

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HUANTA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y GESTIÓN

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL



TESIS

Identificación de áreas potenciales de conservación de la especie *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. en el Perú

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

Ingeniero en Gestión Ambiental

LINEA DE INVESTIGACIÓN:

Ciencias Naturales – Biología - Ecología

AUTOR:

Landeo Atmi, Luis Fernando

ASESOR:

Dra. Karina Milagros Ordoñez Ruiz

HUANTA – PERÚ

2025

NOMBRE DEL TRABAJO

IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS POTENCIALES DE CONSERVACIÓN DE LA ESPECIE *Escallonia resinosa* RUIZ & PAV. EN EL PERÚ

AUTOR

Luis Fernando Landeo Atmi

RECUENTO DE PALABRAS

21985 Words

RECUENTO DE CARACTERES

126004 Characters

RECUENTO DE PÁGINAS

113 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

6.4MB

FECHA DE ENTREGA

Sep 16, 2025 6:08 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Sep 16, 2025 6:10 PM GMT-5

● 5% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 4% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 3% Base de datos de trabajos entregados
- 2% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 10 palabras)

 UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE BUCARIA
Dra. Karina Milagros Ordoñez Ruiz
DOCENTE ORDINARIO - PRINCIPAL

**“IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS POTENCIALES DE CONSERVACIÓN DE LA
ESPECIE *Escallonia resinosa* RUIZ & PAV. EN EL PERÚ”**

AUTOR:

Bach. Luis Fernando Landeo Atmi

ASESOR:

Dra. Karina Milagros Ordoñez Ruiz



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HUANTA
Creada por Ley N° 29658

FACULTAD DE INGENIERÍA Y GESTIÓN
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL

"AÑO DE LA RECUPERACIÓN Y CONSOLIDACIÓN DE LA ECONOMÍA PERUANA"

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO EN GESTIÓN AMBIENTAL**

En ciudad de Luricocha, en el auditorio de las Instalaciones del campus universitario de Intay de la Universidad Nacional Autónoma de Huanta, ubicado en la autopista Carlos Ch. Hiraoka, desvió a Ccollana, a los 07 días del mes de octubre de 2025, siendo las 10:00 am. se dio inicio al acto académico de sustentación de tesis con la presencia de los miembros del jurado calificador:

Ph.D. Walter Víctor Castro Aponte
Mtro. Efraín Suelli Montañez
Dra. Karina Milagros Ordoñez Ruiz

Presidente
Miembro titular 2
Miembro titular 3

Acto seguido se procedió a dar lectura la Resolución de Vicepresidencia Académica N° 086-2025-CO-UNAH, en la que señala fecha, hora y designación de jurado evaluador para la sustentación de tesis del **Bach. Luis Fernando Landeo Atmi**, con la tesis titulada: "**Identificación de áreas potenciales de conservación de la especie *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. en el Perú**", asesorado por la Dra. Karina Milagros Ordoñez Ruiz, para optar el Título profesional de: Ingeniero en Gestión Ambiental.

Observaciones:


NINGUNO

Terminada la sustentación se procedió a la formulación de preguntas por los miembros del jurado evaluador, los mismos que fueron defendidos y absueltos por el tesista. Acto seguido se procedió a calificar con el resultado siguiente:


Aprobado Regular	()
Aprobado Bueno	()
Aprobado Muy Buenos	(X)
Aprobado Excelente	()

Con la calificación de Dieciseis..... (16)

Siendo las 12:00 PM... se da por finalizada el acto académico de sustentación de tesis pasando a firmar los miembros del jurado evaluador.


.....
Ph.D. Walter Víctor Castro Aponte
PRESIDENTE


.....
Mtro. Efraín Suelli Montañez
MIEMBRO TITULAR 2


.....
Dra. Karina Milagros Ordoñez Ruiz
MIEMBRO TITULAR 3

DEDICATORIA

A Dios, por sobre todas las cosas, fuente de vida, fortaleza y sabiduría; por iluminar mi camino en cada momento de incertidumbre y darme la fuerza necesaria para culminar esta etapa tan importante en mi vida académica y personal.

A mis padres, Clemente y Dora, pilares fundamentales en mi vida, por su amor incondicional y sacrificio constante. Gracias por enseñarme con su ejemplo el valor del esfuerzo, la humildad y la perseverancia.

A mis hermanos, Miguel Ángel y Julio César, por su comprensión y paciencia. Este logro es también suyo, pues cada paso en mi formación ha estado sostenido por su apoyo y confianza.

Para ti, mi inspiración y dedicación. Porque en tu mirada encontré la fuerza para continuar y en tu esencia la certeza de que todo valía la pena. Como vos y yo, nunca jamás...

A mí, por resistir, creer y seguir; porque en cada caída descubrí la fuerza de volver a empezar.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi más profundo agradecimiento a la Universidad Nacional Autónoma de Huanta, institución que me brindó la oportunidad de formarme profesionalmente y de desarrollar esta investigación. Gracias a su compromiso con la educación superior y a la dedicación de sus docentes, encontré el respaldo académico y científico necesario para llevar a cabo este trabajo.

Agradezco al Fondo de Desarrollo Socioeconómico del Proyecto Camisea (FOCAM) por el apoyo financiero brindado, el cual hizo posible el desarrollo de esta investigación.

De manera especial, expreso mi profundo agradecimiento al Dr. Paolo Ramoni Perazzi, quien me asesoró a lo largo de toda la tesis, aportando con generosidad su amplio conocimiento, experiencia y compromiso. Su guía constante, sus orientaciones académicas y su apoyo incondicional fueron esenciales para el desarrollo de este trabajo de investigación, constituyéndose en un pilar fundamental para la culminación de mi formación profesional.

Asimismo, extiendo mi sincero agradecimiento al Dr. Marco Aurelio Arizapana Almonacid, por el apoyo brindado durante el proceso de investigación. Sus observaciones, sugerencias y acompañamiento académico contribuyeron a enriquecer el presente trabajo, orientándome a mejorar la calidad y el rigor científico de la tesis.

Agradezco también a la Dra. Karina Milagros Ordoñez Ruiz, por su orientación y apoyo en la etapa final de esta investigación.

De manera muy especial, quiero expresar mi gratitud a Alba Milagros Urbano Najarro, mi compañera de vida, cuyo apoyo constante, dedicación y sacrificio fueron la fuerza que me sostuvo en este camino. Su paciencia, amor y aliento incondicional hicieron posible que culminara esta etapa tan importante; sin ella, este logro no habría sido posible.

Extiendo también mi agradecimiento a mis amigos de la universidad, Paolo Medina, Cristian Quispe y Marco Antonio Quispe, quienes me brindaron su apoyo, compañerismo y palabras de aliento durante esta etapa. Su amistad y motivación hicieron más llevadero este proceso académico y personal.

Finalmente, agradezco a mi familia, por su amor incondicional y por ser el motor que me impulsó a seguir adelante con perseverancia y esfuerzo hasta alcanzar este objetivo.

RESUMEN

Escallonia resinosa Ruiz & Pav. es una especie nativa de los Andes peruanos con importante valor ecológico, especialmente en la estabilización de laderas, protección de suelos y provisión de servicios ecosistémicos. A pesar de su relevancia ambiental, la pérdida acelerada de cobertura vegetal altoandina ha reducido considerablemente su área de distribución. En este contexto, el modelado de nicho ecológico se ha convertido en una herramienta efectiva para determinar zonas prioritarias de conservación, permitiendo una evaluación basada en datos ambientales y espaciales. Sin embargo, no se habían identificado hasta el momento las áreas potenciales de conservación de esta especie a escala nacional integrando factores ecológicos y presión antrópica. Por lo tanto, el objetivo del presente estudio fue determinar las zonas idóneas para la conservación de *E. resinosa* en el Perú mediante el modelado de nicho ecológico con MaxEnt optimizado por ENMeval, incorporando componentes climáticos, topográficos, edáficos, geológicos y de huella humana.

Métodos: Se utilizó un total de 44 registros de presencia depurados que abarca los Andes peruanos. Los factores ambientales fueron transformados mediante análisis de componentes principales (PCA) y evaluadas por su independencia espacial. El modelo óptimo se obtuvo con la configuración fc.LQP_rm.3. Se generaron mapas continuos y binarios de idoneidad, y se clasificó la superficie según tres categorías de manejo: conservación, restauración y mitigación, con base en el índice de huella humana (HFI).

Resultados: El modelo predijo una distribución potencial fragmentada a lo largo de los Andes centrales y meridionales del Perú, con mayor concentración de idoneidad entre 1600 y 3600 msnm. Los componentes ambientales PC1 (gradiente térmico-altitudinal) y PC3 (estacionalidad climática) fueron los más influyentes. El mapa binario permitió identificar zonas prioritarias en Ayacucho, Apurímac, Cusco, Huancavelica y Junín. Al incorporar la

presión antrópica, se establecieron áreas diferenciadas para conservación *in situ*, restauración ecológica y mitigación de impactos.

Conclusiones: El presente estudio permitió demostrar que *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. se distribuye preferentemente en ecosistemas altoandinos intermedios con clima templado-frío y estacionalidad moderada, y que aún existen zonas con alto potencial ecológico para su conservación. La metodología aplicada resultó válida y replicable para otras especies nativas. Los resultados obtenidos aportan una herramienta técnica para apoyar decisiones territoriales, políticas ambientales y estrategias de restauración ecológica en el contexto de los Andes peruanos.

Palabras clave: *Escallonia resinosa*, modelado de nicho ecológico, MaxEnt, ENMeval, idoneidad ambiental, conservación, restauración ecológica, huella humana, Andes peruanos.

ABSTRACT

Escallonia resinosa Ruiz & Pav. is a native species of the Peruvian Andes with significant ecological value, especially in slope stabilization, soil protection, and the provision of ecosystem services. Despite its environmental importance, the accelerated loss of high-Andean vegetation cover has considerably reduced its distribution area. In this context, ecological niche modeling has become an effective tool to identify priority conservation areas, enabling an evaluation based on environmental and spatial data. However, no studies had yet identified the potential conservation areas of this species at a national scale by integrating ecological factors with human pressure. Therefore, the objective of this study was to determine suitable areas for the conservation of *E. resinosa* in Peru through ecological niche modeling using MaxEnt, optimized by ENMeval, and incorporating climatic, topographic, edaphic, geological, and human footprint variables.

Methods: A total of 44 cleaned presence records covering the Peruvian Andes were used. Environmental variables were transformed using principal component analysis (PCA) and evaluated for spatial independence. The optimal model was obtained using the fc.LQP_rm.3 configuration. Continuous and binary habitat suitability maps were generated, and the surface was classified into three management categories: conservation, restoration, and mitigation, based on the Human Footprint Index (HFI).

Results: The model predicted a fragmented potential distribution along the central and southern Andes of Peru, with the highest habitat suitability concentrated between 1600 and 3600 msnm. The most influential components were PC1 (thermal-altitudinal gradient) and PC3 (climatic seasonality). The binary map allowed the identification of priority conservation zones in Ayacucho, Apurímac, Cusco, Huancavelica, and Junín. After integrating anthropogenic

pressure, the territory was zoned into distinct management areas, enabling *in situ* conservation, ecological restoration, and impact mitigation strategies.

Conclusions: This study demonstrated that *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. is preferably distributed in mid to high-Andean ecosystems with temperate-cold climate and moderate seasonality, and that there are still ecologically suitable areas available for its conservation. The applied methodology proved to be valid and replicable for other native species. The results provide a technical tool to support territorial planning, environmental policies, and ecological restoration strategies in the context of the Peruvian Andes.

Keywords: *Escallonia resinosa*, ecological niche modeling, MaxEnt, ENMeval, habitat suitability, conservation, ecological restoration, human footprint, Peruvian Andes.

ÍNDICE

	Pág.
RESUMEN	vii
ABSTRACT	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE ANEXOS	xv
INTRODUCCIÓN	xvi
I. Planteamiento del problema	18
1.2. Objetivos	20
1.3. Justificación e importancia	20
1.4. Hipótesis	22
1.5. Variables	22
II. Marco Teórico	24
2.1. Antecedentes	24
2.2. Bases teóricas	35
2.3. Definición de términos	44
III. Metodología	48
3.1. Tipo y nivel de investigación	48
3.2. Ámbito temporal y espacial	48
3.3. Población y muestra	50
3.4. Instrumentos	50
3.5. Procedimientos	55
3.6. Análisis de datos	78
IV. Resultados	81
4.1. Registros de presencia	81
4.2. Análisis ambiental	84
4.3. Modelado de nicho ecológico	102
4.4. Identificación de áreas	115
4.5 Prueba de hipótesis	118
V. Discusiones	120
VI. Conclusiones	126
VII. Recomendaciones	129
VIII. Referencias bibliográficas	131
IX. Anexos	146

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Operacionalización de variables	23
Tabla 2. Plataformas digitales utilizadas para la obtención de registros de presencia de <i>Escallonia resinosa</i> Ruiz & Pav.	51
Tabla 3. Fuentes de datos ambientales utilizados para el modelado de distribución de <i>Escallonia resinosa</i> Ruiz & Pav.	51
Tabla 4. Instrumentos utilizados para la recolección de datos de presencia de <i>Escallonia resinosa</i> Ruiz & Pav.	53
Tabla 5. Coordenadas geográficas y colectores de registros de presencia de <i>Escallonia resinosa</i> Ruiz & Pav. de bancos de datos en línea	55
Tabla 6. Coordenadas geográficas y colectores de registros de presencia de <i>Escallonia resinosa</i> Ruiz & Pav. colectados en Ayacucho y Abancay	59
Tabla 7. Variables bioclimáticas	69
Tabla 8. Registros georreferenciados de <i>Escallonia resinosa</i> Ruiz & Pav.	81
Tabla 9. Contribución e interpretación ecológica de las variables bioclimáticas al componente principal 1 (PC1)	87
Tabla 10. Contribución e interpretación ecológica de las variables bioclimáticas al componente principal 1 (PC2)	88
Tabla 11. Contribución e interpretación ecológica de las variables bioclimáticas al componente principal 1 (PC3)	90
Tabla 12. Contribución e interpretación ecológica de las variables bioclimáticas al componente principal 1 (PC4)	93
Tabla 13. Comparación de configuraciones de modelado en MaxEnt según métricas de desempeño	103
Tabla 14. Detalle del modelo óptimo seleccionado para la distribución de <i>Escallonia resinosa</i> Ruiz & Pav.	107
Tabla 15. Extensión y porcentaje de área de distribución potencial respecto al territorio peruano	115
Tabla 16. Clasificación del territorio modelado según niveles de intervención antrópica y prioridades de manejo	116

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 01 Ejemplar de <i>Escallonia resinosa</i> Ruiz & Pav. en Huaychao, Acos Vinchos, Ayacucho.	38
Figura 02 Ejemplar de <i>Escallonia resinosa</i> Ruiz & Pav. en Huanta, Ayacucho.	38
Figura 03 Mapa de rangos altitudinales del área de estudio	49
Figura 04 Ejemplar de <i>Escallonia resinosa</i> Ruiz & Pav. en Iguain, Huanta, Ayacucho.	58
Figura 05 Ejemplar de <i>Escallonia resinosa</i> Ruiz & Pav. en Chalco, Cangallo, Ayacucho.	58
Figura 06 Ejemplar de <i>Escallonia resinosa</i> Ruiz & Pav. en Quispicancha, Iguain, Ayacucho.	59
Figura 07 Variación espacial y temporal de la temperatura máxima media en el Perú	61
Figura 08 Variación espacio-temporal de la temperatura mínima media en el Perú	62
Figura 09 Variación espacial-temporal de la precipitación media en el Perú	63
Figura 10 Distribución espacial de la elevación en el Perú clasificado en rangos altitudinales	64
Figura 11 Mapa de pendiente en porcentaje	65
Figura 12 Mapa de aspecto en grados	65
Figura 13 Mapa de clasificación geológica del territorio peruano según unidades litológicas y formaciones geológicas	66
Figura 14 Mapa de clasificación de suelos del territorio peruano según unidades edáficas	68
Figura 15 Mapa global del impacto de la huella humana en el año 2022 (Human Footprint Index, HFI)	76
Figura 16 Flujograma de la metodología aplicada en el modelado de distribución de especies y la clasificación geoespacial	80
Figura 17 Distribución espacial de los 44 registros de presencia validados de <i>Escallonia resinosa</i> Ruiz & Pav. utilizados en el modelado	83
Figura 18 Mapas espaciales de los primeros cuatro componentes principales (PC1–PC4) obtenidos mediante análisis de componentes principales (PCA) de variables bioclimáticas en el Perú	84
Figura 19 Curva de varianza acumulada de los componentes principales resultantes del análisis PCA aplicado a las variables ambientales	85
Figura 20 Contribución porcentual de las capas ambientales al primer componente principal (PC1) del análisis PCA	86
Figura 21 Contribución porcentual de las capas ambientales al segundo componente principal (PC2) del análisis de componentes principales (PCA)	88

Figura 22 Contribución porcentual de las capas ambientales al tercer componente principal (PC3) del análisis de componentes principales (PCA)	90
Figura 23 Contribución porcentual de las capas ambientales al cuarto componente principal (PC4) del análisis de componentes principales (PCA)	92
Figura 24 Distribución de las capas ambientales en el plano factorial, definido por los componentes principales 1 y 2 (PC1 vs PC2)	94
Figura 25 Distribución de las capas ambientales en el plano factorial, definido por los componentes principales 3 y 4 (PC3 vs PC4)	94
Figura 26 Entrograma de autocorrelación espacial para el primer componente principal (PCA 1) en la distribución de <i>Escallonia resinosa</i> Ruiz & Pav.	95
Figura 27 Entrograma de autocorrelación espacial para el segundo componente principal (PCA 2) en la distribución de <i>Escallonia resinosa</i> Ruiz & Pav.	96
Figura 28 Entrograma de autocorrelación espacial para el tercer componente principal (PCA 3) en la distribución de <i>Escallonia resinosa</i> Ruiz & Pav.	97
Figura 29 Entrograma de autocorrelación espacial para el cuarto componente principal (PCA 4) en la distribución de <i>Escallonia resinosa</i> Ruiz & Pav.	98
Figura 30 Entrograma del análisis de autocorrelación espacial aplicado a la capa geología	100
Figura 31 Entrograma del análisis de autocorrelación espacial aplicado a la capa suelo	101
Figura 32 AUC de validación promedio en función del multiplicador de regularización (rm) y las combinaciones de funciones de características (fc)	104
Figura 33 Comportamiento de la tasa de omisión al percentil 10 según configuraciones de regularización y funciones de características (L, LQ, LQP)	105
Figura 34 Comportamiento del Delta AICc en relación con el multiplicador de regularización y las funciones de características	106
Figura 35 Comparación de métricas de desempeño en los tres mejores modelos de MaxEnt	108
Figura 36 Valores de los coeficientes asociados a las variables ambientales en el modelo de MaxEnt (fc.LQP_rm.3)	109
Figura 37 Mapa de distribución potencial continua de <i>Escallonia resinosa</i> Ruiz & Pav. en función de la idoneidad ambiental	111
Figura 38 Comparación de umbrales de corte según distintos criterios estadísticos en el modelo MaxEnt	112
Figura 39 Áreas idóneas para la presencia de <i>Escallonia resinosa</i> Ruiz & Pav. en el Perú, determinadas a partir del modelado de nicho ecológico y umbral de corte	113
Figura 40 Áreas de distribución potencial y puntos de presencia de <i>Escallonia resinosa</i> Ruiz & Pav. en el Perú, con registros fotográficos de campo	114
Figura 41 Clasificación territorial según potencial de conservación, restauración y mitigación de <i>Escallonia resinosa</i> Ruiz & Pav. en el Perú	117

Figura 42 Distribución de la varianza entre los componentes principales (PCA)	118
Figura 43 Resultados de la prueba binomial aplicada a los registros de presencia	119

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia	146
Anexo 2. Prueba de hipótesis	147
Anexo 3. Protocolo de colecta de muestras	148
Anexo 4. Script en RStudio	149
Anexo 5. Colecta de muestras	163

INTRODUCCIÓN

Escallonia resinosa Ruiz & Pav. es una especie nativa de los Andes sudamericanos que desempeña un papel importante en la estabilidad de los ecosistemas altoandinos, gracias a su capacidad para fijar suelos, regular la humedad y proporcionar hábitat a otras especies nativas. Su distribución abarca diversos pisos ecológicos, principalmente en zonas montañas templadas de Perú, Bolivia y Colombia, donde forma parte de bosques relictos o fragmentados. Como ocurre con otras especies leñosas altoandinas, su persistencia está amenazada por la presión antrópica creciente, el cambio climático y la transformación del uso del suelo en sectores tradicionalmente forestales (Rivers, 2024).

El avance de la frontera agrícola, el sobrepastoreo, la tala selectiva y la urbanización han acelerado la degradación y pérdida de hábitat para muchas especies nativas. En el caso de *E. resinosa*, aunque se reconoce su valor ecológico y cultural, no se cuenta con información detallada ni actualizada sobre su distribución potencial a escala nacional ni sobre las zonas más adecuadas para su conservación o restauración ecológica. Esta carencia de datos limita la formulación de políticas ambientales eficaces y la planificación territorial basada en evidencia científica (Soh et al., 2019).

Ante esta situación, el modelado de nicho ecológico ha emergido como una herramienta robusta para predecir la distribución potencial de especies a partir de datos ambientales, datos de presencia y algoritmos matemáticos. En particular, el algoritmo MaxEnt ha demostrado ser eficaz con datos de presencia solamente, lo que resulta útil para especies poco estudiadas o con registros escasos. Su aplicación permite identificar zonas ambientalmente idóneas para la especie en cuestión, incluso en regiones donde no existen registros confirmados, contribuyendo así a orientar esfuerzos de conservación con base espacial (Warren & Seifert, 2011).

En la práctica investigativa reciente, los modelos de nicho ecológico se han fortalecido mediante procesos de validación cruzada, selección óptima de parámetros de regularización y evaluación del desempeño predictivo mediante métricas como: Criterio de Información de Akaike corregido (AICc), Área Bajo la Curva (AUC) y tasa de omisión (Warren & Seifert, 2011). Asimismo, la incorporación de variables transformadas por análisis de componentes principales (PCA), junto con la evaluación de autocorrelación espacial, ha mejorado la calidad estadística y ecológica de las predicciones. Complementariamente, el uso de indicadores como la huella humana (HFI) permite considerar no solo el potencial ecológico, sino también el grado de amenaza o presión sobre el hábitat disponible.

En este marco, el presente estudio tuvo como objetivo identificar las áreas potenciales más idóneas para la conservación de la especie *E. resinosa* en los Andes peruanos, aplicando técnicas de modelado ecológico con MaxEnt, optimización con ENMeval, y análisis espacial en sistemas de información geográfica. A través de la integración de múltiples tipos de factores climáticos, topográficos, edáficos, geológicos y antrópicos, se buscó construir una propuesta territorial concreta para la conservación y restauración de esta especie nativa clave en los ecosistemas altoandinos.

I. Planteamiento del problema

1.1. Descripción y formulación del problema

El crecimiento poblacional y el uso intensivo de los recursos naturales han generado un impacto significativo en la biodiversidad mundial. Según el Banco Mundial (2021), en el año 2020 la población global alcanzó los 7,753 mil millones de personas, lo que ha incrementado la presión sobre los ecosistemas a través de la deforestación, el cambio climático y la sobreexplotación de recursos (Anderson & González, 2011). La alta biodiversidad es fundamental para la resiliencia de los ecosistemas, ya que garantiza la estabilidad del suministro de agua y alimentos para la sociedad (Oliver et al., 2015) e interviene en los servicios ecosistémicos esenciales para la vida humana (Cardinale, 2012).

No obstante, diversos factores han llevado a la degradación de los ecosistemas naturales. Entre las principales causas de la pérdida de biodiversidad se encuentran la fragmentación y degradación del hábitat, la contaminación, el cambio climático y la sobreexplotación de especies (Butchart et al., 2010). De acuerdo con la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN, 2021), más de 38,500 especies a nivel mundial se encuentran en peligro de extinción. En Sudamérica, de 14,060 especies evaluadas, al menos 4,445 están amenazadas (UICN, 2017).

La deforestación es uno de los principales factores de la degradación de los ecosistemas forestales, lo que tiene consecuencias devastadoras para la biodiversidad. Según la FAO (2020), la superficie de bosques en el mundo es de 4,060 millones de hectáreas, pero entre 1990 y 2020 se perdió un total de 178 millones de hectáreas debido a la conversión de tierras para la agricultura y otros usos humanos (Mollins, 2020). En Sudamérica, países como Brasil, Bolivia, Perú y Colombia han experimentado tasas de alarmas de pérdida de cobertura forestal.

En el caso de Perú, los bosques cubren aproximadamente el 60% del territorio nacional, con una extensión de 82,543.385 hectáreas hasta el año 2019. De esta superficie, el 94.2% corresponde a los bosques amazónicos, el 4.7% a los bosques secos de la costa y solo el 1.1% a los bosques andinos (MINAM, 2019). Durante el periodo 2001-2020, se ha registrado una pérdida de 2,636.585 hectáreas de bosques, causada principalmente por la minería ilegal, la tala indiscriminada, los incendios forestales y la agricultura no sostenible (GeoBosques - MINAM).

Dentro de este contexto, la región andina también enfrenta una alta presión sobre sus ecosistemas naturales. La deforestación y degradación de los bosques altoandinos es un problema creciente debido a prácticas agrícolas como la roza y quema, que favorecen la ocurrencia de incendios de origen antrópico, afectando la vegetación nativa y destruyendo extensas áreas de hábitat (Tejedor et al., 2012).

En el Perú, el Decreto Supremo N° 043-2006-AG clasifica a 777 especies de flora silvestre como amenazadas, entre ellas *E. resinosa*, que se encuentra en la categoría vulnerable. Esta especie, característica de los bosques altoandinos, enfrenta una creciente reducción de su población debido a la tala indiscriminada, el cambio de uso del suelo, los incendios forestales y el cambio climático. La falta de estudios detallados sobre su distribución y ecología impide la aplicación de estrategias de conservación efectivas, lo que incrementa el riesgo de pérdida de hábitat y fragmentación de sus bosques naturales.

Dado este escenario, es fundamental desarrollar estrategias para la conservación y restauración de *E. resinosa* en los Andes peruanos. Para ello, el modelado de nicho ecológico se presenta como una herramienta clave, ya que permite identificar las áreas potenciales más idóneas para la gestión ecológica de la especie, contribuyendo así a la preservación de los bosques altoandinos y la biodiversidad que albergan.

1.1.1. Interrogante general

- ¿Cuáles son las áreas potenciales para la gestión ecológica de la especie *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. en los Andes peruanos?

1.1.2. Interrogantes específicas

- ¿Cuáles son los principales factores ambientales que influyen en la distribución potencial de la especie *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav.?
- ¿Cuál es el hábitat idóneo para la *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. en los Andes peruanos?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

- Identificar las áreas potenciales más idóneas para la gestión ecológica de la especie *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. en los Andes peruanos.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Determinar los principales factores ambientales que influyen en la distribución potencial de la especie *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav.
- Generar un mapa de idoneidad de hábitat para la *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. en los Andes peruanos.

1.3. Justificación e importancia

La conservación de los ecosistemas terrestres es un objetivo fundamental dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), específicamente en el ODS 15: Vida de Ecosistemas Terrestres (Hansen et al., 2024). Dentro de este objetivo, las metas 15.4 y 15.5 destacan la importancia de proteger los ecosistemas montañosos, restaurar su

capacidad de proveer servicios esenciales para el desarrollo sostenible y tomar acciones para frenar la degradación de los hábitats naturales y la extinción de especies (Morán, 2020).

En el marco legal peruano, la Constitución promueve la conservación de la diversidad biológica, mientras que la Ley General del Ambiente (Artículo 100) establece la protección de los ecosistemas de montaña (Andaluz, 2016). A nivel regional, el Gobierno Regional de Ayacucho (GORE, 2021) ha definido como uno de sus objetivos estratégicos la preservación de la calidad ambiental y la biodiversidad del departamento.

A pesar de estos esfuerzos normativos, los bosques altoandinos continúan enfrentándose a amenazas como la deforestación, el cambio de uso del suelo y los incendios forestales. En este contexto, la especie *E. resinosa* ha sido catalogada como vulnerable, lo que resalta la necesidad de estrategias efectivas para su conservación y restauración.

El presente estudio busca generar información clave sobre el nicho ecológico de *E. resinosa*, lo que permitirá seleccionar sitios óptimos para su establecimiento y restauración en los bosques altoandinos del Perú. A través del modelado de nicho ecológico, se podrán identificar las áreas con condiciones ambientales favorables para la especie, facilitando la toma de decisiones en proyectos de reforestación y gestión de ecosistemas de montaña. Este estudio contribuirá a la planificación de estrategias de conservación basadas en datos científicos, apoyando iniciativas gubernamentales, regionales y comunitarias orientadas a la recuperación de los ecosistemas altoandinos y la preservación de su biodiversidad.

1.4. Hipótesis

1.4.1. Hipótesis general

- Las áreas potenciales para la gestión ecológica de la especie *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. en los Andes peruanos son identificadas mediante el modelo de nicho ecológico.

1.4.2. Hipótesis específica

- Los principales factores ambientales influyen en la predicción de la distribución potencial actual para la especie *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. en los Andes peruanos.
- El modelado de nicho ecológico genera el mapa de idoneidad de hábitat para la especie *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. en los Andes peruanos.

1.5. Variables

- **Variable independiente:** Modelado de nicho ecológico de la especie *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav.
- **Variable dependiente:** Identificación de áreas potenciales de la especie *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. en los Andes peruanos.

Tabla 1. Operacionalización de variables

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	UNIDAD DE MEDIDA	INSTRUMENTO
VARIABLE INDEPENDIENTE: Modelado de nicho ecológico de la especie <i>Escallonia resinosa</i> Ruiz & Pav.	Técnica de modelado que predice las áreas de distribución potencial de una especie basándose en sus condiciones ambientales optimas	Aplicación de algoritmos de modelado ecológico utilizando registro de presencia de la especie y factores ambientales seleccionadas	Datos de registro	Registro de presencia de la especie	Nº de especies registradas y colectadas	Google académico Guía para la recolección y preservación de muestras botánicas en campo
			Factores climáticos	Precipitación	mm	Algoritmos de R studio
				Temperatura máxima	°C	
				Temperatura mínima	°C	
			Factor topográfico	Desnivel topográfico	m.s.n.m.	Algoritmos de R studio
				Aspecto	Grados	
				Pendiente	Grados	
			Factor geológico	Grupos de geología	Tipo	Algoritmos de R studio
			Factor suelo	Grupos de suelo	Tipo	Algoritmos de R studio
			Configuración y calibración del modelado	Configuración y evaluación	Feature Delta de Aicc	Algoritmos de R studio
Selección del modelado	Raster de distribución potencial de la especie	Valor de idoneidad	Algoritmos de R studio			
VARIABLE DEPENDIENTE: Identificación de áreas potenciales de la especie <i>Escallonia resinosa</i> Ruiz & Pav. en los Andes peruanos.	Identificación de áreas geográficas idóneas para la especie, en base a su nicho ecológico y los niveles de presión antrópica	Delimitación de áreas con alta idoneidad ambiental y baja intervención humana	Selección de umbral	Equal_sens_spec	Valor de umbral	Algoritmos de R studio
			Validación del modelo	Comparación de predicción con puntos de presencia confirmada	Porcentaje	R studio y Arcgis

II. Marco Teórico

2.1. Antecedentes

Los estudios sobre modelado de nicho ecológico son relativamente recientes y su aplicación continúa en expansión. No obstante, uno de los retos más significativos en su implementación es la falta de información sobre la especie *E. resinosa*, lo que dificulta la predicción de su distribución y la identificación de áreas óptimas. Actualmente, existen muy pocos registros o estudios detallados sobre su distribución geográfica.

A nivel taxonómico, la clasificación de *E. resinosa* ha sido actualizada en varias ocasiones, pasando de Saxifragaceae a Grossulariaceae, hasta su ubicación más reciente en la familia Escalloniaceae. No obstante, su nicho ecológico aún no ha sido completamente determinado, ya que se desconocen con precisión los factores ambientales que influyen en su presencia y distribución.

Dado este contexto, es fundamental identificar las variables ambientales clave que determinan su nicho ecológico, lo que permitirá predecir las áreas más idóneas para su gestión ecológica.

2.1.1. Antecedentes Internacionales

Las investigaciones botánicas en el Perú comenzaron en el siglo XVIII con la expedición de Ruiz y Pavón, procedentes de España, quienes realizaron importantes descubrimientos sobre la flora peruana. Desde entonces, se han registrado innumerables hallazgos y descripciones en un territorio caracterizado por su gran diversidad ecológica. Estos conocimientos han continuado expandiéndose de manera progresiva, proporcionando información valiosa sobre la distribución y clasificación de diversas especies. Durante esta expedición, se establecieron unidades sistemáticas para la flora peruana, y *E. resinosa* fue

inicialmente ubicada en la familia Saxifragaceae, con registros en distintas regiones de los Andes peruanos. Posteriormente, la especie fue reclasificada y se calcula que su distribución altitudinal se encuentra entre 2700 y 3800 msnm (Weberbauer, 1911). Es conocida como “chachacuma”, y se distingue por ser una de las especies con distribución más baja dentro del género *Escallonia*.

La presencia de *E. resinosa* no es ajena al país vecino de Bolivia, donde se han registrado poblaciones en diversas regiones, incluyendo Santa Cruz de la Sierra, La Paz, Cochabamba, Chuquisaca y Tuquillas. En particular, en la provincia de Arque, Cochabamba, ubicada aproximadamente a 3800 msnm, se ha documentado la presencia de esta especie en bosques montanos de neblina, donde coexiste con otras especies características de estos ecosistemas, como *Polylepis*, *Alnus* y *Podocarpus* (Ibisch, 1994).

El estudio de Fernández (1997), se centró en la Cordillera Oriental de Cochabamba, la cual se extiende hacia el este de la Cordillera de Tres Cruces, en un rango altitudinal de 2900 a 4100 msnm. Esta zona ha sido descrita como un área de alto impacto por actividades antropogénicas, lo que ha afectado significativamente su biodiversidad. En su investigación, el autor identificó la presencia de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. en estos ecosistemas, y documentó su asociación con especies como *Berberis conmutata*, *Polylepis besseri*, *Citharexylum punctata* y *Polylepis lanata*.

Ibisch y Mérida (2003), documentaron la distribución de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. en asociación con otras especies, registrándola en un rango altitudinal de 3810 a 4100 msnm. Su presencia fue identificada en la ecorregión Puna Húmeda, dentro de las áreas naturales de la región de La Paz, Bolivia.

Según el análisis realizado por CARE Bolivia y el Programa Nacional de Cambio Climático (2011), *E. resinosa* presenta características ecológicas que le permiten adaptarse a condiciones extremas. Se encuentra en zonas con una temperatura media anual de entre 6 y 14 °C, caracterizadas por climas fríos, intensas heladas y bajas precipitaciones. Además, habita en suelos pobres, poco profundos y degradados, lo que demuestra su alta tolerancia a la sequía y aridez, sin requerimientos hídricos elevados. Su distribución altitudinal registrada oscila entre 2500 y 4000 msnm.

La investigación de Adhikari et al. (2012), modeló la distribución del hábitat de *Ilex khasiana* Purk, una especie en peligro de extinción y endémica de las colinas de Khasi, India. Para ello, se utilizó el algoritmo MaxEnt, logrando predecir un área de 500 km² adecuada para la reintroducción de la especie. Los resultados indicaron que las elevaciones más altas de la colina Khasi representan los sitios con mayor idoneidad para su conservación.

En la evaluación realizada por Ab Lah et al. (2021), se aplicó el algoritmo MaxEnt para generar un mapa de idoneidad de hábitat actual y una proyección futura de la distribución potencial de *Melaleuca cajuputi*, un árbol de gran importancia para el ecosistema costero de Terengganu, Malasia. Los resultados indicaron que la distribución potencial actual abarca 1346.5 km², pero bajo los escenarios climáticos proyectados, su área se reduciría significativamente, con un RCP 4.5 disminuiría a 442.1 km² y con un RCP 2.6 a 267.5 km². Además, evidenciaron que, en el futuro, las zonas idóneas en Maraj disminuirán, mientras que en Setiu podrían aumentar, según las condiciones climáticas estimadas.

De acuerdo con el análisis realizado por Omar y Elgamal (2021), se evaluó el estado ecológico y de conservación de las especies *Micromeria serbaliana* y *Veronica kaiserison*, las cuales no habían sido registradas desde 1998. Los resultados indicaron que ambas especies presentan una distribución restringida en zonas de alta montaña, con una extensión de ocurrencia de 65.8 km² para *Micromeria serbaliana* y 108.4 km² para *Veronica kaiserison*. Según la evaluación de hábitat y la limitación de su rango de distribución, se concluyó que estas especies están amenazadas y en peligro de extinción, lo que resalta la urgente necesidad de establecer un programa de conservación para su protección.

Los hallazgos de Ranjith et al. (2022), evidenciaron que, para identificar el hábitat adecuado de *Ensete glaucum*, se llevó a cabo un modelamiento de distribución de la especie. En el estudio se utilizaron seis predictores bioclimáticos, destacando la precipitación del trimestre más caluroso y la variación anual de temperatura como los factores más determinantes. Los resultados indicaron una alta idoneidad de hábitat en el punto crítico de Indo Birmania, lo que resalta la relevancia crucial de estas variables en la distribución de la especie.

El trabajo desarrollado por Chauhan et al. (2022), tuvo como objetivo modelar el nicho ecológico y la predicción del hábitat natural de *Taxus contorta* Griff, una especie en peligro de extinción con gran importancia en la producción de medicamentos contra el cáncer. Mediante el uso de modelado de nicho ecológico, se obtuvo un modelo óptimo con un AUC de 0.905, en el que se identifican como principales variables predictoras de factores ambientales, cobertura del suelo y temperatura media anual. Los resultados sugirieron que el Área de Conservación del Gran Parque Nacional del Himalaya es la zona con

mayor idoneidad a incluir 134.14 km², mientras que solo el 6% del área geográfica de Himachal Pradesh se considera adecuada para la conservación de la especie.

