

# PROGRAMA DE Revegetación

Una década de investigación, ensayo y  
aprendizaje en la Región de Atacama









# **Programa de revegetación: Una década de investigación, ensayo y aprendizaje en la Región de Atacama**

Instituto Forestal, Sede Diaguitas La Serena, Chile  
INFOR, 2026  
(Primera edición)









Instituto forestal  
Juan Georgini Runi 1507  
La Serena Chile  
www.infor.cl

ISBN N° 978-956-318-310-8 (Edición impresa)  
ISBN N° 978-956-318-311-5 (Edición digital)  
Registro Propiedad Intelectual N° 2026-A-7408

**Autores:**

Dr. José Hernández Cartes  
Ingeniero Forestal  
Propagación y Nutrición de Plantas

Claudio Bedoya Barbieri  
Ingeniero Forestal  
Responsable de la gestión ambiental y relacionamiento comunitario de TEN.

**Colaboradores:**

Ismael Jimenez Rojas  
Técnico Recolección y procesamiento

Dr. Marcelo Rosas  
Biólogo, Botánico  
Descripciones en el estudio de especies  
Páginas 53 a 57; 64 a 68; 74 a 77; 80 a 85; 87 a 90.

Dra. Sandra Gacitúa Arias  
Ingeniero Forestal Gerente Sede Diaguitas

Esta publicación puede ser reproducida total o parcialmente y de cualquier forma, solo para propósitos educativos y no comerciales, mencionando la fuente de origen. **Hernández, J y Bedoya, C. (2026)**. Programa de revegetación: Una década de investigación, ensayo y aprendizaje en la Región de Atacama.

**Fotografías:**

Instituto Forestal

**Corrección de texto:**

Braulio Gutiérrez

**Diseño:**

Chriss Ramírez

**Impreso en Chile por:**

Trama Impresores S.A.





# Agradecimientos

Los autores agradecen a la empresa Transmisora Eléctrica del Norte (TEN) por el apoyo brindado para el desarrollo de esta investigación. Asimismo, se reconoce su compromiso con la conservación de la flora nativa y la generación de conocimiento técnico-científico orientado a la conservación y restauración de ecosistemas áridos y semiáridos de Chile. El apoyo ha permitido generar y fortalecer conocimientos técnicos y científicos orientados al estudio de la biología, propagación y conservación de especies nativas, que presentan problemas de conservación.





# Presentación

Hay proyectos que nacen con un objetivo definido pero que, con el paso del tiempo, revelan un propósito mayor. Este es uno de ellos.

Cuando se inicia una gran obra de infraestructura eléctrica en el desierto de Atacama, el foco suele estar puesto en la energía que permitirá impulsar ciudades, industrias y territorios. Sin embargo, desde las primeras etapas del proyecto, TEN comprendió que estaba interviniendo algo más que un espacio físico: estaba entrando en uno de los ecosistemas más frágiles, singulares y silenciosos del planeta. Un territorio donde la vida no es evidente, pero sí extraordinaria; donde cada planta es el resultado de miles de años de adaptación, resistencia y paciencia.

Este programa de revegetación no comenzó como una respuesta automática a un compromiso ambiental. Comenzó como una sucesión de preguntas sencillas, pero transformadoras: **¿somos capaces de construir sin olvidar lo que estaba aquí antes que nosotros?** ¿Podemos intervenir el territorio dejando algo más que infraestructura? ¿Podemos aprender del desierto, en lugar de simplemente atravesarlo?

Desde 2015, Transmisora Eléctrica del Norte, junto al Instituto Forestal, emprendió un camino que nunca estuvo exento de retos, bajo la convicción de que el verdadero progreso no consiste únicamente en desarrollar infraestructura en el territorio, sino en contribuir a su regeneración, impulsando un impacto positivo que permanezca mucho después de que la obra haya terminado. Revelar los secretos de la germinación de una cactácea, rescatar un clavel del aire (*Tillandsia lambeckii*) sostenido únicamente por la niebla, reestablecer un arbusto en un suelo que parece no ofrecer nada a cambio, exige algo más que conocimiento técnico: exige constancia, respeto y una profunda humildad frente a la naturaleza.

Este libro es testimonio de una década de trabajo silencioso. De jornadas bajo el sol, de semillas que no germinaron y de otras que lo hicieron contra todo pronóstico. De ensayos, errores y aprendizajes. De científicos, técnicos y profesionales que entendieron que aquí no se trataba solo de plantar, sino de **reconstruir procesos**, de acompañar a las especies en su propio ritmo, de aceptar que en el desierto no existen soluciones inmediatas.

Cada individuo revegetado representa una pequeña victoria frente a la desertificación, pero también una lección. Nos recuerda que la vida puede parecer detenida, pero nunca está ausente. Que incluso en los ambientes más extremos, la resiliencia es una estrategia cotidiana. Y que, cuando se actúa con convicción, la restauración no es solo posible, sino necesaria.

Este proyecto ha generado conocimiento científico donde antes no lo había. Ha dejado capacidades instaladas, metodologías replicables y, sobre todo, una certeza: **el desarrollo energético y la conservación de la biodiversidad no son caminos opuestos**, sino responsabilidades que deben avanzar juntas. La energía que transportamos tiene sentido solo si es coherente con el territorio que la sostiene.



Mirando hacia 2030, sabemos que el trabajo no termina con la última plantación ni con el cierre de un monitoreo. La restauración es, por definición, un compromiso de largo plazo. Pero lo recorrido hasta hoy nos permite afirmar, con orgullo y con prudencia, que hemos sembrado algo más que plantas: hemos sembrado conocimiento, conciencia y una forma distinta de relacionarnos con el desierto.

Que este libro sea leído no solo como un registro técnico, sino como un acto de memoria.

Un recordatorio de que incluso en el lugar más árido del mundo, cuando se trabaja con respeto, la vida siempre encuentra la forma de volver.



**David López Cortón**  
Gerente General  
Transmisora Eléctrica del Norte S.A.



# Prólogo

El patrimonio vegetal de la Región de Atacama constituye uno de los ecosistemas más singulares y frágiles del planeta. Forjado por miles de años de adaptación a condiciones extremas de aridez, este patrimonio natural forma parte esencial de la identidad territorial, la cultura y los medios de vida de las comunidades locales y pueblos originarios que habitan el desierto.

En este contexto, desarrollar la infraestructura que el país requiere para avanzar hacia un futuro más sostenible representa un desafío que trasciende lo técnico. Implica asumir el compromiso de demostrar que el progreso y la conservación de la biodiversidad no son objetivos contrapuestos, sino dimensiones que deben avanzar de manera integrada y armónica.

Para el Instituto Forestal (INFOR), organismo tecnológico del Estado de Chile dependiente del Ministerio de Agricultura, la protección y recuperación de los ecosistemas nativos y xerofíticos constituye una tarea estratégica, estrechamente vinculada al bienestar de las personas y al desarrollo sostenible de los territorios. Bajo esta convicción surge la alianza establecida con Transmisora Eléctrica del Norte (TEN), en el marco de los compromisos ambientales asociados a la Línea de Transmisión Mejillones-Cardones, iniciativa que ha permitido impulsar un programa de restauración ecológica con una visión de largo plazo y un profundo sentido territorial.

La presente publicación da cuenta de ese esfuerzo. Más que el registro de una medida ambiental, representa la sistematización de una experiencia desarrollada durante más de una década, iniciada en 2015 y proyectada hacia 2030, cuyo principal objetivo ha sido transformar el conocimiento científico en una herramienta concreta para la conservación y recuperación de los ecosistemas desérticos de Atacama.

A través de estas páginas se documentan los aprendizajes, metodologías y resultados obtenidos en la revegetación del matorral desértico, abordando aspectos clave relacionados con la propagación, establecimiento y monitoreo de especies xerofíticas nativas. Sin embargo, su alcance trasciende lo estrictamente biológico. La recuperación de estas especies contribuye también a la protección de los suelos frente a la desertificación, al fortalecimiento de los servicios ecosistémicos y a la preservación de recursos que históricamente han formado parte de la vida y las tradiciones de las comunidades del norte de Chile.

Uno de los principales aportes de este programa ha sido generar conocimiento aplicado sobre especies altamente adaptadas a condiciones de escasez hídrica, reduciendo brechas de información que históricamente han limitado las acciones de restauración en ambientes áridos y desérticos. Este conocimiento constituye hoy una base técnica relevante para enfrentar los desafíos que impone el cambio climático, aportando herramientas que pueden ser utilizadas por investigadores, instituciones públicas, empresas y comunidades comprometidas con la gestión sostenible del territorio.



La experiencia aquí presentada sustenta que la restauración ecológica en zonas desérticas requiere una mirada adaptativa, basada en la ciencia, pero también en el conocimiento del territorio y en la participación de quienes conviven con estos ecosistemas. Solo así es posible construir soluciones duraderas que generen beneficios ambientales, sociales y económicos para las generaciones presentes y futuras.

Invitamos a investigadores, profesionales, estudiantes, organizaciones comunitarias y tomadores de decisión a utilizar esta publicación como una fuente de consulta y aprendizaje. Los resultados aquí expuestos demuestran que es posible compatibilizar el desarrollo de infraestructura estratégica con la conservación de la biodiversidad, transformando los compromisos ambientales en oportunidades concretas para impulsar un desarrollo más justo, resiliente y sostenible para la Región de Atacama y para el país.



**Gabriel Valenzuela V.**  
Director Ejecutivo  
Instituto Forestal (INFOR)

Ministerio de Agricultura, República de Chile













# Índice

|                                                                                                                                                         |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| I. Introducción.....                                                                                                                                    | 17  |
| II. Programa de Revegetación en la Región de Atacama<br>Una experiencia de colaboración público-privada.....                                            | 19  |
| III. Biodiversidad de la Región de Atacama.....                                                                                                         | 21  |
| IV. El desierto florido en el norte de Chile: bases ecológicas,<br>variabilidad climática y relevancia para la conservación de la<br>biodiversidad..... | 31  |
| V. Protección de la biodiversidad.....                                                                                                                  | 35  |
| VI. De la teoría a la práctica: desafíos en la implementación de<br>medidas de mitigación y compensación de impactos sobre el<br>recurso vegetal.....   | 39  |
| VII. Investigación pionera para la conservación de la flora nativa<br>de la Región de Atacama.....                                                      | 41  |
| VIII. Lo primero: rescatar antes de intervenir.....                                                                                                     | 45  |
| IX. Programa de Revegetación: Estudio científico de la flora<br>nativa de la Región de Atacama.....                                                     | 59  |
| 1. <i>Tillandsia landbeckii</i> .....                                                                                                                   | 61  |
| 2. <i>Copiapoa megarhiza</i> .....                                                                                                                      | 72  |
| 3. <i>Eulychnia acida</i> var. <i>Elata</i> .....                                                                                                       | 82  |
| 4. <i>Eriosyce confinis</i> .....                                                                                                                       | 88  |
| 5. <i>Atriplex clivicola</i> .....                                                                                                                      | 95  |
| 6. <i>Krameria cistoidea</i> .....                                                                                                                      | 102 |
| 7. <i>Aphyllocladus denticulatus</i> .....                                                                                                              | 108 |
| X. Restauración a escala del paisaje.....                                                                                                               | 113 |
| XI. Bibliografía.....                                                                                                                                   | 147 |







# I. Introducción

La Región de Atacama alberga uno de los sistemas ecológicos más singulares del país, caracterizado por comunidades vegetales altamente especializadas, con tasas de regeneración naturalmente lentas y una fuerte dependencia de condiciones ambientales específicas. En este escenario, el desarrollo de proyectos de infraestructura plantea exigencias técnicas y ambientales de alta complejidad, especialmente cuando la intervención se realiza en ecosistemas áridos y de elevada fragilidad.

El presente libro documenta el Programa de Revegetación implementado por Transmisora Eléctrica del Norte (TEN), en colaboración con el Instituto Forestal (INFOR), en el marco de los compromisos ambientales asociados al proyecto Línea de Transmisión Mejillones – Cardones.

Dicho programa se orienta a la conservación, propagación y restauración de flora nativa de la zona norte de Chile, mediante un enfoque integral que combina investigación científica, gestión ambiental y ejecución en terreno.

El contenido que se desarrolla en los capítulos siguientes corresponde a un proceso técnico de largo plazo, iniciado en 2015 y proyectado hasta el año 2030, estructurado en etapas sucesivas que abarcan desde el rescate y relocalización de individuos afectados por las obras, hasta la restauración a escala de paisaje de especies xerofíticas representativas del matorral desértico de Atacama.

Este trabajo se sustenta en los compromisos establecidos en las Resoluciones de Calificación Ambiental del proyecto y se ha implementado bajo criterios de trazabilidad, monitoreo y mejora continua.

Uno de los ejes centrales del programa ha sido la generación de conocimiento aplicado, particularmente en relación con especies cuya ecología, propagación y establecimiento en ambientes áridos presentaban brechas significativas de información. A través de ensayos controlados, propagación en vivero, evaluación de estrategias de riego, monitoreo climático y análisis ecofisiológicos, el proyecto ha contribuido a ampliar la base técnica disponible para la restauración ecológica en zonas desérticas.

Asimismo, el programa ha incorporado principios de manejo adaptativo, ajustando sus estrategias en función de la respuesta de las especies y de las condiciones ambientales registradas en terreno. Este enfoque ha permitido optimizar la supervivencia de los individuos establecidos y validar criterios técnicos replicables en futuros proyectos con características similares.

El libro se organiza de manera progresiva.

- En primer lugar, se presenta el contexto ecológico y biogeográfico de la Región de Atacama, destacando la relevancia de su biodiversidad y los principales factores de presión que enfrenta.
- Posteriormente, se abordan los fundamentos científicos y técnicos que sustentan la restauración en ambientes áridos, para luego desarrollar en detalle las acciones implementadas, las especies trabajadas, los resultados obtenidos y los aprendizajes derivados del proceso.
- Finalmente, se incorporan reflexiones orientadas a la proyección futura del programa y a su aporte en un escenario de cambio climático y creciente demanda de intervenciones responsables sobre el territorio.

