

**MODELACIÓN CLIMÁTICA PARA LA DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DE LA  
ESPECIE DE FRAILEJONES «*Espeletia pycnophylla* Cuatrec», PRESENTE EN EL  
COMPLEJO DE PÁRAMOS CHILES- CUMBAL EN EL DEPARTAMENTO DE  
NARIÑO: RECOMENDACIONES PARA LA CONSERVACIÓN DE LA ESPECIE.**

**Bio. LILIANA VELA ZARAMA  
Geo. LUIS IGNACIO SANTACRUZ NARVAEZ**

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES  
FACULTAD DE CIENCIAS ECONÓMICAS Y CONTABLES  
MAESTRIA EN DESARROLLO SOSTENIBLE Y MEDIO AMBIENTE**

**2021**

**MODELACIÓN CLIMÁTICA PARA LA DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DE LA  
ESPECIE DE FRAILEJONES «*Espeletia pycnophylla* Cuatrec», PRESENTE EN EL  
COMPLEJO DE PÁRAMOS CHILES- CUMBAL EN EL DEPARTAMENTO DE  
NARIÑO: RECOMENDACIONES PARA LA CONSERVACIÓN DE LA ESPECIE.**

**Bio. LILIANA VELA ZARAMA  
Geo. LUIS IGNACIO SANTACRUZ NARVAEZ**

**TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OPTAR AL TÍTULO DE:  
MAGISTER EN DESARROLLO SOSTENIBLE Y MEDIO AMBIENTE**

**Director:  
JUAN CARLOS GRANOBLES I.A. MS.c.**

**Coasesor:  
EMMANUEL ZAPATA CALDAS Geo. MS.c**

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES  
FACULTAD DE CIENCIAS ECONÓMICAS Y CONTABLES  
MAESTRIA EN DESARROLLO SOSTENIBLE Y MEDIO AMBIENTE**

**2021**

## **DEDICATORIA**

*A mi hijo Santiago y mi madre Stella, por su apoyo incondicional,  
por su amor y comprensión y a quienes dedico este  
nuevo triunfo con mucho cariño.*

*En especial para mi mamita Maruja, quien  
fue un gran apoyo en mi vida y desde  
el cielo sé que me acompaña siempre y sobre todo  
guiando mi camino para cumplir con este sueño!*

*A Diana, Laura y la bebé, por su cariño siempre presente  
en mi vida;*

**Liliana**

*A mis padres por su apoyo incondicional, en especial a mi mamá que  
siempre me motivo para culminar con éxito esta etapa de formación.*

*A mi hermana y a mi sobrina Juliana, por ser parte  
importante de mi vida.*

*A mi Abuelita Rebeca quien fue un apoyo importante en toda mi vida,  
donde quiera que este, siempre la recuerdo con mucho cariño.*

*A mis amigos de toda la vida Juan Carlos Vallejo, David Guerrero, Juan Esteban Rosales,  
Daniel Ortega, Carolina Torres, Susana Jurado. Los del gimnasio los Andes, una amistad  
verdadera.*

*A mis amigos de la vida Alex Paredes, Nathalia Pinza, Lorena Amezquita. ¡Gracias por su  
amistad!*

**Luis Ignacio**

## **AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo de grado es un logro basado en la dedicación y el esfuerzo, reflejado en el cumplimiento de una meta más en nuestras vidas. Especialmente queremos agradecer a nuestras familias quienes fueron el pilar principal de motivación para culminar este logro.

Agradecimientos a nuestro Asesor de tesis, el profesor Juan Carlos Granoblez por la gran colaboración y motivación que nos brindó en el desarrollo de nuestra investigación. Al coasesor Emmanuel Zapata, quien desde sus conocimientos técnicos contribuyó en el desarrollo de este trabajo. A los profesores de la Maestría en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente, quienes mediante sus conocimientos nos brindaron las herramientas que reforzaron nuestros aprendizajes en materia ambiental. A la Universidad de Manizales por brindarnos los medios tecnológicos para poder educarnos desde la virtualidad.

A nuestro amigo Germán Narvárez, quien aportó de manera significativa con sus conocimientos en materia geográfica y ambiental y quien nos motivó constantemente en cumplir con esta meta.

A la Doctora Aída Mercedes Delgado Martínez por su apoyo incondicional y por su motivación hacia el estudio.

A nuestros compañeros de maestría con quienes compartimos espacios de estudio y propósitos de vida y de los cuales aprendimos con sus aportes desde sus perfiles profesionales.

A los actores sociales presentes en el territorio, quienes con su apoyo en campo y sus entrevistas aportaron en la construcción de esta investigación.

A nuestros amigos de vida y compañeros de profesión quienes hicieron parte de este logro a través de sus aportes: Juan Carlos Caicedo, Eddy Martínez y la profesora Luz Estela Lagos.

## Tabla de Contenido

RESUMEN .....	ix
ABSTRACT .....	x
1. INTRODUCCIÓN .....	11
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	13
2.1 Descripción del Problema .....	13
2.2 Formulación del Problema .....	16
3. JUSTIFICACIÓN .....	17
4. MARCO TEORICO .....	19
4.1 Páramos .....	19
4.2 <i>Espeletia pycnophylla</i> Cuatrec. ....	20
4.3 Cambio Climático .....	21
4.3.1 <i>Escenarios de Cambio Climático</i> .....	23
4.4 Modelos de Distribución de Especies (MDE) .....	25
4.4.1 <i>Variables Dependientes</i> .....	26
4.4.2 <i>Variables Independientes</i> .....	26
4.5 Técnicas de Modelación .....	27
4.5.1 <i>Técnicas Discriminantes</i> .....	27
4.5.2 <i>Técnicas Descriptivas</i> .....	28
4.5.3 <i>Técnicas Mixtas</i> .....	28
4.6 MaxEnt .....	28
4.7 Variables Climáticas o Bioclimáticas.....	29
4.8 Variables Topo-Edáficas .....	30
4.9 Marco Normativo.....	31
5. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS .....	36
6. OBJETIVOS.....	41
6.1 Objetivo General.....	41
6.2 Objetivos Específicos .....	41

<b>7. METODOLOGÍA</b> .....	42
<b>7.1 Tipo de Investigación</b> .....	42
<b>7.2 Área de Estudio</b> .....	42
<b>7.3 Registros de Presencia</b> .....	44
<b>7.4 Obtención de Variables Bioclimáticas</b> .....	47
<b>7.5 Selección de Variables Bioclimáticas</b> .....	47
<b>7.6 Distribución Potencial Actual de <i>E. pycnophylla</i> Cuatrec.</b> .....	48
<b>7.7 Distribución de <i>E. pycnophylla</i> Cuatrec Bajo Escenarios de Cambio Climático</b> .....	48
<b>7.8 Medidas de Conservación de <i>E. pycnophylla</i> Cuatrec. a Nivel Comunitario y Gubernamental</b> .....	49
<b>8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	52
<b>8.1 DISTRIBUCIÓN POTENCIAL ACTUAL DE <i>E. pycnophylla</i> Cuatrec.</b> .....	52
<b>8.1.1 Modelos de Distribución Potencial Actual de <i>E. pycnophylla</i> Cuatrec.</b> .....	52
<b>8.1.2 Análisis de Contribución de Variables para el Escenario de Distribución Potencial Actual</b> .....	55
<b>8.2 DISTRIBUCIÓN POTENCIAL FUTURA DE <i>Espeletia pycnophylla</i> Cuatrec. EN EL COMPLEJO DE PÁRAMOS CHILES CUMBAL BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO</b> .....	63
<b>8.2.1 Análisis de Contribución de variables para los Escenarios de Estabilización 4.5</b> ....	64
<b>8.2.2 Contribución de variables para el Escenario con un Nivel Muy Alto de Emisiones de Gases Efecto Invernadero (RCP 8.5)</b> .....	65
<b>8.2.3 Descripción de Escenarios de Cambio Climático</b> .....	69
<b>8.3 MEDIDAS DE CONSERVACIÓN DE <i>Espeletia pycnophylla</i> Cuatrec. A NIVEL COMUNITARIO Y GUBERNAMENTAL</b> .....	82
<b>CONCLUSIONES</b> .....	92
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	96
<b>REFERENCIAS</b> .....	97
<b>ANEXOS</b> .....	111

## Lista de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Caminos de Forzamiento Radiativo (FR) seleccionados por el IPCC para evaluar el comportamiento de la concentración de emisiones GEI en el planeta a 2100. ....	24
<b>Tabla 2.</b> Código de las variables bioclimáticas obtenidas de WorldClim.....	30
<b>Tabla 3.</b> Superficie Complejo de Páramos Chiles Cumbal. ....	43
<b>Tabla 4.</b> Porcentaje de Contribución para cada variable modelo de Distribución Potencial Actual. ....	57
<b>Tabla 5.</b> Valores de AUC de <i>E. pycnophylla</i> Cuatrec., bajo Escenarios de Cambio Climático....	63
<b>Tabla 6.</b> Porcentaje de Contribución para cada variable en el escenario de estabilización RCP 4.5 para el año 2050 .....	64
<b>Tabla 7.</b> Porcentaje de Contribución para cada variable en el escenario de estabilización RCP 4.5 para el año 2080 .....	65
<b>Tabla 8.</b> Porcentaje de Contribución para cada variable en el escenario de estabilización RCP 8.5 para el año 2050 .....	66
<b>Tabla 9.</b> Porcentaje de Contribución para cada variable en el escenario de estabilización RCP 8.5 para el año 2080 .....	67
<b>Tabla 10.</b> Plan de Acción para la Conservación de <i>E. pycnophylla</i> Cuatrec., identificadas para el Complejo de Páramos Chiles Cumbal.....	87

## Lista de Figuras

<b>Figura 1.</b> <i>E. pycnophylla</i> Cuatrec.....	20
<b>Figura 2.</b> Localización Complejo de Páramos Chiles Cumbal.....	44
<b>Figura 3.</b> Toma de coordenadas geográficas en campo .....	45
<b>Figura 4.</b> Localización de los registros de presencia de <i>E. pycnophylla</i> Cuatrec. ....	46
<b>Figura 5.</b> Tasa de Omisión de <i>E. pycnophylla</i> Cuatrec. que indica el rendimiento del modelo. ..	53
<b>Figura 6.</b> Sensibilidad frente a la especificidad para <i>E. pycnophylla</i> Cuatrec. ....	54
<b>Figura 7.</b> A. Prueba de Jackknife con ganancia de prueba. B. Prueba de Jackknife con los datos de AUC. C. Prueba de Jackknife con la importancia de las variables. ....	56
<b>Figura 8.</b> Distribución Potencial Actual de <i>E. pycnophylla</i> Cuatrec. en el Complejo de Páramos Chiles Cumbal.....	62
<b>Figura 9.</b> Distribución Potencial Actual Vs. Escenarios de Cambio Climático RCP 4.5 en los años 2050 y 2080 para <i>E. pycnophylla</i> Cuatrec. A. Distribución Potencial Actual. B. Escenario año 2050. C. Escenario año 2080.....	74
<b>Figura 10.</b> Distribución Potencial Actual Vs. Escenarios de Cambio Climático RCP 8.5 en los años 2050 y 2080 para <i>E. pycnophylla</i> Cuatrec. A. Distribución Potencial Actual. B. Escenario año 2050. C. Escenario año 2080.....	75
<b>Figura 11.</b> Escenarios RCP con concentraciones de CO <sub>2</sub> provenientes de las emisiones de industria y consumo de energía.....	76
<b>Figura 12.</b> Modelo Conceptual <i>E. pycnophylla</i> Cuatrec. para la identificación de estrategias de conservación.....	84

## RESUMEN

Los páramos actualmente se encuentran afectados por el cambio climático, lo que ha conllevado a que estos ecosistemas sean más vulnerables frente a estas variaciones, ocasionando afectaciones en la provisión de servicios ecosistémicos y trayendo consecuencias negativas en términos socioeconómicos y ambientales. El aumento de las concentraciones de CO<sub>2</sub>, que inciden sobre la temperatura, están afectando el crecimiento de las especies; sobre todo los estados fenológicos, indispensables para la su reproducción. Para el caso del género *Espeletia*, las poblaciones se ven afectadas debido a estos cambios, ocasionando una disminución en el número de individuos de las poblaciones, lo que igualmente conlleva a afectar su distribución y buscar mejores condiciones para adaptarse. En la presente investigación se analizó la influencia del cambio climático sobre la distribución potencial y conservación de la especie de frailejones «*Espeletia pycnophylla* Cuatrec», presente en el complejo de páramos Chiles- Cumbal en el departamento de Nariño, a partir de lo cual se empleó modelos de distribución bajo escenarios de cambio climático RCP 4.5 y 8.5 para los años 2050 y 2080, mediante el manejo del software MaxEnt, usando datos de presencia de la especie, variables bioclimáticas y la elevación, cuyos resultados comprueban que la concentración de gases GEI, específicamente de CO<sub>2</sub>, influye en las condiciones tróficas y no tróficas de la especie, lo cual se ve reflejado en una disminución de nichos para su establecimiento en escenarios futuros. A partir de estos resultados, se propusieron medidas para su conservación, con el fin que sean incluidas en instrumentos de planificación territorial.

**Palabras Clave.** Cambio Climático, páramos, *Espeletia pycnophylla*, MaxEnt, variables bioclimáticas.

## ABSTRACT

The paramos are currently affected by climate change, which has made these ecosystems more vulnerable to these variations, causing effects on the provision of ecosystem services and bringing negative consequences in socio-economic and environmental terms. The increase in CO<sub>2</sub> concentrations, which affect the temperature, are affecting the growth of the species; especially the phenological states, essential for its reproduction. In the case of the genus *Espeletia*, the populations are affected due to these changes, causing a decrease in the number of individuals in the populations, which also leads to affecting their distribution and seeking better conditions to adapt. In this research, the influence of climate change on the potential distribution and conservation of the species of frailejones «*Espeletia pycnophylla* Cuatrec», present in the Chiles-Cumbal paramos complex in the department of Nariño, was used. distribution models under climate change scenarios RCP 4.5 and 8.5 for the years 2050 and 2080, using the MaxEnt software, using data on the presence of the species, bioclimatic variables and elevation, the results of which prove that the concentration of GHG gases, specifically CO<sub>2</sub>, influences the trophic and non-trophic conditions of the species, which is reflected in a decrease in niches for its establishment in future scenarios. Based on these results, measures for their conservation were proposed, in order to be included in territorial planning instruments.

**Key words.** Climate change, paramos, *Espeletia pycnophylla*, MaxEnt, bioclimatic variables.

## 1. INTRODUCCIÓN

El calentamiento global de la tierra ha sido influenciado por diversos factores naturales y antropogénicos. En los últimos años se ha comprobado científicamente que este cambio ha sido influenciado notoriamente por el hombre en un 95%, cuyas actividades han contribuido en el aumento de las concentraciones de gases efecto invernadero -GEI que se evidencian desde mediados del siglo XX (IPCC, 2013, p. 15).

La conversión de los ecosistemas naturales es la principal causa de pérdida de la biodiversidad y de ecosistemas en Latinoamérica, y es el segundo factor responsable del cambio climático inducido por el hombre, ya que influye en la concentración de las emisiones totales de GEI (Alianza Clima y Desarrollo, 2014, p. 4).

El cambio climático ha interferido desfavorablemente sobre las especies terrestres, marinas y dulceacuícolas afectando áreas de distribución geográfica, actividades estacionales, pautas migratorias, abundancias e interacciones entre especies (IPCC, 2014).

Los ecosistemas de alta montaña, en especial los páramos son considerados estratégicos debido a la provisión de servicios ecosistémicos, entre ellos la captura de carbono y en especial la regulación hídrica (Hofstede et al., 2003, p. 53), que favorece las actividades realizadas por las comunidades asentadas en sus áreas de influencia; así mismo el aislamiento topogeográfico en el que se encuentran ha permitido procesos de especiación, logrando que estos ecosistemas presenten una alta tasa de endemismo en su flora y fauna (Cuatrecasas, 1958 citado por Vargas, 2016, p. 28)

Debido al cambio climático, estos ecosistemas son más vulnerables frente a estas variaciones, ocasionando afectaciones en la provisión de servicios ecosistémicos y trayendo consecuencias negativas en términos socioeconómicos y ambientales. Estos cambios se deben

directamente al aumento de la concentración de gases efecto invernadero, especialmente de CO<sub>2</sub>, que inciden sobre la temperatura, afectando la dinámica de los ecosistemas a través de su influencia en el crecimiento de las especies; generando procesos de competencia entre ellas por obtener condiciones más favorables en cuanto a espacio y disponibilidad de alimento para su desarrollo (Van der Hammen et al., 2018, p. 180).

Por otra parte, el cambio climático incide en las funciones ecosistémicas del páramo, como es el caso de los ciclos hidrológicos que afectan directamente a la vegetación, probablemente aumentando la tasa de evapotranspiración y restringiendo la posibilidad a las plantas de captar el agua lluvia o rocío, ya que muchas especies vegetales incluyendo las del género *Espeletia*, han adaptado características fisiológicas que les permiten captar y retener agua para llevar a cabo sus procesos vitales (Buytaert et al., 2014, citado por Vargas, 2016, p. 36). Así mismo, cabe mencionar que los procesos fenológicos de *Espeletia* se ven afectados por el cambio climático, ocasionando una disminución en el número de individuos en las poblaciones, lo que afecta su distribución y conlleva a buscar mejores condiciones para adaptarse.

Es de gran importancia determinar la distribución de especies que contribuyan con mantener la composición, estructura y función de los ecosistemas de alta montaña, sobre todo de aquellas que intervienen en la provisión de servicios ecosistémicos, puesto que resultan de gran valor e influencia para el bienestar humano por su papel esencial como reguladores del ciclo hídrico, sumideros para el secuestro de carbono y fuente de estabilidad climática (García et al., 2010).

Por esta razón con el presente trabajo se pretende evaluar la influencia del cambio climático sobre la distribución potencial de la especie de frailejones *Espeletia pycnophylla* Cuatrec., presente en el Complejo de Páramos Chiles-Cumbal, Nariño, mediante el empleo de modelos de distribución bajo escenarios de cambio climático RCP 4.5 y 8.5, con el manejo del software MaxEnt cuyos datos se basan en la presencia de individuos de la especie y variables bioclimáticas y topo-edáficas que arrojen resultados de distribuciones potenciales de la especie en los años 2050 y 2080 que permitan identificar recomendaciones para su conservación.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 2.1 Descripción del Problema

La presente investigación busca dar solución al desconocimiento de la distribución potencial de la especie de frailejones «*Espeletia pycnophylla* Cuatrec.» bajo escenarios de cambio climático (CC) en el complejo de páramos Chiles-Cumbal, ubicado en el departamento de Nariño. En este sentido, y de acuerdo con los alcances obtenidos en el Plan Territorial de Adaptación Climática del Departamento, se propone realizar un análisis más exhaustivo de la distribución de *E. pycnophylla* Cuatrec., utilizando modelos climáticos globales y escenarios de CC (RCP 4.5 y 8.5), que hasta el momento no se han realizado en este complejo de páramos.

Este desconocimiento ha llevado a que los organismos gubernamentales y las comunidades locales desconozcan la importancia que tiene la especie en el ecosistema de páramo, impidiendo la toma de decisiones en relación con la implementación de acciones de conservación de la especie y, por ende, de los ecosistemas asociados, con la respectiva inclusión en instrumentos de planificación y el cumplimiento de políticas públicas.

Los ecosistemas de alta montaña están experimentando cambios climáticos evidentes para la humanidad. La pérdida de los glaciares en un proceso que actualmente se vive debido al incremento de las temperaturas. Igualmente, estos eventos afectan las líneas de heladas, la altitud del punto de rocío y otros factores ambientales como la disminución de la precipitación anual que inciden en el funcionamiento de los ecosistemas.

Las extrapolaciones de las tendencias climáticas pueden evidenciar que los ecosistemas se están viendo afectados y que el manejo de la biodiversidad debe tener en cuenta la vulnerabilidad y la adaptación. Estas consecuencias por una parte, pueden conllevar a que las especies sean tolerantes y adaptarse al cambio climático, igualmente pueden ocasionar una migración para

seguir gradientes emergentes o la incapacidad de adaptarse o trasladarse, llevando a su extinción, y por otra parte, muchas áreas por encima de los 3.000 msnm han evolucionado de acuerdo a la variabilidad interanual de temperaturas como resultado de El Niño-Oscilación del Sur, logrando que muchas especies de altura sean tolerantes a una amplia gama de oscilaciones climáticas futuras (Herzog et al., 2012, p. xii).

El Complejo de Páramos Chiles-Cumbal cuenta con características especiales relacionadas con su ubicación. Se ve influenciado por un contraste bioclimático muy significativo teniendo en cuenta que las laderas orientales de la cordillera occidental se encuentran bajo la influencia de masas de aire secas y relativamente cálidas que provienen de la parte baja de los valles del Guáitara y del Patía. Por su parte, el flanco occidental está expuesto a las masas de aire cálido y húmedo que proviene del piedemonte Pacífico (Solarte, 2016, p. 5)

Por esta razón, el Complejo se ve influenciado por fenómenos Niño y Niña, los cuales corresponden, en términos generales, a la aparición de aguas superficiales relativamente más cálidas (El Niño) o más frías (La Niña) de lo normal en el Pacífico Tropical central y oriental — frente a las costas del norte de Perú, Ecuador y sur de Colombia. Estas alteraciones de la estructura térmica superficial y sub-superficial del océano están asociadas al debilitamiento de los vientos alisios del Este y con la Oscilación del Sur, correspondientes a una variación de las masas atmosféricas entre el Oeste y el Este del Pacífico Ecuatorial (Arango et al., 2014, p.18; Montealegre, 2009).

La variabilidad interanual y decenal de la precipitación se ha relacionado con las influencias del Océano Pacífico debidas a El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) y otras formas de variabilidad decenal parecidas a los fenómenos ENSO. A escalas de tiempo interanuales, las interacciones entre las anomalías de la temperatura superficial del mar (TSM), los patrones de viento y el desplazamiento latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) provocan variaciones en la nubosidad regional. (Vuille & Keimig, 2004, p. 3.346). El cambio climático puede incrementar los eventos extremos como sequías, olas de calor y frío o intensas lluvias. (Herzog et al., 2012, p. 3).

En este sentido, debido a los fenómenos mencionados, los páramos ubicados en el Complejo Chiles-Cumbal presentan una disminución considerable de servicios ecosistémicos, lo cual influencia la variación en la distribución y abundancia de especies, en especial, de aquellas que son consideradas clave dadas las funciones ecosistémicas que cumplen en los páramos. Este es el caso de *E. pycnophylla* Cuatrec., que interviene en la regulación hídrica, importante para la provisión de agua de muchas poblaciones que se encuentran en el área de influencia del Complejo.

De acuerdo con modelos de distribución y condiciones climáticas y de potencial disminución de nichos bajo diferentes escenarios del cambio climático a futuro, se estiman que en los páramos andinos alrededor del 60% de las especies vegetales (102 especies), se considerarían como extintas o en peligro crítico de acuerdo con el escenario A2 para el año 2080. (Cuesta-Camacho et al., 2008, p. 27), es decir, la flora de páramo y superpáramo serían más afectadas que las de otros biomas.

Finalmente, cabe mencionar que parte de la afectación sobre la distribución de la especie analizada es el incremento de gases efecto invernadero (GEI) en la atmósfera. Este el caso del dióxido de carbono, que podría ocasionar el ascenso del páramo en unos 400 o 500 m, causando que las especies endémicas y los requerimientos ecológicos especiales de los géneros *Espeletia* y *Espeletiopsis*, estén en peligro de extinción (IDEAM et al., 2002). Igualmente, el incremento de 3°C de temperatura podría contribuir en dicho desplazamiento e influir en la pérdida de la superficie de hábitat, buscando mejores condiciones de supervivencia y afectando de manera significativa su viabilidad. Se estima que se podrán presentar cambios en los ecosistemas de páramo, afectando su distribución a manera de islas y su biota altamente endémica (Anderson et al., 2012, p. 4).

Las especies más vulnerables son las que se encuentran en hábitats especializados, así como dependen de una tolerancia ambiental estrecha o de interacciones interespecíficas que son alteradas por el cambio climático, como es el caso de *E. pycnophylla* Cuatrec. Los modelos de distribución de especies pueden aportar en llenar aquellos vacíos de información sobre estas especies y contribuir en el diseño de medidas adaptativas.

## **2.2 Formulación del Problema**

¿Cuál es la influencia del cambio climático sobre la distribución potencial y conservación de la especie de frailejones «*Espeletia pycnophylla* Cuatrec», presente en el complejo de páramos Chiles- Cumbal en el departamento de Nariño?

### 3. JUSTIFICACIÓN

La delimitación de los Complejos de Páramos a nivel nacional es una estrategia que busca la preservación de estos ecosistemas de gran importancia estratégica por la provisión de los servicios ecosistémicos y la conservación de la biodiversidad, no obstante, cabe mencionar que estos ecosistemas actualmente se encuentran amenazados por presiones antrópicas y naturales, siendo entre estas últimas las relacionadas con efectos del cambio climático.

Para determinar este tipo de afectación es importante evaluar la distribución de especies a través de modelamientos bajo escenarios de cambio climático, con el fin de obtener resultados relacionados con la evolución del estado de conservación y los estados de amenaza de las especies, con el fin de tomar medidas de conservación frente a este tipo de amenazas.

En este sentido, es importante adelantar este tipo de investigaciones en el departamento de Nariño teniendo en cuenta que, se identifica un área representativa en páramos con respecto al total del área nacional registrada; por lo tanto, se priorizará al Complejo de Páramos Chiles Cumbal, el cual cuenta con características ambientales que definen una alta biodiversidad debido a su ubicación estratégica, al encontrarse influenciado por factores climáticos provenientes de la cordillera de los Andes y del pie de monte Pacífico.

En el Complejo Chiles-Cumbal, la conservación de los páramos es de gran prioridad, especialmente por el asentamiento de poblaciones campesinas e indígenas que habitan en su área de influencia y a partir del cual obtienen un sin número de beneficios derivados de los bienes y servicios ecosistémicos, entre ellos la obtención de agua, alimento, medicinas, entre otros, con los cuales llevan a cabo sus actividades diarias.

Desafortunadamente, debido a la falta de implementación de políticas públicas tanto sociales como culturales y ambientales, no se han podido establecer procesos concretos de

conservación que permitan a las comunidades participar activamente y empoderarse de la importancia que tienen los páramos y, crear espacios en los que la investigación y la divulgación sean la base para generación de conciencia ambiental.

Es necesario adelantar este tipo de estudios que permitan definir afectaciones sobre especies consideradas de importancia ambiental, para este caso es imprescindible contar con información sobre una de las más representativa de los páramos en el Departamento correspondiente al frailejón *Espeletia pycnophylla* Cuatrec.

