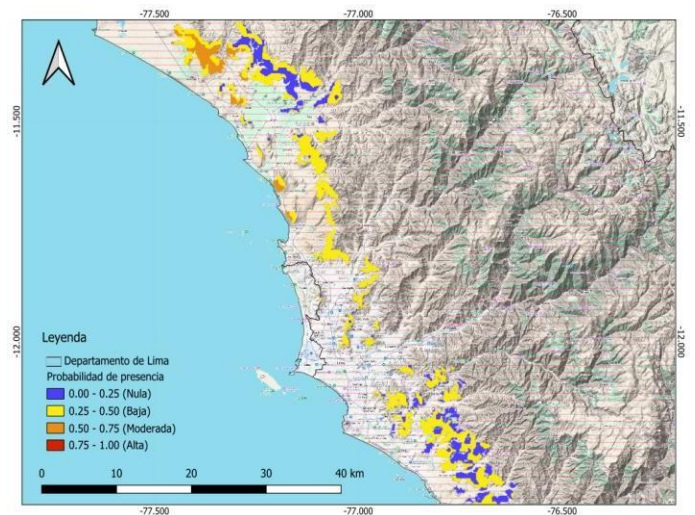


Fig. 4. Distribución al 2065 de *Begonia octopetala* bajo el escenario climático SSP5-8.5

V. CONCLUSIONES

El modelado por conjuntos aplicado a *Begonia octopetala* permitió caracterizar de manera robusta el nicho ecológico actual y proyectar su respuesta frente a escenarios de cambio climático al horizonte 2065, proporcionando una estimación confiable de la idoneidad del hábitat.

La distribución actual de la especie se presenta altamente restringida y fragmentada, con predominio de áreas de idoneidad media y baja, lo que refleja una fuerte dependencia de condiciones microclimáticas específicas y una limitada resiliencia frente a perturbaciones ambientales.

Las proyecciones climáticas evidencian una contracción significativa del nicho ecológico en todos los escenarios evaluados, siendo crítica bajo SSP5-8.5, donde se proyecta la desaparición de áreas de alta idoneidad. Incluso bajo un escenario de mitigación (SSP1-2.6), la persistencia del hábitat resulta limitada y fragmentada, lo que compromete la estabilidad futura de las poblaciones.

La estacionalidad de la precipitación (Bio15) se identificó como una de las variables más influyentes en la distribución de la especie, confirmando la dependencia funcional de *B. octopetala* respecto a la dinámica de humedad asociada a la advección de niebla, particularmente en escenarios de incremento térmico y cambios en la disponibilidad hídrica.

El desplazamiento altitudinal del nicho proyectado refleja un proceso de “estrujamiento térmico” que restringe progresivamente las condiciones ambientales adecuadas y limita la capacidad de adaptación y colonización de *Begonia octopetala* frente al cambio climático.

Desde una perspectiva aplicada, los resultados indican que las actuales estrategias de conservación podrían ser insuficientes frente a los cambios proyectados. En este contexto, se hace necesario incorporar enfoques dinámicos de gestión basados en la identificación de refugios climáticos, priorización de áreas críticas y planificación adaptativa que considere escenarios futuros de cambio climático.

Este estudio aporta evidencia cuantitativa relevante para la gestión y conservación de ecosistemas de lomas costeras, destacando la urgencia de implementar medidas de mitigación y adaptación que permitan preservar tanto las especies como los servicios ecosistémicos asociados.

VI. RECOMENDACIONES

Se recomienda priorizar la identificación, delimitación y protección de refugios climáticos dentro del ecosistema de lomas costeras, especialmente en aquellas áreas que mantienen condiciones de idoneidad bajo el escenario SSP1-2.6, dado su potencial para sostener poblaciones remanentes de *Begonia octopetala* en escenarios futuros.

Asimismo, es necesario incorporar variables microclimáticas de mayor resolución espacial, particularmente aquellas asociadas a la dinámica de la niebla, con el fin de mejorar la precisión de los modelos de distribución en estos ecosistemas. Este enfoque debe complementarse con estudios de campo orientados a validar las proyecciones, incluyendo monitoreo fenológico y evaluación de la respuesta de la especie frente a variaciones térmicas e hídricas.