Esta publicación tiene como objetivo sistematizar una experiencia concreta, poniendo a disposición de la comunidad técnica, institucional y académica un cuerpo de información que da cuenta de cómo es posible integrar infraestructura energética, ciencia aplicada y conservación de la biodiversidad, bajo un marco de cumplimiento ambiental riguroso y con visión de largo plazo.



## II. Programa de Revegetación en la Región de Atacama - Una experiencia de colaboración público-privada

La Transmisora Eléctrica del Norte (TEN) junto al Instituto Forestal (INFOR) están desarrollando, desde hace 10 años, una iniciativa pionera de revegetación en la región de Atacama. Esto para concretar la restauración a escala del paisaje en un área de condiciones ecológicas extremas típicas del norte de Chile.



La iniciativa se realiza en el marco del cumplimiento de compromisos ambientales establecidos por la Autoridad Ambiental y que son parte de la resolución aprobatoria del proyecto Línea de Transmisión Eléctrica 500 kV Mejillones - Cardones, cuyo titular es TEN, empresa con participación igualitaria de Red Eléctrica Chile y Engie Energía Chile. Por otra parte, el Instituto Forestal (INFOR) es un Instituto de Investigación Tecnológica del Estado de Chile, dependiente del Ministerio de Agricultura.



El objetivo del Programa de Revegetación es el establecimiento de una cubierta vegetal permanente en un área de aproximadamente 30 hectáreas, con un total de más de 20.000 ejemplares de especies xerofíticas y sensibles del norte del Chile, entre ellas:

*Copiapoa megarhiza*

*Cumulopuntia sphaerica*

*Eulychnia acida*

*Pyrrhocactus confinis*

Además de las leñosas bajas:

*Atriplex clivicola*

*Atriplex deserticola*

*Ephedra breana*

*Heliotropium chenopodiaceum*

*Nolana albescens*

*Encelia canescens*

*Tetragonia angustifolia*

Formación natural de *Tillandsia landbeckii*  
en dunas costeras de la Región de Tarapaca.

Cabe destacar que, hasta antes de esta iniciativa, los métodos de germinación, propagación en vivero y establecimiento en terreno de la mayoría de estas especies eran desconocidos.

### Programa de revegetación

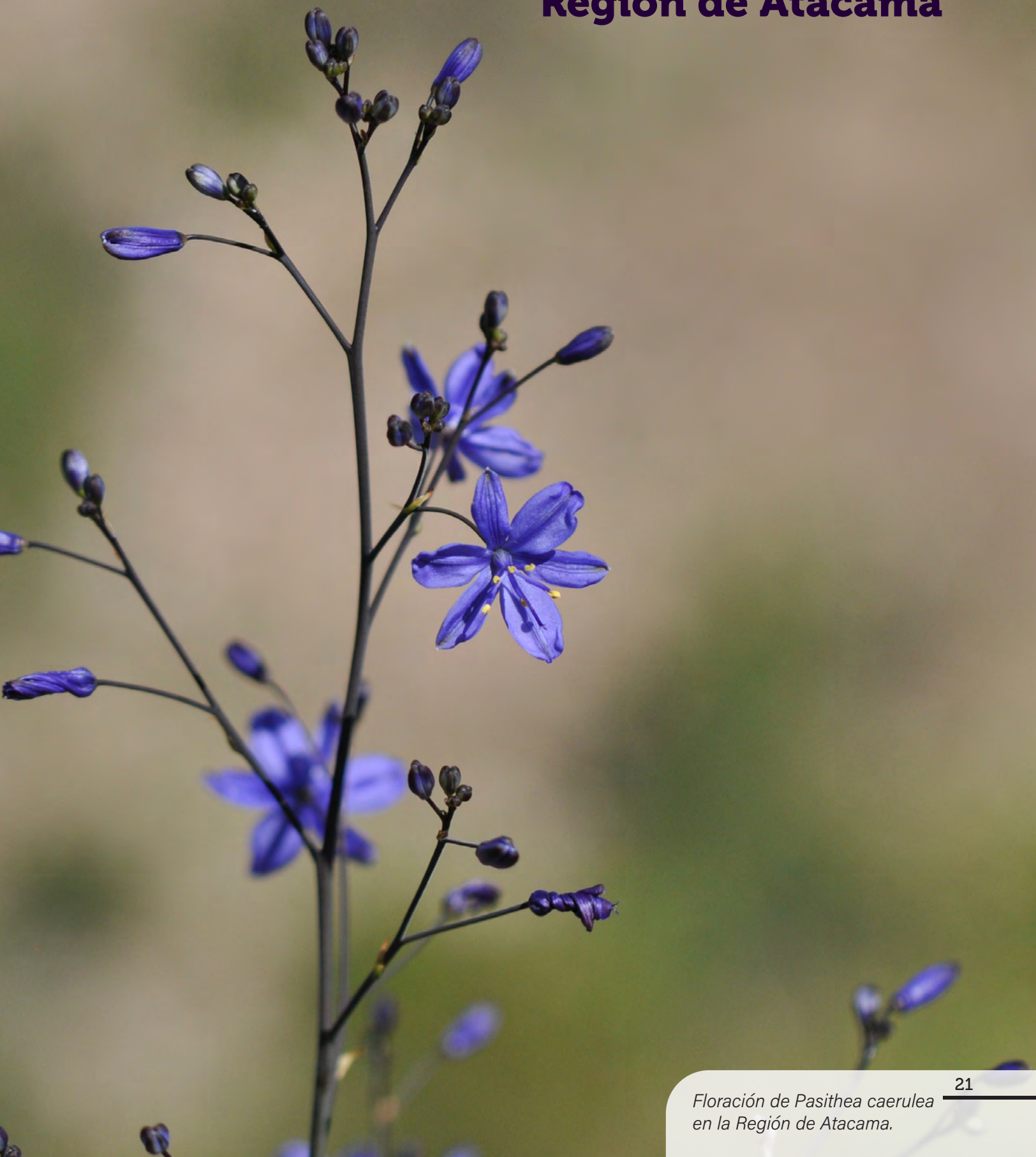
Para el año 2030, este Programa de Revegetación de especies xerofíticas de la región de Atacama busca, a través de la reconstrucción de hábitats naturales de especies endémicas, proteger la vegetación amenazada por procesos de desertificación y erosión del suelo en la zona norte del país.

El encargado del Programa de Restauración en Zonas Áridas del Instituto Forestal, Dr. José Andrés Hernández, destaca que:

**“Durante más de una década de trabajo junto a TEN, hemos logrado desarrollar una experiencia única en restauración ecológica en zonas áridas, integrando investigación aplicada y generación de conocimiento científico y técnico adaptado a las condiciones extremas del norte de Chile. Los resultados obtenidos no solo reflejan el cumplimiento de los objetivos, sino también la consolidación de metodologías y herramientas que hoy pueden servir de base para futuras iniciativas de restauración en ambientes desérticos y semiáridos del país”.**



### III. Biodiversidad de la Región de Atacama



## Diversidad global de plantas y patrones de distribución en Chile

La diversidad de especies de plantas a nivel global presenta un patrón espacial bien definido, caracterizado por un fuerte gradiente latitudinal. Las mayores concentraciones de riqueza florística se encuentran en las regiones tropicales, especialmente en áreas como la Amazonía, los Andes tropicales, el sudeste asiático y África ecuatorial, donde las condiciones de temperatura, humedad y estabilidad climática favorecen la especiación y la coexistencia de numerosas especies.

En contraste, las zonas áridas, templadas y polares presentan una menor riqueza de especies debido a limitaciones ambientales como la escasez de agua, temperaturas extremas o estacionalidad climática (Barthlott *et al.*, 2005; Kreft & Jetz, 2007).

A escala global, se estima que existen entre 300.000 y 400.000 especies de plantas vasculares, muchas de las cuales se concentran en áreas relativamente pequeñas conocidas como centros de diversidad o “hotspots” de biodiversidad. Estas regiones, además de presentar altos niveles de riqueza de especies, poseen una elevada proporción de endemismo, lo que las convierte en prioritarias para la conservación. Sin embargo, estas mismas zonas suelen estar sometidas a fuertes presiones antrópicas, como la deforestación, la expansión agrícola y el cambio climático, lo que incrementa el riesgo de pérdida de biodiversidad (Myers *et al.*, 2000; Barthlott *et al.*, 2005).

La distribución de la diversidad vegetal está estrechamente relacionada con factores ecológicos e históricos, tales como la disponibilidad de energía, el régimen de precipitaciones, la heterogeneidad ambiental y la historia evolutiva de las regiones. Asimismo, la biodiversidad vegetal cumple un rol fundamental en el funcionamiento de los ecosistemas, contribuyendo a procesos como la regulación del clima, el ciclo de nutrientes y la provisión de servicios ecosistémicos esenciales para la humanidad.

En este contexto, comprender los patrones globales de diversidad de plantas es clave para diseñar estrategias efectivas de conservación y manejo sostenible de los recursos naturales (Kreft & Jetz, 2007; Mittermeier *et al.*, 2004).



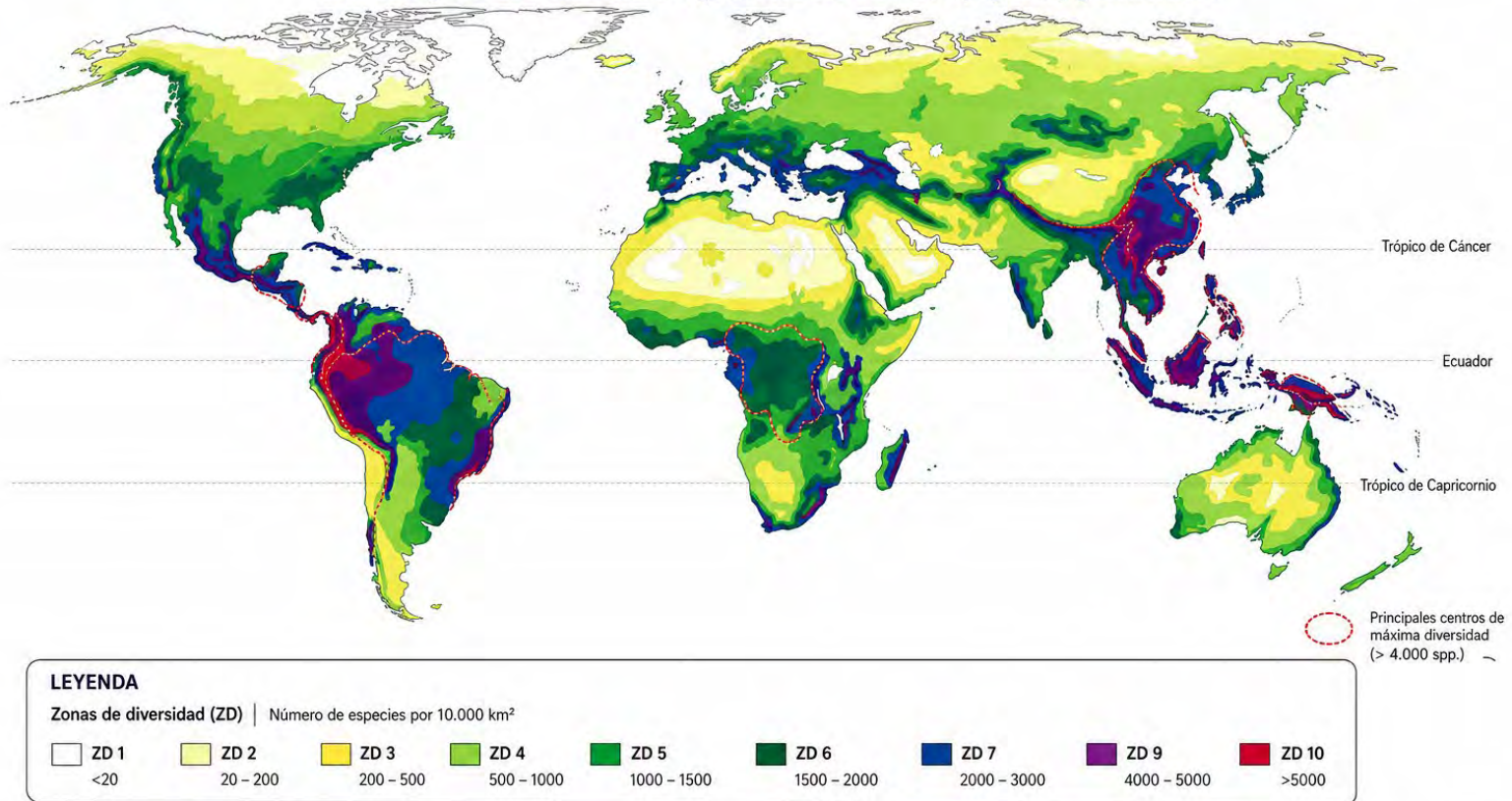
*Floración de Zephyra compacta  
en la Región de Atacama.*



# ZONAS DE DIVERSIDAD (ZD): RIQUEZA DE ESPECIES DE PLANTAS VASCULARES

(NÚMERO DE ESPECIES POR 10.000 km<sup>2</sup>)

Gradiente global de biodiversidad vegetal asociado a clima, topografía y geodiversidad



Fuente: Adaptado de Barthlott, W., Mutke, J., Rafiqpoor, M. D., Kier, G. & Kreft, H. (2005). *Global centers of vascular plant diversity*. *Nova Acta Leopoldina NF*, 92 (3–4), 61–83.

En el caso de Chile, la diversidad de especies vegetales se caracteriza por un marcado gradiente latitudinal y una elevada proporción de endemismo, particularmente en la zona centro del país. Se han registrado más de 5.000 especies de plantas vasculares, de las cuales una fracción significativa corresponde a especies endémicas, lo que posiciona a Chile como parte del hotspot de biodiversidad “Chilean Winter Rainfall– Valdivian Forests” (Arroyo *et al.*, 2004; Myers *et al.*, 2000).