La investigación realizada por Yu et al. (2025), aplicó el algoritmo MaxEnt para modelar la distribución potencial actual de *Trachelospermum jasminoides* (Lindl.) Le, una hierba con alto potencial medicinal y económico. Para ello, se analizaron 227 puntos de ocurrencia y 15 variables ecológicas, identificando como factores limitantes de su distribución la precipitación durante el trimestre de más calor, la temperatura promedio del trimestre más seco, la estacionalidad de la temperatura y el índice de impacto humano. Los resultados indicaron que los sectores más óptimos para la especie se encuentran predominantemente en el este y centro de China. En los escenarios climáticos SSP2-4.5 y SSP5-8.5, se prevé que el hábitat adecuado inicialmente aumentará y posteriormente disminuirá. Asimismo, consideraron que el centro de distribución se concentra en las provincias de Hunan y Jiangxi, con un desplazamiento del centroide de distribución hacia el sureste en comparación con la situación actual.

2.1.2. Antecedentes nacionales

El análisis realizado por Soto y Nishme (2007), donde identificaron la presencia de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. en el distrito de Chalaco, región Piura, con una distribución altitudinal entre 2600 y 4000 msnm. La especie se desarrolla en temperaturas que oscilan entre 6 y 14 °C, tolerando heladas frecuentes. Además, habita en suelos con pH variable, de escasa profundidad y con tolerancia a pedregosidad media-alta, lo que evidencia su capacidad de adaptación a condiciones edáficas adversas.

La investigación desarrollada por Casas (2007), delimitó la microcuenca de Pilcomayo, ubicada en los distritos de Huancarama y Pacobamba, en el departamento de Apurímac. En esta zona, se registró la presencia de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav., junto a otras especies, en un rango altitudinal que varía entre 1850 y 4350 msnm.

De acuerdo con lo documentado por Reynel & Marcelo (2009), *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. se distribuye en tres países: Perú, Ecuador y Bolivia, con presencia en las regiones peruanas de Áncash, Ayacucho, Cusco, Junín y La Libertad. Su altitud varía entre 1500 y 3800 msnm, y en el Perú, la especie ha sido clasificada en situación de peligro, lo que destaca la necesidad de estrategias de protección para su preservación.

El análisis realizado por Moscoso et al. (2013), evaluaron la capacidad predictiva de un modelo basado en el algoritmo MaxEnt para diversas especies de importancia en Perú, Brasil y Colombia. Entre las especies estudiadas se incluyen *Cedrela odorata*, *Handroanthus excelsum*, *Handroanthus impetiginosus*, *Minuartia huberi*, *Mezilaurus intauba*, *Swietenia macrophylla*, *Astrocaryum aculeatum*, *Astrocaryum murumuru*, *Attalea maripa*, *Euterpe oleracea*, *Mauritia flexuosa* y *Oenocarpus bacaba*. Los resultados indicaron que las especies maderables generaron modelos con un AUC superior a 0.75, lo que sugiere una alta capacidad predictiva. Sin embargo, en el caso de las especies de palmeras, los modelos presentan baja confiabilidad. Además, el estudio destacó que en algunas áreas de la Amazonía aún existen zonas insuficientemente muestreadas, lo que resalta la necesidad de más investigaciones para delimitar con precisión la distribución de estas especies.

El estudio desarrollado por Campos (2015), se llevó a cabo en los distritos de Molino, Yauli y Pancan, en la provincia de Jauja, región de Junín, como parte del modelo de gestión del programa de forestación y reforestación con visión de cuenca. En estas comunidades, se registró la presencia de bosques de *E. resinosa*, distribuidos en dos ecorregiones: Bosque Húmedo Montano Bajo Tropical (bh-MBT), con un rango altitudinal entre 2800 y 3400 msnm, temperaturas medias de 12 a 17°C y precipitaciones de 850 a 1200 mm; y bosque Muy Húmedo Montano Bajo Tropical (bmh-MBT), ubicado entre 3400 y 3600 msnm, con temperaturas promedio de 8 a 12°C y precipitaciones anuales de 1000 a 1600 mm. Estos registros resaltan la importancia de *E. resinosa* en los ecosistemas altoandinos y su presencia en distintas gradientes ecológicas dentro de la región.

La proyección realizada por Bennett et al. (2017), en la cual utilizaron un modelo de nicho ecológico previo para predecir la futura distribución de *Leopardus jacobita*, una especie en peligro de extinción que habita en Argentina, Bolivia, Chile y Perú, donde los resultados del estudio indicaron que, en el futuro, la especie experimentará una reducción significativa en su rango de distribución en Bolivia y Perú, mientras que las condiciones ecológicas en la región meridional de la Patagonia podrían favorecer su expansión.

El estudio efectuado por Reyes (2018) registró la presencia de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. en el distrito de Huanipata, provincia de Abancay, departamento de Apurímac. En esta zona, la especie se encuentra en suelos intensamente acidificados, de textura franco arenosa y con altos porcentajes de elementos orgánicos. Además, el estudio señaló que la vegetación en esta región ha sido fuertemente degradada por la expansión agrícola. La distribución altitudinal de la especie en esta área oscila entre 2000 y 4500 msnm.

El trabajo de modelado realizado por Navarro et al. (2020), aplicó el algoritmo MaxEnt en el departamento de Tacna, para evaluar la distribución actual y futura de especies críticas, entre ellas *Buddleja coriacea* J. Remy, *Carica candicans* A. Gray, *Haplorhus peruviana* Engl., *Kageneckia lanceolata* Ruiz & Pav., y *Weberbauerella brongniartioides* Ulbr. Se analizaron distintos escenarios climáticos bajo las proyecciones RCP 8.5 y RCP 4.5, obteniendo los siguientes resultados: *B. coriacea* presentó una pérdida de área en los escenarios futuros, *C. candicans* y *W. brongniartioides* mostraron un aumento en su distribución, y *H. peruviana* experimentó una reducción en los tres primeros escenarios hasta 2050, con una posible recuperación bajo RCP 8.5; finalmente estos hallazgos destacan el impacto del cambio climático en la distribución de especies críticas y la necesidad de estrategias de conservación adaptativas.

La investigación conducida por Scrivanti y Anton (2020), modeló el hábitat adecuado actual para la especie *Poa scaberula*, utilizando datos climáticos de alta resolución. Se identificaron ocho variables clave en el modelo, obteniendo una estimación de 162,747 km² de hábitat idóneo a lo largo de los Andes. Las principales variables predictoras del modelo fueron la resistencia al frío, la presión del vapor de agua y la estacionalidad de la temperatura. Los resultados permitieron identificar las áreas con mayor idoneidad y ocurrencia de la especie, proporcionando información valiosa para evaluar el estado de conservación de los pastizales andinos.

El estudio llevado a cabo por More et al. (2022), aplicó el algoritmo MaxEnt para modelar la distribución de *Tapirus pinchanquees*, una especie en peligro de extinción. Para este análisis, se recopilaron registros de ocurrencia, datos de cámaras trampa, índices de vegetación obtenidos mediante sensores

remotos, variables bioclimáticas y topográficas. Los resultados permitieron generar un mapa de distribución actual, determinando que la especie ocupa un rango de 183,000 hectáreas, ubicadas entre las regiones del norte y sur del río Huancabamba. Sin embargo, se identificó que el 27% de esta área se encuentra dentro de concesiones mineras, lo que representa una amenaza significativa. Se estima una pérdida de bosques de al menos 28,000 hectáreas, lo que llevó a los investigadores a recomendar áreas prioritarias para la conservación de la especie.

El estudio llevado a cabo por Camarena et al. (2024), se enfocó en la reforestación de *Retrophyllum rospigliosii* (Pilg.) en Perú, combinando el análisis de producción de plántulas con la identificación de áreas óptimas para su crecimiento. En particular, uno de sus principales objetivos fue localizar las regiones más adecuadas para la reforestación de esta especie, utilizando modelos de nicho ecológico. Estos modelos analizaron variables climáticas y edáficas para predecir zonas con condiciones favorables. Los resultados indicaron que aproximadamente 6,321.97 km² en Perú presentan un ambiente propicio para la reforestación. Entre las regiones con mayor potencial se encuentran Huánuco, Pasco, Junín y Cusco. Además, se estimó que, para una reforestación a gran escala de estas áreas, sería necesario producir más de tres millones de plántulas. Este método integró estudios sobre el crecimiento de la especie y herramientas de modelado ambiental para optimizar la planificación de la reforestación. Su aplicación facilitó la restauración de ecosistemas degradados y contribuyó a la conservación de una especie amenazada por la explotación excesiva de su madera.

2.1.3. Antecedentes regionales

En el estudio de De la Cruz (2018), “Estructura y composición florística de la vegetación arbórea y arbustiva del Santuario Histórico de la Pampa de Ayacucho, distrito de Quinua. 2017”, se determinó la estructura y composición de la vegetación arbórea arbustiva. Se usó la metodología de transectos variables de Foster; para la determinación de especies se usó el herbario físico, virtual y bibliografía especializada, se registró la especie *E. resinosa* dentro de las 46 especies determinadas, el registro de las especies se realizó entre los 3350 a 4050 msnm.

En el estudio de Tineo (2018), “Composición y estructura de la flora arbórea del bosque de Lucre, distrito de Ocos. Ayacucho 2013”, se realizó en la región de Ayacucho, provincia de Huamanga, comunidad de Chumbes, que se encuentra entre los 2900 a 3355 msnm, se registró 15 especies arbóreas, dentro de ellas *E. resinosa*. Para la identificación de especies se usó claves taxonómicas y bibliografía especializada, la mayor variedad y riqueza están ubicadas en la parte baja, con una altitud de 1900 a 3100 msnm. El bosque de Lucre está conformada por un total 13 especies de importancia económica: 4 especies tintóreas y 11 especies medicinales.

En el estudio de Callañaupa (2019), “Flora fanerogámica de las cataratas de Batán y Qorimaccma, distrito Los Morochucos, provincia de Cangallo. Ayacucho - 2014”, se registró la flora fanerogámica en las cataratas de Batán y Qorimaccma, lugares de gran potencial turístico, este estudio fue de nivel básico descriptivo, el tipo de muestreo fue de búsqueda intensiva, y para la clasificación de la cobertura vegetal se usó el sistema de Cronquist, el estudio

reportó 185 especies fanerogámicas, dentro de las especies reconocidas se encuentra la especie de estudio *E. resinosa*.

En el estudio de Quicaña (2019), “Avifauna asociada al bosque de Escallonia “chachacomo” en la localidad de Totorabamba del distrito de Vinchos, Huamanga, Ayacucho junio 2016 a mayo 2017”, detalla que en los bosques altoandinos de “chachacomo”, se registra la presencia de la especie, en la localidad de Totorabamba, región de Ayacucho, donde se identificó una asociación de 83 especies de flora con las especies *E. myrtilloides* y *E. resinosa*; respecto al estudio determinó que estos bosques de Escallonia, mantiene una elevada biodiversidad de avifauna, manteniendo 4 especies categorizadas en el UICN, 3 especies categorizadas en el DS N°004-2014-MINAGRI y 6 especies endémicas presentes solo en los bosques de Escallonia.

En el proyecto de Aronés (2022), “Modelación de la distribución potencial de la Unca (*Myrcianthes spp.*) usando las 19 variables bioclimáticas en la Región Ayacucho”, se determinó la distribución potencial de las especies del género *Myrcianthes spp.* El estudio utilizó registros de presencia junto con variables bioclimáticas, procesadas mediante los programas ArcGIS, QGIS y MaxEnt. Los resultados del modelamiento mostraron que las áreas con mayor idoneidad se ubicaron en las zonas limítrofes de las provincias de La Mar, Huanta, Huamanga y Vilcas Huamán. Además, la superposición de las áreas idóneas con las zonas de vida permitió identificar que esta especie se desarrolló en ecosistemas como: Bosque Húmedo Montano Subtropical, Bosque Húmedo Subtropical, Bosque muy Húmedo Montano Bajo Subtropical, Bosque muy Húmedo Subtropical, Bosque Pluvial Montano Bajo Subtropical, Bosque Seco Subtropical, Estepa Espinosa Montano Bajo Subtropical y Monte Espinoso Subtropical.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Descripción de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav

Clasificación sistemática de APG IV - 2015

Reino	: Plantae
División	: Angiospermae
Clase	: Equisetopsida
Orden	: Escalloniales
Familia	: Escalloniaceae
Género	: Escallonia
Especie	: <i>Escallonia resinosa</i> (Ruiz & Pav.) Pers.
Nombre común	: Chachacomo, chachas, sachas, tasta, chachas

2.2.2. Descripción botánica de la especie

La especie *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav., es una planta arbórea natural de los Andes del Perú, Bolivia y Ecuador, con nombre común de: “chachacomo”, “chachas”, “sachas” o “tasta”, la distribución de esta especie comprende desde los 2600 a los 4200 m.s.n.m. (CARE Bolivia y Programa Nacional de Cambio Climático, 2011). Este género presenta cerca de 39 especies distribuidas en ecosistemas húmedos y montañosos. De acuerdo a diversos autores, el género *Escallonia* presenta 18 especies en el Perú, siendo la de mayor distribución la *E. resinosa*, seguida por *E. myrtilloides*, *E. pendula* y *E. corymbosa*. Las especies de *Escallonia* son árboles pequeños o arbustos, con hojas coriáceas, a menudo glanduloso-serradas, las flores son pentámeras y se presentan solitarias, en panículas o en racimos, el fruto es una cápsula con numerosas semillas pequeñas (Pretell et al., 1985).

Esta especie llega a medir entre 4 a 6 m de alto y con un diámetro promedio de 25 cm, crecimiento de las ramas de forma simpodial y copa irregular, la corteza exterior presenta una coloración marrón rojiza, y con corteza interna de un color rojizo, homogéneo y sin secreciones (Royal Botanic Gardens, 2025).

Las ramas terminales son de sección circular, con un tamaño de 3 mm de diámetro.

Las hojas presentan una disposición alterna y dística, son simples y se agrupan en los extremos de los tallos. Miden 0.5 cm de ancho y 2 cm de largo aproximadamente, presenta un ápice redondeado y un margen dentado. La nervadura es de tipo pinnado y carece de glabras (Espinoza et al., 2006).

La inflorescencia se presenta en forma de panícula terminal, con una longitud de 3 cm y compuesta por aproximadamente 5 a 15 flores. Estas son hermafroditas y de simetría radial, con un tamaño que varía entre 5 y 6 mm. Tienen cinco piezas por verticilo (pentámeras). El pedicelo mide entre 2 y 3 mm, el cáliz es dentado y alcanza los 5 mm de largo. Los pétalos, de tonalidad blanca, se presentan separados entre sí y alcanzan una longitud aproximada de 3 mm. La flor cuenta con cinco estambres dispuestos de manera alterna respecto a los pétalos, los cuales sobresalen del cáliz (exsertos) y miden 3 mm de largo; las anteras asociadas tienen una longitud cercana a 1 mm. El aparato reproductor femenino incluye un ovario situado por debajo del resto de las piezas florales (ínfero), acompañado de un estilo que se proyecta hacia el exterior y permanece tras la floración (persistente), finalizando en un estigma con morfología capitada.

Los frutos son capsulares, subglobosos de 2 – 2.5 mm de radio, con el cáliz y estilo constante; se abren en par desde la base, a partir del punto de inserción del péndulo estos frutos están provistos de numerosas y diminutas semillas de forma ahusada - alargadas de 0.9 mm de longitud y 0.3 mm de ancho, con un engrosamiento en un extremo y constituido por el embrión (Reynel & Pennigton, 2016).

De acuerdo a Gentry (1993), señala que la especie *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. se distingue por sus hojas, finamente dentadas, base decurrente, alternas, presencia de resina, flores con ovario ínfero y corteza en láminas. Según Macbride (1938), señala que la especie presenta inflorescencias en panículas y cuyas hojas sean glandulares hacia la base decurrente, y que midan alrededor de 1 cm de longitud.

Los suelos donde se desarrolla esta especie son suelos fuertemente ácidos, textura franco arenosa y con alto porcentaje de materia orgánica, su distribución geográfica se da en la serranía esteparia y puna; en áreas de vegetación poco alterada, mayormente florece en agosto. La madera es usada para la elaboración de herramientas y utensilios, por su poder calorífico; de sus hojas se extraen tintes, y son empleadas para el alivio de dolores reumáticos (Reyes, 2018). Cabe resaltar que sus bosques han sido muy degradados por la ampliación de la frontera agrícola.

Figura 01 *Ejemplar de Escallonia resinosa Ruiz & Pav. en Huaychao, Acos Vinchos, Ayacucho.*

UTM: 18L 604858 E – 8546041,6 N; Altitud: 3,585 m s.n.m.; Fecha: 15/06/2022.

Elaboración propia.



Figura 02 *Ejemplar de Escallonia resinosa Ruiz & Pav. en Huanta, Ayacucho.*

UTM: 18L 584058 E – 8574669,7 N; Altitud: 3,492 m s.n.m.; Fecha: 27/07/2022.

Elaboración propia.



2.2.3. Nichos

Los muchos y diversos conceptos asociados al término "nicho" han sido durante mucho tiempo fundamentales en el pensamiento ecológico (Chase & Leibold, 2003). Actualmente el término ha experimentado un renacimiento, en parte a la de la posibilidad de utilizar grandes bases de datos de ocurrencia de biodiversidad primaria junto con conjuntos de datos geoespaciales. Se usan las variables ambientales para las dimensiones de los nichos de las especies; a partir de esas estimaciones de nicho, se pueden estimar también las áreas potenciales de distribución de especies (Peterson et al. 2011). Este enfoque es el llamado enfoque correlativo de lo que se ha denominado modelado del nicho ecológico (ENM), en situaciones en las que el objetivo es comprender las condiciones que permiten la persistencia de las poblaciones de las especies, o de modelos de distribución de especies (SDM) a fin de conocer la distribución geográfica de la especie (Peterson & Soberón, 2012). Sin embargo, existen otros enfoques para estos retos como la modelización "mecanicista" del nicho (Kearney & Porter, 2009), cuyo objetivo es comprender, mediante enfoques detallados de modelización biofísica, los requisitos ambientales que conforman el nicho fundamental de una especie.

2.2.4. Las formas de respuesta de las especies al medio ambiente

Según la teoría del nicho, la forma de la curva que relaciona la abundancia o la aptitud de las especies con una gradiente ambiental es unimodal (en forma de joroba) y describe los límites de tolerancia superior e inferior, así como un óptimo (tendencia central). Sin embargo, las especies de una comunidad suelen mostrar un patrón de recambio a lo largo de una gradiente, y

este patrón se asume en muchos métodos de análisis de comunidades multivariantes. Hay apoyo empírico para curvas de respuesta sesgadas o incluso no unimodales en las que las especies alcanzan límites fisiológicos de crecimiento y supervivencia en el extremo más duro de una gradiente, o están limitadas por la competencia en el extremo mejorable (Whittaker, 1967).

2.2.5. Modelos geográficos y teoría de las variables predictoras

Existen dos modelos conceptuales contrastantes utilizados para representar datos geográficos (Goodchild, 1994). En la vista "campo", el valor preciso de las variables geográficas se puede medir en cualquier ubicación, y la "geografía" se puede representar como un campo multivariante o vectorial. Aunque este es un marco útil para muchos tipos de modelado, no se adapta fácilmente a todos los fenómenos geográficos que interesan a los científicos espaciales. En la vista contrastante de "entidad", la geografía se representa como un espacio vacío que contiene varios objetos o características discretas (entidades), como picos de montañas, valles atmosféricos de baja presión, perímetros de cicatrices de incendio u ocurrencias de especies. La elección de los factores ambientales (abióticos) que afectan la distribución de las especies, los regímenes ambientales primarios de luz, disponibilidad de agua, suma de calor y nutrientes, describen una jerarquía espacialmente anidada de procesos que controlan su distribución para ambientes terrestres, desde distribuciones globales de radiación solar (control del clima) y litologías del sustrato geológico, hasta la topografía local que modera los patrones de calor y humedad a meso escala, y finalmente plantar coberturas artificiales alterando esos patrones a micro escala. Aunque este marco se ha aplicado de manera más efectiva para las especies de plantas (Mackey & Lindenmayer 2001).

2.2.6. Datos de las especies

En un SDM, las observaciones de la especie forman la respuesta, es decir, la variable dependiente cuya variación podría ser descrita por los predictores (Guisan & Zimmermann, 2000). Para una sola especie, estos pueden ser recuentos, estimaciones de cobertura-abundancia o registros de presencia-ausencia o solo presencia, y existen métodos de modelado y validación para todos estos tipos de respuesta. En esta sección, quedará claro que existe una fuerte interacción entre las características de los datos de la especie y el método de modelado porque se desarrollan muchas variaciones en los métodos para tratar con las realidades de los datos (Phillips et al., 2006).

2.2.7. Datos solo de presencia

Los datos de solo presencia se utilizan ahora tan ampliamente que merecen una atención especial, aunque algunos de los problemas cubiertos en esta sección también pueden aplicarse a otros tipos de datos. Existen dos tipos distintos de datos de solo presencia. Los primeros, los datos de radio telemetría, son comunes a los estudios de vida silvestre y se abordan en otro capítulo. A lo que nos referimos aquí como datos de solo presencia, son registros de presencia sin registros acompañantes de sitios inspeccionados pero desocupados, como registros de compilaciones de observaciones, listas de verificación, especímenes de herbarios y museos, y así sucesivamente. Los datos de solo presencia se utilizan cada vez más para SDM porque a menudo son la única fuente de información sobre la ubicación de las especies. Su calidad y características particulares varían según su origen (Elith et al., 2006).

2.2.8. Interacciones y alteraciones bióticas

Las interacciones y perturbaciones bióticas, entre las especies y los datos ambientales, afectan los registros de especies, pero también pueden considerarse variables predictoras. El uso de SDM para predecir los efectos del cambio climático y las especies invasoras han revitalizado los esfuerzos para incluir interacciones bióticas en los modelos porque son claramente una de las realidades ecológicas que afectarán sustancialmente las distribuciones futuras de las especies (Wisniewski et al., 2013). Hay un alcance limitado en los modelos de distribución de especies basados en correlación para tratar limpiamente las interacciones bióticas porque esas interacciones han afectado la distribución de los datos de las especies, y rara vez hay evidencia independiente de lo que habría ocurrido si se eliminaran esos efectos (competencia, mutualismo, facilitación) (Meier et al., 2011).

2.2.9. Datos ambientales

En la actualidad existen crecientes volúmenes de datos geoespaciales disponibles para grandes partes del mundo, muchos de ellos derivados de la teledetección (Skidmore et al., 2011), estos datos no necesariamente describen los factores ambientales más proximales que limitan la distribución y abundancia de las especies; tampoco están siempre disponibles a escalas relevantes para la especie. Además, el conocimiento detallado de los factores proximales que limitan la distribución de las especies no está disponible para la mayoría de las especies. En cambio, los análisis SDM a menudo modelan muchas especies, y se utiliza un conjunto común y conveniente de predictores disponibles (Elith & Leathwick, 2009). Estos predictores con frecuencia

incluyen descriptores del clima, entornos terrestres, hidrología en ecosistemas acuáticos y batimetría, productividad y temperatura del medio marino (Guisan & Thuiller, 2005). El desafío en SDM es desarrollar un conjunto de predictores candidatos que probablemente tengan una relación proximal con la distribución de las especies. Esto a menudo implica aplicar una transformación o modelo, a veces complejo, a las variables mapeadas (Dormann et al., 2013).

2.2.10. Modelos de nichos ecológicos

Los modelos de nicho ecológico (ENM), son acercamientos empíricos al nicho ecológico de una especie, los ENM relacionan datos espaciales o fisiológicos con variables ambientales; mediante métodos estadísticos logran describir, comprender o predecir la distribución de una especie (Elith & Leathwick, 2009). Dicho modelo matemático representa en un mapa geográfico la idoneidad del hábitat y la ocurrencia de la especie (Graham & Kimble, 2019).

2.2.11. Huella humana

La huella humana (Human Footprint) es un indicador compuesto que cuantifica la presión ejercida por las actividades antropogénicas sobre los ecosistemas terrestres. Este índice integra múltiples variables como la densidad poblacional, el uso del suelo, la infraestructura de transporte, los accesos viales, los asentamientos humanos, las luces nocturnas y la fragmentación del hábitat (Sanderson et al., 2002; Venter et al., 2016). La huella humana ha sido ampliamente utilizada como una métrica proxy del grado de transformación de los paisajes naturales, permitiendo evaluar los niveles de impacto humano sobre la biodiversidad y los servicios ecosistémicos (Wan et al., 2019). En el contexto del modelado de distribución de especies, la inclusión de la huella humana

permite ajustar la predicción de idoneidad en función del grado de alteración del hábitat. Este enfoque facilita una zonificación más realista y aplicable en escenarios de conservación, restauración o manejo del riesgo ecológico, especialmente en regiones de alta vulnerabilidad ambiental (Hirsh et al., 2022).

2.3. Definición de términos

- Andes peruanos: es una región geográfica con diversidad ecológica por su variabilidad altitudinal y climatológica, por lo que se tiene interacciones entre distintas especies (Salaverry, 2006).
- Áreas Potenciales: las áreas potenciales son los contextos de desarrollo que permiten un crecimiento, ya sea cultural, económico, político, social, ambiental. (Castro, 2018).
- Conservación: se basa en la protección y preservación de las especies, de ecosistemas que son fundamentales para el funcionamiento y sostenibilidad de la naturaleza (Soulé, 2012).
- Distribución Potencial: es un área geográfica donde las condiciones del nicho fundamental de una especie son expresadas, donde su ambiente abiótico es adecuado para su sobrevivencia (Soberon & Peterson, 2005).
- ENMeval: paquete de software desarrollado en R, empleado para evaluar modelos de nicho ecológico y para el modelado de distribución de especies (Kass et al., 2021).
- *Escallonia resinosa*: especie de planta que pertenece a la familia Escalloniaceae, nativa de América del Sur (Sede & Denham, 2018).

- Espacio Ambiental: el espacio ambiental es entendido como “La cantidad máxima de recursos naturales que podemos usar sosteniblemente y sin violar la justicia global” (Spangenberg, 2002).
- Espacio geográfico: “Debe considerarse como un conjunto indisociable en el que participan, por un lado, cierta combinación de objetos geográficos, objetos naturales y objetos sociales, y por el otro, la vida que le colma y anima, es decir, la sociedad en movimiento. El contenido (la sociedad) no es independiente de la forma (los objetos geográficos), y cada forma encierra una fracción de contenido. El espacio, por consiguiente, es un conjunto de formas, cada una de las cuales contiene fracciones de la sociedad en movimiento” (Tibaduiza, 2008).
- Favorabilidad: la combinación de diferentes variables ambientales que favorecen la presencia de una especie por encima de su prevalencia general en un área de estudio (Sillero et al., 2021).
- Gestión ecológica: se orienta a conservar las condiciones dinámicas de los sistemas naturales, donde se asegura la preservación de todos los elementos que los integran, como su estructura, la diversidad genética y sus procesos fundamentales que los caracterizan (Kaufmann et al., 1994).
- Huella humana: son las modificaciones resultantes de las actividades antrópicas en el medio ambiente, estos efectos generan cambios y alteraciones en los ecosistemas (Correa et al., 2020).
- Idoneidad ambiental: es el grado en el que un ambiente ofrece las condiciones necesarias para la sobrevivencia, crecimiento y reproducción de las especies (Phillips et al., 2006).

- Máxima entropía: permite la elección de la distribución probabilística que representa de la forma más adecuada la información disponible, procurando que sea la opción con menor sesgo frente a las restricciones establecidas (Conrad, 2015).
- MaxEnt: es un algoritmo basado en el principio de la distribución potencial estimada de una especie a partir de las variables ambientales donde fue registrada (Ferrer, 2012). Es una herramienta de modelado de distribución de especies basado solo en datos de presencia usando el principio de máxima entropía (Phillips et al., 2004).
- Modelo de distribución: son modelos asociados con datos de ocurrencia de especies individuales sumado a la información de características ambientales de esas ubicaciones (Elith & Leathwick, 2009).
- Modelado de nicho ecológico: proceso donde un área definida, es caracterizada en cada celda según los datos de presencia (Peterson et al., 2011).
- Nicho Ecológico: es una unidad de distribución más pequeña, dentro de la cual, cada especie se mantiene debido a sus limitaciones instintivas y estructurales. (Grinnell, 1917).
- Nicho Fundamental: conjunto de condiciones que permiten la persistencia de especies en un hábitat determinado para la sobrevivencia y reproducción (Soberon & Peterson, 2005).
- Precipitación: es agua líquida o sólida formada en la atmósfera que regresa a la superficie terrestre en forma de lluvia o en sus demás formas. Esta caída es lo que se conoce como precipitación y se lleva a cabo de forma natural en la Tierra una y otra vez (Linsley et al., 1982).
- Principio de máxima entropía: se postula que de todas las distribuciones de probabilidad compatibles con la información disponible que se tiene, la más

adecuada es aquella que maximiza la entropía bajo restricciones conocidas (Jaynes,1957).

- Restauración ecológica: proceso de asistencia en la recomposición de un ecosistema que ha sido degradado, dañado o destruido (Ceccon, 2013).
- Temperatura: es una magnitud enlazada a los conocimientos comunes de calor o frío, físicamente es una magnitud escalar. Así, en la escala microscópica, la temperatura se limita como el promedio de la energía de las agitaciones de una partícula individual por grado de libertad (Maxwell, 1879).

III. Metodología

3.1. Tipo y nivel de investigación

La investigación fue de tipo aplicada ya que se empleó diferentes estudios científicos a fin de conocer las áreas potenciales de conservación para la especie *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav., el método que se usó fue de presencia - fondo, ya que se comparó las condiciones ambientales y las condiciones que utilizó la especie (Hirzel & Guisan, 2002), representado por su ocurrencia, dando el resultado de los índices de idoneidad del hábitat de la especie (Sillero, 2011). La investigación fue de nivel exploratorio, ya que no se contó con la suficiente información de la distribución de la especie y obtuvo premisas para investigaciones futuras o para la toma de decisiones a futuro.

El diseño elegido fue no experimental, ya que no se manipuló la variable independiente, se correlacionaron sus componentes y se seleccionaron las que tienen mayor correlación, dichos componentes se usaron en el modelo para predecir la distribución de la especie (Sampieri et al., 2014).

3.2. Ámbito temporal y espacial

La investigación se proyectó en los Andes peruanos, una región donde *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. ha sido documentada en diversos ecosistemas según nuestra revisión bibliográfica. Su distribución altitudinal varía a partir de los 1500 msnm, abarcando áreas de bosques montanos, bosques relictos mesoandinos, bosques relictos altoandinos, ceja de selva y puna húmeda. Estas zonas presentan condiciones climáticas variables, con temperaturas medias anuales entre 6 y 14 °C, y precipitaciones que pueden superar los 1000 mm anuales. Esta área de estudio ha sido seleccionada debido a:

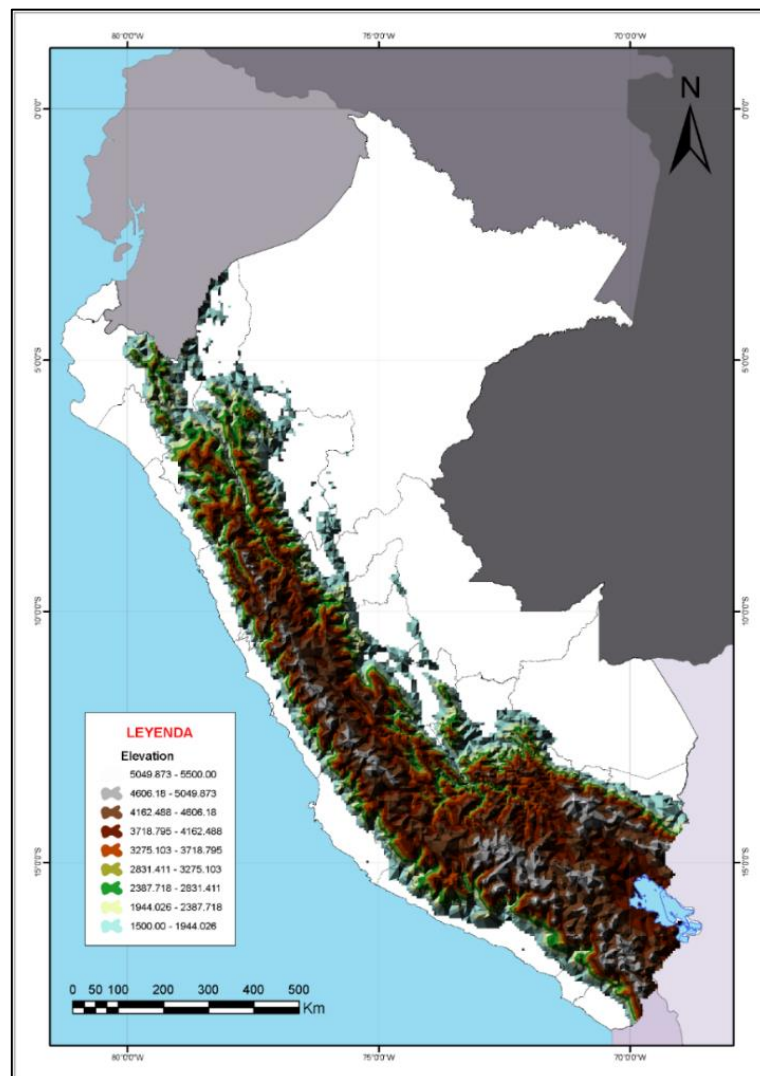
- La distribución confirmada de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. en estos ecosistemas altoandinos.

- La importancia ecológica de estos bosques en la regulación hídrica y la conservación de biodiversidad.
- La degradación de estos hábitats debido a la deforestación y el cambio de uso del suelo.
- La falta de estudios previos sobre su nicho ecológico y su distribución potencial.

El estudio permitió identificar las áreas más idóneas para la gestión ecológica de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. en los Andes peruanos, facilitando la toma de decisiones en gestión ambiental y planificación de estrategias de reforestación.

Figura 03 Mapa de rangos altitudinales del área de estudio

Elaboración propia.



3.3. Población y muestra

La población en este estudio comprendió los árboles de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. registradas en las diferentes bases de datos en línea, como herbarios y registros científicos, así como aquellos muestreados directamente en campo. Esta población incluye los ejemplares de la especie que habitan en una franja altitudinal que varían a partir de los 1500 msnm a los 5500 msnm.

La muestra utilizada en este estudio consistió en 44 registros georreferenciados de presencia de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. a lo largo de los Andes Peruanos, los cuales fueron seleccionados tras un proceso riguroso de depuración y filtrado espacial. Inicialmente, se recopiló una base de datos cruda compuesta por 126 registros provenientes de herbarios digitales, bases de datos científicos y observaciones de campo; posteriormente, se aplicó una etapa de validación geográfica y taxonómica que redujo el conjunto a 95 registros válidos. Finalmente, con el objetivo de evitar la redundancia espacial y minimizar la autocorrelación entre puntos cercanos, se aplicó un filtrado basado en la distancia mínima de 1 km² entre registros, este procedimiento dejó como resultado 44 registros independientes, que fueron utilizados como muestra definitiva para la calibración y validación del modelo ecológico. Esta muestra final representa adecuadamente la distribución geográfica y altitudinal de la especie, asegurando al mismo tiempo la independencia espacial necesaria para una modelación robusta.

3.4. Instrumentos

Para el desarrollo de esta investigación, se usó una combinación de instrumentos tanto de gabinete y campo, complementados con el uso de herramientas tecnológicas y software especializados. Estos instrumentos fueron seleccionados estratégicamente para garantizar la recolección y el análisis riguroso de los datos requeridos para el modelado

del nicho ecológico y la identificación de áreas de conservación de la especie *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav.

3.4.1. Instrumentos usados en gabinete

En primer lugar, se recurrió a la revisión de literatura científica, consulta de bases de datos botánicas, herbarios digitales y colecciones de literatura gris, con el objetivo de recopilar los registros de datos de presencia de la especie. Esta información fue sistematizada en una data frame usando el software RStudio.

Tabla 2. Plataformas digitales utilizadas para la obtención de registros de presencia de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav.

Banco de datos online	
Gbif	https://www.gbif.org/es/
iNaturalist	https://www.inaturalist.org/
Jardín Botánico de Missouri	https://www.tropicos.org/home
Plants of the World Online (POWO)	https://powo.science.kew.org/
Herbarios digitales	
Herbario Virtual Austral Americano	https://herbariovaa.org/imagelib/index.php
Herbario Virtual MOLF	https://forestales.lamolina.edu.pe/facultad/herbario_virtual/

Fuente: Propia

Para caracterizar las condiciones ambientales que determinan la presencia de la especie, se usaron diferentes bases de datos de factores ambientales publicados y usados en red por diferentes investigadores.

Tabla 3. Fuentes de datos ambientales utilizados para el modelado de distribución de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav.

Factor climático	Precipitación	MOD11C3 V. 6.0 Precipitación CHIRPS V. 2.0 resolución de 0.05°	https://vdeblauwe.wordpress.com/download/
-------------------------	---------------	---	---

	Temperatura máxima	Datos PISCO t v1.1 resolución 0.1°	https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.SENAMHI/.HSR/.PISCO/?Set-Language=es
	Temperatura mínima		
Factor topográfico	Desnivel topográfico	USGA Eros Archive – Digital Elevation Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc – Second Global resolución de 0.05	https://cmr.earthdata.nasa.gov/search/concepts/C1220567890-USGS_LTA.html
	Aspecto		
	Pendiente		
Factor geológico	Grupos geológicos	Regional Geology Geoprocessing Geological mapping South America Vector Data resolución de 0.05°	https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/21606
Factor suelo	Grupos de suelo	ISRIC World Soil Information – SoilGrids	https://soilgrids.org/

Fuente: Propia

Para el modelado del nicho ecológico, se usó el software MaxEnt (Maximum Entropy Modeling), reconocido por su eficacia al trabajar con datos de solo presencia (Merow et al., 2013). Con esta herramienta, se generaron modelos de distribución potencial de la especie, evaluando la idoneidad del hábitat a partir de los datos ambientales seleccionadas.