Finalmente, se sugiere que futuras investigaciones integren variables edáficas y geomorfológicas, así como interacciones bióticas, con el fin de avanzar hacia modelos de nicho ecológico más integrales que representen de manera más realista las restricciones ecológicas de la especie.

VII. AGRADECIMIENTO

Agradecemos a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC) por el apoyo institucional brindado para el desarrollo de la presente investigación.

Asimismo, se reconoce el aporte de las plataformas Global Biodiversity Information Facility (GBIF), iNaturalist, Trópicos y el Herbario Virtual Austral Americano (HVAA), cuyas bases de datos permitieron la recopilación de información fundamental para el modelamiento de la especie.

Asimismo, extendemos un reconocimiento especial a la iniciativa de MapBiomias cuya valiosa base de datos fue una herramienta clave para entender la dinámica de los ecosistemas estudiados. Finalmente, agradecemos a todas las personas y organizaciones dedicadas a la conservación de las lomas costeras del Perú, cuya labor inspira la búsqueda de soluciones tecnológicas frente a la crisis climática actual.

REFERENCIAS

- [1] P. Díaz Martínez, "Efecto del cambio climático y de la intensificación por pastoreo sobre el carbono del suelo de los ecosistemas áridos," Tesis Doctoral, Dept. Biol. y Geol., Fis. y Quím. Inorg., Univ. Rey Juan Carlos, Móstoles, España, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/10115/22308>.
- [2] K. Abbass, M. Z. Qasim, H. Song, M. Murshed, H. Mahmood e I. Younis, "A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 29, pp. 42539–42559, 2022, doi: 10.1007/s11356-022-19718-6.
- [3] F. N. Gonzales, D. Craven y J. J. Armesto, "Islands in the mist: A

- systematic review of the coastal lomas of South America," *J. Arid Environ.*, vol. 211, art. n.º 104942, abr. 2023, doi: 10.1016/j.jaridenv.2023.104942.
- [4] H. Y. Gan et al., "The hidden oases: unveiling trophic dynamics in Namib's fog plant ecosystem," *Sci. Rep.*, vol. 14, art. n.º 13334, jun. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-61796-8.
- [5] A. Ampuero, F. Rivera, S. Olórtgui y C. Martel, "Feeding behaviour and food preferences of native and introduced snail species from the Lomas formations, threatened seasonal fog oases," *Pedobiologia*, vols. 99–100, art. n.º 150893, sept. 2023, doi: 10.1016/j.pedobi.2023.150893.
- [6] D. I. Flood Chávez y P. Niewiadomski, "The urban political ecology of fog oases in Lima, Peru," *Geoforum*, vol. 129, pp. 1–12, feb. 2022, doi: 10.1016/j.geoforum.2022.01.001.
- [7] J. Moat et al., "Seeing through the clouds – Mapping desert fog oasis ecosystems using 20 years of MODIS imagery over Peru and Chile," *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, vol. 103, art. n.º 102468, oct. 2021, doi: 10.1016/j.jag.2021.102468.
