

PROYECTO JARDINES COMUNES Y GUÍA DE LOS FRAILEJONES DEL PÁRAMO DE SUMAPAZ

CO-INVESTIGADORES:

Iván Jiménez

Scientist, Center for Conservation and Sustainable Development, Missouri Botanical Garden

Erika Benavides

Finca Milmesetas, vereda Alto del Molino, Pasca, Sumapaz, Cundinamarca, Colombia

Moisés Penagos

Finca El Carmen, vereda Quebradas, Pasca, Sumapaz, Cundinamarca, Colombia

Marco Pardo

Jefe, Parque Nacional Natural Sumapaz, Parques Nacionales Naturales de Colombia

Yulieth N. Ávila

Profesional de Monitoreo e Investigación, Parque Nacional Natural Sumapaz, Parques Nacionales Naturales de Colombia

Luz D. Rodríguez

Profesional Universitario, Parque Nacional Natural Sumapaz, Parques Nacionales Naturales de Colombia

DURACIÓN: 98 MESES

PRESUPUESTO REQUERIDO:

\$ 336.000.000 (treientos treinta y seis millones de pesos colombianos)

30 DE SEPTIEMBRE, 2020

CONTENIDO

CONTENIDO	2
RESUMEN	4
1. INTRODUCCIÓN	6
1.1. La importancia biológica de los frailejones	7
1.2. La importancia de, y dificultad para, identificar las especies de frailejones	8
2. OBJETIVOS	9
3. JARDINES COMUNES, HIPÓTESIS Y PREDICCIONES	10
4. MÉTODOS	10
4.1. Participación de las comunidades campesinas del Sumapaz	10
4.2. Estudiantes del PEAMA para las zonas rurales de la región del Sumapaz	12
4.3. Análisis de dominio inicial	13
4.3.1. <i>Presentación de los grupos de frailejones</i>	14
4.3.2. <i>Búsqueda de características diagnósticas</i>	15
4.3.3. <i>Revisión de la definición y descripción de los grupos de frailejones</i>	15
4.3.4. <i>Resumen de los hallazgos</i>	16
4.4. Jardines comunes	16
4.4.1. <i>Colección y medición de plantas madre</i>	17
4.4.2. <i>Seguimiento y cuidado de las plantas en los jardines comunes</i>	18
4.4.2.1. <i>Siembra de semillas</i>	20
4.4.2.2. <i>Semillas y plántulas en bandejas de germinación</i>	20
4.4.2.3. <i>Primer trasplante</i>	20
4.4.2.4. <i>Plántulas después del primer trasplante</i>	21
4.4.2.5. <i>Segundo trasplante</i>	21
4.4.2.6. <i>Plantas después del segundo trasplante</i>	21
4.4.2.7. <i>Tercer trasplante</i>	22
4.4.2.8. <i>Plantas después del tercer trasplante</i>	22

4.4.2.9. <i>Trasplante final</i>	22
4.4.2.10. <i>Plantas después del trasplante final</i>	22
4.4.2.11. <i>Plantas después de cinco años</i>	23
4.4.3. <i>Medición de las plantas en los jardines comunes</i>	24
4.4.4. <i>Análisis de datos de los jardines comunes</i>	25
4.4.4.1. <i>Asignación de plantas madre a grupos fenotípicos</i>	25
4.4.4.2. <i>Concordancia fenotípica entre juveniles y plantas madre</i>	25
4.4.4.3. <i>Concordancia fenotípica entre plantas adultas y plantas madre</i>	27
4.5. Análisis de dominio final	28
4.5.1. <i>Presentación de las especies de frailejones del Sumapaz</i>	28
4.5.2. <i>Búsqueda de características diagnósticas</i>	29
4.5.3. <i>Revisión de la descripción de las especies</i>	29
4.5.4. <i>Resumen de los hallazgos</i>	29
4.6. Guía de las especies de frailejones del Sumapaz	30
4.7. Comunicación y Divulgación	31
5. RESULTADOS ESPERADOS	31
5.1. <i>Delimitación de las especies de frailejones del páramo de Sumapaz</i>	32
5.2. <i>Empoderamiento de las comunidades campesinas del Sumapaz</i>	33
6. RELACIÓN CON OTROS PROYECTOS Y EXTENSIONES	34
6.1. <i>Modelos demográficos de distribución geográfica</i>	34
6.2. <i>Restauración ecológica del páramo</i>	34
6.3. <i>Extensión a otros páramos</i>	35
7. CRONOGRAMA	36
8. RESPONSABILIDADES DEL PERSONAL DEL PROYECTO	37
9. PRESUPUESTO	38
10. LITERATURA CITADA	39
11. FIGURAS	50

RESUMEN

El proyecto descrito en esta propuesta forma parte de una investigación a largo plazo sobre las respuestas de los frailejones al cambio global, incluyendo el cambio climático y la transformación de hábitats para uso humano. La investigación a largo plazo inició en el año 2017 y es una colaboración entre Parques Nacionales Naturales de Colombia, el Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis y el Missouri Botanical Garden. Esta iniciativa enfatiza la investigación participativa, con proyectos puntuales dirigidos a entender los impactos bióticos del cambio global en el páramo de Sumapaz, a partir del intercambio de ideas entre comunidades campesinas, entidades encargadas de temas ambientales e instituciones académicas.

La investigación a largo plazo tiene como principal objeto de estudio los frailejones, plantas de la familia Asteraceae que son endémicas al norte de los Andes y dominan la vegetación en ecosistemas de alta montaña. Este énfasis en los frailejones deriva de dos características de estas plantas. Primero, los frailejones son particularmente vulnerables al cambio global porque tienen rangos geográficos restringidos, crecen en rangos altitudinales estrechos, tienen una habilidad de dispersión muy limitada y son afectados negativamente por la transformación de hábitats para uso humano. Además, están restringidos a las partes altas de las montañas, donde el cambio global podría causar “extinción en las cumbres” (Figura 1). Segundo, los frailejones tienen impactos ecológicos importantes porque son dominantes en los páramos y por ende determinan la estructura y función de estos ecosistemas a través de interacciones inter-específicas y de procesos como la evapotranspiración, interceptación de agua y retención de agua en el suelo, y la retención de carbono orgánico en el suelo.

La vulnerabilidad e importancia ecológica de los frailejones ha generado especial interés en el monitoreo de estas plantas como herramienta para evaluar las estrategias de manejo de la biodiversidad de los páramos. Desafortunadamente, la tarea de monitorear y evaluar el estado de conservación de las especies de frailejones es problemática, porque identificar las especies de frailejones es particularmente difícil debido a la hibridación entre especies. Como parte de la investigación a largo plazo a la que el proyecto aquí descrito pertenece, entre los años 2017 y 2019 realizamos un estudio de la delimitación de especies de frailejones del páramo de Sumapaz, incluyendo un muestreo intensivo de especímenes y mediciones fenotípicas y genómicas (1). Los resultados indican que los frailejones del Sumapaz forman un “singameón”: un grupo de especies que, a pesar de intercambiar genes frecuentemente por medio de la hibridación, se distinguen fenotípicamente entre sí y constituyen unidades ecológicas y evolutivas distintas.

El objetivo del proyecto aquí descrito es esclarecer los límites de las especies de frailejones del Sumapaz y, así, proveer la base fundamental para el monitoreo de estas plantas, concebidas como especies prioritarias y, por lo tanto, como indicadores para evaluar las estrategias de manejo de la biodiversidad de los páramos. Para lograr este objetivo general nos enfocaremos en

cumplir dos objetivos específicos. El primer objetivo específico es determinar si los grupos fenotípicos de frailejones del páramo de Sumapaz identificados en nuestro trabajo anterior (1) corresponden a i) especies o ii) variación fenotípica dentro de una misma especie inducida por el ambiente (i.e., plasticidad fenotípica). El segundo objetivo específico es producir una guía de las especies de frailejones del Sumapaz, basada en los resultados anteriores (1) y, también, en los resultados obtenidos tras cumplir el primer objetivo específico del proyecto.

Para cumplir el primer objetivo específico del proyecto estableceremos “jardines comunes”, donde cultivaremos por cinco años la progenie de plantas madre pertenecientes a diferentes grupos fenotípicos de frailejones para poner a prueba dos hipótesis. La hipótesis según la cual los grupos fenotípicos son especies predice que habrá diferencias fenotípicas entre la progenie de diferentes grupos fenotípicos (Figura 2), porque tales diferencias tienen una base genética y, por lo tanto, no desaparecerán en un ambiente común. En contraste, la hipótesis según la cual los grupos fenotípicos reflejan variación fenotípica dentro de una misma especie inducida por el ambiente predice que no habrá diferencias entre la progenie de diferentes grupos fenotípicos (Figura 2), porque tales diferencias se deben a plasticidad fenotípica y, por lo tanto, desaparecerán en un ambiente común.

Para cumplir el segundo objetivo específico del proyecto elaboraremos una guía para la identificación de las especies de frailejones del Sumapaz, que estará disponible gratuitamente en un sitio de internet. La guía tendrá secciones dirigidas al público general y, también, a audiencias más especializadas de estudiantes, profesionales y entusiastas de las ciencias naturales. Incluirá descripciones de fenotipos de plantas juveniles y adultas, mapas de distribución y notas sobre fenología de cada especie en el páramo de Sumapaz. Toda la información en la guía estará basada explícitamente en especímenes depositados en el herbario del Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis y otras instituciones. Un elemento importante de la guía, principalmente dirigido a una audiencia especializada e interesada en el monitoreo de frailejones, será una clave interactiva para la identificación de los frailejones del Sumapaz. La guía se diseñará y construirá a medida que avanza el proyecto. Una primera versión de la guía se elaborará al inicio del proyecto, con base en la información existente. A medida que se desarrolla el proyecto se adicionará información sobre fenotipos, distribución y fenología obtenida durante las salidas de campo y en los jardines comunes. La última versión de la guía estará disponible al final del proyecto, y se realizará con base en los resultados de poner prueba las hipótesis sobre las especies de los frailejones en los jardines comunes.

Los jardines comunes y la guía de especies de frailejones del Sumapaz se realizarán con la participación de campesinos del Sumapaz, estudiantes del PEAMA de la Universidad Nacional, así como representantes del Jardín Botánico de Bogotá, Parques Nacionales Naturales de Colombia, y del Missouri Botanical Garden. Implementaremos métodos de la investigación participativa para describir las especies de frailejones del Sumapaz combinando tradiciones complementarias de conocimiento. Durante toda la ejecución del proyecto se fomentará el intercambio de conocimiento entre las comunidades campesinas, entidades encargadas de temas ambientales e instituciones académicas, y la búsqueda de sinergias entre estas formas de conocimiento que permitan entender mejor la compleja naturaleza de las especies de frailejones.

1. INTRODUCCIÓN

El proyecto descrito en esta propuesta forma parte de una investigación a largo plazo que se enfoca en estudiar la respuesta de especies de las partes altas de las montañas tropicales al cambio global, incluyendo el cambio climático y la transformación de hábitats para uso humano. Este es un tema central en ecología y biología de la conservación porque el cambio climático es una de las principales amenazas para la biodiversidad y la provisión de servicios ecosistémicos (2, 3), con profundas implicaciones para el manejo de áreas protegidas (4–7) y el bienestar de las poblaciones humanas (8, 9). La transformación de hábitats para uso humano es una amenaza de magnitud similar (10, 11) que interactúa con el cambio climático afectando la biodiversidad y la integridad de los ecosistemas (12, 13). El efecto combinado del cambio climático y la transformación de hábitats para uso humano (i.e., el cambio global) sobre las montañas tropicales es de interés especial, porque en estas montañas se concentra una proporción excepcionalmente alta de la biodiversidad global (14–16). La investigación a largo plazo enfatiza las partes altas de las montañas tropicales porque allí el cambio climático, exacerbado por la alteración de hábitats para uso humano, podría causar la extinción de un número particularmente alto de especies (17–19), un fenómeno conocido como “extinción en las cumbres” (Figura 1). Estas extinciones podrían tener efectos negativos importantes en la provisión de servicios ecosistémicos, en especial la retención de carbono y la provisión de agua para la agricultura y el consumo humano (20).

La investigación a largo plazo inició en el año 2017 como una colaboración entre el Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis, Parques Nacionales Naturales de Colombia y el Missouri Botanical Garden, y se ha venido desarrollando en el marco del Convenio Interadministrativo 017 de año 2017 entre Parques Nacionales de Colombia y el Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis. Esta investigación busca crear y desarrollar proyectos puntuales dirigidos a entender los impactos bióticos del cambio global en el páramo de Sumapaz, a partir del intercambio de ideas entre comunidades campesinas del Sumapaz que han expresado su interés en investigaciones sobre el medio ambiente y la biodiversidad (21, 22), entidades encargadas de temas ambientales y generación de conocimiento como el Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis y Parques Nacionales Naturales de Colombia, e instituciones académicas como el Missouri Botanical Garden y la Universidad Nacional de Colombia, especialmente su Programa Especial de Admisión y Movilidad Académica (PEAMA) para las zonas rurales de la región de Sumapaz (23).

Para construir interacciones colaborativas entre diversos actores, este proyecto utiliza principios de la investigación participativa (24, 25) y fomenta simultáneamente el avance de la ciencia dirigida al manejo racional de los recursos naturales y el empoderamiento de las comunidades campesinas a través de la apropiación del conocimiento científico. La investigación participativa es de particular interés en este contexto porque promueve el intercambio y combinación de tradiciones complementarias de conocimiento entre las comunidades campesinas, entidades ambientales e instituciones académicas. Además, la investigación participativa y la apropiación del conocimiento científico sobre el medio ambiente promueven el sentido de pertenencia al

territorio, e incrementan la capacidad de las comunidades campesinas para valorar y evaluar el estado de conservación de los ecosistemas, y para manejar los recursos naturales de forma sostenible (página 243 en 21, página 290 en 22, capítulo 28 en 24).

La investigación a largo plazo tiene como principal objeto de estudio los frailejones, plantas endémicas al norte de los Andes (26–30) que dominan la vegetación en ecosistemas de alta montaña llamados páramos (31). La taxonomía actual reconoce 144 especies de frailejones que se encuentran en su mayoría restringidas a elevaciones > 3000 m en los Andes de Venezuela, Colombia y el norte de Ecuador (28, 30). Estas especies conforman la tribu Espeletiinae de la familia Asteraceae. **Dos características de los frailejones son particularmente importantes desde el punto de vista de la conservación de la biodiversidad, como se explica en la siguiente sección.**

1.1. La importancia biológica de los frailejones

Primero, **los frailejones son particularmente vulnerables al cambio global (incluyendo el cambio climático y la transformación de hábitats para uso humano)**. Incluso las especies de frailejones que son localmente comunes tienen rangos geográficos restringidos (32), crecen en rangos altitudinales estrechos (33, 34) y tienen una habilidad de dispersión muy limitada (35, 36). Estas características incrementan la vulnerabilidad al cambio climático (37, 38). Aún más, el hábitat de los frailejones podría desplazarse 400–500 m en elevación hacia la parte alta de las montañas debido al cambio climático entre los años 2000 y 2050 (39), causando grandes pérdidas del área de distribución de estas especies que pueden causar “extinción en las cumbres” (Figura 1), tal como ha ocurrido con otras especies de alta montaña (17–19, 40–44). El cambio climático ya podría haber incrementado la mortalidad de los frailejones a través de un incremento en la herbivoría y el parasitismo (45, 46). Los frailejones también son afectados negativamente por la transformación de hábitats para uso humano, incluyendo cultivos (32, 39, 46–48), quemas, pastoreo (49–56) y minería (47, 48, 57). La recuperación de las poblaciones de *Espeletia* después de estos disturbios puede tardar 6–15 años (58, 59), en parte debido a tasas bajas de crecimiento individual y alta longevidad (60–64).

Segundo, **los frailejones tienen impactos ecológicos importantes**. Los frailejones son plantas dominantes en los páramos (65–67) y por ende influyen en gran medida la estructura y función de estos ecosistemas. Varios estudios sugieren que generalmente las especies dominantes son muy importantes para el funcionamiento de los ecosistemas (68–76). Los frailejones influyen en el funcionamiento de los páramos a través de interacciones inter-específicas (77–79) además de la evapotranspiración, interceptación de agua y retención de agua en el suelo (80–82), y la retención de carbono orgánico en el suelo (83). Por lo tanto, los frailejones son importantes en la provisión de servicios ecosistémicos, particularmente la retención de carbono y el surtimiento de agua potable a grandes poblaciones humanas en los Andes del norte (20, 84).

Dadas estas dos características, **los frailejones se han reconocido como plantas de especial interés para evaluar las estrategias de manejo de la biodiversidad de los páramos**. En particular, los frailejones se consideran “Valor Objeto de Conservación” en el Sistema Nacional de Áreas Protegidas de Colombia (e.g., en los Parques Nacionales Naturales Chingaza, El Cocuy, Pisba y en el Santuario de Flora y Fauna Galeras), así como en territorios de la Corporación

Autónoma Regional de Cundinamarca (85). En otras áreas protegidas los frailejones son considerados especies prioritarias (86). **Esto quiere decir que los frailejones deben monitorearse:** estudiarse periódicamente para medir y evaluar los cambios poblacionales que ocurren en el tiempo y el espacio, de manera natural o como consecuencia de intervenciones humanas deliberadas o involuntarias. Por ejemplo, el Plan de Monitoreo del Parque Nacional Natural Sumapaz propone la implementación de un protocolo de línea base para identificar las especies de frailejones presentes en el área protegida, el estado de conservación de sus poblaciones y las presiones que estas poblaciones enfrentan para su conservación (86).

1.2. La importancia de, y dificultad para, identificar las especies de frailejones

La identificación de las especies de frailejones es un aspecto fundamental del monitoreo de las poblaciones de estas plantas. Sin la identificación de especies, no es posible evaluar el estado de conservación de estas plantas y las amenazas que enfrentan. **Las especies se utilizan como unidades básicas para la conservación de la biodiversidad** (87, 88), **bajo la suposición de que son entidades naturales reales, y no simplemente categorías taxonómicas que agrupan organismos arbitrariamente** (89, 90). Más precisamente, las especies se utilizan como unidades básicas para la conservación de la biodiversidad bajo el supuesto de que son grupos de organismos unidos por procesos genéticos (flujo genético) y ecológicos (competencia por recursos) que determinan el futuro de las poblaciones (91), incluyendo respuestas futuras al cambio global (90). Así, características genéticas y ecológicas de las especies (e.g., tamaño poblacional, uso de diferentes hábitats, distribución geográfica) se utilizan para estimar su riesgo de extinción en el futuro (92). Tales estimados del riesgo de extinción son la base para expresar el estado de conservación de las especies utilizando categorías como “en peligro crítico”, “en peligro” y “vulnerable” (93).

Desafortunadamente, la tarea de monitorear y evaluar el estado de conservación de las especies de frailejones es problemática, porque identificar las especies de frailejones es particularmente difícil. Esto se debe a la historia evolutiva de los frailejones, marcada por la formación rápida y reciente de especies (94). Un estudio detallado indica que todas las especies de frailejones se formaron durante los últimos 2.6 millones de años, muchas de ellas en los últimos 500,000 años (30). Poco tiempo en comparación con los periodos de diversificación de especies en otros grupos de organismos. Por lo tanto, se sospecha que muchas especies de frailejones son incipientes, es decir, que aún están en las fases finales del proceso de especiación (formación de especies) y que no están reproductivamente aisladas entre sí. De hecho, hay bastante evidencia de que **las especies de frailejones se entrecruzan frecuentemente y producen híbridos viables y fértiles** (28–30, 33, 95). Tal hibridación complica la definición de los límites de las especies de frailejones (prefacio por Harold Robinson en 28) y, por lo tanto, su identificación.