Con el fin de evaluar y comparar el rendimiento de los modelos generados, se empleó el paquete ENMeval en RStudio (Muscarella et al., 2014). Finalmente, para la identificación de áreas potenciales de conservación, se integró los resultados con los softwares de análisis geoespacial como QGIS y ArcGIS, donde se reclasificaron las zonas de distribución. Se incorporó también el Human Footprint Map de la NASA EARTHDATA (<https://gis.earthdata.nasa.gov/portal/home/item.html?id=048c92f5ce50462a86b0837254924151>), para identificar aquellas áreas menos impactadas por

actividades humanas, priorizando así zonas de alta idoneidad ambiental y baja intervención antrópica.

3.4.2. Instrumentos usados en campo

Además de las herramientas digitales y de gabinete, fue imprescindible el uso de diversos instrumentos y materiales, que permitieron realizar el levantamiento directo de datos de presencia de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. en diferentes localidades altoandinas. Estas salidas de campo se diseñan para complementar y validar los registros obtenidos a través de las bases de datos digitales.

Tabla 4. Instrumentos utilizados para la recolección de datos de presencia de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav.

Bienes duraderos	
<p>Receptor GPS – OREGON 650</p> <p>Para georreferenciar los puntos de presencia en distintas localidades</p>	
<p>Cámara EOS – CANON REBEL T5i</p> <p>Para documentar visualmente la información recolectada</p>	
<p>Binoculares CF WP Global</p> <p>Para identificar a distancia ejemplares de la especie</p>	

Tijera telescópica de acero, 14 “

Para la recolección de muestras botánicas en ramas altas



Workstation

Para el procesamiento de información



Mochila de campo 40l

Para el transporte de muestras colectadas



Prensa botánica

Para conservar las características morfológicas de hojas, flores y ramas



Materiales e insumos

Guantes de látex



Alcohol 96°



Agua destilada



Papel periodico



Fuente: Propia

3.5. Procedimientos

3.5.1. Recolección de datos de presencia

El procedimiento metodológico inició con la recolección de datos de presencia de la especie *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav., los cuales se obtuvieron de diversas fuentes confiables. Por un lado, se accedió a bancos de datos en línea como GBIF, iNaturalist, herbarios virtuales y colecciones de literatura gris.

Tabla 5. Coordenadas geográficas y colectores de registros de presencia de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. de bancos de datos en línea

1	-73.22857	-14.44187	Alwyn H. Gentry, Michael O. Dillon, Paul E. Berry y James Aronson
2	-78.932509	-7.356089	A. Sagástegui A. et al.
3	-79.80833	-5.005556	A. Sagástegui A. et al.
4	-65.921	-15.113472	A. Fuentes
5	-68.69222	-15.63722	Beck St.G,
6	-73.923002	-13.423679	Carpio Luque, Jose
7	-71.844056	-13.407222	Cheryl MCCleary – Catalano
8	-71.88209	-13.59489	C. S. Tobie
9	-76.46	-11.3694	C. Aedo & A. Galán de mera
10	-74.123499	-13.037843	De la cruz Lizarbe Andrea
11	-69.06945	-14.805816	D. Lara
12	-72.28027	-13.16027	Efraín Suclli, Pamela Puppó
13	-65.38333	-18.93333	E. Garcia

14	-71.59694	-13.29722	F. Zapata
15	-71.63278	-13.21306	F. Zapata
16	-71.36889	-14.08222	F. Zapata
17	-72.28	-13.17	F. Zapata
18	-72.29	-13.177222	F. Zapata
19	-72.28028	-13.160278	F. Zapata
20	-77.716667	-9.033333	F. Zapata
21	-71.666667	-13.633333	F. Zapata
22	-72	-17.15	F. Zapata
23	-72.05277	-13.30305	F. Zapata
24	-77.85	-9.45	F. Zapata
25	-77.723336	-9.029188	F. Zapata
26	-78.139722	-8.087778	F. Zapata
27	-77.718154	-9.01803	F. Zapata
28	-77.2	-9.633333	F. Zapata
29	-72.065278	-13.354167	F. Zapata
30	-74.463056	-13.358333	F. Zapata
31	-77.266667	-9.616667	F. Zapata
32	-72.890693	-13.382219	F. Zapata
33	-78.25	-7.833333	F. Zapata
34	-64.626667	-17.845833	F. Zapata
35	-64.783611	-17.827778	F. Zapata
36	-65.024167	-17.751944	F. Zapata
37	-65.417013	-17.603614	F. Zapata
38	-65.001111	-17.746944	F. Zapata
39	-66.041111	-17.409444	F. Zapata
40	-65.4875	-17.792222	F. Zapata
41	-65.473056	-17.81333	F. Zapata
42	-66.180556	-17.320556	F. Zapata
43	-66.220278	-17.268333	F. Zapata
44	-66.25	-17.576111	F. Zapata
45	-64.768056	-17.811389	F. Zapata
46	-64.78	-17.82	F. Zapata
47	-71.12	-13.53	F. Chavez, M. Cornejo
48	-76.801347	-9.22646	Frank Arroyo
49	-72.262347	-13.309285	Frank Arroyo
50	-72.01642	-13.504803	Frank Arroyo
51	-72.54888	-13.46452	Frank Arroyo
52	-72.045003	-13.504752	Frank Arroyo
53	-65.66667	-17.66667	Freire Fierro A.
54	-71.968166	-13.51231	Gianella Curasco Huaman
55	-75.109073	-12.173379	Gurmendi Porras, Chabelly, Orihuela Izaguirre, Witni
56	-75.154167	-12.391667	Huaroc Reza, Ronal Jhony; Porta Borja, Judith Carina
57	-72.078994	-12.485706	I. Treviño Z., W. Delgado, A. Pari, C. Condori & R. Ocampo.
58	-72.171947	-14.221885	Ignacio Torres García
59	-65.15	-17.66667	James C. Solomon y Robert M. King
60	-67.2	-16.9	J. C. Solomon
61	-71.661195	-13.187458	Jared Shorma
62	-67.75	-16.566667	Lesner, R. L.
63	-67.16667	-16.916667	Lewis M. A.
64	-73.039169	-13.535601	Luis Augusto Casas Gallegos
65	-71.87056	-13.520833	M. Ackermann & N. Salinas
66	-64.96666	-17.73333	M. Nee

67	-77.472778	-10.076667	Próspero Rudecindo Gamarra Gómez
68	-77.03153	-10.196022	Ruth Ripley
69	-76.165493	-9.960913	Ruth Ripley
70	-74.10115	-13.048847	Ruth Ripley
71	-77.018675	-10.196153	Ruth Ripley
72	-77.021303	-10.196477	Ruth Ripley
73	-75.26292	-11.92685	Ruth Ripley
74	-66.147825	-17.321165	Ruth Ripley
75	-75.238366	-11.949319	Robinson Daniel Cuadros Rojas
76	-74.724721	-12.979587	Roxana Yanina Castañeda Sifuentes
77	-67.21667	-16.96667	Ronald Liesner
78	-77.441111	1.261389	Rodríguez, M. Vela, N.
79	-75.90611	-9.6211	Ruiz López, H., J. A. Pavón y Jiménez & J. Dombey (Coll. Boissier et Barbey-Boissier)
80	-67.88333	-16.96667	R. Liesner
81	-64.86667	-21.46056	Sede, S.,
82	-68.069006	-16.537681	St. G. Beck
83	-67.55	-16.8167	St. G. Beck
84	-73.932533	-13.429036	Tineo Vargas Vicky Soledad
85	-75.156627	-12.089172	Wilder R. Quispe Rojas
86	-73.0274	5.48079	Yepes A., S.
87	-77.580306	9.555	Yulieth Castillo, Felipe Castaño

Fuente: Propia

Por otro lado, se complementó esta información con muestras recolectadas directamente en campo, en diferentes localidades del departamento de Ayacucho. Estas muestras se recolectaron siguiendo un muestreo aleatorio simple, utilizando herramientas como tijeras de podar, GPS, cámara fotográfica, libreta de campo y prensa botánica. Posteriormente, las muestras fueron enviadas a un taxónomo especializado para su verificación morfológica.

Figura 04 Ejemplar de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. en Iguain, Huanta, Ayacucho.

UTM: 18L 587788,9 E – 8567104,4 N; Altitud: 3,375 m s.n.m.; Fecha: 05/08/2022.

Elaboración propia.



Figura 05 Ejemplar de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. en Chalco, Cangallo, Ayacucho.

UTM: 18L 587043,4 E – 8504854,9 N; Altitud: 3,502 m s.n.m.; Fecha: 10/09/2022.

Elaboración propia.



Figura 06 Ejemplar de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. en Quispicancha, Iguain, Ayacucho.

UTM: 18L 587537,4 E – 8566441,6 N; Altitud: 3,287 m s.n.m.; Fecha: 26/10/2022.

Elaboración propia.



Los registros de presencia pasaron por un proceso de control de calidad de datos, en el que se verificaron tanto la exactitud de las coordenadas geográficas como la confiabilidad de la información asociada a cada punto de recolección (Zizka et al., 2019). Los datos georreferenciados y tratados fueron organizados en formato CSV y procesados en RStudio, bajo el nombre de “occs”.

Tabla 6. Coordenadas geográficas y colectores de registros de presencia de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. colectados en Ayacucho y Abancay

	Longitud	Latitud	Localidad	Fuente
01	-74.27287	-12.81577	Huanta – Orccona	Propia
02	-74.19289	-12.96636	Iguain – Quispicancha	Propia
03	-74.19064	-12.96044	Iguain - Pumahuasi Baja	Propia

04	-74.18808	-12.95597	Iguain - Pumahuasi Media	Propia
05	-74.18281	-12.94961	Iguain - Pumahuasi Alta	Propia
06	-74.03253	-13.15025	Cangallo – Panticcasa	Propia
07	-74.14811	-13.56300	Cangallo - Pantin Bajo	Propia
08	-74.13663	-13.56601	Cangallo – Pantin	Propia
09	-74.19642	-13.52486	Cangallo – Chalco	Propia
10	-74.21708	-13.33231	Chiara - Toccto	Propia
11	-74.22482	-13.31252	Chiara - Toccto	Propia
12	-74.22844	-13.29661	Chiara - Toccto	Propia
13	-74.05625	-13.14025	Acos Vinchos – Paucarpatilla	Propia
14	-74.04869	-13.16903	Acos Vinchos – Ccorimanlla	Propia
15	-74.03067	-13.17578	Acos Vinchos – Ollucupampa	Propia
16	-73.98667	-13.19392	Acos Vinchos – Hallarumi	Propia
17	-73.99508	-13.31094	Acocro – Matara	Propia
18	-74.01517	-13.30275	Acocro - Jullpa Huaycco	Propia
19	-74.03253	-13.15025	Acos Vinchos – Huaychao	Propia
20	-73.927855	-13.387844	Ocros – Chumbe	Propia
21	-72.848671	-13.602542	Tamburco	Propia
22	-72.850684	-13.607915	Colcha	Propia
23	-74.224361	-12.883444	Huanta – Culluchaca	Propia
24	-74.223944	-12.88525	Huanta – Ccaca	Propia
25	-74.223611	-12.888	Huanta - Ccaca baja	Propia
26	-74.22515	-12.892139	Huanta – Ccakanan	Propia
27	-74.229444	-12.898111	Road uchurracall	Propia
28	-74.236194	-12.910583	Huanta	Propia
29	-74.47442	-13.334559	Vinchos – Totorabamba	Propia
30	-74.14975	-12.981639	Huamanguilla	Propia
31	-74.150917	-12.982556	Huamanguilla	Propia
32	-74.152806	-12.984944	Huamanguilla	Propia
33	-74.153944	-12.984844	Huamanguilla	Propia
34	-74.156472	-12.986306	Huamanguilla	Propia
35	-74.156639	-12.985028	Huamanguilla	Propia
36	-74.162444	-12.991889	Huamanguilla	Propia
37	-74.164972	-12.994806	Huamanguilla	Propia
38	-74.169972	-13.008028	Huamanguilla	Propia
39	-74.182361	-13.020889	Huamanguilla	Propia

Fuente: Propia

3.5.2. Recolección de factores ambientales

Para el desarrollo del modelo de distribución de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav., fue fundamental recopilar, procesar y estandarizar un conjunto de factores ambientales que influyen en su nicho ecológico. Estas variables se agruparon en cuatro grandes categorías: factores climáticos, topográficos, geológicos y edáficos. A continuación, se detalla el procedimiento seguido para cada uno:

a) Factores climáticos

Los factores climáticos constituyeron uno de los pilares del modelado, ya que definen las condiciones climáticas bajo las cuales la especie puede sobrevivir y desarrollarse (Hijmans et al., 2005). Para este estudio, se descargaron variables climáticas de distintas fuentes confiables y de alta resolución:

Temperatura

A partir del producto PISCOt v1.1, se extrajeron las capas correspondientes a temperatura media, máxima y mínima para cada uno de los doce meses del año. Este enfoque mensual permitió captar de manera detallada la estacionalidad térmica, proporcionando un conjunto de datos robusto y representativo del entorno donde se distribuye la especie *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. Las capas utilizadas poseen una resolución espacial de 0.1° , adecuada para estudios ecológicos.

Figura 07 Variación espacial y temporal de la temperatura máxima media en el Perú

Elaboración propia.

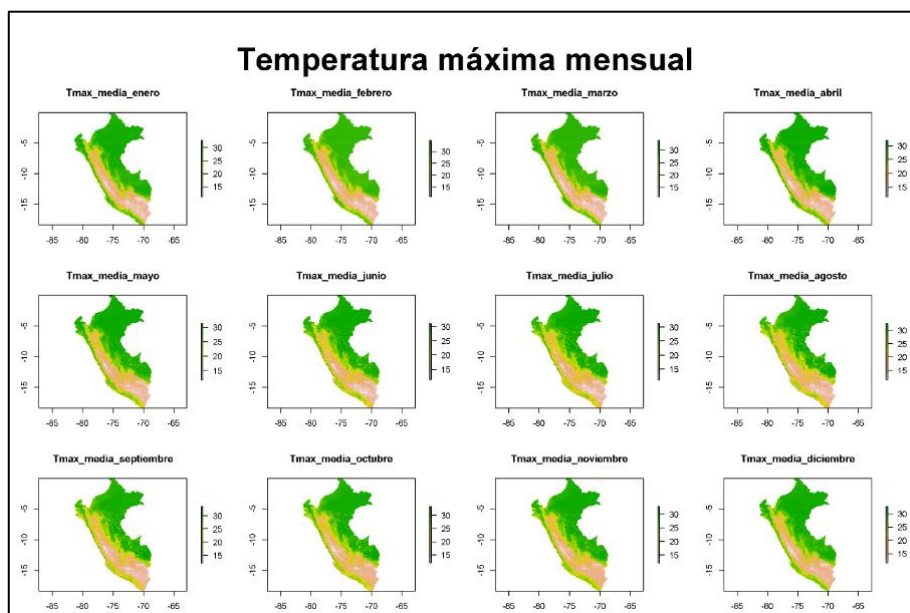
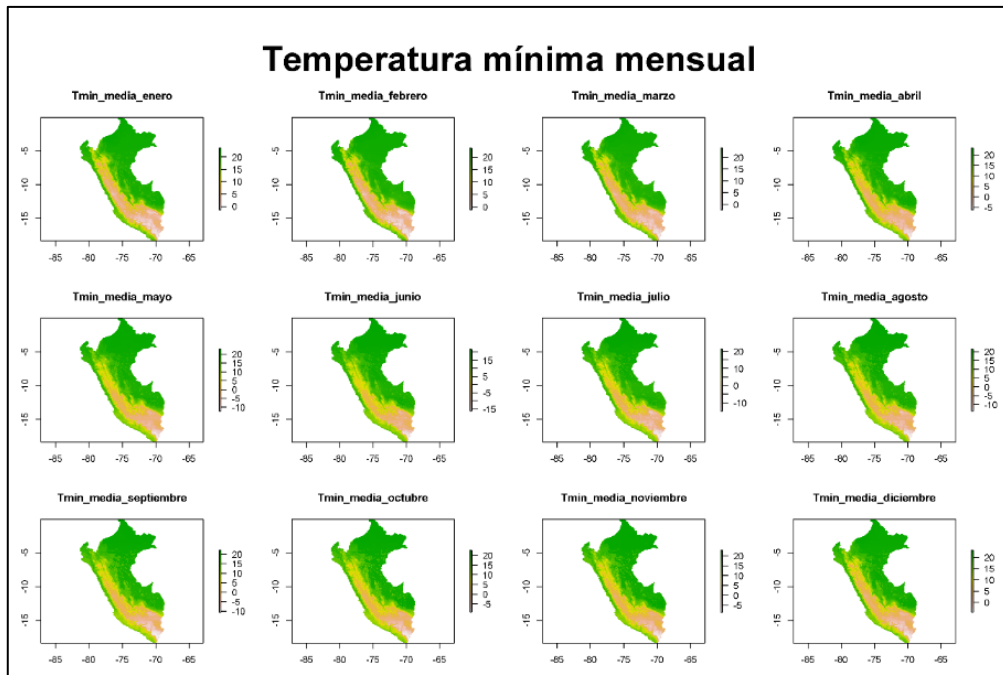


Figura 08 Variación espacio-temporal de la temperatura mínima media en el Perú

Elaboración propia.

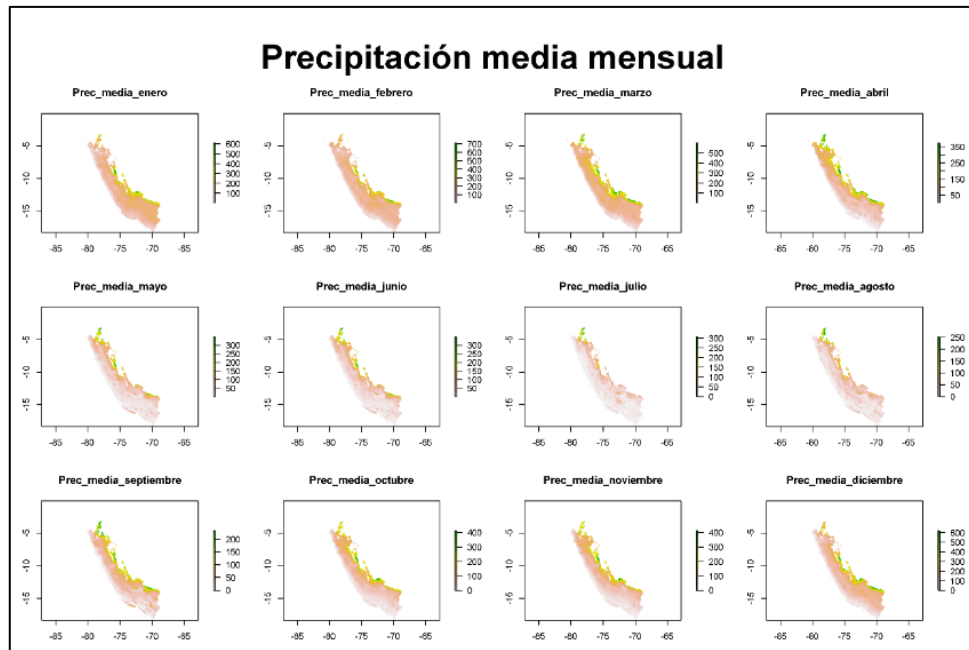


Precipitación

Por otro lado, para representar el régimen hídrico, se usó datos de precipitación provenientes del producto MOD11C3 v6.0, con una resolución de 0.05°, que ofrece información climática mensual a nivel global, derivada de sensores satelitales. Esta base fue seleccionada debido a su cobertura uniforme y su capacidad para detectar variaciones pluviométricas en regiones montañosas con acceso limitado a estaciones meteorológicas. Las capas de precipitación mensual fueron descargadas y utilizadas.

Figura 09 Variación espacial-temporal de la precipitación media en el Perú

Elaboración propia.



b) Factores topográficos

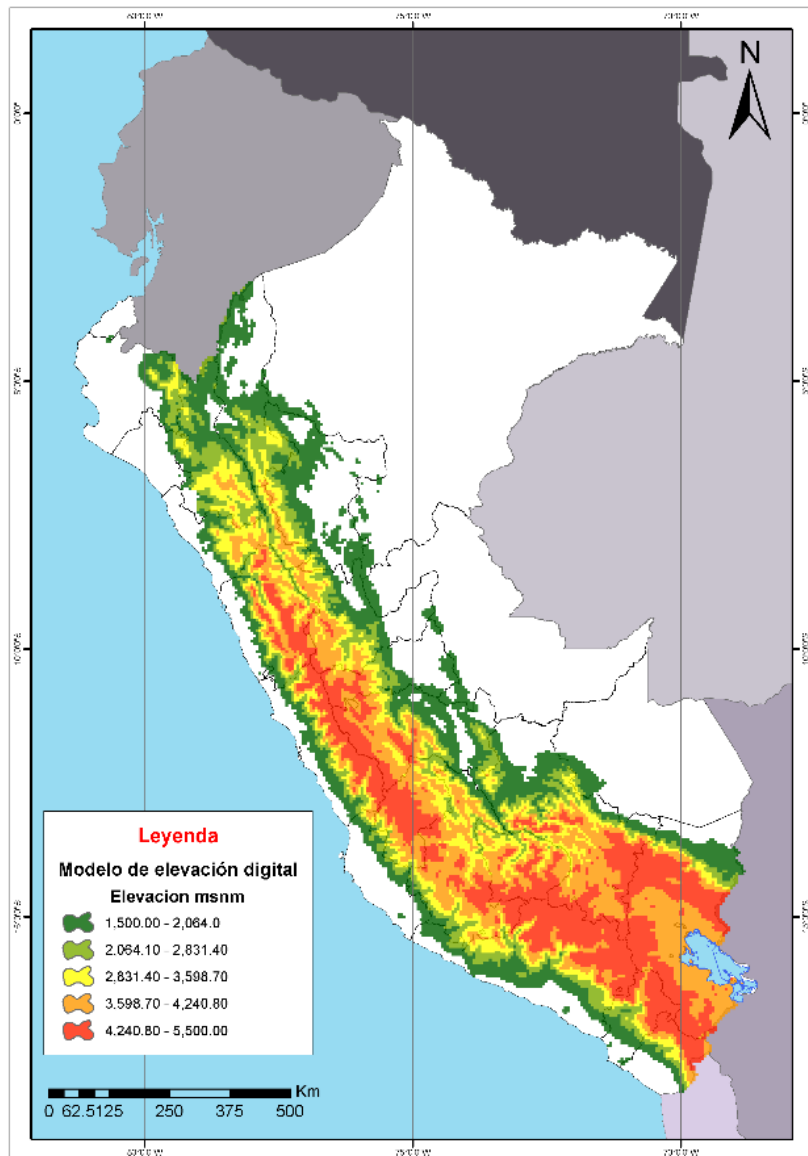
Los factores topográficos desempeñaron un papel fundamental en la construcción del modelo para la especie *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav., ya que en ecosistemas montañosos como los Andes peruanos, la altitud, la pendiente y la orientación del terreno influyen significativamente en la disponibilidad de luz, la retención de humedad, la temperatura y la dinámica de los suelos (Zimmermann & Kienast, 1999). Estas condiciones micro climáticas pueden determinar la presencia o ausencia de especies vegetales altamente especializadas.

Para este estudio, se trabajó con información proveniente del modelo digital de elevación (DEM) generado por la misión Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), el cual ofrece datos con una resolución espacial de 30 metros. Estos datos fueron descargados y procesados directamente en RStudio, utilizando

funciones y herramientas de análisis espacial que permitieron generar variables clave para el modelado.

Figura 10 *Distribución espacial de la elevación en el Perú clasificado en rangos altitudinales*

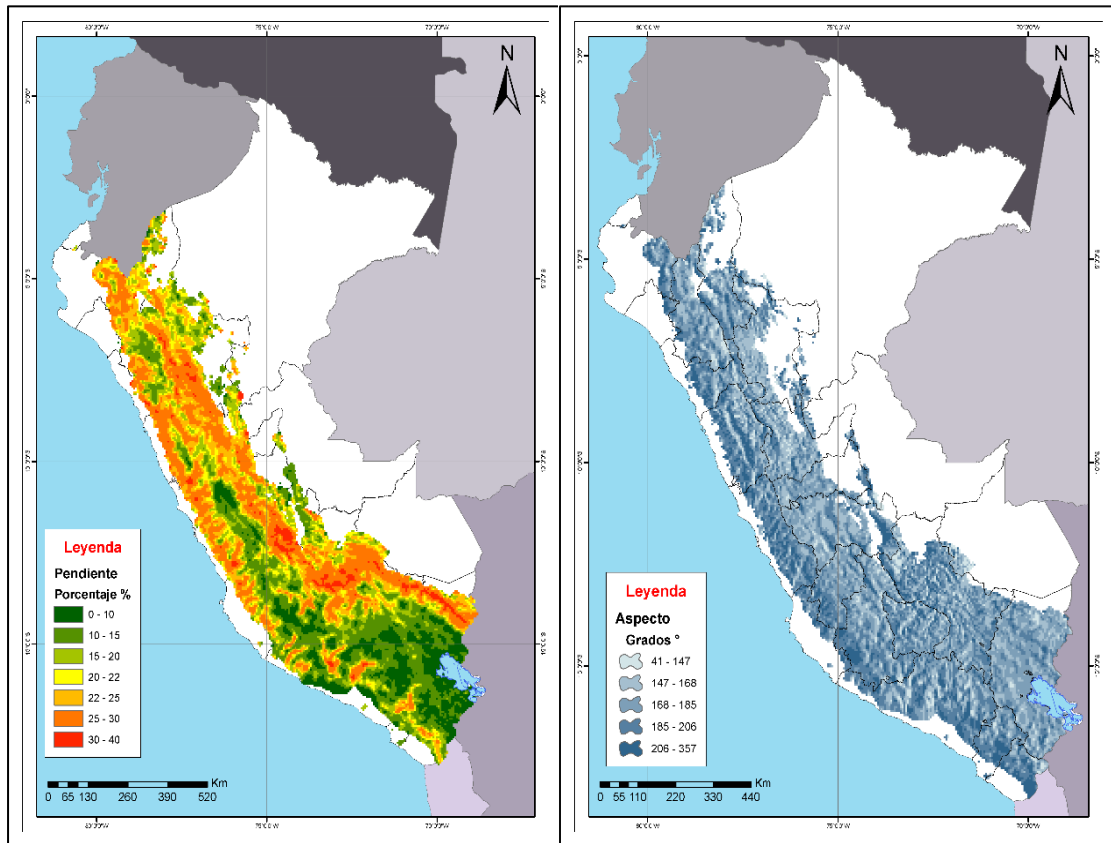
Elaboración propia.



Inicialmente, se cargó la capa base de altitud utilizando el paquete raster, y a partir de ella se generó dos variables derivadas fundamentales: pendiente y aspecto.

Figura 11 Mapa de pendiente en porcentaje
Elaboración propia.

Figura 12 Mapa de aspecto en grados
Elaboración propia.



c) Factor geológico

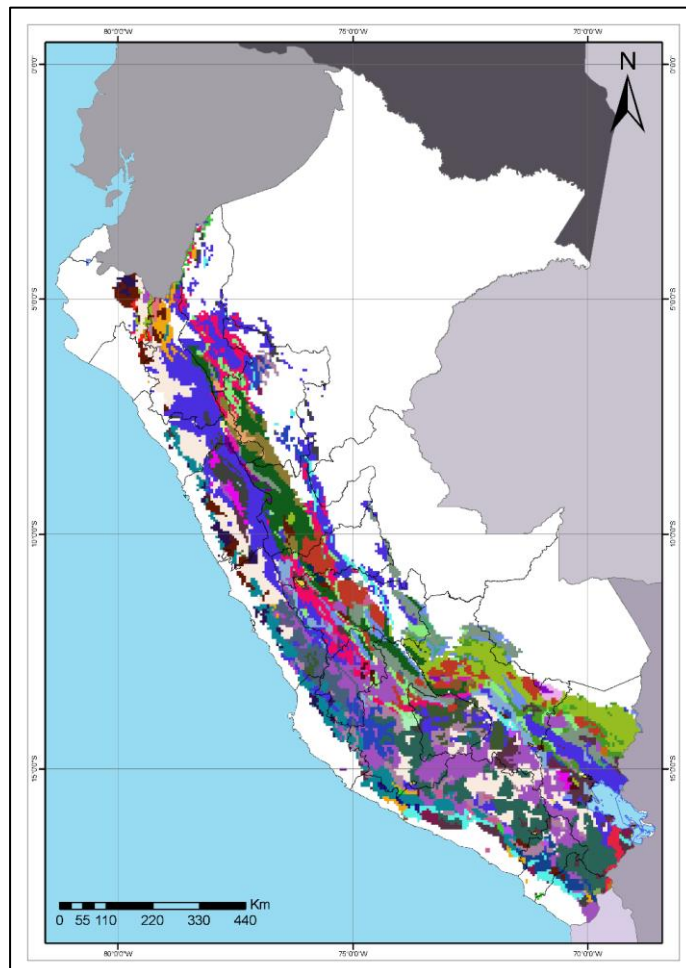
Los factores geológicos fueron incorporados al modelo de distribución ecológica de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. con el fin de representar las características del substrato físico que sustentan los suelos y las comunidades vegetales en los Andes peruanos. La geología de un área influye directamente en la formación del suelo, la disponibilidad de nutrientes, el pH, la capacidad de retención de agua y, por tanto, en la distribución potencial de las especies vegetales (Chadwick & Chorover, 2001).

Para obtener esta información, se utilizó los datos disponibles en la base de datos RIGeo (Repositorio de Información Geológica de América del Sur), una

plataforma especializada que proporciona mapas litológicos y geoestructurales categorizados por regiones. Esta fuente fue seleccionada por su cobertura continental y por la clasificación cualitativa detallada de las unidades geológicas, lo cual resultó útil para incorporar como variable categórica dentro del modelo. Dado que el algoritmo MaxEnt trabaja únicamente con variables numéricas, fue necesario transformar los datos geológicos cualitativos en una codificación numérica. Para ello, se llevó a cabo un proceso de reclasificación categórica, asignando a cada tipo litológico un valor entero específico.

Figura 13 *Mapa de clasificación geológica del territorio peruano según unidades litológicas y formaciones geológicas*

Elaboración propia.



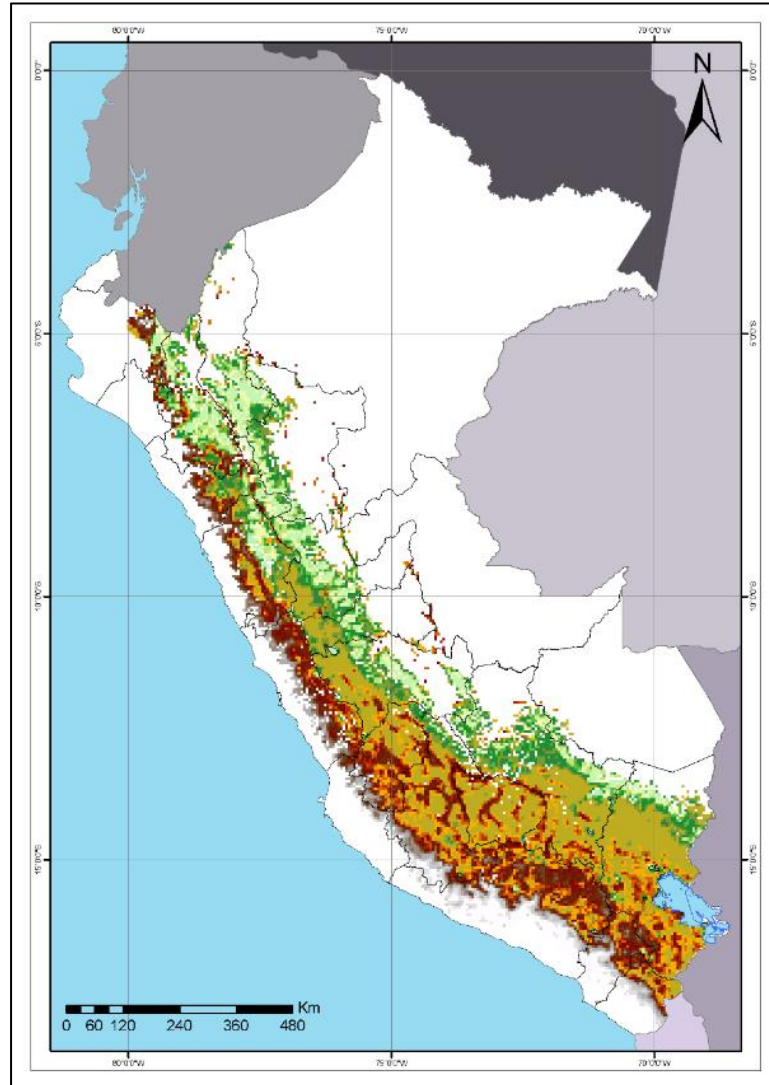
d) Factor edáfico

Los factores edáficos constituyen una dimensión esencial en la modelación de la distribución de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav., ya que el tipo de suelo, su estructura, pH, contenido de materia orgánica y capacidad de retención de agua son determinantes en el establecimiento, crecimiento y distribución de las especies vegetales (Lu et al., 2025). En particular, *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. ha sido documentada en suelos ácidos, poco profundos y con alta proporción de materia orgánica, por lo que incluir estas variables fue clave para una representación más precisa de su nicho ecológico.

Para recopilar esta información, se trabajó con los datos proporcionados por la plataforma SoilGrids, un sistema global de mapeo digital del suelo desarrollado por ISRIC – World Soil Information.

Figura 14 Mapa de clasificación de suelos del territorio peruano según unidades edáficas

Elaboración propia.



3.5.3. Exploración de datos recolectados

Una vez obtenidos y preparados los datos de presencia de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav., junto con los factores ambientales (climáticas, topográficas, geológicas y edáficas), se procedió a realizar una etapa de exploración de datos. Esta fase tuvo como propósito verificar la calidad de la información, su coherencia espacial y su adecuación estadística para el posterior

modelado del nicho ecológico. Esta exploración fue desarrollada en el RStudio, utilizando una combinación de paquetes especializados en análisis espacial y estadístico como raster, terra, sf, sp, rgdal, dismo, ggplot2, rgeos, factoextra, entre otros. En todos los casos, se aseguró que las capas utilizadas fueran resampladas a una resolución espacial de 0.05° y recortadas a la extensión geográfica correspondiente a la distribución potencial de la especie, garantizando uniformidad en la escala y el área de análisis.

a) Generación de las 19 capas bioclimáticas

Como parte del postprocesamiento de las variables climáticas, se realizó la creación del conjunto de 19 capas bioclimáticas (Bio1 a Bio19), las cuales representan métricas ecológicamente relevantes a partir de datos mensuales de temperatura y precipitación. Inicialmente, se apilaron las 12 capas mensuales de precipitación, temperaturas máxima y mínima, utilizando la función stack ().

Tabla 7. Variables bioclimáticas

BIO01	Temperatura media anual
BIO02	Rango medio diario
BIO03	Isotermalidad
BIO04	Estacionalidad de la temperatura
BIO05	Temperatura máxima del mes más cálido
BIO06	Temperatura mínima del mes más frío
BIO07	Rango anual de temperatura
BIO08	Temperatura media del trimestre más húmedo
BIO09	Temperatura media del trimestre más seco
BIO10	Temperatura media del trimestre más cálido
BIO11	Temperatura media del trimestre más frío
BIO12	Precipitación anual
BIO13	Precipitación del mes más lluvioso
BIO14	Precipitación del mes más seco
BIO15	Estacionalidad de la precipitación
BIO16	Precipitación del trimestre más húmedo
BIO17	Precipitación del trimestre más seco
BIO18	Precipitación del trimestre más cálido
BIO19	Precipitación del trimestre más frío

Fuente: Propia

Una vez integrados estos tres bloques mensuales, se usó la función `biovars ()` del paquete `dismo` para generar las 19 capas bioclimáticas, estas capas fueron exportadas como un solo archivo raster multibanda en formato `.tif` bajo el nombre "V_Climaticas02.tif", quedando listas para su análisis.

b) Análisis multivariado de variables ambientales (PCA)

Para reducir la multicolinealidad entre los factores ambientales y evitar la redundancia en el modelo, se realizó un Análisis de Componentes Principales (PCA). Esta técnica estadística transformó las variables originales en un nuevo conjunto de componentes principales no correlacionados que sintetizan la variabilidad ambiental del área de estudio (Liu et al., 2018).

El análisis fue aplicado sobre las 19 capas bioclimáticas previamente generadas, a las que se añadieron los factores topográficos de aspecto, pendiente y elevación. Estas capas fueron agrupadas en un solo objeto tipo `stack` y renombradas para facilitar su manejo. El PCA fue ejecutado mediante la función `rasterPCA ()` con estructura espacial preservada (`spca = TRUE`). Los componentes seleccionados fueron exportados como capas raster para su uso como predictores en el modelado y la data fue guardada con el nombre de "PCAs_DEM2.nc".

c) Autocorrelación espacial

Una vez definidos los predictores derivados del PCA, se verificaron los registros de presencia de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. Se importaron los datos en formato `CSV`, asegurando que estuvieran correctamente proyectados y depurados. Posteriormente, se aplicó un proceso de autocorrelación espacial, con el fin de evitar redundancias y dependencia entre puntos cercanos que pudieran distorsionar el análisis.

La autocorrelación espacial es una propiedad que describe el grado de similitud de un atributo geográfico en función de la distancia entre los puntos de muestreo. Cuando los valores de una variable son más similares entre sí cuanto más próximos están geográficamente, se dice que existe una autocorrelación espacial positiva. Este fenómeno puede influir en la inferencia estadística de modelos ecológicos si no se controla adecuadamente (Legendre, 1993). Se usó la técnica del entropograma espacial (entrograma), que mide la entropía asociada a las diferencias de valores entre puntos a distintas escalas espaciales (Wang & Zhao, 2018), y el índice global de Moran I, que cuantifica el nivel de dependencia espacial general (Moran, 1950, como se citó en Tillé et al., 2018).

Para analizar la dependencia espacial de los factores ambientales utilizados en el modelado, se realizó un análisis de autocorrelación espacial mediante la técnica del entrograma, el cual permitió evaluar el grado de autocorrelación en función de la distancia geográfica entre puntos de presencia.