- [8] A. Bravo, V. Llactayo y M. Quilca, "Apéndice - Lomas Costeras (Tema transversal en Colección 3): Documento de Base Teórica del Algoritmo (ATBD)," MapBiomias Perú, Versión Beta, jun. 2025. [En línea]. Disponible en: https://peru.mapbiomas.org/wp-content/uploads/sites/14/2025/06/5_ATBD-Lomas.pdf. [Accedido: abr. 28, 2026].
- [9] Sistema Metropolitano de Información Ambiental (SMIA), "La importancia de nuestras lomas de Lima," Novedades - Munlima, s. f. [En línea]. Disponible en: <https://smia.munlima.gob.pe/novedades/la-importancia-de-nuestras-lomas-de-lima>. [Accedido: abr. 28, 2026].
- [10] M. Lleellish, J. Odar y H. Trinidad, Guía de Flora de las Lomas de Lima, Lima, Perú: Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR), 2015. [En línea]. Disponible en: https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1268950/guia_flora_lomas_lima_2015.pdf?v=1598649627. [Accedido: abr. 28, 2026].
- [11] P. W. Moonlight et al., "The genus *Begonia* (Begoniaceae) in Peru," *Eur. J. Taxon.*, vol. 881, pp. 1–334, jul. 2023, doi: 10.5852/ejt.2023.881.2175.
- [12] C. Tovar et al., "Species distribution modeling of the Peruvian lomas: a multi-model approach," *Stochastic Environ. Res. Risk Assess.*, vol. 32, n.º 8, pp. 2283–2301, ago. 2018, doi: 10.1007/s00477-018-1548-7.
- [13] L. Buisson, W. Thuiller, N. Casajus, S. Lek y G. Grenouillet, "Uncertainty in ensemble forecasting of species distribution," *Glob. Change Biol.*, vol. 16, n.º 4, pp. 1145–1157, abr. 2010, doi: 10.1111/j.1365-2486.2009.02000.x.
- [14] W. Thuiller, "Editorial commentary on 'BIOMOD – optimizing predictions of species distributions and predicting potential future shifts under global change,'" *Glob. Change Biol.*, vol. 20, pp. 3591–3592, 2014, doi: 10.1111/gcb.12728.
- [15] M. B. Araújo y M. New, "Ensemble forecasting of species distributions," *Trends Ecol. Evol.*, vol. 22, n.º 1, pp. 42–47, ene. 2007, doi: 10.1016/j.tree.2006.09.010.
- [16] M. Marmion, M. Parviainen, M. Luoto, R. K. Heikkinen y W. Thuiller, "Evaluation of consensus methods in predictive species distribution modelling," *Divers. Distrib.*, vol. 15, n.º 1, pp. 59–69, ene. 2009, doi: 10.1111/j.1472-4642.2008.00491.x.
- [17] W. Thuiller, B. Lafourcade, R. Engler y M. B. Araújo, "BIOMOD – a platform for ensemble forecasting of species distributions," *Ecography*, vol. 32, n.º 3, pp. 369–373, jun. 2009, doi: 10.1111/j.1600-0587.2008.05742.x.
- [18] X. Li, Z. Wang, S. Wang y Z. Qian, "MaxEnt and Marxan modeling to predict the potential habitat and priority planting areas of *Coffea arabica* in Yunnan, China under climate change scenario," *Front. Plant Sci.*, vol. 15, art. n.º 1471653, nov. 2024, doi: 10.3389/fpls.2024.1471653.
- [19] S. Radbouchoum, M. D. delos Angeles, B. K. Ngarega, T. Phutthai y H. Schneider, "Forecasting habitat suitability of tropical karst plants in a warmer world — Thailand's *Begonia* diversity as a key example," *Front. Plant Sci.*, vol. 16, art. n.º 1496040, abr. 2025, doi: 10.3389/fpls.2025.1496040.