Este patrón responde a la interacción de factores como la cordillera de los Andes, el océano Pacífico y la diversidad climática, que generan una alta heterogeneidad ambiental. Sin embargo, esta riqueza se encuentra bajo presión debido a actividades antrópicas como la urbanización, la agricultura y el cambio climático, lo que refuerza la necesidad de implementar estrategias de conservación y restauración a escala territorial (Armesto *et al.*, 2007; Luebert & Pliscoff, 2006).

## Diversidad y endemismo de la flora vascular de Chile

La distribución de especies nativas y endémicas en Chile evidencia un patrón latitudinal claramente definido.

De acuerdo con el Catálogo de las Plantas Vasculares de Chile, el país cuenta con

**4.655** especies nativas de las cuales

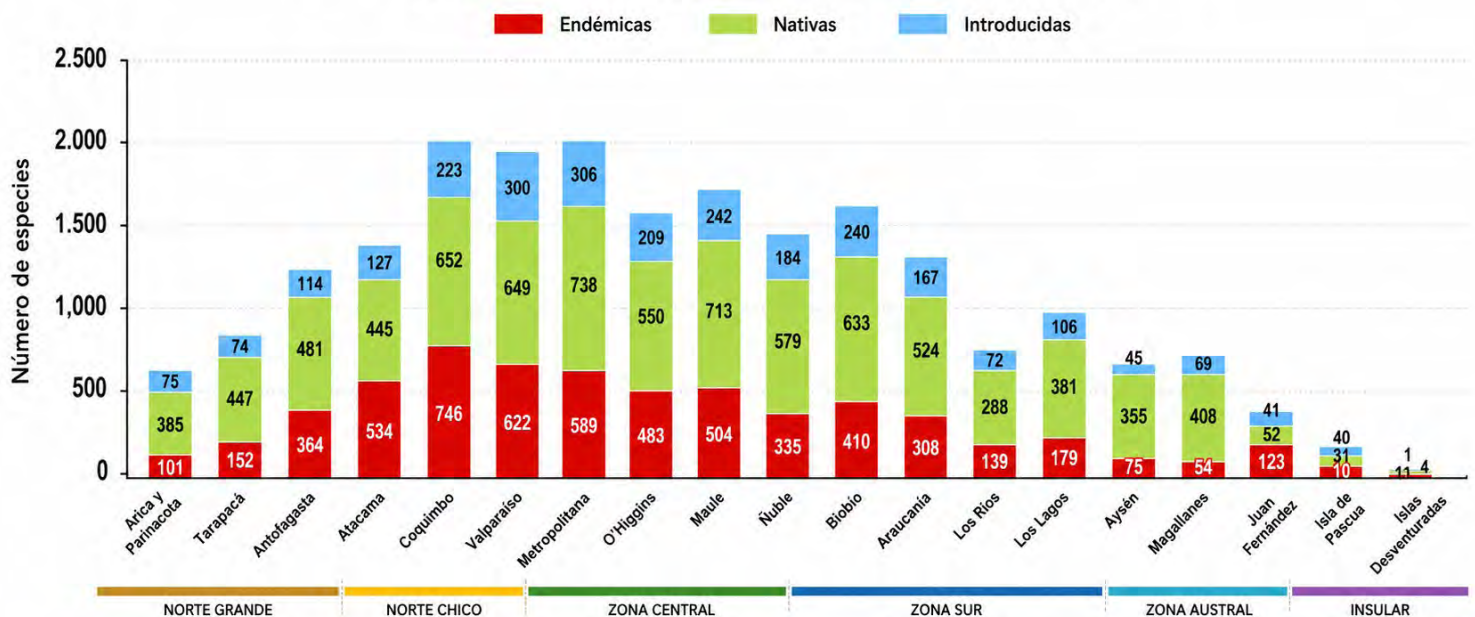
**2.145** son endémicas, lo que representa cerca del 46% de la flora nativa.

Este alto nivel de endemismo posiciona a Chile como un territorio de relevancia global en términos de biodiversidad (Myers *et al.*, 2000; Arroyo *et al.*, 2004). En el gráfico que se presenta a continuación, se observa que las regiones del norte presentan una menor riqueza total de especies, lo cual se explica por las condiciones hiperáridas del desierto de Atacama, que limitan el establecimiento vegetal, aunque con presencia de especies altamente especializadas adaptadas a ambientes extremos (Luebert & Pliscoff, 2006; Rundel *et al.*, 2007).

En contraste, la zona centro del país, particularmente entre las regiones de Coquimbo y Biobío, concentra los mayores valores de especies nativas y endémicas. Este patrón responde a la presencia de un clima mediterráneo, reconocido por su alta biodiversidad y endemismo a nivel global (Cowling *et al.*, 1996; Myers *et al.*, 2000), junto con una elevada heterogeneidad ambiental asociada a gradientes altitudinales, influencia marina y diversidad de hábitats (Arroyo *et al.*, 2004; Armesto *et al.*, 2007).

### Riqueza de especies de flora vascular en Chile por región

Composición de especies endémicas, nativas e introducidas



El porcentaje de endemismo fue calculado como la proporción de especies endémicas respecto del total de especies registradas por región (endémicas + nativas + introducidas).



Estas condiciones han favorecido procesos de especiación y aislamiento, generando altos niveles de endemismo. Sin embargo, esta misma zona coincide con áreas de mayor intervención antrópica, lo que incrementa la vulnerabilidad de estas especies y refuerza la necesidad de implementar medidas de conservación y restauración ecológica (Armesto *et al.*, 2010; Pliscoff & Fuentes-Castillo, 2011).

Hacia el sur y extremo austral, se observa una disminución progresiva en la riqueza de especies nativas y en el número de endemismos. En regiones como Los Ríos y Los Lagos, si bien la diversidad sigue siendo alta, predominan especies con distribuciones más amplias, lo que reduce el nivel de endemismo relativo (Villagrán & Hinojosa, 1997; Armesto *et al.*, 2007). En tanto, en Aysén y Magallanes, las condiciones climáticas más extremas, junto con la historia glacial del territorio, han limitado la diversificación florística (Rundel *et al.*, 2007; Luebert & Pliscoff, 2006). Por otro lado, las regiones insulares presentan baja riqueza total, pero un alto endemismo relativo debido a su aislamiento geográfico, lo que las convierte en sistemas altamente vulnerables (Stuessy *et al.*, 2017). En conjunto, estos patrones reflejan la influencia de factores climáticos, históricos y ecológicos en la configuración de la flora chilena, y permiten orientar la priorización de acciones de manejo y conservación a escala territorial.

La figura anterior presenta la composición de las especies de flora vascular por región de Chile, diferenciando entre especies endémicas, nativas no endémicas e introducidas. Se observa una mayor riqueza en la zona centro del país, con una importante proporción de endemismo, lo que resalta la relevancia ecológica de estas regiones y la necesidad de implementar medidas de conservación y restauración.





## Flora y Vegetación de la Región de Atacama

Se caracteriza por su adaptación a condiciones ambientales extremas, particularmente asociadas a la aridez del desierto más seco del mundo. A pesar de estas limitaciones, la región alberga una importante diversidad florística, con un total de 1.099 especies, de las cuales 980 son nativas (Letelier *et al.*, 2008), lo que refleja una notable capacidad de adaptación ecológica.

Esta vegetación se distribuye en distintos ambientes, incluyendo zonas costeras, valles interiores, quebradas y sectores altoandinos, donde las condiciones de humedad, suelo y altitud permiten el desarrollo de comunidades vegetales diferenciadas. La flora regional incluye diversas formas de vida como arbustos, hierbas anuales y perennes, suculentas y cactáceas, muchas de ellas altamente especializadas para sobrevivir bajo estrés hídrico (Squeo *et al.*, 2008; Luebert & Pliscoff, 2006).



*Estructura reproductiva de Tillandsia landbeckii*

Un rasgo distintivo de la vegetación de Atacama es su elevado nivel de endemismo y singularidad ecológica. La presencia de especies endémicas y con distribución restringida es significativa, muchas de ellas asociadas a microhábitats específicos como laderas rocosas, lechos de quebradas o dunas costeras.

Estas especies suelen presentar adaptaciones morfológicas y fisiológicas particulares, como hojas reducidas, estructuras suculentas o sistemas radiculares profundos, que les permiten enfrentar la escasez de agua.



*Flor de Eriocyce napina  
emergiendo del suelo desértico*



Además, un alto porcentaje de las especies nativas presenta límites de distribución en la región, lo que refuerza su importancia biogeográfica y su rol como zona de transición ecológica. Este patrón es consistente con estudios biogeográficos que destacan el norte chico de Chile como un área clave de endemismo dentro del hotspot de biodiversidad mediterráneo chileno (Arroyo *et al.*, 2004; Myers *et al.*, 2000).

Desde el punto de vista ecológico y de conservación, la vegetación de Atacama enfrenta múltiples presiones antrópicas.

Aproximadamente un 9,6% de la flora nativa se encuentra en categorías de amenaza, lo que evidencia una situación de vulnerabilidad relevante. Entre los principales factores que afectan estas comunidades se encuentran la minería, la expansión agrícola, la extracción de agua y el sobrepastoreo, los cuales impactan directamente en la disponibilidad y calidad del hábitat. Estas presiones afectan especialmente a especies con distribución restringida o baja capacidad de regeneración, aumentando el riesgo de pérdida de biodiversidad y alteración de los ecosistemas (Squeo *et al.*, 2008; Armesto *et al.*, 2010).

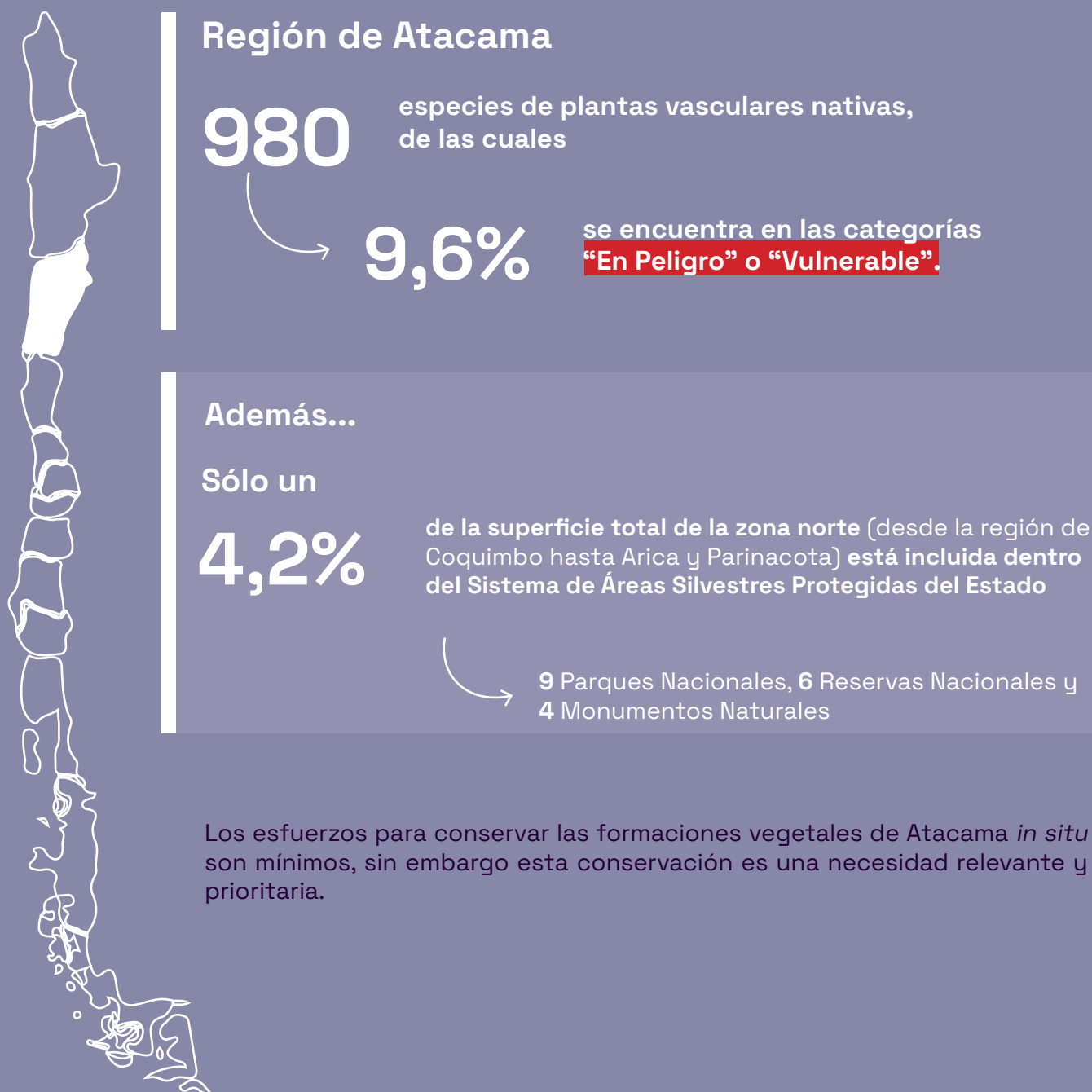
Finalmente, la vegetación de la Región de Atacama cumple un rol clave en la provisión de servicios ecosistémicos y en la mantención de la biodiversidad regional. A pesar de su aparente escasez, las comunidades vegetales contribuyen a la regulación de procesos ecológicos como la infiltración de agua, la estabilización de suelos y la moderación de condiciones microclimáticas. Asimismo, fenómenos como el “Desierto Florido” representan una expresión única de la dinámica ecológica regional, asociada a eventos de precipitación excepcionales.

En este contexto, la conservación de la vegetación de Atacama no solo es relevante desde una perspectiva biológica, sino también para la sostenibilidad de los sistemas naturales y las actividades humanas que dependen de ellos (Gutiérrez, 2008; Squeo *et al.*, 2006).



Las formaciones xerofíticas presente en la zona norte de Chile corresponde a la vegetación más amenazada de Chile bajo un escenario de cambio climático global, hecho que acelera los procesos de desertificación y erosión, afectando a poblaciones de especies singulares, endémicas y de distribución restringida.