Inicialmente, se cargaron las capas ambientales resultantes del análisis de componentes principales (PCA), así como las capas categóricas de geología y suelo, agrupándolas en un único objeto stack denominado env. Cada capa fue renombrada como PCA_01, PCA_02, PCA_03, PCA_04, GEOL y SOIL.

Luego, se importó la base de datos de presencia de la especie y se extrajeron las coordenadas geográficas de cada punto. Para evitar redundancia espacial por registros ubicados en la misma celda raster, se usó el número de celda (cellFromXY) para eliminar duplicados. Posteriormente, se ajustaron las coordenadas espaciales y se extrajeron los valores ambientales correspondientes a cada punto.

Para determinar los rangos de análisis, se estimaron la distancia mínima (dm) y máxima (dM) entre los registros mediante la función `georange ()` del paquete `geodist`, basada en la fórmula de Haversine. A partir de dichas distancias, se construyó una matriz de distancias geográficas entre todos los puntos, y se excluyeron aquellas localidades ubicadas a menos de 25 km entre sí, con el propósito de minimizar la sobreestimación de la autocorrelación espacial.

Se empleó la función `entrogram ()` del paquete `elsa` para calcular la entropía espacial de cada variable, utilizando tanto el conjunto completo de registros como el conjunto filtrado (<25 km). Los resultados fueron almacenados en objetos tipo `data frame`, incluyendo una columna adicional que indicaba el conjunto de análisis correspondiente (“All” o “25 km <”). Asimismo, se calculó el índice global de Moran (I) mediante la función `moran ()`, considerando el rango de distancias determinado por dM.

Finalmente, se generaron gráficos tipo entrograma con el apoyo del paquete `ggplot2`, a fin de comparar los patrones de autocorrelación espacial antes y después del filtrado. En cada gráfico se incorporaron anotaciones con el nombre de la variable analizada y los valores del índice de Moran (I). Este análisis permitió una mejor comprensión del comportamiento espacial de las variables, facilitando la toma de decisiones más fundamentadas para el modelado ecológico.

3.5.4. Configuración del modelado

Para estimar la distribución potencial de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav., se utilizó el paquete `ENMeval` versión 2.0.1. en el entorno de `RStudio`, el cual facilita la implementación de modelos de nicho ecológico con el algoritmo `MaxEnt`, permitiendo la evaluación de múltiples combinaciones de parámetros y

el control del sobreajuste mediante regularización. Se configuró un esquema de calibración cruzado que incluyó tres tipos de funciones de características (fc), específicamente lineales (L), cuadráticas (Q) y de producto (P), combinados con cinco valores del multiplicador de regularización (rm), en el rango de 1 a 5. Esta combinación generó un total de quince configuraciones de modelos distintos. Las capas ambientales, previamente estandarizadas y recortadas, se utilizaron para extraer los valores ambientales en dos conjuntos de datos: los registros de presencia definitiva de la especie (“occs”) y una muestra aleatoria de 10,000 puntos de fondo (“bg1”), generados dentro del área de estudio. A cada uno se le extrajeron los valores ambientales desde el objeto (“env”). Asimismo, se utilizó la función `set.seed (123)` para garantizar la reproducibilidad de los resultados. Posteriormente, se ejecutó la función `ENMevaluate ()` configurando el método de partición “randomkfold” con cinco particiones, lo que permitió realizar una validación cruzada robusta del rendimiento predictivo de cada modelo.

3.5.5. Selección de modelo

Una vez generadas las 15 configuraciones de modelado, se aplicaron dos estrategias para seleccionar el modelo final. La primera consistió en identificar el modelo más parsimonioso con el menor AICc, favoreciendo así un equilibrio entre buen ajuste y simplicidad. La segunda estrategia aplicó criterios secuenciales, priorizando aquel modelo con la menor tasa de omisión al percentil 10, y en caso de empate, el mayor AUC de validación.

El modelo óptimo identificado, debe presentar un buen ajuste, bajo sobreajuste y aceptable capacidad predictiva. Para este modelo, se extrajeron los coeficientes de regularización (betas), los cuales reflejan la contribución de cada

variable ambiental en la predicción de idoneidad del hábitat. Asimismo, se generaron curvas de respuesta marginales utilizando la función de enlace cloglog, con el objetivo de visualizar la influencia individual de cada variable sobre la probabilidad estimada de presencia de la especie.

Los resultados del modelo final fueron exportados en formato GeoTIFF, incluyendo mapas de predicción continua (“Distribucion_Potencial_Escallonia”), los cuales resultan compatibles con sistemas de información geográfica (SIG) para análisis espacial posterior. Además, se documentaron todos los parámetros y decisiones metodológicas en un objeto tipo `rangeModelMetadata`, el cual fue exportado como archivo `.rds`, con el fin de asegurar la trazabilidad y reproducibilidad del proceso de modelado.

3.5.6. Selección de umbrales de corte

Con el modelo final seleccionado, se procedió a determinar un umbral de corte (`threshold`) que permitiera transformar la salida continua en un mapa binario de presencia/ausencia. Para ello, se extrajeron los valores de idoneidad del mejor modelo en dos conjuntos: (i) los puntos de presencia (`occs`) y (ii) los 10,000 puntos de fondo (`bg1`).

Se utilizó la función `evaluate ()` del paquete `dismo`, la cual permite calcular diversas métricas de validación y generar umbrales de corte basados en criterios estadísticos y ecológicos. Entre los umbrales calculados se incluyeron: `kappa`, `spec_sens`, `no_omission`, `prevalence`, `equal_sens_spec` y `sensitivity`.

De todos ellos, se seleccionó el umbral basado en el criterio `equal_sens_spec`, ya que ofrecía un equilibrio entre sensibilidad (verdaderos positivos) y especificidad (verdaderos negativos), especialmente útil para

especies con registros dispersos o escasos (Liu et al., 2013), aplicando este umbral, se generó un nuevo raster binario, en el cual todas las celdas con valores mayores o iguales al umbral seleccionado fueron clasificadas como presencia, mientras que las restantes se asignaron como ausencia.. Este raster fue exportado en formato GeoTIFF, para su posterior uso en el análisis espacial de identificación de zonas prioritarias.

3.5.8. Validación de modelo

La validación del modelo óptimo, se realizó mediante la comparación espacial entre el mapa binario de distribución potencial y un conjunto de registros de presencia confirmada recolectados de forma independiente. Estos puntos, obtenidos en campañas de verificación en campo, no fueron utilizados en la calibración inicial del modelo y sirvieron como insumo externo para validar su capacidad predictiva.

3.5.7. Clasificación y reclasificación

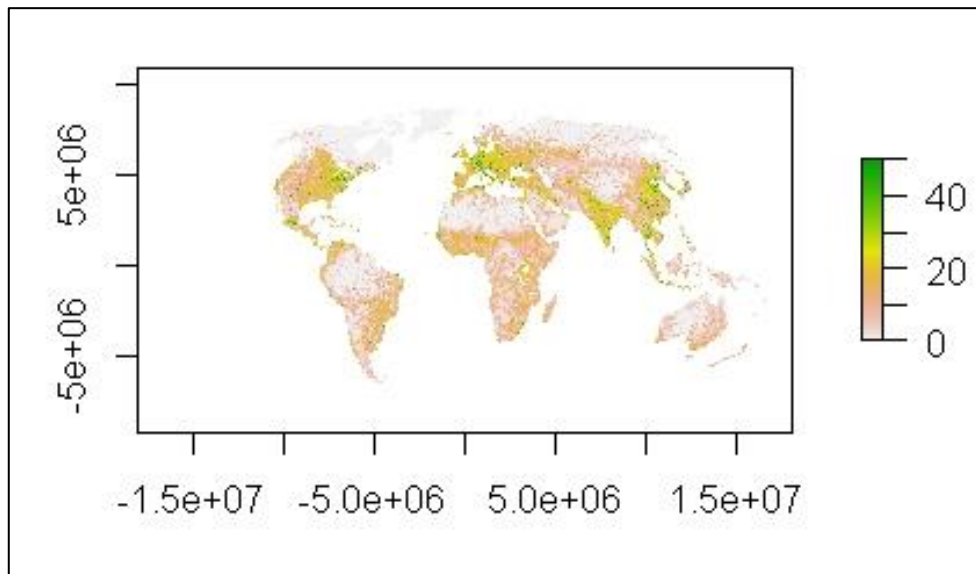
Con el fin de incorporar el componente de presión antrópica en el análisis espacial de la distribución potencial de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav., se trabajó con el conjunto de datos de Huella Humana Global, el cual proporciona estimaciones anuales de la huella humana a nivel mundial desde el año 2000 hasta 2018 (Mu et al., 2022). Este dataset sintetiza ocho presiones humanas, la capa fue descargada en formato raster, con resolución espacial de 1 km, y corresponde al año 2022, último año disponible en la serie (Venter et al., 2016; Betts et al., 2017, como se citó en Mu et al., 2022). Una vez descargada la capa raster, se reescaló la resolución y se reproyectó al sistema de coordenadas geográficas WGS84 para asegurar consistencia espacial. Con el fin de facilitar el análisis e interpretación

de los resultados, se reclasificó la capa de huella humana en tres categorías ordinales, considerando criterios ecológicos y niveles de presión territorial:

La clasificación generó una capa categórica, que posteriormente fue combinada con la distribución binaria de la especie para el diseño de una propuesta de zonificación ecológica diferenciada.

Figura 15 Mapa global del impacto de la huella humana en el año 2022 (*Human Footprint Index, HFI*)

Elaboración propia.



3.5.8. Identificación de áreas

Una vez obtenido el raster binario de presencia potencial de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. y reclasificada la capa de huella humana global (Human Footprint 2022), se procedió a integrar ambas capas con el objetivo de identificar zonas prioritarias para la conservación, restauración y mitigación. Esta integración permitió generar un mapa final de manejo territorial basado en criterios ecológicos y antrópicos.

Para ello, se emplearon funciones de análisis espacial en RStudio, las cuales permitieron cruzar el mapa binario de idoneidad (presencia/ausencia) con la capa categórica de huella humana. El raster binario representaba la presencia potencial de la especie según el umbral previamente determinado, mientras que la huella humana había sido clasificada en tres niveles de presión: baja (0–3), moderada (4–10) y alta (>10), conforme al siguiente criterio:

- Conservación estricta (Categoría 1): áreas donde la especie tiene alta idoneidad y la presión humana es baja (HFI 0–3). Estas zonas presentan condiciones casi naturales, adecuadas para proteger poblaciones existentes y conservar hábitats remanentes (Williams et al., 2020).
- Restauración ecológica (Categoría 2): áreas aptas para la especie, pero con presión antrópica moderada (HFI 4–10), lo que sugiere alteraciones que podrían ser revertidas mediante restauración pasiva o activa.
- Mitigación o manejo de riesgo (Categoría 3): áreas con alta idoneidad para la especie, pero con huella humana elevada (HFI >10), como zonas periurbanas o agrícolas, donde la conservación directa es limitada y se requieren acciones de mitigación del impacto. (Venter et al., 2016b)

A partir de esta combinación, se generó una nueva capa raster multicategórica, denominada prioridad, la cual fue utilizada posteriormente para cuantificar el área (en km²) correspondiente a cada categoría de manejo. Para ello, se calculó la frecuencia de píxeles por clase y se convirtió en superficie considerando el área de cada celda bajo la proyección empleada (~1 km²).

3.6. Análisis de datos

El análisis de los datos generados se estructuró en dos bloques principales: (i) el análisis estadístico y ecológico de la distribución potencial de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. a partir del modelado de nicho, y (ii) el análisis geográfico de presión antrópica para la identificación de zonas prioritarias de manejo. Ambos bloques fueron desarrollados en el entorno de programación RStudio y ArcGIS, haciendo uso de diversas herramientas estadísticas y funciones especializadas para la interpretación de los resultados.

3.6.1. Análisis de la distribución de la especie

En este primer bloque se aplicaron herramientas estadísticas para evaluar la relación entre las variables ambientales seleccionadas y la distribución potencial de la especie. El modelo generado fue sometido a una revisión detallada de sus salidas mediante funciones del paquete ENMeval, complementado con el paquete dismo para la evaluación de desempeño.

Se utilizaron funciones como `evaluate ()` para generar matrices de confusión, calcular métricas de sensibilidad, especificidad y exactitud global, y determinar la estabilidad del modelo frente a la variación de datos. A través de `cloglog` se generaron curvas de respuesta marginal, lo cual permitió analizar visualmente la forma en que cada variable influye individualmente sobre la probabilidad de ocurrencia de la especie.

Asimismo, se interpretaron los coeficientes de regularización mediante análisis de regresión logística generalizada, lo que permitió cuantificar el peso estadístico de cada predictor en la construcción del modelo. Se aplicaron también análisis gráficos, para explorar la distribución de los valores predichos y los patrones de idoneidad ambiental en el espacio.

En cuanto a la predicción espacial, se generaron mapas continuos de idoneidad con la función `predict ()` y se aplicaron operaciones de reescalado, umbralización y reclasificación mediante funciones como `reclassify ()` y `calc ()`.

3.6.2. Análisis de información geográfica

El segundo bloque de análisis se centró en la integración de la distribución potencial de la especie con la presión antrópica, utilizando herramientas estadísticas aplicadas al análisis espacial. La capa de huella humana fue reclasificada y combinada con el modelo binario mediante operadores lógicos y funciones como `overlay ()` y `mask ()`, generando una capa de zonificación final.

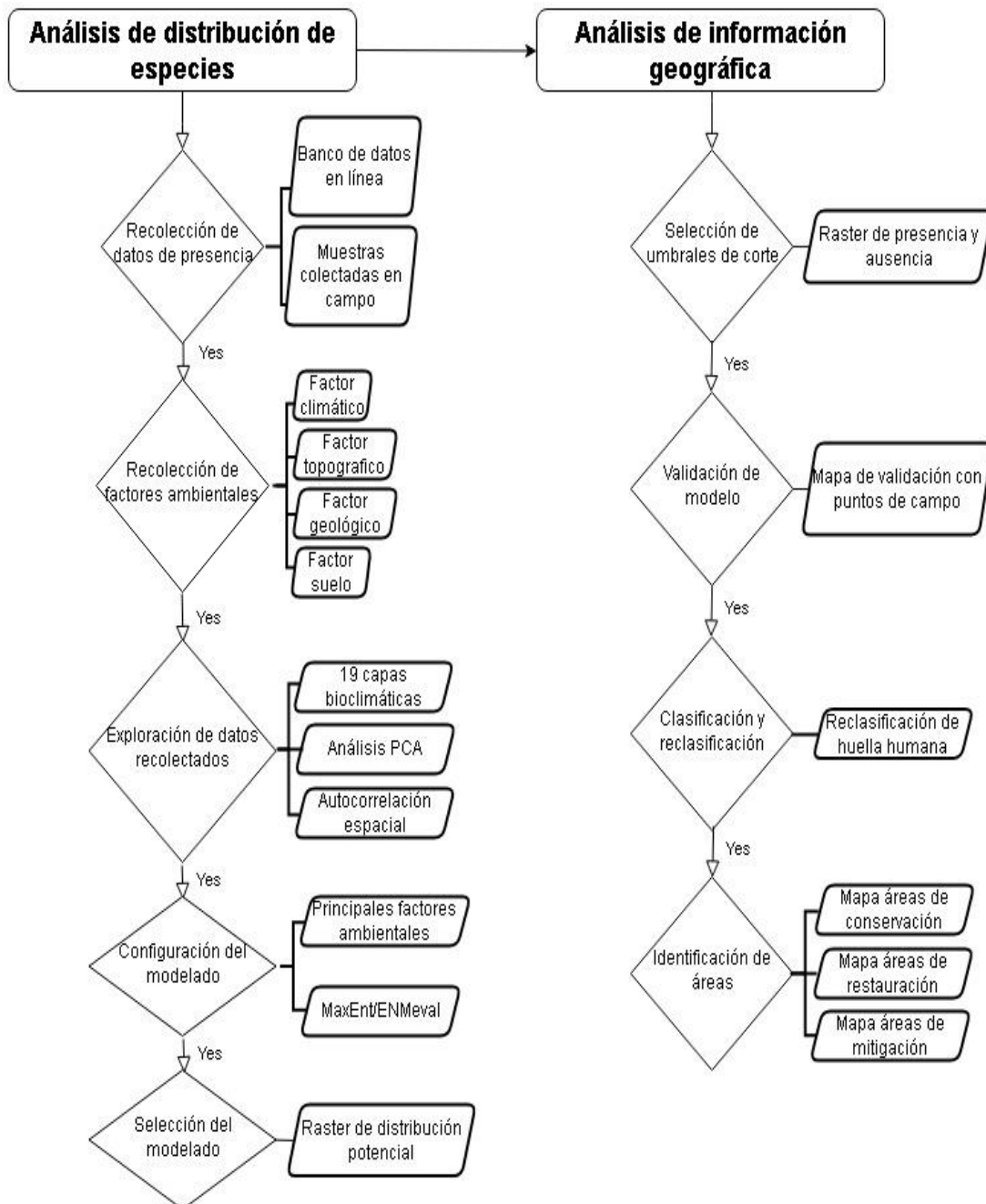
Para la cuantificación de áreas por clase, se utilizó la función `getValues ()` para extraer los valores por categoría, seguido del cálculo de superficie total mediante operaciones matemáticas simples considerando la resolución espacial. Estos resultados fueron organizados en un marco de datos (`data.frame`) y visualizados mediante gráficos de barras elaborados con `ggplot2` y por último desde el enfoque estadístico espacial, se aplicaron también análisis de distribución de frecuencias, proporciones relativas y análisis comparativo entre clases para evaluar el grado de cobertura territorial asignado a cada categoría de manejo. Esta evaluación permitió consolidar una propuesta de zonificación diferenciada, sustentada en datos cuantitativos y cartográficos.

Con el fin de sustentar las hipótesis de investigación formuladas, se plantearon sus respectivas hipótesis estadísticas, las cuales fueron contrastadas mediante pruebas de inferencia estadística. Estas pruebas permitieron determinar si los patrones observados en los datos ambientales y en la predicción del modelo eran producto del azar o de relaciones significativas entre las variables

consideradas y la distribución de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. Los detalles técnicos de cada prueba estadística y los valores obtenidos se presentan en el Anexo 4.

Figura 16 *Flujograma de la metodología aplicada en el modelado de distribución de especies y la clasificación geoespacial*

Elaboración propia.



IV. Resultados

Este capítulo presenta los resultados obtenidos a lo largo de la investigación, los cuales se derivan de la aplicación de los procedimientos metodológicos descritos previamente. Se abordan los aspectos relacionados con la caracterización de los registros de presencia, el análisis ambiental multivariado y la modelación de la distribución potencial de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav., así como la integración de dichos resultados con indicadores de presión antrópica.

4.1. Registros de presencia

Como resultado del proceso de recopilación, depuración y análisis de autocorrelación espacial, se obtuvo un total de 44 registros georreferenciados válidos para la especie *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav., los cuales fueron utilizados como insumo principal para el modelado de su distribución potencial. Estos registros correspondieron a ejemplares observados en campo, así como a reportes provenientes de bancos de datos en línea y bases de datos científicos tanto nacionales como internacionales.

Tabla 8. Registros georreferenciados de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav.

	Longitud	Latitud
1	-74.19289	-12.96636
2	-74.19064	-12.96044
3	-74.03253	-13.15025
4	-74.14811	-13.563
5	-74.13663	-13.56601
6	-74.21708	-13.33231
7	-72.848671	-13.602542
8	-72.850684	-13.607915
9	-74.47442	-13.334559
10	-73.22857	-14.44187
11	-71.59694	-13.29722
12	-71.63278	-13.21306
13	-71.36889	-14.08222
14	-71.12	-13.53

15	-72.078994	-12.485706
16	-75.90611	-9.6211
17	-71.844056	-13.407222
18	-77.03153	-10.196022
19	-76.165493	-9.960913
20	-78.932509	-7.356089
21	-76.46	-11.3694
22	-71.968166	-13.51231
23	-75.238366	-11.949319
24	-75.156627	-12.089172
25	-72.171947	-14.221885
26	-77.018675	-10.196153
27	-76.801347	-9.22646
28	-79.80833	-5.005556
29	-77.716667	-9.033333
30	-71.666667	-13.633333
31	-72.05277	-13.30305
32	-77.85	-9.45
33	-77.723336	-9.029188
34	-78.139722	-8.087778
35	-77.2	-9.633333
36	-74.463056	-13.358333
37	-77.266667	-9.616667
38	-72.890693	-13.382219
39	-78.25	-7.833333
40	-75.109073	-12.173379
41	-72.54888	-13.46452
42	-75.154167	-12.391667
43	-74.724721	-12.979587
44	-77.472778	-10.076667

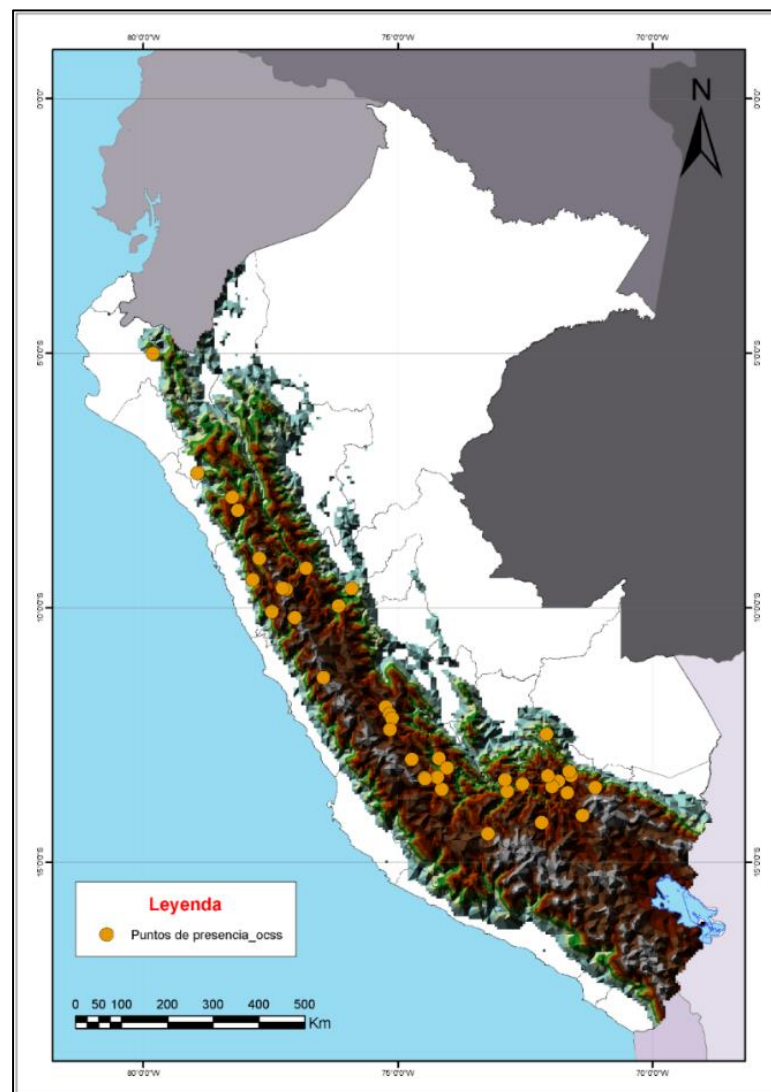
Fuente: Propia

La muestra final se distribuyó a lo largo de la región andina central y sur del Perú, con concentraciones importantes en los departamentos de Ayacucho, Junín, Cusco y Apurímac. La distribución espacial mostró una marcada preferencia por pisos altitudinales entre los 2600 y 4000 msnm, aunque también se identificaron registros aislados a partir de los 1500 msnm hasta altitudes superiores, evidenciando la amplitud ecológica de la especie en relación con la gradiente altitudinal.

Los puntos de presencia se localizaron predominantemente en zonas de pendiente media a alta, así como en áreas con exposición sur y este, lo cual concuerda con las condiciones topográficas asociadas a los bosques andinos húmedos, hábitat característico de la especie. La representación espacial de estos registros permitió visualizar su dispersión y agrupamiento, así como identificar regiones donde la presencia de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. podría estar infraestimada por falta de muestreo.

Figura 17 Distribución espacial de los 44 registros de presencia validados de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. utilizados en el modelado

Elaboración propia.



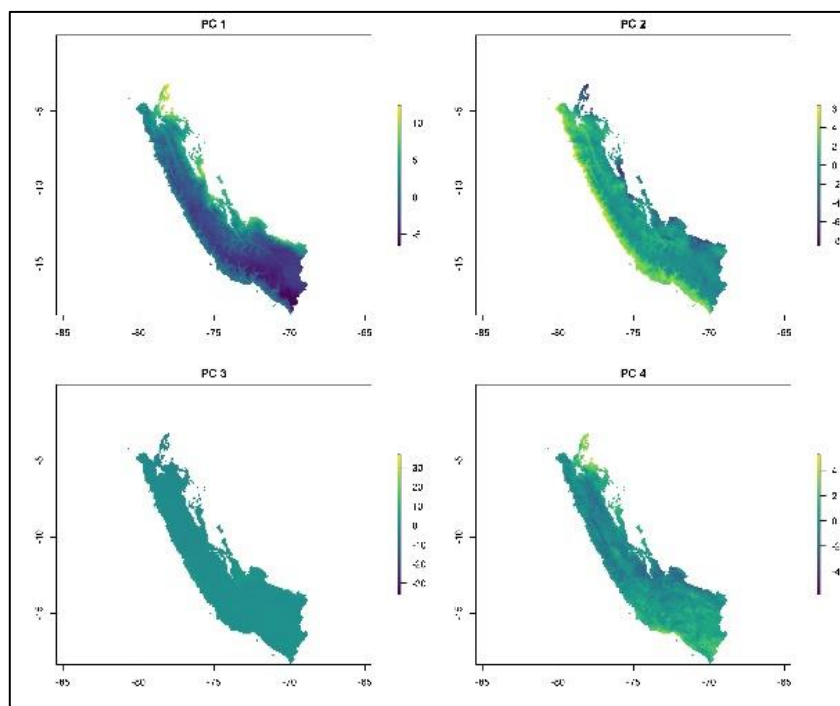
4.2. Análisis ambiental

4.2.1. Análisis de componentes principales (PCA)

Para optimizar la selección de factores ambientales y evitar problemas de multicolinealidad en el modelado de distribución, se aplicó un análisis de componentes principales (PCA) sobre las 22 capas ambientales iniciales, que incluyeron 19 capas bioclimáticas y 3 factores topográficos (pendiente, aspecto y altitud). El PCA permitió sintetizar la información ambiental en un conjunto reducido de componentes ortogonales.

Figura 18 Mapas espaciales de los primeros cuatro componentes principales (PC1–PC4) obtenidos mediante análisis de componentes principales (PCA) de variables bioclimáticas en el Perú

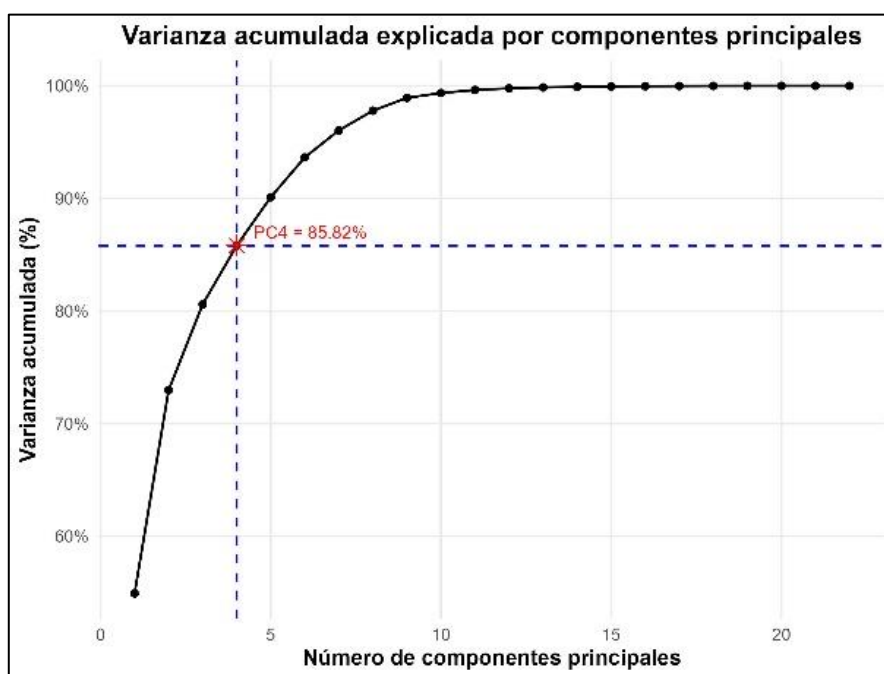
Elaboración propia.



Los resultados mostraron que los cuatro primeros componentes principales (PC1 a PC4) concentraron en conjunto el 85.82% de la varianza total del sistema ambiental de acuerdo con el criterio de retención basado en la varianza acumulada (Weeraratne et al., 2025), se seleccionaron los primeros cuatro componentes, el primer componente (PC1) explicó el 54.93%, seguido de PC2 (18.05%), PC3 (7.62%) y PC4 (5.22%). Así, los componentes PC1 a PC4 fueron utilizados como insumos para las siguientes etapas del modelado de distribución de la especie *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav.

Figura 19 Curva de varianza acumulada de los componentes principales resultantes del análisis PCA aplicado a las variables ambientales

Elaboración propia.



4.2.2. Contribución para cada PCA

Una vez obtenido el resultado del análisis de componentes principales (PCA), se procedió a examinar las cargas factoriales (Loadings), donde los

valores más cercanos a +1 o -1 contribuyen fuertemente y los valores cercanos a 0, aportan muy poco a cada componente de los cuatro primeros componentes seleccionados, con el fin de interpretar las principales gradientes ambientales presentes en el área de estudio y conocer cuáles son las principales condiciones climáticas para la distribución de la especie *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav., los resultados mostraron que:

PC1, explicó el 54.93% de la varianza total. El signo positivo de las cargas factoriales (Loadings) asociadas a las capas térmicas indica que, a medida que aumentan los valores de temperatura —ya sea la máxima, la media anual o la media estacional—, también lo hace el valor del componente principal PC1. En otras palabras, las áreas más cálidas tienden a presentar valores más altos en este componente.

Figura 20 Contribución porcentual de las capas ambientales al primer componente principal (PC1) del análisis PCA

Elaboración propia.

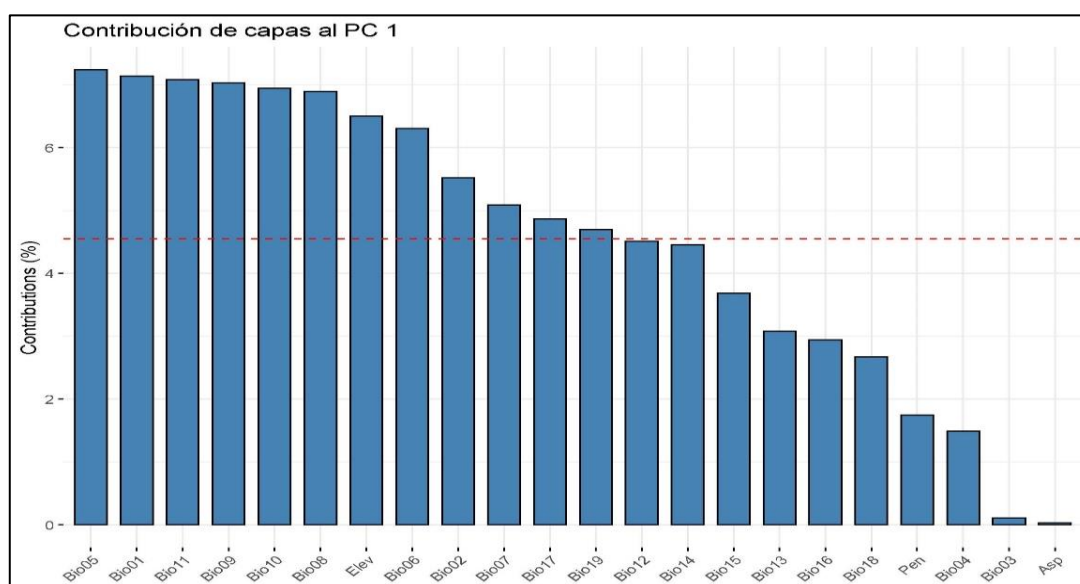


Tabla 9. Contribución e interpretación ecológica de las variables bioclimáticas al componente principal 1 (PC1)

Bioclimáticas	Contribución	Interpretación
Bio05 - Temperatura máxima del mes más cálido	+0.268	Contribuye significativamente y positivamente mayores valores de Bio05, mayor PC1
Bio01 - Temperatura media anual	+0.267	Contribuye positivamente, ambientes más cálidos tienden a valores altos de PC1
Bio11 - Temperatura media del trimestre más frío	+0.266	Refuerza el patrón de temperatura general
Bio09 - Temperatura media del trimestre más seco	+0.265	Apoya el componente de temperaturas medias estacionales
Bio10 - Temperatura media del trimestre más cálido	+0.263	Asociado a temperaturas de estaciones cálidas
Bio08 - Temperatura media del trimestre más húmedo	+0.262	Indica condiciones térmicas en épocas húmedas
Elevación	-0.254	Relación inversa: a mayor altitud, menor valor en PC1 (lo que es esperable porque sube el frío)
Bio06 - Temperatura mínima del mes más frío	+0.251	Relacionado con la resistencia a heladas y extremos fríos
Bio02 - Rango medio diurno	+0.234	Indica amplitud de temperaturas diurnas
Bio07 - Rango anual de temperatura	+0.226	Variabilidad térmica anual

Fuente: Propia

La variable temperatura media anual (Bio01), a pesar de representar un promedio anual, también indicó esta tendencia térmica: lugares con temperaturas promedio más elevadas se asociaron a valores mayores en PC1, caracterizando ambientes más cálidos en el contexto del área de estudio; por su parte, el Loading negativo de la altitud (Elev) (-0.255) confirmó que los ambientes de mayor altitud, típicamente más fríos, corresponden a valores más bajos de PC1. En conjunto, PC1 sintetizó un fuerte gradiente térmico-altitudinal en el área de estudio, donde el aumento de la temperatura y la disminución de la altitud estructuran de manera conjunta la principal dimensión de variabilidad ambiental.

El segundo componente principal (PC2) explicó el 18.05% de la varianza total del conjunto de datos ambientales analizados, el análisis de cargas factoriales mostró

que PC2 estuvo claramente dominado por variables de precipitación, lo que refleja un gradiente de humedad ambiental en el área de estudio.

Figura 21 Contribución porcentual de las capas ambientales al segundo componente principal (PC2) del análisis de componentes principales (PCA)

Elaboración propia.

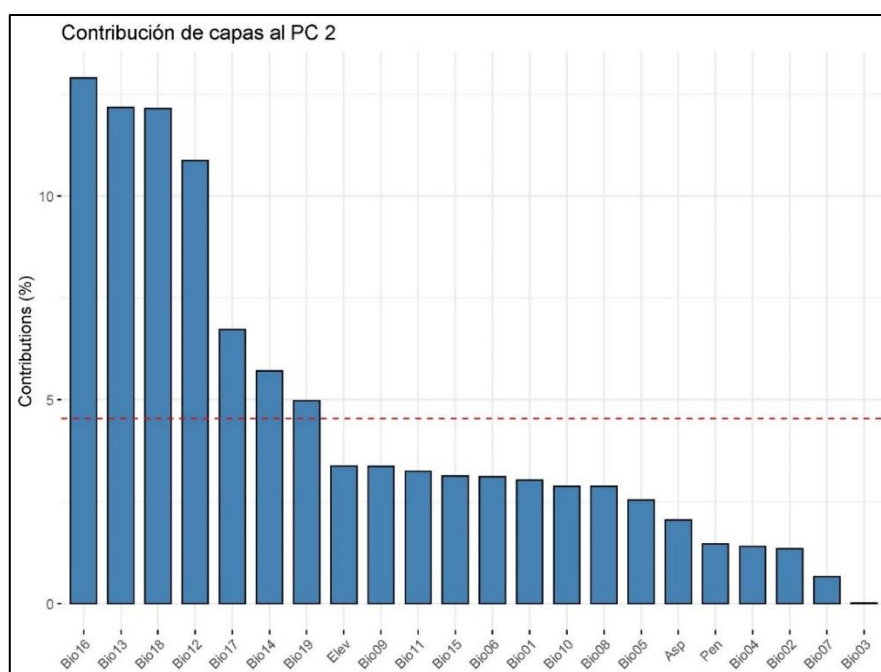


Tabla 10. Contribución e interpretación ecológica de las variables bioclimáticas al componente principal 1 (PC2)

Bioclimáticas	Contribución	Interpretación
Bio16 - Precipitación del trimestre más húmedo	-0.359	A mayor precipitación en la época más lluviosa, menor valor de PC2, es la variable que más define el gradiente de humedad
Bio13 - Precipitación del mes más lluvioso	-0.348	Alta precipitación mensual máxima también disminuye el valor de PC2, refuerza que PC2 mide humedad máxima
Bio18 - Precipitación del trimestre más cálido	-0.348	Mayor precipitación durante la época cálida disminuye PC2, áreas cálidas y húmedas tienden a valores bajos de PC2.
Bio12 - Precipitación anual	-0.329	Lugares con mayor precipitación anual general tienen valores menores de PC2
Bio17 - Precipitación del trimestre más seco	-0.259	Alta precipitación incluso en la temporada seca hace que PC2 baje, distingue ambientes de sequía versus humedad todo el año

Bio14 - Precipitación del mes más seco	-0.238	Si en el mes más seco aún cae lluvia, el valor de PC2 baja, mide resistencia a la sequía estacional
Bio19 - Precipitación del trimestre más frío	-0.223	Mide humedad durante la temporada fría, alta humedad en frío disminuye PC2
Elevación	-0.183	Lugares más altos tienden a ser más húmedos en el área de estudio, lo cual se asocia a menor PC2
Bio09 - Temperatura media del trimestre más seco	+0.183	A mayor temperatura en la estación seca, mayor valor de PC2, áreas secas y cálidas tienden a valores altos de PC2
Bio11 - Temperatura media del trimestre más frío	+0.180	A mayor temperatura durante la estación fría, también aumenta PC2, pero su efecto es menor que la humedad

Fuente: Propia

Estas capas bioclimáticas indican que a medida que aumenta la precipitación, el valor de PC2 disminuye; es decir, las áreas más húmedas se corresponden con valores más bajos de PC2, mientras que las áreas más secas presentan valores más altos.