Los resultados obtenidos a partir de la distribución potencial actual y bajo escenarios de cambio climático de *E. pycnophylla* Cuatrec., se convierten en una herramienta fundamental por la identificación de estrategias de conservación a nivel regional que puedan incluirse en instrumentos de planificación territorial, que conlleven a un manejo adecuado del ecosistema en el mediano y largo plazo. Así mismo, que puedan aportar a la conservación de *E. pycnophylla* Cuatrec. teniendo en cuenta que es una especie que influye en la provisión de algunos servicios ecosistémicos, entre ellos la regulación hídrica, considerado indispensable para las comunidades asentadas en el área de influencia, ya que el desarrollo de diferentes actividades de sustento depende de este vital recurso.

Por otra parte, cabe mencionar que esta investigación aportará información base para llevar a cabo otros estudios relacionados con la especie, específicamente con aquellos que tienen que ver con la influencia del cambio climático sobre su fisiología, puesto que la alteración de las variables climáticas afectan los estados fenológicos y reproductivos llevando a que muchos individuos busquen las condiciones climáticas adecuadas para reproducirse y establecerse en el lugares propicios para su supervivencia.

Finalmente, cabe mencionar que se aportará a la línea de investigación de Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente de la Universidad de Manizales, mediante la generación de conocimientos que contribuyan en el manejo sostenible de la biodiversidad, como en la evaluación de un modelo de distribución que pueda ser más preciso al momento de determinar áreas potenciales para la conservación de especies.

## 4. MARCO TEORICO

### 4.1 Páramos

Cuatrecasas, (1958) definió el páramo como extensas regiones desarboladas que coronan las cordilleras por encima del bosque andino. Son fríos y húmedos con cambios climáticos bruscos y están casi cubiertos por niebla y en ellos los pastos son abundantes.

Guhl, 1982 citado por Sarmiento et al.,(2013) define a los páramos como las regiones montañosas de los Andes ecuatoriales húmedos, por encima del límite superior del bosque, con una geomorfología hasta periglacial y bajo condiciones ambientales extremas (p. 25).

Rangel-Ch, (2000), define el páramo andino como:

La región de vida paramuna comprende las extensas zonas que coronan las cordilleras entre el bosque andino y el límite inferior de las nieves perpetuas. Está definida como región natural por la relación entre el suelo, el clima, la biota y la influencia humana” (p.3)

El páramo es un ecosistema de pajonales, principalmente abierto, localizado en la franja comprendida entre el bosque montano y el límite superior de la nieve perpetua. Este ecosistema está distribuido dentro de la zona húmeda de los andes ecuatoriales entre 11° N y 8 ° S de latitud, principalmente en Venezuela, Colombia, Ecuador, el Norte de Perú y algunas localidades de Costa Rica y Panamá (Sklenár, 2005). El páramo es uno de los ecosistemas de alta montaña más rico del mundo con una gran biodiversidad y endemismo, pero desde el punto de vista ecológico, es un ambiente frágil.

De acuerdo con Bruce et al, 2012, se definen como:

Los páramos se caracterizan por presentar bajas temperaturas y un balance hídrico positivo ocasionado por altos índices de coberturas nubosas, niebla y precipitación horizontal. La variación diaria de temperatura es mucho mayor que la de la temperatura media a nivel estacional, con frecuentes heladas nocturnas. Estas condiciones solo permiten que el crecimiento se produzca durante periodos cortos de tiempo al día, haciendo que el establecimiento de plántulas sea difícil. (p. 197)

Este ecosistema parece ser muy vulnerable al cambio climático, debido a su disposición espacial en las cumbres de la alta montaña. A medida que las condiciones climáticas que requieren los páramos asciendan altitudinalmente, las áreas de vegetación de páramo probablemente desaparecerán debido a la invasión de especies leñosas procedentes de áreas de menor altitud y al incremento de la actividad agrícola. (p. 198)

#### 4.2 *Espeletia pycnophylla* Cuatrec.

**Figura 1.** *E. pycnophylla* Cuatrec.



Reino: Plantae

Phylum: Magnoliophyta

Clase: Equisetopsida C. Agardh

Subclase: Magnoliidae Novák ex Takht.

Superorden: Asterales Takht.

Orden: Asterales Link

Familia: Asteraceae Bercht. & J. Presl

Género: Espeletia Mutis ex Bonpl.

Epíteto específico: pycnophylla Cuatrec.

Especie: *Espeletia pycnophylla* Cuatrec.

Foto: Vela, L. 2020

Especie conocida vulgarmente como “Frailejón”, es una roseta gigante, caulescente y perenne, endémica de los Páramos del suroccidente de Colombia y del norte y centro del Ecuador, constituyéndose en uno de los componentes más conspicuos de estos ecosistemas.(Cuatrecasas, 1986; Mena & Medina, 2001) . Sus características diagnósticas son las hojas sésiles altamente pubescentes con forma lanceolada a elíptica, inflorescencias desnudas (Cuatrecasas, 1986), con una longitud en estado maduro entre 30 y 40 cm. Poseen alturas máximas de 4 a 5 m y diámetros del tallo que oscilan entre 6 y 8 cm. (Laegard, 1992). Puede llegar a vivir más de 100 años y crecer entre uno a cuatro centímetros al año (Mavares, 2018). Sus semillas carecen de pappus y no son ornitócoras, lo que implica una gran restricción para la dispersión a largas distancias. Estas semillas caen al piso cuando las inflorescencias se deshidratan lo suficiente después del periodo de fructificación, y las plántulas crecen cerca de la planta madre, produciendo un patrón de distribución agregado (Benavides, Burbano, Urbano, & Solarte, 2007).

*E. pycnophylla* Cuatrec. presenta un ámbito de distribución geográfica bastante disyunto, formado por varias poblaciones geográficamente aisladas, las cuales se ajustan al concepto de *isla biogeográfica* de Carlquist, (1974). Por esta razón, Cuatrecasas, (1986) propuso la existencia de tres niveles infraespecíficos: *E. pycnophylla* var *galerana* Cuatrec., *E. pycnophylla* spp. *angelensis* Cuatrec., y *E. pycnophylla* spp. *llanganatensis* Cuatrec. Sin embargo, no hay evidencias posteriores que confirmen la validez filogenética de estos grupos, y además, aún existen poblaciones que permanecen sin estudiar.

### **4.3 Cambio Climático**

El clima se encuentra sujeto al equilibrio radiativo de la atmósfera, que se encuentra bajo ciertas condiciones como la cantidad de radiación solar y la concentración atmosférica de algunos gases que ejercen un efecto invernadero natural (gases traza con actividad radiativa, nubes y aerosoles).Es así como se produce alteraciones en el clima del planeta, puesto que estas condiciones forzamiento radiativo varían tanto de forma natural como por la actividad humana (H. Benavides & León, 2007, p. 2).

En gran parte, el cambio climático se produce por el incremento de las emisiones de Gases Efecto Invernadero - GEI. No obstante, existe una diferencia entre variabilidad climática (ejm. el fenómeno del Niño) y cambio climático. La variabilidad climática es un fenómeno natural y transitorio que se desarrolla como un evento de comportamiento anormal del clima; por otro lado, el cambio climático es un proceso de desarrollo continuo que se puede evaluar y verificar a lo largo del tiempo, mediante el registro de datos climáticos, como por ejemplo la temperatura (H. Benavides & León, 2007, p. 30).

Según el (IDEAM, s/f):

De acuerdo con la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC), el cambio climático se entiende como un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables. Por otro lado, el Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC) lo define como cualquier cambio en el clima con el tiempo debido a la variabilidad natural o como resultado de actividades humanas.

De acuerdo con Buytaert, Sevink, & Cuesta, (2014), mencionan que varios estudios coinciden que el incremento del calentamiento global y el cambio climático afectan diferentes escalas y niveles de la biodiversidad (p. 513).

Algunos estudios evidencian las respuestas ecológicas de los ecosistemas ante los cambios de clima que han generado diversos impactos, entre ellos se identifica:

- a) Alteraciones en la fisiología de las especies y su capacidad de soportar eventos extremos como las heladas (Sierra-Almeida & Cavieres, 2010).
- b) Cambios en los patrones de distribución y riqueza de especies (Feeley & Silman, 2010; Ramirez-Villegas et al., 2014)

- c) Incrementos en las tasas de extinción locales de algunas especies o comunidades de especies (Bustamante et al., 2005; Pounds et al., 2006).
- d) Alteraciones en los patrones fenológicos (Zavaleta et al., 2003). Como consecuencias derivadas, también se proyectan cambios en los patrones de distribución de los ecosistemas o biomas con fuertes disminuciones del área de los ecosistemas más altos (Peñuelas & Boada, 2003; Sanz-Elorza et al., 2003) (Cuesta et al., 2009) y posibles alteraciones en funciones ecosistémicas como el ciclo del carbono y el agua (Buytaert et al., 2011).

#### ***4.3.1 Escenarios de Cambio Climático***

A través de los Escenarios de Cambio Climático se puede analizar el clima a futuro, mediante una determinada concentración de gases de efecto invernadero presentes en la atmósfera.

Los escenarios de Cambio Climático permiten evaluar diferentes posibilidades relacionadas con el comportamiento del clima en el futuro e incidir en la toma de decisiones que beneficien a los diferentes actores en aspectos sociales, ambientales, económicos y políticos necesarios para no llegar a la situación proyectada de un futuro desfavorable (Murcia et al., 2015, p. 8).

De acuerdo con el Quinto Informe del Panel Intergubernamental de Cambio Climático – IPCC, se han identificado cuatro escenarios de emisión, llamados “camino representativo de concentración (RCP), que se basan en el forzamiento radiativo total para el año 2100, que se encuentra entre los 2,6 y 8,5 vatios por metro cuadrado ( $W/m^2$ ) (Tabla 1) (Murcia et al., 2015, p. 5).

**Tabla 1.** Caminos de Forzamiento Radiativo (FR) seleccionados por el IPCC para evaluar el comportamiento de la concentración de emisiones GEI en el planeta a 2100.

Escenario	Forzamiento Radiativo (W/m <sup>2</sup> )	CO <sub>2eq</sub> atmosférico (ppm)	Anomalía de temperatura	Trayectoria	Equivalente para escenarios SRES (AR4)
RCP 8.5	8.5	>1370	4.9	2100, en aumento	SRES A1F1
RCP 6.0	6.0	850	3	Estabilización después de 2100	SRES B2
RCP 4.5	4.5	650	2.4	Estabilización después de 2100	SRES B1
RCP 2.6	2.6	490	1.5	Picos antes de 2100 y después declina	Ninguno

Fuente: (Murcia et al., 2015, p. 10)

Según Murcia et al., (2015):

El Forzamiento Radiativo (FR) es un proceso que altera el equilibrio de energía del sistema Tierra – atmósfera, a raíz de un cambio en la concentración de dióxido de carbono o en la energía emitida por el Sol. Si el FR es positivo tiende a calentar el sistema (más energía recibida que emitida), mientras que un FR negativo lo enfría (más energía perdida que recibida). El FR se expresa en unidades de medida de vatios por metro cuadrado (W/m<sup>2</sup>).

El FR puede deberse a cambios en la radiación solar incidente, a incrementos en la concentración de gases como los GEI y los aerosoles, o a cambios en las propiedades reflectivas superficiales del planeta (cambios en los usos del suelo a coberturas que reflejan más la radiación solar).

Al hablar de escenarios RCP 2.6, 4.5, 6.0 u 8.5, no se están indicando aumentos de temperatura en grados centígrados, se indica la cantidad de energía que retiene el planeta, producto del FR: 2.6, 4.5, 6.0 u 8.5 W/m<sup>2</sup>. (p. 11).

#### **4.4 Modelos de Distribución de Especies (MDE)**

Según Mateo et al., (2011), los modelos de distribución de especies MDE son representaciones cartográficas de la idoneidad de un espacio para la presencia de una especie en función de las variables empleadas para generar dicha representación (p. 218).

Las variables o los indicadores pueden ser geológicos, topográficos o climáticos y con algunos de ellos o ya sea combinados, se pueden definir los factores ambientales que lleguen a interceder en la distribución de las especies y las comunidades (Guisan & Zimmermann, 2000, p. 148).

Dentro de las variables o indicadores se pueden determinar aquellas que son dependientes e independientes. Las variables dependientes son dicotómicas, o sea se basan en la presencia/ ausencia de las especies; y las independientes pueden ser cuantitativas tales como la temperatura, la elevación o usos del suelo (Mateo et al., 2011, p. 218).

Algunos autores puede referir además que:

Un MDE es una construcción numérica que define en el espacio ecológico las relaciones existentes entre las presencias de una especie o comunidad vegetal y los valores de las variables ambientales con influencia en su distribución, ayudándonos a mejorar nuestra interpretación y comprensión de la distribución de las especies y comunidades (Franklin, 2009 citado por Pérez, 2013, p. 5).

El modelado del nicho ecológico es un instrumento que permite analizar los factores ecológicos que influyen en la distribución de una determinada especie y que la influyen en distintos grados y modos. La información del modelo una vez

analizada posibilita proyectar a nivel geográfico el área potencial que ocupa la especie (Osinfor, 2013 p. 10).

#### ***4.4.1 Variables Dependientes***

Para realizar los modelos de distribución de especies es necesario contar con datos de presencia y ausencia de las especies, datos que se pueden obtener de muestreos o avistamientos (Mateo et al., 2012, p. 220).

Para estas variables se han identificados dos problemas, en primera instancia es que algunos de estos datos han sido colectados mediante muestreos planificados y en segunda instancia la mayoría de los datos colectados en campo suelen ser de datos de presencias, igualmente los estudios enfocados en la distribución de especies son muy escasos (Mateo et al., 2012, p. 220).

Actualmente se cuenta con información de distribución de especies en bases de datos disponibles por vía Internet, entre las que se destacan: Global Biodiversity Information Facility (<http://www.gbif.com>), European Register of Marine Species (<http://www.marbef.org/data/erms.php>), Tropicos (<http://www.tropicos.org>), Fishnet (<http://www.fishnet2.net>), ORNIS (<http://ornisnet.org>), Manis (<http://manisnet.org>) y Herpnet (<http://www.herpnet.org>) (Mateo et al., 2012, p. 231).

#### ***4.4.2 Variables Independientes***

Según (Mateo et al., 2011):

Las relaciones entre organismos y medio abiótico son una de las causas de los patrones espaciales de distribución, lo que hace que la distribución de los organismos sea descrita razonablemente bien por factores climáticos a escalas espaciales amplias. A escalas menores es probable que la distribución responda a factores como la distribución de recursos y variaciones microtopográficas en las condiciones ambientales. (p. 221).

Las variables ambientales más utilizadas son: 1) climáticas; 2) edafológicas, litológicas o geológicas; 3) elevación y variables derivadas, como pendiente, curvatura, rugosidad, radiación solar potencial, red de drenaje, etc.; 4) variables obtenidas mediante teledetección, como índices de vegetación, temperatura en superficie o clasificaciones de la cubierta del suelo (Bradley y Fleishman, 2008 citado por Mateo et al., 2012, p. 221); 5) variables de tipo demográfico y de ocupación del espacio, como índices de población, accesibilidad, densidad o proximidad a vías de comunicación, útiles como indicadores del grado de influencia antrópica (Mateo et al., 2012 p. 221).

#### **4.5 Técnicas de Modelación**

Entre las técnicas de modelación de especies se han identificado tres grupos que se relacionan a continuación:

##### ***6.5.1 Técnicas Discriminantes***

Son técnicas que requieren datos de presencia y de ausencia para construir el modelo (Mateo et al., 2011, p. 222). Pueden clasificarse en:

- a. Árboles de clasificación.
- b. Técnicas de ordenación (análisis de correspondencia canónica).
- c. Redes neurales.
- d. Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS).
- e. Modelos Lineales Generalizados –GLM.
- f. Modelos Aditivos Generalizados – GAM.
- g. Regresión por cuantiles.
- h. Estadística bayesiana.
- i. Máxima entropía.

Dentro de algunas de estas técnicas se han empleado como ausencias aquellos lugares donde no se ha encontrado a la especie (Mateo et al., 2011, p. 222).

#### ***4.5.2 Técnicas Descriptivas***

Son técnicas que únicamente emplean datos de presencia (Mateo et al., 2011, p. 223).

Entre estas se tiene:

- a. Deductivas.
- b. Envueltas geográficas ó convex hull.
- c. Envueltas ambientales como BIOCLIM, ANUCLIM. BIOMAP, HABITAT o FLORAMAP.
- d. Métodos de distancias matemáticas como DOMAIN, Biomapper, ENFA, LIVES y MADIFA.
- e. Expectation-Maximization Algorithm –EM–.

#### ***4.5.3 Técnicas Mixtas***

Son la combinación de técnicas discriminantes y descriptivas. Generan un modelo de acuerdo con el grado de coincidencia entre varios modelos. Entre estas se destaca BIOMOD que se encarga de generar modelos de consenso (Mateo et al., 2011, p. 223).

### **4.6 MaxEnt**

MaxEnt es un método que estima una probabilidad de distribución de especies mediante la máxima entropía, o sea la distribución más dispersa y sea lo más uniforme posible. La información que se obtiene de la distribución se presenta como un conjunto de variables denominadas “características” y de restricciones que son el valor esperado de cada característica que debe coincidir con el promedio de un conjunto de puntos de la muestra tomada de la distribución. Cuando se realiza el modelo de distribución con MaxEnt , se emplean solo datos de presencia y se obtiene como resultado los píxeles del área de estudio que conforman el espacio que define la distribución de probabilidad; los píxeles con registros de ocurrencia de especies constituyen los puntos de muestra y las características son variables climáticas, elevación , categorías del suelo, tipos de vegetación y otras variables ambientales (Phillips et al., 2006, p. 234).

MaxEnt tiene muchas ventajas tales como: (1) Requiere solo datos de presencia, junto con información ambiental para toda el área de estudio. (2) Puede utilizar datos continuos y categóricos, y puede incorporar interacciones entre diferentes variables. (3) Utiliza algoritmos deterministas eficientes que se converja en la distribución de probabilidades propia (máxima entropía). (4) Los resultados son continuos, lo que permite hacer distinciones finas entre la idoneidad modelada para cada especie de diferentes áreas (Phillips et al., 2006, p. 234).

#### **4.7 Variables Climáticas o Bioclimáticas**

Son las variables más empleadas en temas de modelación de especies, debido a su fácil acceso y la obtención de datos globales a alta resolución (1 km). En este sentido se trabaja con bases de datos globales de superficies climáticas como Worldclim, que contiene 19 variables bioclimáticas predefinidas (Pliscoff & Fuentes-Castillo, 2011, p. 66).

Según Osinfor, (2013):

Las distintas mediciones de factores registrados por un cierto tiempo en todo el mundo se han estandarizado para formar capas bioclimáticas. Estas capas permiten analizar el espacio ecológico de las especies, ya que se pueden obtener los valores bioclimáticos correspondientes a cada dato de presencia de alguna especie de interés y usarlos de insumos de un algoritmo de modelación que nos permitirá obtener un modelo de nicho ecológico. p. 12.

La determinación de variables bioclimáticas se obtiene de los valores mensuales de temperatura y precipitación que son empleados en modelos de distribución de especies y técnicas de modelado ecológico. Estas variables contienen datos de precipitación y temperatura de acuerdo a las tendencias anuales, a la estacionalidad y a factores ambientales extremos o limitantes (WorldClim, 1991).

**Tabla 2.** *Código de las variables bioclimáticas obtenidas de WorldClim*

---

<b>VARIABLES BIOCLIMÁTICAS</b>
BIO1 = Temperatura media anual
BIO2 = Rango de temperaturas diurnas
BIO3 = Isotermalidad (BIO2/BIO7) (* 100)
BIO4 = Estacionalidad en la temperatura (desviación estándar * 100)
BIO5 = Temperatura máxima del mes más cálido
BIO6 = Temperatura mínima del mes más frío
BIO7 = Rango anual de temperatura (BIO5-BIO6)
BIO8 = Temperatura media del trimestre más lluvioso
BIO9 = 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 en la precipitación (coeficiente de variación)
BIO16 = Precipitación del trimestre más lluvioso
BIO17 = Precipitación del trimestre más seco
BIO18 = Precipitación del trimestre más cálido
BIO19 = Precipitación del trimestre más frío

---

Fuente: (WorldClim, 1991)

#### **4.8 Variables Topo-Edáficas**

Proceden de imágenes satelitales, obteniendo coberturas de uso de suelo o índices de productividad (Plissock & Fuentes-Castillo, 2011, p. 66).

En el caso de estas variables, se ha probado que su uso en forma conjunta con los datos climáticos, puede mejorar el resultado de los modelos a escalas espaciales de mayor detalle (Randin et al, 2009, citado por Plissock & Fuentes-Castillo, 2011, p. 67).

## 4.9 Marco Normativo

La falta de implementación en políticas públicas ha conllevado con el tiempo a un uso desmesurado de los recursos naturales sin medidas sostenibles de manejo, que poco a poco han alterado las funciones ecosistémicas y al mismo tiempo afectando a las comunidades por la escasez de servicios ecosistémicos de los cuales se benefician.

Con base en los resultados obtenidos en el estudio de modelación de distribución de la especie *E. pycnophylla* Cuatrec., se contribuye en la toma de decisiones sobre acciones de conservación en los ecosistemas de páramo y de la especie, al mismo tiempo se da cumplimiento con las políticas ambientales establecidas para este tipo de ecosistemas.

A nivel normativo el trabajo de investigación se relaciona en primera instancia con la Constitución Política de Colombia, con los artículos 8, 79 y 80, los cuales rezan: “Es obligación del Estado y de las personas proteger las riquezas culturales y naturales de la Nación”; “Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo” y “El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución”(Constitución Política de Colombia, 1991)

Así mismo, en la Ley 99 de 1993 en su artículo 1, numeral 4, menciona que: “las zonas de paramos, subpáramos, los nacimientos de agua y las zonas de recarga de acuíferos serán objeto de protección especial”, así mismo, en su artículo 63 se definen los principios de armonía regional, gradación normativa y rigor subsidiario, con los cuales las entidades territoriales buscan un de un medio ambiente sano y adecuadamente protegido, y de garantizar el manejo armónico y la integridad del patrimonio natural de la Nación (Ley 99, 1993).

En el Decreto ley 2811 de 1974, se define el ambiente como patrimonio común, señala el objeto de la regulación y ámbito de aplicación normativa, igualmente que la ejecución de la política ambiental será una función del Gobierno Nacional, lograr la preservación y restauración del ambiente, la conservación, mejoramiento y utilización racional de los recursos naturales

renovables, según criterios de equidad que aseguran el desarrollo armónico del hombre y de dichos recursos, la disponibilidad permanente de éstos, y la máxima participación social para beneficio de la salud, el bienestar de los presentes y futuros habitantes del territorio Nacional (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014).

En la Resolución 769 de 2002, señala que el Ministerio de Ambiente expidió las disposiciones para contribuir a la protección, conservación y sostenibilidad de los páramos en el territorio nacional, estableciendo en sus artículos 3° y 4°, la elaboración por parte de las autoridades ambientales del Estudio sobre el Estado Actual de los Páramos del área de su jurisdicción y del Plan de Manejo Ambiental de los mismos (Ministerio del Medio Ambiente, 2002).

Así mismo, en la Resolución 839 de 2003 se establecen los términos de referencia para la elaboración del Estudio sobre el Estado Actual de Páramos y del Plan de Manejo Ambiental de los Páramos (Resolución 839 de 2003). Tiene como objetivos los siguientes:

- Establecer una línea base biofísica, socioeconómica y cultural de los ecosistemas de páramo en las jurisdicciones de las autoridades ambientales, como referente para la gestión, manejo y seguimiento de estos ecosistemas.
- Realizar un diagnóstico y evaluación integral de los elementos identificados en la línea base que permita determinar el estado actual de los ecosistemas de páramo y determinar las medidas de manejo para su conservación, restauración y la orientación de usos sostenibles.
- Obtener una zonificación ambiental para el ordenamiento y establecimiento de las medidas de manejo para el uso sostenible, conservación y restauración de los ecosistemas de páramo y sus recursos asociados.

La Ley 1382 de 2010, consideró a los ecosistemas de páramo áreas excluibles de la minería, los cuales se identificarán de conformidad con la información cartográfica proporcionada por el Instituto Alexander von Humboldt.

De acuerdo con la Ley 1753 de 2015, se dispuso en el artículo 173: “En las áreas delimitadas como páramos no se podrán adelantar actividades agropecuarias ni de exploración o explotación de recursos naturales no renovables, ni construcción de refinerías de hidrocarburos”; en el mismo artículo se menciona que el proceso de delimitación debe ser realizada con base en la cartografía generada por el Instituto Alexander von Humboldt a escala 1:100.000 o 1:25.000, cuando esta última esté disponible y en los estudios técnicos, sociales, económicos y ambientales elaborados por las Corporaciones Autónomas Regionales. Así mismo, refiere que la delimitación de los ecosistemas de páramos por parte del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, debe estar fundamentada en: a) el área de referencia definida en la cartografía generada por el Instituto Alexander von Humboldt a escala 1:100.000 o 1:25.000; b) los estudios técnicos que permitan caracterizar el contexto ambiental, social y económico elaborados por las Corporaciones Autónomas Regionales con jurisdicción en los páramos. (Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018, 2015)

En este contexto, el gobierno nacional delimita los Complejos de páramos a nivel nacional a escala 1:25.000, es así como para el departamento de Nariño se delimitan tres Complejos, dentro de los cuales se encuentra Chiles -Cumbal, delimitado por la resolución 1398 de 2018. En esta misma vigencia, el Congreso de la República de Colombia, expide la Ley 1930 por medio de la cual se dictan disposiciones para la gestión integral de los páramos en Colombia; su objeto se enfoca en establecer como ecosistemas estratégicos a los páramos, así como fijar directrices que propendan por su integralidad, preservación, restauración, uso sostenible y generación de conocimiento. En este mismo contexto, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, mediante la Resolución 0886 de 2018, adopta los lineamientos para la zonificación y régimen de usos en las áreas de los páramos delimitados y se establecen las directrices para diseñar, capacitar y poner en marcha programas de sustitución y reconversión de las actividades agropecuarias.

Por otra parte, se tiene en cuenta la Ley 1931 de 2018 que establece las directrices para la gestión del cambio climático, enfocadas en acciones de adaptación al cambio climático, así como en mitigación de gases efecto invernadero, con el objetivo de reducir la vulnerabilidad de la población y de los ecosistemas del país frente a los efectos del mismo y promover la transición

hacia una economía competitiva, sustentable y un desarrollo bajo en carbono, cuya competencia se encuentra en todos los actores sociales (Congreso de la República, 2018).

Igualmente, se aporta en la Política Nacional para la Gestión Integral de la Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos (PNGIBSE), que promueve la Gestión Integral de la Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos (GIBSE), de manera que se mantenga y mejore la resiliencia de los sistemas socioecológicos, a escalas nacional, regional, local y transfronteriza, considerando escenarios de cambio y a través de la acción conjunta, coordinada y concertada del Estado, el sector productivo y la sociedad civil (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2012) .