La riqueza biológica del norte de Chile, particularmente de su componente flora, ha sido y es de especial interés para botánicos y conservacionistas, situación reconocida a nivel mundial por su alto grado de endemismo. Un ejemplo es la flora nativa de la región de Atacama:





Actualmente, la gran diversidad de especies nativas de la zona norte de Chile se encuentra amenazada por especies invasoras, las cuales son uno de los principales generadores del cambio ambiental en el mundo y con ello, una amenaza a la biodiversidad global. Estas especies invasoras podrían estar acelerando los procesos de extinción de plantas nativas a escala local, causando altos impactos sociales y económicos. Sin embargo, poco se sabe sobre sus efectos ecosistémicos, en especial de aquellas con mayor potencial invasivo.

En la actualidad las especies invasoras representan un peligro para la biodiversidad, pueden alterar características ecológicas fundamentales tales como la identidad de las especies dominantes en una comunidad, las propiedades físicas del ecosistema y su estabilidad, el ciclo de nutrientes y la productividad vegetal.







*Floración de Leucocoryne macropetala, geófita nativa que aporta color y diversidad al Desierto Florido del norte de Chile.*



# **IV. El desierto florido en el norte de Chile: bases ecológicas, variabilidad climática y relevancia para la conservación de la biodiversidad**





El desierto florido corresponde a un fenómeno ecológico excepcional del Desierto de Atacama, caracterizado por la emergencia masiva y sincronizada de especies vegetales —principalmente anuales y geófitas— en respuesta a precipitaciones extraordinarias que interrumpen los prolongados periodos de sequía (Vidiella *et al.*, 1999). Este proceso refleja una adaptación ecológica a condiciones de extrema aridez, donde la disponibilidad hídrica actúa como principal factor limitante.



El Desierto de Atacama presenta precipitaciones generalmente inferiores a 20 mm anuales, con eventos de lluvia altamente irregulares (Houston, 2006). En este contexto, muchas especies han desarrollado estrategias de persistencia mediante bancos de semillas y estructuras subterráneas que permanecen en estado de latencia por años. Se ha determinado que un umbral mínimo de entre 10 y 15 mm de precipitación acumulada puede gatillar procesos de germinación en numerosas especies, lo que evidencia la sensibilidad del fenómeno frente a pequeñas variaciones climáticas.



La ocurrencia del desierto florido está estrechamente asociada a la variabilidad climática interanual, particularmente a la influencia del fenómeno El Niño–Oscilación del Sur (ENOS), cuya fase cálida favorece el incremento de precipitaciones en el norte de Chile (Garreaud *et al.*, 2009). Eventos históricos relevantes se han registrado en 1982–1983, 1997–1998 y 2015–2016. Entre 1981 y 2015 se han documentado al menos 13 eventos, destacando el del año 2011 por su extensión superior a 11.000 km<sup>2</sup> (Chávez *et al.*, 2019) y duración cercana a 180 días.

Durante estos eventos pueden emerger más de 200 especies vegetales, principalmente nativas, cuya floración ocurre entre agosto y noviembre.

*Floración de Phycella cyrtanthoides en ambientes xerofíticos*



Estas especies presentan adaptaciones que les permiten completar rápidamente su ciclo de vida, aprovechando la disponibilidad temporal de agua. En sectores costeros, la camanchaca actúa como fuente complementaria de humedad, favoreciendo la supervivencia de la vegetación (Rundel *et al.*, 1991).

La distribución espacial del fenómeno es heterogénea y depende de la magnitud y localización de las precipitaciones. En la Región de Atacama, se manifiesta principalmente en sectores costeros e interiores, incluyendo áreas como el Parque Nacional Llanos de Challe, así como zonas entre Huasco, Caldera, Vallenar y Freirina.



*Estrellas blancas del desierto: floración de Leucocoryne macropetala en la Región de Atacama.*

En el año 2025 se registró un nuevo evento de desierto florido asociado a precipitaciones invernales inusuales, lo que permitió la activación de bancos de semillas y la emergencia de especies características. Este evento generó un aumento temporal de la cobertura vegetal y activó procesos ecológicos relevantes como la polinización y la disponibilidad de recursos para la fauna.

Desde una perspectiva de conservación, el desierto florido posee alto valor ecológico y patrimonial, pero también presenta alta vulnerabilidad frente a perturbaciones antrópicas. Por ello, su monitoreo y protección resultan fundamentales para la conservación de la biodiversidad y para comprender la respuesta de los ecosistemas áridos frente a la variabilidad climática y el cambio global.



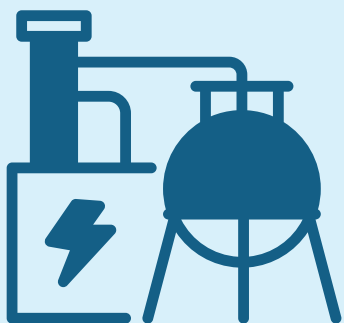




## V. Protección de la biodiversidad

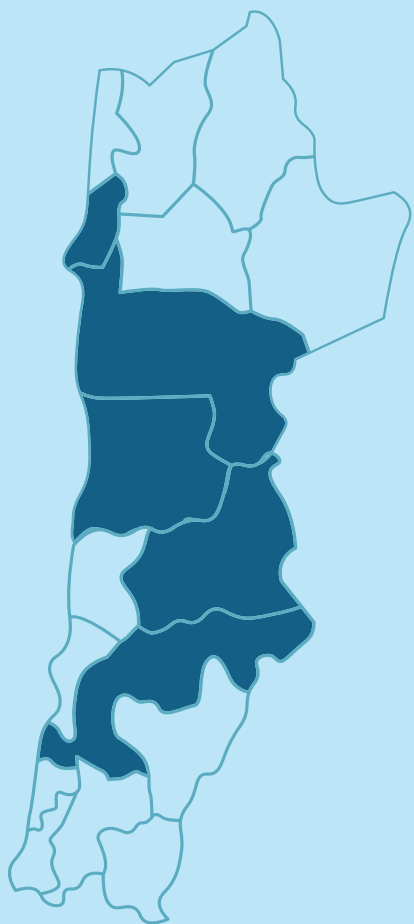






El desarrollo de **proyectos mineros y energéticos requiere ocupar espacios naturales que, en muchos casos, albergan hábitats de flora y fauna nativa.** Estas iniciativas, impulsadas por las demandas de consumo y desarrollo de la sociedad, generan inevitablemente impactos sobre el territorio y los ecosistemas.

Tales proyectos frecuentemente involucran la remoción de vegetación para instalar sus obras físicas e infraestructura, consecuentemente provocan una disminución de la superficie ocupada por las formaciones vegetales xerofíticas. Aún así, ambas actividades (minería y energía) son importantes y necesarias para el desarrollo del país.



Transmisora Eléctrica del Norte (TEN) marcó un hito sin precedentes en la historia energética de Chile al concretar la interconexión entre las fuentes de generación eléctrica del norte del país y los principales centros de consumo del centro sur. Esta obra permitió integrar el sistema de transmisión nacional, habilitando el flujo bidireccional de energía, especialmente aquella proveniente de fuentes renovables generadas en el norte de Chile.

La materialización de este proyecto representó uno de los mayores desafíos de infraestructura desarrollados en el país, involucrando complejos procesos de ingeniería, financiamiento, logística, construcción e innovación tecnológica. A ello se sumaron importantes desafíos en materias de recursos humanos, salud y seguridad ocupacional, relacionamiento comunitario y cumplimiento ambiental, junto con la necesidad de construir una relación de confianza y colaboración con las comunidades y territorios involucrados.

En paralelo al desafío técnico y constructivo, el proyecto logró cumplir íntegramente con los permisos y compromisos ambientales asociados, demostrando que es posible desarrollar infraestructura de gran escala incorporando estándares ambientales y sociales de alto nivel. Sin duda, para quienes fuimos parte de este proceso, representó un viaje extraordinario e inolvidable. Fueron casi cuatro años de diseño, construcción y trabajo ininterrumpido, hasta concretar una interconexión histórica, ejecutada dentro de los plazos y presupuestos establecidos.



Este libro busca relatar diez años de trabajo orientados al cumplimiento de compromisos ambientales asociados a un proyecto de gran escala y relevancia para el país. Sin embargo, luego de una década de esfuerzo continuo e intenso, comprendemos que dicho cumplimiento representa solo una parte, aunque fundamental, de un proceso mucho más amplio, relacionado con la generación de conocimiento, la conservación de la biodiversidad, la restauración ecológica y la construcción de vínculos con los territorios y sus comunidades.

A lo largo de estos diez años, el trabajo desarrollado ha permitido avanzar de manera progresiva y sostenida en múltiples compromisos ambientales, técnicos y sociales, cuyos principales alcances y resultados se presentan a continuación.

1

**Enriquecimiento de las poblaciones naturales** de las especies de cactáceas y plantas objetivo. Se realizó el enriquecimiento (incremento en densidad) con plántulas de cactáceas y arbustivas propagadas en vivero.

2

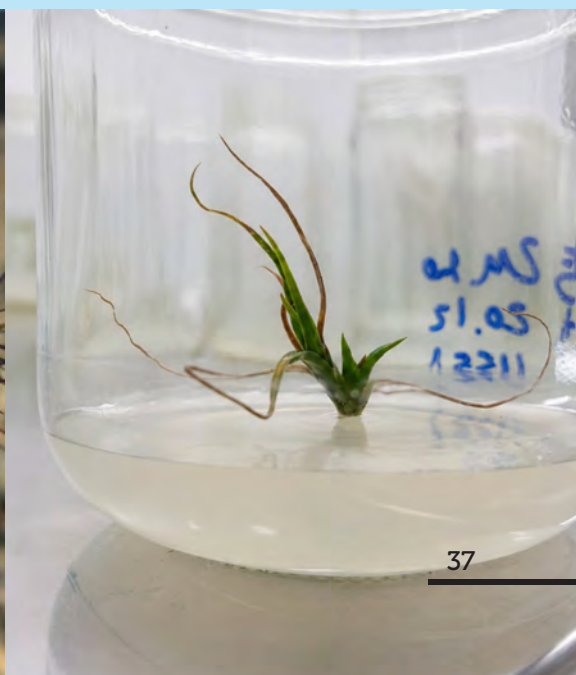
**Ejecución de estudios específicos** de las especies *Tillandsia landbeckii* y *Copiapoa megarhiza*.

3

**Monitoreo de individuos rescatados y relocados** (arbustivos y cactáceos).

4

**Plantación** progresiva de más de 20.000 plantas de 14 especies arbustivas y cactáceas propagadas en vivero.





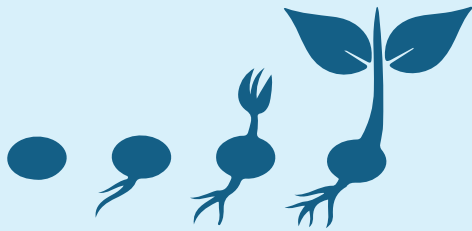




## VI. De la teoría a la práctica: desafíos en la implementación de medidas de mitigación y compensación de impactos sobre el recurso vegetacional







En términos simples, el compromiso ambiental asumido ante el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) consiste en compensar la pérdida de vegetación originada por la intervención de áreas ocupadas por formaciones xerofíticas sensibles en la Región de Atacama, particularmente aquellas emplazadas dentro del Sitio Prioritario para la Conservación de la Biodiversidad Desierto Florido.

Este compromiso busca no solo recuperar cobertura vegetal, sino también contribuir a la conservación de ecosistemas únicos y altamente vulnerables del desierto costero del norte de Chile.

***La revegetación en zonas áridas es un desafío crucial y complejo en el contexto de la creciente desertificación global.***



Las zonas áridas, caracterizadas por su extrema escasez de agua, altas temperaturas, intensa radiación solar y suelos pobres, presentan condiciones que limitan severamente el establecimiento y crecimiento de la vida vegetal. Sin embargo, las especies que habitan en estos ambientes se encuentran evolutiva y genéticamente adaptadas a sobrevivir con los recursos hídricos mínimos disponibles, desarrollando adaptaciones únicas que deben ser aprovechadas estratégicamente en cualquier plan de restauración.

La falta de conocimiento en los procesos ecofisiológico de especies del desierto ha sido uno de los principales obstáculos para el éxito de los planes de revegetación en zonas áridas, requiriendo un enfoque meticuloso y basado en la ciencia ecológica. El desconocimiento de las estrategias de la vegetación para sobrevivir en estos ambientes adversos ha sido un desafío a abordar.



## **VII. Investigación pionera para la conservación de la flora nativa de la Región de Atacama**





Este Programa de Revegetación constituye uno de los compromisos ambientales más ambiciosos y complejos implementados en esta zona del país, tanto por la magnitud de los esfuerzos humanos requeridos como por la alta complejidad técnica que ha demandado su ejecución.

Su desarrollo ha implicado un trabajo sostenido de largo plazo, requiriendo equipos humanos altamente especializados, investigación aplicada, innovación técnica y una significativa inversión de recursos económicos.

Desde sus inicios, en 2015, el programa se enfocó en generar conocimiento y buscar soluciones que permitieran avanzar en la restauración de espacios degradados mediante el uso de especies nativas propias de ecosistemas xerofíticos de la Región de Atacama. Muchas de estas especies nunca habían sido estudiadas desde una perspectiva de restauración ecológica, propagación o establecimiento en terreno, representando un desafío científico y técnico sin precedentes.

Entre ellas destacan diversas especies cactáceas y arbustivas, caracterizadas por su fragilidad ecológica, sensibilidad ambiental y alto valor para la conservación de la biodiversidad del desierto costero del norte de Chile.