La presencia de la elevación (Elev) con un Loading negativo menor (-0.183) sugiere que las zonas más altas tienden a ser ligeramente más húmedas, lo que es coherente con el patrón climático de los Andes (Körner, 2007), donde la humedad se acumula en ciertos sectores montañosos. Las capas de temperatura Bio09 (temperatura media del trimestre más seco) y Bio11 (temperatura media del trimestre más frío) mostraron cargas positivas más bajas (0.183 y 0.180 respectivamente), lo que sugiere una ligera asociación de los valores altos de PC2 con temperaturas más elevadas en condiciones más secas. En conjunto, PC2 sintetizó una gradiente de humedad climática, diferenciando los ambientes más húmedos (bajos valores de PC2) de los más secos (altos valores de PC2) en el área de estudio.

El tercer componente principal (PC3) explicó el 7.62% de la varianza total. Este componente sintetizó principalmente la variabilidad térmica y en menor medida, la estacionalidad de la precipitación en el área de estudio.

Figura 22 Contribución porcentual de las capas ambientales al tercer componente principal (PC3) del análisis de componentes principales (PCA)

Elaboración propia.

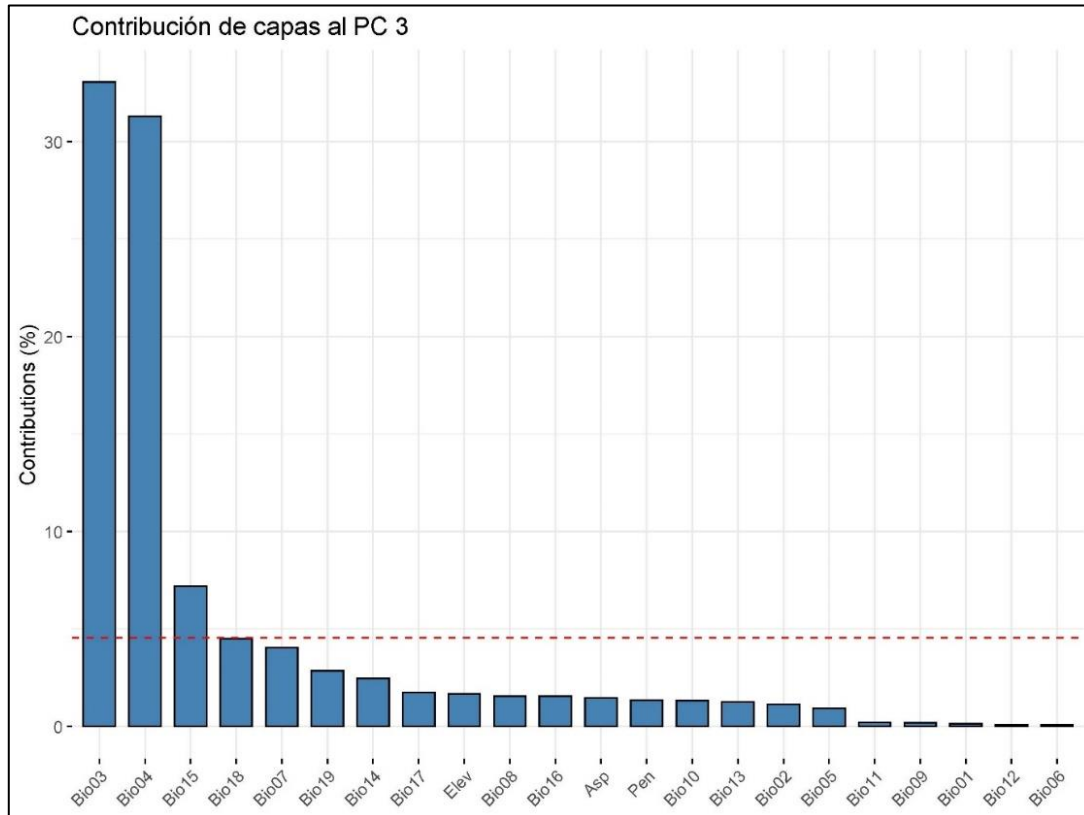


Tabla 11. Contribución e interpretación ecológica de las variables bioclimáticas al componente principal 1 (PC3)

Bioclimáticas	Contribución	Interpretación
Bio03 - Isotermalidad	+0.574	A mayor Isotermalidad (más estabilidad diaria respecto a la variación anual), mayor valor de PC3
Bio04 - Estacionalidad de la temperatura	+0.559	A mayor variabilidad de temperatura a lo largo del año, mayor valor de PC3
Bio15 - Estacionalidad de la precipitación	+0.268	Áreas donde la precipitación cambia mucho entre estaciones (alta estacionalidad) tienen mayores valores de PC3
Bio18 - Precipitación del trimestre más cálido	+0.212	Más precipitación en el trimestre cálido contribuye a aumentar PC3
Bio07 - Rango anual de temperatura	+0.201	Ambientes con una gran diferencia entre temperaturas máximas y mínimas anuales tienden a tener mayores valores de PC3
Bio19 - Precipitación del trimestre más frío	-0.169	A mayor precipitación en el trimestre frío, el valor de PC3 tiende a disminuir

Bio14 - Precipitación del mes más seco	-0.156	Más precipitación en el mes más seco disminuye PC3, áreas menos estacionales tienden a valores bajos
Bio17- Precipitación del trimestre más seco	-0.131	Igual: si en la estación seca aún llueve, el valor de PC3 baja
Elevación	-0.129	Altitudes mayores están asociadas a menores valores de PC3 (lugares más fríos y con menor variación térmica)
Bio08 - Temperatura media del trimestre más húmedo	+0.124	A mayor temperatura en la época más húmeda, el valor de PC3 aumenta

Fuente: Propia

La alta carga positiva de la variable Isotermalidad (Bio03) indica que el componente PC3 está fuertemente influenciado por la relación entre la variabilidad diaria y anual de la temperatura. En consecuencia, las zonas con temperaturas más estables a lo largo del año presentan valores más altos en este componente. De igual modo, la contribución elevada de la estacionalidad de la temperatura (Bio04) sugirió que los ambientes con grandes fluctuaciones térmicas estacionales también estructuran este eje. En cuanto a las capas de precipitación, la estacionalidad de la precipitación (Bio15) y la precipitación del trimestre más cálido (Bio18) indicaron que la variabilidad pluviométrica también desempeña un rol, aunque en menor magnitud; por otro lado, algunas capas como: Precipitación del trimestre más frío (Bio19) (-0.169), Precipitación del mes más seco (Bio14) (-0.157), Precipitación del trimestre más seco (Bio17) (-0.132) y Altitud (Elev) (-0.130), presentaron cargas negativas moderadas, indicando que en zonas de mayor altitud o con precipitaciones más concentradas en épocas secas y frías, los valores de PC3 tienden a disminuir. En resumen, PC3 sintetizó una gradiente ambiental dominado por la estabilidad térmica estacional y la variabilidad de precipitaciones, diferenciando ambientes más isotérmicos y moderadamente estacionales de aquellos con fluctuaciones climáticas más extremas.

El cuarto componente principal (PC4) explicó el 5.22% de la varianza total. A diferencia de los componentes anteriores, PC4 sintetizó principalmente gradientes asociados a la morfología del terreno (pendiente) y a variaciones térmicas diurnas y anuales, combinados con aspectos de precipitación en épocas secas y frías. La variable con mayor contribución fue la pendiente (Pen), que presentó un Loading de -0.567, indicando que las áreas de mayor pendiente presentaron valores más bajos de PC4. Esto sugirió que las condiciones de inclinación del terreno tienen una influencia significativa en las variaciones microambientales representadas por este componente.

Figura 23 Contribución porcentual de las capas ambientales al cuarto componente principal (PC4) del análisis de componentes principales (PCA)

Elaboración propia.

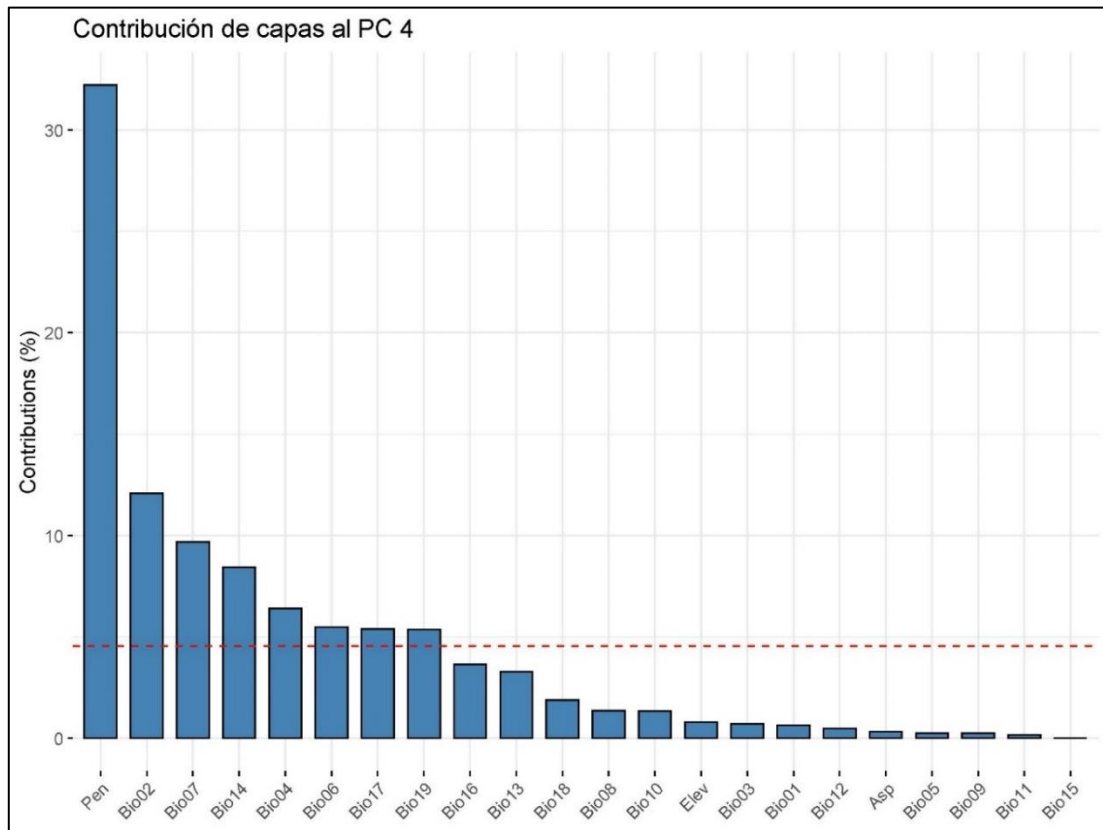


Tabla 12. Contribución e interpretación ecológica de las variables bioclimáticas al componente principal 1 (PC4)

Bioclimáticas	Contribución	Interpretación
Pen - Pendiente	-0.567	A mayor pendiente, menor PC4. Zonas más inclinadas se asocian a valores bajos de PC4.
Bio02 - Rango medio diario	-0.347	Mayor variabilidad de temperatura entre día y noche reduce PC4.
Bio07 - Rango anual de temperatura	-0.310	Mayor diferencia entre temperatura máxima y mínima anual disminuye PC4.
Bio14 - Precipitación del mes más seco	+0.290	Más precipitación en el mes más seco aumenta PC4.
Bio04 - Estacionalidad de la temperatura	+0.252	Mayor variabilidad estacional de la temperatura incrementa PC4.
Bio06 - Temperatura mínima del mes más frío	+0.233	Temperaturas mínimas más altas aumentan PC4.
Bio17 - Precipitación del trimestre más seco	+0.232	Más lluvia durante la estación seca aumenta PC4.
Bio19 - Precipitación del trimestre más frío	+0.231	Más lluvia durante la estación fría también sube PC4.
Bio16 - Precipitación del trimestre más húmedo	-0.190	Más precipitación en época húmeda tiende a reducir PC4.
Bio13 - Precipitación del mes más húmedo	-0.180	Alta precipitación mensual máxima reduce PC4 ligeramente

Fuente: Propia

Finalmente, capas de alta precipitación durante los periodos más húmedos del año, como Bio16 y Bio3, mostraron cargas negativas moderadas, indicando que en ambientes muy lluviosos PC4 tiende a disminuir. En conjunto, PC4 representó una gradiente ambiental dominada por condiciones microtopográficas (pendiente) y por la interacción entre variabilidad térmica diaria y estacionalidad hídrica, diferenciando ambientes de fuerte contraste térmico y pendientes pronunciadas de aquellos más suaves y con mayor humedad en estaciones tradicionalmente secas.

El patrón general evidencia que PC1 resume una gradiente térmico-altitudinal dominante en el área de estudio, mientras que PC2 representa variaciones moderadas de humedad estacional. PC3 refleja la estacionalidad térmica y pluviométrica, mientras que PC4 incorpora principalmente la influencia de variables topográficas (como pendiente) y micro variaciones climáticas.

Figura 24 Distribución de las capas ambientales en el plano factorial, definido por los componentes principales 1 y 2 (PC1 vs PC2)

Elaboración propia.

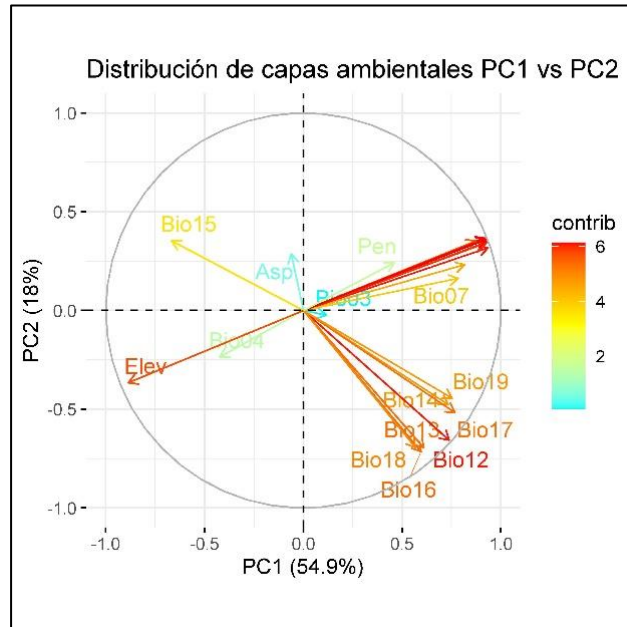
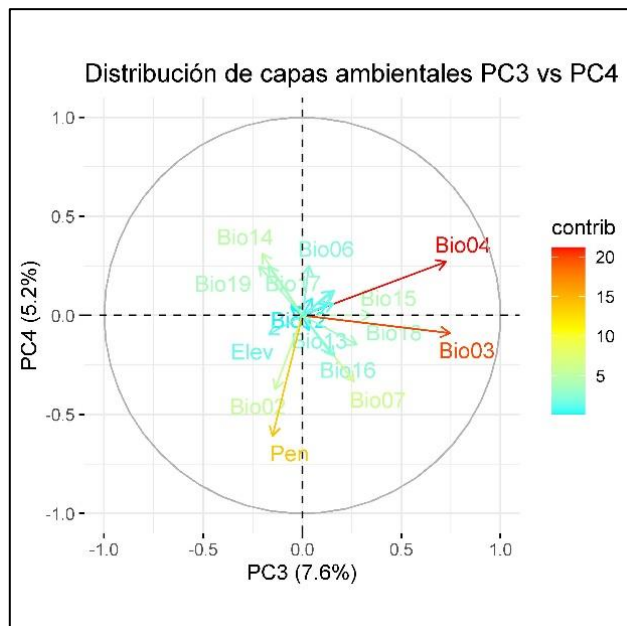


Figura 25 Distribución de las capas ambientales en el plano factorial, definido por los componentes principales 3 y 4 (PC3 vs PC4)

Elaboración propia.



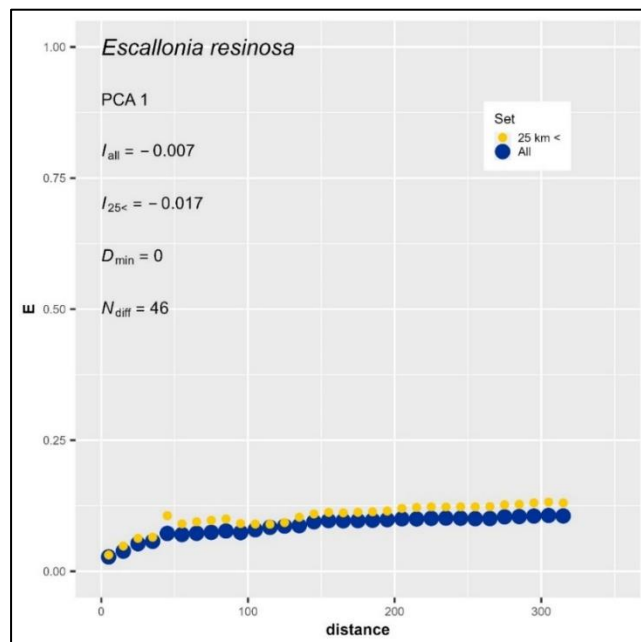
4.2.3. Autocorrelación espacial de los registros de presencia

Con el objetivo de garantizar la validez estadística de los datos de presencia utilizados en el modelado de distribución potencial, se realizó un análisis de autocorrelación espacial sobre las variables ambientales seleccionadas. Se presentan los resultados detallados para cada variable evaluada, acompañados de los respectivos gráficos de entrograma que ilustran los patrones espaciales observados:

Para la variable PC1, se observó una muy baja autocorrelación espacial tanto en el conjunto completo como en el conjunto filtrado, el valor del índice de Moran I fue de -0.007 en el conjunto completo y -0.017 luego del filtrado, lo que indica una ligera tendencia a la dispersión espacial pero estadísticamente cercana a la aleatoriedad.

Figura 26 Entrograma de autocorrelación espacial para el primer componente principal (PCA 1) en la distribución de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav.

Elaboración propia.

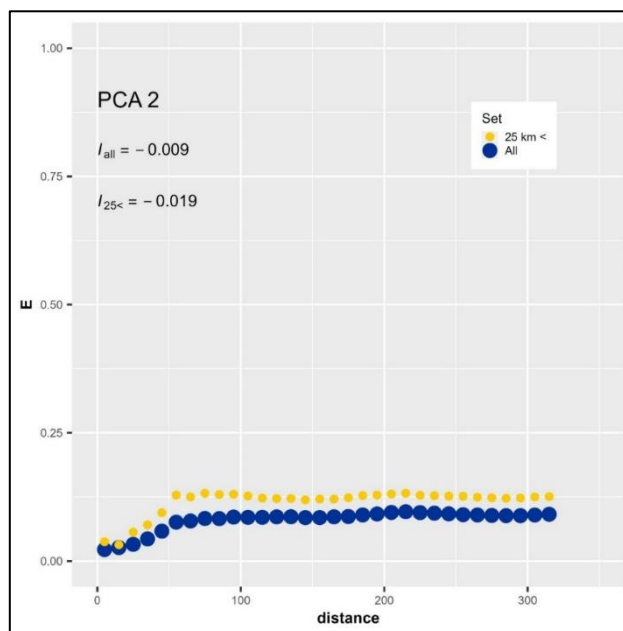


Visualmente, ambos conjuntos (líneas amarilla y azul) siguen un patrón muy similar, con valores bajos de entropía en todas las distancias. No se evidenció un patrón de agrupamiento espacial significativo, lo que sugiere que los valores del componente PC1 están distribuidos de manera homogénea en el espacio. Además, se eliminaron 46 registros redundantes durante el filtrado, con una distancia mínima observada (D_{\min}) de 0 entre algunos puntos en el conjunto original.

Para la variable PC2, el análisis reveló valores negativos del índice global de Moran, el valor del índice de Moran I fue de -0.009 en el conjunto completo y -0.019 luego del filtrado, lo cual indica una ligera tendencia a la dispersión espacial en ambas versiones del conjunto de datos.

Figura 27 Entrograma de autocorrelación espacial para el segundo componente principal (PCA 2) en la distribución de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav.

Elaboración propia.

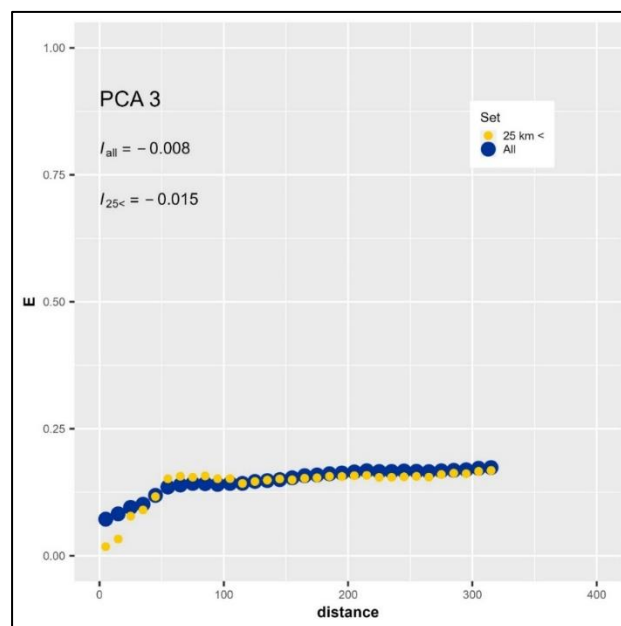


El entrograma muestra un patrón donde los valores de entropía espacial aumentan conforme la distancia crece, pero se mantienen en niveles bajos. La comparación entre los dos conjuntos muestra que el filtrado espacial redujo ligeramente la dependencia local, generando un patrón aún más homogéneo.

En el caso de PC3, los valores del índice global de Moran fueron nuevamente negativos y bajos, tanto en el conjunto completo -0.008 como en el conjunto filtrado -0.015 , lo que sugirió la ausencia de autocorrelación espacial significativa.

Figura 28 Entrograma de autocorrelación espacial para el tercer componente principal (PCA 3) en la distribución de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav.

Elaboración propia.



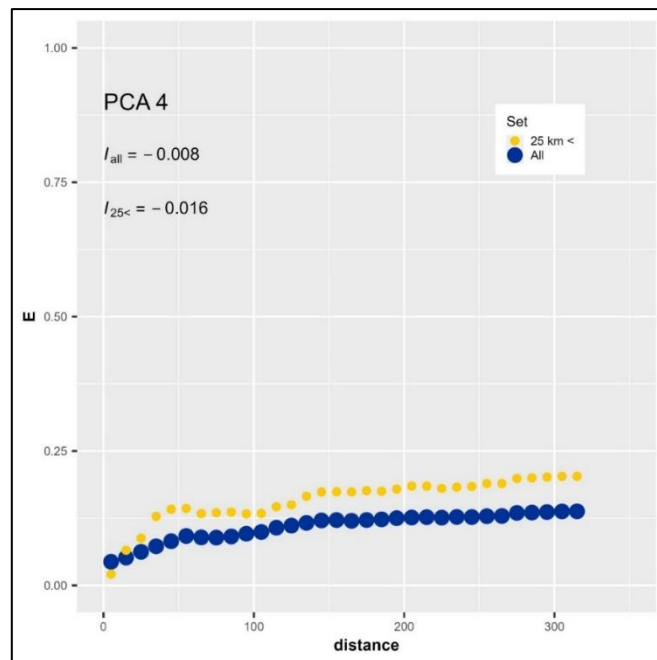
A diferencia de los entrogramas anteriores, en este caso se observó una mayor similitud en las curvas de entropía entre los dos conjuntos. La curva del conjunto completo mostró una leve acumulación en los primeros tramos de

distancia, mientras que el conjunto filtrado generó una línea ligeramente más dispersa, especialmente en las distancias cortas. Esto indica que el filtrado espacial logró reducir levemente la dependencia local, aunque en general, PC3 ya presentaba una distribución bastante homogénea desde el inicio.

Para PC4, los resultados del índice global de Moran fueron nuevamente negativos y muy bajos: tanto para el conjunto completo -0.008 como en el conjunto filtrado -0.016 , estos valores indicaron una distribución espacial casi aleatoria de los valores de PC4, con una ligera tendencia a la dispersión tras el filtrado.

Figura 29 Entrograma de autocorrelación espacial para el cuarto componente principal (PCA 4) en la distribución de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav.

Elaboración propia.

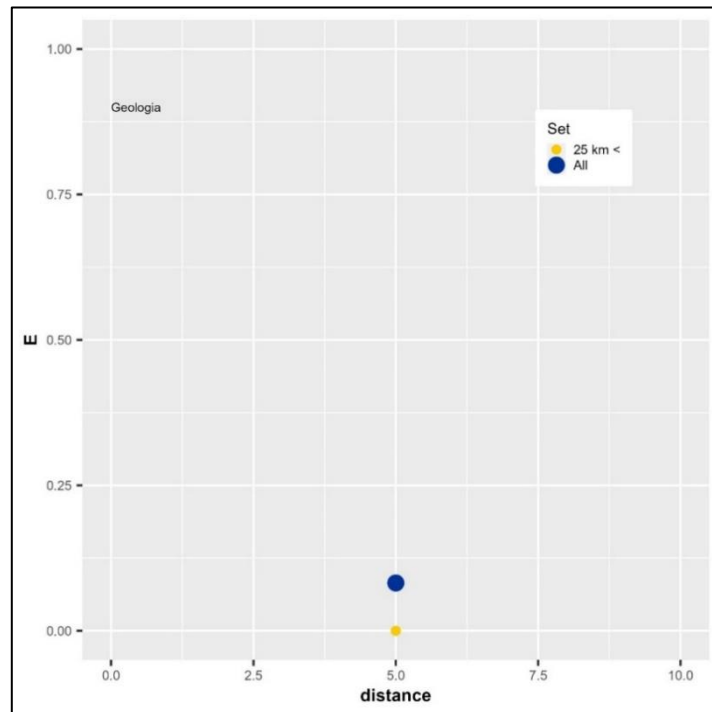


En el gráfico se observa que, al aplicar el filtrado, los puntos amarillos ($25 \text{ km} <$) muestran una curva levemente más alta en los primeros tramos de distancia, reflejando una dispersión espacial ligeramente mayor en comparación al conjunto original, este patrón confirma que la autocorrelación espacial fue prácticamente inexistente desde el inicio, y el filtrado solo contribuyó a fortalecer la independencia entre registros.

El análisis de entropía espacial para la variable GEOL mostró resultados muy limitados debido a la naturaleza categórica de esta variable y a la distribución restringida de clases geológicas entre los registros de presencia, solo se generó un único punto de medición en el entrograma, con valores de entropía muy bajos (cerca de cero) tanto para el conjunto completo como para el filtrado. Esto indicó que no existe una estructura espacial definida en la variable geológica en los registros analizados.

Figura 30 Entrograma del análisis de autocorrelación espacial aplicado a la capa geología

Elaboración propia.

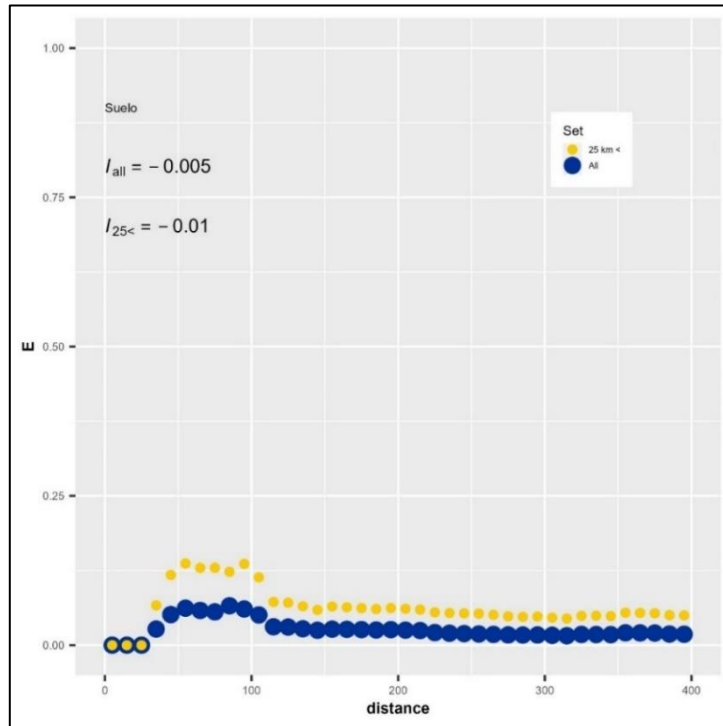


La ausencia de variabilidad significativa sugiere que la variable geología no presentó autocorrelación espacial detectable en el análisis, lo cual se debe a la alta fragmentación por las distintas clases que tiene la capa.

El análisis de autocorrelación espacial para la variable suelo mostró valores bajos del índice global de Moran en ambos conjuntos: para el conjunto completo -0.005 y para el conjunto filtrado -0.010 , estos resultados indicaron una muy leve tendencia a la dispersión espacial, aunque estadísticamente cercana a un patrón aleatorio.

Figura 31 Entrograma del análisis de autocorrelación espacial aplicado a la capa suelo

Elaboración propia.



Visualmente, el entrograma reveló un patrón algo más marcado que en otras variables categóricas. El conjunto filtrado (amarillo) mostró una entropía levemente mayor en los primeros tramos de distancia, lo que sugiere una mayor diversidad de clases de suelo en distancias cortas tras el filtrado. Sin embargo, esta diferencia no implica una autocorrelación significativa, la reducción del valor de Moran tras el filtrado refuerza la idea de que el conjunto final de datos mejora su independencia espacial también respecto a las condiciones edáficas.

Los valores del índice global de Moran (I) fueron consistentemente cercanos a cero o negativos, tanto en los conjuntos completos como en los filtrados a más de 25 km. La comparación visual de los entrogramas mostró que

el proceso de filtrado contribuyó a reducir aún más cualquier posible agrupamiento espacial local, especialmente en las primeras distancias.

Estos resultados validaron estadísticamente la independencia espacial de los datos de presencia y refuerzan la confiabilidad de los factores empleados en el posterior modelado de nicho ecológico.

4.3. Modelado de nicho ecológico

Con el objetivo de predecir la distribución potencial de la especie *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav., se realizó un modelado de nicho ecológico utilizando el algoritmo MaxEnt, implementado mediante el paquete ENMeval en RStudio. Este enfoque permitió calibrar múltiples configuraciones del modelo, evaluando simultáneamente el sobreajuste y la capacidad predictiva del modelo. La base de datos incluyó los 44 registros de presencia filtrados previamente, integrado a un conjunto de 10,000 puntos de fondo generados aleatoriamente dentro del área de estudio. Las capas ambientales empleadas correspondieron a los cuatro componentes principales del análisis PCA (PC1–PC4), además de las capas categóricas de geología y suelo. A continuación, se presentan los resultados detallados de la calibración, selección del modelo final, análisis de variables predictoras y evaluación de desempeño del modelo seleccionado.

4.3.1 Configuración del modelo y calibración

Se evaluaron un total de 15 configuraciones de modelado a partir de la combinación de tres tipos de funciones de características (lineales, cuadráticas y de producto) y cinco niveles de multiplicador de regularización ($rm = 1$ a 5). Cada modelo fue calibrado mediante validación cruzada de tipo randomkfold con cinco particiones, esto significa que el modelo se entrena 5 veces, cada vez con 80% de los datos y valida con el 20% restante. Los resultados en general fueron:

Tabla 13. Comparación de configuraciones de modelado en MaxEnt según métricas de desempeño

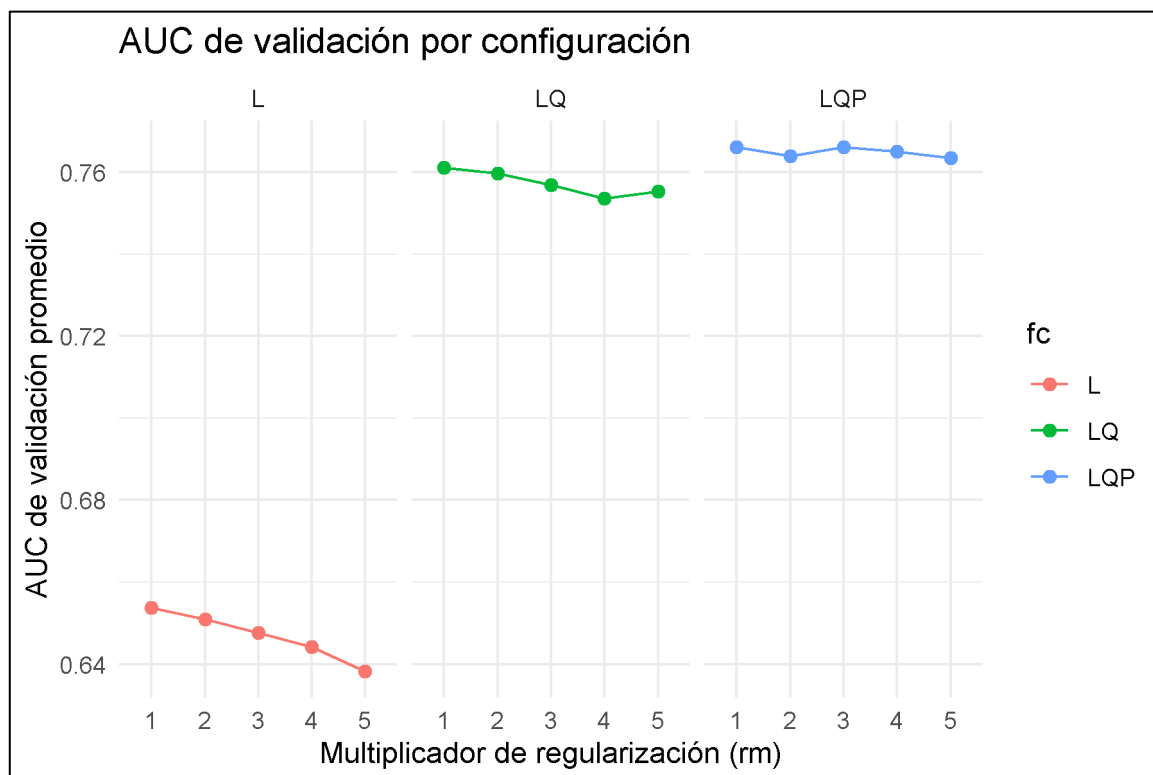
	fc	r	tune.ar	auc.t	cbi.tr	auc.d	auc.dif	auc.v	auc.v	cbi.v	cbi.v	or.10	or.10	or.mt	or.mt	AICc	delta.A	w.A	nc
		m	gs	rain	ain	iff.av	f.sd	al.av	al.sd	al.av	al.sd	p.avg	p.sd	p.avg	p.sd		ICc	IC	oe
						g		g		g									f
1	L	1	fc.L_r m.1	0.688	0.713	0.076	0.066	0.654	0.079	0.359	0.336	0.200	0.244	0.025	0.056	765.62 8	34.308	0	6
2	LQ	1	fc.LQ_ rm.1	0.827	0.903	0.085	0.060	0.761	0.060	0.442	0.247	0.200	0.168	0.075	0.068	739.96 7	8.647	0.00	11
3	LQ P	1	fc.LQP rm.1	0.841	0.871	0.090	0.045	0.766	0.051	0.502	0.152	0.225	0.163	0.100	0.056	735.23 8	3.917	0.04	11
4	L	2	fc.L_r m.2	0.687	0.769	0.074	0.066	0.651	0.076	0.341	0.364	0.175	0.190	0.025	0.056	766.09 1	34.771	0	6
5	LQ	2	fc.LQ_ rm.2	0.824	0.897	0.084	0.062	0.760	0.060	0.409	0.376	0.200	0.168	0.075	0.068	735.07 9	3.759	0.04	9
6	LQ P	2	fc.LQP rm.2	0.829	0.919	0.078	0.046	0.764	0.046	0.473	0.040	0.175	0.143	0.075	0.068	731.72 5	0.405	0.23	8
7	L	3	fc.L_r m.3	0.685	0.748	0.072	0.067	0.648	0.074	0.314	0.363	0.175	0.190	0.025	0.056	763.85 7	32.537	0.00	5
8	LQ	3	fc.LQ_ rm.3	0.820	0.885	0.077	0.066	0.757	0.057	0.318	0.557	0.225	0.163	0.075	0.068	734.98 3	3.662	0.04	8
9	LQ P	3	fc.LQP rm.3	0.816	0.921	0.063	0.043	0.766	0.050	0.424	0.190	0.175	0.190	0.025	0.056	731.32 0	0.000	0.29	6
10	L	4	fc.L_r m.4	0.684	0.736	0.073	0.067	0.644	0.074	0.315	0.366	0.200	0.168	0.050	0.068	764.57 2	33.252	0.00	5
11	LQ	4	fc.LQ_ rm.4	0.812	0.814	0.070	0.067	0.754	0.056	0.234	0.559	0.175	0.190	0.050	0.068	732.35 2	1.031	0.17	6
12	LQ P	4	fc.LQP rm.4	0.802	0.941	0.046	0.048	0.765	0.056	0.506	0.227	0.150	0.205	0.025	0.056	733.17 1	1.851	0.11	5
13	L	5	fc.L_r m.5	0.681	0.680	0.075	0.062	0.638	0.072	0.328	0.378	0.200	0.168	0.050	0.068	765.43 7	34.116	0.00	5
14	LQ	5	fc.LQ_ rm.5	0.802	0.885	0.061	0.063	0.755	0.054	0.328	0.337	0.175	0.190	0.050	0.068	735.66 8	4.348	0.03	6
15	LQ P	5	fc.LQP rm.5	0.789	0.941	0.056	0.037	0.763	0.065	0.518	0.173	0.125	0.177	0.025	0.056	737.10 5	5.784	0.01	5

Fuente: Propia

Los resultados del proceso de calibración mostraron diferencias claras en el comportamiento de los modelos evaluados. El valor del AUC de validación promedio (área bajo la curva ROC) fue superior en las configuraciones LQP y LQ, manteniéndose consistentemente por encima de 0.75, mientras que los modelos con solo funciones lineales (L) mostraron valores inferiores a 0.66, indicando una menor capacidad discriminativa. Esta tendencia se observa claramente en la Figura 32, donde los modelos LQP alcanzaron el mayor AUC, especialmente en niveles de regularización intermedia ($rm = 2$ y 3).