A nivel regional, se contribuye con el cumplimiento de metas establecidas en el Plan de Acción en Biodiversidad para Nariño 2006-2030, y a nivel nacional, de acuerdo con la Política Nacional de Biodiversidad, la cual busca promover la conservación, el conocimiento y el uso sostenible de la biodiversidad, así como la distribución justa y equitativa de los beneficios derivados de la utilización de los conocimientos, innovaciones y prácticas asociados a ella por parte de la comunidad científica nacional, la industria y las comunidades locales; siendo necesario emprender procesos sostenibles que garanticen condiciones para la conservación de la biodiversidad, sus servicios ecosistémicos y el mejoramiento de la calidad de vida de las comunidades (Delgado et al., 2007).

En el Plan de Gestión Ambiental Regional del departamento de Nariño 2016-2036, se establece en su línea estratégica 1: “La gestión Integral del Territorio para Proteger, Conservar y Recuperar el Patrimonio Natural Costero, Marino y Continental Del Departamento”, en cuya meta a 2027 se relacionan los páramos de la siguiente manera: “100% los planes de ecosistemas estratégicos y de servicios ecosistémicos (páramos, manglares y subxerofítico) con incorporación de la gestión integral de la biodiversidad”.

A partir de los resultados obtenidos, los entes territoriales deben incluir las áreas de páramos delimitadas en instrumentos de planificación territorial (EOT, PBOT y POT), teniendo en cuenta que son determinantes ambientales que se constituyen en normas de mayor jerarquía conforme la Ley 388 de 1997. Por otra parte, se contribuye a lo establecido en la normatividad

como es la declaración de áreas protegidas (Decreto 2372 de 2010- inmerso en el Decreto Único Reglamentario 1076 de 2015 ), la identificación de áreas estratégicas para la conservación del recurso hídrico que abastece a acueductos municipales y/o veredales (Decreto 0953 de 2013- inmerso en el Decreto Único Reglamentario 1076 de 2015) (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015) y la implementación de la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico.

Finalmente, está en articulación con los lineamientos establecidos en el Plan Nacional de Desarrollo “Pacto por Colombia, Pacto por la Equidad” 2018-2022, relacionado con el pacto: “Por la sostenibilidad: producir conservando y conservar produciendo”, bajo la línea biodiversidad y riqueza natural: activos estratégicos de la Nación, con el cumplimiento del objetivo No. 2. “...Realizar intervenciones integrales en áreas ambientales estratégicas y para las comunidades que las habitan...” (DPN, 2018). Es así como se puede contribuir en el mejoramiento de las condiciones de vida de muchas poblaciones tanto indígenas como campesinas que dependen del suministro de servicios ecosistémicos que otorgan los páramos en el Complejo Chiles-Cumbal y que a partir de esta investigación se puedan determinar acciones de conservación de una especie importante que es indispensable en la función y estructura de este vital ecosistema.

## 5. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

El desarrollo de la presente investigación se llevará cabo en el Complejo de Páramos Chiles-Cumbal en el departamento de Nariño, con el fin de realizar la modelación de la distribución de la especie *E. pycnophylla* Cuatrec. bajo escenarios de variabilidad climática, que conlleven a la toma de decisiones en cuanto a medidas de conservación, de manera participativa tanto con las comunidades indígenas como campesinas, asentadas en el área de influencia del Complejo.

A nivel local, regional y nacional los ecosistemas de páramos son considerados estratégicos debido a la provisión de bienes y servicios ecosistémicos que ofrecen a las comunidades asentadas en sus áreas de influencia, que permiten desarrollar los diferentes procesos socioecológicos, pero que debido a las actividades de antropización junto con la variabilidad climática, se están viendo afectados, ocasionando la pérdida de biodiversidad y en consecuencia, la alteración de su función y estructura, así como de los procesos biogeoquímicos.

El desconocimiento de la distribución de especies ha conllevado que se realicen investigaciones con el fin de definir patrones que permitan tomar decisiones para su manejo y conservación. Es así que, a nivel internacional, los estudios desarrollados en la modelación de especies vegetales, han determinado la distribución potencial y sus nichos fundamentales, como lo demuestra Cuesta-Camacho et al. (2008) quienes evaluaron los posibles impactos del cambio climático (en dos escenarios de cambio) en el nicho ambiental de un grupo de aves y plantas vasculares de origen andino para los años 2050 y 2080.

Contreras-Medina, Luna-Vega, & Ríos-Muñoz, (2010) estudiaron la Distribución de *Taxus globosa* Schltl. (Taxaceae) en México, considerada una especie amenazada y que, de acuerdo con los resultados obtenidos en cuanto a la disminución en el número de individuos,

surge la necesidad de tomar decisiones en cuanto a la conservación de parches de bosques nublados para garantizar la existencia de esta especie.

En 2010, Aguirre & Chamba, realizaron el estudio sobre Patrones de Comportamiento de 10 Especies Vegetales del Páramo del Parque Nacional Podocarpus ante escenarios de Cambio Climático. Se aplicó una metodología estandarizada y herramientas tecnológicas que permitieron generar información relacionada al cambio futuro de la distribución y comportamiento de las especies en función de cambio climático. Se determinaron las potenciales especies de flora indicadoras de cambio climático, igualmente los patrones de distribución actual de las especies de flora indicadoras de cambio climático y se generaron modelos predictivos del comportamiento espacial y temporal de especies de flora indicadoras de cambio climático.

Así mismo, Leal, Mendoza, Pérez, Geneletti, & López, (2012) e Ibarra et al., (2016), realizaron la modelación de las especies vegetales de *Pinus martinezii* E. Larsen y *Coryphantha chihuahuensis* (Britton & Rose) A. Berger (Cactaceae) respectivamente en México, con el fin de tomar decisiones para la protección, conservación y recuperación de las especies, como para planificar exploraciones en busca de nuevas poblaciones que no han sido registradas, o identificar sitios las especies puedan reintroducirse.

La investigación desarrollada por Rodrigues, Silva, Eisenlohr, & Schaefer, (2015), demuestra la evaluación de modelos de nichos ecológicos de tres especies arbóreas especializadas (*Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan, *Aspidosperma pyriformium* Mart. y *Myracrodruon urundeuva* Allemão) en bosques tropicales estacionalmente secos en Brasil, con el fin de hacer predicciones confiables de las estrategias de adaptación de las plantas y las respuestas a los cambios climáticos en el bosque seco a nivel comunitario y así tomar decisiones en cuanto al emprendimiento de políticas públicas que minimicen los efectos del cambio climático sobre la biodiversidad que se encuentran dentro de estos ecosistemas.

A nivel nacional, las investigaciones realizadas en modelación de especies vegetales se han realizado por Armenteras & Mulligan, (2010), con *Palicourea angustifolia* Kunth y *Palicourea guianensis* Aubl., para predecir la distribución de especies a escala nacional,

utilizando la prueba de Mahalanobian que contribuyó al desarrollo de la ciencia de la biogeografía, permitiendo modelar patrones de distribución en regiones con poca o escasa información. A partir de ello, *P. angustifolia* Kunth tiene una distribución claramente andina con presencia en áreas de montaña bajas y medias, pero no en la alta montaña ni en los valles inter-Andinos. *P. guianensis* Aubl., indican presencia en tierras bajas, incluyendo bosques amazónicos, y algunas zonas de la Orinoquia.

Así mismo, se cuenta con el estudio realizado por Viancha, (2012), en el que se estableció un Modelo de Distribución de *Quercus humboldtii* (Bonpl.) en Colombia para los años 2020, 2050 y 2080, prediciendo la disminución en la distribución de la especie probablemente debido al cambio climático, con lo cual se pueden generar planes y propuestas encaminados a la conservación de esta especie y de los bosques altoandinos fuertemente amenazados por acciones antrópicas principalmente.

Alarcón & Pabón, (2013), analizaron los cambios que habría en la distribución espacial de la vegetación sobre el territorio colombiano bajo dos escenarios de cambio climático en diferentes periodos del siglo XXI. Tomaron las variables climatológicas generadas para Colombia por un modelo climático regional en dos escenarios (A2 y B2) de IPCC (2007) para los periodos 2011-2040 y 2070-2100, y se generó la distribución de la vegetación correspondiente a esos periodos y escenarios. Mediante la comparación de las distribuciones de los periodos actual (1970-2000) y futuros (2011-2040 y 2070-2100), se establecieron los cambios que habría en la vegetación y como resultado se obtuvo que en los dos escenarios, para los dos periodos analizados, las formaciones vegetales sufren cambios hacia las de pisos altitudinales más bajos y provincias de humedad más secas; el cambio más drástico ocurre en el escenario A2 para el periodo 2070-2100. Las formaciones vegetales que más se afectan son las de páramo y las altoandinas, que según los escenarios climáticos explorados, desaparecerían a mediados del siglo XXI.

Para el 2016, Fajardo-Gutiérrez, Infante-Betancour, & Cabrera Amaya, realizaron la modelación de la distribución potencial de las especies de *Polylepis* presentes en Colombia para identificar amenazas y oportunidades de conservación a escala regional.

Los estudios de modelación de distribución de especies de flora en el departamento de Nariño a partir de la variabilidad climática son escasos, las primeras contribuciones al tema se realizaron con los estudios técnicos para la elaboración del Plan Territorial de Adaptación Climática del departamento de Nariño, elaborados por WWF y Corponariño (Guevara et al., 2016).

En este trabajo establecieron diferentes análisis entre ellos: generar información de las posibles afectaciones en los ecosistemas, especies y áreas protegidas que son objeto de conservación en el departamento. En este ítem se realizó la modelación de 49 especies valores objeto de conservación en las que se incluye seis especies vegetales, entre ellas *E. pycnophylla* Cuatrec., con base en 6 variables bioclimáticas (Worldclim) evaluadas bajo 2 escenarios: uno con el clima actual desde el año de 1950 hasta el 2000 y otro correspondiente al clima futuro al año 2050.

Así mismo, se evidencia el trabajo realizado por Diaz, (2015), en relación con el análisis biogeográfico de *E. pycnophylla* Cuatrec. (Asteraceae) en los Andes del norte de Ecuador y suroccidente de Colombia en el departamento de Nariño, identificó variables ambientales que controlan la distribución de *E. pycnophylla* Cuatrec., para ello utilizó el enfoque de modelos de distribución de especies-SDM; caracterización de la estructura y composición de la vegetación asociada a *E. pycnophylla* Cuatrec., a lo largo del gradiente latitudinal, aplicó un análisis de similaridad a los datos florísticos recopilados en 80 levantamientos realizados en los páramos Doña Juana, Morasurco, Bordoncillo, Ovejas y El Ángel. Como resultado se generó un modelo lineal generalizado que explica el 66,3% de la distribución de *E. pycnophylla* Cuatrec. Se registraron un total de 108 especies. Las comunidades vegetales diferentes fueron las ubicadas en Ángel y Doña Juana (2 especies en común), y las comunidades similares fueron Morasurco y Bordoncillo (15 especies en común).

Para el año 2020, Valencia et al., (2020), mediante modelos de sensibilidad climática e inferencias potenciales adaptativas evaluaron la vulnerabilidad climática de *Espeletia*, mediante la modelación de la distribución de 28 taxones de *Espeletia* bajo un escenario de conservadurismo de nicho utilizando altitud y cinco variables bioclimáticas actuales (1970-2000)

y futuras (2050 RCP 8.5) en 36 complejos de páramo diferentes en los Andes del norte. Calcularon la capacidad adaptativa de estos complejos de páramo considerando tres factores que mejoran el potencial adaptativo de la biodiversidad, así como tres factores ambientales limitantes de la respuesta plástica de las poblaciones. Estos predictores mostraron que diversos páramos en la Cordillera Oriental eran más vulnerables. Los resultados evidenciaron una persistencia limitada a través de la migración en las respuestas a corto plazo de *Espeletia* al cambio climático. Por otra parte, el modelo ilustró cómo el clima futuro puede afectar las poblaciones de plantas en un ecosistema mega diverso y altamente amenazado como el Páramo, y alienta la realización de estimaciones similares en diversos complejos de plantas en otros ecosistemas de alta montaña e insulares.

Con relación al presente estudio, se aportaría en la generación de información sobre la distribución de la especie *E. pycnophylla* Cuatrec. para el Complejo paramuno Chiles-Cumbal, aún no estudiado, con el fin de generar estrategias de conservación, según diferentes escenarios de variabilidad climática que para el departamento de Nariño no se han determinado, igualmente se destaca que la importancia de esta especie consiste básicamente en su intervención en la regulación hídrica en la región paramuna, como también actúa en la regulación climática, ya que de regiones dominadas por esta planta proviene la mayor parte del agua que provee a los cascos urbanos y veredales (M. Mavares, 2013).

## 6. OBJETIVOS

### 6.1 Objetivo General

Analizar la influencia del cambio climático sobre la distribución potencial y conservación de la especie de frailejones «*Espeletia pycnophylla* Cuatrec», presente en el complejo de páramos Chiles- Cumbal en el departamento de Nariño.

### 6.2 Objetivos Específicos

- Determinar la distribución potencial actual de la especie *E. pycnophylla* Cuatrec. bajo variables bioclimáticas priorizadas.
- Evaluar la modelación de la distribución potencial futura de *E. pycnophylla* Cuatrec. bajo escenarios de cambio climático RCP 4.5 y 8.5 para los periodos 2050 y 2080
- Proponer medidas de conservación de *E. pycnophylla* Cuatrec. para el Complejo de Páramos Chiles-Cumbal.

## 7. METODOLOGÍA

### 7.1 Tipo de Investigación

La investigación desarrollada presenta un enfoque cuantitativo de tipo descriptivo, al trabajar con el procesamiento de datos de variables climáticas y datos de presencia-ausencia de la especie *E. pycnophylla* Cuatrec., que permitieron evaluar su distribución bajo escenarios de cambio climático en el Complejo paramuno Chiles-Cumbal para la identificación de medidas de conservación.

### 7.2 Área de Estudio

El complejo de páramos Chiles - Cumbal cubre áreas de alta montaña de los Andes occidentales y suroccidentales del departamento de Nariño. Esta zona se encuentra constituida por un corredor de páramos que de manera fragmentada se prologa a lo largo de la divisoria de aguas de la cordillera Occidental y hacia el sur, en la divisoria de aguas del macizo montañoso conocido como Nudo de los Pastos. Por lo tanto, dentro del corredor principal que se encuentra en el suroccidente de los Andes Nariñenses existen varias áreas paramunas muy representativas, alguna de ellas conformando corredores y otras presentándose de manera aislada.

De norte a sur, estas áreas o núcleos son los correspondientes al cerro de Sotomayor, complejo de páramos Azufral – Gualcalá, corredor Chiles – Cerro Negro – Cumbal y dos páramos aislados e intra-andinos: Paja Blanca y Quitasol. Estos dos últimos no se encuentran en la divisoria de aguas sino que se localizan en antiguos edificios volcánicos ubicados al oriente y norte del altiplano Túquerres – Cumbal (Solarte, 2016. p. 1)

El Complejo de Páramos Chiles Cumbal está ubicado en dieciséis (16) municipios del departamento de Nariño, entre ellos se encuentran: Cumbal, Guachucal, Mallama, Santacruz, Túquerres, Sapuyes, Gualmatán, Contadero, Ospina, Iles, Los Andes, Cumbitara, La Llanada, Pupiales, Guaitarilla y Providencia. La mayor parte del área de páramo se localiza en los

municipios de Cumbal, Mallama, Guachucal y Túquerres con un porcentaje equivalente al 80,14% (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018. p. 5) (Figura 2).

El área mencionada es calculada en el sistema de proyección de coordenadas planas Magna Colombia Bogotá, sin embargo, para la presente investigación se adoptó el sistema de coordenadas Magna Colombia Oeste, dado que era el más adecuado por la localización del área de estudio y mayor precisión. El área calculada para el complejo Chiles-Cumbal es de 64.388,96 ha.

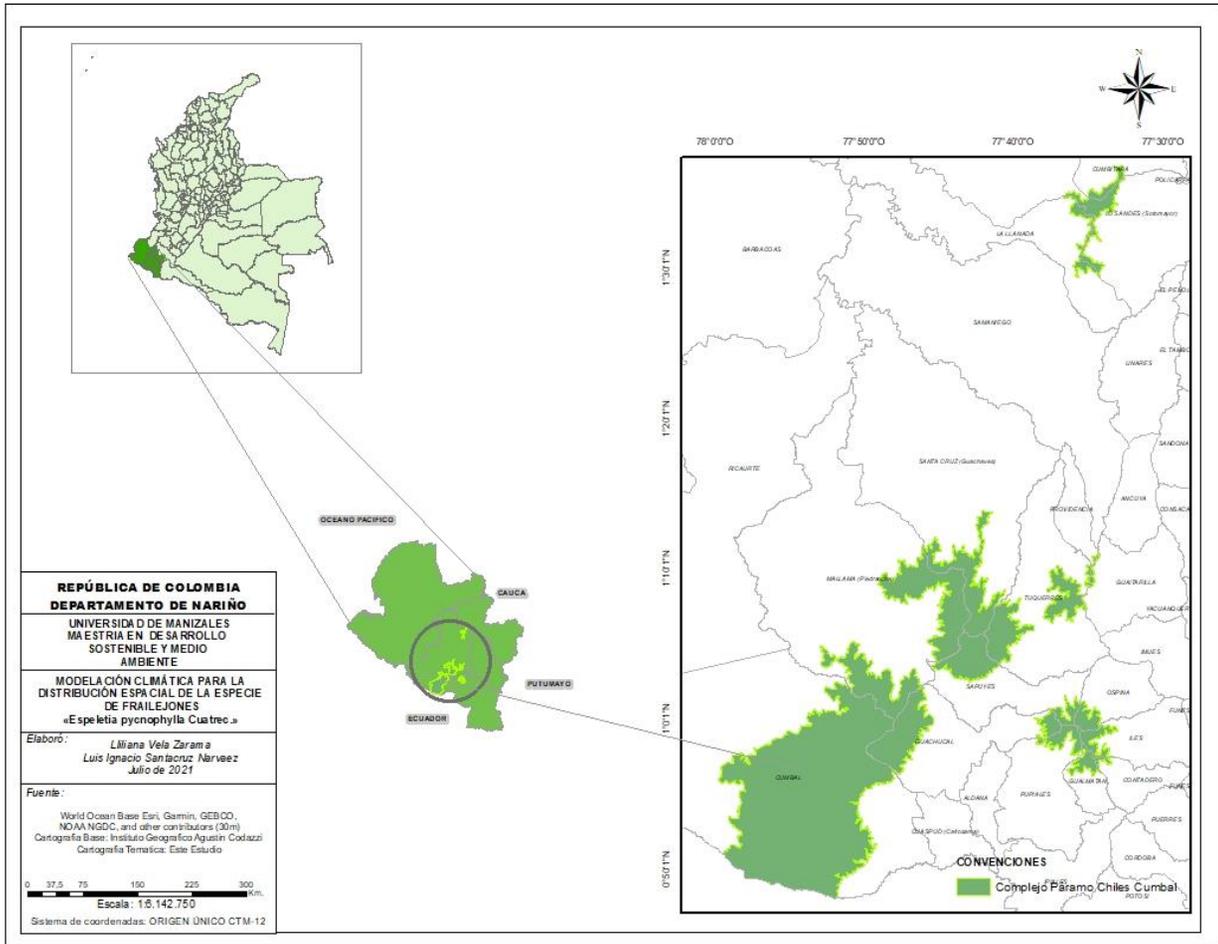
**Tabla 3.** Superficie Complejo de Páramos Chiles Cumbal.

<b>Páramo</b>	<b>Municipio</b>	<b>Área Municipio (ha)</b>	<b>Área del Complejo Dentro Municipio (ha)</b>	<b>% del Complejo por Municipio</b>	<b>% del Municipio en el Complejo</b>
<b>Chiles Cumbal</b>	Cumbal	91.132,45	33.929,98	52,70	37,23
	Guachucal	15.599,28	3.649,96	5,67	23,40
	Mallama (Piedrancha)	56.659,06	3.763,71	5,85	6,64
	Santa Cruz (Guachavés)	53.696,79	3.765,48	5,85	7,01
<b>Azufra</b>	Sapuyes	11.465,46	2.571,35	3,99	22,43
	Túquerres	21.633,30	2.332,28	3,62	10,78
	Los Andes (Sotomayor)	95.411,65	1.402,29	2,18	1,47
<b>Cerro Negro/Sotomayor</b>	La Llanada	24.409,11	697,86	1,08	2,86
	Cumbitara	35.453,13	431,19	0,67	1,22
	<b>Paja Blanca</b>	Pupiales	12.918,26	869,05	1,35
<b>Paja Blanca</b>	Iles	8.017,42	809,45	1,26	10,10
	Ospina	6.460,07	749,45	1,16	11,60
	Contadero	4.307,27	119,96	0,19	2,78
	Gualmatán	2.993,95	595,88	0,93	19,90
	Guachucal	15.599,28	570,85	0,89	3,66
	Sapuyes	11.465,46	548,72	0,85	4,79
<b>Quitasol Norte</b>	Guaitarilla	11650,43	134,23	0,21	1,15

	Túquerres	21.633,30	97,54	0,15	0,45
	Providencia	3.998,75	24,56	0,04	0,61
<b>Quitasol Sur</b>	Túquerres	21.633,30	1.699,84	2,64	7,86
	Guaitarilla	11.650,43	26,19	0,04	0,22

Fuente: Los Autores, 2021

**Figura 2.** Localización Complejo de Páramos Chiles Cumbal



Fuente: Los Autores, 2021

### 7.3 Registros de Presencia

Se realizó la revisión de información secundaria a partir de la consulta de la base de datos del Sistema de Información sobre Biodiversidad de Colombia - SIB, para identificar los registros de presencia de *E. pycnophylla* Cuatrec., para Colombia (Anexo 1). Posteriormente, se filtró la

información utilizando la localización del Complejo de Páramos Chiles Cumbal en el departamento de Nariño, identificando un total de 174 registros. Es importante mencionar que no todos los registros fueron aptos para ser usados, ya que algunos de estos no contaban con coordenadas geográficas o algunos se encontraban repetidos o tenían inconsistencias en la escritura del nombre científico, para lo cual se realizó una depuración manual. Igualmente, se revisaron que estos puntos se encuentren distribuidos de manera uniforme a lo largo del área del Complejo de Páramos, obteniendo como resultado un total de 7 registros de presencia.

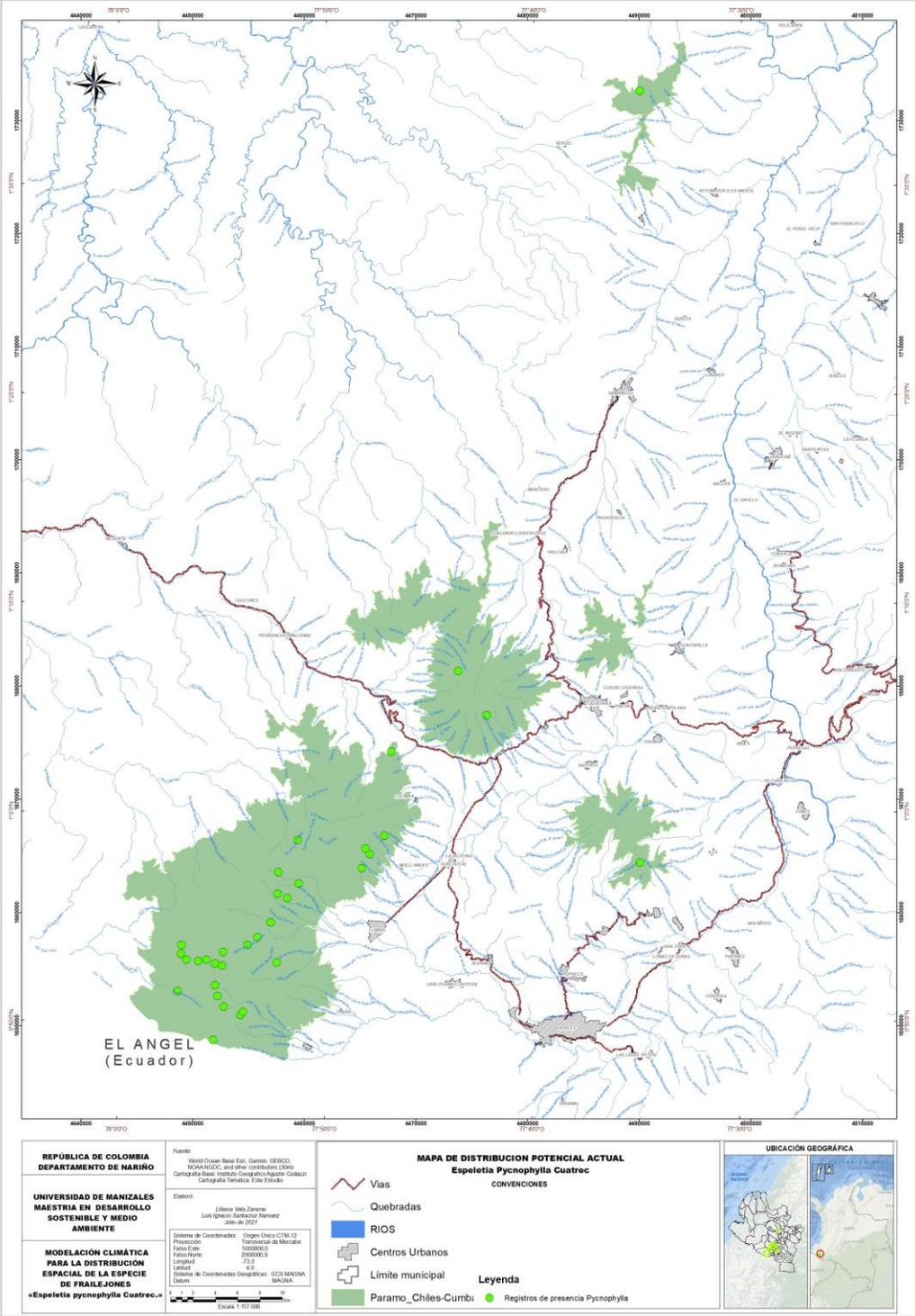
Teniendo en cuenta el número de registros obtenidos a partir de la base de datos del SIB, se realizaron recorridos de campo con el fin de complementar la información de presencias, para lo cual se llevaron a cabo salidas de campo en los municipios de Sapuyes y Cumbal. Mediante el empleo de GPS se obtuvieron un total de 26 registros, los cuales se ubicaron en terreno de manera uniforme. Como resultado final se obtuvieron 33 registros de los cuales 7 corresponden a los puntos de presencia obtenidos del SIB y 26 a los puntos georreferenciados en campo (Figura 3 y 4).

**Figura 3.** *Toma de coordenadas geográficas en campo*



Fuente: Los Autores, 2021.

Figura 4. Localización de los registros de presencia de *E. pycnophylla* Cuatrec.