- [20] X. Wang, Z. Li, L. Zhang, Y. Wang, Y. Liu y Y. Ma, "The optimized Maxent model reveals the pattern of distribution and changes in the suitable cultivation areas for *Reaumuria songarica* being driven by climate change," *Ecol. Evol.*, vol. 14, n.º 7, art. n.º e70015, jul. 2024, doi: 10.1002/ece3.70015.
- [21] R. Jiang et al., "Modeling of the potential geographical distribution of three *Fritillaria* species under climate change," *Front. Plant Sci.*, vol. 12, art. n.º 749838, ene. 2022, doi: 10.3389/fpls.2021.749838.
- [22] R. Valavi, G. Guillera-Aroita, J. J. Lahoz-Monfort y J. Elith, "Predictive performance of presence-only species distribution models: a benchmark study with reproducible code," *Ecol. Monogr.*, vol. 92, n.º 1, art. n.º e01486, feb. 2022, doi: 10.1002/ecm.1486.
- [23] L. B. Croft, S. R. Archer y J. L. von Maltitz, "Predicting the Distribution of a Threatened Plant Species (*Thesium australe*) Using Maxent: Implications for Management and Conservation," *PLOS ONE*, vol. 8, n.º 8, p. e71218, ago. 2013, doi: 10.1371/journal.pone.0071218.
- [24] M. L. Forister, L. A. Dyer, M. S. Singer, J. O. Stireman III y J. T. Lill, "Revisiting the evolution of ecological specialization, with emphasis on insect-plant interactions," *Ecology*, vol. 93, n.º 5, pp. 981–991, may. 2012, doi: 10.1890/11-0650.1.
- [25] H.-T. Zhang y W.-T. Wang, "Prediction of the Potential Distribution of the Endangered Species *Meconopsis punicea* Maxim. under Future Climate Change Based on Four Species Distribution Models," *Plants*, vol. 12, n.º 6, art. n.º 1376, mar. 2023, doi: 10.3390/plants12061376.
- [26] S. Ali, M. Umair, T. A. Makanda, S. Shi, S. A. Hussain y J. Ni, "Modeling Current and Future Potential Land Distribution Dynamics of Wheat, Rice, and Maize under Climate Change Scenarios Using MaxEnt," *Land*, vol. 13, n.º 8, art. n.º 1156, jul. 2024, doi: 10.3390/land13081156.
- [27] C. Xie, L. Chen, M. Li, C. Y. Jim y D. Liu, "BIOCLIM Modeling for Predicting Suitable Habitat for Endangered Tree *Tapiscia sinensis* (Tapisciaceae) in China," *Forests*, vol. 14, n.º 11, art. n.º 2275, nov. 2023, doi: 10.3390/f14112275.
- [28] S. Xie et al., "Predicting the Potential Distribution of the Endangered Plant *Eucommia ulmoides* in China under the Background of Climate Change," *Sustainability*, vol. 15, no. 6, art. n.º 5349, mar. 2023, doi: 10.3390/su15065349.
- [29] P. G. Bhaskaran et al., "Revisiting current distribution and future habitat suitability models for the endemic Malabar Tree Toad (*Pedostibes tuberculosus*) using citizen science data," *Sci. Rep.*, vol. 14, art. n.º 18856, ago. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-60785-1.
- [30] F. Shabani, L. Kumar y M. Ahmadi, "A comparison of absolute performance of different correlative and mechanistic species distribution models in an independent area," *Ecol. Evol.*, vol. 6, n.º 16, pp. 5973–5986, ago. 2016, doi: 10.1002/ece3.2332.
- [31] H. R. Sofaer et al., "Development and Delivery of Species Distribution Models for Conservation and Management," *BioScience*, vol. 69, n.º 7, pp. 544–557, jul. 2019, doi: 10.1093/biosci/biz045.
- [32] T. Fawcett, "ROC Graphs: Notes and Practical Considerations for Researchers," *HP Laboratories, Palo Alto, CA, USA, Tech. Rep.*, mar. 2004.
- [33] S. Ali, M. Umair, T. A. Makanda, S. Shi, S. A. Hussain y J. Ni, "Modeling Current and Future Potential Land Distribution Dynamics of Wheat, Rice, and Maize under Climate Change Scenarios Using MaxEnt," *Land*, vol. 13, n.º 8, art. n.º 1156, jul. 2024, doi: 10.3390/land13081156.
- [34] M. Marmion, M. Parviainen, M. Luoto, R. K. Heikkinen y W. Thuiller, "Evaluation of consensus methods in predictive species distribution modelling," *Divers. Distrib.*, vol. 15, n.º 1, pp. 59–69, ene. 2009, doi: 10.1111/j.1472-4642.2008.00491.x.
- [35] S. E. Fick y R. J. Hijmans, "WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas," *Int. J. Climatol.*, vol. 37, n.º 12, pp. 4302–4315, oct. 2017, doi: 10.1002/joc.5086.
- [36] K. Hilal, "Projected CMIP6 temperature changes over Sudan under SSP2-4.5 and SSP5-8.5 for mid- and late-21st century," *Meteorol. Hydrol. Water Manage.*, vol. 14, art. n.º 217736, feb. 2026, doi: 10.26491/mhwm/217736.