Figura 32 AUC de validación promedio en función del multiplicador de regularización (rm) y las combinaciones de funciones de características (fc)

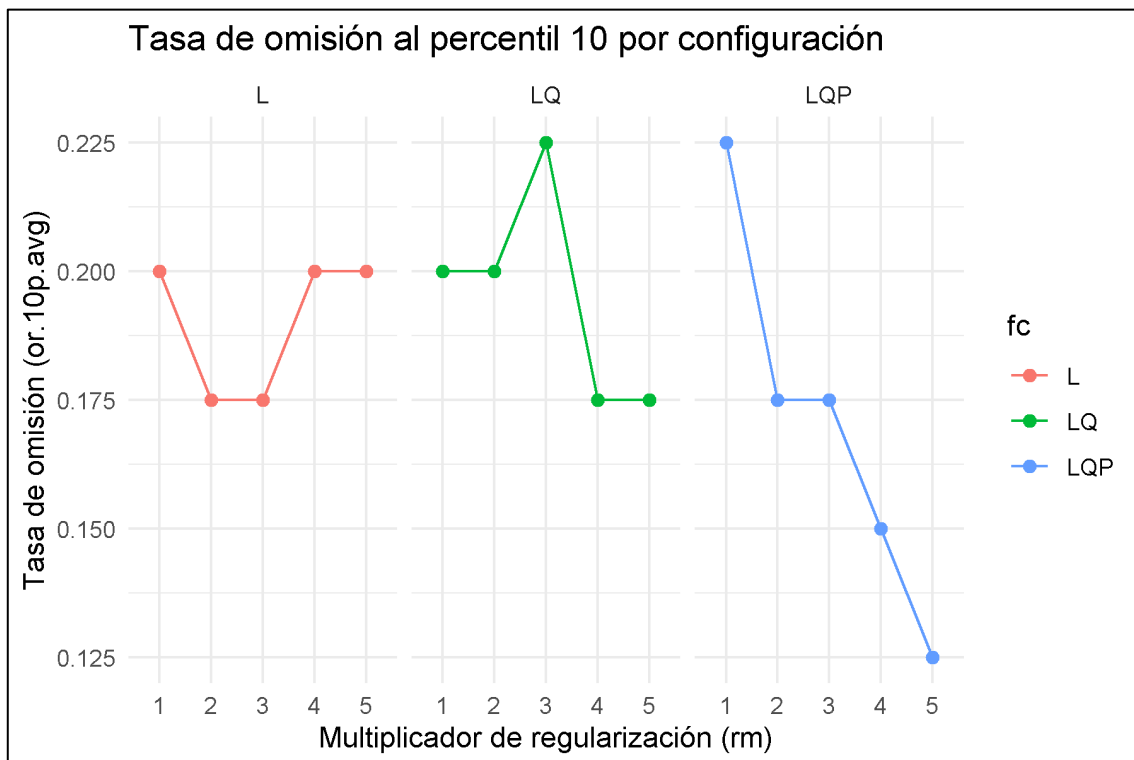
Elaboración propia.



Por otro lado, la tasa de omisión al percentil 10, que indica el porcentaje de registros de presencia mal clasificados como ausentes, mostró su comportamiento más favorable en los modelos LQP con regularización creciente. Tal como se observa en la Figura 33, los valores más bajos de omisión correspondieron a configuraciones LQP con $rm = 3, 4$ y 5 , siendo esta última la de menor omisión (0.125). Sin embargo, a mayor regularización también se observó una ligera pérdida de capacidad predictiva (leve descenso del AUC), lo que sugiere la necesidad de un balance entre ambos criterios.

Figura 33 Comportamiento de la tasa de omisión al percentil 10 según configuraciones de regularización y funciones de características (L , LQ , LQP)

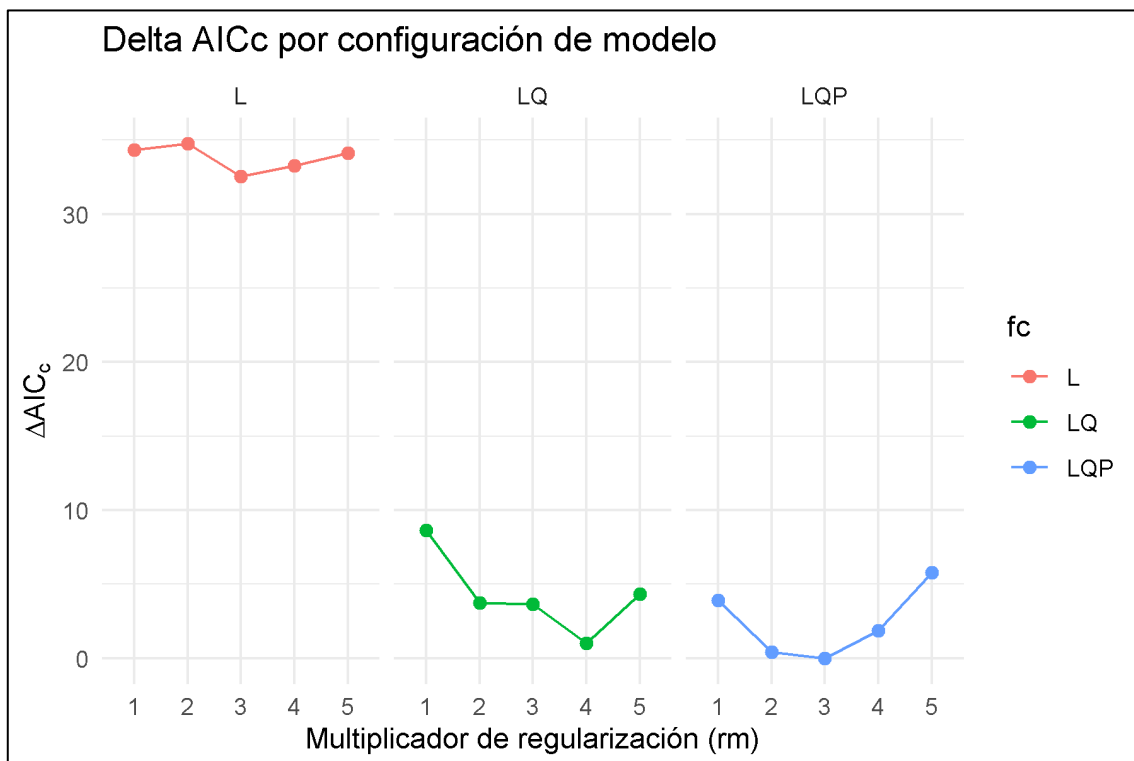
Elaboración propia.



El análisis de delta AICc, mostrado en la Figura 34, confirmó esta observación. Las configuraciones LQP_rm.2 y LQP_rm.3 presentaron los valores más bajos de $\Delta AICc$, con diferencias menores a 2 unidades, lo cual indica que son estadísticamente equivalentes en términos de calidad de ajuste. Sin embargo, LQP_rm.3 ofreció un equilibrio más robusto entre ajuste, complejidad y rendimiento predictivo.

Figura 34 Comportamiento del Delta AICc en relación con el multiplicador de regularización y las funciones de características

Elaboración propia.



En resumen, los resultados comparativos entre las funciones de características y niveles de regularización demostraron que los modelos con funciones LQP y rm intermedio (2 o 3) alcanzaron el mejor balance entre ajuste, capacidad predictiva y simplicidad.

4.3.2 Selección del modelo óptimo

Luego de comparar las 15 configuraciones generadas mediante combinaciones de funciones de características (fc) y multiplicadores de regularización (rm), el modelo seleccionado como óptimo fue “fc.LQP_rm.3”. Esta configuración integró funciones lineales, cuadráticas y de producto, con un nivel de regularización intermedio (rm = 3), lo que permitió un ajuste eficiente sin incurrir en sobreajuste.

Tabla 14. Detalle del modelo óptimo seleccionado para la distribución de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav.

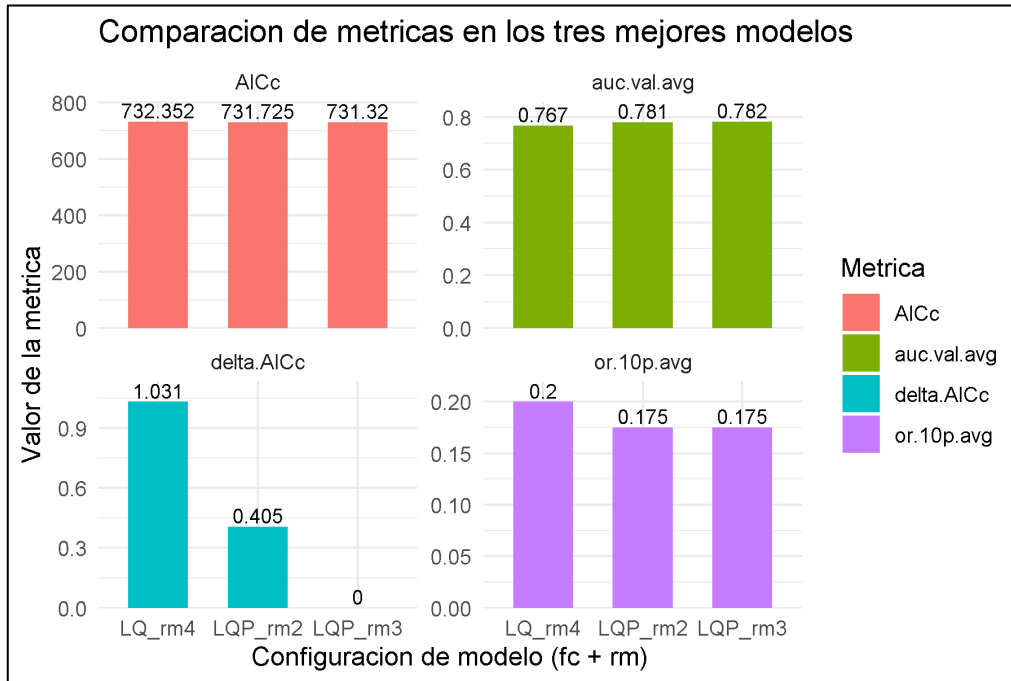
fc	rm	tune.args	auc.val.avg	or.10p.avg	AICc	delta. AICc	ncoef
LQP	3	fc.LQP_rm.3	0.782	0.175	731.320	0	6

Fuente: Propia

El modelo que cumplió con estos criterios fue fc.LQP_rm.3, el cual presentó el valor más bajo de AICc (731.32) y, por tanto, un $\Delta AICc = 0.00$, posicionándose como el modelo de referencia. Otros modelos cercanos, como fc.LQP_rm.2 y fc. LQ_rm.4, mostraron $\Delta AICc$ de 0.40 y 1.03 respectivamente, lo que indica que estadísticamente podrían considerarse modelos equivalentes. Sin embargo, al continuar con el segundo criterio —la tasa de omisión al percentil 10—, el modelo fc.LQP_rm.3 mantuvo un valor bajo de 0.175, igualando o mejorando a sus competidores; finalmente, entre los modelos con $\Delta AICc < 2$ y omisión similar, fc.LQP_rm.3 presentó el mayor AUC de validación (0.766), lo que le confirió una ventaja decisiva en términos de capacidad predictiva.

Figura 35 Comparación de métricas de desempeño en los tres mejores modelos de MaxEnt

Elaboración propia.



Por tanto, considerando su rendimiento integral, el modelo fc.LQP_rm.3 fue seleccionado como el más robusto y equilibrado para representar la distribución potencial para *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav., y se empleó como base para los análisis subsiguientes de importancia de variables, curvas de respuesta marginal y de idoneidad de hábitat.

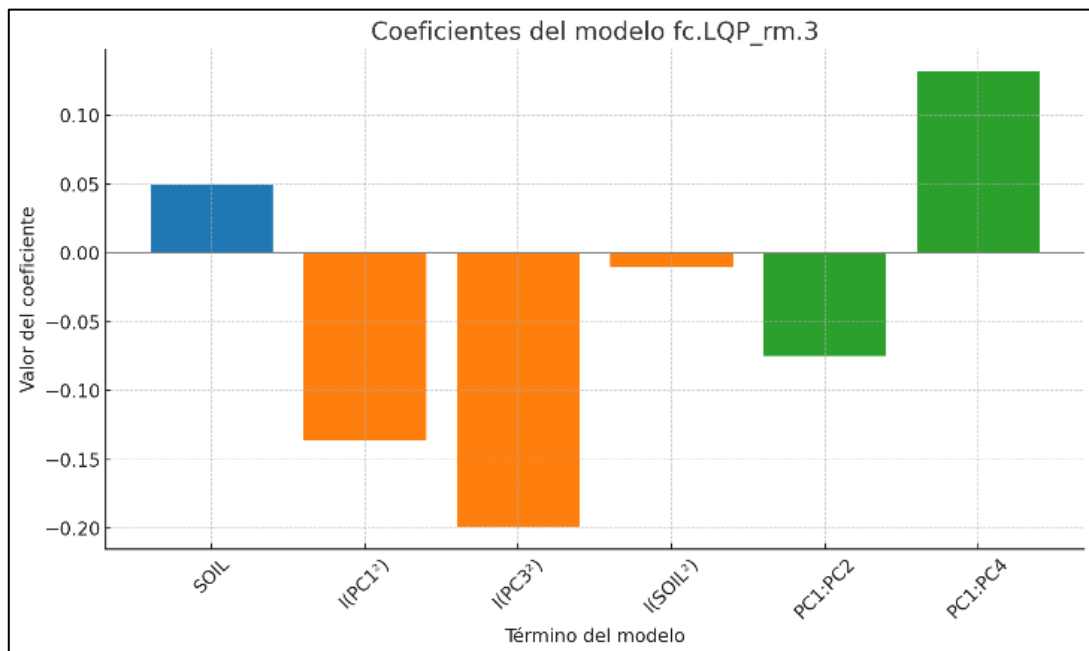
4.3.3 Importancia y contribución de variables

En el modelo óptimo fc.LQP_rm.3, la distribución potencial de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. fue determinada principalmente por los componentes PC1 y PC3, que mostraron efectos cuadráticos negativos (−0.136 y −0.199, respectivamente), indicando una respuesta no lineal de tipo unimodal, las interacciones entre variables también fueron significativas. El término PC1:PC2

presentó un coeficiente negativo (-0.075); por el contrario, la interacción PC1:PC4 tuvo un efecto positivo ($+0.132$). En cuanto al factor SOIL, su influencia fue menor: el coeficiente lineal fue positivo, pero bajo ($+0.049$), mientras que su término cuadrático fue prácticamente neutro (-0.010), lo que sugiere un efecto débil y poco curvado sobre la idoneidad. Otras variables como GEOL, PC2 y PC4 no aparecieron de forma independiente en el modelo, lo que indica que su contribución fue relevante solo en interacción o fue descartada por baja influencia.

Figura 36 Valores de los coeficientes asociados a las variables ambientales en el modelo de MaxEnt (fc.LQP_rm.3)

Elaboración propia.



El componente más influyente fue PC1, el cual representa una gradiente térmico-altitudinal, dominado por variables como temperatura máxima, temperatura media anual, estacionalidad térmica y altitud (contribución inversa).

4.3.4 Distribución potencial de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav.

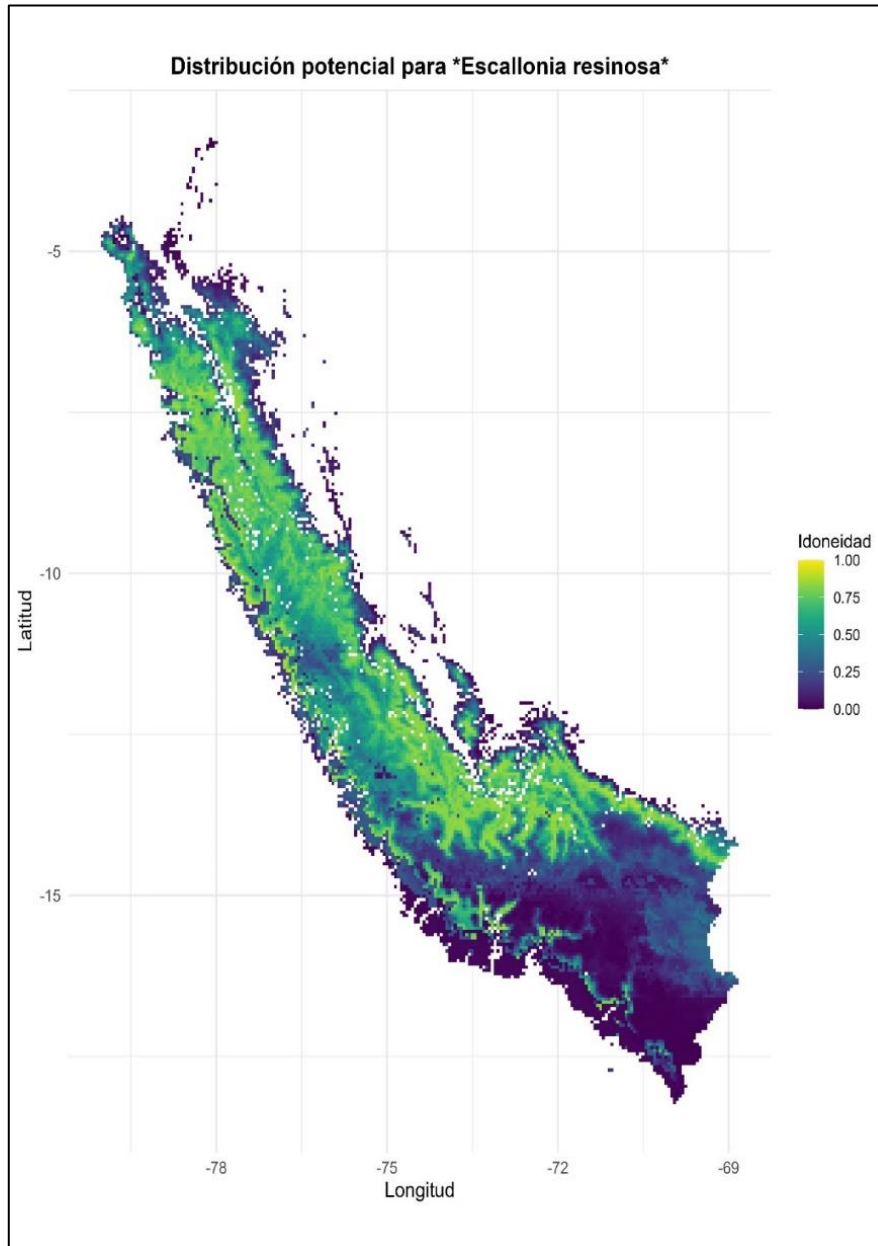
A partir del modelo óptimo fc.LQP_rm.3, se generó un mapa de distribución potencial continua para *E. resinosa*, utilizando la función predict () bajo la transformación cloglog, que permitió interpretar directamente los valores como una probabilidad de presencia en el rango de 0 a 1.

El modelo óptimo presentó una idoneidad máxima de 0.9037499, lo cual representa un alto nivel de ajuste local, especialmente en sitios donde se registran condiciones ambientales óptimas para la especie. Esta alta probabilidad indica una fuerte correspondencia entre los valores ambientales, modelados y la presencia observada de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav.

El mapa continuo de predicción (Figura 37) muestra que las zonas de mayor idoneidad (en amarillo y verde claro) se concentran a lo largo de la cordillera central y sur de los Andes peruanos, particularmente en sectores intermedios de altitud donde predominan condiciones térmicas y estacionales moderadas. La mayor extensión de áreas altamente favorables se localiza en los flancos orientales y occidentales de la cordillera, en una franja altitudinal que coincide con los bosques montanos húmedos.

Figura 37 Mapa de distribución potencial continua de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. en función de la idoneidad ambiental

Elaboración propia.



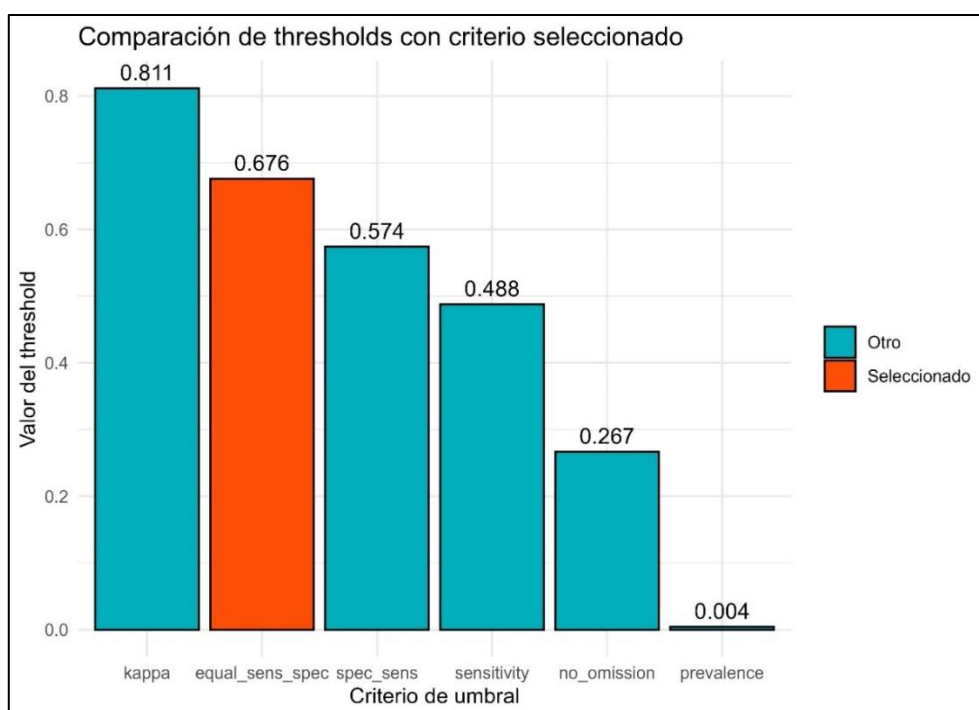
4.3.5 Umbral de corte y mapa binario

Para transformar el mapa continuo de idoneidad en una representación binaria (presencia/ausencia), se aplicó un umbral de corte sobre las predicciones del modelo óptimo *fc.LQP_rm.3*. Este umbral permitió distinguir de manera

objetiva las áreas ambientalmente adecuadas para la presencia de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav.

Figura 38 Comparación de umbrales de corte según distintos criterios estadísticos en el modelo MaxEnt

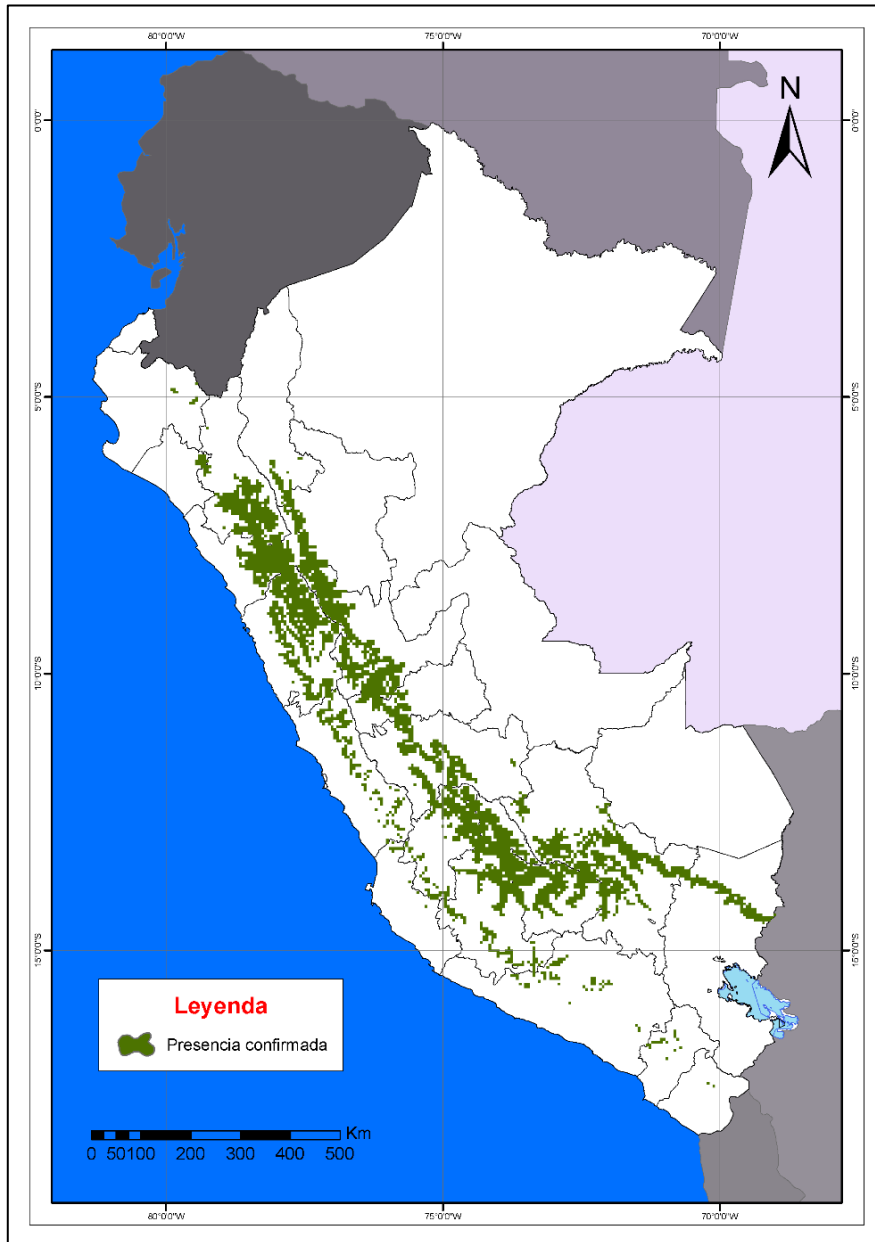
Elaboración propia.



Se utilizó el criterio de igual sensibilidad y especificidad (`equal_sens_spec`), el cual busca un equilibrio entre las tasas de verdaderos positivos y verdaderos negativos. Este enfoque es recomendable cuando se desea minimizar simultáneamente los errores de omisión y comisión. El valor umbral obtenido fue de 0.6759987; aplicando este umbral, se generó un raster binario de distribución potencial (Figura 38), en el cual todas las celdas con valores de idoneidad iguales o superiores a 0.6759987 fueron clasificadas como aptas (presencia), y aquellas por debajo de este valor como no aptas (ausencia). Este mapa brinda una representación espacial clara de los núcleos de hábitat óptimo, eliminando las áreas marginales o de baja probabilidad.

Figura 39 *Áreas idóneas para la presencia de Escallonia resinosa Ruiz & Pav. en el Perú, determinadas a partir del modelado de nicho ecológico y umbral de corte*

Elaboración propia.



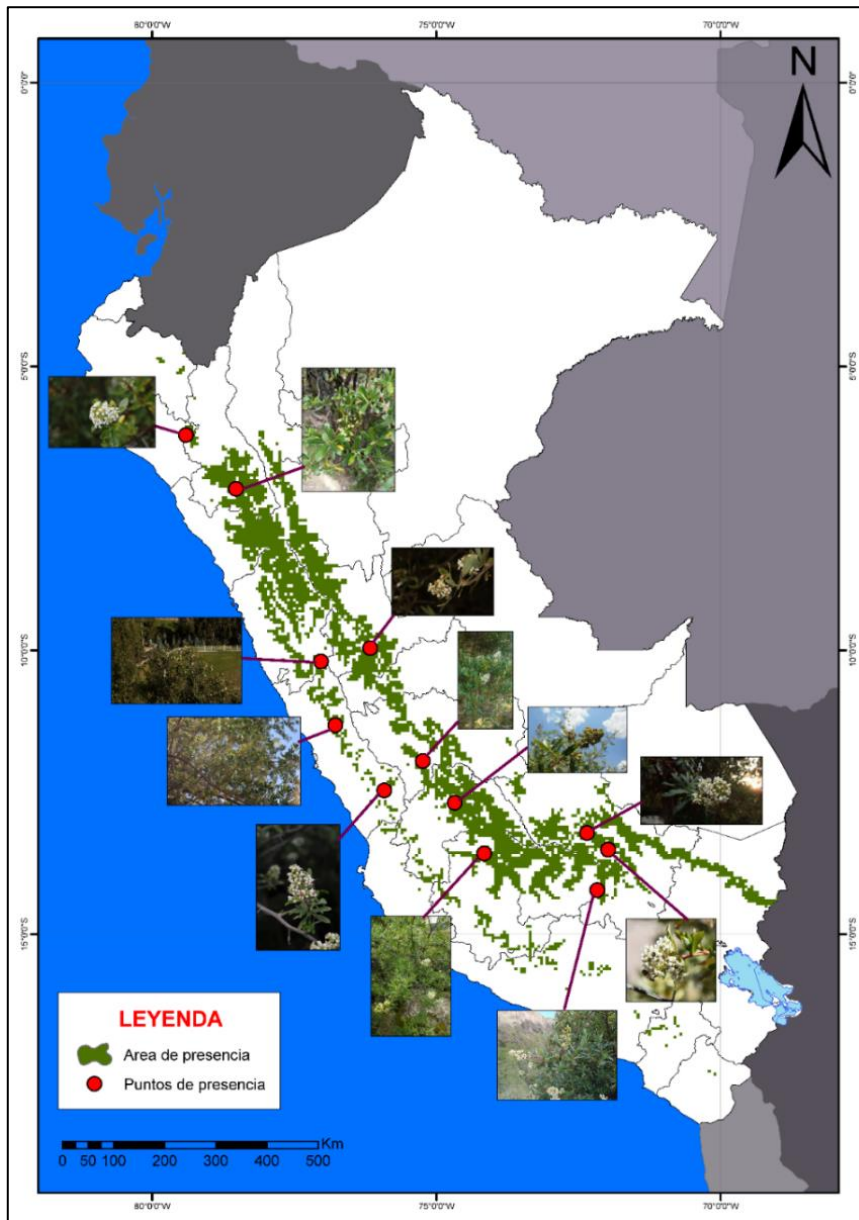
4.3.6. Validación de modelo

La superposición de los registros de validación externa sobre el mapa binario de distribución potencial mostró que los puntos confirmados coincidieron espacialmente con las zonas clasificadas como presencia por el modelo (Figura

40). Esta coincidencia sugiere que el modelo es capaz de identificar correctamente áreas donde la especie realmente está presente, incluso fuera del conjunto de entrenamiento, lo que indica una alta capacidad de generalización espacial.

Figura 40 *Áreas de distribución potencial y puntos de presencia de Escallonia resinosa Ruiz & Pav. en el Perú, con registros fotográficos de campo*

Elaboración propia.



4.4. Identificación de áreas

Tras la generación del raster binario de distribución potencial de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav., se integró este resultado con la capa reclasificada de huella humana global (Human Footprint 2022), con el objetivo de identificar zonas prioritarias para el manejo territorial de la especie. El cruce espacial entre ambas capas permitió clasificar el territorio en tres categorías de manejo:

- Presencia del modelo + HFP 0–3 → Categoría 1: Conservación estricta
- Presencia del modelo + HFP 4–10 → Categoría 2: Restauración ecológica
- Presencia del modelo + HFP >10 → Categoría 3: Mitigación o manejo de riesgo

La superposición del mapa binario de presencia potencial de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. con la capa reclasificada de huella humana permitió identificar tres categorías de manejo territorial en función del grado de presión antrópica y la idoneidad ecológica de la especie. El análisis espacial arrojó una superficie total de presencia potencial de 112,768.30 km², lo que representa aproximadamente el 8.77 % del territorio nacional. Esta superficie se distribuyó entre las tres categorías de la siguiente manera:

Tabla 15. Extensión y porcentaje de área de distribución potencial respecto al territorio peruano

Concepto	Superficie (km ²)	% respecto al territorio peruano
Extensión territorial del Perú	1,285,215.00	100.00
Área de distribución potencial de <i>Escallonia resinosa</i> Ruiz & Pav.	112,768.30	8.77

Fuente: Propia

Tabla 16. Clasificación del territorio modelado según niveles de intervención antrópica y prioridades de manejo

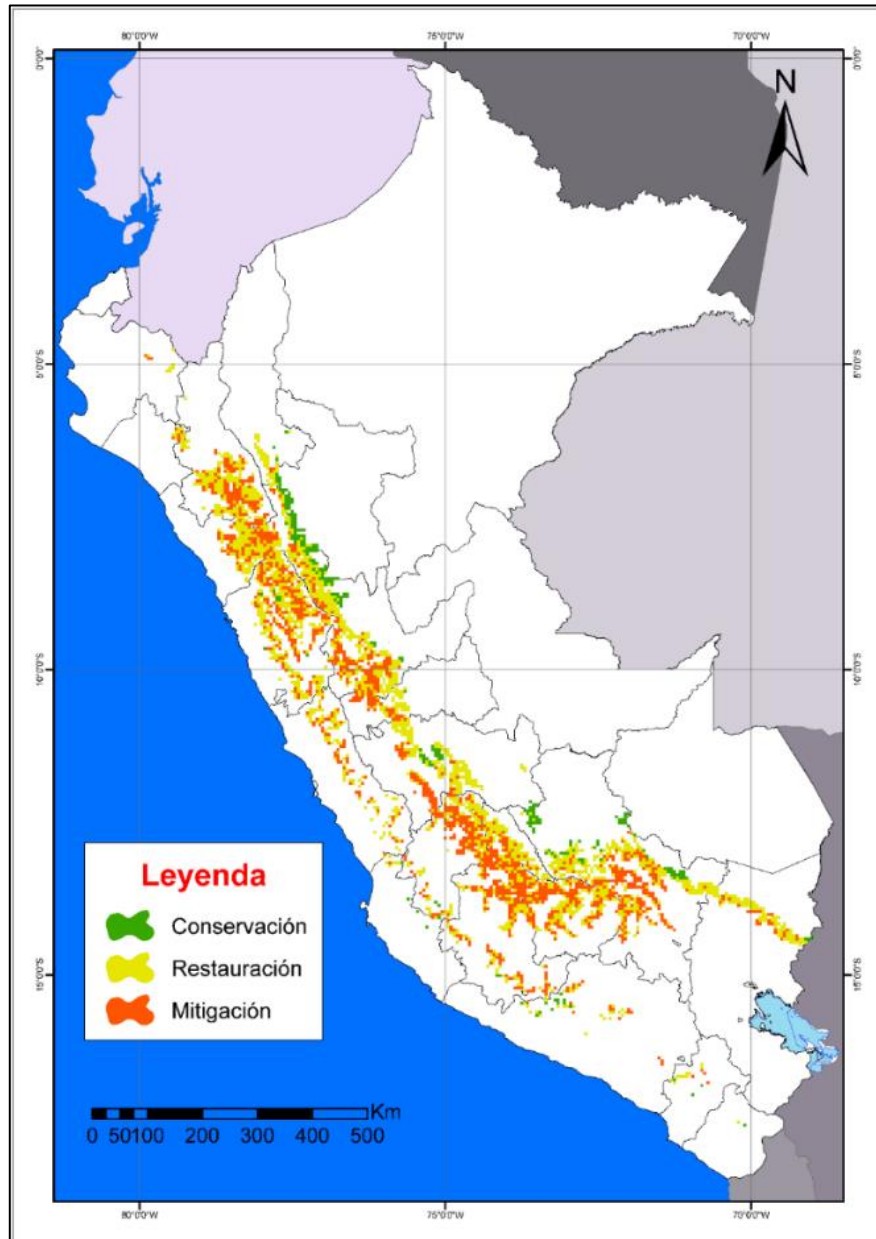
Categoría	Superficie (km²)	Porcentaje (%)
Restauración ecológica (HFI 4–10)	61,241.07	54.31
Mitigación / alto riesgo (HFI >10)	44,032.85	39.05
Conservación estricta (HFI 0–3)	7,494.42	6.65

Fuente: Propia

La mayor proporción del hábitat potencial (54.3 %) se encontró en zonas con presión antrópica intermedia, lo que resalta la necesidad de acciones de restauración ecológica para evitar la pérdida de poblaciones en ambientes degradados. Las zonas de mitigación ocupan un 39.1 %, mientras que solo un 6.7 % del área apta se conserva en estado natural, lo que evidencia la limitada cobertura de ambientes intactos disponibles para la conservación estricta.

Figura 41 Clasificación territorial según potencial de conservación, restauración y mitigación de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. en el Perú

Elaboración propia.



Estos resultados confirman que la mayor parte del rango ecológico potencial de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. se encontró en contextos antrópicos transformados, lo cual implica un riesgo significativo de pérdida de hábitat si no se adoptan estrategias de intervención adecuadas. La información generada constituye una base espacial robusta para orientar decisiones de gestión territorial basadas en evidencia ecológica.

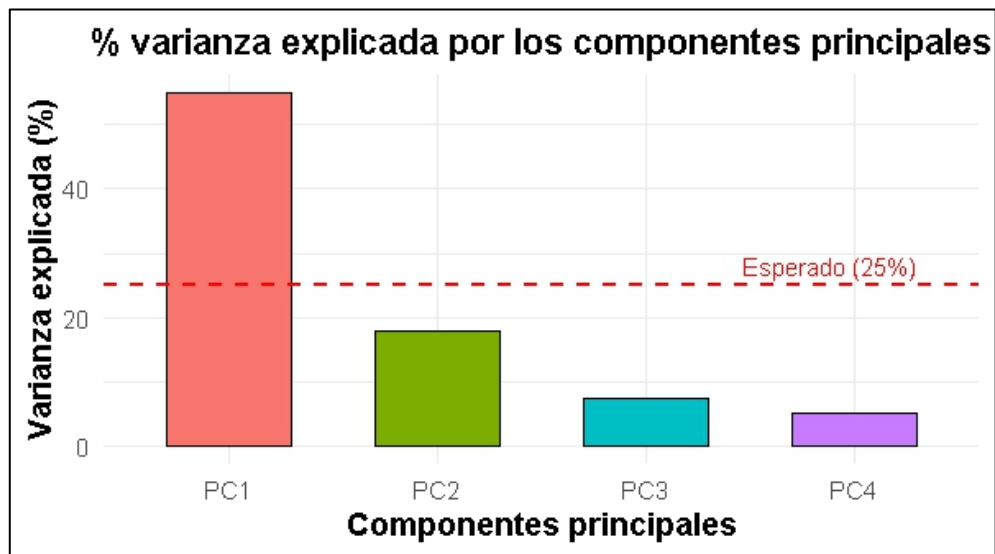
4.5 Prueba de hipótesis

Hipótesis específica 1:

Se mostró que el PC1 obtuvo 54,93 % de la varianza total, el PC2 con 18,05 %, PC3 con 7,62 % y, por último, el PC4 con 5,22%. La prueba chi-cuadrado indicó diferencias significativas respecto a la distribución uniforme esperada del 25% en cada componente.