***Copiapoa megarhiza***

***Cumulopuntia sphaerica***

***Eulychnia acida***

***Pyrrhocactus confinis***

Además de las leñosas bajas:

***Atriplex clivicola***

***Atriplex deserticola***

***Ephedra breana***

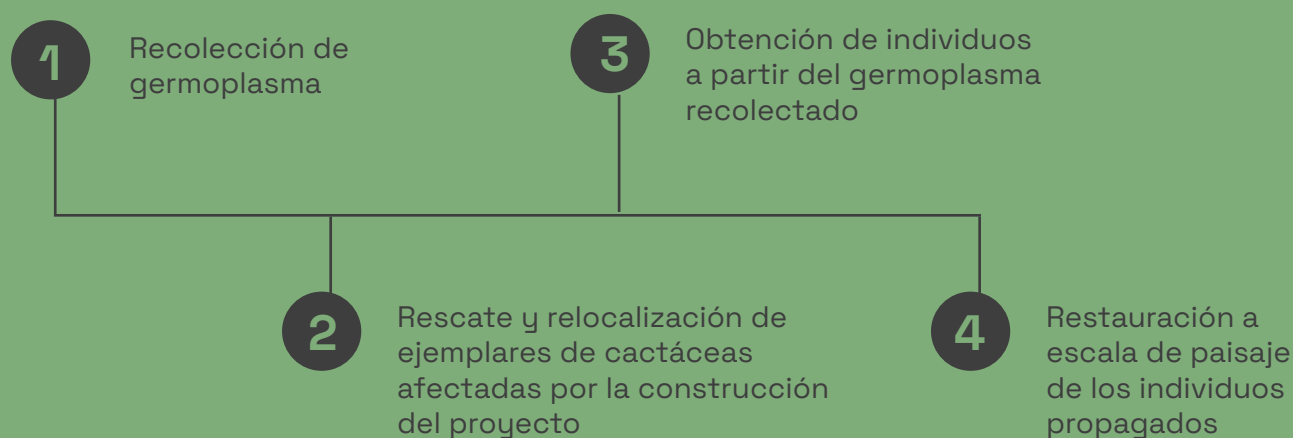
***Heliotropium chenopodiaceum***

***Nolana albescens***

***Encelia canescens***

***Tetragonia angustifolia***

Se planificó un trabajo en cuatro etapas:





Uno de los logros más destacados de esta iniciativa de conservación y restauración ha sido la generación de un conocimiento científico sin precedentes.

Gracias a la investigación conjunta de INFOR y TEN se ha logrado descifrar el proceso de germinación y propagación en vivero de varias especies cactáceas y arbustivas, información que hasta ahora era desconocida y que resulta fundamental para su conservación a largo plazo.

***“No solo se trata de plantar, más bien se trata de estudiar y conocer las claves fisiológicas que determinan la germinación y propagación de algunas especies xerofíticas del norte de Chile.”***

***“La información obtenida sobre la propagación de cactáceas es un legado invaluable para la ciencia y la conservación de la biodiversidad en Chile”***

***– Dr. José Andrés Hernández, INFOR***



*Cada planta cuenta: monitoreo de sobrevivencia en áreas revegetadas del desierto de Atacama.*



A la fecha de edición de este libro, el Programa se encuentra en su cuarta etapa, con actividades de propagación en vivero, adaptación ecológica y finalmente, establecimiento *in situ*.

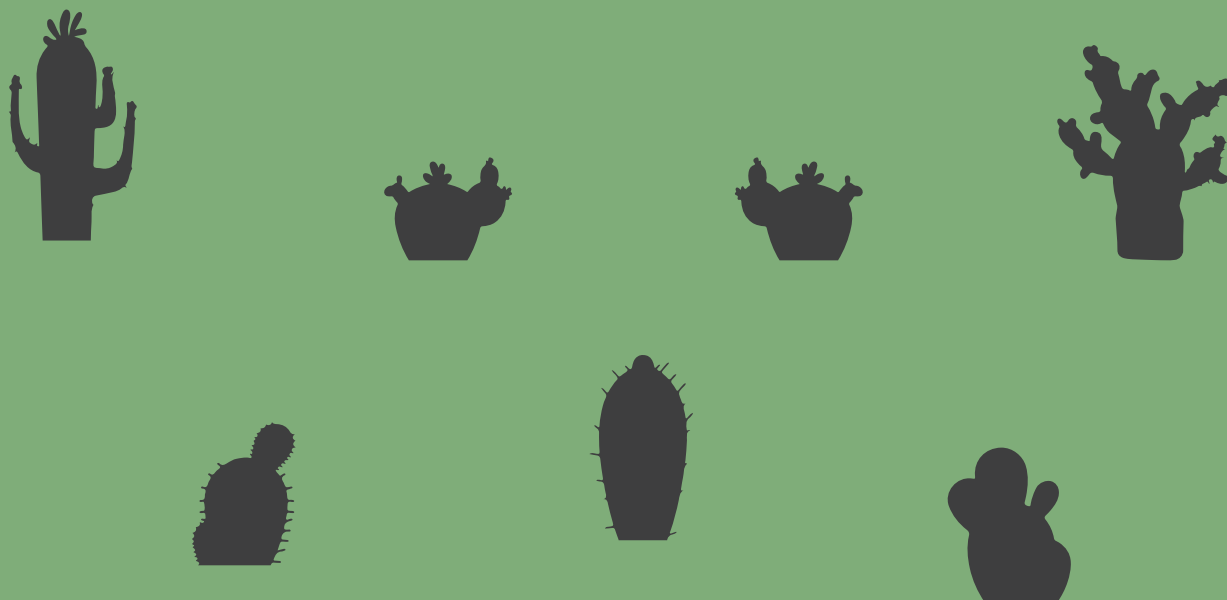
Los próximos pasos de TEN e INFOR incluyen:

- Monitoreo de las cactáceas y arbustivas establecidas
- Irrigación a necesidad de las plantas a través de riego tecnificado
- Replante y mantención
- Análisis de estrés hídrico
- Análisis de estrés hídrico/clima con el pasar de los años.

Como parte de los avances alcanzados, fue posible implementar ensayos de revegetación y plantación utilizando individuos propagados por el Instituto Forestal (INFOR), resultado de un extenso proceso de investigación aplicada desarrollado específicamente para especies nativas xerofíticas de la Región de Atacama.

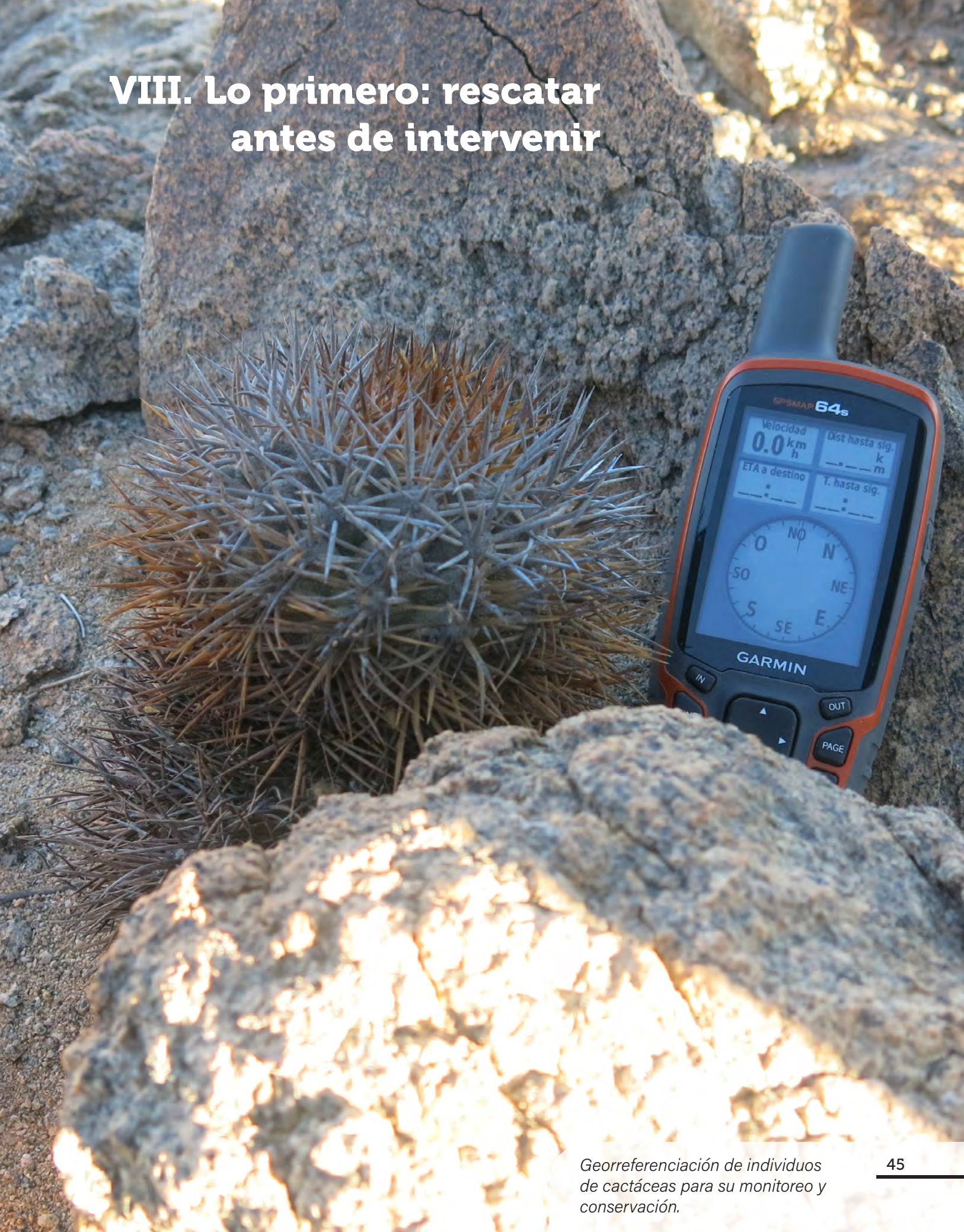
Este trabajo permitió generar protocolos de propagación, establecimiento y manejo adaptados a las condiciones extremas del desierto, obteniendo resultados favorables una vez establecidas las plantas en terreno, tanto en términos de supervivencia como de adaptación a las condiciones ambientales locales.

Antes de establecer las especies, se realizó una serie de ensayos, durante dos años, para dilucidar aspectos como el espaciamiento entre individuos, régimen de riego, protección solar de plantas y época de instalación, entre otros.





## VIII. Lo primero: rescatar antes de intervenir





Entre las actividades iniciales se realizó la identificación y georreferenciación de los ejemplares a afectar. Para ello, se realizó microrruteos para verificar o constatar la presencia de las especies cactáceas: *Copiapoa megarhiza*, *Eulychnia acida* y *Cumulopuntia sphaerica*; *Tillandsia landbeckii*. Cada individuo fue georreferenciado mediante un GPS.

## **El caso de los cactus.**

En el Norte de Chile se encuentran en ejecución proyectos asociados al desarrollo energético del país, los que abarcan extensas zonas áridas o desérticas. En tales áreas los cactus son elementos característicos y representativos de la flora de esa zona, con un hábito de vida perenne, permanentes en el paisaje y muy longevos.

Su estrategia de sobrevivencia en ambientes áridos incluye diversas adaptaciones morfológicas y fisiológicas, entre las que destacan el desarrollo de tallos suculentos capaces de almacenar agua y realizar fotosíntesis, además de la reducción de las hojas a espinas. Estas últimas corresponden a hojas modificadas que permiten disminuir la pérdida de agua por transpiración, proteger a la planta frente a herbívoros y generar sombra sobre la superficie del tallo, favoreciendo así la conservación hídrica en condiciones extremas de aridez (Nobel, 2002; Mauseth, 2006).

La cubierta de los cactus es una epidermis muy dura, frecuentemente cerosa, adaptada para evitar al máximo la pérdida de agua, estomas muy eficientes que se abren en la noche para captar CO<sub>2</sub> y liberar O<sub>2</sub> en una vía metabólica especializada en zonas áridas llamada CAM (metabolismo ácido crasuláceo).

Los tallos de los cactus pueden hincharse con agua durante los escasos periodos de lluvia y pueden almacenarla por varios años, reduciendo su diámetro y altura al ir perdiendo gradualmente el agua. Otras adaptaciones para sobrevivir en el clima árido es reducir la





exposición solar adelgazando la silueta, inclinándose hacia el sol, enterrándose, u otros.

También desarrollan sistemas radiculares excepcionalmente amplios, tanto en la expansión horizontal subsuperficial de raíces hasta 15 o 20 metros, y profundos, penetrando a estratos que pueden llegar a 10 o 30 metros, incluso en rocas usando mecanismos de bio oxidación. Además forman asociaciones con hongos y bacterias en las raíces o simbioses en toda la planta.



En Chile crecen

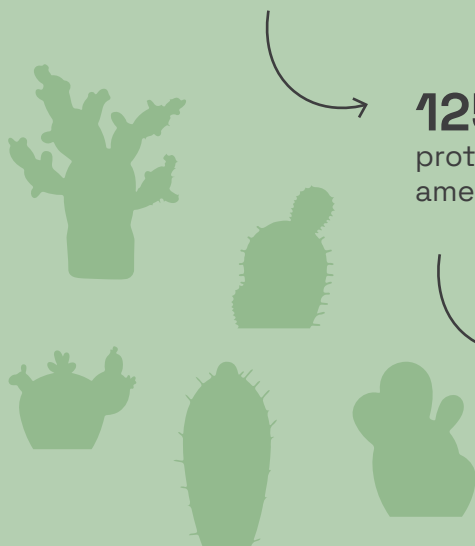
**98**

especies de cactus distribuidos en  
**17 géneros.**

A algunas de estas especies se les incluye en categorías sub específicas, por lo que la lista de taxa sube hasta

**151 variedades**

De estas 151 taxa (o variedades):



**125** están incluidas en alguna propuesta de protección, ya que presentan algún tipo de amenaza o problema de conservación.

**32** de ellas se encuentran protegidas oficialmente por el Estado (D.S. N°29 de 2011 del Ministerio de Medio Ambiente).