Fuente: Los Autores, 2021

## **7.4 Obtención de Variables Bioclimáticas**

Los datos bioclimáticos globales del presente se descargaron en formato ráster a una resolución de 30 arc segundo de la página de Worldclim ([http://www.worldclim.org/cmip5\\_30s](http://www.worldclim.org/cmip5_30s)) las cuales se encuentran disponibles libremente. Las capas bioclimáticas del presente estudio fueron propuestas por Hijmans, Cameron, Parra, Jones, & Jarvis, (2005), a partir de la interpolación de datos promedio mensuales de estaciones meteorológicas en una resolución de 30 arc segundos (1 km<sup>2</sup>), dentro de un intervalo temporal desde el año 1950 hasta el 2000.

Las 19 variables bioclimáticas (Tabla 2) derivan de la precipitación total mensual y la temperatura promedio mensual, mínima y máxima. Estas variables representan promedios anuales (por ejemplo: la temperatura media anual, precipitación anual), estacionalidad (por ejemplo: el rango anual de temperatura y precipitación) y factores ambientales extremos o limitantes (por ejemplo: la temperatura del mes más frío, el más cálido, y la precipitación del trimestre más seco y más lluvioso).

## **7.5 Selección de Variables Bioclimáticas**

La correlación entre variables bioclimáticas puede afectar el desarrollo adecuado de los modelos de nicho ecológico, obstaculizar su caracterización y producir modelos sobre ajustados (Peterson et al., 2011). Una de las metodologías propuestas para disminuir la correlación y los problemas que esta conlleva es identificar las variables menos correlacionadas y usarlas en la generación de los modelos (Baselga & Araújo, 2009).

Por lo tanto, para analizar la correlación entre las variables bioclimáticas, como primer paso se realizó una extracción de los valores climáticos para cada pixel donde se registra la presencia de la especie. Este ejercicio se llevó a cabo con cada una de las 19 variables bioclimáticas propuestas por Hijmans et al. (2005).

Con dichos datos se construyó una matriz en la cual se aplicó un análisis estadístico de coeficiente de correlación, la cual permitió elegir las variables menos correlacionadas (Anexo 2), cuyos valores fueron menores a 0,7 (Anexo 1); mientras que las variables que tuvieran valores de correlación superiores a 0,7 fueron descartadas. Como resultado de este análisis, se determinaron

las siguientes variables bioclimáticas: la temperatura media anual (Bio 1), rango diurno medio (Bio 2), isothermalidad (Bio 3), temperatura estacional (Bio 4), precipitación anual (Bio 12), precipitación del mes más seco (Bio 14), precipitación estacional (Bio 15) y la elevación.

Estos resultados permitieron reducir el sobreajuste del modelo, pues la selección a priori de las covariables disminuyó la autocorrelación y se seleccionaron las covariables más significativas para la especie. (Cruz-Cárdenas et al., 2014, p. 189).

## **7.6 Distribución Potencial Actual de *E. pycnophylla* Cuatrec.**

La distribución actual de *E. pycnophylla* Cuatrec., se realizó empleando el software MaxEnt (Maximum Entropy Modelling of Species Geographic Distributions) el cual aplica el principio de máxima entropía para calcular la distribución de especies más probable y uniforme posible para un taxón. El resultado arrojado es un valor de idoneidad de hábitat en función de las características ambientales de los puntos de presencia que se introduzcan en el modelo (Phillips et al., 2006, p. 232).

Para realizar este modelo se emplearon como datos de entrada los registros de presencia de la especie (33 registros de presencia) y las variables ambientales (BIO 1, BIO 2, BIO 3, BIO 4, BIO 12, BIO 14, BIO 15 y elevación). Se obtuvieron 10 réplicas con 1000 puntos de background, tipo de réplica bootstrap y salida logística y cálculo de graficas de Jackknife para medir la importancia de las variables.

## **7.7 Distribución de *E. pycnophylla* Cuatrec Bajo Escenarios de Cambio Climático**

Para modelar la distribución de *E. pycnophylla* Cuatrec. bajo escenarios de Cambio Climático para los años 2050 y 2080, se descargó el Modelo de Circulación Global (MCG) de la página Climate Change, Agriculture and Food Security Downscales Data Portal (Navarro-Racines et al., 2020), bajo los escenarios RCP 4.5 y 8.5, el cual presenta un método de reducción de escala simple (llamado método delta), basado en la suma de anomalías interpoladas a superficies climáticas mensuales de alta resolución de WorldClim (Hijmans et al., 2005). El método produce una superficie suavizada (interpolada) de cambios en los climas (deltas o

anomalías) y luego aplica esta superficie interpolada al clima de la línea base (de WorldClim), teniendo en cuenta el posible sesgo debido a la diferencia en las líneas base. El método asume que los cambios climáticos solo son relevantes a escalas gruesas y que las relaciones entre las variables se mantienen hacia el futuro. Si bien estas suposiciones pueden ser ciertas en varios casos, podrían ser incorrectas en paisajes muy heterogéneos donde las condiciones topográficas causan variaciones considerables en distancias relativamente pequeñas.

De acuerdo a lo anterior y como lo establece la tercera comunicación de cambio climático (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, 2015) uno de los modelos climáticos que mejor representan el territorio colombiano y sus características orográficas es el Moric5 (Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology. Japón), en especial en la latitud 0° a 1° donde se encuentra la zona del presente estudio.

Al igual que en la modelación potencial actual se utilizaron las mismas variables bioclimáticas (BIO 1, BIO 2, BIO 3, BIO 4, BIO 12, BIO 14, BIO15) y la elevación, esto con el fin de evaluar la distribución de la especie a futuro, bajo los mismos criterios. Se obtuvieron 10 réplicas con 1000 puntos de background, tipo de réplica bootstrap y salida logística y cálculo de graficas de Jackknife para medir la importancia de las variables.

Se obtuvo la modelación de la especie en los escenarios 4.5 para los años 2050 y 2080. y 8.5 para los años 2050 y 2080. Para un total de 4 mapas de distribución, es importante resaltar que el análisis de las anomalías (cambios en la distribución) se obtuvo tras realizar operaciones matemáticas en la calculadora raster de Arcgis.

Para ello se tomó como base de comparación el mapa de distribución actual el cual fue comparado con cada uno de los resultados de la modelación futura. Como resultado se obtuvo las áreas en km<sup>2</sup> donde hay mayor probabilidad de presencia y donde hay menor.

## **7.8 Medidas de Conservación de *E. pycnophylla* Cuatrec. a Nivel Comunitario y Gubernamental**

Para determinar las medidas para la conservación de *E. pycnophylla* Cuatrec, se tuvo en cuenta como base los resultados obtenidos de la modelación de la distribución potencial actual de la especie y bajo escenarios de cambio climático RCP 4.5 y 8.5, los cuales se complementaron

con entrevistas realizadas a actores estratégicos del Complejo de Páramos Chiles Cumbal, entre los que se incluyen Gobernadores Indígenas, líderes comunitarios, integrantes de grupos vigías de las áreas declaradas y representantes de los entes territoriales (Anexo 2).

Teniendo en cuenta la emergencia sanitaria por Covid-19, las entrevistas se llevaron a cabo en el mes de septiembre de 2020 vía telefónica, puesto que algunas comunidades no autorizaron el ingreso a los territorios, con el fin de evitar contagios.

Para elaboración de la entrevista se formularon preguntas concretas y claras, de fácil entendimiento a partir de las cuales se obtuvo la información necesaria sobre la especie (Anexo 2):

- ¿Qué Actividades Productivas cree usted que afectan al Frailejón?
- ¿Qué beneficios ambientales, culturales y medicinales conoce usted sobre el Frailejón?
- ¿Usted conoce sobre algún tipo de acciones que se hayan realizado para conservar el frailejón y que se hayan adelantado en su municipio o sector?
- ¿Quiénes las han realizado?
- ¿Qué acciones considera usted sean prioritarias para la conservación del frailejón?

Esta información se complementó con la metodología de estándares abiertos para la práctica de la conservación, establecida por Alianza para las medidas de la Conservación versión 3.0 (CMP, 2017), a partir de la cual se elaboró un modelo conceptual, que es una herramienta que representa visualmente las relaciones entre los diferentes factores del análisis situacional.

En este sentido, se tomó como objeto de conservación a *E. pycnophylla* Cuatrec., a partir del cual se identificaron las amenazas directas que influyen sobre esta. En este punto, se identificaron amenazas antrópicas y naturales; las primeras se identificaron con base en la información obtenida y sistematizada de las entrevistas a los actores sociales, y las segundas con base en los resultados obtenidos a partir de la modelación potencial actual y los escenarios de cambio climático.

Posteriormente, se identificaron los factores que impulsan las amenazas directas, es decir las amenazas indirectas conocidas también como factores contribuyentes o clave, así como las oportunidades y estrategias para mitigar las afectaciones sobre la especie y se encuentren acordes con los intereses primarios de los actores.

Una vez elaborado el modelo conceptual, se definieron líneas estratégicas, acciones, resultados, indicadores y responsables los cuales fueron compilados en una matriz de Plan de Acción para la conservación de la especie.

## 8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos una vez aplicada la metodología descrita, a partir de la cual se obtuvieron los resultados de la modelación del escenario actual de distribución potencial, así como aquellos referentes a la distribución probable en diferentes escenarios de cambio climático, evaluando el comportamiento esperado bajo distintas proyecciones de cambio climático.

En este sentido, inicialmente se describirá la distribución potencial actual desde las funciones de salida que proporciona MaxEnt, haciendo referencia a las pruebas estadísticas que aplica el software para validar el proceso y dar confianza sobre las estimaciones realizadas. Posteriormente se analizarán los resultados de los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, bajo los resultados de distribución potencial e idoneidad de hábitat para 2050 y 2080.

### 8.1 DISTRIBUCIÓN POTENCIAL ACTUAL DE *E. pycnophylla* Cuatrec.

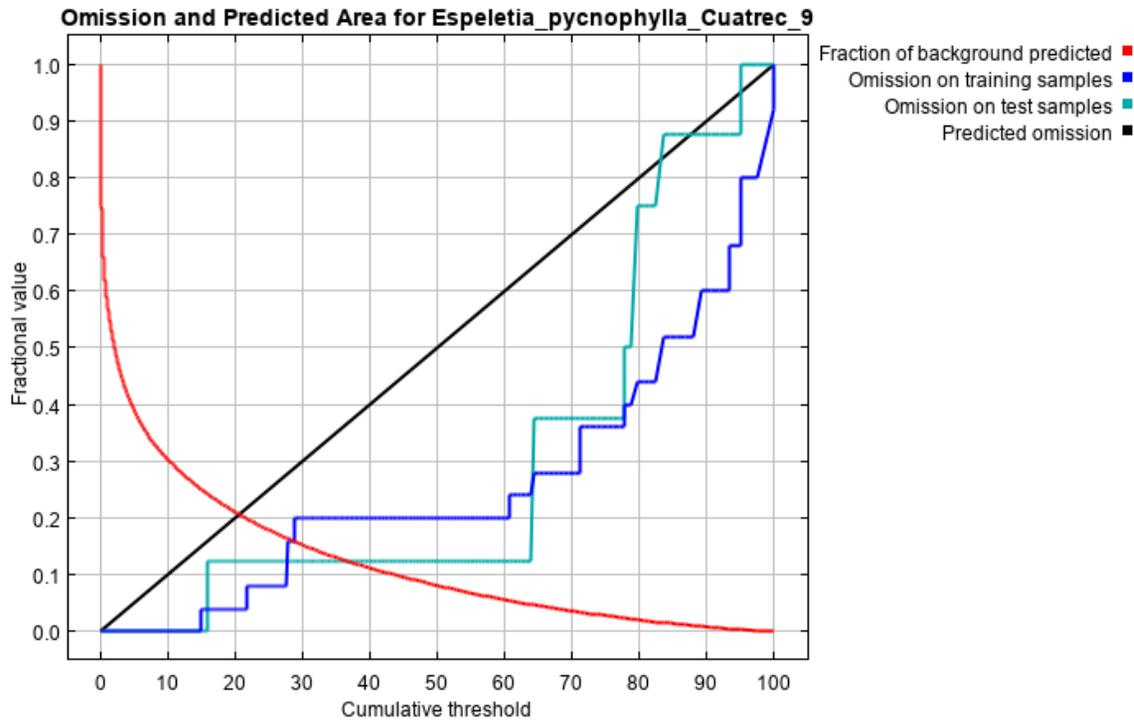
#### 8.1.1 Modelos de Distribución Potencial Actual de *E. pycnophylla* Cuatrec.

En primera instancia, para comprobar que las ocurrencias fueron las necesarias en el modelo de distribución potencial actual de *E. pycnophylla* Cuatrec., se determinó el rendimiento del modelo (Figura 5). Scheldeman & Van Zonneveld, (2011), establecen los siguientes criterios para esta evaluación (p. 152):

- a. Omission on training samples (línea azul): muestra las fracciones de los puntos de presencia ubicados por fuera del área potencial con base en el modelo de MaxEnt (Fraction value) por los valores del umbral de probabilidad (de bajo a alto) que limita el área predicha (Cumulative threshold). Training samples (muestras de entrenamiento) se usa como sinónimo de “puntos de presencia”.

- b. Fraction of background predicted (línea roja): muestra las fracciones de los puntos de fondo (aleatorios) del área de estudio incluidos en el área predicha, usando diferentes umbrales acumulativos (Cumulative thresholds).
- c. Predicted omission (línea negra): es una línea de referencia.

**Figura 5.** Tasa de Omisión de *E. pycnophylla* Cuatrec. que indica el rendimiento del modelo.



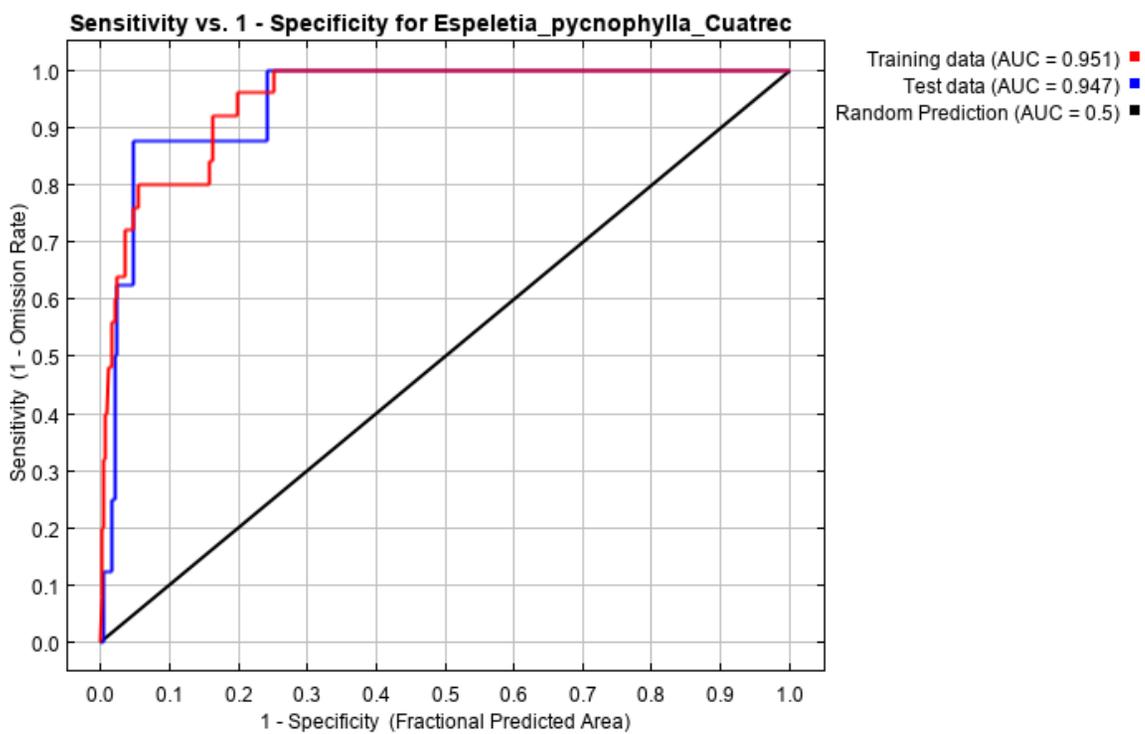
Fuente: Los Autores, 2021

La confiabilidad del análisis realizado por MaxEnt está dado por el comportamiento de los datos seleccionados en el “porcentaje aleatorio de prueba”, que corresponde al 25% de los datos de entrada. Para este caso MaxEnt proporcionó un valor de las variables de entrenamiento y de prueba (colores azul y aguamarina respectivamente (Figura 5)), asumiendo valores por debajo del umbral de aceptación con una desviación estándar de 0.026, por lo que los resultados se ubican por debajo de la línea negra.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el modelo de distribución potencial de *E. pycnophylla* Cuatrec., presentó resultados satisfactorios con valores de AUC respecto a la

capacidad de distinguir la presencia de la especie a partir de los puntos aleatorios, indicando que las predicciones realizadas son estadísticamente confiables al acercarse a 1. El valor de 0.951 corresponde a los datos de entrenamiento y el valor de 0.947 corresponde a los datos de validación, explicando una distribución adecuada a partir de las variables climáticas priorizadas, por lo tanto, el modelo es altamente confiable (Phillips, S., Anderson, R. & Sphapire, 2006) (Figura 6).

**Figura 6.** Sensibilidad frente a la especificidad para *E. pycnophylla* Cuatrec.



Fuente: Los autores, 2021

Los valores de AUC son similares a los obtenidos por Diaz, (2015), quien realizó un estudio de distribución potencial de *E. pycnophylla* Cuatrec., en los Andes del norte de Ecuador y Suroccidente de Colombia, y empleó el mismo número de registros de la especie cuyo valor arrojó un resultado de 0.990 (p. 29), por lo tanto los resultados obtenidos para el presente estudio son muy similares, determinando que son modelos de alta capacidad, y que el modelamiento para la especie para ambos casos presenta valores altos de AUC.

Del mismo modo, en el estudio sobre: “Posibles efectos del calentamiento global sobre el nicho climático de algunas especies en los Andes Tropicales” llevado a cabo por Cuesta-Camacho et al., (2008), trabajaron con 102 especies de plantas, distribuidas en 14 ecorregiones que incluyen 4 tipos de páramos, obtuvieron un modelo de MaxEnt con un buen desempeño, ya que el AUC de los puntos de validación muestra un alto grado de exactitud con un valor de 0.93 y una desviación estándar de 0,07 (p. 24).

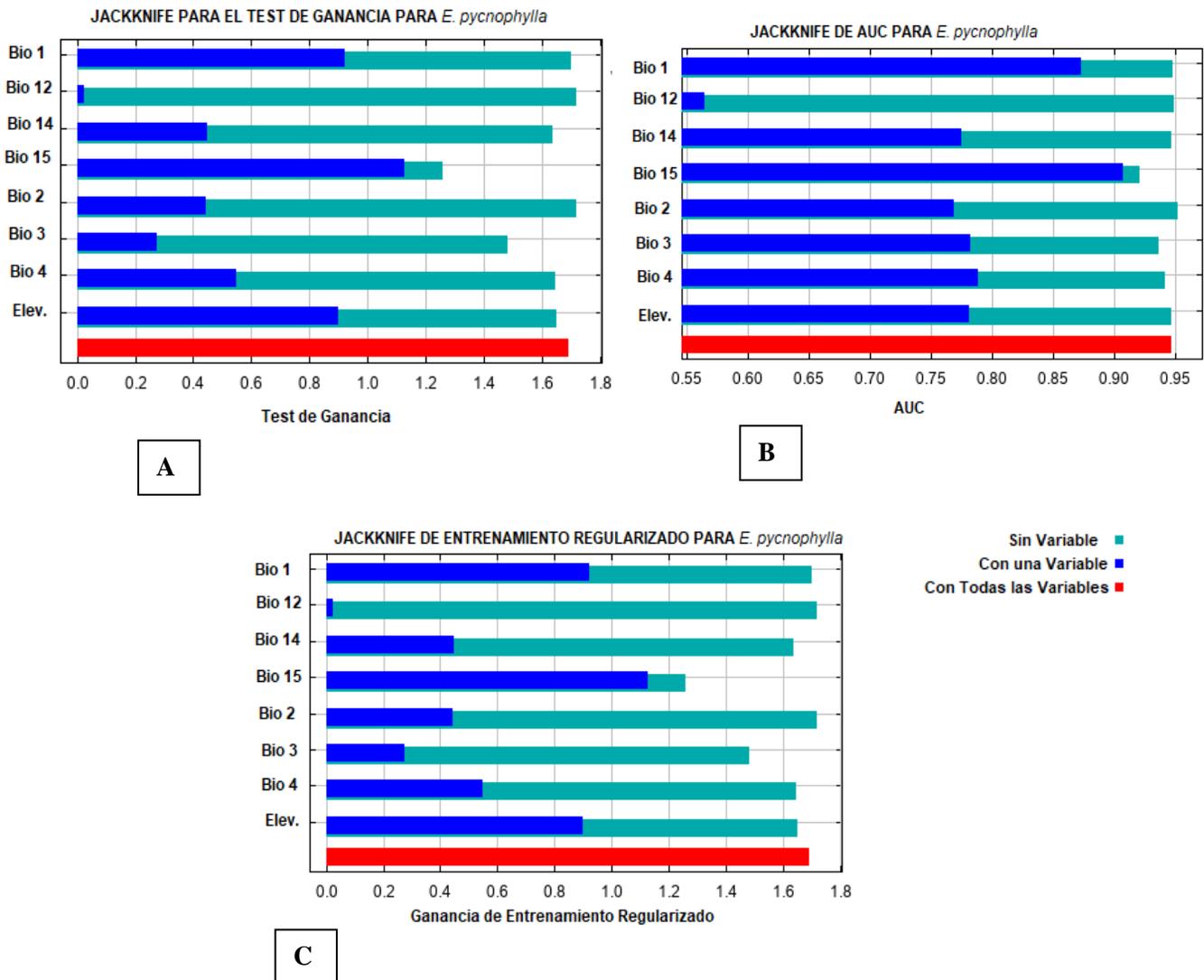
### ***8.1.2 Análisis de Contribución de Variables para el Escenario de Distribución Potencial Actual***

La prueba de Jackknife (Figura 7) permite conocer las variables bioclimáticas que condicionan más la distribución geográfica de *E. pycnophylla* Cuatrec. En la figura 7A, se muestra la prueba de Jackknife, con ganancia de prueba en lugar de la ganancia de entrenamiento. En la figura 7B, la misma prueba con los datos de AUC. En la figura 7C se muestran los resultados de la prueba, que presentan la importancia de las variables.

Para las tres gráficas (A, B y C) la variable bioclimática con mayor ganancia es la estacionalidad en la precipitación (BIO 15). Posteriormente, le siguen las variables de temperatura media anual (BIO 1) y la elevación, por lo tanto, estas variables tienen la información más útil. La variable ambiental que disminuye la ganancia para los tres ejercicios es precipitación anual (BIO12), que parece tener la mayoría de la información que no está presente en el resto de las variables.

Es importante mencionar que en el modelo se incluyen a parte de las variables bioclimáticas, variables topográficas (elevación), que son determinantes ambientales en la distribución de la especie a escala local (Pearson & Dawson, 2003, p. 368) y son incidentes al momento de obtener los resultados en la distribución potencial actual, si bien, la elevación determina en gran medida los parámetros bioclimáticos tales como la temperatura, precipitaciones y radiación solar (López-Sandoval et al., 2015).

**Figura 7.** A. Prueba de Jackknife con ganancia de prueba. B. Prueba de Jackknife con los datos de AUC. C. Prueba de Jackknife con la importancia de las variables.



Fuente: Los autores, 2021

Bio 1: Temperatura media anual, Bio 2: Rango de temperaturas diurnas, Bio 3: Isotermalidad, Bio 4: Estacionalidad en la temperatura, Bio 12: Precipitación anual, Bio 14: Precipitación del mes más seco, Bio 15: Estacionalidad en la precipitación, Elev.: Elevación.

El análisis de contribución de variables es realizado a partir de la prueba de Jackknife, que permite calcular la contribución relativa de cada variable al modelo. En términos prácticos, el porcentaje de contribución de las variables es un indicador de los requerimientos ecológicos de la especie (para este caso bioclimáticos), que inciden en la probabilidad de presencia o no de la misma.

En la Tabla 4 se presentan las variables bioclimáticas con mayor influencia en la distribución geográfica de *E. pycnophylla* Cuatrec. Principalmente se registran tres variables bioclimáticas que registran los porcentajes más altos, cuya suma equivale al 81,6%. La variable con mayor peso corresponde a la estacionalidad en la precipitación (BIO 15) con el 33,3%, le siguen la temperatura media anual (BIO 1) con el 30,1% y luego se encuentra la elevación con el 18,2%.

De acuerdo con los resultados obtenidos por Diaz (2015), las variables que más contribuyen al modelo MaxEnt para *E. pycnophylla* para el suroccidente de Colombia y norte de Ecuador, corresponden a la temperatura media anual (BIO 1) con el 40,6%, la elevación con el 24,2 %, la estacionalidad de temperatura (BIO 4) con el 11,3%, el rango de temperatura media diurna (BIO 2) con 9,3 %, isotermalidad (BIO 3), con 9,2 %, y la precipitación anual (BIO 12) con 5,2 %. Teniendo en cuenta lo anterior, las variables que coinciden en la distribución potencial actual de *E. pycnophylla* para el Complejo de Páramos La Cocha Patascoy corresponden a las variables bioclimáticas BIO 1 y la elevación, por lo tanto, son consideradas clave para determinar la distribución de la especie.

**Tabla 4.** Porcentaje de Contribución para cada variable modelo de Distribución Potencial Actual.

Variable	Porcentaje de Contribución
Estacionalidad en la precipitación - BIO15	33,3
Temperatura media anual - BIO 1	30,1
Elevación	18,2
Precipitación del mes más seco -BIO 14	7,7
Isotermalidad - BIO 3	4,6
Estacionalidad en la Temperatura - BIO 4	2,5
Rango de temperaturas diurnas - BIO 2	2,3
Precipitación anual - BIO 12	1,3

Fuente: Los autores, 2021

La distribución de *Espeletia*, se encuentra influenciada por las características de cada franja altitudinal, puesto que la topografía, la temperatura, los niveles de precipitación y las características del suelo son propias de cada una; la altitud y la posición geográfica cumplen un papel fundamental en la distribución, pues el sistema montañoso de la cordillera de Los Andes actúa como una barrera para la dispersión de la especie, que junto con el clima y las características del suelo varían de acuerdo con las vertientes de cada cordillera (Vargas, 2016, p. 51).

Cabe mencionar que, la influencia de la variable BIO 15 en la distribución de *E. pycnophylla* Cuatrec, en el Complejo de Páramos Chiles Cumbal, coincide con los regímenes de precipitación reportados para la cordillera occidental, cuyos valores oscilan entre los 2.500 a 3.000 mm/año (Pabón & Hurtado, 2002, citado por Arcila, 2013, p. 28), por lo cual incide en la distribución de la especie.