Figura 42 Distribución de la varianza entre los componentes principales (PCA)

Elaboración propia.



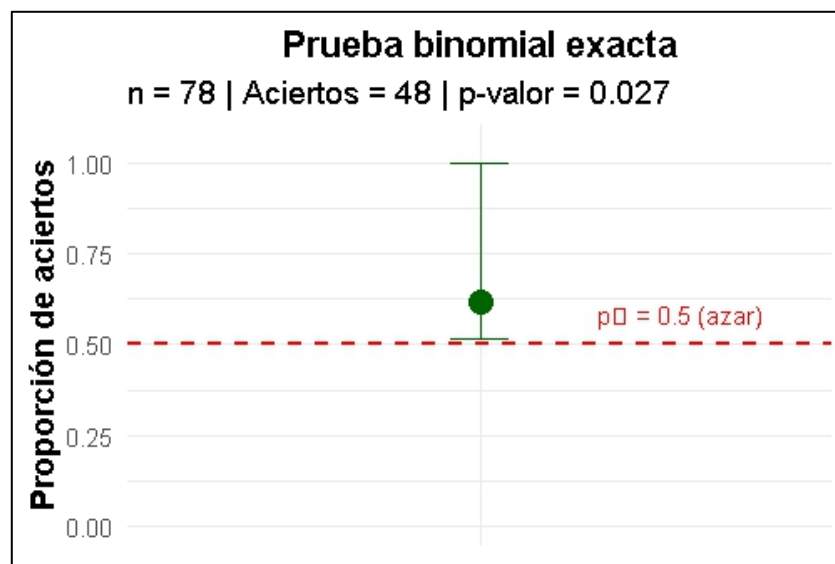
Para la HE1, se aplicó el análisis de chi-cuadrado aplicado a las contribuciones de los componentes principales (PC1–PC4), con una distribución uniforme esperada, mostrando un valor de $p < 0.001$. Este resultado indicó que al menos uno de los factores ambientales evaluados influyó de manera significativa en la predicción de la distribución de *Escallonia resinosa* Ruiz y Pav. Por lo tanto, se rechazó la hipótesis nula (H_0) y se aceptó la hipótesis alterna (H_1).

Hipótesis específica 2:

Se mostró de los 78 registros de presencia que fueron evaluadas, 48 (61,5%) coincidieron con las celdas reclasificadas con un valor de 1 en el mapa binario, mientras que 30 quedaron fuera de dichas áreas. La prueba binomial exacta nos indicó que la proporción de aciertos fue significativamente mayor al 50% esperado por azar ($p = 0,0267$, IC95 % = 0,516 – 1,000; $N = 78$) lo que indicó la capacidad predictiva del modelo.

Figura 43 Resultados de la prueba binomial aplicada a los registros de presencia

Elaboración propia.



La prueba binomial aplicada a la coincidencia entre los puntos de validación y predicción del modelo, mostró un valor de $p = 0.026$. Este resultado indicó que la predicción del modelo fue significativamente mejor que el azar. En consecuencia, se rechazó la hipótesis nula (H_0) y se aceptó la hipótesis alterna (H_1).

V. Discusiones

En el análisis de componentes principales, se observó que los cuatro primeros ejes explicaron, en conjunto, 85.82 % de la variabilidad ambiental del área de estudio. Este resultado fue consistente con lo reportado en estudios similares de modelado de nicho ecológico, donde los primeros componentes suelen concentrar la mayor parte de la información climática y topográfica relevante (Elith & Leathwick, 2009; Dormann et al., 2013).

El modelo mostró que *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. alcanza su mayor idoneidad en condiciones térmicas intermedias, evitando tanto climas cálidos de baja altitud como ambientes fríos extremos. Esta preferencia coincide con los registros documentados por Soto y Nishme (2007) y Casas (2007), quienes reportaron su presencia en altitudes entre 2600 y 4350 msnm, con temperaturas medias entre 6 y 17 °C. De igual modo, los registros de Tineo (2018) y De la Cruz (2018) en Ayacucho valida esta afinidad por pisos altitudinales medios y altos.

Otro componente destacado fue PC3 (Tabla 11), correspondiente a una gradiente de estacionalidad climática, influido por la isothermalidad, la estacionalidad de temperatura y precipitación, y el rango térmico anual. El modelo indicó que *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. se distribuye preferentemente en ambientes con variabilidad climática moderada, lo cual permite cierto grado de adaptación sin exposición a extremos ambientales. Esta interpretación es respaldada por estudios como los de Quicaña (2019) en la provincia de Vinchos, y en el estudio de Casas (2007), que ubican a la especie en bosques intermedios de humedad y temperatura, en zonas con estacionalidad moderada y marcada heterogeneidad ambiental.

Asimismo, el modelo incorporó interacciones como PC1:PC2 (gradiente de humedad-sequedad), que reveló que la idoneidad térmica puede verse limitada en condiciones de baja humedad. Este resultado es coherente con los antecedentes de Reyes (2018) y Callañaupa (2019), quienes asociaron la presencia de la especie a micro hábitats con retención de humedad

y estabilidad hidrológica local, como quebradas y laderas húmedas. También se destaca la interacción positiva entre PC1 y PC4, lo que sugiere que las condiciones térmicas favorables se ven reforzadas en ambientes con menor pendiente y menor variabilidad térmica extrema, tal como ocurre en algunas zonas descritas por Tineo (2018).

La variable SOIL (suelo), aunque incluida en el modelo, mostró un efecto débil. Esto no contradice su importancia ecológica a escalas locales, ya que antecedentes como los de Soto y Nishme (2007), y Reyes (2018), indican que la especie se adapta a suelos ácidos, poco profundos y con alta materia orgánica. Sin embargo, a la escala de resolución empleada en este estudio, los patrones climáticos y topográficos demostraron ser los determinantes principales.

La elección del modelo óptimo (Tabla 14), respondió a un proceso secuencial que combinó criterios de capacidad predictiva. El modelo fc.LQP_rm.3 se destacó por presentar el valor más bajo de AICc, con un $\Delta AICc$ igual a cero, lo que lo posicionó como la alternativa más robusta frente a otros modelos estadísticamente comparables. Según Burnham y Anderson (2002), diferencias menores a 2 en $\Delta AICc$ indican que los modelos pueden considerarse equivalentes; sin embargo, al complementar el análisis con la tasa de omisión al percentil 10 y el AUC de validación, fc.LQP_rm.3 mantuvo el mejor desempeño. Este resultado coincide con lo reportado por Warren y Seifert (2011), y Elith et al. (2011), quienes resaltan la importancia de evaluar simultáneamente la complejidad del modelo y su ajuste predictivo.

La selección del modelo óptimo (fc.LQP_rm.3), sustentada en criterios estadísticos de parsimonia y desempeño predictivo, no solo permitió identificar con mayor precisión los factores ambientales que determinan la distribución potencial de *Escallonia resinosa* Ruiz y Pav., sino que también ofrece un insumo clave para la gestión ambiental en el Perú. El Ministerio del Ambiente (MINAM, 2014, 2019), a través de instrumentos como la *Estrategia Nacional de Diversidad Biológica* y el *Mapa Nacional de Ecosistemas*, promueve la

generación de información espacial. En este sentido, la predicción obtenida con el modelo contribuye directamente a dichos lineamientos, al delimitar áreas de conservación estricta y zonas prioritarias para restauración ecológica en los Andes.

Por su parte, el Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR, 2016) reconoce a los bosques altoandinos como ecosistemas frágiles y estratégicos, incorporando especies nativas como *Escallonia resinosa* Ruiz y Pav. dentro de las prioridades de manejo sostenible. La robustez del modelo fc.LQP_rm.3 fortalece las metas de restauración planteadas por el Estado peruano.

De este modo, la aplicación de criterios científicos de modelado, como los empleados en la Tabla 14, se articula con las políticas de gestión ecológica impulsadas por MINAM y SERFOR, constituyendo una herramienta técnica que fortalece la toma de decisiones para la conservación de los bosques altoandinos y el uso sostenible de *Escallonia resinosa* Ruiz y Pav. en el territorio peruano.

En la Tabla 14 se rechaza la hipótesis nula de la primera hipótesis específica, ya que los factores ambientales influyeron significativamente en la distribución de las especies; respondiendo a la interrogante de los principales factores ambientales que influyen en la distribución potencial de la especie.

La zonificación territorial obtenida (Figura 41), evidenció que gran parte del rango potencial de *Escallonia resinosa* Ruiz y Pav. se encuentra en áreas sometidas a diferentes niveles de intervención humana, predominando aquellas clasificadas como de restauración y mitigación. Este resultado confirma la fuerte presión sobre los bosques altoandinos, en concordancia con lo señalado por el Ministerio del Ambiente (MINAM, 2019), que identifica a los ecosistemas de montaña como altamente vulnerables frente a procesos de deforestación y cambios de uso de suelo.

La presencia de áreas destinadas a conservación estricta resalta la necesidad de fortalecer las medidas de protección *in situ*, alineándose con la *Estrategia Nacional de Diversidad Biológica* (MINAM, 2014), que promueve la conservación de especies nativas con valor ecológico y cultural. De manera complementaria, las zonas definidas para restauración ecológica responden a las directrices establecidas por el Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR, 2016), que reconoce la fragilidad de los bosques altoandinos y fomenta su recuperación mediante reforestación y manejo con especies nativas.

Por otro lado, las áreas clasificadas como de mitigación coincidieron con territorios de alta presión antrópica en distintas regiones andinas, lo que subraya la importancia de vincular esta información con los procesos de ordenamiento territorial y planificación del paisaje. Estos hallazgos se relacionan con las orientaciones de MINAM y SERFOR, que plantean que la restauración y el manejo participativo deben priorizar los paisajes degradados para reducir la pérdida de biodiversidad y asegurar la provisión de servicios ecosistémicos.

En términos sobre la identidad del ecosistema forestal, se confirmó que *Escallonia resinosa* Ruiz y Pav. desempeñó un papel esencial en la estabilidad de los ecosistemas altoandinos. Su distribución en laderas, quebradas y suelos inclinados evidenció su función en la fijación de suelos, la regulación de la humedad y la provisión de microhábitats. De esta manera, la especie contribuyó directamente a la integridad ecológica de los bosques montanos, manteniendo procesos hidrológicos y reduciendo la vulnerabilidad frente a la erosión, en concordancia con lo señalado por Körner (2007), quien destaca la función reguladora de la vegetación montaña en la dinámica climática e hidrológica de los Andes.

La amplitud altitudinal de la distribución modelada (1500–5250 msnm) sugirió una tolerancia ecológica amplia que posicionó a *E. resinosa* como una especie potencialmente resiliente frente a escenarios de cambio climático. La mayor idoneidad en pisos montanos

medios y altos indicó que la especie podría servir como componente clave en procesos de restauración adaptativa, fortaleciendo la capacidad de los ecosistemas para responder a la variabilidad climática, lo cual coincide con lo reportado por MINAM (2014), al priorizar especies nativas resilientes para enfrentar la vulnerabilidad de ecosistemas altoandinos. Sin embargo, se pide otras investigaciones para determinar su adaptabilidad a distintos escenarios del futuro.

La distribución espacial de *E. resinosa*, permitió reconocer su papel en la conectividad de mosaicos forestales fragmentados, contribuyendo al mantenimiento de la diversidad beta en los Andes. La especie actuó como elemento estructural que favoreció la persistencia de flora y fauna endémica asociada a los bosques altoandinos, reforzando su importancia como especie clave en redes ecológicas locales y regionales. Este resultado es coherente con lo planteado por Huamantupa et al. (2023), quienes destacan que la diversidad beta de las comunidades vegetales de los Andes se sustenta en la heterogeneidad espacial y la presencia de especies nativas que son clave en las estructuras del mosaico.

En la Figura 41 acepta la Hipótesis general ya que rechaza la hipótesis nula, donde se confirmó que es posible identificar áreas diferenciales de manejo territorial a partir del modelado, correspondiente a la interrogante de las áreas potenciales más idóneas para la gestión ecológica de la especie.

En la prueba de hipótesis específica 1 (Figura 42), se evidenció que PC1 concentró más de la mitad de la varianza total, donde en este eje sintetizó las variables ambientales que tuvieron mayor influencia sobre la distribución de *Escallonia resinosa* Ruiz y Pav. Varias investigaciones referentes a nicho ecológico, destacan que aquellos componentes iniciales suelen concentrar los gradientes climáticos con mayor relevancia, como la precipitación y la temperatura, que son los predictores principales de la presencia de las especies (Phillips et al.,

2006; Phillips & Dudík, 2008; Elith et al., 2011). La significancia obtenida en la prueba X^2 indicó que la varianza no tuvo una distribución uniforme, sino que fue dominada por algunos factores ambientales, lo que coincide con los reportes de dichos autores al señalar que la identificación de las variables clave fortalece la confiabilidad de los modelos de nicho ecológico.

En la Figura 43, el porcentaje de coincidencia observado (61,5%) y la significancia de la prueba binomial, confirmaron que el modelo MaxEnt evidenció la presencia de *Escallonia resinosa* Ruiz y Pav. con un desempeño superior al azar. Este hallazgo validó la confiabilidad del modelo MaxEnt para la estimación de la distribución de la especie en los Andes peruanos. Investigaciones previas sostienen que los modelos de nicho ecológico basados en presencia-fondo, al ser calibrados con criterios estadísticos apropiados, alcanzan niveles de eficacia para la planificación de la conservación (Phillips et al., 2006; Phillips & Dudík, 2008; Elith et al., 2011). Así que estos resultados confirman la validez de la hipótesis específica 2, al demostrarse una proporción de aciertos significativamente mayor al 50 % esperado por azar.

El enfoque metodológico aplicado basado en el uso de MaxEnt, validación mediante ENMeval, análisis de componentes principales y uso de herramientas SIG fue sólido, reproducible y científicamente confiable. Este enfoque permitió integrar múltiples tipos de variables (climáticas, topográficas, edáficas y de presión humana) de manera coherente y validada. Además, se consideró que puede ser fácilmente adaptado a otras especies altoandinas, así como ampliado a estudios regionales de conservación, corredores ecológicos o diseño de áreas protegidas.

VI. Conclusiones

Interrogante general

Al superponer el mapa binario de presencia con la capa de huella humana (HFI, 2022), se estableció una clasificación para el hábitat de *Escallonia resinosa* Ruiz y Pav. en tres categorías: conservación estricta, restauración ecológica y mitigación. Las zonas de conservación estricta ($HFI \leq 3$; 6.65%) se localizaron principalmente en Ayacucho, Apurímac, Cusco, Huancavelica, Junín y Pasco, representando áreas clave para la protección *in situ*. Las zonas de restauración ($0.3 < HFI \leq 10$; 54.31%) abarcaron partes de Arequipa, La Libertad, Huánuco y Puno. Las zonas de mitigación ($HFI > 10$; 39.05%) incluyeron sectores con alta presión antrópica en Lima, Cajamarca, Apurímac y Cusco. Esta zonificación permitió relacionar la distribución ecológica potencial con el contexto territorial real, facilitando la toma de decisiones diferenciadas. Se concluyó que esta zonificación aporta una herramienta territorial estratégica para la gestión diferenciada de los ecosistemas donde habita *Escallonia resinosa* Ruiz y Pav., y puede ser integrada en planes de ordenamiento ambiental, conservación participativa y restauración a escala regional.

Interrogante específica 1

Con base en los resultados del modelo óptimo (fc.LQP_rm.3), se concluyó que la distribución potencial de *Escallonia resinosa* Ruiz y Pav. estuvo determinada principalmente por los componentes ambientales PC1 y PC3, con efectos cuadráticos negativos, lo que evidenció una respuesta unimodal frente a las gradientes ambientales. El componente PC1 sintetizó un gradiente térmico-altitudinal y representó la variable más influyente. A partir de los resultados altitudinales del modelo, se observó que la especie presentó un rango de distribución modelada entre 1500 y 5250 msnm, con mayor concentración de presencia entre 1600 y 3600 msnm, lo que indicó preferencia por ambientes de temperatura moderada y pisos

altitudinales medios y altos. PC3, relacionado con la estacionalidad climática, también aportó significativamente, confirmando la afinidad de la especie por zonas con variabilidad térmica intermedia. Se identificó interacciones significativas entre variables (PC1:PC2 y PC1:PC4) que reforzaron la importancia del contexto climático combinado. Además, aunque el factor SOIL mostró un efecto leve en el modelo general, se reconoció que podría tener un mayor peso ecológico a escalas locales, especialmente en suelos ácidos y con buen drenaje. La observación directa en campo confirmó la presencia de la especie en pendientes pronunciadas y laderas húmedas, lo cual sugiere una tolerancia ecológica más amplia de la que se reflejó en los patrones promedio del modelo. Finalmente, se observó que variables como GEOL, PC2 y PC4 no aparecieron de forma independiente en el modelo final, lo cual indicó que su influencia fue relevante solo en interacción con otros componentes, o que fueron descartadas por presentar baja capacidad explicativa.

Interrogante específica 2

Mediante el uso del modelo optimizado, se generó un mapa continuo de idoneidad ambiental para *Escallonia resinosa* Ruiz y Pav., el cual permitió identificar áreas con alta, media y baja probabilidad de presencia. Posteriormente, al aplicar el umbral de corte equal_sens_spec, se construyó un mapa binario de presencia–ausencia que mostró una distribución discontinua, principalmente en los departamentos como Ayacucho, Apurímac, Cusco, Huancavelica y Junín, que concentraron las mayores extensiones de hábitat potencial, aunque también se identificaron núcleos fragmentados en Ancash, Pasco y Puno. Se determinó que la superficie potencial favorable para la especie aproximadamente fue de 112,768.30 km², lo que representa un 8.77 % del territorio nacional del Perú, lo cual se concentra en zonas montañas templado-frías, con condiciones climáticas estacionales y suelos medianamente desarrollados. La mayor parte del área modelada como idónea se ubicó entre los 1600 y 3600 msnm, donde se registraron los valores más altos de frecuencia altitudinal de presencia. Se

concluyó que el mapa generado constituye una herramienta útil para orientar acciones de conservación, restauración y planificación ecológica territorial.

VII. Recomendaciones

Con base en las conclusiones obtenidas, se formularon las siguientes recomendaciones dirigidas a instituciones, autoridades y futuras investigaciones:

- ✓ Priorizar la conservación *in situ* en zonas de alta idoneidad y baja presión antrópica, se propone que las zonas clasificadas como conservación estricta sean integradas en instrumentos de ordenamiento territorial o sistemas de áreas protegidas, especialmente en Ayacucho, Apurímac, Cusco, Huancavelica, Junín y Pasco, donde aún se conservan remanentes de bosques con presencia potencial de la especie.
- ✓ Implementar programas de restauración ecológica activa en zonas intermedias, se recomienda desarrollar proyectos de restauración en las áreas con condiciones ambientales favorables y presión antrópica moderada, mediante la instalación de viveros locales, reforestación con plántulas de *E. resinosa* y participación social.
- ✓ Establecer estrategias de mitigación y control en zonas de alta presión antrópica, en las áreas clasificadas como de mitigación, se sugiere implementar medidas de control de actividades antrópicas, restauración funcional y compensación ecológica, priorizando sectores altamente intervenidos en Cusco, Arequipa, Lima y La Libertad.
- ✓ Validar y monitorear en campo las predicciones del modelo, se recomienda realizar campañas de validación en campo, especialmente en zonas de presencia modelada sin registros confirmados, para ajustar y mejorar la precisión del modelo ecológico en futuras versiones.
- ✓ Ampliar el enfoque metodológico a otras especies altoandinas, se sugiere replicar este enfoque en otras especies nativas amenazadas o indicadoras de ecosistemas altoandinos, como estrategia para orientar programas regionales de conservación y restauración con base científica.

- ✓ Fortalecer el uso de variables socio ambientales y climáticas futuras, incorporar variables como uso de suelo, accesibilidad, escenarios de cambio climático y conectividad del paisaje puede permitir una proyección más realista del hábitat potencial de la especie y de su vulnerabilidad futura.
- ✓ Promover la articulación interinstitucional en conservación y restauración, se insta a que los resultados de este estudio sean compartidos con instituciones como MINAM, SERFOR, gobiernos regionales y ONGs, para integrarlos en políticas ambientales, planes de restauración y proyectos de desarrollo sostenible.

VIII. Referencias bibliográficas

- Ab Lah, N., Yusop, Z., Hashim, M., Mohd, J., & Numata, S. (2021). Predicción de la idoneidad del hábitat de *Melaleuca cajuputi* en función del modelo de distribución de especies MaxEnt. *Forests*, 12(11), 1449. <https://doi.org/10.3390/f12111449>
- Adhikari, D., Barik, S., & Upadhaya, K. (2012). Modelado de distribución de hábitat para la reintroducción de *Ilex khasiana* Purk., una especie de árbol en peligro crítico de extinción del noreste de la India. *Ingeniería Ecológica*, 40, 37–43. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.12.004>
- Andaluz, C. (2016). Manual de derecho ambiental (1.a ed., Vol. 1). Proterra. https://www.academia.edu/31333488/Manual_de_Derecho_Ambiental_Carlos_Andaluz_Westreicher
- Anderson, E., & González, J. (2011). Human population growth and biodiversity loss. In S. Levin (Ed.), *The Princeton Guide to Ecology* (pp. 253–259). Princeton University Press.
- Aronés, M. (2022). *Modelación de la distribución potencial de la Unca (Myrcianthes spp.) usando las 19 variables bioclimáticas en la Región Ayacucho* [Tesis de ingeniería, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga]. <https://es.scribd.com/document/639164830/Modelacion-de-la-distribucion-potencial-de-la-Unca-Myrcianthes-spp-usando-las-19-variables-bioclimaticas-en-la-Region-Ayacucho>
- Banco Mundial (2021). *Datos sobre población mundial*. <https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL>
- Bennett, M., Reppucci, J., Cuéllar, E., & Romero-Muñoz, A. (2017). Forecasting habitat suitability for the Andean cat (*Leopardus jacobita*) under climate change scenarios in

the central Andes. *Biological Conservation*.

<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2017.xx.xxx>

Burnham, K., & Anderson, D. (2002). *Model selection and multimodel inference: A practical information-theoretic approach* (2nd ed.). Springer.

Butchart, S., Walpole, M., Collen, B., van Strien, A., Scharlemann, J., Almond, R., ... & Watson, R. (2010). Global biodiversity: indicators of recent declines. *Science*, 328(5982), 1164–1168. <https://doi.org/10.1126/science.1187512>

Callañaupa, R. (2019). Estructura y composición florística de la vegetación arbórea y arbustiva del Santuario Histórico de la Pampa de Ayacucho, distrito de Quinua. 2017. Repositorio Institucional UNSCH. <http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/2837>

Camarena, J., Gutiérrez, D., Quispe, L., & Gonzales, M. (2024). Seedling production of *Retrophyllum rospigliosii* in nurseries and potential reforestation areas using modeling techniques. *Forests*, 15(12), 2179. <https://doi.org/10.3390/f15122179>

Campos, D. (2015). Gestión exitosa de la forestación y reforestación de tres comunidades campesinas de la provincia de Jauja (Región Junín, Perú). Repositorio Institucional Universidad Nacional Agraria La Molina. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/214>

Cardinale, B., Duffy, J., Gonzalez, A., Hooper, D., Perrings, C., Venail, P., ... & Naeem, S. (2012). Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature*, 486(7401), 59–67. <https://doi.org/10.1038/nature11148>

CARE Bolivia y Programa Nacional de Cambio Climático. (2011). Fichas botánicas de especies agroforestales nativas aptas para tierras altoandinas (N.º 1). PRAA. <http://www.ecosaf.org/altiplano/Fichas%20botanicas%20CARE.pdf>

Casas, L. (2007). Evaluación del potencial del ecoturismo en la microcuenca Palliccamayo en la región Apurímac. Repositorio Institucional Universidad Nacional Agraria La Molina. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/1740>

- Castro, R. (2018). Planificación territorial y desarrollo sostenible: una mirada desde las áreas potenciales.
- Ceccon, E. (2013). Restauración ecológica: conceptos, tendencias y perspectivas. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 84(4), 1060–1070. <https://doi.org/10.7550/rmb.36469>
- Chadwick, O., & Chorover, J. (2001). The chemistry of pedogenic thresholds. *Geoderma*, 100(3–4), 321–353. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(01\)00027-1](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(01)00027-1)
- Chase, J., & Leibold, M. (2003). Ecological niches: linking classical and contemporary approaches. University of Chicago Press.
- Chauhan, S., Ghoshal, S., Kanwal, K., Sharma, V., & Ravikanth, G. (2022). Modelado de nichos ecológicos para predecir la idoneidad del hábitat de la especie arbórea en peligro de extinción *Taxus contorta* Griff. *Ecología Tropical*. <https://doi.org/10.1007/s42965-021-00200-2>
- Conrad, K. (2015). *Probability distributions and maximum entropy*. University of Connecticut. <https://kconrad.math.uconn.edu/blurbs/analysis/entropypost.pdf>
- Correa, C., Etter, A., Díaz, J., Rodríguez, S., Ramírez, W., & Corzo, G. (2020). Spatiotemporal evaluation of the human footprint in Colombia: Four decades of anthropic impact in highly biodiverse ecosystems. *Ecological Indicators*, 117, 106630. Doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106630
- De la Cruz, A. (2018). Estructura y composición florística de la vegetación arbórea y arbustiva del Santuario Histórico de la Pampa de Ayacucho, distrito de Quinua. 2017. Repositorio Institucional UNSCH. <http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/2837>
- Dormann, C., Elith, J., Bacher, S., Buchmann, C., Carl, G., Carré, G., ... & Lautenbach, S. (2013). Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography*, 36(1), 27–46. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2012.07348.x>

- Elith, J., Graham, C. H., Anderson, R. P., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., ... & Zimmermann, N. E. (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29(2), 129–151. <https://doi.org/10.1111/j.2006.0906-7590.04596.x>
- Elith, J., & Leathwick, J. R. (2009). Species distribution models: Ecological explanation and prediction across space and time. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 40, 677–697. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.110308.120159>
- Elith, J., Phillips, S., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y., & Yates, C. (2011). A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 17(1), 43–57. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00725.x>
- Espinoza, C., Reynel, C., & Marcelo, J. (2006). *Guía dendrológica del Perú. Escalloniaceae: Escallonia resinosa*. Herbario MOL, Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- FAO (2020). Global Forest Resources Assessment 2020 – Key findings. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/forest-resources-assessment/2020/en/>
- Ferrer, M. (2012). Modelización de la distribución potencial de especies mediante el algoritmo MaxEnt: una herramienta útil para la conservación. *Ecología Austral*, 22(1), 55–67.
- Fernández, E. (1997). Estudio fitosociológico de los bosques de kewiña en la cordillera de Cochabamba. *Revista Boliviana de Ecología y Conservación Ambiental*, 2, 49–60. https://issuu.com/jpinto2/docs/1997_fernandez_estfitbqkewi_accocha
- Gentry, A. (1993). A field guide to the families and genera of woody plants of northwest South America (Colombia, Ecuador, Peru) with supplementary notes on herbaceous taxa. University of Chicago Press.
- GeoBosques – MINAM. Sistema de Monitoreo de la Cobertura de Bosques del Perú. Ministerio del Ambiente. <https://geobosques.minam.gob.pe>

- Goodchild, M. (1994). Integrating GIS and spatial analysis: problems and possibilities. *International Journal of Geographical Information Systems*, 8(5), 407–423. <https://doi.org/10.1080/02693799408901925>
- GORE. (2021). Gobierno Regional de Ayacucho | Gobierno del Perú. Gob.pe. <https://www.gob.pe/institucion/regionayacucho/institucional>
- Graham, J., & Kimble, M. (2019). Visualizing uncertainty in habitat suitability models with the Hyper-Envelope Modeling Interface, version 2 (HEMI 2). *Ecology and Evolution*, 9, 251–264. <https://doi.org/10.1002/ece3.4720>
- Grinnell, J. (1917). The niche-relationships of the California Thrasher. *The Auk*, 34(4), 427–433. <https://doi.org/10.2307/4072271>
- Guisan, A., & Thuiller, W. (2005). Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*, 8(9), 993–1009. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00792.x>
- Guisan, A., & Zimmermann, N. E. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, 135(2–3), 147–186. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(00\)00354-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(00)00354-9)
- Hansen, A., Aragon, J., González, I., Veneros, J., Virnig, A., Jantz, P., Venter, O., Goetz, S., Watson, J., Cordoba, N., Rodriguez, S., Monroy, L., Iglesias, J., Beltrán, L., Borja, D., Ureta, D., Tingo, J., Oñate, C., Valencia, F., . . . Huerta, P. (2024). Developing national complementary indicators of SDG15 that consider forest quality: Applications in Colombia, Ecuador, and Peru. *Ecological Indicators*, 159, 111654. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111654>
- Hijmans, R., Cameron, S., Parra, J., Jones, P., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25(15), 1965–1978. <https://doi.org/10.1002/joc.1276>

- Hirsh, K., Johnson, C., Schuster, R., Wheate, R., & Venter, O. (2022). Canada's human footprint reveals large intact areas juxtaposed against areas under immense anthropogenic pressure. *FACETS*, 7, 398-419. <https://doi.org/10.1139/facets-2021-0063>
- Hirzel, A., & Guisan, A. (2002). ¿Cuál es la estrategia de muestreo óptima para la modelización de la idoneidad del hábitat?. *Ecological Modelling*, 157(2-3), 331-341. [https://doi.org/10.1016/s0304-3800\(02\)00203-x](https://doi.org/10.1016/s0304-3800(02)00203-x)
- Huamantupa, I., Martínez, Y., & Orosco, E. (2023). Valuation of the diversity of native plants and the cultural-archaeological richness as an integrative approach for a potential use in ecotourism in the inter-Andean valley of Cusco, Southern Peru. *Diversity*, 15(6), 760. <https://doi.org/10.3390/d15060760>
- Ibisch, L. (1994). Flora y vegetación de la provincia Arque, departamento Cochabamba, Bolivia. *Ecología en Bolivia*, 53-92. <https://ecologiaenbolivia.com/documents/1Ibisch222.pdf>
- Ibisch, P., & Mérida, G. (Eds.). (2003). Biodiversidad: La riqueza de Bolivia. Estado de conocimiento y conservación. Ministerio de Desarrollo Sostenible, Editorial FAN, Santa Cruz de la Sierra.
- Jaynes, E. (1957). *Information theory and statistical mechanics*. *Physical Review*, 106(4), 620-630. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.106.620>
- Kass, J., Muscarella, R., Galante, P., Bohl, C., Pinilla, G., Boria, R., ... Anderson, R. (2021). ENMeval 2.0: Redesigned for customizable and reproducible modeling of species' niches and distributions. *Methods in Ecology and Evolution*, 12(9), 1602-1608. doi:10.1111/2041-210x.13628
- Kaufmann, M., Graham, R., Boyce, D., Moir, W., Perry, L., Reynolds, R., Bassett, R., Mehlhop, P., Edminster, C., Block, W., & Corn, P. (1994). *An ecological basis for*

- ecosystem management* (General Technical Report RM-GTR-246). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station.
<https://doi.org/10.2737/RM-GTR-246>
- Kearney, M., & Porter, W. (2009). Mechanistic niche modelling: combining physiological and spatial data to predict species' ranges. *Ecology Letters*, 12(4), 334–350.
<https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01277.x>
- Körner, C. (2007). The use of “altitude” in ecological research. *Trends in Ecology & Evolution*, 22(11), 569–574. doi: 10.1016/j.tree.2007.09.006
- Legendre, P. (1993). Spatial Autocorrelation: Trouble or New Paradigm?. *Ecology*, 74(6), 1659–1673. doi:10.2307/1939924
- Linsley, R., Kohler, M., & Paulhus, J. (1982). *Hydrology for engineers* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- Liu, C., White, M., & Newell, G. (2013). Selecting thresholds for the prediction of species occurrence with presence-only data. *Journal of Biogeography*, 40(4), 778–789. doi:10.1111/jbi.12058
- Liu, Y., Zhang, J., Wang, S., Wang, Y. & Zhao, A. (2018). Assessment of Environmental Carrying Capacity Using Principal Component Analysis. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 6, 54-65. 10.4236/gep.2018.63006
- Lu, C., Yunyin, X., Ning, W., Hongtu, G., Guifang, H., Jun'e, L., Ligu, C. & Zhengchao, Z. (2025). Soil properties influence the distribution and diversity of plant communities in the desert-loess transition zone. *CATENA*. Volume 254. 108976. ISSN 0341-8162.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.108976>.
- Macbride, J. (1938). *Flora of Peru*. Publications of the Field Museum of Natural History, Botanical Series, Vol. XIII, Part V. Field Museum of Natural History, Chicago.

- Mackey, B., & Lindenmayer, D. (2001). Towards a hierarchical framework for modelling the spatial distribution of animals. *Journal of Biogeography*, 28(9), 1147–1166. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.2001.00676.x>
- Maxwell, J. (1879). *Theory of heat* (4th ed.). Longmans, Green, and Co.
- Meier, E., Kienast, F., Pearman, P., Svenning, J., Thuiller, W., Araújo, M., Guisan, A. (2011). Biotic and abiotic variables show little redundancy in explaining tree species distributions. *Ecography*, 33(6), 1038–1048. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2010.06229.x>
- Merow, C., Smith, M., & Silander, J. (2013). A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*, 36(10), 1058–1069. doi:10.1111/j.1600-0587.2013. 07872.x
- MIDAGRI (2006). Decreto Supremo N.º 043-2006-AG. Aprueban categorización de especies amenazadas de flora silvestre. El Peruano. <https://www.gob.pe/institucion/midagri/normas-legales/60199-043-2006-ag>
- MINAM (2014). *Estrategia Nacional de Diversidad Biológica al 2021 y su Plan de Acción 2014–2018*. Lima: MINAM
- MINAM. (2019). *Mapa Nacional de Ecosistemas del Perú*. Lima: MINAM.
- MINAM (2019). Informe Nacional de Bosques y Cambio Climático. Ministerio del Ambiente del Perú. <https://www.minam.gob.pe>
- Mollins, J. (2020). Deforestation: how much have we lost and how quickly? *FAO Forestry News*. <https://www.fao.org/news/story/en/item/1292640/icode/>
- Morán, M. (2020). Bosques, desertificación y diversidad biológica. *Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/biodiversity/>
- More, A., Bonacic, C., Vargas, J., & Pacheco, L. (2022). Modeling habitat suitability for the mountain tapir (*Tapirus pinchaque*) in the northern Andes using MaxEnt and remote

- sensing data. *Journal for Nature Conservation*, [volumen y páginas cuando estén disponibles]. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2022.xx.xxx>
- Moscoso, V., Albernaz, A., & Salomão, R. (2013). Modelado de nichos para doce especies de plantas (seis especies maderables y seis palmeras) en la región amazónica, utilizando datos de recolección y de estudio de campo. *Forest Ecology and Management*, 310, 652–662. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.08.064>
- Mu, H., Li, X., Wen, Y., Huang, J., Du, P., Su, W., Miao, S., & Geng, M. (2022). A global record of annual terrestrial Human Footprint dataset from 2000 to 2018. *Scientific Data*, 9, 176. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01284-8>
- Muscarella, R., Galante, P., Soley, M., Boria, R., Kass, J., Uriarte, M., & Anderson, R. (2014). ENMeval: An R package for conducting spatially independent evaluations and estimating optimal model complexity for Maxent ecological niche models. *Methods in Ecology and Evolution*, 5(11), 1198–1205. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12261>
- Navarro, M., Jove, C., & Ignacio, J. (2020). Modelamiento de nichos ecológicos de flora amenazada para escenarios de cambio climático en el departamento de Tacna - Perú. *Colombia Forestal*, 23(1), 51–67. <https://doi.org/10.14483/2256201x.14866>
- Oliver, T., Heard, M., Isaac, N., Roy, D., Procter, D., Eigenbrod, F., ... & Bullock, J. (2015). Biodiversity and resilience of ecosystem functions. *Trends in Ecology & Evolution*, 30(11), 673–684. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2015.08.009>
- Omar, K., & Elgamal, I. (2021). Lista Roja de la UICN y modelos de distribución de especies como herramientas para la conservación de especies poco conocidas: un estudio de caso de las plantas endémicas *Micromeria serbaliana* y *Veronica kaiseri* en el sur del Sinaí, Egipto. *Kew Bulletin*, 76(3), 477–496. <https://doi.org/10.1007/s12225-021-09953-4>
- Peterson, A., Soberón, J., Pearson, R., Anderson, R., Martínez, E., Nakamura, M., & Araújo, M. (2011). *Ecological niches and geographic distributions*. Princeton University Press.

- Peterson, A., & Soberón, J. (2012). Species distribution modeling and ecological niche modeling: getting the concepts right. *Natureza & Conservação*, 10(2), 102–107. <https://doi.org/10.4322/natcon.2012.019>
- Phillips, S., Anderson, R., & Schapire, R. (2004). A maximum entropy approach to species distribution modeling. *Proceedings of the Twenty-First International Conference on Machine Learning*, 83. <https://doi.org/10.1145/1015330.1015412>
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3–4), 231–259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- Pretell, J., Ocaña, D., Jap, R., & Barahona, E. (1985). Apuntes sobre algunas especies forestales nativas de la sierra peruana. Ministerio de Agricultura, Instituto Nacional Forestal y de Fauna Silvestre.
- Quicaña, P. (2019). Avifauna asociada al bosque de *Escallonia* “chachacomo” en la localidad de Totorabamba del distrito de Vinchos, Huamanga, Ayacucho junio 2016 a mayo 2017. Repositorio Institucional UNSCH. <http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/2845>
- Ranjith, M., Semwal, M., Rana, T., & Nair, N. (2022). Predicción del hábitat adecuado potencial para *Ensete glaucum* (Roxb.) Cheesman utilizando el modelado MaxEnt. *Flora*, 287, 152007.
- Reyes, C. (2018). Caracterización y clave de identificación de las especies leñosas acompañantes de *Cedrela angustifolia* en Apurímac - Perú. Repositorio Institucional Universidad Nacional Agraria La Molina. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/3837>
- Reynel, C., & Marcelo, J. (2009). Árboles de los ecosistemas forestales andinos: Manual de identificación de especies (1.a ed., Vol. 9). ECOBONA – INTERCOO.