Cada rescate de ejemplares requiere levantar información clave del sitio de origen. Esta información orienta la selección del sitio de destino y también la forma y posición de la planta relocalizada. Se levanta al menos la siguiente información:

- Nombre científico
- Nombre común
- Coordenadas (UTM)
- Posición topográfica (piedemont, ladera, plano)
- Características del sustrato: textura (arenosa, franco gruesa, franco fina), pedregosidad (piedras de más de 25 cm de diámetro)
- Exposición (orientación cardinal)





*El caso de Copiapoa  
megarhiza*





*Protegiendo la vida en el desierto:  
crecimiento de Copiapoa megarhiza bajo  
malla de protección*

Las características morfológicas de esta especie son:

- El cuerpo esférico o algo alargado
- Solitario, a veces ramificado
- Ápice cubierto de lanosidad suave color amarillo
- Costillas longitudinales
- Espinas rectas, tiesas, alesnadas, de 1-3 cm de largo.
- Raíz gruesa y larga con cuello muy angosto.



*Copiapoa megarhiza creciendo entre rocas*



*Sistema radicular de Copiapoa  
megarhiza en el desierto de Atacama*



Para el rescate de esta especie, se consideró su extracción completa que incluye toda la estructura aérea y el sistema radicular con el menor daño posible. En estas condiciones, los individuos sufren un menor estrés de trasplante y tienen una alta posibilidad de recuperarse y sobrevivir puesto que las raíces intactas generarán nuevas raicillas funcionales.



Se debe procurar una extracción sin producir daño mecánico o que deje heridas en la planta, para evitar o minimizar la infestación por patógenos, como hongos y bacterias que causan pudrición y/o muerte.

*Copiapoa megarrhiza* presenta raíces napiformes, para almacenar sustancias de reserva que le permite sobrevivir en este clima. Se ha obtenido evidencia que una extracción que daña significativamente las raíces (napiformes) resulta en menos posibilidades de supervivencia de la planta. Sus raíces de almacenamiento son fundamentales, no siendo suficiente solo raíces superficiales o fasciculares.





## *El caso de Eulychnia acida*



*Poblaciones naturales de copao  
(Eulychnia acida var elata) en  
laderas rocosas de la Región de  
Atacama.*





Para identificar a esta especie se consideró:

- Su crecimiento preferentemente arborescente de 1,5-4 m de altura, muy ramificado, generalmente con tronco único.
- Posee entre 10 y 16 costillas anchas y bajas con areolas algo hundidas.
- Presenta espinas aciculares de color marrón cuando nuevas, y que al madurar se tornan grises.
- Sus espinas marginales son alrededor de 12, más una o dos centrales erectas de 10 a 20 cm de largo (Hoffmann & Walter, 2004).





Para el rescate se consideró una extracción parcial de los individuos, criterio definido en función de su altura, diámetro y peso. Este procedimiento permitió obtener ejemplares más aptos para su manipulación, transporte y posterior establecimiento, disminuyendo el riesgo de daños mecánicos durante las labores de rescate. La extracción incluyó la totalidad del sistema radicular, con el propósito de favorecer la emisión de nuevas raíces funcionales y aumentar las probabilidades de supervivencia tras el trasplante.

La extracción de los individuos requirió un trabajo cuidadoso, debido a que las raíces se desarrollaban en suelos predominantemente minerales y de alta compactación. Para ello, además del uso de herramientas manuales como pala, chuzo y picota, se realizó una remoción gradual del suelo alrededor de cada individuo, permitiendo exponer y liberar el sistema radicular con el menor daño posible. Este procedimiento favoreció la conservación de una mayor proporción de raíces funcionales, incrementando las probabilidades de supervivencia y establecimiento posterior de los ejemplares rescatados.

La extracción debe realizarse evitando, en la medida de lo posible, el daño de la raíz principal, debido a su importancia para la sobrevivencia posterior del individuo. No obstante, durante este proceso las raíces secundarias inevitablemente sufren algún grado de afectación.





A close-up photograph of a Cumulopuntia sphaerica cactus. The cactus has a green, segmented body covered in numerous long, thin, greyish-brown spines that radiate outwards. A large, vibrant orange flower with multiple petals is in full bloom, emerging from the center of the cactus. The background is a blurred desert landscape with sandy ground and other cacti.

*El caso de Cumulopuntia  
sphaerica*



Para identificar a esta especie se consideró:

- Presenta un crecimiento en cojines sueltos, formados por ramas subesféricas fácilmente desprendibles de la planta madre, con areolas cubiertas por un fieltro blanco característico
- Espinitas finas y espinas largas, aciculares, rectas (Hoffman, 1989).

Para el rescate se consideró la extracción completa del ejemplar, incluyendo el total de su estructura aérea y radicular, intentando causar el menor daño posible, las raíces con bloque de tierra y cuidando que los artejos basales no se desprendiesen.







*El caso de **Tillandsia  
landbeckii***

*Vida sostenida por la camanchaca:  
poblaciones de **Tillandsia landbeckii** en  
la Región de Atacama.*





Rescate y establecimiento de *Tillandsia landbeckii* en la Región de Atacama.

Para evitar la afectación de las obras del proyecto sobre una población de Clavel del Aire (*Tillandsia landbeckii*), se rescató un total de

**80** ejemplares.

Los individuos fueron extraídos del suelo mediante herramientas manuales, principalmente pala y chuzo. Durante este proceso se procuró evitar daños en las estructuras aéreas de las plantas y minimizar la afectación del sistema radicular.

Una vez extraídos, los individuos fueron depositados en sacos de arpillera y posteriormente trasladados hacia el área de relocalización.

El área de relocalización presenta condiciones ideales para el desarrollo de la especie. La preparación del suelo consideró una mezcla de suelo del lugar y materia orgánica, en una proporción 70:30 (tierra local: tierra orgánica).

El área fue delimitada en su perímetro con un cerco, se aplicó riego en la parte aérea en forma de nebulización, con un volumen de 1,2 litros por planta al año, iniciándose durante junio del 2017.

**Tras 27 meses de haber efectuado el rescate, se observó una supervivencia del 100 % de los individuos rescatados.**



## Renacer en el desierto: la exitosa relocación de *Tillandsia landbeckii* nueve años después de su rescate y relocación

En 2017 se realizó el rescate y relocación de 80 ejemplares adultos de *Tillandsia landbeckii*, los cuales fueron posteriormente establecidos en sectores que presentaban condiciones ambientales similares a las de su área de origen, es decir sitios con características equivalentes de exposición, tipo de sustrato y disponibilidad de humedad costera, condiciones fundamentales para el desarrollo de esta especie.

De manera complementaria, se incorporó a otros ejemplares obtenidos mediante propagación vegetativa, estos últimos con el objetivo de comparar su capacidad de adaptación, establecimiento y crecimiento bajo las mismas condiciones ambientales en que se estableció a los individuos rescatados. Esta experiencia permitió avanzar en el conocimiento sobre las posibilidades de recuperación y manejo de la especie en ecosistemas desérticos costeros altamente sensibles.

Transcurridos nueve años desde su implementación, la totalidad de los individuos establecidos presenta un notable desarrollo vegetativo, evidenciando altos niveles de supervivencia, vigor y crecimiento, lo que permite concluir que fue una experiencia exitosa y fácilmente replicable en otros proyectos que requieran de esta solución.



**Antes**

**Después**

Una década de transformación: antes y después del establecimiento de *Tillandsia landbeckii*.



## **IX. Programa de Revegetación: Estudio científico de la flora nativa de la Región de Atacama**







*Capturando la camanchaca: Tillandsia landbeckii en uno de los ambientes más áridos del mundo.*



# 1. *Tillandsia landbeckii*

## Las plantas del aire: vida sostenida por la niebla

*Tillandsia* es un **género exclusivamente americano** que reúne **cerca de 730 especies**.

El género fue descrito por Carlos Linneo en 1753 y dedicado al botánico finlandés Elias Tillands. Según la tradición, Tillands —cuyo apellido significa “por tierra” en sueco— caminó más de mil kilómetros para evitar el mareo del viaje en barco, una anécdota que parece anticipar la resistencia de las plantas que hoy llevan su nombre.



Conocidas popularmente como clavel del aire, las *Tillandsia* son parientes cercanas de los chaguales (*Puya gilmartiniae* y *Deuterocohnia chrysantha*), especies que también habitan las costas áridas de la región de Atacama.

## Un linaje diverso y adaptable

*Tillandsia* es el género más diverso de la familia *Bromeliaceae*. La mayoría de sus representantes crecen en ambientes tropicales húmedos, donde se desarrollan como epífitas, absorbiendo agua y nutrientes directamente desde el aire mediante hojas cubiertas de tricomas, pequeñas escamas especializadas.

Algunas pocas especies del género han sido capaces de colonizar los desiertos más áridos del planeta, adaptándose a condiciones extremas donde las lluvias son prácticamente inexistentes. Entre ellas *Tillandsia landbeckii* se destaca por formar extensas comunidades monoespecíficas denominadas tillandsiales, uno de los paisajes biológicos más singulares del desierto costero del norte de Chile.





## En Chile se han registrado

**6** especies en ambientes áridos, desde la Región de Coquimbo hacia el norte.

Entre ellas, *Tillandsia landbeckii* Phil.  
conocida como “paja blanca”



*Evaluación de disponibilidad de semillas en poblaciones de Tillandsia landbeckii para programas de conservación.*



## Una especie con historia

*T. landbeckii* fue descrita en 1864 por el naturalista Rodolfo Amando Philippi en la revista *Linnaea*. Philippi dedicó la especie a su colega Christian Landbeck, ornitólogo alemán y colaborador, en el Museo de Historia Natural de Santiago. El ejemplar tipo fue recolectado cerca de Illapel, en la actual Región de Coquimbo.

Su distribución se extiende desde el centro de Perú hasta el valle del río Choapa en Chile. En la Región de Atacama convive con *T. geissei* y *T. virescens*, conformando un mosaico de comunidades adaptadas a la captación de humedad atmosférica.

## Adaptaciones al límite de la supervivencia

*T. landbeckii* es una hierba perenne que forma cojines de hasta 40 cm de alto y entre 0,5 y 2 m de ancho. Posee raíces solo en su etapa juvenil, cuya función principal es anclar la planta al sustrato. Su crecimiento es lento y sostenido, una característica común en las especies perennes del desierto.

Las hojas son delgadas, acanaladas y curvadas hacia atrás, cubiertas por densos tricomas que le confieren un aspecto gris ceniciento. Estas estructuras reflejan la radiación solar y capturan la humedad del aire. Ocasionalmente, algunos tallos desarrollan una vara floral delgada que produce una o dos pequeñas flores de tonos amarillos o violáceos, con una delicada fragancia. El fruto libera semillas plumosas que son dispersadas por el viento, aunque la especie se propaga principalmente de manera vegetativa.





## La niebla como fuente de vida

La supervivencia de *T. landbeckii* depende casi por completo de la camanchaca, la niebla costera característica del norte de Chile. Este fenómeno se origina cuando nubes bajas del océano Pacífico chocan con las laderas de la cordillera de la costa, condensando la humedad en diminutas gotas.



Gracias a su metabolismo ácido de las crasuláceas (CAM), la planta puede realizar fotosíntesis con los estomas cerrados durante el día, evitando así la pérdida de agua por evaporación. Cada noche, las hojas capturan la humedad de la niebla, lo que permite su crecimiento en un entorno donde la lluvia prácticamente no existe.

## Los *tillandsiales*: Oasis invisibles del desierto

En el paisaje del desierto costero, los *tillandsiales* pueden parecer formaciones grises y áridas, pero en realidad son ecosistemas funcionales que aportan vida y estabilidad. Las plantas tienden a organizarse en bandas perpendiculares al flujo de la niebla o en montículos que optimizan la captación de humedad. Estas comunidades generan materia orgánica, retienen humedad, moderan la temperatura del suelo y proporcionan hábitat para otros organismos del desierto.

Muchos *tillandsiales* muestran distintos grados de degradación. En algunos sectores se observan plantas muertas o dispersas, posiblemente como consecuencia de variaciones en la frecuencia e intensidad de la niebla. Por esta razón, *Tillandsia landbeckii* se considera un bioindicador sensible del cambio climático, capaz de reflejar modificaciones sutiles en la disponibilidad de humedad atmosférica.







Poblaciones de individuos  
adultos de *Tillandsia landbeckii*

## Un patrimonio natural que se debe proteger

“Las principales amenazas que enfrenta esta especie incluyen el cambio climático, la herbivoría por cabras y burros, el uso como combustible y la circulación de vehículos motorizados en laderas arenosas, su hábitat natural. Cada una de estas perturbaciones afecta la estabilidad de un ecosistema que depende del equilibrio entre la niebla, el viento y el relieve.

Conocer y valorar a *Tillandsia landbeckii* significa reconocer la resiliencia del desierto de Atacama y la capacidad de la vida para persistir en condiciones extremas. Estas plantas, sostenidas solo por la niebla, son un símbolo de adaptación y equilibrio natural. Su presencia silenciosa recuerda que incluso en los ambientes más áridos, la vida encuentra caminos para florecer.

Los “tillandsiales”, son ecosistemas dominados por plantas del género *Tillandsia* presentes en la costa peruana y chilena (Aponte y Flores, 2013). En Chile su distribución se ha reportado desde la Región de Arica y Parinacota hasta la Región de Valparaíso.

El incremento histórico de la aridez y el cambio climático representan una seria amenaza para la estabilidad y supervivencia futura de los Tillandsiales del desierto costero del norte de Chile, debido a la disminución del agua aportada por la neblina costera (Schulz et al., 2011), por lo que su estudio es necesario para generar conocimientos que permitan implementar programas de conservación tanto in situ como ex situ, con el fin de salvaguardar este patrimonio biológico.”



## Flores y semillas

*Tillandsia landbeckii* presenta una inflorescencia aromática con 1 o 2 flores subsésiles, raramente 3, bisexuales, de diversos colores, naranja, púrpura, marfil, café, siendo el amarillo el más frecuente; sépalos asimétricos, parcialmente escamosos de 1 cm de largo.

Estambres junto a los pétalos, de 6 mm de largo, que sobrepasan levemente el pistilo; Ovario súpero, tan largo como el pistilo. El fruto es una cápsula cilíndrica de aproximadamente 2 cm de largo; Las semillas de 1-4 mm poseen apéndices plumosos de 1 cm de largo (Smith & Downs, 1977; Pinto, 2002; Castañeda, 2003).