Como parte de la investigación a largo plazo a la que este proyecto pertenece, entre los años 2017 y 2019 **realizamos un estudio sobre la naturaleza de las especies de los frailejones del páramo de Sumapaz** (1). Este estudio se basó en un muestreo intensivo (538 especímenes) y mediciones de caracteres fenotípicos (13 caracteres que describen las hojas y las sinflorescencias) y genéticos (2,098 polimorfismos de un solo nucleótido), y **sus resultados son**

consistentes con la idea de que la hibridación es un fenómeno importante en los frailejones. En particular, los análisis que realizamos para este estudio detectaron seis grupos fenotípicos y sólo tres grupos genómicos poco diferenciados y con altos niveles de intercambio genético. Estos resultados **sugieren que los frailejones del Sumapaz forman un “singameón”**. Un singameón es un grupo de especies que, a pesar de intercambiar genes frecuentemente, se distinguen fenotípicamente entre sí y constituyen unidades ecológicas y evolutivas separadas (96–103). Las diferencias fenotípicas entre las especies de un singameón pueden estar basadas en diferencias en unos pocos genes que se mantienen por presiones de selección fuertes, mientras que el resto del genoma es homogeneizado por la introgresión entre especies, es decir por la hibridación y el posterior cruce de los híbridos con las líneas parentales (104, 105). Por lo tanto, las diferencias genéticas entre las especies de un singameón no siempre pueden detectarse en análisis de muestras aleatorias de genes a través de todo el genoma, como los que realizamos para estudiar los frailejones del Sumapaz (1).

Los resultados de nuestro estudio también indican que **las especies de frailejones que forman un singameón en el páramo de Sumapaz no corresponden a las especies taxonómicas actualmente aceptadas**, descritas en el último trabajo monográfico sobre estas plantas (28). **Tales resultados ponen de manifiesto que la taxonomía actualmente aceptada no provee una base apropiada para el monitoreo de los frailejones.** En este contexto es importante distinguir las especies, entendidas como unidades biológicas en la naturaleza, de las especies taxonómicas, entendidas como divisiones en una clasificación de organismos elaborada por taxónomos (106). Nuestros resultados indican que **las especies taxonómicas de frailejones no corresponde a entidades naturales reales, sino a categorías taxonómicas que agrupan organismos arbitrariamente** (1).

2. OBJETIVOS

El objetivo general de este proyecto es esclarecer los límites de las especies de frailejones del Sumapaz y, así, proveer la base fundamental para el monitoreo de estas plantas, concebidas como Valores Objeto de Conservación o especies prioritarias y, por lo tanto, como indicadores para evaluar las estrategias de manejo de la biodiversidad de los páramos. Para lograr este objetivo general, nos enfocaremos en cumplir **dos objetivos específicos**.

El primer objetivo específico es determinar si los seis grupos fenotípicos de frailejones del páramo de Sumapaz que identificamos en el estudio anterior (1) corresponden a i) especies o ii) variación fenotípica dentro de una misma especie inducida por el ambiente (i.e., plasticidad fenotípica). Nuestros análisis sugieren que estos grupos fenotípicos son especies (1), pero es necesario realizar experimentos para determinar con certeza si ese es, en verdad, el caso o no. Para cumplir este objetivo estableceremos “jardines comunes”, donde cultivaremos por cinco años la progenie de plantas madre pertenecientes a los seis diferentes grupos fenotípicos de frailejones detectados en el estudio anterior.

El segundo objetivo específico es producir una guía de las especies de frailejones del Sumapaz, basada en nuestros resultados anteriores (1) y, también, en los resultados obtenidos tras cumplir el primer objetivo específico de este proyecto. Para cumplir este objetivo elaboraremos una guía

que incluirá una clave interactiva para la identificación de las especies de frailejones del Sumapaz.

3. JARDINES COMUNES, HIPÓTESIS Y PREDICCIONES

La **herramienta clásica** que se utiliza en este tipo de investigaciones biológicas se llama “**jardín común**”, y consisten en cultivar la progenie de plantas madre pertenecientes a diferentes grupos fenotípicos en un ambiente común (107). **La hipótesis según la cual los grupos fenotípicos son especies predice** diferencias fenotípicas entre la progenie de diferentes grupos fenotípicos (Figura 2), porque tales diferencias tienen una base genética y, por lo tanto, no desaparecen en un ambiente común. En contraste, **la hipótesis según la cual los grupos fenotípicos reflejan variación fenotípica dentro de una misma especie inducida por el ambiente predice** que no habrá diferencias entre la progenie de diferentes grupos fenotípicos (Figura 2), porque tales diferencias se deben a plasticidad fenotípica y, por lo tanto, deben desaparecer en un ambiente común.

4. MÉTODOS

4.1. Participación de las comunidades campesinas del Sumapaz

Este proyecto se basa en principios de la investigación participativa (24, 25, 108) y, por lo tanto, personas de las comunidades campesinas del Sumapaz han estado participando y participarán en todos los aspectos del proyecto, desde su formulación y diseño hasta su conclusión. La contribución de las comunidades campesinas al proyecto es fundamental para lograr los propósitos de la investigación a largo plazo (ver tercer párrafo de la introducción), en especial el intercambio y combinación de tradiciones complementarias de conocimiento entre las comunidades campesinas, entidades encargadas de temas ambientales e instituciones académicas. La complementariedad de estas tradiciones representa una oportunidad para establecer relaciones de ayuda mutua que simultáneamente avancen la ciencia, contribuyan al manejo racional de los recursos naturales, y empoderen las comunidades campesinas a través de la apropiación del conocimiento científico.

La idea inicial de este proyecto se desarrolló en colaboración con co-investigadores pertenecientes a las comunidades campesinas del Sumapaz (Erika Benavides y Moisés Penagos), y se relaciona al interés de estas comunidades en comprender y valorar su medio ambiente. El interés en conocer los ecosistemas naturales, para usarlos, mantenerlos y preservarlos, es un componente central de la identidad campesina en el Sumapaz y en otras regiones (páginas 208 y 215 en 21, 109, 110). Tal interés ha sido expresado, por ejemplo, en el Plan de Desarrollo Sostenible de la Zona de Reserva Campesina del Sumapaz, que concibe la armonía entre personas y la naturaleza como objetivo del desarrollo rural y enfatiza la conservación de la biodiversidad, el suelo y el agua, así como la capacidad de valorizar el entorno físico, como elementos claves de la viabilidad y el desarrollo medio ambiental (páginas 249 a 250 en 21). Más aún, el Plan de Desarrollo Sostenible de la Zona de Reserva Campesina del Sumapaz señala que la ubicación de las comunidades campesinas en la zona de amortiguamiento del Parque Nacional Natural Sumapaz representa una oportunidad para realizar investigación sobre la biodiversidad del territorio (página 243 en 21), y que tal investigación es clave para el ordenamiento ambiental

(página 272 en 21). De forma similar, el Plan de Desarrollo Sostenible de la Zona de Reserva Campesina de Cabrera resalta la valoración del medio ambiente, y en particular la importancia de la caracterización, el monitoreo y la defensa de la biodiversidad (página 290 en 22). Ambos planes de desarrollo expresan interés en la apropiación del conocimiento científico para incrementar la capacidad de administración de los recursos naturales entre los miembros de las comunidades campesinas (página 243 en 21, página 290 en 22). Este proyecto atiende directamente tal interés de las comunidades campesinas del Sumapaz, porque fomenta la creación y apropiación del conocimiento científico sobre los frailejones, que constituyen uno de los elementos más importantes de los ecosistemas paramunos (ver sección 1.1. sobre la importancia biológica de los frailejones).

Uno de los co-investigadores de las comunidades campesinas del Sumapaz (Moisés Penagos) estará a cargo de un jardín común, situado en un predio familiar dentro del páramo de Sumapaz. Además, a medida que se desarrolla el proyecto, los co-investigadores buscarán oportunidades para que personas de las comunidades campesinas del Sumapaz participen en actividades de investigación, incluyendo las tareas que se llevan a cabo en los jardines comunes (ver sección 4.4 para la descripción de los jardines comunes y las actividades requeridas para su manejo y manutención), los “análisis de dominio” (ver secciones 4.3. y 4.5.) dirigidos a construir la delimitación de especies de frailejones del páramo de Sumapaz y la elaboración de la guía de estas especies (ver sección 4.6.).

El proyecto compensará monetariamente las personas pertenecientes a comunidades campesinas del Sumapaz que participen en el proyecto, según sus contribuciones. Esta compensación monetaria, restringida a personas que no sean estudiantes del PEAMA (ver sección 4.2) y que participen en el proyecto independientemente de otros compromisos laborales, busca crear condiciones suficientes para que las personas puedan involucrarse en la generación, el intercambio y asimilación del conocimiento sobre el medio ambiente. Un mínimo de seguridad material y tiempo disponible es necesario para pensar, deliberar y realizar otras actividades propias de la investigación participativa que conllevan a la creación y apropiación del conocimiento científico, la combinación de tradiciones complementarias de conocimiento, y el empoderamiento de las comunidades campesinas (página 51 en 108).

Por lo tanto, el proyecto cubrirá el costo de la construcción y los materiales básicos requeridos para el jardín común que estará localizado en un predio familiar dentro del páramo de Sumapaz, además compensar a las personas por el espacio ocupado por el jardín común y por el tiempo que inviertan, como sustituto del beneficio económico que derivarían de las actividades que dejen de realizar por alojar y atender el jardín común. El proyecto también cubrirá los costos de desplazamiento de las personas de las comunidades campesinas para su participación en los “análisis de dominio” (ver secciones 4.3. y 4.5.), y los compensará monetariamente por el tiempo invertido en estos análisis. Si se presenta la oportunidad, el proyecto podría también compensar monetariamente personas de las comunidades campesinas que se comprometan a realizar contribuciones específicas a la elaboración de la guía de estas especies de frailejones (ver sección 4.6.).

4.2. Estudiantes del PEAMA para las zonas rurales de la región del Sumapaz

Un aspecto central del proyecto es la participación de estudiantes del Programa Especial de Admisión y Movilidad Académica (PEAMA) de la Universidad Nacional de Colombia para las zonas rurales de la región de Sumapaz, con sede en la vereda Nazareth de la localidad de Sumapaz (Bogotá). El propósito del PEAMA es promover el acceso de los bachilleres de la región del Sumapaz a la educación superior de alta calidad, generando oportunidades para optar por títulos universitarios en carreras relacionadas al medio ambiente (23). Por lo tanto, el PEAMA es una institución clave para el desarrollo medio ambiental de las comunidades campesinas del Sumapaz. Como se discutió en la sección 4.1., el desarrollo medio ambiental es un interés central de estas comunidades (21, 22). En particular, las comunidades campesinas del Sumapaz están interesadas en la formación de profesionales propios de la región que puedan contribuir a su desarrollo (página 244 en 21) y el PEAMA brinda una oportunidad concreta para satisfacer tal interés.

Estudiantes del PEAMA participarán en la exploración y formulación de las hipótesis del proyecto (ver sección 4.3.), la colecta de plantas madre (ver sección 4.4.1.) y la siembra de los jardines comunes (ver sección 4.4.2.1.), realizarán mediciones de los caracteres fenotípicos de las plantas madre y su progenie en los jardines comunes (ver secciones 4.4.1. y 4.4.3), analizarán los datos de los jardines comunes (ver sección 4.4.4.), y contribuirán a la elaboración de la guía de las especies de frailejones del Sumapaz (ver sección 4.6.). Durante estas actividades los estudiantes contarán con la orientación de co-investigadores del proyecto, incluyendo al menos un tutor académico y docente del PEAMA. Las actividades de los estudiantes en el proyecto se enfocarán en desarrollar la capacidad de los estudiantes para implementar el método hipotético-deductivo, y para diseñar, conducir y analizar los resultados de experimentos científicos formales. Se enfatizará que los proyectos de investigación se benefician del intercambio y combinación de tradiciones complementarias de conocimiento, incluyendo especialmente el conocimiento campesino. De hecho, el proyecto proveerá un ejemplo patente del uso de métodos clásicos de investigación en un contexto de investigación participativa.

Los detalles de la participación de los estudiantes en el proyecto se diseñarán en colaboración con académicos y docentes del PEAMA, para lograr la sinergia entre el proyecto y el currículo del PEAMA. Las actividades de los estudiantes podrían incluir talleres sobre conceptos centrales al proyecto, como el concepto de especie en biología y su importancia para la conservación de la biodiversidad (ver sección 1.2. sobre la importancia de, y dificultad para, identificar las especies de frailejones). El proyecto también podría ofrecer un taller que tendría como objetivo que los estudiantes del PEAMA conozcan y practiquen los conceptos básicos de programación en el lenguaje R (<https://www.r-project.org/>). El lenguaje R es un sistema coherente de herramientas para realizar análisis estadísticos que se utiliza cada vez más en muchas áreas de investigación. En investigaciones sobre el medio ambiente, incluyendo estudios de biología y ecología, el lenguaje R se ha adoptado como una lengua franca y por lo tanto es una herramienta casi indispensable. Su gran popularidad entre investigadores se debe en parte a que: i) sirve para realizar una muy amplia variedad de análisis, ii) su capacidad se expande constantemente gracias a la colaboración internacional, voluntaria y masiva, de expertos en estadística y computación, y

iii) es un proyecto GNU (<https://www.gnu.org/home.es.html>) y por lo tanto un “programa libre” que puede utilizarse y compartirse sin costo alguno. Uno de los co-investigadores del proyecto (Iván Jiménez) ha dictado varios talleres sobre los conceptos básicos de programación en R (ver detalles aquí: <https://rbasicsworkshop.weebly.com/>) y dictará el taller en el PEAMA. En colaboración con un tutor académico y docente del PEAMA, Iván Jiménez adaptará el contenido del taller para que los estudiantes realicen ejercicios sobre temas de investigación relacionados a su currículo en el PEAMA y al proyecto.

4.3. Análisis de dominio inicial

El análisis de dominio es un método de investigación participativa para examinar cómo las personas perciben y clasifican elementos de la naturaleza (e.g., plantas, animales), usando su propio lenguaje y conocimiento (25). Este método ayuda a enriquecer una clasificación de organismos individuales en grupos o categorías tales como especies, porque fomenta la descripción de los grupos o categorías a partir de la combinación de tradiciones complementarias de conocimiento. Por ejemplo, combinaciones de medidas cuantitativas con descripciones basadas en el conocimiento y la intuición campesina han contribuido a entender la ecología de variedades agrícolas de plantas (páginas 29 a 31 en 108). Aún más, el análisis de dominio es útil para examinar críticamente una clasificación dada, porque permite contrastar tal clasificación con diferentes fuentes de conocimiento, incluyendo resultados obtenidos en jardines comunes.

Durante el proyecto se realizarán dos análisis de dominio, uno al principio (esta sección) y otro hacia el final de la ejecución del proyecto (sección 4.5.). El análisis de dominio inicial se utilizará para examinar creativamente y enriquecer la delimitación de especies de frailejones del Sumapaz basada en los grupos fenotípicos que descubrimos en nuestro trabajo anterior (1). Aún más, el análisis de dominio inicial podría resultar en la creación de grupos fenotípicos distintos, que constituyan una hipótesis alternativa de la delimitación de las especies de frailejones del Sumapaz. Tanto los grupos fenotípicos encontrados en nuestro trabajo anterior (1), así como otras formas de agrupar los frailejones que emerjan durante el análisis de dominio inicial, serán considerados como hipótesis que se examinarán en los jardines comunes (Figura 2). Por lo tanto, idealmente, el análisis de dominio inicial debe llevarse a cabo antes de la colección de plantas madre para los jardines comunes (ver sección 4.4.1.). Los resultados del análisis de dominio inicial se incorporarán en una primera versión de la guía de los frailejones del Sumapaz (ver sección 4.6.).

Varios aspectos logísticos del análisis de dominio inicial deberán ser definidos a medida que avanza el proyecto. El análisis de dominio inicial será un espacio diseñado para el intercambio y combinación de tradiciones complementarias de conocimiento entre las comunidades campesinas e instituciones ambientales y académicas, y para la búsqueda de sinergias entre estas formas de conocimiento que permitan entender mejor la compleja naturaleza de las especies de frailejones (ver sección 1.2. sobre la importancia de, y dificultad para, identificar las especies de frailejones).

El análisis de dominio inicial seguirá los pasos comúnmente utilizados para implementar el método (111), adaptados al contexto de este proyecto tal como se describe en las cuatro

secciones a continuación (4.3.1., 4.3.2., 4.3.3. y 4.3.4.). Este análisis enfatizará el uso de especímenes de herbario para representar los grupos fenotípicos de frailejones, y como evidencia esencial para la guía de las especies de frailejones del Sumapaz (ver sección 4.6.). Tal énfasis permitirá resaltar el valor de los especímenes de herbario como herramientas fundamentales para la descripción de la biodiversidad. A pesar de su importancia para la biología (112–116) y para la conservación de la biodiversidad en particular (117–120), la naturaleza y el valor de los especímenes de herbario son poco conocidos por fuera de los círculos especializados. Por ende, la importancia de los repositorios de estos especímenes, como el herbario del Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis, no es ampliamente comprendida. El análisis de dominio contribuirá a contrarrestar este problema y fomentará la apropiación del conocimiento científico a través de una actividad que es realizada rutinariamente en investigaciones sobre biodiversidad: el uso de especímenes de herbario para definir grupos de organismos según sus características fenotípicas.

Las cuatro secciones a continuación (4.3.1., 4.3.2., 4.3.3. y 4.3.4.) describen cómo el análisis de dominio inicial se realizaría si los participantes pudiesen reunirse físicamente, implementando las precauciones necesarias con los respectivos protocolos de bioseguridad. Sin embargo, si fuese necesario, el análisis de dominio inicial se realizaría virtualmente. En tal caso utilizaríamos material fotográfico de los especímenes de herbario y fotografías de las plantas en campo, y accederíamos a los herbarios virtuales del Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis (<http://herbario.jbb.gov.co/especimen/simple>) y del Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia (<http://www.biovirtual.unal.edu.co/es/colecciones/search/plants/>).

4.3.1. Presentación de los grupos de frailejones

El primer paso del análisis de dominio será la presentación de los grupos de frailejones descritos en nuestro trabajo anterior (1), utilizando especímenes de herbario, fotografías de las plantas y un borrador de la primera versión de la guía de especies de frailejones del Sumapaz (ver sección 4.6.). De ser posible, las fotografías y la guía se presentarán utilizando un proyector, de lo contrario se utilizarían impresiones en papel. Las fotografías ilustrarán claramente los caracteres fenotípicos que difieren entre grupos de frailejones. Estos caracteres incluyen: longitud de la lámina de las hojas (desde el ápice hasta el comienzo de la base de la hoja), amplitud de la lámina de las hojas, número de capítulos por escapo, diámetro de los capítulos, número de pares de hojas estériles por escapo, longitud del eje principal del escapo, perímetro del eje principal del escapo (a 10 cm de la base del escapo), longitud de los pedúnculos de la cima, longitud de las filarias estériles, amplitud de las filarias estériles, longitud de la corola de las flores del disco, longitud de la corola de las flores del radio y longitud del tubo de las flores del disco. Varias copias impresas en papel de una lista de estos caracteres, con los valores de cada carácter para cada grupo de frailejones, estarán disponibles para los participantes durante el análisis de dominio.

Cada grupo de frailejones estará representado por al menos diez especímenes de herbario. Los participantes en el análisis de dominio verificarán que los grupos de frailejones difieren en las características mencionadas en el párrafo anterior, midiendo cada característica en al menos un espécimen de cada grupo. Los participantes dispondrán de lupas para examinar los especímenes

y, si en la medida de lo posible, también tendrían acceso a al menos un estereoscopio para estudiar caracteres que son difíciles de observar sin magnificación.