La variable relacionada con la estacionalidad de la precipitación arrojó resultados considerables en la contribución de distribución potencial actual. La variación temporal de la precipitación en el Complejo de Páramos Chiles Cumbal está ligada estrechamente con la oscilación y movimiento latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), razón por la cual se identifica un comportamiento bimodal con tendencia a la monomodalidad, es decir, se encuentran dos periodos lluviosos y dos secos, pero el periodo seco de inicio de año es significativamente menos intenso, puesto que generalmente se reduce solamente a un mes (febrero) y esto es a lo que explica el denominar a este régimen como bimodal con tendencia a la monomodalidad (Solarte, 2016, p. 34).

Según Solarte, (2016), a la hora de definir los periodos lluviosos se encuentra que entre los meses de marzo a mayo se acumula un 32% del total anual, mientras que de octubre a diciembre los registros equivalen al 35% de la lluvia caída durante todo el año. Estas dos épocas lluviosas se deben a que; entre marzo y mayo la ZCIT se está desplazando desde su ubicación más sur, posición que alcanza a principio de año durante el verano austral, y al pasar sobre el área genera un aumento de las precipitaciones. Por su parte, el segundo periodo lluvioso obedece al tránsito norte - sur de la ZCIT, sistema que una vez terminado el verano del hemisferio norte (entre junio y agosto), desciende latitudinalmente debido al desplazamiento de la zona de mayor radiación solar hacia el sur de la línea ecuatorial (p.35).

Por su parte, la época seca o menos lluviosa o seca se presenta desde junio a septiembre, registrando durante este lapso de tiempo apenas el 17.5% de la lluvia acumulada durante el año, esta disminución en los registros se debe a que durante estos meses la ZCIT alcanza la ubicación más septentrional, durante el verano boreal, con lo que los procesos generadores de precipitación quedan relegados a fenómenos del orden local como convección local, transporte de humedad desde las partes más bajas de los valles, entre otros (Solarte, 2016, p. 35).

En los Andes Tropicales los patrones de precipitación tienen su origen en sistemas climáticos de gran escala sobre el Océano Pacífico y la Amazonia, y en el caso de los Andes colombianos y venezolanos, adicionalmente por el Caribe (Llambí et al., 2012)

Cabe mencionar que los páramos ubicados en los flancos occidentales de los Andes del Norte como es el caso específico del Complejo de Páramos Chiles Cumbal, está influido por masas de aire originadas en el Pacífico, por lo cual se consideran como páramos húmedos a hiperhúmedos (Hofstede, 2014), característica que se ve influenciada por el régimen pluviométrico bimodal del Complejo.

A partir de los resultados obtenidos por Rodríguez, (2009) en su estudio sobre la influencia de la precipitación horizontal y otras variables abióticas en la distribución de la vegetación en un gradiente altitudinal del Parque Nacional Natural Chingaza, menciona que la precipitación determina la distribución de la vegetación; así mismo, relaciona que la especie *Espeletia grandiflora* se encuentra asociada a lugares con mayor precipitación (p.27), por lo tanto, estos resultados corroboran que la influencia de la estacionalidad de la precipitación influyen en la distribución de *E. pycnophylla* Cuatrec., en el Complejo de Páramos Chiles Cumbal.

Por otro lado, la variable de temperatura media anual – BIO 1 presenta un porcentaje considerable de contribución al modelo. Con base en esto, Solarte (2016), menciona que la temperatura en el Complejo de Páramos presenta un régimen monomodal con un periodo cálido y otro frío, distribuyéndose entre los meses de noviembre a mayo para el periodo más cálido, coincidiendo con un leve incremento de la temperatura en las zonas altitudinalmente más bajas del área, sin embargo, en las zonas más altas (por encima de los 4.700 m.s.n.m.), las temperaturas

disminuyen hasta los  $-0.4^{\circ}\text{C}$  en noviembre debido a la alta nubosidad presentada, pues durante octubre y noviembre se presenta la segunda temporada lluviosa del año (p. 41).

Asimismo, refiere que, entre los meses de junio a septiembre, se presenta el periodo más frío, siendo julio y agosto los meses en los cuales los registros térmicos son más bajos, coincidiendo a su vez con el descenso en los valores térmicos en las zonas de páramo los cuales alcanzan un promedio de  $0^{\circ}\text{C}$ . Este descenso en la temperatura durante los meses más secos del año está explicado por el desarrollo de heladas, las cuales tienen lugar durante las noches, frecuentemente prolongándose hasta las primeras horas de la mañana (p. 41).

Diaz, (2015), menciona que: “De acuerdo con Franklin (2011) existen dos tipos de factores que controlan la distribución de las especies: 1) factores directos los cuales inciden en la fisiología del organismo tales como la temperatura y el pH y 2) factores indirectos como la latitud, la longitud, la elevación, pendiente y exposición”. p. 41.

Teniendo en cuenta lo anterior, la distribución potencial actual de *E. pycnophylla* Cuatrec., se ve influida por las variables de precipitación, temperatura y elevación; pues se convierten en factores importantes para el establecimiento de la especie y por consiguiente pueden influir en su estado fenológico.

De acuerdo con lo reportado por Erazo, (2011), menciona que la temperatura y la precipitación influyen en la dispersión y reproducción de la especie. La época lluviosa y fría estimula la iniciación de la floración, la formación de las sinflorescencias y capítulos y la época seca y cálida influye en la finalización de la floración, mediante la dispersión de las semillas. p. 98

Mediante la salida logística se pudo determinar el escenario actual, identificando el modelo de distribución más probable, en el que se manifiesta una alta probabilidad de presencia de *E. pycnophylla* Cuatrec., en las zonas aledañas con respecto a los puntos de presencia reportados.

La distribución potencial para la especie bajo las 8 variables bioclimáticas se presenta en la figura 8, el cual se generó a partir de los resultados obtenidos por MaxEnt, clasificando en una escala de 0 a 1, donde 0 corresponde a ausencia de la especie y los valores cercanos a 1 presencia. La expresión de la idoneidad del hábitat puede ser binaria, otorgando valor 1 a áreas idóneas y 0 a áreas no idóneas, o continua, según un rango de valores que clasifican el territorio de menor a mayor grado de idoneidad (Phillips et al., 2006).

En la figura se puede observar las zonas donde Maxent estableció áreas para la distribución potencia actual de *E. pycnophylla* Cuatrec. Las áreas con un porcentaje por encima del 60%, se presentan de una tonalidad verde intenso, tomando como referencia la ubicación del Complejo desde el Sur hacia el Norte, cuya área cubre aproximadamente 97,28 Km<sup>2</sup>.

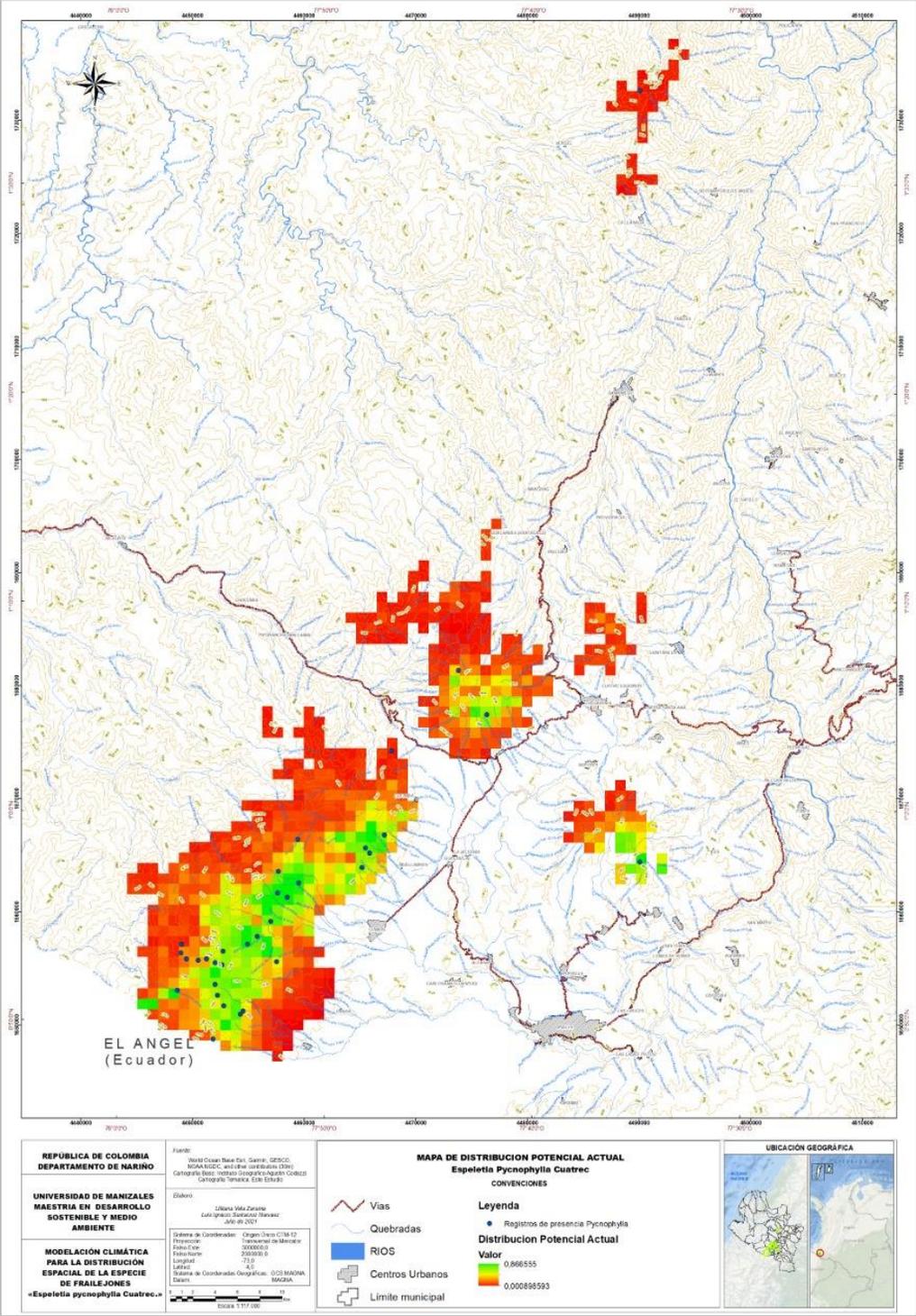
En el modelo elaborado a partir de las variables que resultaron estadísticamente significativas, las áreas de distribución actual coinciden con aquellas áreas con probabilidades entre 0.6 y 1, excepto los datos de ocurrencia del Páramo de Sotomayor hacia el norte del Complejo de Páramos.

Se puede encontrar que, para el corredor Chiles-Cumbal, la especie registra su distribución hacia el flanco norte del Volcán Chiles, en lo correspondiente a la cuenca alta del río San Juan, que incluyen los páramos de los Cerros Nazate, Canguil y Colorado. Para el Volcán Cumbal, se distribuye hacia los sectores oriental, nororiental y suroriental del cráter, coincidiendo con lo encontrado en campo. Esta distribución se registra en los límites altitudinales comprendidos entre los 3.700 a 4.000 msnm.

En el municipio de Mallama se evidencia la presencia de la especie hacia el sector denominado como El Infiernillo o Pueblo Viejo, entre los 3.600 y 3.700 msnm.

Para el páramo de Azufral la especie se tiende a localizarse hacia el sector sur de la Laguna Verde (cráter del Volcán Azufral) correspondiente al sector de El Espino y hacia el norte y noroccidente del cráter del Volcán, entre los 3.600 y 3.900 msnm.

**Figura 8.** Distribución Potencial Actual de *E. pycnophylla* Cuatrec. en el Complejo de Páramos Chiles Cumbal.



Fuente: Los Autores, 2021

El porcentaje por encima del 60% permite predecir que la presencia de individuos de *E. pycnophylla* Cuatrec. en ciertos sectores del Complejo se relacionan con las variables bioclimáticas que favorecen un ciclo de vida adecuado cuyas condiciones influyen positivamente en su crecimiento y desarrollo.

Asimismo se puede evidenciar estas zonas en la figura 8 y algunas de ellas no cuentan con registros actuales de *E. pycnophylla* Cuatrec., posiblemente porque en el pasado estas áreas contaban con la presencia de individuos de la especie y desaparecieron por alguna razón, por lo que sería importante realizar análisis palinológicos para probar esta hipótesis, tal como lo afirma Diaz (2015). p.42.

## 8.2 DISTRIBUCIÓN POTENCIAL FUTURA DE *Espeletia pycnophylla* Cuatrec. EN EL COMPLEJO DE PÁRAMOS CHILES CUMBAL BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

La distribución potencial futura para los años 2050 y 2080 de *E. pycnophylla* Cuatrec., se analizó desde la salida logística, evaluando los valores obtenidos de AUC en los escenarios RCP 4.5 y 8.5, los cuales arrojaron valores de confianza mayores a 0.8, demostrando modelos confiables donde las predicciones realizadas son estadísticamente confiables al acercarse a 1, con los cuales se realizó el análisis de distribución de la especie (Tabla 5).

**Tabla 5.** Valores de AUC de *E. pycnophylla* Cuatrec., bajo Escenarios de Cambio Climático

AUC	2050		2080	
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
<b>PRUEBA</b>	0.836	0.806	0.897	0.943
<b>ENTRENAMIENTO</b>	0.889	0.814	0.947	0.865

Fuente: Los Autores, 2021.

### 8.2.1 Análisis de Contribución de variables para los Escenarios de Estabilización 4.5

**8.2.1.1 Año 2050.** Para el año 2050, de acuerdo con los resultados obtenidos, la variable bioclimática que más contribuyó al modelo corresponde a la elevación con un porcentaje de 75,8% (Tabla 6). Luego se encuentra la variable bioclimática correspondiente a la estacionalidad en la precipitación (BIO 15) con el 12,4% y por último se encuentra la temperatura media anual (BIO 1) con un valor de 6,3%.

Estos resultados permiten definir que estas mismas variables registran una contribución importante al igual que en el escenario potencial actual, no obstante, se han logrado mantener en el tiempo y han influido en la distribución geográfica de la especie.

**Tabla 6.** Porcentaje de Contribución para cada variable en el escenario de estabilización RCP 4.5 para el año 2050

Variable	Porcentaje de Contribución
Elevación	75,8
Estacionalidad en la precipitación - BIO15	12,4
Temperatura media anual - BIO 1	6,3
Estacionalidad en la Temperatura - BIO 4	2,2
Isotermalidad - BIO 3	1,7
Precipitación del mes más seco -BIO 14	1,1
Precipitación anual - BIO 12	0,5
Rango de temperaturas diurnas - BIO 2	0

Fuente: Los Autores, 2021

**8.2.1.2 Año 2080.** Para el año 2080 se puede evidenciar que la variable bioclimática de temperatura media anual (BIO 1), presenta el valor más alto de contribución (46,3%), al igual que la elevación y la estacionalidad de la temperatura (BIO 4) (14,7% y 13,9% respectivamente) (Tabla 7).

Cabe mencionar que la temperatura media anual (BIO 1) y la elevación son variables constantes que definen la distribución de la especie tanto en el escenario de estabilización RCP 4.5 para ambos años como para el escenario potencial actual.

**Tabla 7.** *Porcentaje de Contribución para cada variable en el escenario de estabilización RCP 4.5 para el año 2080*

Variable	Porcentaje de Contribución
Temperatura media anual - BIO 1	46,3
Elevación	14,7
Estacionalidad en la Temperatura - BIO 4	13,9
Precipitación del mes más seco -BIO 14	12
Estacionalidad en la precipitación - BIO15	5,9
Rango de temperaturas diurnas - BIO 2	3,6
Precipitación anual - BIO 12	2
Isotermalidad - BIO 3	1,6

Fuente: Los Autores, 2021

### **8.2.2 Contribución de variables para el Escenario con un Nivel Muy Alto de Emisiones de Gases Efecto Invernadero (RCP 8.5)**

**8.2.2.1 Año 2050.** De acuerdo con los resultados obtenidos en la modelación para el año 2050, la variable temperatura media anual (BIO 1) aporta el 56,6% (Tabla 8) y sigue siendo una de las variables que más contribuye en la distribución de la especie tanto para el escenario RCP 4.5 para el año 2080 como para el escenario con un nivel muy alto de emisiones de gases efecto invernadero (GEI) RCP 8.5 para el año 2050.

La variable de elevación igualmente conserva su lugar teniendo una gran importancia sobre la distribución de la especie, no obstante, se evidencia una diferencia en el porcentaje de contribución, incrementando para el escenario 8.5 a 2050 a un 21,7% (Tabla 8).

De acuerdo con estos resultados, se puede referir que la tendencia de la temperatura media anual (BIO 1) y la elevación presentan valores altos para ambos escenarios pues el porcentaje de importancia en cada una de estos es significativo e influyen considerablemente en la distribución de *E. pycnophylla* Cuatrec.

Por otra parte, la variable bioclimática de isotermalidad (BIO 3) aporta en la distribución de la especie y su aporte está relacionado con los resultados obtenidos en la variable BIO 1 en lo correspondiente a la influencia de la temperatura en la distribución de la especie.

**Tabla 8.** *Porcentaje de Contribución para cada variable en el escenario de estabilización RCP 8.5 para el año 2050*

Variable	Porcentaje de Contribución
Temperatura media anual - BIO 1	56,6
Elevación	21,7
Isotermalidad - BIO 3	9,6
Precipitación del mes más seco -BIO 14	3,9
Precipitación anual - BIO 12	3,6
Estacionalidad en la Temperatura - BIO 4	2,9
Estacionalidad en la precipitación - BIO15	1,7
Rango de temperaturas diurnas - BIO 2	0

Fuente: Los Autores, 2021

**8.2.2.2 Año 2080.** Para el año 2080 las variables bioclimáticas continúan la misma tendencia con respecto a los escenarios RCP 4.5 para el año 2080 y el RCP 8.5 2050. Para este caso, la variable bioclimática de temperatura media anual (BIO 1) continua con un porcentaje de contribución considerable (36,8%), sin embargo, presenta un leve descenso con respecto a los otros dos escenarios donde su contribución es igualmente significativa (Tabla 9).

Igualmente, la elevación es otra de las variables que continúa aportando a la distribución de la especie (26,8%) y para este escenario incrementó con respecto a los otros dos escenarios en los que se reporta igualmente un aporte considerable. Sin embargo, para este escenario se reporta una nueva variable bioclimática que contribuye correspondiente a la estacionalidad en la temperatura con un 13% (Tabla 9).

**Tabla 9.** Porcentaje de Contribución para cada variable en el escenario de estabilización RCP 8.5 para el año 2080

Variable	Porcentaje de Contribución
Temperatura media anual - BIO 1	36,8
Elevación	26,8
Estacionalidad en la Temperatura - BIO 4	13
Precipitación anual - BIO 12	9,3
Estacionalidad en la precipitación - BIO15	7,1
Precipitación del mes más seco -BIO 14	5
Rango de temperaturas diurnas - BIO 2	2
Isotermalidad - BIO 3	0

Fuente: Los Autores, 2021

De acuerdo con los resultados obtenidos a partir de la contribución de variables bioclimáticas y topográficas en la distribución de *E. pycnophylla* Cuatrec., se evidencia que la temperatura media anual (BIO 1) y la elevación continúan siendo las más influyentes en la distribución de la especie para los dos escenarios de cambio climático RCP 4.5 y 8.5 en los años 2050 y 2080.

Con base en los nuevos escenarios de cambio climático para Colombia, se llevó a cabo la evaluación de la temperatura media para cada departamento en los periodos comprendidos entre los años 2041-2070 y 2071-2100, bajo los mismos escenarios de forzamiento radiativo (RCP 4.5 y 8.5), cuyos resultados reflejaron que para el departamento de Nariño la temperatura media anual para el periodo comprendido entre 2041-2070 incrementará en 1,38°C para el escenario radiativo RCP 4.5 y en 2,01°C para

el escenario RCP 8.5. De igual manera, para el periodo comprendido entre 2071-2100, el incremento de la temperatura para el escenario RCP 4.5 será en 1,97°C y para el escenario RCP 8.5, la temperatura se incrementa en 3,36°C (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, 2015).

Estos resultados se corroboran con lo mencionado en la tercera comunicación Nacional para el IPCC (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, 2017, p. 27) donde los posibles valores promedio, máximo y mínimo del cambio de la temperatura media en Colombia para los periodos 2041- 2070 y 2071-2100, mostrarían los aumentos más significativos en la región Andina, especialmente para el 2040 donde las zonas de alta montaña, específicamente para los páramos mostrarán cambios más rápidos en la temperatura que podrían incidir en el establecimiento de *E. pycnophylla* Cuatrec..

Esta tendencia está relacionada con las proyecciones de temperatura y precipitación que se presentan en los páramos, donde la vegetación está sometida a condiciones climáticas cambiantes en una escala temporal muy corta, respecto a los cambios climáticos del holoceno, los cuales originaron una oscilación de los límites elevacionales de las franjas de vegetación. De acuerdo con la proyección realizada por el IPCC y el IDEAM en Colombia, los escenarios evaluados arrojan que los páramos involucrarán respuestas adaptativas de las especies in situ, y una reducida migración de elementos de franjas superiores, debido a los tiempos tan cortos de cambio y a la presencia de ecosistemas antrópicos que se establecen como barreras a una posible migración (Rojas et al., 2018, p.163).

Los resultados arrojados en la distribución de la especie para los escenarios evaluados, evidencia que tiende a mantenerse dentro de los rangos altitudinales de distribución donde normalmente se ubica, sin observar que esta se traslade a franjas altitudinales más elevadas.

### 8.2.3 Descripción de Escenarios de Cambio Climático

**8.2.3.1 Escenario de Estabilización 4.5.** Se realizó una descripción tomando como referencia la distribución de *E. pycnophylla* Cuatrec. de acuerdo con la distribución potencial actual y la distribución obtenida para el escenario RCP 4.5 en los años 2050 y 2080 (Figura 9).

De acuerdo con la ubicación del Complejo de Páramos Chiles Cumbal para el escenario potencial actual las áreas que cuentan con una alta probabilidad de presencia superior al 60%, equivalen a 97,28 Km<sup>2</sup>. De Sur a Norte, se definen estas áreas para el páramo de Chiles, igualmente hacia los Cerros Canguil, Nazate, Colorado, Crespo y el páramo de Cumbal. En Azufral las probabilidades altas de presencia se observan hacia el lado noroccidental. Para el páramo de Quitasol, Paja Blanca y Sotomayor se evidencia unas probabilidades medias a bajas de presencia (Figura 9A).

En cuanto al escenario RCP 4.5, donde se presenta un aumento de la temperatura, se esperaría que los frailejones disminuyan o se desplacen hacia arriba. La disminución de áreas se presentaría debido a que las probabilidades de adaptación de la vegetación de páramo son mucho menores, y no necesariamente hay que esperar que la temperatura aumente para que el ecosistema paramuno se desplace hacia arriba en el transcurso de 20, a 50 años, si bien, este fenómeno demoraría siglos o se podría esperar que las áreas de presencia se reduzcan significativamente.

Para el año 2050 tal y como se observa en la figura 9B, las áreas reflejan una tendencia hacia la disminución, pasando de 97,28 Km<sup>2</sup> de la distribución potencial actual, a una extensión de 49.93 Km<sup>2</sup>, cuyas áreas presentan una probabilidad superior al 60% correspondientes a los colores verde intenso.

Estas áreas se ubican hacia el occidente del Complejo de Páramos dentro de las cuales se identifican al páramo de Chiles hacia Cerro Negro, así mismo el páramo de Cumbal y lo que corresponde al sector de El Infiernillo o Pueblo Viejo hacia el occidente.

Este desplazamiento que se presenta en el Complejo de Páramos, no de manera altitudinal, si no hacia otra vertiente se debe a que el modelo relaciona a parte de la variable climática de temperatura media anual- BIO 1, la estacionalidad de la precipitación – BIO 15 como las variables que más contribuyen en la distribución de *E. pycnophylla* Cuatrec., así mismo puede estar influenciada por la humedad, teniendo en cuenta la influencia del clima proveniente del pie de monte costero.

En lo que corresponde al Volcán Azufra, las áreas identificadas para la distribución potencial actual que presentan altas probabilidades de presencia (color verde), pasan a no tener presencia (color rojo) y las áreas de presencia para este páramo se reflejan hacia el occidente en lo que corresponde al Cerro Gualcalá.

El resto de las áreas donde se presentan actualmente una baja probabilidad (color rojo), pasan a una tonalidad intermedia (naranjas y amarillas), con muy bajas probabilidades de presencia menor al 20%.

Para el año 2080, no se observan mayores cambios al identificar áreas con altas probabilidades de distribución (color verde), teniendo en cuenta que la diferencia de periodos es corta, situación que se sustenta en la estabilización de la curva de concentración de CO<sub>2</sub> para el escenario RCP 4.5, ya que la pendiente de la curva entre los años 2050 y 2080 tiende a disminuir levemente, lo cual se encuentra en función de la temperatura que igualmente decrece levemente (Figura 9C y Figura 11).

Las áreas que cuentan con probabilidades de presencia mayor al 60% se ubican hacia los mismos páramos identificados para el año 2050 y se observan pocas diferencias en cuanto a la disminución de áreas. Estas áreas cubren 46.48 Km<sup>2</sup> y su diferencia es mínima con 3.45 Km<sup>2</sup> con respecto al año 2050.

**8.2.3.2 Escenario con un Nivel Muy Alto de Emisiones de Gases Efecto Invernadero (RCP 8.5).** Al comparar el escenario de distribución potencial actual, con respecto al escenario RCP 8.5 en los años 2050 y 2080, hay una reducción sustancial de áreas, pasando para el año 2050 de 32.71 Km<sup>2</sup> a 17.21 Km<sup>2</sup> para el año 2080 con áreas de presencia de la especie, cuya diferencia corresponde a 15,5 Km<sup>2</sup> (Figura 10).

Para el año 2050 las áreas con probabilidades superiores al 60% son muy dispersas, observando pequeñas áreas hacia el occidente y algunas se mantienen hacia el oriente, pero sin concentración en núcleos como se evidenció en el escenario RCP 4.5 para los años 2050 y 2080. Para el páramo de Azufral la especie tiende a desaparecer y se mueve hacia el Cerro Gualcalá (Figura 10B).

Para el año 2080 se acentúa la baja probabilidad de presencia de la especie y las áreas que presentan estos valores bajos están relacionadas con las zonas más altas de los páramos de Chiles, Cumbal y Azufral, teniendo en cuenta que, sumado al aumento de temperatura, las variables bioclimáticas no favorecen el establecimiento de la especie (Figura 10C).

Estos resultados, en función de la temperatura están relacionados con la pendiente de la curva de concentración de CO<sub>2</sub> para el escenario RCP 8.5, ya que esta se encuentra en ascenso y las variaciones de las otras variables bioclimáticas son mayores, causando una reducción significativa de áreas con probabilidades altas de presencia de la especie.