Las flores polinizadas producen una cápsula con tres cámaras, y cada cápsula contiene de 18 a 54 semillas por fruto, el cual demora 3 meses en madurar (Pinto, 2005).

El fruto se seca gradualmente, hasta que las paredes de las cámaras se contraen y separan. La pared de cada cámara se dobla hacia atrás y provee de una abertura para la dispersión de las semillas, que ocurre generalmente por viento (Molina, 1999).

Los pelos exteriores se sueltan de la semilla para tomar forma de quitasol, lo que les permite ser transportadas por el viento (Pinto, 2005).



## Germinación

En el género *Tillandsia* la fertilización del óvulo da origen a la semilla. El endosperma ocupa gran parte del interior de la semilla y contiene carbohidratos de reserva, proteínas, vitaminas y minerales.

El embrión crece lentamente, alimentado por el endosperma y ocupa sólo una porción pequeña de la semilla, por lo general un tercio del volumen total. En la madurez, un embrión de *tillandsia* se compone de un cotiledón carnoso, situado al abrigo del endospermo, un ápice embrionario pequeño con varias hojas parcialmente desarrolladas y una raíz primaria parcialmente desarrollada (Benzing, 1980).



*Iniciando el proceso de germinación de semillas de Tillandsia landbeckii.*



*De semilla a planta: germinación de Tillandsia landbeckii.*

La dormancia (latencia) es un mecanismo de base genética que poseen algunas semillas, que puede ser de naturaleza física o fisiológica, y que previenen la germinación de la semilla cuando las condiciones ambientales le son adversas. La dormancia permite que la germinación se sincronice con el ambiente, a la espera de que existan condiciones óptimas para la supervivencia de las plántulas (Hartmann *et al.*, 2002).

Las semillas de bromeliaceas epífitas son consideradas quiescentes, es decir, que no pasan por un periodo de dormancia y pueden germinar inmediatamente después de ser dispersadas, cuando se encuentran en un medio apropiado de humedad y temperatura (Benzing, 2000). Se esperaría entonces, que las semillas de *Tillandsia landbeckii* sometidas a medios controlados de temperatura, humedad y luz germinen rápidamente.

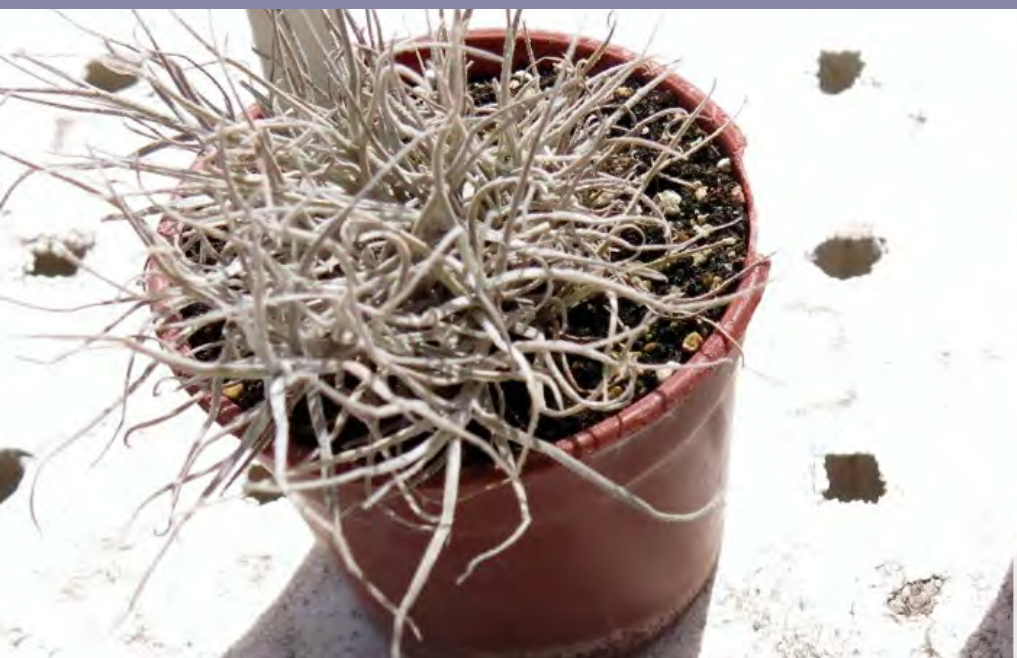
Sin embargo, la germinación también dependerá de la calidad y viabilidad de las semillas colectadas, atributos que pueden variar según el año, las condiciones climáticas en las cuales se desarrollaron y otros factores ambientales y genéticos de las poblaciones.



## Propagación vegetativa

La propagación vegetativa es un método que puede mitigar y resolver problemas en especies cuyas semillas presentan dificultades para germinar, ella consiste en la multiplicación de individuos basada en la totipotencialidad celular (Hartmann y Kester, 2001; Rojas *et al.*, 2004).

La propagación vegetativa se produce por la estimulación de los tejidos para entrar en división celular y producir primordios radiculares, mediante la acumulación natural de auxinas y de carbohidratos en las áreas expuestas (Baldini, 1992; Hartmann y Kester, 2001). De esta manera, los tejidos se estimulan para que produzcan etileno, auxinas y citoquininas, los cuales promueven la formación de raíces adventicias (Hartmann y Kester, 2001; Salisbury y Ross, 1992; Wilson, 1994; Zacarías y Lafuente, 2000).



Multiplicando la vida del desierto: extracción y propagación vegetativa de *Tillandsia landbeckii*.

### • Macropropagación vegetativa:

No existen ensayos anteriores para *T. landbeckii*, que describan su comportamiento bajo propagación a través de sus hojas, lo que contribuiría a obtener individuos de la especie rápidamente.



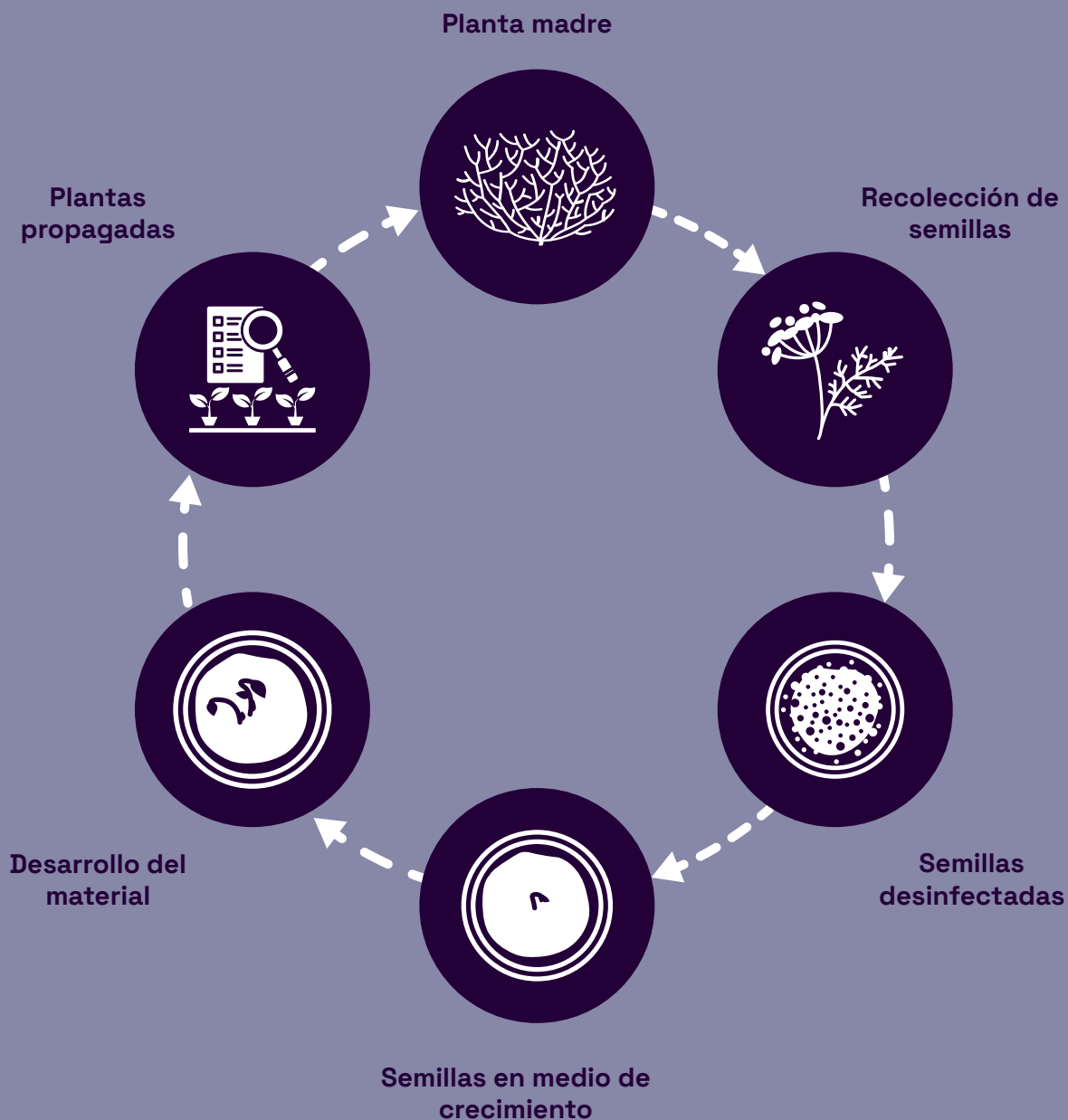
Una nueva generación de jardines de niebla: individuos de *Tillandsia landbeckii* propagados y establecidos en terreno.



- **Micropropagación *in vitro*:**

La micro-propagación también es una alternativa al momento de obtener individuos de forma más rápida que mediante semillas. Además, este método asegura la sanidad vegetal de los individuos que se obtengan.

Las hormonas de crecimiento aplicadas a explantes *in vitro* de *Tillandsia landbeckii* actúan como diferenciadores de tejidos. Principalmente se usan dos hormonas: auxinas para de la estimulación de raíces, y citoquininas para la elongación de brotes. Una relación alta de Auxinas: Citoquininas genera la estimulación de la producción de raíces, en cambio, una relación baja de estos reguladores del crecimiento genera un aumento en la producción de follaje. (Cárdenas *et al.*, 2020)

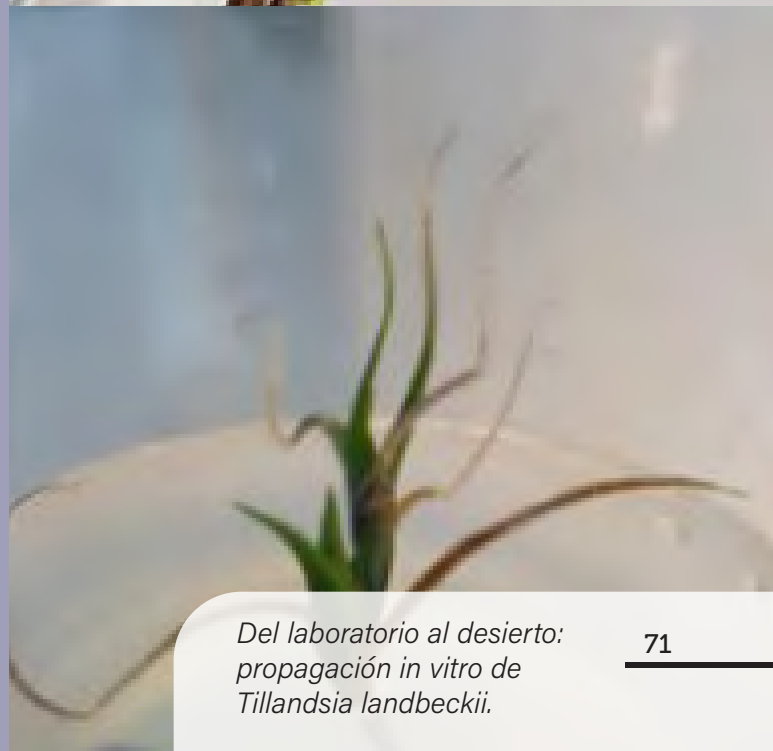




Davidson y Donnan (1977) lograron propagar *in vitro* bromeliáceas del género *Cryptanthus* utilizando medio Musashige y Skoog (MS) conteniendo 1 mg/L de la auxina ácido naftalenacético (ANA). Así mismo, Droste *et al.* (2005) demostraron que estas bromelias desarrollaron raíces en medio MS al 50% de su concentración, conteniendo 0,2 mg/L de ANA.

Por otra parte, Huertas *et al.* (1995) utilizaron embriones inmaduros de *Tillandsia spp.*, logrando propagar cultivares de este modo. Otros estudios realizados con éxito en la propagación *in vitro* de especies de *Tillandsia*, fueron el de Mansilla (2007), quien usó el medio de cultivo MS al 50% y Orozco (2011), utilizando también medio de cultivo MS al 25% de su concentración original.

En base a los resultados obtenidos en los estudios de *Tillandsia landbeckii*, la introducción de material adulto requiere un protocolo de desinfección para minimizar los problemas de contaminación. La combinación de tratamientos de fungicidas con CAPTAN® y BENOMILO®, seguida de una desinfección superficial con hipoclorito de sodio y etanol, permitió obtener explantos para su establecimiento *in vitro*. Asimismo, el uso de cisteína resultó relevante para reducir los procesos de oxidación asociados al manejo del material vegetal. En la fase de establecimiento y multiplicación de material adulto, se observó que una etapa inicial de adaptación en medio MS completo, suplementado con sacarosa y libre de reguladores de crecimiento, favorece la recuperación fisiológica de los explantos. Posteriormente, la incorporación de 1 mg L<sup>-1</sup> de BAP permitió estimular la multiplicación del material vegetal, constituyéndose en una alternativa viable para la propagación de la especie. Respecto al material juvenil, la aplicación de tratamientos de asepsia superficial resultó indispensable para evitar pérdidas por contaminación. Los mejores resultados de germinación se obtuvieron utilizando medio MS a media concentración suplementado con sacarosa y bajo condiciones de iluminación, lo que evidencia el potencial de este tipo de material para programas de propagación y conservación *ex situ*. En conjunto, estos resultados aportan antecedentes técnicos para el desarrollo de estrategias de conservación *ex situ* y propagación de *Tillandsia landbeckii*, contribuyendo a mejorar las capacidades de manejo y preservación de esta singular especie de los ecosistemas áridos del norte de Chile.