- Reynel, C., & Pennington, R. (2016). Árboles de los ecosistemas forestales andinos del Perú: guía de campo. Universidad Nacional Agraria La Molina, Universidad de Oxford, y Herbario MOL.
- Rivers, M. (2024). *Escallonia resinosa*. En IUCN (Ed.), *The IUCN Red List of Threatened Species 2024: e.T42532740A42533733*. International Union for Conservation of Nature. <https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2024-1.RLTS.T42532740A42533733.en>
- Royal Botanic Gardens, Kew. (2025). *Escallonia resinosa* (Ruiz & Pav.) Pers. Plants of the World Online. <https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:791093-1>
- Salaverry, J. (2006). Macroecología de los Andes peruanos: Situación actual y dinámica de cambio en los últimos 20,000 años. Institut français d'études andines. <https://doi.org/10.4000/books.ifea.5502>
- Sampieri, R., Collado, C., Lucio, P., Valencia, S., & Torres, C. (2014). Metodología de la investigación. Educación McGraw-Hill.
- Sanderson, E., Jaiteh, M., Levy, M., Redford, K., Wannebo, A., & Woolmer, G. (2002). The Human Footprint and the Last of the Wild: The human footprint is a global map of human influence on the land surface, which suggests that human beings are stewards of nature, whether we like it or not. *OUP Academic*. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2002\)052](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2002)052)
- Scrivanti, L., & Anton, A. (2020). Distribución espacial de *Poa scaberula* (Poaceae) a lo largo de los Andes. *Heliyon*, 6(10), e05220. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05220>
- Sede, S., & Denham, S. (2018). Taxonomic Revision of *Escallonia* (Escalloniaceae) in Argentina. *Systematic Botany*, 43(1), 364–396. doi:10.1600/036364418x696932
- Sillero, N., Barbosa, A., & Real, R. (2021). Favorability: Concept, distinctive characteristics and potential utility in species distribution modelling. *Ecological Modelling*, 440, 109355. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109355>

- SERFOR (2016). *Lineamientos para la restauración de ecosistemas forestales y otros ecosistemas de vegetación silvestre*. Lima: SERFOR.
- Sillero, N. (2011). ¿Qué modela la modelización ecológica? Una propuesta de clasificación de los modelos de nicho ecológico en función de sus métodos subyacentes. *Ecological Modelling*, 222(8), 1343–1346. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.01.018>
- Skidmore, A., Pettorelli, N., Coops, N., Geller, G., Hansen, M., Lucas, R., ... & Turner, W. (2011). Bridging the gap between ecosystem services and remote sensing: A framework for remote sensing contributions to the ecosystem services agenda. *Biodiversity and Conservation*, 20(14), 3217–3243. <https://doi.org/10.1007/s10531-011-9990-0>
- Soberon, J., & Peterson, A. (2005). Interpretation of Models of Fundamental Ecological Niches and Species' Distributional Areas. *Biodiversity Informatics*, 2(0). doi:10.17161/bi.v2i0.4
- Soh, M., Mitchell, N., Ridley, A., Butler, C., Puan, C. and Peh, K. (2019). Impacts of Habitat Degradation on Tropical Montane Biodiversity and Ecosystem Services: A Systematic Map for Identifying Future Research Priorities. *Front. For. Glob. Change* 2:83. doi: 10.3389/ffgc.2019.00083
- Soto, K., & Nishme, Y. (2007). Estudio etnobotánico para el diseño de sistemas agroforestales en el distrito de Chalaco - Piura. Repositorio Institucional Universidad Nacional Agraria La Molina. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/1735>
- Soulé, M. (2012). What Is Conservation Biology?. *BioScience*, 35(11), 727–734. doi:10.2307/1310054
- Spangenberg, J. (2002). Environmental space and the prism of sustainability: frameworks for indicators measuring sustainable development. *Ecological Indicators*, 2(3), 295–309. [https://doi.org/10.1016/S1470-160X\(02\)00005-0](https://doi.org/10.1016/S1470-160X(02)00005-0)

- Tejedor, N., Tovar, C., Gonzales, R., & Sarmiento, F. (2012). Andean montane forests and páramos in Peru: climate change scenarios and biodiversity conservation strategies. In: Herzog, S. et al. (Eds.), *Climate Change and Biodiversity in the Tropical Andes*. Inter-American Institute for Global Change Research (IAI) and Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE).
- Tibaduiza, C. (2008). Reflexiones sobre el concepto de espacio geográfico y su enseñanza en el aula. *Revista Educación y Ciudad*, (15), 95–108.
- Tillé Y., Dickson M., Espa G. & Giuliani D. (2018). Measuring the spatial balance of a sample: A new measure based on Moran's I index. *Spatial Statistics*. Volume 23. Pages 182-192. ISSN 2211-6753. <https://doi.org/10.1016/j.spasta.2018.02.001>.
- Tineo, V. (2018). Composición y estructura de la flora arbórea del bosque de Lucre, distrito de Ocos. Ayacucho 2013. Repositorio Institucional UNSCH. <http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/2341>
- UICN (2017). State of the World's Species – South America Assessment. <https://www.iucnredlist.org/regions/southamerica>
- UICN (2021). The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2021-3. <https://www.iucnredlist.org>
- Venter, O., Sanderson, E., Magrath, A., Allan, J., Beher, J., Jones, K., ... Watson, J. (2016). Sixteen years of change in the global terrestrial human footprint and implications for biodiversity conservation. *Nature Communications*, 7, 12558. doi:10.1038/ncomms12558
- Wan, J., Li, Q., Wei, G., Yin, G., Wei, D., Song, Z., & Wang, C. (2019). The effects of the human footprint and soil properties on the habitat suitability of large old trees in alpine urban and periurban areas. *Urban Forestry & Urban Greening*, 47, 126520. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126520>

- Wang, C., & Zhao, H. (2018). Spatial Heterogeneity Analysis: Introducing a New Form of Spatial Entropy. *Entropy*, 20(6), 398. doi:10.3390/e20060398
- Warren, D., & Seifert, S. (2011). Ecological niche modeling in Maxent: the importance of model complexity and the performance of model selection criteria. *Ecological Society of America*, 21(2), pp. 335–342. <https://doi.org/10.1890/10-1171.1>
- Weberbauer, A. (1911). El mundo vegetal de los Andes peruanos: estudio fitogeográfico. Wilhelm Engelmann, Leipzig.
- Weeraratne, N., Hunt, L., & Kurz, J. (2025). Optimizing PCA for Health and Care Research: A Reliable Approach to Component Selection. *arXiv*. 10.48550/arXiv.2503.24248
- Whittaker, R. (1967). Gradient analysis of vegetation. *Biological Reviews*, 42(2), 207–264. <https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.1967.tb01419.x>
- Williams, B., Venter, O., Allan, J., Atkinson, S., Rehbein, J., Ward, M., Di Marco, M., Grantham, H., Ervin, J., Goetz, S., Hansen, A., Jantz, P., Pillay, R., Rodríguez, S., Supples, C., Virnig, A., & Watson, J. (2020). Change in Terrestrial Human Footprint Drives Continued Loss of Intact Ecosystems. *One Earth*, 3(3), 371–382. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.08.009>
- Wisz, M., Pottier, J., Kissling, W., Pellissier, L., Lenoir, J., Damgaard, C., ... & Guisan, A. (2013). The role of biotic interactions in shaping distributions and realised assemblages of species: implications for species distribution modelling. *Biological Reviews*, 88(1), 15–30. <https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.2012.00235.x>
- Yu, J., Zhang, Y., Li, X., & Chen, L. (2025). Modeling the potential distribution of *Trachelospermum jasminoides* using MaxEnt under current climatic conditions. *Journal of Ethnopharmacology*

- Zimmermann, N., & Kienast, F. (1999). Predictive mapping of alpine grasslands in Switzerland: Species versus community approach. *Journal of Vegetation Science*, 10(4), 469–482. <https://doi.org/10.2307/3237188>
- Zizka, A., Silvestro, D., Andermann, T., Azevedo, J., Ritter, C. D., Edler, D., Farooq, H., Herdean, A., Ariza, M., Scharn, R., Svantesson, S., Wengström, N., Zizka, V., & Antonelli, A. (2019). CoordinateCleaner: Standardized cleaning of occurrence records from biological collection databases. *Methods in Ecology and Evolution*, 10(5), 744–751. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13152>

IX. Anexos

Anexo 1. Matriz de consistencia

Problema	Objetivos	Variables	Hipótesis	Metodología
<p style="text-align: center;">GENERAL</p> <p>¿Cuáles son las áreas potenciales para la gestión ecológica de la especie <i>Escallonia resinosa</i> Ruiz & Pav. en los Andes peruanos?</p>	<p style="text-align: center;">GENERAL</p> <p>Identificar las áreas potenciales más idóneas para la gestión ecológica de la especie <i>Escallonia resinosa</i> Ruiz & Pav., en los Andes peruanos</p>	<p style="text-align: center;">INDEPENDIENTE</p> <p>Modelado de nicho ecológicos de la especie <i>Escallonia resinosa</i> Ruiz & Pav.</p>	<p style="text-align: center;">GENERAL</p> <p>Las áreas potenciales para la gestión ecológica de la especie <i>Escallonia resinosa</i> Ruiz & Pav. en los Andes peruanos son identificadas mediante el modelo de nicho ecológico</p>	<p>TIPO: Aplicada</p> <p>NIVEL: Exploratorio</p> <p>DISEÑO: No experimental</p> <p>POBLACIÓN: La población en el estudio comprenderá los árboles de <i>Escallonia resinosa</i> Ruiz & Pav. registradas en todo el territorio peruano. Los bosques se encuentran a una altitud de 1500 msnm hasta los 5500 msnm.</p> <p>MUESTRA: La muestra utilizada en este estudio consistió en 44 registros georreferenciados de presencia de <i>Escallonia resinosa</i> Ruiz & Pav., los cuales fueron seleccionados tras un proceso riguroso de depuración y filtrado espacial</p> <p>Análisis de distribución de especies:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Recolección de datos de presencia - Recolección de factores ambientales - Exploración de datos recolectados - Configuración del modelado - Selección del modelado <p>Análisis de información geográfica:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Selección de umbrales de corte - Validación de modelo - Clasificación y reclasificación - Identificación de áreas
<p style="text-align: center;">ESPECÍFICOS</p> <p>- ¿Cuáles son los principales factores ambientales que influyen en la distribución potencial de la especie <i>Escallonia resinosa</i> Ruiz & Pav.?</p> <p>- ¿Cuál es el hábitat idóneo para la <i>Escallonia resinosa</i> Ruiz & Pav. en los Andes peruanos?</p>	<p style="text-align: center;">ESPECÍFICOS</p> <p>- Determinar los principales factores ambientales que influyen en la distribución potencial de la especie <i>Escallonia resinosa</i> Ruiz & Pav.</p> <p>- Generar un mapa de idoneidad de hábitat para la <i>Escallonia resinosa</i> Ruiz & Pav. en los Andes peruanos</p>	<p style="text-align: center;">DEPENDIENTE</p> <p>Identificación de áreas potenciales de la especie <i>Escallonia resinosa</i> Ruiz & Pav. en los Andes peruanos</p>	<p style="text-align: center;">ESPECÍFICAS</p> <p>- Los principales factores ambientales influyen en la predicción de la distribución potencial para la especie <i>Escallonia resinosa</i> Ruiz & Pav. en los Andes peruanos</p> <p>- El modelado de nicho ecológico genera el mapa de idoneidad de hábitat para la especie <i>Escallonia resinosa</i> Ruiz & Pav. en los Andes peruanos</p>	

Anexo 2. Prueba de hipótesis

Hipótesis específica	Hipótesis nula (H₀)	Hipótesis alternativa (H₁)	Prueba aplicada	Resultados
<p>HE1: Los principales factores ambientales influyen en la predicción de la distribución potencial de <i>Escallonia resinosa</i> Ruiz & Pav. en los Andes peruanos.</p>	<p>H₀: Los factores ambientales no influyen significativamente en la predicción del modelo; sus contribuciones son homogéneas</p>	<p>H₁: Al menos un factor ambiental influye significativamente en la predicción de la distribución de la especie</p>	<p>Prueba de chi-cuadrado sobre las contribuciones de los componentes principales (PC1–PC4)</p>	<p>p < 0.001 → se rechaza H₀ y se acepta H₁. Al menos uno de los factores ambientales contribuye significativamente al modelo</p>
<p>HE2: El modelado de nicho ecológico genera el mapa de idoneidad de hábitat para la especie <i>Escallonia resinosa</i> Ruiz & Pav. en los Andes peruanos.</p>	<p>H₀: El modelo no genera un mapa de idoneidad significativamente mejor que el azar</p>	<p>H₁: El modelo genera un mapa de idoneidad significativamente mejor que el azar</p>	<p>Prueba binomial sobre la coincidencia entre puntos de validación y predicción del modelo</p>	<p>p = 0.026 → se rechaza H₀ y se acepta H₁. El modelo predice significativamente mejor que el azar</p>

Anexo 3. Protocolo de colecta de muestras

FASE 01: Colecta de muestras

- Para la colección de las muestras se usa la tijera telescópica
- Cortar una rama del árbol a fin de identificarlo, el corte debe ser entre 10 a 15 cm partiendo de la yema terminal incluyendo hojas frutos y flores
- Limpiar con un chorrillo suave de agua destilada
- Dejar secar en papel toalla

FASE 02: Toma de datos en campo

- En la libreta de datos se anotarán los siguientes datos:
 - Nombres de las personas que colectaron los datos
 - Datos del lugar • Fecha de colecta • Numero de colecta y sus duplicados
 - Características del árbol colectado
 - Características del lugar (suelo, pendiente, clima, pedregosidad)
 - Coordenadas geográficas y altitud de la zona usar el GPS con altímetro barométrico

FASE 03: Codificación definitiva y prensado

- Las muestras colectadas deben ser prensadas en el menor tiempo posible
- Desinfectar las muestras con un chorrillo suave de alcohol y agua destilada con una proporción de 1 a 1
- Colocar las muestras desinfectadas en el papel periódico
- Usando un marcador codificar las muestras siguiendo las iniciales numeradas “LFLA - 01A”
- Usar la prensa botánica, las muestras colectadas estarán superpuestas y alineadas, cuidando que no se sobresalgan partes de las muestras colectadas
- Ya prensadas las muestras colectadas llevar en la mochila de montaña a fin de su mejor conservación

FASE 04: Cuidado de las muestras colectadas

- Al pasar más de 2 semanas las muestras necesitan ser cuidadas
- Abrir la prensa botánica con cuidado retirar cada muestra colectada en orden
- Desinfectar las muestras con un chorrillo suave de alcohol y agua destilada con una relación de 1 a 1
- Colocar las muestras desinfectadas en un nuevo papel periódico
- Usar la prensa botánica, las muestras colectadas estarán superpuestas y alienadas, cuidando que no se sobresalgan partes de las muestras colectadas
- Enviar al taxónomo especialista para el reconocimiento de especie

Anexo 4. Script en RStudio

PCA Analysis for Environmental Variables

```
library(raster)
library(sp)
library(gdalUtils)
library(RStoolbox)
library(ggplot2)
library(factoextra)
library(corrplot)
library(ncdf4)
# Load variables
setwd("F:/Resultados/Aspecto")
aspecto <- raster("aspectores0.05.tif")
setwd("F:/Resultados/Pendiente")
pendiente <- raster("pendientes0.05.tif")
setwd("F:/Resultados/Den 1500")
den <- raster("den1500res0.05.tif")
setwd("F:/Resultados/Geología")
geol <- raster("geolPaolo_Resample1.tif")
setwd("F:/Resultados/Suelo")
suel <- raster("sueloPerures0.005.tif")
setwd("F:/PISCO/Resultados")
vclim <- stack("V_Climaticas02.tif")
# Combine 19 bioclimatic layers and topographic factors
bios <- stack(vclim, aspecto, pendiente, den)
names(bios) <- c(paste0("Bio0", 1:9), paste0("Bio", 10:19), "Asp", "Pen", "Elev")
plot(bios)
# Start PCA
pcaRasters <- rasterPCA(bios, nSamples = NULL, spca = TRUE)
pcaRasters
writeRaster(pcaRasters$map[[1:4]], filename="I:/PCA/Resultados/PCAs_DEM2.nc",
format="CDF", overwrite=TRUE)
```

```

# Variance plots
screplot(pcaRasters$model, type = "l", npcs = 22, pch = 20)
summary(pcaRasters$model)
loadings(pcaRasters$model)

# Scree Plot
jpeg(file= "F:/Tesis/PCA/Fig_01.jpg", width = 6, height = 6, units = 'in', res = 300)
screplot(pcaRasters$model, type = "b", npcs = length(names(bios)), main = "Scree Plot -
PCA")
abline(h = 1, col = "red", lwd = 2, lty = 2)
legend("topright", legend = c("Eigenvalue = 1"), col = "red", lty = 2, cex = 1.2, box.lty = 0)
dev.off()

# Cumulative variance plot
cumpro <- cumsum(pcaRasters$model$sdev^2 / sum(pcaRasters$model$sdev^2))
jpeg(file = "F:/Tesis/PCA/Fig_02.jpg", width = 6, height = 6, units = "in", res = 300)
plot(cumpro[1:20], type = "b", xlab = "Principal Component (PC)", ylab = "Cumulative
Variance Explained",
     main = "Cumulative Variance by Component")
abline(v = 4, col = "red", lty = 2)
abline(h = 0.85812256, col = "red", lty = 2)
legend("bottomright", legend = c("Cut at PC4 = 85.8%"), col = "red", lty = 2, cex = 0.9, box.lty
= 0)
dev.off()

# Variable contributions using factoextra
library(factoextra)
var_exp <- pcaRasters$model$sdev^2 / sum(pcaRasters$model$sdev^2)
var_contrib <- get_pca_var(pcaRasters$model)$contrib
var_contrib <- as.data.frame(var_contrib)

# Top 10 for PC1 & PC2
var_contrib$total_PC1_PC2 <- var_contrib[,1] + var_contrib[,2]
top_vars_PC12 <- names(sort(var_contrib$total_PC1_PC2, decreasing = TRUE))[1:10]
p1 <- fviz_pca_var(pcaRasters$model,
                  select.var = list(name = top_vars_PC12),
                  axes = c(1, 2),

```

```

        col.var = "contrib",
        gradient.cols = c("#00AFBB", "#E7B800", "#FC4E07"),
        repel = TRUE) +
labs(
  x = paste0("PCA 1 (", round(var_exp[1]*100, 1), "%)"),
  y = paste0("PCA 2 (", round(var_exp[2]*100, 1), "%)"),
  title = "Top 10 Influential Variables (PCA 1 & 2)"
)
print(p1)
# Heatmap of cos2
library(corrplot)
var <- get_pca_var(pcaRasters$model)
cos2 <- var$cos2
colnames(cos2) <- paste0("PCA ", 1:ncol(cos2))
corrplot(cos2, is.corr = FALSE, tl.col = "black", tl.cex = 0.8, cl.ratio = 0.2,
         cl.align.text = "l", cl.cex = 0.8, title = "Variable Representation Quality (cos2)", mar =
c(0, 0, 2, 0))
# Variable contributions (PC1–PC4)
jpeg("F:/Tesis/PCA/Contribucion_PCA1.jpg", width = 8, height = 6, units = "in", res = 300)
fviz_contrib(pcaRasters$model, choice = "var", axes = 1, top = 23)
dev.off()
# Final visualization and saving top loadings per component
load_matrix <- loadings(pcaRasters$model)
load_df <- as.data.frame(unclass(load_matrix))
rownames(load_df) <- rownames(load_matrix)
load_df$Variable <- rownames(load_df)
library(dplyr)
for (i in 1:4) {
  top_table <- load_df %>%
    select(Variable, paste0("Comp.", i)) %>%
    rename>Loading = paste0("Comp.", i)) %>%
    mutate(abs_loading = abs>Loading)) %>%

```

```

    arrange(desc(abs_loading)) %>%
    head(10) %>%
    select(Variable, Loading)

write.csv(top_table, paste0("F:/Tesis/PCA/Top_Loadings_PC", i, ".csv"), row.names =
FALSE)
}

```

Spatial Autocorrelation

```

rm(list = ls())
library(raster)
library(sp)
library(ggplot2)
library(viridisLite)
library(viridis)
library(elsa)
library(ggpubr)
library(geodist)
library(spdep)
library(ggpmisc)
library(ncdf4)
WGS84 <- "+proj=longlat +datum=WGS84"
setwd("F:/Modelo2")
PCA <- stack("F:/Modelo2/PCAs_DEM.nc")
geologia <- raster("geolPaolo_Resample1.tif")
geologia <- as.factor(geologia)
suelo <- raster("sueloPerures20.005.tif")
suelo <- as.factor(suelo)
env <- stack(PCA, geologia, suelo)
names(env) <- c("PCA_01", "PCA_02", "PCA_03", "PCA_04", "GEOL", "SOIL")
crs(env) <- WGS84
plot(env)
# Load corrected presence records

```

```

locs <- read.csv("DATOS DE PRESENCIA - Hoja 1.csv", sep = ";")
temp3 <- locs[, c(1:3)]
temp3[, 1] <- abbv <- "EsRe"
species <- "Escallonia resinosa"
colnames(temp3) <- c("especie", "Lon", "Lat")
nr1 <- nrow(temp3)
coordinates(temp3) <- ~ Lon + Lat
proj4string(temp3) <- CRS(WGS84)
# Remove duplicate records by raster cell
temp4 <- extract(env[[1]], temp3, cellnumbers = TRUE)
temp5 <- temp3 <- data.frame(temp3@coords[-duplicated(temp4[,1]),])
nr2 <- nrow(temp3)
coordinates(temp3) <- ~Lon + Lat
proj4string(temp3) <- CRS(WGS84)
# Extract corrected environmental values
temp4 <- data.frame(extract(env, temp3))
temp4 <- cbind(data.frame(temp3), temp4)
coordinates(temp4) <- ~ Lon + Lat
proj4string(temp4) <- CRS(WGS84)
# Distance calculations
dists <- georange(temp4@coords, sequential = FALSE, measure = "haversine")
dm <- floor(dists[1])
dM <- ceiling(dists[2])
allDists <- geodist(temp4@coords, paired = TRUE, sequential = FALSE, pad = FALSE,
measure = "haversine")
# Filter out records closer than 25 km
minus25 <- allDists <= 25000
minus25[lower.tri(minus25, diag = TRUE)] <- NA
v <- colSums(minus25, na.rm = TRUE)
v <- which(v > 1)

# Define spatial cutoff

```

```

temp <- data.frame(longitude = c(extent(temp4)[1], extent(temp4)[2]),
  latitude = c(extent(temp4)[3], extent(temp4)[4]))
coordinates(temp) <- ~longitude + latitude
cutoff <- (georange(temp@coords, sequential = FALSE, measure = "haversine")[1]) / 1000
# Repeat for PCA_01 to PCA_04, GEOL, and SOIL using entrogram and ggplot2
# Save filtered corrected presence records for modeling
presencia_final <- as.data.frame(temp4[-v, ])
write.csv(presencia_final, "F:/Tesis/SWD/Escallonia resinosa.csv", row.names = FALSE)

##### Running ENMeval
# Modified from https://cran.r-project.org/web/packages/ENMeval/vignettes/ENMeval-vignette.html
options(java.parameters = "-Xmx8g")
rm(list = ls())
library(ENMeval)
library(raster)
library(dismo)
library(sf)
library(sp)
library(tidyr)
library(dplyr)
# Ruta base
pathx <- "F:/Luis/"
output <- paste0(pathx, "ENMs/")
pais <- st_read("F:/Luis/Shape/ShPeru/Peru.shp")
edos <- st_read("F:/Luis/Shape/ShDepartamentos/Departamento.shp")
vars <- list.files(paste0(pathx, "capasCorregidas"), full.names = TRUE)
geol <- as.factor(raster(vars[1]))
soil <- as.factor(raster("F:/Luis/CapasCorregidas/sueloPerures20.005.tif"))
env <- stack("F:/Luis/CapasCorregidas/PCAs_DEM.nc")
env <- stack(env, geol, soil)
names(env) <- c("PC1", "PC2", "PC3", "PC4", "GEOL", "SOIL")

```

```

crs(env) <- CRS("+proj=longlat +datum=WGS84")
compareRaster(env[[1]], env[[2]], env[[3]], env[[4]], env[[5]], env[[6]], extent = TRUE,
rowcol = TRUE, crs = TRUE, res = TRUE)

occs <- read.csv(paste0(pathx, "SWD/Escallonia resinosa.csv"))

names(occs)
c("LON","LAT","PCA_01","PCA_02","PCA_03","PCA_04","GEOL","SOIL")
points(occs, pch = 20)
occs.sp <- SpatialPoints(occs)
temp1 <- rasterToPolygons(env[[1]], na.rm=TRUE)
set.seed(123)
bg <- spsample(temp1, 20000, type = "random")
crs(bg) <- crs(env)
temp <- extract(env, bg)
temp <- cbind(bg@coords, temp)
colnames(temp) <- c("LON", "LAT", "PC1", "PC2", "PC3", "PC4", "GEOL", "SOIL")
temp <- temp[complete.cases(temp), ]
bg1 <- temp[sample.int(nrow(temp), 10000, replace = FALSE),]
eval2 <- ENMevaluate(occ = occs[,c(1,2)], env = env, bg = bg1[,c(1,2)],
algorithm = "maxnet", partitions = "randomkfold",
tune.args = list(fc = c("L","LQ","LQP"), rm = 1:5), rasterPreds = NULL)
write.csv(eval2@results, file = paste0(output, "Resultados_ENMeval_completo.csv"),
row.names = TRUE)
res <- as.data.frame(eval2@results)
res$fc <- as.factor(res$fc)
library(ggplot2)
png(filename = paste0(output, "grafico_deltaAICc.png"), width = 1800, height = 1200, res =
300)
ggplot(res, aes(x = rm, y = delta.AICc, color = fc, group = fc)) +
geom_line(linewidth = 1) +
geom_point(size = 2) +
facet_wrap(~ fc) +
labs(title = "Delta AICc por configuración de modelo", x = "rm", y =
expression(Delta*AIC[c])) +
theme_minimal()

```

```

dev.off()

png(filename = paste0(output, "grafico_tasa_omision.png"), width = 1800, height = 1200, res
= 300)

ggplot(res, aes(x = rm, y = or.10p.avg, color = fc, group = fc)) +
  geom_line(linewidth = 1) +
  geom_point(size = 2) +
  facet_wrap(~ fc) +
  labs(title = "Tasa de omisión (10%)", x = "rm", y = "Omission Rate") +
  theme_minimal()
dev.off()

png(filename = paste0(output, "grafico_auc_validacion.png"), width = 1800, height = 1200,
res = 300)

ggplot(res, aes(x = rm, y = auc.val.avg, color = fc, group = fc)) +
  geom_line(linewidth = 1) +
  geom_point(size = 2) +
  facet_wrap(~ fc) +
  labs(title = "AUC Validación", x = "rm", y = "AUC") +
  theme_minimal()
dev.off()

best_model <- eval.models(eval2)[["fc.LQP_rm.3"]]
pred.best <- eval.predictions(eval2)[["fc.LQP_rm.3"]]

writeRaster(pred.best, filename = paste0(output, "Distribucion_Potencial_Escallonia.tif"),
format = "GTiff", overwrite = TRUE)

#####Thresholding and Binary Map Generation
library(raster)
# Load the continuous habitat suitability raster
pred.best <- raster("F:/Tesis/ENMEVAL/Distribucion_Potencial_Escallonia.tif")
plot(pred.best, main = "Potential Distribution - Escallonia resinosa")

library(dismo)
# Load presence data after spatial filtering
abbv <- c("Escallonia resinosa")

```

```

occs <- read.csv(paste0(pathx, "SWD/Escallonia resinosa.csv"))
names(occs)
c("LON","LAT","PCA_01","PCA_02","PCA_03","PCA_04","GEOL","SOIL")
# Create background sample
bg <- spsample(temp1, 20000, type = "random")
crs(bg) <- WGS84
temp <- raster::extract(env, bg)
temp <- cbind(bg@coords, temp)
colnames(temp) <- c("LON", "LAT", "PC1", "PC2", "PC3", "PC4", "GEOL", "SOIL")
temp <- temp[complete.cases(temp), ]
bg1 <- temp[sample.int(nrow(temp), 10000, replace = FALSE),]
# Extract predictions at presence and background points
est.loc <- raster::extract(pred.best, occs[, c("LON", "LAT")])
est.bg <- raster::extract(pred.best, bg1[, c("LON", "LAT")])
# Evaluate model performance
ev <- evaluate(p = est.loc, a = est.bg)
# Show available threshold values
thresh_df <- data.frame(
  criterion = names(threshold(ev)),
  value = as.numeric(threshold(ev))
)
write.csv(thresh_df, file = "F:/Tesis/Binario/Thresholds_fcLQP_rm3.csv", row.names =
FALSE)
# Selected threshold value (e.g. based on equal sensitivity and specificity)
threshold_value <- 0.6759987
# Generate binary map
pred_bin <- pred.best >= threshold_value
plot(pred_bin, main = "Binary Distribution - Escallonia resinosa")
# Export binary raster
writeRaster(pred_bin, filename = "F:/Tesis/Binario/Distribucion_Binaria_fcLQP_rm3.tif",
  format = "GTiff", overwrite = TRUE)
# Bar chart comparing thresholds
library(ggplot2)

```

```

thresh_df$highlight <- ifelse(thresh_df$criterion == "equal_sens_spec", "Selected", "Other")
ggplot(thresh_df, aes(x = reorder(criterion, -value), y = value, fill = highlight)) +
  geom_bar(stat = "identity", color = "black") +
  geom_text(aes(label = round(value, 3)), vjust = -0.5, size = 4) +
  scale_fill_manual(values = c("Selected" = "#FC4E07", "Other" = "#00AFBB")) +
  labs(title = "Comparison of Threshold Criteria",
       x = "Threshold Criterion",
       y = "Threshold Value") +
  theme_minimal() +
  theme(legend.title = element_blank())
ggsave("F:/Tesis/Binario/Comparacion_thresholds_resaltado2.jpg",
       width = 7, height = 5, dpi = 600, bg = "white")

```

```
#####Priority area analysis
```

```
library(raster)
```

```
library(sf)
```

```
library(RColorBrewer)
```

```
# Load rasters
```

```
hfi_raw <- raster("F:/Tesis/Huella/hfp2022.tif")
```

```
binario <- raster("F:/Tesis/Binario/Distribucion_Binaria_fcLQP_rm3.tif")
```

```
# Check projection and extent
```

```
crs(hfi_raw)
```

```
crs(binario)
```

```
extent(hfi_raw)
```

```
extent(binario)
```

```
# Define WGS84 projection
```

```
crs_wgs84 <- CRS("+proj=longlat +datum=WGS84")
```

```
# Load Peru shapefile and reproject to match HFI
```

```
peru_sf <- st_read("F:/buddleja/Peru shapes/Peru.shp")
```

```
peru_sf_moll <- st_transform(peru_sf, crs(hfi_raw))
```

```
peru_sp_moll <- as(peru_sf_moll, "Spatial")
```

```
# Crop HFI raster to Peru extent
```

```

hfi_crop <- crop(hfi_raw, peru_sp_moll)
# Reproject cropped HFI to WGS84
hfi_wgs <- projectRaster(hfi_crop, crs = CRS("+proj=longlat +datum=WGS84"), method =
"ngb")
# Align HFI to binary mask resolution
hfi_final <- projectRaster(hfi_wgs, binario, method = "ngb")
writeRaster(hfi_final, "F:/Tesis/Huella/HFI_WGS84_MATCH.tif", overwrite = TRUE)
# Reclassify HFI into priority categories
m <- matrix(c(0, 3.001, 1, 3.001, 10.001, 2, 10.001, 100, 3), ncol = 3, byrow = TRUE)
hfi_clasificado <- reclassify(hfi_final, m)
# Apply binary mask
binario[binario == 0] <- NA
prioridad_masc <- mask(hfi_clasificado, binario)
# Visualize
plot(prioridad_masc, col = brewer.pal(3, "Set1"),
     main = "Priority zones within Escallonia resinosa distribution",
     legend = FALSE)
legend("topright", legend = c("Conservation", "Restoration", "Mitigation"),
     fill = brewer.pal(3, "Set1"), bty = "n")
# Save classified raster
writeRaster(prioridad_masc,
"F:/Tesis/Huella/Prioridad_Manejo_Escallonia_PRESENCIA_v2.tif", overwrite = TRUE)
# Area calculation
prioridad <- raster("F:/Tesis/Huella/Prioridad_Manejo_Escallonia_PRESENCIA_v2.tif")
area_r <- area(prioridad)
clases_vals <- getValues(prioridad)
area_vals <- getValues(area_r)
library(dplyr)
df <- data.frame(Clase = clases_vals, Area_km2 = area_vals) %>%
  filter(!is.na(Clase)) %>%
  group_by(Clase) %>%
  summarise(Superficie_km2 = sum(Area_km2, na.rm = TRUE)) %>%
  mutate(

```

```

Categoria = case_when(
  Clase == 1 ~ "Strict Conservation (HFI 0–3)",
  Clase == 2 ~ "Ecological Restoration (HFI 4–10)",
  Clase == 3 ~ "Mitigation / High Risk (HFI >10)"
)
) %>%
  arrange(desc(Superficie_km2))
print(df)
# Total area of presence
binario <- raster("F:/Tesis/Binario/Distribucion_Binaria_fcLQP_rm3.tif")
binario_presencia <- binario
binario_presencia[binario != 1] <- NA
area_r <- area(binario_presencia)
valores <- getValues(binario_presencia)
areas <- getValues(area_r)
superficie_km2 <- sum(areas[!is.na(valores)], na.rm = TRUE)
print(superficie_km2)
# Check total area matches
total_prioridades_km2 <- sum(df$Superficie_km2)
print(total_prioridades_km2)
round(total_prioridades_km2, 1) == round(superficie_km2, 1)
# Presence area vs national area
superficie_presencia <- 112768.3
superficie_peru <- 1285216
porcentaje_presencia <- (superficie_presencia / superficie_peru) * 100
print(round(porcentaje_presencia, 2))
resumen_presencia <- data.frame(
  Indicator = c("Presence area (km²)", "Total area of Peru (km²)", "Presence percentage (%)" ),
  Value = c(112768.3, 1285216, round((112768.3 / 1285216) * 100, 2))
)
write.csv(resumen_presencia, "F:/Tesis/Huella/Resumen_Presencia_Total.csv", row.names = FALSE)

```

```

# Area by priority category (in %)
df_porcentajes <- df %>%
  mutate(Percentage = round((Superficie_km2 / 112768.3) * 100, 2)) %>%
  arrange(desc(Percentage))
print(df_porcentajes)
write.csv(df_porcentajes, "F:/Tesis/Huella/Resumen_Prioridades_con_Porcentajes.csv",
row.names = FALSE)

##### Statistical test
# Load required packages
library(terra)
library(sf)
# TEST FOR HE1 (Variable Importance)
# -----
# Percentage of variance explained by each principal component (PCA)
varianzas <- c(54.93, 18.05, 7.62, 5.22)
# Convert to approximate frequencies (assuming total = 100)
observado <- round(varianzas)
esperado <- rep(25, 4) # Equal expected contribution if all were equally important
# Chi-square test for unequal contributions
resultado <- chisq.test(x = observado, p = rep(0.25, 4)) # Uniform expectation
# Display result
print(resultado)
# TEST FOR HE2 (Validation model)
# -----
# Load binary raster map of predicted distribution
raster_binario <- terra::rast("F:/Tesis/Binario/presencia_binaria.tif")
# Load external validation points
puntos <- read.csv("F:/Tesis/Distribucion/presenciasgbif.csv")

# Convert points to spatial object (sf)
puntos_sf <- st_as_sf(puntos, coords = c("LON", "LAT"), crs = 4326)

```

```

# Reproject points to match raster CRS if necessary
if(!st_crs(puntos_sf) == st_crs(raster_binario)) {
  puntos_sf <- st_transform(puntos_sf, crs = st_crs(raster_binario))
}
# Extract raster values at point locations
valores <- terra::extract(raster_binario, vect(puntos_sf))
# Assign extracted values to point data
puntos_sf$raster_value <- valores[,2]
# Count how many points fall inside (value = 1) or outside (NA or 0) the suitable area
table(puntos_sf$raster_value, useNA = "ifany")
# Number of matches (points within suitable areas)
aciertos <- 48
# Total number of points evaluated
total <- 78 # 48 inside + 30 outside
# Exact binomial test: does the model perform better than random?
resultado <- binom.test(aciertos, total, p = 0.5, alternative = "greater")
# Display test result
print(resultado)
# Data for visualization
valores <- c("Within suitable area" = 48, "Outside suitable area" = 30)
# Bar plot for visual validation
barplot(valores,
        col = c("forestgreen", "firebrick"),
        main = "Validation of occurrence points over binary suitability map",
        ylab = "Number of points",
        ylim = c(0, 60))
# Chi-square test (alternative to binomial test)
chisq.test(x = c(48, 30), p = c(0.5, 0.5))

```

Anexo 5. Colecta de muestras

Bosque de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. en Huanta – Iguain (Código Ubigeo - 050404)



Bosque de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. en Cangallo – Pantín (Código Ubigeo - 050201)



Bosque de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. en Acocro – Matara (Código Ubigeo - 050102)



Bosque de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. en Huamanguilla (Código Ubigeo - 050405)



Bosque de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. quemado por la acción antrópica en Acocro



Bosque de *Escallonia resinosa* Ruiz & Pav. fragmentado por el incremento de la franja agrícola en Acocro