- [37] F. Shabani, L. Kumar y M. Ahmadi, "A comparison of absolute performance of different correlative and mechanistic species distribution models in an independent area," *Ecol. Evol.*, vol. 6, n.º 16, pp. 5973–5986, ago. 2016, doi: 10.1002/ece3.2332.
- [38] Y. Luo, J. Yang, L. Liu y K. Zhang, "MaxEnt Modeling and Effects of Climate Change on Shifts in Habitat Suitability for *Sorbus alnifolia* in China," *Plants*, vol. 14, n.º 5, art. n.º 677, feb. 2025, doi: 10.3390/plants14050677.
- [39] M. E. Aiello-Lammens, R. A. Boria, A. Radosavljevic, B. Vilela y R. P. Anderson, "spThin: an R package for spatial thinning of species occurrence records for use in ecological niche models," *Ecography*, vol. 38, n.º 5, pp. 541–545, may. 2015, doi: 10.1111/ecog.01132.
- [40] A. I. Monterroso-Rivas, J. D. Gómez-Díaz, y M. L. Toledo-Medrano, "Modelling the potential distribution of *Pinus patula* Schl. et Cham. in Mexico," *Rev. Chapingo Ser. Cienc. For. Ambiente*, vol. 20, n.º 1, pp. 87–101, abr. 2014, doi: 10.5154/r.chscfa.2013.09.034.
- [41] J. A. Sarquis, M. A. Cristaldi, V. Arzamendia, G. Bellini y A. R. Giraudo, "Species distribution models and empirical test: Comparing predictions with well-understood geographical distribution of *Bothrops alternatus* in Argentina," *Ecol. Evol.*, vol. 8, n.º 21, pp. 10497–10509, oct. 2018, doi: 10.1002/ece3.4517.
- [42] O. Allouche, A. Tsoar y R. Kadmon, "Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS)," *J. Appl. Ecol.*, vol. 43, n.º 6, pp. 1223–1232, dic. 2006, doi: 10.1111/j.1365-2664.2006.01214.x.
- [43] R. J. Hijmans y C. H. Graham, "The ability of models to predict the spatial distribution of species is influenced by the size of the species range," *Glob. Ecol. Biogeogr.*, vol. 17, n.º 3, pp. 263–273, may. 2008, doi: 10.1111/j.1466-8238.2007.00358.x.
- [44] J. Calvo-Cubero, C. Ibáñez, A. Rovira, P. J. Sharpe y E. Reyes, "Changes in water and soil metals in a Mediterranean restored marsh subject to different water management schemes," *Restor. Ecol.*, vol. 24, n.º 2, pp. 248–258, mar. 2016, doi: 10.1111/rec.12305.
- [45] Q. Huang et al., "Predicting the geographical distribution and niche characteristics of *Cotoneaster multiflorus* based on future climate change," *Front. Plant Sci.*, vol. 15, art. n.º 1360190, may. 2024, doi: 10.3389/fpls.2024.1360190.
- [46] R. Pinto, I. Barria y J. J. Marquet, "Spatial and temporal distribution of vegetation in the lomas system of the Atacama Desert, northern Chile," *J. Arid Environ.*, vol. 65, n.º 4, pp. 541–558, jun. 2006, doi: 10.1016/j.jaridenv.2005.10.015.
- [47] M. O. Dillon, "The Atacama and Peruvian Deserts: Phytogeography of the Lomas Formations," *Aliso: A Journal of Systematic and Evolutionary Botany*, vol. 13, n.º 1, pp. 1–31, may. 1991, doi: 10.5642/aliso.19911301.02.
- [48] V. Caballero-García, M. O. Dillon, y G. Pino, "Potential distribution of the endemic plant *Nolana adutii* (Solanaceae) in the coastal desert of Peru under climate change scenarios," *J. Arid Environ.*, vol. 211, art. n.º 104942, abr. 2023, doi: 10.1016/j.jaridenv.2023.104942.
- [49] V. Caballero-García, M. O. Dillon, y G. Pino, "Potential distribution of the endemic plant *Nolana adutii* (Solanaceae) in the coastal desert of Peru under climate change scenarios," *J. Arid Environ.*, vol. 211, art. n.º 104942, abr. 2023, doi: 10.1016/j.jaridenv.2023.104942.
- [50] R. J. Bravo-Sánchez, J. L. García-Arostegui, C. Kohfahl, y F. J. Alcalá, "Assessing the impact of climate change on groundwater recharge and levels of a coastal aquifer in the semi-arid region of Peru," *J. Hydrol. Reg. Stud.*, vol. 51, art. n.º 101661, feb. 2024, doi: 10.1016/j.ejrh.2024.101661.
- [51] P. Ghosh, A. Mukhopadhyay, A. Chanda, P. Mondal, A. Akhand, S. Mukherjee, S. Nayak, S. Ghosh, D. Mitra, T. Ghosh y S. Hazra, P., "Application of Cellular automata and Markov-chain model in geospatial environmental modeling- A review," *Remote Sens. Appl. Soc. Environ.*, vol. 5, pp. 64–77, ene. 2017, doi: 10.1016/j.rsase.2017.01.005.