4.3.2. Búsqueda de características diagnósticas

Las características diagnósticas son aquellas que distinguen diferentes grupos de organismos. Por ejemplo, los caracteres fenotípicos mencionados en la sección anterior permiten distinguir los grupos descritos en nuestro trabajo anterior (1). Sin embargo, es posible que existan características diagnósticas adicionales que no fueron consideradas en este trabajo. En el segundo paso del análisis de dominio, los participantes utilizarán los especímenes de herbario para buscar características diagnósticas que no han sido reconocidas. Para ello, se escogerán al azar dos de los grupos fenotípicos descritos en nuestro trabajo anterior (1), y se examinarán los especímenes de herbario correspondientes en busca de al menos una característica que los distinga y que no haya sido señalada previamente. Las características diagnósticas que se encuentren deben describirse en detalle, así como el rango de valores de tales características en los dos grupos de frailejones examinados. Una vez finalizada esta tarea, otro par de grupos fenotípicos se examinará para encontrar características diagnósticas, y así sucesivamente hasta que todos los posibles pares de grupos fenotípicos sean estudiados.

Una vez terminado el examen de todos los posibles pares de grupos fenotípicos, los resultados de la búsqueda de características diagnósticas se consignarán en una tabla en la que las filas representan características diagnósticas y las columnas grupos fenotípicos. Por lo tanto, cada fila de la tabla deberá incluir una descripción de una característica diagnóstica particular. Además, cada fila incluirá el rango de valores de la característica correspondiente a cada uno de los grupos de frailejones. Es posible que, para obtener todos estos rangos de valores, sea necesario volver a examinar los especímenes de herbario que representan algunos de los grupos de frailejones.

4.3.3. Revisión de la definición y descripción de los grupos de frailejones

El tercer paso del análisis de dominio es considerar, con base en los resultados de los dos pasos anteriores (secciones 4.3.1 y 4.3.2), si es útil modificar la descripción o definición de los grupos de frailejones. Por ejemplo, el hallazgo de nuevos caracteres diagnósticos (sección 4.3.2) implicaría que las descripciones de los grupos fenotípicos de frailejones pueden enriquecerse. Por otra parte, es posible que el estudio de los especímenes en el primer paso del análisis de dominio (sección 4.3.1) no corrobore las diferencias entre grupos de frailejones descritas en nuestro trabajo anterior (1). En tal caso parecería necesario, como mínimo, corregir las descripciones de los grupos de frailejones. Aún más, en ese caso sería útil discutir si es necesario proponer grupos fenotípicos distintos a los descritos en nuestro trabajo anterior (1). Por ejemplo, durante este tercer paso del análisis de dominio se podrían dividir o unir algunos de los grupos, o construir grupos de otras formas. Los grupos fenotípicos descritos en nuestro trabajo anterior (1), y las modificaciones de estos grupos propuestas durante el análisis de dominio, serán tratados como hipótesis de especies que se pondrán a prueba en los jardines comunes (Figura 1). Adicionalmente, los resultados del análisis de dominio inicial se utilizarán para construir una primera versión de la guía de los frailejones del Sumapaz (ver sección 4.6.).

4.3.4. Resumen de los hallazgos

Los resultados de análisis de dominio se resumirán en una tabla en la que las filas representan características diagnósticas y las columnas grupos fenotípicos (como la descrita en la sección 4.3.2.). En esta tabla deben resumirse las descripciones de los grupos de frailejones que emerjan del análisis de dominio, incorporando todos los caracteres relevantes y los rangos de valores de cada característica para cada grupo. Si el análisis de dominio resulta en una modificación de la definición de los grupos descritos anteriormente (1), tal modificación deberá representarse en la tabla.

4.4. Jardines comunes

Instalaremos jardines comunes de frailejones en al menos dos lugares dentro del páramo de Sumapaz: vereda Santa Rosa (sede del Parque Nacional Natural Sumapaz, a 3480 m de altitud) y vereda Quebradas (finca El Carmen, a 3373 m de altitud). Tener dos jardines comunes es útil para determinar la repetibilidad de los resultados y, por lo tanto, la solidez de las conclusiones de poner a prueba las hipótesis sobre los grupos fenotípicos de frailejones (ver sección 3).

El diseño de los jardines comunes de frailejones se adecuará a las características de cada lugar. Sin embargo, en general, cada jardín común incluirá tres zonas: i) la **zona de germinación y primer trasplante** cubrirá un área de 20 m² (por ejemplo, 4 × 5 m) donde se ubicarán bandejas de germinación sobre tres mesas altas de 1 m de ancho y 2.30 m de largo; ii) la **zona de trasplantes a matera** cubrirá un área de 81 m² (por ejemplo, 9 × 9 m) donde se pondrán materas en mesas de madera o en el suelo, en camas elaboradas con alambre y madera; y iii) la **zona de siembra final** cubrirá un área de 900 m² (por ejemplo, 30 × 30 m) para mantener las plantas permanentemente (ver detalles en la sección 4.4.2). La forma de cada una de estas zonas puede variar según lo que sea conveniente en cada lugar, siempre y cuando el área sea suficiente para mantener las plantas y hacer las observaciones y mediciones descritas en las secciones 4.4.2. y 4.4.3.

Planeamos mantener cada uno de los jardines comunes durante cinco años después de la última siembra de semillas (ver sección 4.4.2.1.). Este tiempo es suficiente para el desarrollo de un número razonable de plantas adultas y, por lo tanto, para obtener datos de caracteres fenotípicos reproductivos (e.g., longitud de los escapos, número de brácteas estériles en los escapos, número de capítulos por escapo, diámetro de los capítulos, longitud de la corola de las flores del disco y el radio). La Figura 3 muestra un estimado de la proporción de plantas adultas obtenidas en un jardín común a través de los años, basados en datos demográficos de frailejones del páramo de Chingaza identificados como *Espeletia grandiflora* (63). Más allá de los objetivos de esta propuesta, y dependiendo del número de plantas que sobrevivan después de cinco años, los jardines comunes podrían constituir un recurso excepcional para el proyecto a largo plazo, porque permitirían estudiar aspectos de los frailejones que son difíciles de estudiar en plantas silvestres (ver sección 4.4.2.1.).

4.4.1. Colección y medición de plantas madre

En cada uno de los jardines comunes sembraremos semillas de al menos 30 plantas madre pertenecientes a cada uno de los grupos fenotípicos detectados en nuestro análisis anterior (1). Las semillas sembradas en los todos los jardines comunes provendrán de las mismas plantas madre. En cada jardín sembraremos entre 50 y 100 semillas de cada planta madre. Esto es factible porque frecuentemente es posible coleccionar más de 500 semillas de una planta madre.

Para coleccionar plantas madre pertenecientes a los grupos fenotípicos identificados anteriormente (1), realizaremos salidas de campo en cuatro zonas del Páramo de Sumapaz: Santa Rosa (incluyendo “Careperro”), Quebradas (incluyendo Laguna Larga y Cuevecitas), Quebrada Honda (incluyendo la Rabona y alto los Amarillos) y San José (incluyendo La Laguna de La Hermosura, y la zona al occidente del Río Sumapaz). En la medida de lo posible se visitarán zonas adicionales en los municipios de Guamal, Cubarral (incluyendo el Cerro Nevado, Puerta de las Dantas), Colombia (incluyendo Oseras), y Gutiérrez (incluyendo Cueva del Cobre, El Gallo).

Visitaremos cada una de estas zonas en diferentes épocas del año, ya que los grupos fenotípicos pueden diferir en fenología reproductiva y es necesario coleccionar plantas madre que tengan semillas y flores (ver siguiente párrafo). En particular, visitaremos las cuatro zonas mencionadas arriba (Santa Rosa, Quebradas, Quebrada Honda y San José) durante cada una de las cuatro estaciones de pluviosidad (Figura 4): la época más seca (diciembre – marzo), un periodo relativamente seco (agosto – septiembre) y las dos épocas más lluviosas (abril – julio y octubre – noviembre). Salidas a zonas adicionales se programarán según la oportunidad.

Al momento de su colección las plantas madre deben estar razonablemente sanas, tener al menos cinco capítulos con semillas que estén maduras o puedan alcanzar la madurez en almacenamiento. Al menos cinco capítulos son necesarios para obtener suficientes semillas para cada jardín común. Las plantas madre deben también tener capítulos en flor (idealmente en cada uno de tres escapes). Esto es necesario para poder medir en cada una de las plantas madre los caracteres fenotípicos que definen los grupos descritos (1) y, de esa forma, poder asignar formalmente cada planta madre a un grupo fenotípico.

De acuerdo con lo anterior, y en la medida de lo posible, se coleccionarán seis hojas, tres escapes con capítulos en flor y al menos cinco capítulos con semillas de cada planta madre. Las hojas y escapes en flor se prensarán el mismo día de la colección para preservar especímenes que serán depositados en el Jardín Botánico de Bogotá. También se preservarán hojas de cada espécimen en un sobre dentro de una bolsa con desecante (sílica gel), para una eventual extracción de ácido desoxirribonucleico (ADN). Los capítulos con semillas se envolverán en papel periódico, marcado con el correspondiente número de colecta de la planta madre, se secarán en un horno a temperatura baja (30 °C) por aproximadamente 15 minutos, para después almacenarlos en un lugar seco y aireado a temperatura ambiente (20–27 °C). Nuestra experiencia reciente sugiere poner los paquetes de papel periódico con las semillas de cada planta madre sobre mallas metálicas, teniendo la precaución de no poner un paquete encima de otro. Esto parece facilitar el secado y la maduración de las semillas. La siembra de las semillas deberá realizarse no más de

cinco semanas después de la colecta de las plantas madre (ver sección 4.4.2.1. sobre siembra de semillas). Las semillas que sobren después de la siembra seguirán almacenadas de la misma forma, para posibilitar la eventual réplica de las siembras en el mismo jardín común o en otros jardines comunes, o inclusive para estudiar las respuestas evolutivas de los frailejones al cambio climático utilizando experimentos de “resurrección de semillas” (159 – 160).

En cada uno de los especímenes de las plantas madre se medirán los 13 caracteres fenotípicos que definen los grupos descritos anteriormente (1): longitud de la lámina de las hojas (desde el ápice hasta el comienzo de la base de la hoja), amplitud de la lámina de las hojas, número de capítulos por escapo, diámetro de los capítulos, número de pares de hojas estériles por escapo, longitud del eje principal del escapo, perímetro del eje principal del escapo (a 10 cm de la base del escapo), longitud de los pedúnculos de la cima, longitud de las filarias estériles, amplitud de las filarias estériles, longitud de la corola de las flores del disco, longitud de la corola de las flores del radio y longitud del tubo de las flores del disco.

En el Apéndice 1 se encuentran detalles del protocolo que describe el proceso de colecta y preservación de especímenes para herbario y medición de los 13 caracteres fenotípicos. Entre los detalles del método de colecta, es importante resaltar que cada lugar donde se colecte una planta madre deberá georreferenciarse con una unidad GPS, con la mayor precisión posible. Así se obtendrán las coordenadas geográficas de cada planta madre que serán utilizadas para desarrollar modelos de la distribución de las especies de frailejones (ver sección 4.6.), basados en datos espaciales sobre clima (<https://www.worldclim.org/>) y elevación (<https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>) que pueden obtenerse sin costo alguno, así como en los datos espaciales sobre integridad ecológica desarrolladas por el equipo de investigación y monitoreo del Parque Nacional Natural Sumapaz. Las coordenadas geográficas de cada planta madre también permitirán diseñar un muestreo de suelos para estudiar la distribución de las especies en relación a variables edáficas.

4.4.2. Seguimiento y cuidado de las plantas en los jardines comunes

El seguimiento de las plantas es la documentación detallada de la historia de cada planta en cada jardín común. Esta historia se describirá semanalmente por medio de fotografías y el registro de datos sobre la procedencia, la supervivencia, el desarrollo y la ubicación de cada planta. El seguimiento también incluye la observación *ad libitum* de las plantas, que es fundamental para entender la historia natural de los frailejones. La observación *ad libitum* será muy importante para postular caracteres fenotípicos que podrían distinguir las especies (ver sección 4.4.3.) e incluirse en la guía de frailejones (sección 4.6.). Los métodos para el seguimiento de las plantas dependen de su estado de desarrollo y de la zona del jardín donde se encuentren (**zona de germinación y primer trasplante, zona de trasplantes a matera o zona de siembra final**), como se explica en las secciones 4.4.2.1. a 4.4.2.10.

El cuidado de las plantas incluye la creación de condiciones y la provisión de recursos apropiados para la supervivencia, el crecimiento y la formación de estructuras reproductivas. El ambiente de los jardines comunes no necesariamente debe recrear en detalle todos los aspectos del ambiente natural de las especies. A veces es importante evitar en los jardines comunes

condiciones estacionales que aumentan la tasa de mortalidad en los ambientes naturales, tales como la baja disponibilidad de agua o la alta presión de herbivoría. Los jardines comunes, en general, deben ser ambientes benignos para las especies de interés (107). Este principio se aplica especialmente a los jardines comunes diseñados para estudiar la delimitación de especies, donde el interés principal es la propagación de plantas de diferentes grupos (presuntas especies) en un ambiente común para estudiar sus fenotipos (Figura 2). Los métodos para el cuidado de las plantas dependen de su estado de desarrollo y de la zona del jardín donde se encuentren (**zona de germinación y primer trasplante**, **zona de trasplantes a materia** o **zona de siembra final**), como se explica en los siguientes párrafos y en las secciones 4.4.2.1. a 4.4.2.10.

La **zona de germinación y primer trasplante** debe protegerse de lluvia y el sol directo con un techo transparente y polisombra al 65% de sombrío. Las semillas y plantas en esta zona estarán en bandejas puestas sobre tres mesas altas, de 1 m de ancho y 2.30 m de largo (Figura 5). Estas mesas ayudarán a proteger las semillas y las plantas de los animales del suelo. Sin embargo, también podría ser necesario cercar con malla toda la zona de germinación y primer trasplante, para excluir animales domésticos y silvestres, incluyendo mamíferos (e.g., conejos, vacas, caballos, venados) y aves (e.g., gallinas). Una fuente de mortalidad que parece particularmente importante en los jardines comunes de frailejones son los insectos que atacan las semillas y las raíces, tallos, cotiledones y hojas de las plántulas (e.g., larvas de la mosca del mantillo). Por eso, la zona de germinación y primer trasplante deberá protegerse con anejo y trampas pegajosas para controlar la abundancia de insectos. También podría ser necesario aplicar productos (e.g., polisulfuro de calcio, peróxido de hidrógeno) para controlar hongos asociados a los sustratos de germinación y crecimiento. Es crítico garantizar suficiente riego para que el sustrato de germinación permanezca siempre húmedo. Se sospecha que buena parte de la mortalidad de las plántulas silvestres de los frailejones se debe a la baja disponibilidad de agua (121), y lo mismo parece ocurrir en los jardines comunes cuando no se riega constantemente.

La **zona de trasplantes a materia** tendrá una parte con techo y polisombra al 65% de sombrío y otra parte solo con polisombra para evitar la exposición de las plantas al sol directo. La parte con techo y polisombra se utilizará para cultivar plantas menos desarrolladas (ver secciones 4.4.2.5. y 4.4.2.6.) que las plantas que estarán en la parte cubierta solo con polisombra (ver secciones 4.4.2.7. y 4.4.2.8.). El suelo debe estar nivelado y limpio para ubicar las materas en mesas y camas elaboradas con alambre y madera. Estas camas deben cercarse con una malla metálica (de “gallinero”) para excluir animales del entorno que puedan afectar severamente las plántulas (e.g., gallinas, conejos, vacas, caballos, venados). La zona de trasplantes a materia también debe contar con trampas para evitar el ataque de insectos que afectan las plántulas y, en la medida que sea necesario, deberán usarse productos de prevención y control (e.g., polisulfuro de calcio, sales de potasio). Es crítico garantizar suficiente riego para que el sustrato en las materas permanezca siempre húmedo. Como se mencionó anteriormente, la escasez de agua es una causa de mortalidad importante en los frailejones jóvenes.

La **zona de siembra final** debe cercarse con malla metálica o alambre de púa para excluir los animales grandes que puedan afectar las plantas severamente (e.g., vacas, caballos, venados). Sin embargo, no se requerirá techo plástico ni polisombra ya que las plantas serán suficientemente

grandes para resistir la lluvia y el sol directo. Tampoco se necesitarán materas, porque las plantas se sembrarán directamente en el suelo. Los puntos de siembra estarán separados por 1 m de distancia. Las plantas deberán regarse frecuentemente durante periodos secos para mantener el suelo húmedo y así reducir la mortalidad debida a la escasez de agua.

En cada jardín común se medirán diariamente la temperatura máxima y mínima (con termómetro de máximos y mínimos, en grados Celsius), la humedad relativa (con un higrómetro, en porcentaje) y la precipitación (con un pluviómetro, en milímetros). Se usarán equipos básicos manuales y los datos se registrarán utilizando el formato en el Apéndice 2. Sin embargo, de ser posible se conseguirán equipos más especializados de estaciones meteorológicas donde por ejemplo se podría medir también la radiación solar y la velocidad del viento, con registro de los datos automatizado.

4.4.2.1. Siembra de semillas

Las semillas serán extraídas de los capítulos de las plantas madre y sembradas no más de cinco semanas después de haber sido colectadas. El proceso de extracción y selección de las semillas para la siembra, así como su desinfección antes de la siembra, se describe en el Apéndice 3. En cada jardín común se sembrarán 100 semillas de cada planta madre. Para la siembra de las semillas de cada planta madre se utilizará un recipiente de germinación de 10 cm de ancho, 15 cm de largo, y 2 cm de profundidad, marcado con el número de colección de la planta madre correspondiente y la fecha de siembra. Las semillas de cada planta madre se distribuirán uniformemente a lo largo y ancho del recipiente. El sustrato de germinación será turba negra o rubia con nivel de abonado medio (e.g., Pindstrup substrate).

4.4.2.2. Semillas y plántulas en bandejas de germinación

Las bandejas de germinación se regarán con agua con la frecuencia necesaria para evitar el desecamiento del sustrato. Una vez a la semana se tomará una foto de cada bandeja de germinación que servirá para examinar el número de plántulas de cada planta madre y, además, para obtener información sobre el desarrollo de las plántulas. Las fotos deben ser suficientemente nítidas para determinar el número y disposición de los cotiledones y las hojas de cada plántula en la bandeja de germinación. En cada foto debe incluirse un rótulo que indique la fecha. En una libreta de campo se anotará la fecha y hora a la que se tomó cada foto, así como observaciones *ad libitum* de las plantas (e.g., observaciones sobre el número de cotiledones).

4.4.2.3. Primer trasplante

Cada semana se trasplantarán las plántulas que hayan desplegado las primeras hojas verdaderas (i.e., las hojas que se desarrollan después de los cotiledones). El trasplante de cada plántula debe hacerse teniendo cuidado de no herir la raíz y tratando de minimizar el disturbio del sustrato en la celda correspondiente, donde podría haber otras plántulas o semillas en proceso de germinación. Las plántulas con hojas verdaderas pasarán de las bandejas de germinación a bandejas con celdas más grandes. Estas bandejas para el primer trasplante tendrán 50 celdas (5 × 10) con sustrato igual al de las bandejas de germinación: turba negra o rubia con nivel de abonado medio (e.g., Pindstrup substrate).