La temperatura como una de las variables que más contribuye en la distribución de *E. pycnophylla* Cuatrec. en los dos escenarios de cambio climático para los años 2050 y 2080, está relacionada con el incremento de la concentración de gases efecto invernadero (GEI), específicamente con el aumento de concentraciones de CO<sub>2</sub>, lo que puede incidir en el crecimiento de las plantas, así como en la competencia por espacio (Van der Hammen et al., 2018, p.180). Esta situación se ve reflejada en los resultados obtenidos, entendiendo la evaluación de los escenarios de cambio climático para la presente investigación.

En este orden de ideas, para el escenario RCP 4.5 al presentarse una disminución de áreas con altas probabilidades de presencia de *E. pycnophylla* Cuatrec. y al contar con algunas áreas a manera de islas con presencia de la especie, está relacionado con lo mencionado por Navarro-Racines, C., Tarapues, J., Thornton, (2020), quienes refieren que este es un escenario de estabilización en el que el forzamiento radiativo total se estabiliza antes de 2100, mediante el empleo de una variedad de tecnologías y estrategias para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (Figura 11).

La misma situación se presenta con los resultados obtenidos en la evaluación de la distribución de la especie para el escenario RCP 8.5, en el cual, las altas probabilidades de presencia de *E. pycnophylla* Cuatrec. son escasas y estos resultados se encuentran en función de las concentraciones de gases efecto invernadero, especialmente de CO<sub>2</sub>, que para este escenario continuarían en aumento a lo largo del tiempo (Navarro-Racines, C., Tarapues, J., Thornton, 2020) (Figura 11) .

Cabe mencionar que, el Forzamiento Radiativo (FR) es un proceso que altera el equilibrio de energía del sistema Tierra – atmósfera, a raíz de un cambio en la concentración de dióxido de carbono o en la energía emitida por el Sol (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, 2015, p.11).

Los mapas que representa la distribución de *E. pycnophylla* Cuatrec. actualmente y bajo escenarios de cambio climático RCP 4.5 y 8.5 en los años 2050 y 2080, evidencian cambios en la distribución de la especie dentro del Complejo de Páramos, donde el número de áreas con alta probabilidad de presencia son escasas debido a la fragmentación del páramo a manera de islas, lo que puede influir en una mayor sensibilidad climática (Valencia et al., 2020, p.9), que sumado a factores como la actividad antrópica incide en la pérdida de la cobertura vegetal del páramo y por consiguiente en la pérdida de individuos de la especie, llevando a que esta busque mejores condiciones de adaptación.

Asimismo, se evidencia la disminución de áreas de nicho presencial comparando el escenario potencial actual con respecto a los escenarios de forzamiento radiativo para los

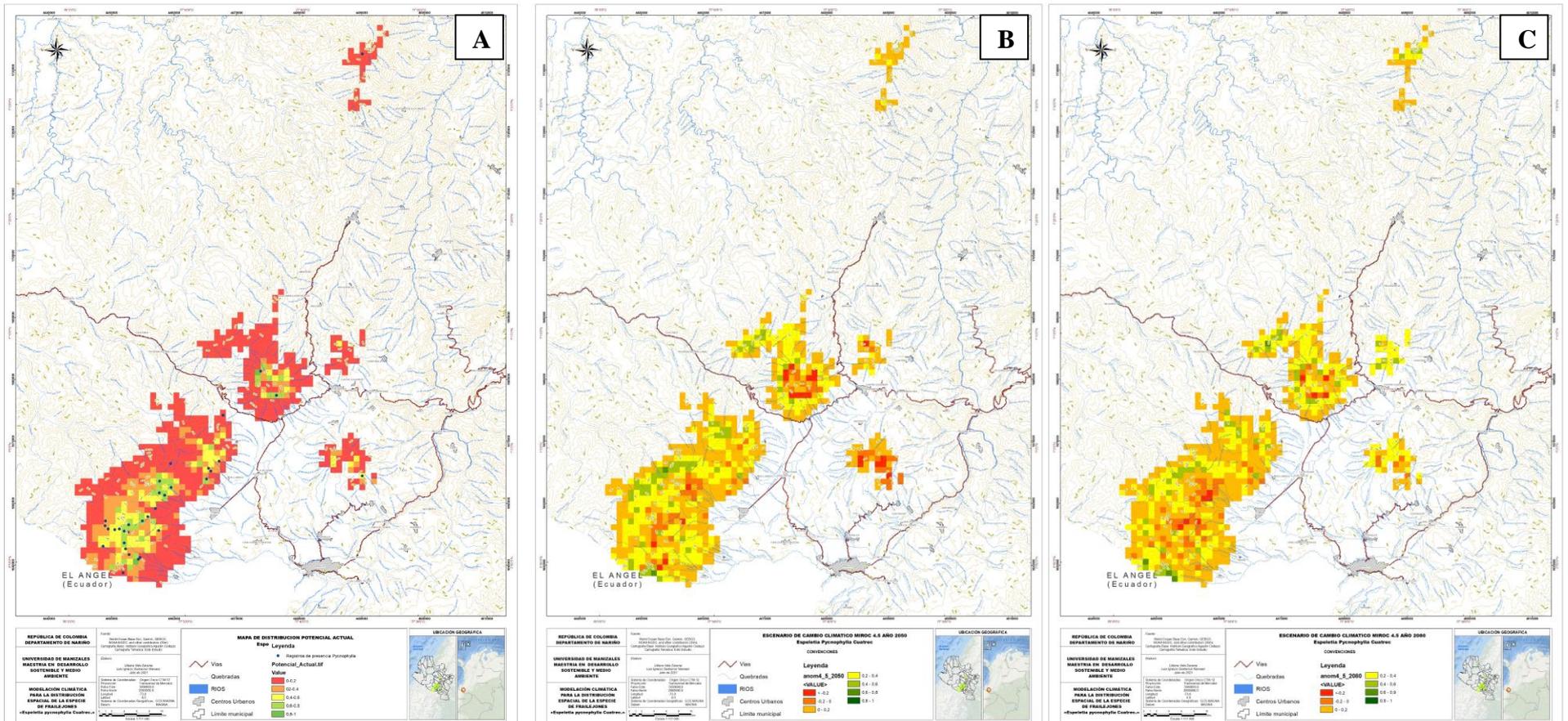
años 2050 y 2080, pues las proyecciones climáticas futuras sugieren que es probable que las temperaturas extremas serán más frecuentes, lo que conducirá a un clima muy diferente al actual que impondría desafíos a las especies (Diazgranados et al., 2021).

El cambio climático global, incidirá en el incremento de las temperaturas en los ecosistemas tropicales alpinos, lo cual está relacionado con la disminución en la nubosidad y precipitación, generando la contracción de los ecosistemas de bosque nublado y páramo (Helmer Id et al., 2019, p.27), igualmente el movimiento ascendente de zonas de vida causará la fragmentación, la reducción del nicho de las poblaciones vegetales y dificultará las labores de conservación (Burbano-Figueroa et al., 2020, p.5).

Según Anthelme et al. (2014), las regiones alpinas tropicales de los Andes son probablemente uno de los ecosistemas terrestres que enfrentarán el mayor calentamiento hasta 2100 (Bradley et al., 2006). En este contexto, las especies que se encuentran en áreas alpinas pueden ser especialmente propensas a la extinción bajo los efectos del cambio climático debido a:

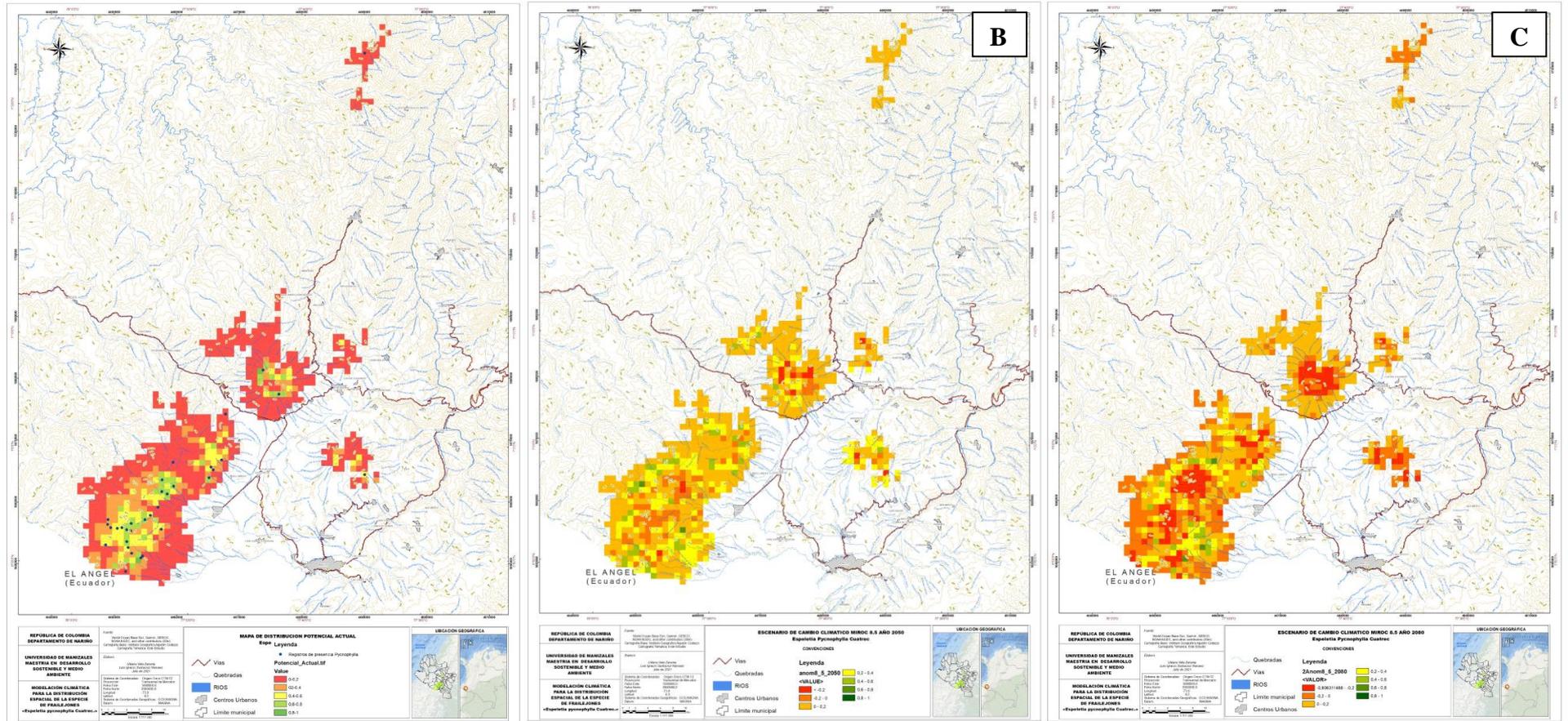
1. Habitan en ambientes con un área total colonizable relativamente baja y no tienen a dónde migrar hacia arriba (Gosling et al., 2009),
2. El rápido cambio de los límites superiores de las áreas alpinas a mayores elevaciones aumenta el aislamiento de poblaciones viables contiguas (Jørgensen et al., 2011; Larsen et al., 2011; Laurance et al., 2011; Velásquez - Tibatá et al., 2013). Debe tenerse en cuenta, sin embargo, que las especies en elevaciones más altas pueden reducir su riesgo de extinción al tener rangos de distribución vertical posiblemente más grandes (Herzog et al., 2013).

**Figura 9.** Distribución Potencial Actual Vs. Escenarios de Cambio Climático RCP 4.5 en los años 2050 y 2080 para *E. pycnophylla* Cuatrec. A. Distribución Potencial Actual. B. Escenario año 2050. C. Escenario año 2080.



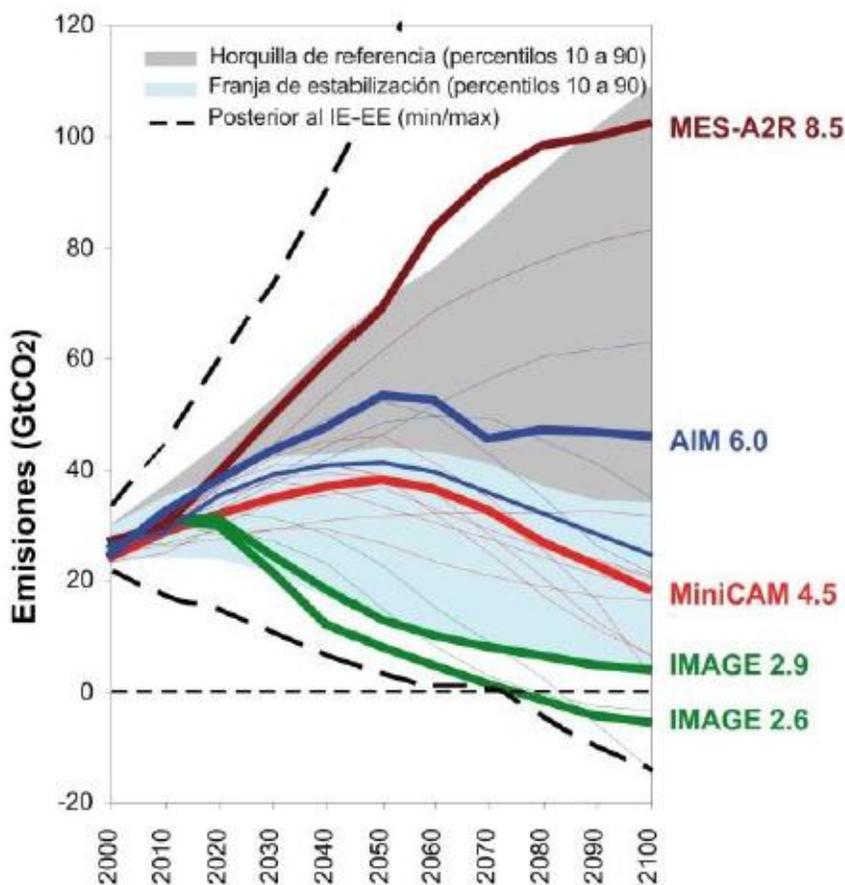
Fuente: Los Autores, 2021.

**Figura 10.** Distribución Potencial Actual Vs. Escenarios de Cambio Climático RCP 8.5 en los años 2050 y 2080 para *E. pycnophylla* Cuatrec. A. Distribución Potencial Actual. B. Escenario año 2050. C. Escenario año 2080.



Fuente: Los Autores, 2021.

**Figura 11.** Escenarios RCP con concentraciones de CO<sub>2</sub> provenientes de las emisiones de industria y consumo de energía.



Fuente: (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, 2015, p. 19)

Se ha estimado que el cambio climático sumado con el desarrollo de actividades humanas afectaría los ecosistemas paramunos ubicados en la cordillera occidental de los andes del norte, principalmente debido a que estas áreas sufrirían un proceso intenso de insularidad. Asimismo, el alto índice de vulnerabilidad que tienen los frailejones del género *Espeletia* afectaría directamente su equilibrio, convirtiéndose en una amenaza para esta especie llevando a un incremento de su endemismo o a su extinción (Anthelme et al., 2014; R. Rodríguez et al., 2017)

La pérdida de individuos de *E. pycnophylla* Cuatrec. y la reducción de nichos a manera de islas en el Complejo de Páramos incidiría directamente en las funciones que

aportan al mantenimiento del ecosistema paramuno, pues *Espeletia* juega un papel fundamental ya que a través de su establecimiento natural se evita la erosión de los páramos causada por el sobre enfriamiento y el descongelamiento; sus raíces ayudan a estabilizar el suelo, contribuyendo con el aporte de materia orgánica; sus flores son atractivas para aves e insectos que aportan al proceso de polinización. Debido a su mecanismo de captación de gotas de agua, contribuye en la producción de agua y su mecanismo de aprovechamiento de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> contribuye a combatir el calentamiento global (Llambí et al., 2012).

En este orden de ideas, Diazgranados et al (2021) mencionan que los servicios ecosistémicos proporcionados bajo las condiciones climáticas actuales cambiarán inevitablemente como resultado del cambio climático, los cuales serían evaluados de acuerdo con unos impulsores de cambio:

El primer impulsor de cambio está relacionado con la pérdida del espacio ambiental para una especie que proporciona un servicio ecosistémico, como es el caso de *E. pycnophylla* Cuatrec. Como consecuencia, la distribución espacial de una especie se reduce, lo que resulta en una pérdida neta de individuos que brindan ese servicio ecosistémico en particular (p.16).

El segundo impulsor de cambio tiene que ver con la afectación en las interacciones bióticas entre plantas, hongos e insectos que afectan gravemente a las poblaciones locales de plantas de páramo, como es el caso de *Espeletia*. Asimismo, se incluye la introducción de especies invasoras relacionadas con pastos (p.17).

Finalmente, el tercer impulsor del cambio es el resultado del grado de compensación funcional, o redundancia ecológica entre las especies, es decir que varias especies juegan roles equivalentes en los ecosistemas p.17).

La disminución del nicho de *E. pycnophylla* Cuatrec. podría afectar la composición florística del Complejo de Páramos Chiles Cumbal, así como lo acontecido

en los páramos de Boyacá, donde se reporta la reducción de nichos bajo condiciones climáticas futuras de algunas especies que han afectado la composición florística y por consiguiente la afectación en la provisión de servicios ecosistémicos, con la colonización de especies en áreas desglaciadas. Este fenómeno que está relacionado con la termofilización, no se ha comprobado para el ecosistema de páramos, aunque puede que comience a presentarse en zonas paramunas, no obstante, las comunidades forestales andinas han mostrado cambios de especies hacia áreas con mayor óptimo térmico a lo largo de los Andes en los últimos 15 años. Igualmente, en el extremo inferior, algunas especies del bosque alto andino podrían estar colonizando el páramo y podrían proporcionar algunos de los servicios ecosistémicos que brindaban las especies nativas (Diazgranados et al., 2021, p.18).

El cambio climático en los ecosistemas paramunos tiene serios problemas para la población de frailejones, puesto que se está presentando en periodos de tiempo muy cortos, influyendo en una baja adaptabilidad de las plantas y de otras especies del ecosistema paramuno.

La especie *E. pycnophylla* Cuatrec., al pertenecer al ecosistema de páramo, cuenta con rangos altitudinales restringidos y podría enfrentar los llamados “vacíos de desplazamiento de distribución”, entendidos como vacíos físicos entre el límite superior de la distribución altitudinal actual y el límite inferior de la distribución altitudinal pronosticada de la especie bajo un escenario climático futuro (Cowell et al, 2008, citado por Herzog et al., 2012, p.66), por lo que puede ser más vulnerable al cambio climático con respecto a otras especies de distribución más amplia, ya que deben desplazar su distribución hacia otras zonas con condiciones adecuadas para poder sobrevivir (Herzog et al., 2012).

La respuesta de migración de algunas especies frente al cambio climático por lo general puede realizarse hacia altitudes más altas o en otros casos hacia altitudes más bajas, debido a comportamientos competitivos, no obstante, cuando el potencial

migratorio es restringido, como es el caso de *E. pycnophylla* Cuatrec , buscaría a ajustarse a las nuevas condiciones ambientales (Valencia et al., 2020, p.2).

Asimismo, se puede referir que la distribución de *E. pycnophylla* Cuatrec., obtenida en la presente investigación contrasta con lo mencionado por Peyre et al (2018), quien menciona que las poblaciones de *Espeletia* experimentan diferentes condiciones climáticas al adaptar su crecimiento en lugares como depresiones húmedas de valles altos, en laderas secas o en el borde de la línea de bosques altoandinos, por lo que puede reaccionar a estas condiciones ambientales cambiantes.

Sin embargo, estas respuestas de adaptación al cambio climático pueden ser variadas y en ocasiones contradictorias, sobre todo en una especie de páramo de larga vida cuya dispersión de semillas es limitada (Valencia et al., 2020, p.2), y que al ser parte del ecosistema de páramo puede estar sometida a mayores impactos relacionados con presiones climáticas (Korner, 2003; Rumpf et al., 2018).

Igualmente, los resultados obtenidos en la presente investigación son muy similares con en el estudio realizado para la modelación de la distribución de 28 taxones de *Espeletia* en 36 Complejos de Páramos en los Andes del Norte (Colombia) bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5 para 2050 (Valencia et al., 2020), donde se evidenció una misma tendencia de reducción de áreas, sobre todo en los Complejos de Páramos ubicados en la Cordillera Oriental, a pesar que esta proyección se realizó en un periodo de tiempo más corto.

Dentro del Complejo de Páramos Chiles Cumbal, se identifican áreas protegidas del orden regional que hacen parte del Sistema Nacional de Áreas Protegidas-SINAP, correspondientes a los Parques Naturales Regionales (PNR) Volcán Azufral Chaitán y Páramo de Paja Blanca.

Cabe mencionar que las zonas que presentan una probabilidad superior al 60% de presencia de *E. pycnophylla* Cuatrec. bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5, se

identifican por fuera de estas áreas protegidas, por lo tanto, se puede deducir que las medidas de manejo frente a su administración son incipientes y no han aportado al cumplimiento de los objetivos de conservación planteados para las áreas, por lo que es necesario evaluar los modelos de efectividad de manejo y tener en cuenta la zonificación establecida, que permitan determinar el grado de afectación de las actividades productivas y restringir aquellas que no se encuentran acordes con el régimen de usos.

Lo mencionado anteriormente, se encuentra estrechamente relacionado con los resultados obtenidos en la presente investigación, pues estas afectaciones presentadas de manera aislada en Complejo de Páramos Chiles Cumbal, evidencia que el Cambio Climático está influyendo en la pérdida de individuos de las poblaciones de *E. pycnophylla* Cuatrec.

Asimismo, de ser necesario implementar acciones de conservación contundentes que podrían contribuir en minimizar el impacto del cambio climático y de las acciones antrópicas en los ecosistemas de páramo, mediante el mejoramiento de su capacidad de adaptación (Valencia et al., 2020, p.11).

De acuerdo con Rojas et al., (2018), uno de los aspectos más importantes del cambio climático, no solamente está relacionado con el cambio en los valores promedio máximos y mínimos de variables ambientales, como la temperatura y la precipitación, sino también en la alteración de las interacciones tróficas y no tróficas que se pueden presentar al interior de los ecosistemas (p.164).

Este autor menciona que, las interacciones tróficas están relacionadas con la pérdida y ganancia de biomasa en los individuos involucrados, siendo una de las más representativas para la vegetación la herbivoría, pues la aparición de estas afectaciones puede estar relacionada con el cambio climático (p.164).

En algunas zonas del país se han presentado consecuencias por la aparición de estas afectaciones, sobre todo para algunos taxones de *Espeletia*, como es el caso de *E.*

*grandiflora* en páramos ubicados a los alrededores de Bogotá, cuyas características están relacionadas con daños a nivel foliar, posiblemente relacionados con larvas de polillas.

Cabe mencionar que Burbano-Figueroa et al., (2020) evidenciaron afectaciones sobre *E. pycnophylla* Cuatrec. en el PNR Páramo de Paja Blanca ubicado en el Complejo de Páramos Chiles Cumbal, pues estos autores plantean algunas hipótesis sobre la afectación de la especie asociado a:

1. Pérdida de la función de la raíz por ataque de patógenos radiculares o del consumo de Entomidos (Curculionidae)
2. Ataque a los tallos por picudos de la subfamilia Baridinae o por escolítidos (este último incluye el posterior crecimiento de hongos *Ambrosia* en las plantas).
3. Pérdida de área foliar ocasionado por patógenos foliares y herbivoría de insectos.

Asimismo, refieren que:

“Estas infestaciones de plagas y enfermedades deben ser consideradas en los modelos de predicción de desplazamiento que sufrirán las poblaciones de *Espeletia* como resultado del cambio global. Estas interacciones pueden exacerbar el efecto del cambio climático e incrementar los riesgos de reducción de la población y extinción”.

Igualmente, de acuerdo con reportes realizados por la Corporación Autónoma de Nariño- CORPONARIÑO, mencionaron que, se han evidenciado afectaciones de algunos individuos de *E. pycnophylla* Cuatrec. para el sector de El Espino en el Páramo del PNR Volcán Azufral Chaitán, cuyas características están relacionadas con la presencia de plagas (insectos) y hongos, con el entorchamiento de hojas y muerte en pie de algunos individuos, no obstante, esta afectación aún no se encuentra en estudio, sin embargo, es una muestra que se suma a la afectación de las poblaciones de frailejón dentro del Complejo de Páramos.

Entre las interacciones no tróficas se encuentran la productividad y el desempeño reproductivo de los organismos, que, al estar influenciadas por el cambio climático, generan estrés, lo cual afecta el estado fisiológico por alguna condición biótica o abiótica del medio que aleja a la planta de su óptimo funcionamiento. Entre ellos se tiene el estrés por altas o bajas temperaturas, el estrés por radiación, el estrés por déficit o exceso de agua y el estrés por falta de nutrientes (p.164).

La afectación del cambio climático está relacionado con cambios en las variables y los recursos que requieren las plantas, principalmente las relacionadas con la temperatura, la radiación y la precipitación, que no solamente están involucradas en el metabolismo primario de las plantas, es decir con la fotosíntesis, sino también en el metabolismo secundario y en la fenología como es el ciclo reproductivo, alterando los patrones de floración de algunas plantas(Rojas et al., 2018, p.165).

La disminución de áreas en la distribución de *E. pycnophylla* Cuatrec. bajo los escenarios de cambio climático, reflejan la misma tendencia de estudios realizados por Mavárez et al. (2018) quienes evaluaron las distribuciones actuales y futuras de 28 especies de la Subtribu Espeletiinae (Asteraceae) en los Andes Venezolanos, basadas en la reducción de la escala estadística de variables climáticas y de modelos de nicho, cuyos resultados predijeron grandes reducciones en el área modelada e importantes cambios ascendentes en la distribución para el año 2070 bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5 en comparación con su distribución actual.