Se utilizará cinta adhesiva naranja y un rotulador indeleble negro para marcar cada bandeja de 50 celdas con las letras “BT” (para indicar “bandeja de trasplante”) seguidas de un número único. Además, se utilizará cinta adhesiva azul y un rotulador indeleble negro para identificar las hileras de celdas a lo largo del borde más corto de las bandejas. Estas hileras se identificarán con las marcas “F1”, “F2”, ..., “F5” (para indicar “fila 1”, “fila 2”, ..., “fila 5”). De forma similar se marcarán las hileras de celdas a lo largo del borde más largo de las bandejas, pero en este caso las marcas serán “C1”, “C2”, ..., “C10” (para indicar “columna 1”, “columna 2”, ..., “columna 10”). De esta forma, cada celda en cada bandeja de trasplante podrá ser identificada por el número de la bandeja, el número de la fila y el número de la columna. En cada una de estas celdas se pondrá una sola plántula (Figura 6). La celda donde se trasplanta una plántula determinada será escogida al azar y registrada en un formato para la toma de datos del primer trasplante (Apéndice 4).

4.4.2.4. Plántulas después del primer trasplante

Una vez a la semana se examinarán las plántulas en las bandejas de trasplante (de 50 celdas) para registrar la muerte de plántulas utilizando el formato en el Apéndice 4. Cada semana se tomará una foto de cada bandeja con plántulas trasplantadas. Las fotos deben ser suficientemente claras para permitir ver la marca única de la bandeja (“BT” seguido por un número único) así como la posición (fila y columna) y estado de cada una de las plántulas en cada bandeja. En cada foto debe incluirse un rótulo que indique la fecha (Figura 7).

4.4.2.5. Segundo trasplante

Las plántulas que desarrollen rosetas de aproximadamente 5 cm de diámetro se trasplantarán a macetas individuales de 12 cm de diámetro (materia plástica # 12). Las plántulas que no desarrollen rosetas de este tamaño después de 6 a 9 meses también serán trasplantadas a macetas de 12 cm de diámetro, dado que después de este tiempo el sustrato en las bandejas de trasplante tiende a perder las propiedades que fomentan el crecimiento de las plántulas. El sustrato en estas macetas será una mezcla con seis partes de turba, tres partes de tierra, y una parte de compost – abono “Bocashi”. Cada maceta se marcará con un rótulo metálico único para cada planta, que incluirá el número de colección de la planta madre, lugar y fecha de siembra, lugar y fecha del primer trasplante, número de la bandeja, fila y columna de la celda donde la planta creció después del primer trasplante (Figura 8). A diferencia del primer trasplante (sección 4.4.2.3.), durante el segundo trasplante el sustrato de cada plántula será completamente removido de la bandeja para no herir la raíz, ya que sólo habrá una plántula en cada celda de la bandeja.

4.4.2.6. Plantas después del segundo trasplante

Una vez a la semana se examinarán las plantas después del segundo trasplante para registrar la muerte de plantas y el desarrollo de estructuras reproductivas (escapos, capítulos, flores), utilizando el formato en el Apéndice 5. Cada mes se tomará una foto de cada planta. Las fotos deben ser suficientemente claras para permitir ver, desde arriba, el estado de las hojas en la roseta y cualquier estructura reproductiva, incluyendo escapos inmaduros. La foto también debe capturar nítidamente la información en el rótulo metálico único para cada planta y, además, la fecha escrita en un rótulo adicional.

4.4.2.7. Tercer trasplante

Una vez que la roseta de una planta alcance un tamaño de 10 a 15 cm de diámetro, se trasplantará a una maceta individual de 18 cm de diámetro (materia plástica # 18), teniendo cuidado de no herir las raíces. Las plantas que no alcancen este tamaño después de 9 a 12 meses también serán trasplantadas a macetas de 18 cm de diámetro, para evitar que el deterioro del sustrato impida su crecimiento. El sustrato en estas materas de 18 cm de diámetro será una mezcla de seis partes de tierra, tres partes de turba y una parte de compost (abono “Bocashi”). Cada maceta se marcará con el rótulo metálico único para cada planta, como se describe en la sección 4.4.2.5. (Figura 8).

4.4.2.8. Plantas después del tercer trasplante

Una vez a la semana se examinarán las plantas después del tercer trasplante, para registrar la muerte de plantas y el desarrollo de estructuras reproductivas (escapos, capítulos, flores), utilizando el formato en el Apéndice 5. Estimamos que las plantas tendrán suficiente espacio para crecer en las macetas de 18 cm de diámetro por al menos un año, y que muy probablemente al menos algunas plantas alcanzarán 20 cm de altura y desarrollarán capítulos con flores. Sin embargo, esto no necesariamente se cumplirá para todos los grupos fenotípicos de frailejones. Cada mes se tomará una foto de cada planta. Las indicaciones para la toma de estas fotos son iguales a las descritas en la sección 4.4.2.6. Las fotos deben ser suficientemente claras para permitir ver, desde arriba, el estado de las hojas en la roseta y cualquier estructura reproductiva, incluyendo inmaduros. La foto también debe capturar nítidamente la información en el rótulo metálico único para cada planta y, además, la fecha escrita en un rótulo adicional.

4.4.2.9. Trasplante final

Cuando una planta alcance 20 cm de altura o 40 cm de diámetro, será trasplantada al suelo de la **zona de siembra final**. Cada planta se marcará con un rótulo metálico único, como se describe en la sección 4.4.2.5. (Figura 8). Este rótulo será atado con un alambre a una estaca clavada en el suelo, al lado de la planta correspondiente. La distancia entre los puntos de siembra será de 1 m a través de toda la zona de siembra final. El punto de siembra para cada planta será escogido al azar entre todos los puntos de siembra disponibles (i.e., no ocupados) en la zona de siembra final. Se adecuará cada punto de siembra para favorecer la supervivencia a largo plazo, el crecimiento y la formación de estructuras reproductivas. En la medida que sea posible, se podrían realizar análisis de laboratorio para conocer las características del suelo de cada lugar y determinar si es necesario adecuar el suelo para aproximar condiciones óptimas para el desarrollo de las plantas.

4.4.2.10. Plantas después del trasplante final

Una vez a la semana se examinarán las plantas después de la siembra definitiva, para registrar la muerte de plantas y el desarrollo de estructuras reproductivas (escapos, capítulos, flores), utilizando el formato en el Apéndice 5. Cada mes se tomará una foto de cada planta. Las fotos deben ser suficientemente claras para permitir ver, desde arriba, el estado de las hojas en la roseta y cualquier estructura reproductiva, incluyendo escapos inmaduros. En cada foto debe incluirse el rótulo metálico único que identifica la planta y un rótulo adicional que indique la fecha.

4.4.2.11. Plantas después de cinco años

Todas las plantas que sobrevivan cinco años después de la última siembra en los jardines comunes serán trasplantadas a la **zona de siembra final**. En la medida que varias plantas de diferentes grupos fenotípicos sobrevivan más de cinco años, serían un recurso muy valioso para realizar estudios adicionales en el contexto de la investigación a largo plazo sobre las respuestas de los frailejones al cambio global. **Podrían realizarse una gran variedad de estudios, pero a continuación se describen brevemente sólo dos ejemplos.**

Primero, sería posible estudiar las tasas de crecimiento de diferentes especies en un mismo ambiente y en plantas de edad conocida. La tasa de crecimiento, y su variación con la edad, es un parámetro fundamental en modelos demográficos de los rangos geográficos de las especies que sirven para predecir las respuestas de diferentes especies al cambio global (ver sección 6.1.). Pero ningún estudio parece haber medido las tasas de crecimiento en frailejones de edad conocida. La idea que los frailejones crecen 1 cm por año se ha difundido muy ampliamente en Colombia. Sin embargo, basados en sus propias observaciones, los campesinos del páramo de Sumapaz frecuentemente critican esta idea diciendo, por ejemplo, “esa es la mentira más grande del mundo” o “si los frailejones crecen 1 cm por año yo tengo 300 años”. Los estudios de las tasas de crecimiento de los frailejones, en conjunto, están de acuerdo con la crítica de los campesinos: hay gran variación entre diferentes estimados (55, 61, 63, 64, 121), incluyendo valores de hasta 14.8 cm por año (56).

Más allá de diferencias metodológicas, la variación entre los estimados de diferentes estudios podría explicarse por diferencias en la edad (e.g., Figura 3), el ambiente (55) y la especie de las plantas medidas (121). Sin embargo, hasta el momento no hay claridad al respecto. La medición de las tasas de crecimiento de las plantas en la zona de siembra final contribuiría a resolver este asunto, dado que sería posible comparar las tasas de crecimiento de diferentes especies, medidas con la misma metodología y controlando por la edad de las plantas y el ambiente. Es importante anotar que durante los primeros cinco años de los jardines comunes obtendremos estimados de las tasas de crecimiento, basados en medidas la longitud del tallo (desde la unión con la raíz hasta el meristema apical, ver secciones 4.4.2.4., 4.4.2.6., 4.4.2.8. y 4.4.2.10.). Lo que se resalta en este párrafo es la oportunidad de continuar midiendo las tasas de crecimiento en plantas cinco años después de la última siembra, dada la inexistencia y la importancia de estimados de las tasas de crecimiento en plantas de edad conocida.

Segundo, las plantas en la zona de siembra final también constituirían una gran oportunidad para estudiar el aislamiento reproductivo entre diferentes especies, y examinar la hipótesis según la cual las especies de frailejones se mantienen principalmente debido a barreras de aislamiento reproductivo “extrínsecas” (o exógenas), es decir diferencias de hábitat o distribución geográfica que limitarían espacial o temporalmente la frecuencia de hibridación. Esta hipótesis la sugiere Harold Robinson en el prólogo a la monografía taxonómica de frailejones más reciente (28), y es consistente con diversas observaciones en la monografía. Por ejemplo, en la página 190 la monografía sugiere que los fenotipos intermedios, presumiblemente híbridos, están principalmente restringidos a áreas afectadas por disturbios antrópicos. Tales áreas habrían sido colonizadas por varias especies de frailejones que, en ausencia de disturbios antrópicos, ocuparían hábitats diferentes. Las páginas 193 y 324 de la monografía también sugieren que los

fenotipos intermedios están restringidos a ecotonos donde diferentes especies existen en proximidad.

Si las especies de frailejones se mantienen principalmente por barreras reproductivas extrínsecas (o exógenas), como lo sugiere en el párrafo anterior, la hibridación podría ser un factor importante en las respuestas de los frailejones al cambio global. Ese es el caso para otras especies de la familia Asteraceae, para plantas en general (103, 122) y para otros organismos (123–126). En general, uno de los posibles efectos del cambio global sobre la biodiversidad es incrementar la frecuencia de la hibridación entre especies (127, 128), posiblemente fusionando especies. Las plantas en la zona de siembra final permitirían evaluar esta amenaza, estudiando plantas de diferentes especies en un mismo sitio y ambiente para determinar si existen barreras de aislamiento reproductivas “intrínsecas” (o “endógenas”, en contraste a las “extrínsecas” o “exógenas”), es decir barreras reproductivas que operan en un mismo sitio y ambiente, como la incompatibilidad de gametos y las diferencias en polinizadores o fenología reproductiva. Estos estudios incluirían, por ejemplo, cuantificación de la fenología reproductiva y estudios de la biología de la polinización (63), así como experimentos de entrecruzamiento (95).

Vale la pena aclarar que, si se considerase necesario como parte del manejo de las plantas, sería sencillo evitar el entrecruzamiento de especies en la zona de siembra final. Las estructuras reproductivas de los frailejones tardan meses en desarrollarse y los escapos que las sostienen son obvios y fáciles de podar mucho antes de la formación de flores fértiles. La poda de estos escapos podría implementarse para evitar el entrecruzamiento entre especies que, por estar geográficamente aisladas, tienen relativamente pocas oportunidades de polinización interespecífica en su estado natural. Sin embargo, según nuestros análisis anteriores (1), las especies de frailejones propias del páramo de Sumapaz son en general simpátricas, *sensu* (129). Es decir, todos los pares de especies del páramo de Sumapaz tienen distribuciones geográficas suficientemente cercanas para que las oportunidades de entrecruzamiento sean apreciables. Por supuesto, algunos pares de especies están más separados geográficamente que otros, y las oportunidades de entrecruzamiento pueden ser mayores para unos pares de especies que para otros.

4.4.3. Medición de las plantas en los jardines comunes

Cada seis meses, y empezando seis meses después de la primera siembra, se medirán todas las plantas en cada jardín común, excepto las que aún estén en las bandejas de germinación. En cada planta se medirá la longitud del tallo (desde la unión con la raíz hasta el meristema apical), el número de hojas y la filotaxis de las hojas (media del ángulo entre hojas consecutivas). También se medirán caracteres fenotípicos adicionales que, según la observación *ad libitum* de las plantas en los jardines comunes (ver primer párrafo de la sección 4.4.2.), podrían ayudar a distinguir las especies. El formato en el Apéndice 6 se utilizará para tomar estos datos.

Cuando una planta desarrolle una roseta de 15 cm de diámetro que tenga al menos 10 hojas con apariencia saludable, se colectará una de sus hojas. Esta hoja será escaneada para crear una imagen que posteriormente se utilizará para medir el tamaño y la forma de las hojas. También se medirán otros caracteres fenotípicos que podrían distinguir las especies, si así lo sugiere la observación *ad libitum* de las plantas en los jardines comunes (ver primer párrafo de la sección 4.4.2.). Cada hoja debe ser escaneada con una regla que sirva de referencia para estas medidas, y

con una leyenda que identifique la plántula de la que proviene la hoja. Esta leyenda debe incluir toda la información en el rotulo único que identifica cada planta: el número de colección de la planta madre, el lugar y la fecha de siembra, el lugar y la fecha del primer trasplante, y el número de la bandeja, fila y columna de la celda donde la planta creció después del primer trasplante. Además, la leyenda debe incluir la fecha de colecta de la hoja. En la medida que sea conveniente, varias hojas pueden incluirse en una sola imagen, siempre y cuando la correspondencia entre hojas y leyendas sea clara.

Si una planta desarrolla capítulos con flores, una muestra de al menos dos hojas y un capítulo con flores será colectada, siguiendo los procedimientos descritos para la colección y elaboración de especímenes de las plantas madre. Se debe tomar especial precaución para que la colección del material no cause la muerte de la planta. En cada uno de los especímenes se medirán los 13 caracteres fenotípicos que definen los grupos descritos en nuestro trabajo anterior (1), mencionados en la sección 4.1. También podrían medirse caracteres fenotípicos adicionales en las plantas adultas, según la información obtenida a través de la observación *ad libitum* de las plantas en los jardines comunes (ver primer párrafo de la sección 4.4.2.).

4.4.4. Análisis de datos de los jardines comunes

Para poner a prueba las predicciones derivadas de las hipótesis sobre límites de especie descritas en la Figura 2, utilizaremos modelos de mezclas normales (130) aplicados al análisis de límites de especie utilizando datos fenotípicos (131). Esta aplicación supone herencia poligénica de los caracteres fenotípicos y apareamiento aleatorio dentro de cada especie. Bajo estas condiciones, las frecuencias alélicas se aproximan al equilibrio Hardy-Weinberg y el desequilibrio de ligamiento es negligible. Por lo tanto, la variación fenotípica entre individuos de una especie puede describirse razonablemente con una distribución normal (univariada o multivariada). El análisis tendrá tres partes principales descritas a continuación.

4.4.4.1. Asignación de plantas madre a grupos fenotípicos

Las plantas madre serán asignadas a los grupos fenotípicos según nuestro análisis anterior (1), utilizando las medidas de los 13 caracteres fenotípicos que definen estos grupos (ver sección 4.4.1.). Calcularemos la probabilidad de que cada planta madre pertenezca a cada grupo fenotípico, utilizando el modelo de mezclas normales descrito en nuestro análisis anterior (1), y asignaremos cada planta madre al grupo fenotípico más probable.

4.4.4.2. Concordancia fenotípica entre juveniles y plantas madre

Examinaremos el apoyo empírico para diferentes hipótesis en lo que concierne a las plantas juveniles. En particular, determinaremos si los fenotipos de las plantas juveniles forman grupos que concuerdan con los grupos fenotípicos detectados en nuestro análisis anterior (1). Bajo la suposición que las especies de frailejones del Sumapaz difieren en los caracteres medidos en las plantas juveniles, **la hipótesis según la cual los grupos fenotípicos encontrados en nuestro análisis anterior son especies predice alta concordancia (Figura 2).** En contraste, **la hipótesis según la cual estos grupos fenotípicos reflejan variación fenotípica dentro de una misma especie inducida por el ambiente predice baja concordancia.**

Las plantas juveniles son aquellas que aún no han producido escapos y por lo tanto no han alcanzado la edad de la primera reproducción. Para estas plantas tendremos datos de al menos cinco caracteres fenotípicos: longitud del tallo (desde la unión con la raíz hasta el meristema apical), el número de hojas, la filotaxis de las hojas (media del ángulo entre hojas consecutivas), y el tamaño y forma de la hoja. Las plantas juveniles en las que se tomarán estas medidas tendrán diferentes grados de parentesco, principalmente debido a si provienen de una misma planta madre o no. Para controlar esta dependencia en los datos, para cada uno de los caracteres estimaremos la media a través de toda la progenie de cada planta madre. Así, obtendremos un valor medio para cada carácter y planta madre. Estos son los valores que se utilizarán para medir la correspondencia fenotípica entre plantas juveniles y adultas.

Para tres caracteres fenotípicos (la longitud del tallo, el número de hojas y la filotaxis de las hojas) habrá datos de medidas tomadas cada seis meses, empezando seis meses después de la primera siembra (ver sección 4.4.3.). Entonces es necesario explicar cómo se calculará la media de estos caracteres a través de la progenie de cada planta madre. En el caso de estos tres caracteres estimaremos un valor medio para la progenie de cada planta madre, condicional en la edad de la progenie. Para cada planta madre estimaremos el promedio de cada uno de los tres caracteres para progenie de 1, 2 y 3 años de edad. Estos estimados se basarán en modelos de regresión mixtos, es decir con variables independientes fijas y aleatorias (132). La variable de respuesta en estos modelos mixtos será uno de los tres caracteres fenotípicos (la longitud del tallo, el número de hojas o la filotaxis de las hojas). Por otra parte, los modelos mixtos incluirán una variable independiente fija, que será edad de la planta juvenil medida como el tiempo transcurrido desde la siembra de la semilla, y una variable independiente aleatorias, la identidad de la planta juvenil. Un modelo regresión mixto será ajustado, separadamente, a los datos de la progenie de cada planta madre.

Los valores de la media de la progenie de cada planta madre para cada carácter fenotípico se analizarán con modelos de mezclas normales (ver inicio de la sección 4.4.4.). Los resultados de este análisis determinarán los grupos fenotípicos formados por las plantas juveniles. Para medir la concordancia entre estos grupos fenotípicos y la clasificación de las plantas juveniles según los grupos fenotípicos a los que sus respectivas plantas madre pertenecen (ver sección 4.4.4.1.), utilizaremos el estadístico tau de Goodman y Kruskal, *GKtau* (133). Este estadístico mide la correspondencia entre dos clasificaciones de un mismo conjunto de elementos (en nuestro caso plantas juveniles). Su valor varía entre cero (no concordancia) y uno (máxima concordancia) y deriva de definir la variabilidad en una clasificación como la probabilidad que dos elementos (plantas juveniles en nuestro caso) seleccionados aleatoriamente pertenezcan a diferentes grupos.

Aplicando el estadístico *GKtau* al análisis de interés aquí, podemos definir dos clasificaciones. *X* es la clasificación de plantas juveniles según los grupos fenotípicos a los que sus respectivas plantas madre pertenecen. Por otra parte, *Y* es la clasificación de plantas juveniles según los grupos que sus propios fenotipos forman. Entonces, la capacidad que clasificación *X* tiene de predecir la clasificación *Y* es:

$$GKtau(X, Y) = \frac{V(Y) - V(Y|X)}{V(Y)} \quad (\text{ecuación 1}),$$

donde $V(Y)$ es la probabilidad de que dos plantas juveniles aleatoriamente escogidas pertenezcan a dos grupos diferentes en la clasificación Y , mientras que $V(Y|X)$ es la probabilidad de que dos plantas juveniles aleatoriamente escogidas de un grupo particular en la clasificación X pertenezcan a dos grupos diferentes en la clasificación Y . Valores de $GKtau(X, Y)$ cercanos a uno indican que la clasificación X predice muy bien la clasificación Y ; valores cercanos a cero indican lo contrario. Por otra parte, la capacidad que clasificación Y tiene de predecir la clasificación X se define intercambiando los términos Y y X en la ecuación 1. Así, valores de $GKtau(Y, X)$ cercanos a uno indican que la clasificación Y predice muy bien la clasificación X , y valores cercanos a cero indican lo contrario.

La hipótesis según la cual los grupos fenotípicos encontrados por Pineda et al. (1) son especies predice (Figura 2) predice valores de $GKtau(X, Y)$ y $GKtau(Y, X)$ cercanos a 1 y estadísticamente significativos. En contraste, la hipótesis según la cual estos grupos fenotípicos reflejan variación fenotípica dentro de una misma especie inducida por el ambiente predice (Figura 2) predice que al menos uno de estos dos valores, $GKtau(X, Y)$ o $GKtau(Y, X)$, es cercano a cero y estadísticamente no significativo. Para evaluar la significancia estadística de los valores de $GKtau(X, Y)$ y $GKtau(Y, X)$ utilizaremos un modelo nulo que aleatorizará la asignación de la progenie de cada planta madre a los grupos en la clasificación Y (i.e., la clasificación de plantas juveniles según sus propios fenotipos) y calculará los valores de $GKtau(X, Y)$ y $GKtau(Y, X)$ en los datos aleatorizados. Realizaremos 1000 iteraciones de este modelo nulo para construir una distribución nula de $GKtau(X, Y)$ y $GKtau(Y, X)$, y calcular la significancia estadística como la fracción de los valores en estas distribuciones nulas que es al menos tan extrema como los respectivos valores observados.

4.4.4.3. *Concordancia fenotípica entre plantas adultas y plantas madre*

Examinaremos el apoyo empírico para diferentes hipótesis en lo que concierne a las plantas adultas. En particular, determinaremos la concordancia entre los fenotipos de las plantas adultas de los jardines comunes y los grupos detectados en nuestro análisis anterior (1). **La hipótesis según la cual los grupos fenotípicos son especies predice** alta concordancia (Figura 2). En contraste, **la hipótesis según la cual los grupos fenotípicos reflejan variación fenotípica dentro de una misma especie inducida por el ambiente predice** baja concordancia.

Definimos plantas adultas como aquellas que han alcanzado la edad de la primera reproducción. Por lo tanto, todas las plantas adultas habrán producido estructuras reproductivas, incluyendo capítulos en flor. Por lo tanto, para estas plantas habrá datos de los 13 caracteres fenotípicos que definen los grupos descritos en nuestro trabajo anterior (1), mencionados en la sección 4.1. Para cada uno de estos caracteres estimaremos la media a través de toda la progenie de cada planta madre, controlando así la dependencia entre las mediciones fenotípicas de la progenie de una misma planta madre. Los valores de la media de la progenie de cada planta madre para cada carácter fenotípico se analizarán con modelos de mezclas normales (ver inicio de la sección 4.4.4.). Con estos modelos determinaremos los grupos fenotípicos formados por las plantas adultas en los jardines comunes. Para medir la concordancia entre estos grupos fenotípicos y la clasificación de las plantas juveniles según los grupos fenotípicos a los que sus respectivas

plantas madre pertenecen (ver sección 4.4.4.1.), utilizaremos el estadístico estadístico *GKtau*, tal como se explica anteriormente para el caso de plantas juveniles (ver sección 4.4.4.2.).

4.5. Análisis de dominio final

El análisis de dominio es un método de investigación participativa (25, 111) que se implementará en este proyecto para describir las especies de frailejones del Sumapaz combinando tradiciones complementarias de conocimiento (ver sección 4.3). El análisis de dominio final será una actividad clave para consolidar todos los resultados del proyecto e incorporarlos en la versión final de la guía de las especies de frailejones del Sumapaz (sección 4.6).

Dependiendo de aspectos logísticos que deben ser definidos a medida que avanza el proyecto, el análisis de dominio final será una actividad que presencial o virtual, dependiendo del desarrollo de la pandemia de COVID-19. Las cuatro secciones a continuación (4.5.1., 4.5.2., 4.5.3. y 4.5.4.) describen cómo el análisis de dominio final se realizaría presencialmente (i.e., si los participantes pudiesen reunirse físicamente). Sin embargo, si fuese necesario realizar el análisis de dominio final virtualmente, utilizaríamos material fotográfico de los especímenes de herbario y fotografías de las plantas en campo, y accederíamos a los herbarios virtuales del Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis (<http://herbario.jbb.gov.co/especimen/simple>) y del Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia (<http://www.biovirtual.unal.edu.co/es/colecciones/search/plants/>). En cualquier caso, el análisis de dominio final se realizará de forma que facilite una participación diversa, incluyendo campesinos del Sumapaz, estudiantes del PEAMA de la Universidad Nacional, así como representantes del Jardín Botánico de Bogotá, Parques Nacionales Naturales de Colombia y el Missouri Botanical Garden.

El análisis de dominio final contará con una gran cantidad de información, incluyendo los resultados del análisis de dominio inicial (sección 4.3), los especímenes de las plantas madre y el análisis de sus mediciones, observaciones y análisis de las mediciones de las plantas en los jardines comunes y, en general, los resultados de poner a prueba las hipótesis sobre las especies de frailejones del Sumapaz con datos de los jardines comunes (Figura 2). Por lo tanto, el análisis de dominio final comenzará con la presentación de las especies de frailejones delimitadas con base en todos los resultados del proyecto (sección 4.5.1.) y se enfocará en enriquecer la descripción de estas especies (secciones 4.5.2., 4.5.3. y 4.5.4.). El análisis de dominio final, al igual que el inicial, enfatizará el uso de especímenes de herbario para representar los grupos fenotípicos de frailejones, y como evidencia esencial para la guía de las especies de frailejones del Sumapaz (ver sección 4.6.).

4.5.1. Presentación de las especies de frailejones del Sumapaz

El primer paso del análisis de dominio final será la presentación de las especies de frailejones del Sumapaz, basada en todos los resultados del proyecto. Las especies de frailejones se presentarán utilizando especímenes de herbario, fotografías y una versión avanzada de la guía de especies de frailejones del Sumapaz (ver sección 4.6.). Las fotografías deberán ilustrar los caracteres fenotípicos que distinguen las especies, incluyendo caracteres de plántulas y juveniles (i.e., individuos que no han alcanzado la edad de reproducción). Además, en la medida que fuese

relevante, la presentación incluiría caracteres demográficos medidos en los jardines comunes, como la tasa de crecimiento y la edad a la que las plantas empiezan a reproducirse.

Los participantes en el análisis de dominio final tendrán disponibles al menos diez especímenes de herbario representando cada especie de frailejones, y copias impresas de una lista de los caracteres que difieren entre especies, con los valores de cada carácter para cada especie. Los participantes examinarán los especímenes de herbario para verificar que las especies difieren en las características fenotípicas descritas en la presentación e incluidas en la lista de caracteres impresa. Idealmente los participantes examinarán cada característica fenotípica en al menos un espécimen de cada especie, utilizando lupas o estereoscopios para estudiar caracteres que son difíciles de observar sin magnificación.

4.5.2. Búsqueda de características diagnósticas

Los participantes utilizarán los especímenes de herbario para buscar características que distinguen las especies (i.e., características diagnósticas) que no han sido reconocidas. Para ello, se escogerán al azar dos especies y se examinarán los especímenes de herbario correspondientes en busca de al menos una característica que los distinga y que no haya sido señalada en la presentación inicial ni en las copias impresas de la lista de los caracteres que difieren entre especies. El hallazgo de nuevas características diagnósticas se describirá en detalle, así como el rango de valores de tales características en los dos grupos de frailejones examinados. Una vez finalizada esta tarea, el ejercicio de búsqueda de características diagnósticas se realizará con otro par de especies, hasta que todos los posibles pares de especies sean estudiados.

Una vez terminado el examen de todos los posibles pares de especies, los resultados se consignarán en una tabla en la que las filas representan características diagnósticas y las columnas especies. Cada fila de la tabla deberá incluir una descripción de una característica diagnóstica particular. Además, cada fila incluirá el rango de valores de la característica correspondiente en cada una de las especies de frailejones.

4.5.3. Revisión de la descripción de las especies

El tercer paso del análisis de dominio es considerar, con base en los resultados de los dos pasos anteriores (secciones 4.5.1 y 4.5.2), si es útil modificar las descripciones de las especies de frailejones del Sumapaz. Por ejemplo, se podría modificar o enriquecer la descripción de algunos de los caracteres que difieren entre especies. Además, se podrían adicionar caracteres diagnósticos a las descripciones de las especies.

4.5.4. Resumen de los hallazgos

Los resultados de análisis de dominio final se resumirán en una tabla en la que las filas representan características diagnósticas y las columnas especies de frailejones (como la descrita en la sección 4.5.2.). En tabla resumirá las descripciones de las especies de frailejones que emerjan del análisis de dominio, incorporando todos los caracteres relevantes y los rangos de valores de cada característica para cada grupo.

4.6. Guía de las especies de frailejones del Sumapaz

Elaboraremos una guía para la identificación de las especies de frailejones del Sumapaz, que estará disponible en un sitio de internet gratuito y fácil de utilizar, que fomente la participación directa de campesinos del Sumapaz, estudiantes del PEAMA de la Universidad Nacional, así como representantes del Jardín Botánico de Bogotá, Parques Nacionales Naturales de Colombia, y del Missouri Botanical Garden. También desarrollaremos una versión de la guía que podrá imprimirse fácilmente en formato PDF, para fomentar su uso cuando no hay acceso a internet o a dispositivos que puedan guardar la guía en forma electrónica.

La guía será escrita y estructurada de tal manera que sea útil para el público general y, también, para audiencias más especializadas de estudiantes, profesionales y entusiastas de las ciencias naturales. Para cada especie incluirá descripciones de los fenotipos de plantas juveniles y adultas, ilustradas con fotos de plantas creciendo en el campo y en los jardines comunes, además de fotos de especímenes de herbario. La guía también incluirá mapas de distribución de cada especie en el páramo de Sumapaz (incluyendo distribución altitudinal), basados en datos de localidad de especímenes de herbario (incluyendo las plantas madre, ver sección 4.4.1.) y modelos de distribución (134, 135), notas sobre los hábitats ocupados, una tabla resumiendo los datos de fenología obtenidos de los especímenes de herbario, y una sección que discuta especies similares que pueden causar problemas de identificación.

Toda la información en la guía (descripciones fenotípicas, mapas de distribución, fenología) **estará basada explícitamente en especímenes de herbario.** Esto es fundamental porque los especímenes de herbario son, por excelencia, las referencias primarias sobre las que se basa la delimitación de las especies (112). Además, cada espécimen de herbario constituye información primaria de la presencia de una especie en un lugar y tiempo particular. Así, colectivamente, los especímenes de herbario representan datos primarios y verificables sobre la distribución geográfica de las especies y su dinámica temporal (136, 137). Por ello, los especímenes de herbario son herramientas fundamentales para determinar el estatus de conservación de las especies (117, 118, 138) y entender los impactos bióticos del cambio global (114, 115, 119, 120). La guía incluirá listados exhaustivos de los especímenes de herbario de frailejones colectados en el páramo de Sumapaz, conectados al herbario en línea del Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis (<http://herbario.jbb.gov.co/especimen/simple>). La guía también establecerá la correspondencia (o falta de correspondencia) con clasificaciones alternativas, incluyendo la monografía de frailejones más reciente (28).

Un elemento importante de la guía, principalmente dirigido a una audiencia especializada en el monitoreo de frailejones, será una clave para la identificación de los frailejones de Sumapaz. Esta clave será interactiva, *sensu* (139), ya que cualquier combinación de caracteres relevantes podrá utilizarse para tratar de determinar la especie a la que pertenece una planta dada, juvenil o adulta. La clave interactiva también será probabilística, es decir que estimará la probabilidad de la asignación de un espécimen a cada una de las especies, basada en modelos de mezclas normales (130) aplicados al contexto de delimitación de especies (131) (ver sección 4.4.4.). La clave interactiva será implementada en una función del lenguaje de programación R (<https://www.r-project.org/>) y podrá obtenerse a través del portal de internet de la guía. El

lenguaje R es particularmente apropiado para este propósito porque es muy popular, poderoso y puede utilizarse sin costo alguno (ver el último párrafo de la sección 4.2., sobre talleres de R que el proyecto podría ofrecer en el PEAMA con sede en Nazareth).

La guía se diseñará y construirá a medida que avanza el proyecto. **Una primera versión de la guía estará disponible poco tiempo después del comienzo del proyecto.** Un borrador de esta primera versión se preparará para ser discutida durante el primer análisis de dominio (sección 4.3.). Este borrador se editará para incorporar los resultados de tal análisis y así producir la primera versión de la guía. A medida que se desarrolla el proyecto se adicionará información (fotos, datos y texto) sobre distribución y fenología obtenidos durante las salidas de campo para coleccionar plantas madre (sección 4.4.1.). Los resultados de los jardines comunes también se incorporarán en la guía a medida que se obtengan, incluyendo descripciones de plántulas de cada especie (basadas en fotos y mediciones) e información demográfica como tasas de crecimiento y la edad a la que las plantas empiezan a reproducirse. **La última versión de la guía estará disponible al final del proyecto.** Para producir esta versión final se utilizarán todos los resultados del proyecto, incluyendo la consolidación de los resultados del proyecto realizada en análisis de dominio final (sección 4.5).

4.7. Comunicación y Divulgación

Los procesos de comunicación son fundamentales y transversales a todos los componentes del proyecto. Por lo tanto, es importante definir las actividades de comunicación entre las personas que participan en el proyecto, las instituciones, y diferentes comunidades campesinas. Puntualmente, es importante establecer mecanismos de retroalimentación y construcción participativa que fortalezcan el diálogo, el intercambio de ideas, e identifiquen los aspectos del proyecto más relevantes para la divulgación. Los contenidos, productos y actividades de comunicación y divulgación se discutirán y definirán continuamente durante el desarrollo del proyecto, e incluirán presentaciones, comunicados, cortometrajes y otros materiales que se podrían utilizar también en procesos de formación o educación. Para obtener los contenidos y productos de comunicación y divulgación, durante toda la ejecución del proyecto se utilizarán fotografías, videos, audios y textos que capturen momentos del desarrollo de cada actividad principal, y contribuyan a la memoria de todo el trabajo.

5. RESULTADOS ESPERADOS

Los principales productos de proyecto pueden resumirse en **dos resultados generales esperados**. El primero es **la delimitación de las especies de frailejones del páramo de Sumapaz**, basada en la integración de tradiciones de conocimiento de las comunidades campesinas e instituciones gubernamentales y académicas. Esta delimitación de especies será consignada en artículos publicados en revistas científicas y en una guía de especies que estará disponible gratuitamente en un sitio de internet, con diferentes secciones dirigidas al público general y a especialistas (ver sección 4.6). El segundo resultado general esperado es **el empoderamiento de las comunidades campesinas del Sumapaz a través de la apropiación del conocimiento científico**. La apropiación del conocimiento científico se logrará a través de la participación co-investigadores pertenecientes a las comunidades campesinas del Sumapaz (ver

sección 4.1) y de estudiantes del Programa Especial de Admisión y Movilidad Académica (PEAMA) de la Universidad Nacional de Colombia para las zonas rurales de la región de Sumapaz, con sede en la vereda Nazareth (ver sección 4.2). Enseguida discutimos los alcances de estos dos resultados generales esperados.

5.1. Delimitación de las especies de frailejones del páramo de Sumapaz

La capacidad de identificar las especies de frailejones es fundamental para el monitoreo y manejo de la biodiversidad de los páramos, como se explicó en las secciones 1.1. y 1.2. Desafortunadamente, identificar las especies de frailejones es especialmente difícil (sección 1.2.). Nuestros estudios recientes sugieren que la taxonomía actual (28) es extremadamente deficiente, al punto de no hacer sentido alguno, porque describe fenotipos que no existen en la naturaleza y, a la vez, ignora fenotipos que son abundantes en el páramo de Sumapaz (1). En contraste, la delimitación de las especies de frailejones del páramo de Sumapaz que producirá este proyecto identificará entidades biológicas reales, cuya existencia en la naturaleza puede verificarse con base en observaciones, independientemente del criterio de expertos taxonómicos. Es decir, este proyecto resultará en la detección y descripción de especies entendidas como unidades biológicas en la naturaleza, y no simplemente en la descripción de especies taxonómicas que son divisiones potencialmente arbitrarias (106).

La guía electrónica y gratuita de especies de frailejones del Sumapaz compilará los resultados del proyecto, describiendo en detalle la delimitación de las especies (sección 4.6.). Como pocas guías, describirá en detalle no solo los fenotipos de plantas adultas de cada especie, sino también los fenotipos de plantas juveniles, con base en datos y observaciones de los jardines comunes. Este aspecto de la guía es importante para la identificación hasta especie de los frailejones juveniles, una tarea difícil pero importante en estudios sobre las respuestas de los frailejones al cambio global, y en programas de monitoreo en general. La guía también describirá la distribución geográfica de cada especie en el páramo de Sumapaz, e incluirá notas sobre hábitat y fenología y una clave interactiva para la identificación de los frailejones de Sumapaz. La guía hará posible monitorear y manejar las especies de frailejones en el páramo de Sumapaz con una base biológica sólida, documentada formalmente con especímenes de herbario y consignada en artículos publicados en revistas científicas.

Vale la pena enfatizar que el proyecto se centra en estudiar la delimitación de especies dentro del páramo de Sumapaz, y no a una escala global. Es decir, el proyecto se centra en detectar y caracterizar grupos discretos de organismos simpátricos, adoptando así la aproximación que, por excelencia, permite delimitar las especies objetivamente (capítulo 1 en 89, 140). Sin embargo, una revisión taxonómica está fuera del alcance del proyecto porque es posible que varias de las especies que habitan el páramo de Sumapaz también tengan poblaciones en otras regiones. Tomando como referencia la monografía actual (28), al menos tres especies taxonómicas que se han registrado en el páramo de Sumapaz (*Espeletia argentea*, *Espeletia grandiflora*, y *Espeletia killipii*) también se han colectado en localidades por fuera de este páramo. Otra razón por la que una revisión taxonómica no es posible es que el proyecto no incluirá especies de frailejones que no se encuentran en el páramo de Sumapaz, a pesar de que algunas de ellas puedan ser muy similares fenotípicamente, o estar muy cercanamente relacionadas evolutivamente, a las especies

que habitan el páramo de Sumapaz. En conclusión, a pesar de que el proyecto piloto no producirá una revisión taxonómica de los frailejones, el proyecto sí determinará objetivamente los límites entre las especies de frailejones en el páramo de Sumapaz, y servirá de base fundamental para estudiar las respuestas de los frailejones al cambio global en este páramo, y aportará información para futuras revisiones taxonómicas.