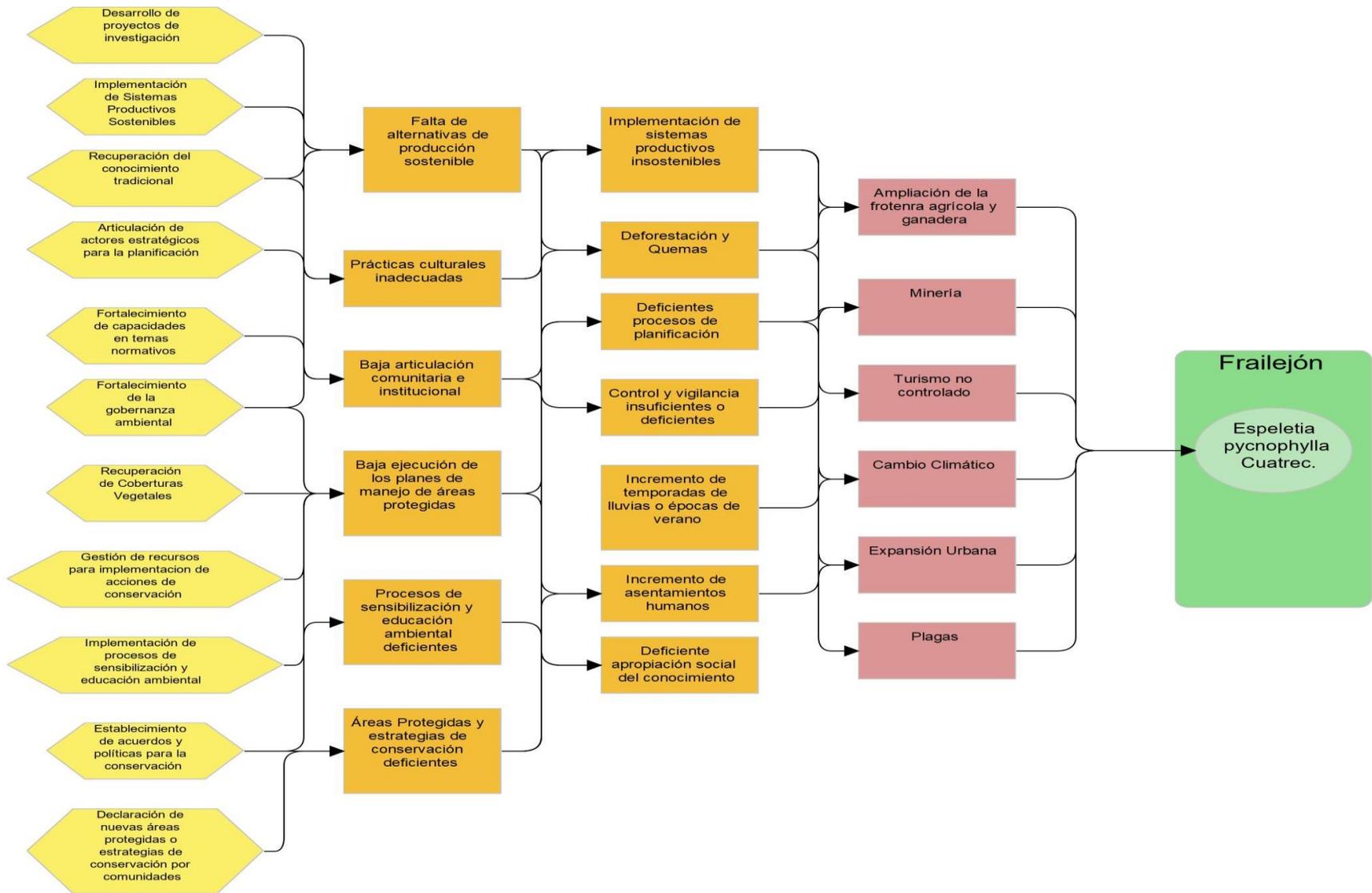
### **8.3 MEDIDAS DE CONSERVACIÓN DE *Espeletia pycnophylla* Cuatrec. A NIVEL COMUNITARIO Y GUBERNAMENTAL**

Los resultados arrojados por la modelación de la distribución potencial actual de la especie y bajo escenarios de cambio climático RCP 4.5 y 8.5, permitieron identificar las medidas de conservación de la especie, las cuales fueron complementadas con información brindada por actores estratégicos presentes en el territorio como: Gobernadores Indígenas, líderes comunitarios, integrantes de grupos vigías de las áreas declaradas (Parques Naturales regionales)

y representantes de los entes territoriales que hacen parte del Complejo de Páramos, quienes dieron respuesta a preguntas concretas formuladas mediante una entrevista.

A partir de estos resultados, se elaboró un modelo conceptual teniendo en cuenta lo propuesto por la Alianza para las medidas de la Conservación versión 3.0 (CMP, 2017), con el fin consolidar las amenazas directas, los factores que contribuyen a esas amenazas y las estrategias para contrarrestarlas (Figura 12).

**Figura 12.** Modelo Conceptual *E. pycnophylla* Cuatrec. para la identificación de estrategias de conservación.



Fuente: Los Autores, 2021

De acuerdo con la Figura 12, se pudo identificar que los actores sociales comunitarios e institucionales, manifestaron que dentro de las amenazas directas que afectan a *E. pycnopylla* Cuatrec., se encuentran principalmente la ampliación de la frontera agrícola y ganadera seguido del turismo no controlado y la minería, sin embargo, el cambio climático, la expansión urbana y las plagas, se consideran como presiones que afectan a la especie dentro del Complejo.

Estas amenazas son causadas principalmente por factores directos como:

- La implementación de sistemas productivos insostenibles ligados a la falta de alternativas de producción sostenible;
- La deforestación y las quemas, identificadas como prácticas culturales inadecuadas para el establecimiento de cultivos o pastos para ganadería en zonas de páramo;
- Acciones de control y vigilancia deficientes debido a la falta de articulación comunitaria e institucional que permita una apropiada gobernanza ambiental;
- El incremento de temporadas de lluvia o épocas de verano causadas por la variabilidad climática;
- El establecimiento de asentamientos humanos, debido al incremento poblacional;
- Los deficientes procesos de apropiación social del conocimiento, debido a la falta de sensibilización y educación ambiental;
- Los deficientes procesos de declaratoria de áreas protegidas y de estrategias complementarias de conservación.

Las afectaciones relacionadas en el presente estudio, se referencian igualmente en el Plan de Gestión Ambiental Regional (PGAR), si bien se menciona que en los cuatro Complejos de Páramos registrados para el departamento de Nariño, se presenta una degradación con aumento progresivo, causada por el uso inadecuado de suelo, la expansión de la frontera agrícola, la implementación de obras de infraestructura, monocultivos, colonización, incendios forestales, y sistemas insostenibles de producción, debido a la explotación de franjas de páramo bajo (Corponariño, 2014).

De acuerdo con la información brindada por los actores sociales, algunas de las acciones que han aportado en la conservación de *E. pycnophylla* Cuatrec. en el Complejo de Páramos Chiles Cumbal han sido realizadas por diferentes actores como CORPONARIÑO, Resguardo Indígena de Guachucal, Alcaldías Municipales de Ospina, Gualmatán, Sapuyes e Iles, Instituciones Educativas y algunos grupos asociativos.

Entre las acciones realizadas se encuentran:

- Acciones de restauración y reforestación ecológica.
- Declaratoria de dos áreas protegidas como Parques Naturales Regionales (PNR) por parte de la Corporación Autónoma Regional de Nariño-CORPONARIÑO correspondientes al PNR Volcán Azufral Chaitán y PNR Páramo de Paja Blanca.
- Compra de predios.
- Sensibilización ambiental
- Implementación de componentes de sostenibilidad
- Monitoreo de *E. pycnophylla* Cuatrec. como Valor Objeto de Conservación (VOC) de las áreas protegidas declaradas (PNR Páramo de Paja Blanca y Volcán Azufral Chaitán).

Pese a la intervención de los actores sociales, estas acciones no han sido suficientes por lo que se requiere gestionar recursos técnicos y financieros para contribuir con la conservación de la especie.

De acuerdo con la normatividad establecida por el Congreso de la República, mediante la Ley 1930 de 2018, dentro de los páramos se establecen directrices que propendan por su integralidad, preservación, restauración, uso sostenible y generación de conocimiento, es así como instituciones gubernamentales deben articular acciones que conlleven a su protección.

A partir de esta investigación se proponen acciones que puedan contribuir con la construcción del Plan de Manejo Ambiental del Complejo, teniendo en cuenta que la Corporación Autónoma Regional de Nariño – CORPONARIÑO, de acuerdo con el artículo 6 de la Ley 1930 de 2018, deberá elaborarlo y sus componentes deben contener los programas, planes y proyectos

de reconversión y sustitución de las actividades prohibidas que hayan quedado en su interior; igualmente incluirá un sistema de seguimiento para evaluar, supervisar, monitorear el estado y tendencias de páramo y las correspondientes actividades de manejo. Estas actividades conjuntas, lograrán una mayor protección del ecosistema y por ende de las especies que en él habitan.

En este sentido, se proponen como medidas para la conservación de *E. pycnophylla* Cuatrec., unas acciones enmarcadas en líneas estratégicas, resultados, indicadores y actores responsables. Cada línea estratégica contiene las acciones que pueden ser adoptadas en diferentes instrumentos de planificación (Tabla 10)

**Tabla 10.** Plan de Acción para la Conservación de *E. pycnophylla* Cuatrec., identificadas para el Complejo de Páramos Chiles Cumbal

ACCIONES	RESULTADOS	INDICADORES	RESPONSABLES
<b>Línea Estratégica de Conservación</b>			
Implementar acciones de restauración ecológica participativa en áreas con disturbios, en el Complejo de Páramos Chiles Cumbal	Identificación, priorización y establecimiento de áreas con restauración ecológica participativa	Número de hectáreas restauradas	Alcaldías municipales, Gobernación de Nariño, Cabildos Indígenas, ONG's, CORPONARIÑO
Establecer viveros comunitarios e institucionales para la propagación de frailejón y especies de alta montaña en el Complejo de Páramos Chiles Cumbal	Implementación y fortalecimiento de viveros comunitarios e institucionales para la propagación de frailejón y especies nativas de alta montaña	Número de viveros implementados y fortalecidos	Alcaldías municipales, Gobernación de Nariño, Cabildos Indígenas, ONG's, CORPONARIÑO
Promover y declarar nuevas áreas protegidas o estrategias complementarias de conservación en el Complejo de Páramos Chiles Cumbal	Áreas protegidas declaradas y estrategias complementarias de conservación implementadas	Número de áreas protegidas declaradas y número de estrategias complementarias de conservación	CORPONARIÑO, Resguardos Indígenas, Alcaldías Municipales

Adquirir predios por parte de las autoridades competentes en el Complejo de Páramos Chiles - Cumbal	Ampliación de áreas de páramo para la conservación de la especie	Número de predios adquiridos	Alcaldías municipales, Gobernación de Nariño, Cabildos Indígenas, ONG's, CORPONARIÑO
<b>Línea Estratégica de Investigación y Monitoreo</b>			
Investigar las enfermedades causantes de la muerte de individuos de frailejón para el control y monitoreo en áreas protegidas priorizadas en el Complejo de Páramos Chiles Cumbal	Investigación sobre las enfermedades causantes de la muerte de individuos de frailejón	Documento de investigación	Universidades, CORPONARIÑO
Identificar e implementar alternativas para la mitigación por afectación de plagas a <i>E. pycnophylla</i> Cuatrec. en el Complejo de Páramos Chiles Cumbal	Alternativas de mitigación por afectación de plagas identificadas e implementadas	Número de alternativas de mitigación por afectación de plagas identificadas e implementadas	Universidades, Corponariño, Gobernación de Nariño
Investigar y establecer protocolos sobre las técnicas de propagación de frailejón, que garanticen la preservación de material genético en el Complejo de Páramos Chiles Cumbal	Identificación de al menos un protocolo de propagación de frailejón	Número de protocolos identificados	Alcaldías municipales, Gobernación de Nariño, Cabildos Indígenas, Universidades, CORPONARIÑO
Realizar acciones de monitoreo y seguimiento sobre áreas restauradas en zonas de alta montaña en el Complejo de Páramos Chiles Cumbal	Áreas restauradas en zonas de bosque altoandino, páramos y corredores biológicos con seguimiento y monitoreo	Número de hectáreas restauradas con seguimiento y monitoreo	Alcaldías municipales, Gobernación de Nariño, Cabildos Indígenas, ONG's, CORPONARIÑO
Implementar el programa de monitoreo de las poblaciones de frailejón en las áreas protegidas declaradas en el Complejo de Páramos Chiles Cumbal	Programa de monitoreo implementado en cada área protegida	Número de programas de monitoreo implementados	CORPONARIÑO

Evaluar el estado ecológico de las poblaciones de frailejón en el Complejo de Páramos Chiles Cumbal	Al menos el 80% de las poblaciones de frailejón y sus hábitats caracterizados	Documento sobre la evaluación del estado de las poblaciones de frailejón	Universidades, CORPONARIÑO
<b>Línea Estratégica de Producción Sostenible</b>			
Recuperar el conocimiento ancestral y tradicional que contribuya en la producción sostenible en el Complejo de Páramos Chiles Cumbal	Técnicas ancestrales identificadas e implementadas que contribuyan en una producción sostenible	Número de técnicas ancestrales identificadas e implementadas	Alcaldías municipales, Gobernación de Nariño, Cabildos Indígenas, ONG's, CORPONARIÑO
Identificar productos promisorios en ecosistemas de alta montaña para su uso y aprovechamiento sostenible en el Complejo de Páramos Chiles Cumbal	Productos promisorios de ecosistemas de alta montaña identificados para su uso y aprovechamiento sostenible	Número de productos promisorios identificados	Alcaldías Municipales, Cabildos Indígenas, Gobernación de Nariño, CORPONARIÑO
Identificar e implementar sistemas de producción sostenible para la reconversión productiva en el Complejo de Páramos Chiles Cumbal	Sistemas de producción sostenibles identificados e implementados	Número de sistemas de producción sostenibles identificados e implementados	Alcaldías Municipales, Cabildos Indígenas, Gobernación de Nariño, CORPONARIÑO
<b>Línea Estratégica de Políticas e Instrumentos de Gestión</b>			
Incluir en instrumentos de planificación territorial estrategias de conservación para el Complejo de Páramos Chiles Cumbal	Instrumentos de planificación que incluyan estrategias de conservación para el Complejo de Páramos Chiles Cumbal.	Número de instrumentos de planificación con estrategias de conservación	Alcaldías Municipales, Cabildos Indígenas, Gobernación de Nariño, CORPONARIÑO
Incentivar áreas de protección mediante acuerdos de conservación en el Complejo de Páramos Chiles Cumbal	Incentivos de conservación implementados por entidades gubernamentales y privadas	Número de incentivos de conservación implementados	Alcaldías municipales, Gobernación de Nariño, ONG's, CORPONARIÑO

Gestionar fuentes de financiación para la implementación de acciones de conservación en el Complejo de Páramos Chiles Cumbal	Fuentes de financiación gestionadas	Número de fuentes de financiación gestionadas	Alcaldías municipales, Gobernación de Nariño, Cabildos Indígenas, ONG's, CORPONARIÑO
<b>Línea Estratégica de Educación y Comunicación</b>			
Promover espacios de articulación comunitaria e institucional para el fortalecimiento de la gobernanza ambiental en el Complejo de Páramos Chiles Cumbal	Creación de instancias de articulación para fortalecimiento de la gobernanza ambiental	Número de instancias de articulación	Alcaldías municipales, Gobernación de Nariño, Cabildos Indígenas, ONG's, CORPONARIÑO, comunidad campesina e indígena, JAC, JAA, Grupos Asociativos
Elaborar estrategias de comunicación y divulgación relacionadas con la conservación del frailejón en el Complejo de Páramos Chiles Cumbal	Estrategias de comunicación y divulgación relacionadas con la conservación del frailejón elaboradas	Número de estrategias de comunicación y divulgación (documentales, cartillas, afiches, cuñas radiales, campañas)	Alcaldías municipales, Gobernación de Nariño, Cabildos Indígenas, ONG's, Instituciones Educativas CORPONARIÑO
Incorporar el componente de conservación de frailejón en los PRAE, CIDEA y PROCEDAS para sensibilizar a instituciones educativas y comunidad en general	Componente de conservación de frailejón incorporado en PRAE, CIDEA y PROCEDA	Número de PRAE, CIDEA y PROCEDA con componente de conservación	Instituciones educativas, CORPONARIÑO
Fortalecimiento de capacidades en normatividad ambiental a actores sociales presentes en el Complejo de Páramos Chiles Cumbal	Actores sociales fortalecidos en normatividad ambiental	Número de capacitaciones en normatividad ambiental	Policía Ambiental, CORPONARIÑO
Conformar grupos de guardias ambientales en el Complejo de Páramos Chiles Cumbal	Fortalecimiento en acciones de control y vigilancia en el Complejo de Páramos	Número de grupos ambientales conformados	Alcaldías municipales, Gobernación de Nariño, Cabildos Indígenas, ONG's,

Fuente: Los Autores, 2021

Cabe mencionar que, si se logra implementar las medidas de conservación planteadas, estas contribuirán a mitigar la pérdida de nichos de *E. pycnophylla* Cuatrec. y de especies asociadas a los ecosistemas de páramo, ya que su aporte incidiría en mejorar las condiciones ambientales y por lo tanto, mantener las áreas con presencia de la especie para que puedan afrontar el cambio climático.

Asimismo, se proponen estas medidas teniendo en cuenta que pueden aportar en la construcción o actualización de diferentes instrumentos de planificación territorial, cuyo aporte incidiría en la conservación de la especie y del ecosistema de páramo.

## CONCLUSIONES

- La distribución de la especie de frailejones *Espeletia pycnophylla* Cuatrec. en el Complejo de Páramos Chiles Cumbal se ve influenciada por el cambio climático, incidiendo principalmente sobre la variable bioclimática de temperatura media anual – BIO 1, la cual está relacionada con el incremento de la concentración de gases efecto invernadero (GEI), lo cual afecta el crecimiento de la especie, así como la competencia por espacio, cuyos resultados se ven reflejados en la disminución de nichos para su establecimiento en escenarios futuros.
- Las variables bioclimáticas con mayor influencia en la distribución potencial actual de *E. pycnophylla* Cuatrec. corresponden a la estacionalidad en la precipitación (BIO 15) con el 33,3%, le siguen la temperatura media anual (BIO 1) con el 30,1% y luego se encuentra la elevación con el 18,2%, cuyos porcentajes equivalen al 81,6%, considerándose factores importantes para el establecimiento de la especie y que pueden influir en su estado fenológico, principalmente en la iniciación de la floración, la formación de las sinflorescencias, capítulos y la dispersión de semillas.
- El modelo de distribución potencial actual de *E. pycnophylla* Cuatrec. estableció áreas con un porcentaje por encima del 60%, tomando como referencia la ubicación del Complejo desde el Sur hacia el Norte, cuya área cubre aproximadamente 97,28 Km<sup>2</sup>. La especie se distribuye en la cuenca alta del río San Juan, que incluyen los páramos de los Cerros Nazate, Canguil y Colorado. Para el Volcán Cumbal, se encuentra ubicada hacia los sectores oriental, nororiental y suroriental del cráter, en límites altitudinales comprendidos entre los 3.700 a 4.000 msnm. En el municipio de Mallama se evidencia la presencia de la especie hacia el sector denominado como El Infiernillo o Pueblo Viejo, entre los 3.600 y 3.700 msnm. Para el páramo de Azufra la especie tiende a localizarse hacia el sector sur

de la Laguna Verde (cráter del Volcán Azufral) correspondiente al sector de El Espino y hacia el norte y noroccidente del cráter del Volcán, entre los 3.600 y 3.900 msnm.

- A partir de la contribución de variables bioclimáticas y topográficas en la distribución de *E. pycnophylla* Cuatrec. bajo escenarios de cambio climático se evidencia que la temperatura media anual (BIO 1) y la elevación continúan siendo las más influyentes en la distribución de la especie tanto para el escenario RCP 4.5 y como para el RCP 8.5 en los años 2050 y 2080, resultados que se encuentran en concordancia con el incremento de las temperaturas reportadas en la tercera comunicación Nacional para el IPCC, donde los posibles valores de cambio de la temperatura media en Colombia para los periodos 2041-2100, mostrarían los aumentos más significativos, específicamente para los páramos, lo que podría afectar la distribución de la especie.
- La distribución de *E. pycnophylla* Cuatrec., para los escenarios evaluados, evidencia que esta tiende a mantenerse dentro de los rangos altitudinales de distribución donde normalmente se ubica, sin observar que esta se traslade a franjas altitudinales más elevadas.
- Para el escenario RCP 4.5 en el año 2050, las áreas reflejan una tendencia hacia la disminución, pasando de 97,28 Km<sup>2</sup> de la distribución potencial actual, a una extensión de 49.93 Km<sup>2</sup>, cuyas áreas presentan una probabilidad superior al 60%, las cuales se ubican principalmente hacia el occidente del Complejo de Páramos entre las que se identifican al páramo de Chiles hacia Cerro Negro, así mismo el páramo de Cumbal y lo que corresponde al sector de El Infiernillo o Pueblo Viejo.
- El desplazamiento que se presenta la distribución de la especie en el Complejo de Páramos, no de manera altitudinal, si no hacia otra vertiente se debe a que el modelo relaciona a parte de la variable climática de temperatura media anual- BIO 1, la estacionalidad de la precipitación – BIO 15 como las variables que más contribuyen en la distribución de *E. pycnophylla* Cuatrec., así mismo puede estar influenciada por la humedad, teniendo en cuenta la influencia del clima proveniente del pie de monte costero.

- Para el año 2080, en relación con el año 2050, en el escenario RCP 4.5 no se observan mayores cambios al identificar las áreas con altas probabilidades de distribución, si bien, estas áreas cubren 46.48 Km<sup>2</sup> y su diferencia es mínima con 3.45 Km<sup>2</sup> con respecto al año 2050. Teniendo en cuenta que la diferencia de periodos es corta, esta situación se sustenta en la estabilización de la curva de concentración de CO<sub>2</sub> para el escenario RCP 4.5, ya que la pendiente de la curva entre estos dos años disminuye lo cual se encuentra en función de la temperatura que igualmente decrece.
- Para el escenario RCP 8.5 en los años 2050 y 2080, hay una reducción sustancial de áreas, pasando para el año 2050 de 32.71 Km<sup>2</sup> a 17.21 Km<sup>2</sup> para el año 2080. En el año 2050, las áreas con probabilidades superiores al 60% son muy dispersas, observando pequeñas áreas hacia el occidente y algunas se mantienen hacia el oriente, pero sin concentración en núcleos. Para este año la especie tiende a desaparecer en el páramo de Azufral y se mueve hacia el Cerro Gualcalá. Para el año 2080, se acentúa la baja probabilidad de presencia de la especie y las áreas que presentan estos valores bajos están relacionadas con las zonas más altas de los páramos de Chiles, Cumbal y Azufral, teniendo en cuenta que, sumado al aumento de temperatura, las variables bioclimáticas no favorecen el establecimiento de la especie.
- La distribución de *E. pycnophylla* Cuatrec. bajo los escenarios de cambio climático evaluados, permitieron identificar que no únicamente la distribución de la especie se encuentra relacionada con la temperatura, la precipitación y la elevación, sino que se encuentra igualmente ligada a factores tróficos en los cuales el cambio climático influye en la aparición de plagas y enfermedades en la especie y factores no tróficos en los cuales se afecta el estado fisiológico por alguna condición biótica o abiótica del medio que aleja a la planta de su óptimo funcionamiento.
- Teniendo en cuenta que el cambio climático influye en la distribución de *E. pycnophylla* Cuatrec. en el Complejo de Páramos Chiles Cumbal, se propusieron cinco líneas estratégicas relacionadas con conservación, investigación y monitoreo, producción sostenible, políticas e instrumentos de gestión, educación y comunicación, las cuales

contienen medidas para la conservación de la especie que pueden tenerse en cuenta en la construcción o actualización de diferentes instrumentos de planificación territorial. Asimismo, su implementación contribuiría en mitigar la pérdida de nichos de *E. pycnophylla* Cuatrec. y de especies asociadas a los ecosistemas de páramo, ya que su aporte incidiría en mejorar las condiciones ambientales y, por lo tanto, en mantener las áreas con presencia de la especie para que puedan afrontar el cambio climático.

## RECOMENDACIONES

- Existe la disponibilidad de 24 Modelos de Circulación Global- MCG los cuales podrían ser evaluados para realizar ejercicios de modelación de distribución de *E. pycnophylla* Cuatrec. y de otras especies de importancia ambiental en los ecosistemas de páramo bajo concentraciones de GEI, lo cual permitiría definir cual MCG está más acorde con la realidad y de esta manera verificar su validez mediante recorridos de campo.
- Es importante que entidades competentes en articulación con actores comunitarios, identifiquen e implementen estrategias de conservación enfocadas en el ecosistema de páramo, teniendo en cuenta que el desarrollo de las distintas actividades humanas estaría aumentando la vulnerabilidad del ecosistema y por ende de *E. pycnophylla* Cuatrec.
- La estimación de la distribución potencial actual de la especie *E. pycnophylla* Cuatrec. se realizó con base a los puntos de presencia actual, esto quiere decir que son las áreas donde se encuentran las condiciones ambientales disponibles para la presencia de la especie, de acuerdo con esto, la información obtenida en la presente investigación puede ser incorporada en los diferentes planes, programas o proyectos que busquen la conservación de los ecosistemas de alta montaña.
- Es importante adelantar estudios de distribución de otras especies de alta montaña que permitan analizar los efectos del cambio climático y poder priorizar áreas donde se concentren un mayor número de especies para su conservación estricta.
- Para obtener un modelo más completo sobre los efectos del cambio climático sobre *E. pycnophylla* Cuatrec. sería conveniente ampliar la investigación hacia el resto de los Complejos de Páramos identificados para el departamento de Nariño.

## REFERENCIAS

- Aguirre, C., & Chamba, C. (2010). Patrones de Comportamiento de 10 especies vegetales del Páramo del Parque Nacional Podocarpus ante escenarios de Cambio Climático. Universidad Nacional de Loja. Tesis de Grado Previa a la obtención del título de Ingeniero Agroforestal. Loja Ecuador. 77 pág.
- Alarcón, J. C., & Pabón, J. D. (2013). El Cambio Climático y la distribución espacial de las formaciones vegetales en Colombia. *Colombia Forestal*, 16(2), 171-185.
- Alianza Clima y Desarrollo. (2014). El Quinto Reporte de Evaluación del IPCC | ¿Qué implica para Latinoamérica?. <https://cdkn.org/wp-content/uploads/2014/12/Informe-del-IPCC-Que-implica-para-Latinoamerica-CDKN.pdf>
- Anderson, E. P., Marengo, J. A., Villalba, R., Halloy, S. R. P., Young, B. E., Cordero, D., Gast, F., Jaimes, E., & Ruiz, D. (2012). Consecuencias del cambio climático en los ecosistemas y servicios ecosistémicos de los Andes Tropicales. *Climate change and Biodiversity in the Tropical Andes*, 410.
- Anthelme, F., Jacobsen, D., Macek, P., Meneses, R. I., Moret, P., Beck, S., & Dangles, O. (2014). Biodiversity patterns and continental insularity in the tropical High Andes. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 46(4), 811–828. <https://doi.org/10.1657/1938-4246-46.4.811>
- Arango, C., Dorado, J., Guzmán, D., & Ruíz, J. F. (2014). Variabilidad Climática de la Precipitación en Colombia Asociada al Ciclo El Niño, La Niña – Oscilación Del Sur (Enso). Grupo de Modelamiento de Tiempo, Clima y Escenarios de Cambio Climático Subdirección de Meteorología – IDEAM
- Arcila, N. (2013). Vulnerabilidad al Cambio Climático de tres especies de flora del Páramo.