5.2. Empoderamiento de las comunidades campesinas del Sumapaz

La conservación de la biodiversidad en áreas y ecosistemas protegidos depende de las comunidades humanas que viven dentro y alrededor de estas áreas y ecosistemas, y que hacen parte de “sistemas socioecológicos” donde elementos sociales, económicos, políticos y ecológicos interactúan (141–143). La sostenibilidad ambiental de los sistemas socioecológicos depende en parte del conocimiento de sus propiedades ecológicas y, además, de la construcción colaborativa y difusión de tal conocimiento entre diferentes actores (144, 145). Acorde con esta visión de los sistemas socioecológicos, el proyecto aquí descrito generará nuevo conocimiento relevante al manejo racional de los recursos naturales por medio de la aplicación de los principios de la investigación participativa para el intercambio de ideas entre comunidades campesinas, entidades encargadas de temas ambientales, e instituciones académicas. Uno de los principales resultados esperados es el empoderamiento de las comunidades campesinas a través de la apropiación del conocimiento científico.

El contexto social y político en el que se desarrollará el proyecto es particularmente adecuado para lograr la apropiación del conocimiento científico por parte de las comunidades campesinas. Gracias a décadas de trabajo, que se remonta hasta el tiempo de líderes centrales al movimiento agrario en Colombia durante el principio del siglo XX (146–148), las comunidades campesinas del Sumapaz han alcanzado un alto grado de organización basado en un conocimiento claro y reflexivo de la identidad campesina. Parte central de esta identidad es la comprensión de los ecosistemas naturales para usarlos, mantenerlos y preservarlos (sección 4.1.). Buscando expandir tal comprensión, las comunidades campesinas del Sumapaz han expresado su interés en la apropiación del conocimiento científico para incrementar su capacidad de administración de los recursos naturales (21, 22). Es decir, este proyecto responde a un interés pre-existente de las comunidades campesinas del Sumapaz.

Otro aspecto del contexto social y político que facilita la apropiación del conocimiento científico por parte de las comunidades campesinas es el Programa Especial de Admisión y Movilidad Académica (PEAMA) de la Universidad Nacional de Colombia para las zonas rurales de la región de Sumapaz. Esta institución está dedicada a la formación de profesionales propios de la región que puedan contribuir a su desarrollo ambiental (sección 4.2.), y por lo tanto constituye una oportunidad para que estudiantes jóvenes se involucren y contribuyan significativamente a procesos de largo aliento de las comunidades campesinas de las que provienen (21). El proyecto aquí descrito contribuirá a la formación de estos estudiantes por medio de su participación en la exploración y formulación de hipótesis, la medición de caracteres fenotípicos en plantas madre y en plantas de los jardines comunes, el análisis de datos, y la elaboración de la guía de las especies de frailejones del Sumapaz. Los estudiantes también participarán en talleres sobre biodiversidad, diseño experimental, estadística y análisis de datos (sección 4.2.).

6. RELACIÓN CON OTROS PROYECTOS Y EXTENSIONES

El proyecto que se propone en este documento tiene relación directa con programas de monitoreo, como se explicó en detalle en la sección 1.2., y en general con cualquier estudio o programa de manejo o conservación de la biodiversidad basado en la idea que las especies de frailejones del Sumapaz son unidades naturales reales. A continuación, primero discutimos la relación del proyecto con un objetivo central de la investigación a largo plazo sobre las respuestas de los frailejones al cambio global. Después resaltamos la relación del proyecto con programas de restauración ecológica del páramo de Sumapaz. Finalmente consideramos cómo el proyecto podría constituirse en un modelo para iniciativas similares en otros páramos.

6.1. Modelos demográficos de distribución geográfica

La conservación y el manejo de la biodiversidad requiere la predicción de futuras respuestas bióticas al cambio global que informen directamente la toma de decisiones (149). Para esto es necesario desarrollar modelos de la distribución geográfica de las especies que consideren explícitamente los mecanismos demográficos que determinan las respuestas al cambio global (150–152). Es decir, estos modelos deben relacionar las tasas demográficas (e.g., tasas de reclutamiento, mortalidad, y crecimiento) con la variación espacio-temporal del ambiente para predecir la respuesta de la distribución de las especies al cambio global. Desarrollar estos modelos es uno de los objetivos centrales del estudio a largo plazo sobre las respuestas de los frailejones al cambio global. Dado que las tasas demográficas y sus relaciones al medio ambiente varían entre especies, es necesario desarrollar modelos separados para cada especie. Por ejemplo, se cree que diferentes especies de frailejones están adaptadas a diferentes altitudes y que son afectadas en diferente grado por la alteración antropogénica de sus hábitats. Estas diferencias ecológicas ilustran uno de los sentidos en los que las especies son unidades naturales reales (no simplemente divisiones taxonómicas arbitrarias, ver sección 1.2.), que deben considerarse separadamente en programas de conservación y el manejo de la biodiversidad. Uno de los resultados esperados del proyecto descrito en este documento es, precisamente, la delimitación de las especies de frailejones del páramo de Sumapaz (sección 5.1).

6.2. Restauración ecológica del páramo

Hay un interés creciente en realizar programas de restauración ecológica en el páramo de Sumapaz y en otros páramos de Colombia. Algunas iniciativas recientes se enfocan en la siembra de frailejones como uno de los métodos principales para lograr la restauración del páramo. Este énfasis en los frailejones parece razonable en vista de la dominancia e importancia ecológica de estas plantas en los páramos (sección 1.1.). Sin embargo, es importante evaluar diferentes iniciativas a la luz del significado de la restauración ecológica. Aunque hay un debate en la literatura especializada (153–156), en la práctica la restauración ecológica se entiende generalmente como el proceso de asistir la recuperación de un ecosistema nativo que ha sido degradado, dañado o destruido (157). Bajo esta definición el objetivo de la restauración ecológica es recobrar la función, estructura y composición de especies que caracterizaría un ecosistema nativo si tal ecosistema no hubiese sido degradado, dañado o destruido. Por lo tanto, la identidad de las especies es crucial en la restauración ecológica, porque la composición de

especies es una de las características clave de los ecosistemas nativos que la restauración ecológica pretende recobrar (157, 158).

Dada la dificultad para identificar las especies de frailejones del Sumapaz (sección 1.2.), es a penas natural dudar que sea posible implementar un proyecto de restauración ecológica sembrando frailejones, al menos bajo la definición de restauración ecológica generalmente aceptada (discutida en el párrafo anterior). Como mínimo, un programa de restauración ecológica basado en la siembra de frailejones debería documentar formalmente la identidad de las especies utilizadas. Idealmente, las diferencias ecológicas entre especies (ver sección 6.1.) deberían considerarse para diseñar siembras en diferentes ambientes del páramo (e.g., diferentes altitudes). El aislamiento geográfico de las especies también debería tomarse en cuenta para asegurar que las siembras no contribuyan a una posible fusión de especies a través de la hibridación (ver sección 4.4.2.11.).

El proyecto descrito proveerá la base fundamental para utilizar la siembra de frailejones como método en iniciativas para la restauración ecológica del páramo de Sumapaz. El proyecto producirá una delimitación de las especies de frailejones del páramo de Sumapaz, necesaria para establecer la composición de especies en diferentes zonas y ambientes del páramo y, por lo tanto, para diseñar siembras de frailejones en el contexto de la restauración ecológica. Aún más, el desarrollo del proyecto descrito en este documento llevará a la implementación y difusión de prácticas rigurosas para el cultivo frailejones, que documentan formalmente la procedencia de cada planta y la especie a la que pertenece. La difusión de estas prácticas entre comunidades campesinas e instituciones encargadas de temas ambientales contribuirá a la capacidad para desarrollar e implementar rigurosamente proyectos de restauración ecológica del páramo de Sumapaz.

6.3. Extensión a otros páramos

Nuestro trabajo anterior (1) se enfocó exclusivamente en el páramo de Sumapaz, pero los problemas taxonómicos que este estudio revela podrían fácilmente afectar otros páramos. Como se discutió anteriormente (sección 5.1.), varias especies taxonómicas que se han registrado en el páramo de Sumapaz también se han colectado en localidades de otros páramos, incluyendo por ejemplo el páramo de Chingaza. El proyecto descrito en este documento podría, en principio, servir como modelo para abordar este asunto en otros páramos. Por su puesto, diferencias en los contextos ecológicos, sociales y políticos de diferentes páramos tendrían que considerarse para modificar el proyecto antes de poder extenderlo a otras regiones. Pero la delimitación de especies de frailejones es de interés general para el manejo y la conservación de la biodiversidad de los páramos, dada la importancia biológica de estas plantas (sección 1.1.). Por lo tanto, la experiencia obtenida desarrollando este proyecto podría transferirse a otras regiones de Colombia, en búsqueda de la colaboración entre comunidades campesinas e instituciones ambientales y académicas para avanzar la ciencia relevante el manejo de los recursos naturales, y para empoderar las comunidades campesinas a través de la apropiación del conocimiento científico.

7. CRONOGRAMA

La fecha de comienzo del proyecto aún no está definida, por eso el cronograma en la Tabla 1 se presenta en tiempo relativo a la fecha de comienzo (mes 1). Este cronograma no incluye la construcción de la infraestructura de los jardines comunes. Las fechas de los talleres para los estudiantes del PEAMA (sección 4.2.) aún no han sido incluidos en el cronograma, y se definirán para lograr la sinergia entre el proyecto y el currículo del PEAMA. El cronograma presenta solo los tiempos para la elaboración de la primera y última versión de la guía de especies de frailejones (actividades B y K, respectivamente), pero la guía será actualizada constantemente durante la realización del proyecto. Por ahora el cronograma no incluye la actividad de “Manejo y coordinación del proyecto”, que contempla la articulación de las diferentes actividades y la consecución de recursos para el proyecto.

Tabla 1. Cronograma del proyecto. Celdas grises indican que una actividad se llevará a cabo durante el (los) mese(s) correspondiente(s). Las actividades del proyecto se muestran en la primera columna, agrupadas en 12 categorías: **A** = análisis de dominio inicial, **B** = elaboración de la primera versión de la guía de especies del Sumapaz, **C** = colección de plantas madre, **D** = medición de plantas madre en el herbario, **E** = siembra de semillas en los jardines comunes (incluyendo la extracción, selección y desinfección de las semillas), **F** = seguimiento y cuidado de las plantas en los jardines comunes (incluyendo trasplantes), **G** = medición de las plantas en los jardines comunes, el asterisco (*) en la columna correspondiente a los meses 21 – 80 indica que las mediciones se harán cada seis meses, **H** = trasplante de las plantas que aún están en la zona de trasplantes a materas a la zona de siembra final, **I** = análisis de datos de los jardines comunes, **J** = segundo análisis de dominio, **K** = elaboración de la versión final de la guía de especies de frailejones del Sumapaz, **L** = preparación de artículos científicos.

Actividad	Meses															
	1 - 6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21 - 80
A																
B																
C																
D																
E																
F																
G																
H																
I																
J																
K																
L																

8. RESPONSABILIDADES DEL PERSONAL DEL PROYECTO

En la Tabla 2 se precisan las responsabilidades primarias del personal del proyecto. En esta tabla aún no están los talleres para los estudiantes del PEAMA, ya que esta actividad debe coordinarse con profesores de esa institución. Por ahora, la tabla tampoco incluye la construcción de los jardines comunes.

Tabla 2. Responsabilidades del personal del proyecto y tiempo dedicado a diferentes actividades. Las celdas de la tabla marcadas en gris indican que la persona correspondiente será el principal responsable, o uno de los principales responsables, de coordinar y supervisar el desarrollo de la actividad y llevarla a buen término. Los números en cada celda indican el tiempo (medido en meses) que la persona correspondiente dedicará a la actividad durante toda la duración del proyecto. Las actividades del proyecto se agruparon en 13 categorías: **A** = análisis de dominio inicial, **B** = elaboración de la primera versión de la guía de especies del Sumapaz, **C** = colección de plantas madre, **D** = medición de plantas madre en el herbario, **E** = preparación y siembra de las semillas en los jardines comunes (incluyendo la extracción, selección y desinfección de las semillas), **F** = seguimiento y cuidado de las plantas en los jardines comunes (incluyendo trasplantes), **G** = medición de las plantas en los jardines comunes, **H** = trasplante de las plantas que aún están en la zona de trasplantes a materas a la zona de siembra final, **I** = análisis de datos de los jardines comunes, **J** = segundo análisis de dominio, **K** = elaboración de la versión final de la guía de especies de frailejones del Sumapaz, **L** = preparación de artículos científicos, **M** = manejo y coordinación del proyecto. Esta última actividad incluye la articulación de las diferentes actividades y la consecución de recursos para el proyecto.

Personal	Tiempo dedicado a diferentes actividades (meses)													Total (meses)
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	
Iván Jiménez	0.14	0.5	4	0.2	0	0	1	0	3	0.14	3	5	2.5	19.48
Erika Benavides	0.2	0.5	3	0.1	3	4	3	3	1	0.2	3	3	3	27.00
Moisés Penagos	0.1	0.2	3	0	2	2	4	2	1	0.2	1	0	0	15.47
Marco Pardo	0.2	0.2	0	0	0	1	3	3	1	0.2	3	3	3	17.57
Yulieth N. Ávila	0.2	0.5	3	0.2	1	2	3	3	1	0.2	4	4	1	23.10
Luz D. Rodríguez	0.2	0.2	2	0.1	1	3	3	3	1	0.2	3	2	1	19.70

9. PRESUPUESTO

El presupuesto en la Tabla 3 es el resultado de un ejercicio inicial que identificó los requerimientos básicos del proyecto y estimó el tiempo de ejecución y los costos de las actividades descritas en las secciones anteriores de este documento. Este presupuesto incluye el valor del establecimiento de cada uno de los jardines comunes planteados inicialmente, en la sede del Parque Nacional Natural Sumapaz (vereda Santa Rosa) y en la finca El Carmen (vereda Quebradas). También incluye el valor estimado de la compensación monetaria que los co-investigadores comunitarios e institucionales recibirían por el tiempo invertido en el proyecto, y que sería parte de la contrapartida. Es importante resaltar que el proyecto podría empezar con los recursos de contrapartida y con los recursos ya disponibles en cada uno de los dos jardines comunes planeados inicialmente (incluyendo materiales y capital humano).

Tabla 3. Resumen del presupuesto del proyecto.

Rubro	Cantidad	Valor unitario (pesos colombianos)	Valor total (pesos colombianos)	Financiación externa	Contrapartida PNNS	Contrapartida MOBOT	Contrapartida Comunidad
Co-investigadores (6 personas)	5 años	21.600.000	108.000.000		X	X	X
Salidas de campo	16 salidas	900.000	14.400.000	X	X	X	X
Análisis de dominio	2 eventos	1.900.000	3.800.000		X	X	X
Mediciones, siembra, mantenimiento	1 actividad	33.000.000	33.000.000		X	X	X
Transporte	12 viajes	3.000.000	36.000.000		X	X	X
Publicaciones, comunicación - difusión	5 años	3.000.000	15.000.000	X			
Equipos y materiales (computadores - cámaras – libretas, lápices, papelería)	5 años	2.200.000	11.000.000	X	X	X	X
Servicios (Laboratorios - consultorías)	30 servicios	1.000.000	30.000.000	X			
Infraestructura jardín común (óptima) - sede PNN Sumapaz	1 estructura	36.000.000	36.000.000		X		
Infraestructura jardín común (básica) - Quebradas	1 estructura	12.000.000	12.000.000	X			X
Materiales Jardín C. funcionamiento	2 estructuras	4.500.000	9.000.000				
Espacio Quebradas y seguimiento adicional	5 años	2.160.000	10.800.000				
Total			336.000.000	X	X	X	X

10. LITERATURA CITADA

1. Y. M. Pineda, et al. The nature of *Espeletia* species. *bioRxiv*. doi: <https://doi.org/10.1101/2020.09.29.318865> (2020).
2. B. R. Scheffers, et al., The broad footprint of climate change from genes to biomes to people. *Science* 354, aaf7671 (2016).
3. G. T. Pecl, et al., Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being. *Science* 355, eaai9214 (2017).
4. A. Santangeli, A. Rajasärkkä, A. Lehtikoinen, Effects of high latitude protected areas on bird communities under rapid climate change. *Glob. Change Biol.* 23, 2241–2249 (2017).
5. T. C. Bonebrake, et al., Managing consequences of climate - driven species redistribution requires integration of ecology, conservation and social science. *Biol. Rev.* 93, 284–305 (2018).
6. L. van Kerkhoff, et al., Towards future-oriented conservation: Managing protected areas in an era of climate change. *Ambio* 48, 699–713 (2019).
7. P. Lehtikoinen, A. Santangeli, K. Jaatinen, A. Rajasärkkä, A. Lehtikoinen, Protected areas act as a buffer against detrimental effects of climate change—Evidence from large - scale, long - term abundance data. *Glob. Change Biol.* 25, 304–313 (2019).
8. D. González-Zeas, et al., Linking global climate change to local water availability: Limitations and prospects for a tropical mountain watershed. *Sci. Total Environ.* 650, 2577–2586 (2019).
9. R. Tito, H. L. Vasconcelos, K. J. Feeley, Global climate change increases risk of crop yield losses and food insecurity in the tropical Andes. *Glob. Change Biol.* 24, e592–e602 (2018).
10. T. Newbold, et al., Global patterns of terrestrial assemblage turnover within and among land uses. *Ecography* 39, 1151–1163 (2016).
11. R. P. Powers, W. Jetz, Global habitat loss and extinction risk of terrestrial vertebrates under future land-use-change scenarios. *Nat. Clim. Change* 9, 323–329 (2019).
12. J. M. Northrup, J. W. Rivers, Z. Yang, M. G. Betts, Synergistic effects of climate and land - use change influence broad - scale avian population declines. *Glob. Change Biol.* 25, 1561–1575 (2019).
13. M. K. Peters, et al., Climate–land-use interactions shape tropical mountain biodiversity and ecosystem functions. *Nature* 568, 88–92 (2019).
14. C. D. L. Orme, et al., Global hotspots of species richness are not congruent with endemism or threat. *Nature* 436, 1016–1019 (2005).

15. T. Distler, P. M. Jørgensen, A. Graham, G. Davidse, I. Jimenez, DETERMINANTS AND PREDICTION OF BROAD-SCALE PLANT RICHNESS ACROSS THE WESTERN NEOTROPICS1. *Ann. Mo. Bot. Gard.* 96, 470–491 (2009).
16. C. Rahbek, et al., Humboldt's enigma: What causes global patterns of mountain biodiversity? *Science* 365, 1108–1113 (2019).
17. P. R. Elsen, M. W. Tingley, Global mountain topography and the fate of montane species under climate change. *Nat. Clim. Change* 5, 772–776 (2015).
18. B. G. Freeman, M. N. Scholer, V. Ruiz-Gutierrez, J. W. Fitzpatrick, Climate change causes upslope shifts and mountaintop extirpations in a tropical bird community. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 115, 11982–11987 (2018).
19. M. C. Urban, Escalator to extinction. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 115, 11871–11873 (2018).
20. W. Buytaert, F. Cuesta - Camacho, C. Tobón, Potential impacts of climate change on the environmental services of humid tropical alpine regions. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 20, 19–33 (2011).
21. ASOSUMAPAZ (Asociación Campesina del Sumapaz), INCODER (Instituto de Desarrollo Rural), SDDE (Secretaría Distrital de Desarrollo Económico), FDLS (Fondo de Desarrollo Local de Sumapaz), “Plan de desarrollo sostenible de la zona de reserva campesina del Sumapaz (Bogotá DC) 2014-2030. Convenio De Asociación 0648-310 de 2012.” (2013).
22. SINPEAGRICUN (Sindicato de Pequeños Agricultores de Cundinamarca), ILSA (Instituto Latinoamericano para una Sociedad y un Derecho Alternativo), INCODER (Instituto de Desarrollo Rural), “Plan de Desarrollo Sostenible Zona de Reserva Campesina de Cabrera Cundinamarca: Por una Zona de Reserva Campesina garante de derechos económicos, sociales, culturales y ambientales para los cabrerunos.” (Editorial Gente Nueva, 2013).
23. H. G. Cortés-Mora, “Risks and Challenges in the Implementation of a Higher Education Program (PEAMA) in the Rural Community of Nazareth-Sumapaz Colombia,” Universidad Nacional de Colombia. (2018).
24. J. F. Gonsalves, Investigación y desarrollo participativo para la agrícola y el manejo sostenible de recursos naturales: libro de consulta (IDRC, 2006).
25. J. M. Chevalier, D. J. Buckles, Participatory action research: Theory and methods for engaged inquiry (Routledge, 2019).
26. M. Monasterio, L. Sarmiento, Adaptive radiation of Espeletia in the cold Andean tropics. *Trends Ecol. Evol.* 6, 387–391 (1991).

27. J. T. Rauscher, Molecular phylogenetics of the Espeletia complex (Asteraceae): evidence from nrDNA ITS sequences on the closest relatives of an Andean adaptive radiation. *Am. J. Bot.* 89, 1074–1084 (2002).
28. J. Cuatrecasas, H. E. Robinson, W. L. Wagner, A systematic study of the subtribe Espeletiinae (Heliantheae, Asteraceae) (New York Botanical Garden Press, 2013).
29. M. Diazgranados, J. C. Barber, Geography shapes the phylogeny of frailejones (Espeletiinae Cuatrec., Asteraceae): a remarkable example of recent rapid radiation in sky islands. *PeerJ* 5, e2968 (2017).
30. C. Pouchon, et al., Phylogenomic analysis of the explosive adaptive radiation of the Espeletia complex (Asteraceae) in the tropical Andes. *Syst. Biol.* 67, 1041–1060 (2018).
31. P. M. Ramsay, E. R. B. Oxley, The growth form composition of plant communities in the Ecuadorian páramos. *Plant Ecol.* 131, 173–192 (1997).
32. E. Calderón, G. Galeano, N. García, Libro rojo de plantas de Colombia. Volumen 2: Palmas, frailejones y zamias (La serie Libros Rojos de Especies amenazadas de Colombia. Instituto ..., 2005).
33. M. Diazgranados, A nomenclator for the frailejones (Espeletiinae Cuatrec., Asteraceae). *PhytoKeys*, 1 (2012).
34. J. Mavarez, A Taxonomic revision of Espeletia (Asteraceae). The Venezuelan Radiation. *Harv. Pap. Bot.* 24, 131–244 (2019).
35. P. E. Berry, R. N. Calvo, An overview of the reproductive biology of Espeletia (Asteraceae) in the Venezuelan Andes. *Trop. Alp. Environ.*, 229–249 (1994).
36. A. M. GALLEGO, M. A. B. Gómez, Caracterización de micrositios para el establecimiento de plántulas de Espeletia uribei (Asteraceae). *Acta Biológica Colomb.* 21, 387–398 (2016).
37. B. Sandel, et al., The influence of Late Quaternary climate-change velocity on species endemism. *Science* 334, 660–664 (2011).
38. S. Dullinger, et al., Europe's other debt crisis caused by the long legacy of future extinctions. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 110, 7342–7347 (2013).
39. T. Van Der Hammen, Diagnóstico, cambio global y conservación in *Memorias Congreso Mundial de Páramos*, (Ministerio de Medio Ambiente Paipa, Colombia, 2002), pp. 60–71.
40. R. J. Wilson, et al., Changes to the elevational limits and extent of species ranges associated with climate change. *Ecol. Lett.* 8, 1138–1146 (2005).
41. T. Dirnböck, F. Essl, W. Rabitsch, Disproportional risk for habitat loss of high - altitude endemic species under climate change. *Glob. Change Biol.* 17, 990–996 (2011).

42. S. Dullinger, et al., Extinction debt of high-mountain plants under twenty-first-century climate change. *Nat. Clim. Change* 2, 619–622 (2012).
43. M. Gottfried, et al., Continent-wide response of mountain vegetation to climate change. *Nat. Clim. Change* 2, 111–115 (2012).
44. D. M. Bell, J. B. Bradford, W. K. Lauenroth, Mountain landscapes offer few opportunities for high - elevation tree species migration. *Glob. Change Biol.* 20, 1441–1451 (2014).
45. C. Salinas, L. S. Fuentes, L. Hernández, Caracterización de los lepidópteros fitófagos asociados a la herbivoría de frailejones en la microcuenca de la quebrada Calostros del Parque Nacional Natural Chingaza. *Rev. Mutis* 3, 22–22 (2013).
46. O. V. Ríos, Disturbios en los páramos andinos. *Visión Socioecosistémica Los Páramos Alta Mont. Colomb.*, 39–57 (2013).
47. J. Valencia, L. Lassaletta, E. Velázquez, J. M. Nicolau, A. Gómez-Sal, Factors Controlling Compositional Changes in a Northern Andean Páramo (La Rusia, Colombia). *Biotropica* 45, 18–26 (2013).
48. D. L. Vásquez, H. Balslev, P. Sklenář, Human impact on tropical-alpine plant diversity in the northern Andes. *Biodivers. Conserv.* 24, 2673–2683 (2015).
49. P. A. Verweij, K. Kok, Effects of fire and grazing on *Espeletia hartwegiana* populations. *Páramo Andean Ecosyst. Hum. Infl. Acad. Lond. Engl.*, 215–229 (1992).
50. P. M. Ramsay, The Ecology of Volcán Chiles: high-altitude ecosystems on the Ecuador-Colombia border (Pebble & Shell, 2001).
51. R. Suarez, G. Medina, Vegetation structure and soil properties in Ecuadorian páramo grasslands with different histories of burning and grazing. *Arct. Antarct. Alp. Res.* 33, 158–164 (2001).
52. O. Vargas, J. Premauer, C. Cárdenas, Efecto del pastoreo sobre la estructura de la vegetación en un páramo húmedo de Colombia. *Ecotrópicos* 15, 35–50 (2002).
53. O. Vargas, J. Premauer, M. Zalamea, Impacto de fuego y ganadería sobre la vegetación de páramo in *Memorias Del Congreso Mundial de Páramos*, (2002), pp. 819–841.
54. O. V. Vargas Ríos, Disturbios, patrones sucesionales y grupos funcionales de especie en la interpretación de matrices de paisaje en los páramos. *Pérez - Arbelaezia* 13, 73–89 (2002).
55. M. A. Zomer, P. M. Ramsay, *Espeletia* giant rosette plants are reliable biological indicators of time since fire in Andean grasslands. *Plant Ecol.* 219, 79–88 (2018).
56. P. M. Ramsay, Giant rosette plant morphology as an indicator of recent fire history in Andean páramo grasslands. *Ecol. Indic.* 45, 37–44 (2014).

57. I. F. Amaya Cocunubó, F. O. Amaya Cocunubó, Análisis de los impactos ecosistémicos causados por la actividad minera en el páramo Palacio (2014).
58. V. Jaimes, L. Sarmiento, Regeneración de la vegetación de páramo después de un disturbio agrícola en la Cordillera Oriental de Colombia. *Ecotropicos* 15, 61–74 (2002).
59. L. Sarmiento, L. Llambi, A. Escalona, N. Marquez, Vegetation patterns, regeneration rates and divergence in an old-field succession of the high tropical Andes. *Plant Ecol.* 166, 145–156 (2003).
60. C. Estrada, M. Monasterio, GIGANTE, *Espeletia spicata* SCH. BIP.(COMPOSITAE), DEL. *Ecotropicos* 4, 1–17 (1991).
61. J. Cavelier, et al., Leaf demography and growth rates of *Espeletia barclayana* Cuatrec.(Compositae), a caulescent rosette in a Colombian paramo. *Biotropica*, 52–63 (1992).
62. J. F. Silva, M. C. Trevisan, C. A. Estrada, M. Monasterio, Comparative demography of two giant caulescent rosettes (*Espeletia timotensis* and *E. spicata*) from the high tropical Andes. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 9, 403–413 (2000).
63. J. Fagua, V. Gonzalez, Growth rates, reproductive phenology, and pollination ecology of *Espeletia grandiflora* (Asteraceae), a giant Andean caulescent rosette. *Plant Biol.* 9, 127–135 (2007).
64. F. L. Pérez, Long-term growth rates of two caulescent rosette species, *Coespeletia timotensis* (Cuatrec.) Cuatrec., and *Espeletia schultzii* Wedd., in an Andean páramo. *Flora* 252, 1–9 (2019).
65. A. M. Cleef, Characteristics of neotropical paramo vegetation and its subantarctic relations. *Erdwissenschaftliche Forsch.* 11, 365–390 (1978).
66. J. Cuatrecasas, Speciation and radiation of the Espeletiinae in the Andes. Pp. 267–303 in F. Vuilleumier & M. Monasterio (eds.), *High altitude tropical biogeography* (Oxford Univ. Press, Oxford, 1986).
67. A. P. Smith, T. P. Young, Tropical alpine plant ecology. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 18, 137–158 (1987).
68. M. D. Smith, A. K. Knapp, Dominant species maintain ecosystem function with non - random species loss. *Ecol. Lett.* 6, 509–517 (2003).
69. O. Dangles, B. Malmqvist, Species richness–decomposition relationships depend on species dominance. *Ecol. Lett.* 7, 395–402 (2004).
70. K. J. Gaston, R. A. Fuller, Commonness, population depletion and conservation biology. *Trends Ecol. Evol.* 23, 14–19 (2008).

71. T. L. DeVault, Z. H. Olson, J. C. Beasley, O. E. Rhodes Jr, Mesopredators dominate competition for carrion in an agricultural landscape. *Basic Appl. Ecol.* 12, 268–274 (2011).
72. S. Fauset, et al., Hyperdominance in Amazonian forest carbon cycling. *Nat. Commun.* 6, 1–9 (2015).
73. B. Maas, T. Tscharntke, S. Saleh, D. D. Putra, Y. Clough, Avian species identity drives predation success in tropical cacao agroforestry. *J. Appl. Ecol.* 52, 735–743 (2015).
74. R. Winfree, J. W. Fox, N. M. Williams, J. R. Reilly, D. P. Cariveau, Abundance of common species, not species richness, drives delivery of a real - world ecosystem service. *Ecol. Lett.* 18, 626–635 (2015).
75. M. Lohbeck, F. Bongers, M. Martinez - Ramos, L. Poorter, The importance of biodiversity and dominance for multiple ecosystem functions in a human - modified tropical landscape. *Ecology* 97, 2772–2779 (2016).
76. R. Inger, E. Per, D. T. Cox, K. J. Gaston, Key role in ecosystem functioning of scavengers reliant on a single common species. *Sci. Rep.* 6, 29641 (2016).
77. H. Sturm, Contribución al conocimiento de las relaciones entre los frailejones (*Espeletiinae*, *Asteraceae*) y los animales en la región del páramo andino. *Rev Acad Colomb Cienc* 17, 667–685 (1990).
78. D. M. Trujillo-Motta, “Efecto de disturbios antrópicos en las interacciones bióticas de un páramo húmedo de Colombia” in *Memorias Congreso Mundial de Páramos*, (2002), pp. 969–982.
79. J. R. Salamanca-Reyes, Ecología del barbudito de páramo (*Oxypogon guerinii*, *Trochilidae*) en el páramo de Siscunsi, Boyacá, Colombia. *Ornitol. Colomb.* 11, 58–75 (2011).
80. L. Sarmiento, Water balance and soil loss under long fallow agriculture in the Venezuelan Andes. *Mt. Res. Dev.* 20, 246–253 (2000).
81. C. Tobón, E. G. G. Morales, Capacidad de interceptación de la niebla por la vegetación de los páramos andinos. *Av. En Recur. Hidráulicos* (2007).
82. M. F. Cárdenas Agudelo, “Ecohydrology of paramos in Colombia: Vulnerability to climate change and land use,” *Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín*. (2016).
83. C. R. Montes-Pulido, J. J. Ramos-Miras, S. José-Wery, A. María, Estimation of soil organic carbon (SOC) at different soil depths and soil use in the Sumapaz paramo, Cundinamarca-Colombia. *Acta Agronómica* 66, 95–101 (2017).
84. W. Buytaert, et al., Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Sci. Rev.* 79, 53–72 (2006).

85. J. E. Rojas Rojas, A. Varela Ramírez, K. Osher Altsjor, Plan de Conservación y Manejo de las Especies de Frailejones Presentes en el Territorio CAR (2018).
86. Parque Nacional Natural Sumapaz, Programa de monitoreo del Parque Nacional Natural Sumapaz. Documento anexo del Plan de Manejo 2018-2022 del Parque Nacional Natural Sumapaz. Dirección Territorial Orinoquia. Parques Nacionales Naturales de Colombia. (2018).
87. G. M. Mace, The role of taxonomy in species conservation. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.* 359, 711–719 (2004).
88. S. T. Garnett, L. Christidis, Taxonomy anarchy hampers conservation. *Nat. News* 546, 25 (2017).
89. J. A. Coyne, H. A. Orr, *Speciation*. Sunderland, MA (2004).
90. T. G. Barraclough, *The Evolutionary Biology of Species* (Oxford University Press, 2019).
91. A. R. Templeton, The meaning of species and speciation: a genetic perspective. *Units Evol. Essays Nat. Species*, 159–183 (1989).
92. IUCN Standards and Petitions Committee, *Guidelines for Using the IUCN Red List Categories and Criteria*. Version 14. (2019).
93. IUCN (World Conservation Union), *The IUCN red list of threatened species. Summary statistics for globally threatened species*. (2006).
94. S. Madriñán, A. J. Cortés, J. E. Richardson, Páramo is the world's fastest evolving and coolest biodiversity hotspot. *Front. Genet.* 4, 192 (2013).
95. P. Berry, S. Beaujon, R. N. Calvo, La hibridización en la evolución de los frailejones (*Espeletia*, *Asteraceae*). *Ecotropicos* 1, 11–24 (1988).
96. L. Van Valen, Ecological species, multispecies, and oaks. *Taxon* 25, 233–239 (1976).
97. J. P. Lotsy, On the species of the taxonomist in its relation to evolution. *Genetica* 13, 1–16 (1931).
98. V. Grant, The plant species in theory and practice. *Species Probl.*, 39 (1957).
99. V. Grant, *Plant Speciation*, 1st Ed. (Columbia University Press, 1971).
100. L. H. Rieseberg, J. M. Burke, A genic view of species integration. *J. Evol. Biol.* 14, 883–886 (2001).
101. Q. C. Cronk, A. Suarez - Gonzalez, The role of interspecific hybridization in adaptive potential at range margins. *Mol. Ecol.* 27, 4653–4656 (2018).

102. C. H. Cannon, R. J. Petit, The oak syngameon: more than the sum of its parts. *New Phytol.* (2019).
103. A. Suarez-Gonzalez, C. Lexer, Q. C. Cronk, Adaptive introgression: a plant perspective. *Biol. Lett.* 13, 20170688 (2018).
104. A. L. Hipp, et al., Genomic Identity of White Oak Species in an Eastern North American Syngameon. *Ann. Mo. Bot. Gard.* 104, 455–477 (2019).
105. A. L. Hipp, Pharaoh's Dance: the Oak Genomic Mosaic. (2018).
106. J. Hey, M. L. Arnold, R. K. Butlin, R. G. Harrison, Understanding and confronting species uncertainty in biology and conservation. *Trends Ecol. Evol.* 18, 597–603 (2003).
107. P. de Villemereuil, O. E. Gaggiotti, M. Mousterde, I. Till-Bottraud, Common garden experiments in the genomic era: new perspectives and opportunities. *Heredity* 116, 249–254 (2016).
108. M. P. Pimbert, International Institute for Environment and Development, Participatory research and on-farm management of agricultural biodiversity in Europe (IIED, 2011).
109. V. M. Toledo, “La racionalidad ecológica de la producción campesina” in *Ecología, Campesinado e Historia, Genealogía del poder.*, E. Sevilla Guzmán, M. González de Molina, Eds. (Las Ediciones de la Piqueta, 1993), pp. 197–218.
110. A. Vázquez-García, E. Ortiz-Torres, F. Zárate-Temoltzi, I. Carranza-Cerda, La construcción social de la identidad campesina en dos localidades del Municipio de Tlaxco, Tlaxcala, México. *Agric. Soc. Desarro.* 10, 01–21 (2013).
111. J. M. Chevalier, D. J. Buckles, Handbook for Participatory Action, Research, Planning and Evaluation, Revised Edition (SAS2 Dialogue, 2019).
112. J. Wen, S. M. Ickert-Bond, M. S. Appelhans, L. J. Dorr, V. A. Funk, Collections-based systematics: Opportunities and outlook for 2050: Collections-based systematics 2050. *J. Syst. Evol.* 53, 477–488 (2015).
113. V. A. Funk, Collections-based science in the 21st Century: Collections-based science in the 21st Century. *J. Syst. Evol.* 56, 175–193 (2018).
114. D. A. Denney, J. T. Anderson, Natural history collections document biological responses to climate change: A commentary on DeLeo et al. (2019), Effects of two centuries of global environmental variation on phenology and physiology of *Arabidopsis thaliana*. *Glob. Change Biol.* 26, 340–342 (2020).
115. J. M. Heberling, L. A. Prather, S. J. Tonsor, The Changing Uses of Herbarium Data in an Era of Global Change: An Overview Using Automated Content Analysis. *BioScience* 69, 812–822 (2019).

116. A. López, A. B. Sassone, The Uses of Herbaria in Botanical Research. A Review Based on Evidence From Argentina. *Front. Plant Sci.* 10 (2019).
117. N. Nualart, N. Ibáñez, I. Soriano, J. López-Pujol, Assessing the Relevance of Herbarium Collections as Tools for Conservation Biology. *Bot. Rev.* 83, 303–325 (2017).
118. C. Canteiro, et al., Enhancement of conservation knowledge through increased access to botanical information. *Conserv. Biol.* 33, 523–533 (2019).
119. P. L. M. Lang, F. M. Willems, J. F. Scheepens, H. A. Burbano, O. Bossdorf, Using herbaria to study global environmental change. *New Phytol.* 221, 110–122 (2019).
120. E. K. Meineke, T. J. Davies, B. H. Daru, C. C. Davis, Biological collections for understanding biodiversity in the Anthropocene. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 374, 20170386 (2019).
121. A. P. Smith, Growth and population dynamics of Espeletia (Compositae) in the Venezuelan Andes. *Smithson. Contrib. Bot.* 48, 1–45 (1981).
122. S. B. Yakimowski, L. H. Rieseberg, The role of homoploid hybridization in evolution: A century of studies synthesizing genetics and ecology. *Am. J. Bot.* 101, 1247–1258 (2014).
123. S. Lamichhaney, et al., Evolution of Darwin’s finches and their beaks revealed by genome sequencing. *Nature* 518, 371–375 (2015).
124. R. J. Pereira, F. S. Barreto, R. S. Burton, Novelty by hybridization: experimental evidence for increased thermal tolerance by transgressive segregation in *tigriopus californicus*: ecological novelty by hybridization. *Evolution* 68, 204–215 (2014).
125. M. C. Fontaine, et al., Extensive introgression in a malaria vector species complex revealed by phylogenomics. *Science* 347, 1258524 (2015).
126. S. A. Taylor, E. L. Larson, R. G. Harrison, Hybrid zones: windows on climate change. *Trends Ecol. Evol.* 30, 398–406 (2015).
127. A. Brennan, et al., Hybridization due to changing species distributions: adding problems or solutions to conservation of biodiversity during global change. *Evol. Ecol. Res.* 16, 475–491 (2014).
128. J. M. Gómez, A. González-Megías, J. Lorite, M. Abdelaziz, F. Perfectti, The silent extinction: climate change and the potential hybridization-mediated extinction of endemic high-mountain plants. *Biodivers. Conserv.* 24, 1843–1857 (2015).
129. J. Mallet, A. Meyer, P. Nosil, J. L. Feder, Space, sympatry and speciation. *J. Evol. Biol.* 22, 2332–2341 (2009).
130. G. McLachlan, D. Peel, Finite Mixture Models, Willey Series in Probability and Statistics (John Wiley & Sons, New York, 2000).