Estudio de Caso: Parque Nacional Natural Los Nevados. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.

Armenteras, D., & Mulligan, M. (2010). Modelling The Potential Distribution of Tree Species on a National Scale In Colombia: Application To *Palicourea angustifolia* Kunth And *Palicourea guianensis* Aubl . escala nacional en Colombia : una aplicación para *Palicourea angustifolia* Kunth y *Palicour*. *Caldasia*, 32(2), 355–380.

Baselga, A., & Araújo, M. B. (2009). Individualistic vs community modelling of species distributions under climate change. *Ecography*, 32(1), 55–65. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2009.05856.x>

Benavides, F., Burbano, D., Urbano, S., & Solarte, M. E. (2007). Efectos del gradiente altitudinal sobre aspectos autoecológicos de *Espeletia pycnophylla* ssp *Angelensis* Cuatrec. (Asteraceae) en el páramo el Infiernillo (Nariño) Colombia. *Actualidades Biológicas*, 29 (86), 41–53.

Benavides, H., & León, G. (2007). Información Técnica sobre Gases de Efecto Invernadero y el Cambio Climático.  
<http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gases+de+Efecto+Invernadero+y+el+Cambio+Climatico.pdf/7fabbbd2-9300-4280-befe-c11cf15f06dd>. Bogotá. Subd. Meteorología. IDEAM. 220p.

Burbano-Figueroa, O., Galindez-Chicaiza, E., Benitez-Arteaga, A. J., Coral, A. V. A., Casanova, C. A. F., García, C. A. B., -González, C. S., David-Figueroa, A., & Mora, L. E. L. (2020). Declive y muerte de los frailejones en los ecosistemas alpinos de los Andes del Norte: Modelo Conceptual. Artículo de Revisión Crítica. <https://doi.org/10.31219/OSF.IO/9MKP6>

Bustamante, M. R., Ron, S. R., & Coloma, L. A. (2005). Cambios en la diversidad en siete comunidades de anuros en los Andes de Ecuador. *Biotropica*, 37(2), 180–189. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2005.00025.x>

Buytaert, W. ;, Sevink, J. ;, & Cuesta, F. (2014). Cambio climático: la nueva amenaza para los páramos. En F. Cuesta, J. Sevink, L. D. LLambi, B. 506, & J. Posner (Eds.), Avances en investigación para la conservación de los páramos andinos (pp. 505-525). CONDESAN. . [http://www.condesan.org/ppa/sites/default/files/recursos/archivos/5%200%20Cambio\\_Introduccio%CC%81n%20Buytaert%20LpS.pdf](http://www.condesan.org/ppa/sites/default/files/recursos/archivos/5%200%20Cambio_Introduccio%CC%81n%20Buytaert%20LpS.pdf)

Buytaert, W., Cuesta-Camacho, F., & Tobón, C. (2011). Potential impacts of climate change on the environmental services of humid tropical alpine regions. *Global Ecology and Biogeography*, 20(1), 19–33. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00585.x>

Carlquist, S. (1974). *Island Biology*. Columbia University Press. New York, Columbia University Press. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.63768>

CMP. (2017). CMP Estándares Abiertos para la Práctica de la Conservación. [www.conservationmeasures.org](http://www.conservationmeasures.org).

Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018. Todos por un Nuevo País. (2015). [http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley\\_1753\\_2015.html](http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1753_2015.html)

Congreso de la República. (2018). Directrices para la Gestión del Cambio Climático. [http://es.presidencia.gov.co/normativa/normativa/Ley 1931 del 27 de julio de 2018.pdf](http://es.presidencia.gov.co/normativa/normativa/Ley%201931%20del%2027%20de%20julio%20de%202018.pdf)

Ley 99 de 1993, (1993). <http://www.humboldt.org.co/images/documentos/pdf/Normativo/1993-12-22-ley-99-crea-el-sina-y-mma.pdf>

Congreso de la República de Colombia. (2018). Ley 1930 de 2018. Congreso, 1930, 14. [http://www.andi.com.co/Uploads/Ley-2018-N0001930\\_20180727.pdf](http://www.andi.com.co/Uploads/Ley-2018-N0001930_20180727.pdf)

Contreras-Medina, R., Luna-Vega, I., & Ríos-Muñoz, C. A. (2010). Distribución de *Taxus globosa* (Taxaceae) en México: Modelos ecológicos de nicho, efectos del cambio del uso de

suelo y conservación. *Revista Chilena de Historia Natural*, 83, 421–433.  
<http://dx.doi.org/10.4067/S0716-078X2010000300009>

Corponariño. (2014). Plan de Gestión Ambiental Regional del Departamento de Nariño- PGAR 2015-2031.

<http://corponarino.gov.co/expedientes/planeacion/pgar20152032/diagnosticoPGAR20152032-parte1.pdf>

Constitución Política de Colombia 1991, 2016 (1991).

[http://www.corteconstitucional.gov.co/inicio/Constitucion politica de Colombia.pdf](http://www.corteconstitucional.gov.co/inicio/Constitucion%20politica%20de%20Colombia.pdf)

Cruz-Cárdenas, G., Villaseñor, J. L., López-Mata, L., Martínez-Meyer, E., & Ortiz, E. (2014).

Selección de predictores ambientales para el modelado de la distribución de especies en Maxent. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 20(2), 187–201.  
<https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2013.09.034>

Cuatrecasas, J. (1958). Aspectos de la vegetación natural de Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias. Exactas Físicas y Naturales.*, 10(40), 221–268.

Cuatrecasas, J. (1986). Speciation and radiation of the Espeletiinae in the Andes. *High altitude tropical biogeography*, 276–303.

Cuesta-Camacho, F., Peralvo, M., & Ganzenmüller, M. (2008). Posibles efectos del calentamiento global sobre el nicho climático de algunas especies en los Andes Tropicales. CODESAN. Proyecto Páramo Andino. University of Texas at Austin EcoCiencia. 15–38.

Cuesta, F., Peralvo, M., & Valarezo, N. (2009). Los bosques montanos de los Andes Tropicales. Quito, Ecuador: Ecobona. [www.bosquesandinos.info](http://www.bosquesandinos.info)

Delgado, A., Ruiz, S., Arevalo, L., Castillo, G., Viles, N., Calderon, J., Canizales, J., Munoz, Y.,

& Ramos, R. (2007). Plan de Acción en Biodiversidad del departamento de Nariño 2006 – 2030 - Propuesta Técnica. 525.  
<http://corponarino.gov.co/expedientes/intervencion/biodiversidad/parteI.pdf>

Diaz, L. (2015). Análisis biogeográfico de *Espeletia pycnophylla* Cuatrecasas (Asteraceae) en los Andes del norte de Ecuador y suroccidente de Colombia Universidad de San Francisco de Quito.

Diazgranados, M., Etherington, T. R., Rodríguez-zorro, P. A., Castellanos-castro, C., Galvis, M., & Ga, S. (2021). Ecosystem services show variable responses to future climate conditions in the Colombian páramos. PeerJ 9:e11370 <https://doi.org/10.7717/peerj.11370>

Erazo, D. (2011). Estudio Fenológico de *Espeletia pycnophylla* Cuatrec. en los páramos de El Infiernillo, Reserva Natural Pueblo Viejo, Municipio de Mallama y Cerro Negro, Municipio de Puerres, departamento de Nariño, Colombia. Universidad de Nariño.

Fajardo-Gutiérrez, F., Infante-Betancour, J., & Cabrera Amaya, D. M. (2016). Modelación de la distribución potencial de las especies de *Polylepis* presentes en Colombia. Ecología Austral. 028(01bis):202-215. [http://hdl.handle.net/20.500.12110/ecologiaaustral\\_v028\\_n01bis\\_p202](http://hdl.handle.net/20.500.12110/ecologiaaustral_v028_n01bis_p202)

Feeley, K. J., & Silman, M. R. (2010). Land-use and climate change effects on population size and extinction risk of Andean plants. *Global Change Biology*, 16(12), 3215–3222. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02197.x>

García, V. L., Rios, L. J., & Molina, Q. A. (2010). Structure, Plant Composition And Leaf Litter Decomposition In Soil, At Two Sites Of An Andean Cloud Forest (Reforested And In Spontaneous Succession), In Peñas Blancas, Calarcá (Quindío), Colombia. 32(93), 147–164.

Guevara, O., Abud, M., Trujillo, A. F., Suárez, C. F., Cuadros, L., López, C., & Flórez, C. (2016). Plan Territorial de Adaptación Climática del departamento de Nariño.

- Guisan, A., & Zimmermann, N. E. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. En *Ecological Modelling* Vol. 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)
- Helmer Id, E. H., Gerson, E. A., Baggett, L. S., Bird, B. J., 3ª, I. D., Ruzycki, T. S., & Voggeser, S. M. (2019). Neotropical cloud forests and páramo to contract and dry from declines in cloud immersion and frost. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213155>
- Herzog, S., Masrtínez, R., Jorgensen, P., & Tiessen, H. (2012). Cambio Climático y Biodiversidad en los Andes Tropicales. En *Cambio Climático y Biodiversidad en los Andes Tropicales*. Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global (IAI) Sao José dos Campos y Comité Científico sobre problemas del Medio Ambiente (SCOPE), Paris. 426 pp.
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & 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>
- Hofstede, R. (2014). *Los Páramos Andinos ¿Qué Sabemos? Estado de conocimiento sobre el impacto del cambio climático en el ecosistema páramo*. UICN, Quito, Ecuador.
- Hofstede, R., Segarra, P., & Mena Vásconez, P. (2003). *Los Páramos del Mundo. Proyecto AtlasMundial de los Páramos*. Global Peatland Initiative/NC-UICN/EcoCiencia. Quito
- Ibarra, I., Lebgue, T., Viramontes, O., Reyes, I., Ortega, J., & Morales, C. (2016). Modelo de nicho fundamental para *Coryphantha chihuahuensis* ( Cactaceae ) en el estado de Chihuahua , México fundamental niche model of *Coryphantha chihuahuensis* ( Cactaceae ) in the state of Chihuahua , México. 15(1), 9–16.
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, C. (2015). *Escenarios de Cambio Climático para Precipitación y Temperatura para Colombia 2011-2100. Herramientas Científicas para la Toma de*

Decisiones-Estudio Técnico Completo. Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático, 207 pp.

IDEAM, PNUD, MADS, DNP, C. (2017). Tercera comunicación nacional de Colombia a la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre Cambio Climático (CMNUCC).

IDEAM. (s/f). Cambio Climático - IDEAM. Recuperado el 25 de septiembre de 2018, de <http://www.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/cambio-climatico>

IDEAM, MINAMBIENTE, & PNUD. (2002). Páramos y Ecosistemas Alto Andinos de Colombia en condición Hot Spot & Global Climatic Tensor. IDEAM Eds. 387 pp.

IPCC. (2013). Cambio Climático Bases físicas. Contribución del grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Resumen para responsables de políticas.

IPCC. (2014). Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Resumen para responsables de políticas. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

Korner, C. (2003). Alpine plant life: functional plant ecology of high mountain ecosystems, 2nd edn. Springer, Berlin..

Laegard, S. (1992). Influence of fire on the grass Páramo vegetation of Ecuador. En H. & J. L. (eds. . Balslev (Ed.), Paramo: An Andean Ecosystem under Human Influence. Academic Press.

Leal, O., Mendoza, M., Pérez, D., Geneletti, D., & López, E. (2012). Distribución potencial del *Pinus martinezii*: un modelo espacial basado en conocimiento ecológico y análisis multicriterio Potential distribution of *Pinus martinezii* : an spatial model based in ecological knowledge and muticriteria analysis. 1152–1170. <https://doi.org/10.7550/rmb.27199>

- Llambí, L. D., Soto-W, A., Célleri, R., De Bievre, B., Ochoa, B., & Borja, P. (2012). Páramos Andinos Ecología, hidrología y suelos de páramos. Proyecto Páramo Andino MAE. 2013. Mapa de vegetación del Ecuador Continental. Quito: Ministerio del Ambiente del Ecuador, Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo, Sistema Nacional de Información.
- López-Sandoval, J., López-Mata, L., Cruz-Cárdenas, G., Vibrans, H., Vargas, O., & Martínez, M. (2015). Modelado de los Factores Ambientales que determinan la Distribución de Especies Sinantrópicas de *Physalis*. *Botanical Sciences* 93(4):755-764. <https://doi.org/10.17129/botsci.192>
- Mateo, R. G., Felicísimo, Á. M., & Muñoz, J. (2011). Modelos de Distribución de Especies: Una Revisión Sintética. En *Revista Chilena de Historia Natural* (Vol. 84). [http://digital.csic.es/bitstream/10261/78890/1/modelos\\_RCHN\\_2011.pdf](http://digital.csic.es/bitstream/10261/78890/1/modelos_RCHN_2011.pdf)
- Mateo, R. G., Felicísimo, Á. M., & Muñoz, J. (2012). Modelos de distribución de especies y su potencialidad como recurso educativo interdisciplinar. *Reduca (Biología)*. Serie Ecología, 5(1), 137–153. <http://revistareduca.es/index.php/biologia/article/viewFile/881/1030>
- Mavares, J. (2018). Los frailejones, una de las especies que más “rápido” evolucionan en el mundo. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. <https://www.utadeo.edu.co/es/noticia/destacadas/home/1/los-frailejones-una-de-las-especies-que-mas-rapido-evolucionan-en-el-mundo>
- Mavares, M. (2013). Los frailejones son importantes para la medicina y la regulación hídrica., *Diario el tiempo C.A2*.
- Mavárez, J., Bézy, S., Goeury, T., Fernández, A., & Aubert, S. (2018). Current and future distributions of Espeletiinae (Asteraceae) in the Venezuelan Andes based on statistical downscaling of climatic variables and niche modelling. *Plant Ecology and Diversity*, 12(40), 1–15. <https://doi.org/10.1080/17550874.2018.1549599>

Mena, V. P., & Medina, G. (2001). La Biodiversidad de los Páramos en el Ecuador. Los Páramos del Ecuador, particularidades, problemas y perspectivas. Abya Yala/Proyecto Páramo. (P. G. & R. H. (Eds. . Mena, V., Medina (ed.)).

Resolución 839 de 2003, (2003).  
[http://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/Paramos/res\\_0839\\_010803.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/Paramos/res_0839_010803.pdf)

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2012). Política Nacional para la Gestión integral de la Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos |<http://www.minambiente.gov.co/index.php/bosques-biodiversidad-y-servicios-ecosistemicos/politica-nacional-de-biodiversidad#documentos>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014). Decreto Ley 2811 de 1978.  
<http://parquearvi.org/wp-content/uploads/2016/11/Decreto-Ley-2811-de-1974.pdf>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Decreto Único Reglamentario 1076 de 2015. <http://www.parquesnacionales.gov.co/portal/wp-content/uploads/2013/08/Decreto-Unico-Reglamentario-Sector-Ambiental-1076-Mayo-2015.pdf>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018). Resolución 1398 de 2018 Chiles Cumbal.pdf.

Ministerio del Medio Ambiente. (2002). Resolución 769 de 2001.  
<http://corponarino.gov.co/expedientes/juridica/2002resolucion769.pdf>

Montealegre, E. (2009). Estudio de la Variabilidad climática de la precipitación en Colombia asociada a procesos oceánicos y atmosféricos de meso y gran escala. Nota Técnica IDEAM, IDEAM -METEO/022-2009, Bogotá D.C.

- Murcia, F., Gutierrez, J., Dorado, J., Mendoza, J., Martínez, C., Rojas, M., Hernández, D., & Rodríguez, M. (2015). Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011-2100. Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones. IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA. Bogotá: Colombia. Disponible en [http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022964/documento\\_nacional\\_departamental.pdf](http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022964/documento_nacional_departamental.pdf)
- Navarro-Racines, C., Tarapues, J., Thornton, P. et al. (2020). High-resolution and bias-corrected CMIP5 projections for climate change impact assessments.
- Navarro-Racines, C., Tarapues, J., Thornton, P., Jarvis, A., & Ramirez-Villegas, J. (2020). High-resolution and bias-corrected CMIP5 projections for climate change impact assessments. *Scientific Data*, 7(1), 7. <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0343-8>
- Osinfor. (2013). Modelamiento Espacial de Nichos Ecológicos para la evaluación de presencia de Especies Forestales Maderables en la Amazonía Peruana. Recuperado de <https://www.osinfor.gob.pe/publicaciones/modelamiento-espacial-de-nichos-ecologicos-para-la-evaluacion-de-presencia-de-especies-forestales-maderables-en-la-amazonia-peruana/>
- Pearson, R. G., & Dawson, T. P. (2003). Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? *Global Ecology and Biogeography*, 12(5), 361–371. <https://doi.org/10.1046/j.1466-822X.2003.00042.x>
- Peñuelas, J., & Boada, M. (2003). A global change-induced biome shift in the Montseny mountains (NE Spain). *Global Change Biology* 9:131-140.
- Pérez, N. (2013). Inferencia espacial y predicción de la distribución de plantas: un estudio a diferentes escalas. Universidad de Barcelona. Departamento de Biología Vegetal. 264 pp.
- Peyre, G., Balslev, H., & Font, X. (2018). Phytoregionalisation of the Andean páramo. *PeerJ*, 6(6), e4786. <https://doi.org/10.7717/PEERJ.4786>

- Phillips, S., Anderson, R., & Schapire, R. (2006). Modelling and analysis of the atmospheric nitrogen deposition in North Carolina. *International Journal of Global Environmental Issues*, 6(2–3), 231–252. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- 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>
- Pliscoff, P., & Fuentes-Castillo, T. (2011). Modelación de la distribución de especies y ecosistemas en el tiempo y en el espacio: una revisión de las nuevas herramientas y enfoques disponibles. *Revista de Geografía Norte Grande*, 48, 61–79. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30018455005>
- Pounds, J. A., Bustamante, M. R., Coloma, L. A., Consuegra, J. A., Fogden, M. P. L., Foster, P. N., La Marca, E., Masters, K. L., Merino-Viteri, A., Puschendorf, R., Ron, S. R., Sánchez-Azofeifa, G. A., Still, C. J., & Young, B. E. (2006). Widespread amphibian extinctions from epidemic disease driven by global warming. *Nature*, 439(7073), 161–167. <https://doi.org/10.1038/nature04246>
- Ramirez-Villegas, J., Cuesta, F., Devenish, C., Peralvo, M., Jarvis, A., & Arnillas, C. A. (2014). Using species distributions models for designing conservation strategies of Tropical Andean biodiversity under climate change. *Journal for Nature Conservation*, 22(5), 391–404. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2014.03.007>
- Rangel-Ch, J. O. (2000). La región paramuna y franja aledaña en Colombia. En: Rangel-Ch, J. O. (ed.). *Colombia Diversidad Biótica III. La región de vida paramuna.*, III(February 2000), 1–23.
- Rodrigues, P., Silva, J. O., Eisenlohr, P. V., & Schaefer, C. (2015). Climate change effects on the geographic distribution of specialist tree species of the Brazilian tropical dry forests. 75(3),

679–684.

Rodríguez, M. E. (2009). Influencia de la precipitación horizontal y otras variables en la distribución de la vegetación en un gradiente altitudinal del PNN Chingaza. Universidad de los Andes. Tesis prgrado Biología. URI: <http://hdl.handle.net/1992/20704>

Rodríguez, R., Tigmasa, N., García, K., Pazmiño, R., & Caamaño, R. (2017). *Espeletia pycnophylla* subsp. *angelensis*, el ángel del norte. <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:bgjZGXRwY-cJ:revistabionatura.com/2017.02.01.10.html+&cd=1&hl=es-419&ct=clnk&gl=co>

Rojas, J. E., Varela, A., & Osher, K. (2018). Plan de Conservación y Manejo de las especies de Frailejones presentes en el territorio de la CAR. Pontificia Universidad Javeriana. Corporación Autónoma regional de Cundinamarca. 200 pp.

Rumpf, S. B., Hülber, K., Klonner, G., Moser, D., Schütz, M., Wessely, J., Willner, W., Zimmermann, N., & Dullinger, S. (2018). Range dynamics of mountain plants decrease with elevation. 115(8). <https://doi.org/10.1073/pnas.1713936115>

Sanz-Elorza, M., Elías, D., Gonzalez, A., & Sobrino, E. (2003). Changes in the High-mountain Vegetation of the Central Iberian Peninsula as a Probable Sign of Global Warming. <https://doi.org/10.1093/aob/mcg130>

Sarmiento, C., Cadena, C., Sarmiento, M., & Zapata, J. (2013). Aportes a la conservación estratégica de los páramos de Colombia. Actualización de la cartografía de los complejos de páramo a escala 1:100.000. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, D.C. Colombia

Scheldeman, X., & Van Zonneveld, M. (2011). Manual de Capacitación en Análisis Espacial de Diversidad y Distribución de Plantas. Biodiversity International, Rome, Italy. 179 pp.

- Sierra-Almeida, A., & Cavieres, L. A. (2010). Summer freezing resistance decreased in high-elevation plants exposed to experimental warming in the central Chilean Andes. *Oecologia*, 163(1), 267–276. <https://doi.org/10.1007/s00442-010-1592-6>
- Sklenár, P. (2005). *Flora Genérica de los Páramos. Guía Ilustrada de las Plantas Vasculares*. New York: New York Botanical Garden Press.
- Solarte, M. A. (2016). Estudio Técnico, Económico, Social y Ambiental para la Identificación y Delimitación a escala 1:100.000 del Complejo de Páramos Chiles-Cumbal.
- Valencia, J. B., Mesa, J., León, J. G., Madriñán, S., & Cortés, A. J. (2020). Climate Vulnerability Assessment of the Espeletia Complex on Páramo Sky Islands in the Northern Andes. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 0, 309. <https://doi.org/10.3389/FEVO.2020.565708>
- Van der Hammen, T., Pabón, J. D., Gutiérrez, H., & Alarcon, J. C. (2018). El Cambio Global y los Ecosistemas de Alta Montaña de Colombia. En: Páramos y Ecosistemas Altoandinos de Colombia en Condiciones HotSpot & Global Climatic Tensor (pp. 163-209).
- Vargas, O. (2016). Distribución Altitudinal, papel en los Ecosistemas y Amenazas de las poblaciones del Género *Espeletia* (Asteráceae) en Colombia. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad de Ciencias y Educación. 62 pp.
- Viancha, A. (2012). Modelo de distribución de *Quercus humboldtii* (BONPL.) En Colombia. Congreso Latinoamericano y II nacional de Alta Montaña Tropical: Desafíos ante el Cambio Climático de los Ecosistemas de Bosque Altoandino, Páramos y Glaciar, 197.
- Vuille, M., & Keimig, F. (2004). Interannual Variability of Summertime Convective Cloudiness and Precipitation in the Central Andes Derived from ISCCP-B3 Data.
- WorldClim. (1991). Bioclimatic variables | WorldClim - Global Climate Data. <http://www.worldclim.org/bioclim>

Zavaleta, E. S., Shaw, M. R., Chiariello, N. R., Mooney, H. A., & Field, C. B. (2003). Additive effects of simulated climate changes, elevated CO<sub>2</sub>, and nitrogen deposition on grassland diversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(13), 7650–7654. <https://doi.org/10.1073/PNAS.0932734100>

## ANEXOS

### Anexo 1. Tabla de Correlación de Variables Bioclimáticas

	BIO 1	BIO2	BIO3	BIO4	BIO5	BIO6	BIO7	BIO8	BIO9	BIO10	BIO11	BIO12	BIO13	BIO14	BIO15	BIO16	BIO17	BIO18	BIO19
BIO 1	1																		
BIO2	-0,31261148	1																	
BIO3	0,12096881	0,15117133	1																
BIO4	-0,2323635	0,42011164	-0,564238036	1															
BIO5	<b>0,9976527</b>	-0,25463829	0,106711488	-0,198908559	1														
BIO6	<b>0,99530385</b>	-0,39668839	0,132643761	-0,289209455	<b>0,987033199</b>	1													
BIO7	-0,35220429	<b>0,94046441</b>	-0,193795347	0,611445076	-0,289754908	-0,43962795	1												
BIO8	<b>0,99457422</b>	-0,26655847	0,081467215	-0,16673041	<b>0,996009219</b>	<b>0,98382769</b>	-0,292972344	1											
BIO9	<b>0,99720841</b>	-0,32121488	0,125646771	-0,272454217	<b>0,994353078</b>	<b>0,99391223</b>	-0,362369796	<b>0,99047435</b>	1										
BIO10	<b>0,99990684</b>	-0,31174314	0,112247671	-0,223502515	<b>0,997816935</b>	<b>0,99480924</b>	-0,348336164	<b>0,99478487</b>	<b>0,99666704</b>	1									
BIO11	<b>0,998819</b>	-0,33488775	0,140267366	-0,278128234	<b>0,994645536</b>	<b>0,99730665</b>	-0,380973052	<b>0,99013861</b>	<b>0,99810118</b>	<b>0,99836445</b>	1								
BIO12	0,21118943	-0,64932251	-0,143750828	-0,375162242	0,178143564	0,26692188	-0,594744451	0,1905086	0,24635029	0,20998197	0,23260256	1							
BIO13	0,48531258	-0,69822383	0,049022481	-0,65119681	0,449486802	0,54091499	-0,710146864	0,45098539	0,52136439	0,48226937	0,51578471	<b>0,867279732</b>	1						
BIO14	-0,2477229	-0,32466367	-0,248735523	0,06515532	-0,268158512	-0,21211566	-0,235730183	-0,23900605	-0,22744477	-0,24624372	-0,24398769	0,766597901	0,420602918	1					
BIO15	0,67516577	-0,25640534	0,346727786	-0,621198756	0,664670594	0,68656909	-0,374554211	0,63450311	0,68427418	0,67090911	0,69629649	-0,090321753	0,375982017	-0,660311147	1				
BIO16	0,47272745	-0,72364599	0,010044784	-0,617350315	0,436418814	0,53059321	-0,721724753	0,43469728	0,50946731	0,4700974	0,50219678	<b>0,904056287</b>	<b>0,9805936</b>	0,458543177	0,330945977	1			
BIO17	-0,29150329	-0,2192571	-0,32364763	0,166817884	-0,302954043	-0,26659856	-0,105568947	-0,27075843	-0,26927541	-0,2902766	-0,29223393	0,727862542	0,335796211	<b>0,952747447</b>	-0,716256185	0,38062247	1		
BIO18	0,35553049	-0,65255865	-0,06607744	-0,517776668	0,322408365	0,40740946	-0,625177614	0,33262621	0,39558216	0,35352134	0,38213698	<b>0,957737201</b>	<b>0,952791452</b>	0,601603085	0,147497681	<b>0,96819925</b>	0,54909748	1	
BIO19	-0,26763868	-0,16485235	-0,339787386	0,164591497	-0,274437515	-0,24981397	-0,046083176	-0,24280104	-0,23615437	-0,26686241	-0,2690501	0,708412041	0,327637767	<b>0,920770407</b>	-0,687111796	0,37188559	<b>0,98321029</b>	0,5442342	1