131. C. Cadena, F. Zapata, I. Jiménez, Issues and Perspectives in Species Delimitation using Phenotypic Data: Atlantean Evolution in Darwin's Finches. *Syst. Biol.* 67, 181–194 (2018).
132. M. J. Crawley, *The R book*, Second edition (Wiley, 2013).
133. A. Agresti, *Categorical data analysis*, 2nd ed (Wiley-Interscience, 2002).
134. J. Elith, J. R. Leathwick, Species Distribution Models: Ecological Explanation and Prediction Across Space and Time. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 40, 677–697 (2009).
135. M. B. Araújo, et al., Standards for distribution models in biodiversity assessments. *Sci. Adv.* 5, eaat4858 (2019).
136. M. Schilthuizen, C. S. Vairappan, E. M. Slade, D. J. Mann, J. A. Miller, Specimens as primary data: museums and 'open science.' *Trends Ecol. Evol.* 30, 237–238 (2015).
137. J. Troudet, R. Vignes-Lebbe, P. Grandcolas, F. Legendre, The Increasing Disconnection of Primary Biodiversity Data from Specimens: How Does It Happen and How to Handle It? *Syst. Biol.* 67, 1110–1119 (2018).
138. G. E. Schatz, Taxonomy and herbaria in service of plant conservation: lessons from Madagascar's endemic families. *Ann. Mo. Bot. Gard.* 89, 145–152 (2002).
139. M. J. Dallwitz, T. A. Paine, E. J. Zurcher, Principles of interactive keys. *Web-Based Doc. Httpbiodiversity Uno Edudelta* 3 (2000).
140. F. Zapata, I. Jiménez, Species Delimitation: Inferring Gaps in Morphology across Geography. *Syst. Biol.* 61, 179–194 (2012).
141. E. Ostrom, A General Framework for Analyzing Sustainability of Social-Ecological Systems. *Science* 325, 419–422 (2009).
142. G. M. Mace, Whose conservation? *Science* 345, 1558–1560 (2014).
143. G. S. Cumming, et al., Understanding protected area resilience: a multi-scale, social-ecological approach. *Ecol. Appl.* 25, 299–319 (2015).
144. A. Virapongse, et al., A social-ecological systems approach for environmental management. *J. Environ. Manage.* 178, 83–91 (2016).
145. Ö. Bodin, Collaborative environmental governance: Achieving collective action in social-ecological systems. *Science* 357, eaan1114 (2017).
146. L. Varela Mora, Y. Romero Picón, *Surcando amaneceres. Historia de los agrarios de Sumapaz y Oriente del Tolima*. Bogotá Fondo Editor. Univ. Antonio Nariño Alcaldía Local Sumapaz (2007).

147. R. Londoño Botero, Juan de la Cruz Varela: sociedad y política en la región de Sumapaz, 1902-1984 (Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Humanas, Departamento de Historia, 2011).
148. L. M. V. Mora, D. D. Ortiz, Estrategia de los agrarios de Sumapaz y Oriente del Tolima durante el Frente Nacional. *Hist. Soc.*, 173–195 (2011).
149. M. C. Urban, et al., Improving the forecast for biodiversity under climate change. *Science* 353, aad8466–aad8466 (2016).
150. J. Pagel, F. M. Schurr, Forecasting species ranges by statistical estimation of ecological niches and spatial population dynamics: Statistical estimation of dynamic range models. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 21, 293–304 (2012).
151. F. M. Schurr, et al., How to understand species' niches and range dynamics: a demographic research agenda for biogeography: A demographic research agenda for biogeography. *J. Biogeogr.* 39, 2146–2162 (2012).
152. J. Pagel, et al., Mismatches between demographic niches and geographic distributions are strongest in poorly dispersed and highly persistent plant species. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 117, 3663–3669 (2020).
153. J. C. Aronson, D. Simberloff, A. Ricciardi, N. Goodwin, Restoration science does not need redefinition. *Nat. Ecol. Evol.* 2, 916–916 (2018).
154. N. M. Evans, M. A. Davis, What about cultural ecosystems? Opportunities for cultural considerations in the “International Standards for the Practice of Ecological Restoration”: What about cultural ecosystems? *Restor. Ecol.* 26, 612–617 (2018).
155. E. S. Higgs, et al., Keep ecological restoration open and flexible. *Nat. Ecol. Evol.* 2, 580–580 (2018).
156. T. McDonald, et al., The SER Standards, cultural ecosystems, and the nature-culture nexus-a reply to Evans and Davis: SER Standards-a reply to Evans and Davis. *Restor. Ecol.* 27, 243–246 (2019).
157. G. D. Gann, et al., International principles and standards for the practice of ecological restoration. Second edition. *Restor. Ecol.* 27 (2019).
158. K. Holl, *Primer of Ecological Restoration* (Island Press, 2020).
159. Rauschkolb, R., Henres, L., Lou, C., Godefroid, S., Dixon, L., Bossdorf, O., Ensslin, A. and Scheepens, J., 2020. Resurrection approach shows evolutionary changes in drought responses in European plant species after two decades of climate change.
160. Wooliver, R., Sheth, S.N. and Tittes, S.B., 2020. A resurrection study reveals limited evolution of thermal performance in response to recent climate change across the geographic range of the scarlet monkeyflower. *bioRxiv*.

11. FIGURAS

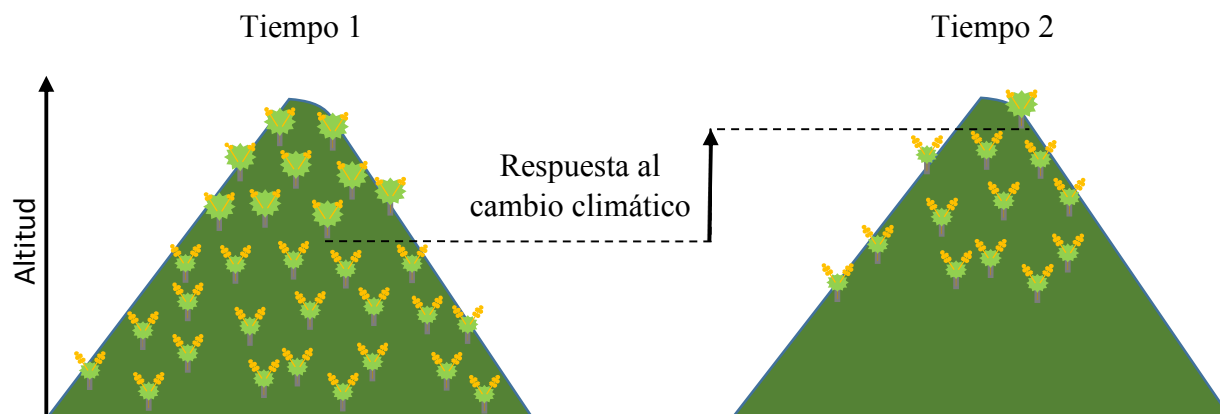


Figura 1. Las especies de las partes altas de las montañas son muy vulnerables al cambio climático. La figura muestra la distribución de dos especies antes (Tiempo 1) y después (Tiempo 2) del desplazamiento altitudinal de ambas especies en respuesta al cambio climático. La especie propia de la zona más alta del gradiente altitudinal (caracterizada por rosetas grandes y escapos cortos con tres capítulos) sufre una reducción muy marcada de su rango geográfico, dado que la forma generalmente cónica de las montañas implica una reducción del área disponible con la altitud. Tal reducción del área de distribución de las especies incrementa su vulnerabilidad a otras amenazas (e.g., transformación de hábitats para uso humano) y por lo tanto aumenta el riesgo de extinción. En algunos casos el cambio climático puede resultar en la desaparición del hábitat adecuado para una especie, causando así una “extinción en la cumbre”.

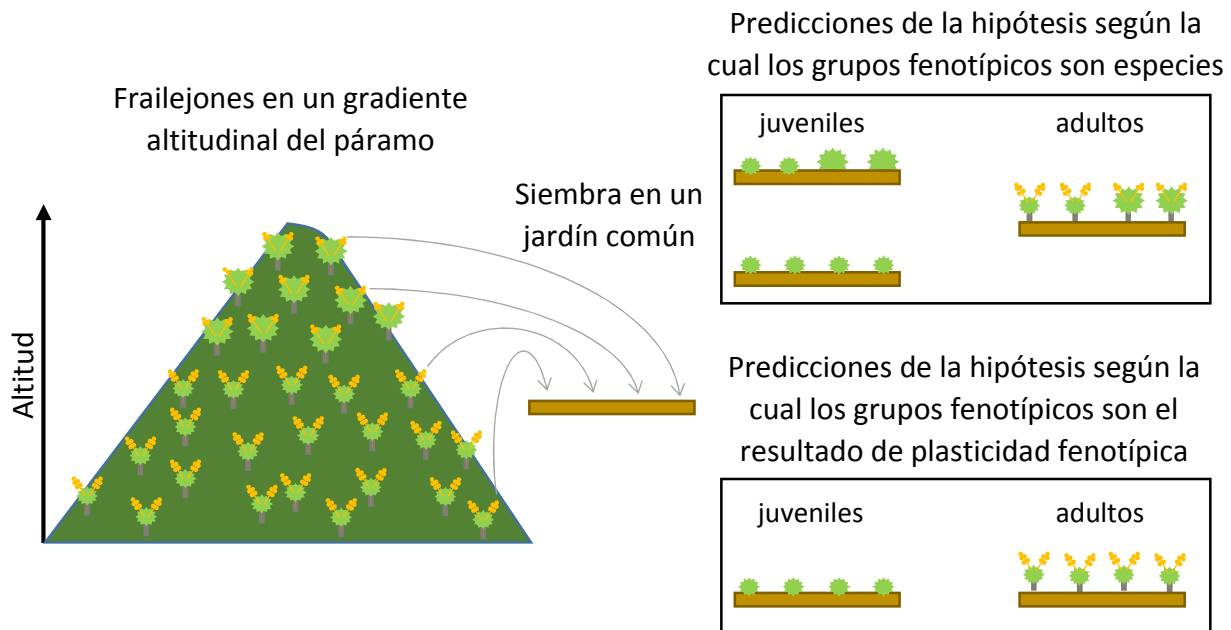


Figura 2. Predicciones de lo que debería observarse en un jardín común, según dos hipótesis sobre los grupos fenotípicos de frailejones del Sumapaz descritos por Pineda et al. (1). A la izquierda de la figura se representa la distribución altitudinal de dos grupos fenotípicos de frailejones. Un grupo fenotípico, caracterizado por rosetas grandes y escapos cortos con tres capítulos, se encuentra en la parte alta del gradiente altitudinal. El otro grupo, caracterizado por rosetas pequeñas y escapos largos con cinco capítulos, se encuentra en la parte baja del gradiente altitudinal. Dos hipótesis pueden explicar la naturaleza de estos grupos fenotípicos. La primera hipótesis propone que los grupos fenotípicos corresponden a especies distintas. La segunda hipótesis propone que estos grupos son el resultado de plasticidad fenotípica dentro de una especie (i.e., variación fenotípica inducida por el ambiente). En este ejemplo la diferencia ambiental más obvia entre los grupos fenotípicos es la altitud, pero la hipótesis de plasticidad fenotípica puede aplicarse a cualquier tipo de diferencia ambiental (e.g., suelo, pendiente, exposición al viento, etc.). Si las semillas de plantas madre pertenecientes a diferentes grupos fenotípicos se siembran en un jardín común (flechas grises y rectángulo marrón), las diferencias ambientales entre la progenie de los grupos fenotípicos se eliminarían y, por lo tanto, sería posible poner a prueba las dos hipótesis. La hipótesis según la cual los grupos fenotípicos son especies predice diferencias fenotípicas entre la progenie de diferentes grupos fenotípicos (arriba a la derecha), porque tales diferencias tienen una base genética y, por lo tanto, no desaparecerían en un ambiente común. Estas diferencias genéticas podrían expresarse en plantas juveniles o no; pero deberían necesariamente expresarse en plantas adultas, ya que Pineda et al. (1) describió grupos fenotípicos de plantas adultas. En contraste, la hipótesis según la cual los grupos fenotípicos son el resultado de plasticidad fenotípica predice que no habrá diferencias entre la progenie de diferentes grupos fenotípicos (abajo a la derecha), porque tales diferencias deberían desaparecer en un ambiente común.

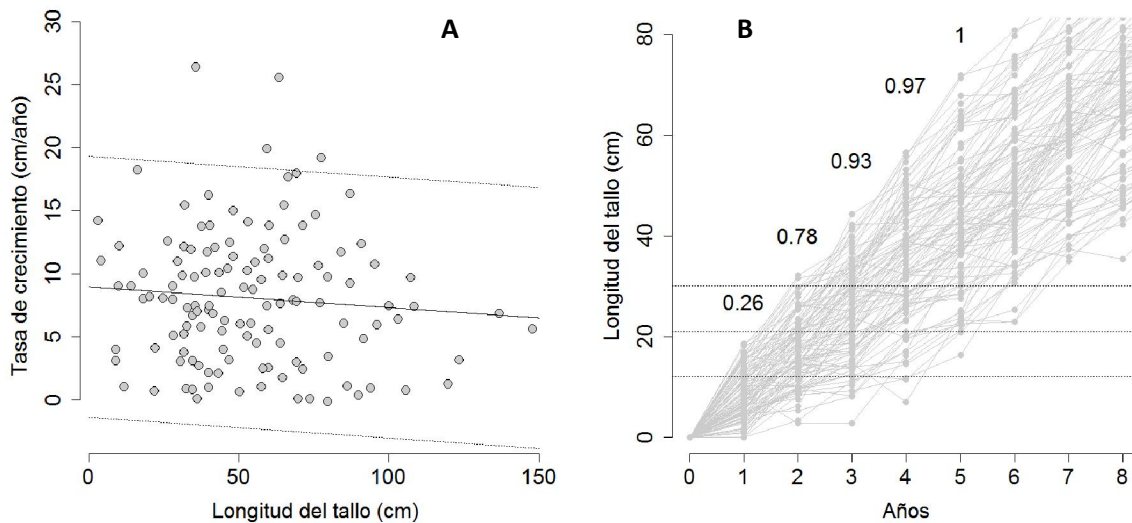


Figura 3. Datos de campo de frailejones de la especie *Espeletia grandiflora* (Fagua y González 2007) indican que en cinco años, o inclusive en dos o tres años, se puede obtener una proporción grande de plantas reproductivas en los jardines comunes. **A)** Tasa de crecimiento de *Espeletia grandiflora* (eje vertical) en función al tamaño de las plantas (eje horizontal) en el páramo de Chingaza a 3200 m de altitud, según datos de Fagua y González (63). La tasa de crecimiento tiende a disminuir con el tamaño de las plantas (la línea continua representa la regresión entre estas dos variables y las líneas punteadas los límites del intervalo de predicción del 95% de confianza). La media de la tasa de crecimiento (para las plantas de todos los tamaños) es 7.5 cm/año, muy superior a la figura de 1 cm/año que ha sido ampliamente difundida en círculos científicos y entre el público general. **B)** Simulación del crecimiento de 100 plantas en un jardín común, basado en los datos presentados en el panel A. El eje horizontal muestra los años que una planta permanece en un jardín común, empezando desde la siembra de semillas (año cero), y el eje vertical representa el tamaño de la planta. Cada línea gris (con los respectivos puntos grises) representa la simulación de la trayectoria de crecimiento de una planta. Las líneas horizontales punteadas muestran el rango de tamaños en el que las plantas empiezan a reproducirse, según Fagua y González (63). Los números encima de los puntos grises para los años 1 – 5 indican la proporción de plantas que alcanzan el rango de tamaños en el que las plantas empiezan a reproducirse.

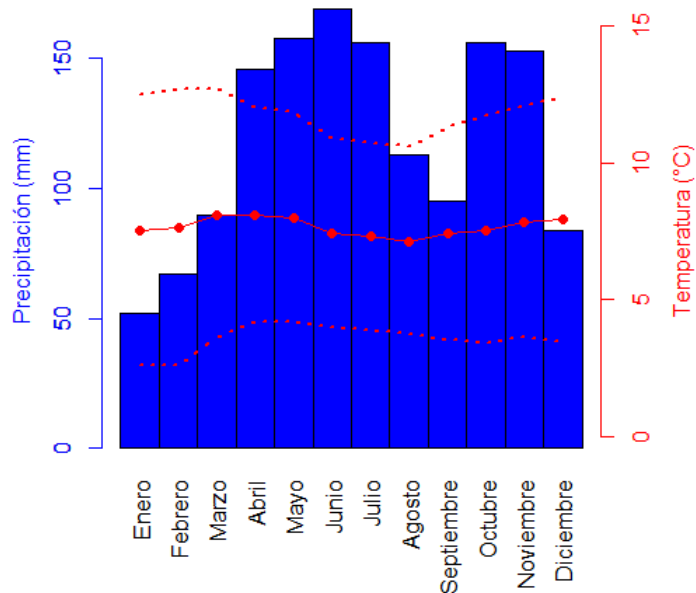


Figura 4. Variación mensual de la precipitación (barras azules), la temperatura media (línea continua y puntos rojos), y las temperaturas mínima y máxima (líneas punteadas rojas) en San Juan del Sumapaz, localizado a 3503 m de altitud en el páramo de Sumapaz. La temperatura media anual es de 7.6 °C y la precipitación anual es 1439 mm. Datos obtenidos de CLIMATE-DATA.ORG (<https://en.climate-data.org/>).



Figura 5. Mesa de 90 cm de alto, 1 m de ancho y 2.30 m de largo. Sobre estas mesas se ponen los recipientes de germinación, las bandejas de primer trasplante y las materas de segundo trasplante. Estas mesas ayudan a proteger las plantas y facilitan el trabajo en el jardín común.



Figura 6. Foto de una bandeja de primer trasplante, de 50 celdas, con filas (F) y columnas (C) enumeradas, y con una marca que identifica la bandeja (BT – 1B). Esta marca indica que es una bandeja de trasplante (BT), el número de bandeja (1) y el lugar del jardín común (B). El rótulo a la derecha indica la fecha en la que se tomó la foto.



Figura 7. Fotografía semanal a la bandeja de primer trasplante, con el rótulo que indica la fecha en que se tomó la foto. Esta imagen muestra el número de cada fila (F) y columna (C), la marca que identifica la bandeja (BT-1B) y el estado de las plantas en cada celda.



Figura 8. Rótulo metálico único. En la información del rótulo va el número de colección de la planta madre, la fecha de siembra de la semilla en recipiente de germinación, fecha del primer trasplante en bandejas de 50 celdas, y la ubicación de la planta en la celda (bandeja: 1B, número fila: 1, número columna: 10). Este rótulo acompañará la planta en los siguientes trasplantes y la siembra final.