## 2. *Copiapoa megarhiza*



A nivel mundial, la familia

**Cactaceae**

a la cual pertenece  
*Copiapoa megarhiza*

Incluye:

**125** géneros

**1900** especies  
aproximadamente

(Señoret y Acosta, 2013)



Esta familia es nativa de América y el Caribe, y se distribuye naturalmente desde el oeste y el sur de Canadá (Speirs, 1982) hasta el sur de la Patagonia Chilena y Argentina (Kiesling, 1988).

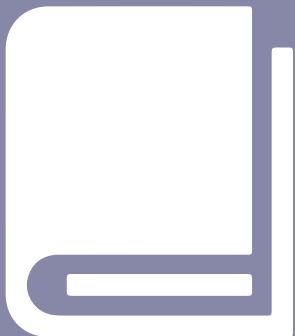
Actualmente se encuentra cultivada en distintas partes del mundo (Nobel, 2002; Señoret y Acosta, 2013).



Creciendo en el desierto: individuo adulto de *Copiapoa megarhiza* en la Región de Atacama



## En 1922...



Los botánicos estadounidenses Nathaniel Britton y Joseph Rose, publicaron el tercer tomo de su obra *The Cactaceae. Descriptions and illustrations of plants of the cactus family*, una monumental serie en cuatro volúmenes dedicada exclusivamente a los cactus.

En este tomo establecieron el género *Copiapoa*, cuyo nombre hace honor a la ciudad de Copiapó, en el desierto de Atacama.

Dentro del nuevo género incluyeron **6 especies:**

**Cinco ya conocidas** y descritas previamente en *Echinocactus*

- *C. cinerea*
- *C. marginata*
- *C. coquimbana*
- *C. cinerascens*
- *C. echinoides*

**Y una completamente nueva para la ciencia: *Copiapoa megarhiza*.**

Britton y Rose (1922) la describieron como un cactus solitario, de forma globosa que se alarga con la edad, de color grisáceo y con espinas robustas, amarillas al nacer y pronto grises. Sus flores son amarillas y sus frutos verdes, sin pelos ni espinas.

Una de las particularidades del género *Copiapoa* es el fieltro de pelitos amarillos en el ápice de los tallos y la presencia de frutos secos sin pulpa, que se abren en la parte superior para liberar las semillas. Estas semillas presentan un funículo (el tejido que las conecta al fruto) engrosado y carnoso al madurar, lo que atrae a las hormigas, responsables de su dispersión.



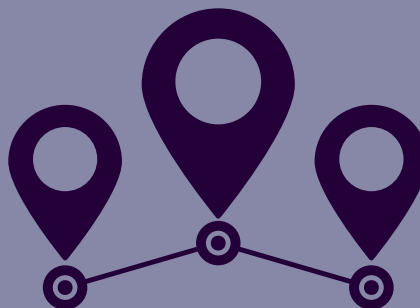
La especie fue recolectada por Joseph Rose en los alrededores de Copiapó, en colinas áridas de granito. Lo que más llamó su atención fueron sus raíces extraordinarias: grandes, carnosas, de hasta 7 a 8 cm de diámetro y 25 a 30 cm de largo, una adaptación que permite a la planta sobrevivir en suelos pedregosos y extremadamente secos. Esta característica dio origen a su nombre: *Copiapoa megarhiza*, que literalmente significa “cactus de Copiapó de raíz grande”.





## Distribución y amenazas actuales

La distribución de *Copiapoa megarhiza* es muy restringida y se limita a los alrededores de Copiapó. Se ha registrado en pequeñas poblaciones de no más de 20 individuos, hasta 15 km al noroeste y 25 km al suroeste de la ciudad. Sin embargo, en planicies pedregosas del suroeste de la ciudad se descubrió una



población mucho mayor, con miles de ejemplares en un área de unas 120 hectáreas. Hoy, ese hábitat se encuentra bajo presión debido a la instalación de parques solares y al crecimiento urbano, lo que provoca pérdida directa de plantas y fragmentación del hábitat.

## Una historia científica compleja

Tras su descripción inicial, la especie cayó en el olvido durante décadas. La localidad tipo —descrita vagamente como “los alrededores de Copiapó”— dificultó su redescubrimiento y favoreció la confusión con especies similares, como *Copiapoa fiedleriana* y *C. parvula*, que incluso llegaron a considerarse subespecies de *C. megarhiza*.

Solo en años recientes, gracias a análisis genéticos (Larridon *et al.*, 2015), se pudo demostrar que son especies independientes y no tan estrechamente relacionadas como se pensaba.



Creciendo entre rocas: individuo adulto de *Copiapoa megarhiza* con restos florales en la Región de Atacama





## Rasgos distintivos

*Copiapoa megarhiza* se diferencia de sus parientes por su forma globosa, que se alarga con la edad, su escasa ramificación y su tallo de consistencia más blanda.

Los ejemplares jóvenes muestran un color verde grisáceo que se torna gris con el tiempo, y sus espinas rectas o ligeramente curvas cambian de amarillas a grises. Su raíz, gruesa y alargada, constituye su rasgo más notable: un verdadero “órgano de supervivencia” en el desierto de Atacama.

## Un patrimonio vivo del desierto

Más allá de su rareza botánica, *Copiapoa megarhiza* simboliza la resistencia de la vida en uno de los desiertos más áridos del planeta. Su historia científica —desde la primera recolección hasta los estudios genéticos modernos— refleja la fragilidad del conocimiento cuando se trata de especies de distribución tan limitada.

Hoy, su supervivencia depende de que se logre conservar los pocos sitios donde aún prospera. Proteger a *Copiapoa megarhiza* no es solo resguardar un cactus singular, sino también mantener vivo un testimonio de la extraordinaria historia natural del desierto de Atacama.





## Floración

Las flores son amarillas y miden 3 cm de largo. El pericarpelo es redondeado-anguloso desnudo. El tubo floral es corto y con forma de embudo muy abierto. Al interior de la flor existe una cámara nectarífera muy desarrollada, corta y tubular, la cual se encuentra cubierta por los estambres de inserción más profunda.

Los estambres y el pistilo son casi siempre de color amarillo pálido; generalmente las anteras se encuentran bajo las ramificaciones del estigma. Perigonio o tépalos generalmente espatulados. La polinización de *C. megarhiza* es llevada a cabo por insectos, entre los que cuentan moscas y abejas de distintas especies.



06/15/2017



### Fruto de *Copiapoa megarhiza*

Fruto maduro de *Copiapoa megarhiza* extraído de la planta para su evaluación. Se observa la estructura carnosa de color pardo rojizo, con restos florales persistentes en el extremo apical y abundante pilosidad blanca en la base, característica de la especie. La evaluación de frutos y semillas constituye una etapa fundamental para comprender los procesos reproductivos y apoyar estrategias de conservación y propagación de esta cactácea endémica del desierto costero de Chile.



Fruto maduro de *Copiapoa megarhiza* extraído para la evaluación y caracterización de semillas.



## Frutos

Los frutos son dehiscentes de color verdoso de 1 cm de ancho, con 4-6 escamas anchas y se encuentran estructurados de forma especial para que las semillas puedan ser dispersadas por hormigas (el fruto tiene una especie de tapa en uno de sus extremos, la cual se desprende completamente por una división transversal); las paredes de los frutos son relativamente gruesas. En la madurez, la placenta donde están adheridas las semillas se ablanda y endulza, atrayendo así a los insectos.





## Semillas

Las semillas son negras, brillantes, con el dorso arqueado con más o menos quilla. El hilum es ovalado y encierra una micrópila pequeña. (Hoffmann y Walter, 2004; CONAMA, 2006a; Señoret y Acosta, 2013).



*Germinación de semillas de Copiapoa megarrhiza en placa Petri bajo condiciones controladas de laboratorio.*





*Cultivando el futuro del desierto: cámara de crecimiento en ambiente controlado para la germinación y desarrollo de Copiapoa*

## Germinación

La germinación y el establecimiento de semillas son aspectos clave en la biología de las cactáceas (Godínez-Álvarez *et al.*, 2003). Para las especies del género *Copiapoa*, las condiciones de germinación en su hábitat natural son generalmente muy difíciles y en pocas poblaciones se pueden observar plántulas (Hoffmann y Walter, 2004).

Se considera que la latencia de semillas, también conocida como dormancia, es una estrategia adaptativa de ciertas cactáceas en lugares imprevisibles o con condiciones ambientales adversas, tales como los ambientes desérticos áridos y semiáridos (Jurado y Flores, 2005).



*Copiapoa megarhiza en etapa temprana de desarrollo, mostrando cotiledones, cubierta seminal y radícula.*

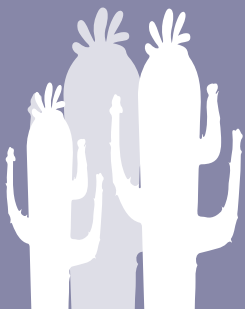


*Plántula de Copiapoa megarhiza en desarrollo, previa a la formación de las primeras espinas*



### 3. *Eulychnia acida* var. *elata*

## Gigantes del desierto



En medio del desierto de Atacama se alzan gigantes verdes que parecen custodiar el paisaje. Son las *eulychnias*, cactus columnares que forman parte de la identidad del norte de Chile. Entre ellas, destaca la variedad más imponente y orgullosa: *Eulychnia acida* var. *elata*, la “antorcha orgullosa de Atacama”.

El género *Eulychnia* fue establecido por Rodolfo Philippi en 1860, en su obra *Florula Atacamensis*, inicialmente para una sola especie, *Eulychnia breviflora*.

Hoy se reconocen

**9** especies, dos variedades y otros linajes aún no descritos formalmente.

Estos cactus columnares constituyen una de las imágenes más características del desierto chileno, y en sectores al sur del río Huasco llegan incluso a formar verdaderos bosques de cactáceas, visibles desde grandes distancias.



Fructificación de *Eulychnia acida*: botones florales del copao en el desierto de Atacama.

Durante milenios los pueblos de la región mantuvieron una estrecha relación con estas plantas. Sus frutos grandes y jugosos, conocidos como “copao” o “rumpa”, fueron una fuente importante de alimento en un medio donde los recursos son limitados.



## La variedad más imponente

La variedad *elata* de *Eulychnia acida* fue descrita por Friedrich Ritter en 1980, destacando por su gran tamaño y porte erguido. Es la forma más grande y masiva de todas las especies y variedades de *Eulychnia*. Pueden alcanzar hasta 6 metros de altura y desarrollar un tronco de hasta 40 centímetros de diámetro. Sus ramas crecen erectas, esto es rectas hacia arriba, a diferencia de la variedad típica de *E. acida*, cuyas ramas son ascendentes, algo curvadas hacia arriba. Los tallos, de color gris verdoso, se pueden ramificar desde la base y continúan dividiéndose hasta muy arriba. Al noreste de Copiapó se encuentran plantas más bajas, de hasta 3 metros, con ramas más delgadas.

La distribución de la variedad *elata* se extiende desde el norte del valle del Huasco hasta quebradas en el noreste de Copiapó. El valle del Huasco marca además la separación natural con la variedad *acida*, que crece más al sur.



Individuo adulto de *Eulychnia acida* creciendo en ambientes áridos de la Región de Atacama.



## Un nombre con historia

El nombre del género proviene del griego *eu* (“verdadero” o “correcto”) y *lychnos* (“lámpara”), usado por Teofrasto para plantas cuyos pelos servían como mechas. Así, *Eulychnia* se traduce como “una antorcha verdadera”, una referencia a la forma erguida y ramificada de estos cactus.

El epíteto específico *acida* deriva del latín *acidus*, “agrio”, en referencia al sabor de los frutos. El término *elata* significa “altiva” u “orgullosa”. Juntos, forman un nombre que puede leerse como “antorcha orgullosa de Atacama”.



Población natural de *Eulychnia acida* en ambientes áridos de la Región de Atacama.

## El lugar de elata en el género *Eulychnia*

Un estudio molecular reciente distingue nueve especies chilenas de *Eulychnia*, agrupadas en dos linajes principales: uno norteño y otro sureño. La variedad *elata* pertenece al grupo del sur, que se caracteriza por flores y frutos con lana corta y costillas anchas y bajas. En cambio, las especies del norte presentan flores con lana más larga y costillas estrechas y marcadas.

Las especies de *Eulychnia* no coexisten en un lugar. En lugar de ello, se reemplazan unas a otras a lo largo de gradientes climáticos y geográficos, adaptándose cada una a condiciones específicas de su hábitat en el desierto.





## Cómo reconocerlas

Las especies de *Eulychnia* pueden distinguirse de otros cactus chilenos por ciertos rasgos distintivos. El tubo floral, la parte concava con los pétalos, es corto en comparación con el pericarpelo, la zona inferior de la flor que más tarde se transforma en fruto. Los tallos son siempre cilíndricos, y las especies alcanzan alturas que van desde 0,8 hasta los 6 metros, dependiendo de la especie y variedad.

Las espinas centrales alcanzan longitudes de hasta 15 centímetros, lo que da un aspecto intimidante a las ramas. Sus flores, que aparecen en primavera o verano, son cortas y anchas, de hasta 7 centímetros de largo, con tonos blanquecinos. Los frutos, de entre 5 y 10 centímetros de diámetro, son carnosos y comestibles, rasgo que explica tanto su valor cultural como su relevancia ecológica en el desierto.

## Conservación y valor cultural

Los ejemplares de *Eulychnia* son escasos en jardines botánicos o colecciones privadas fuera de Chile. Su gran tamaño y la dificultad para que florezcan en invernaderos limitan su cultivo. Esto subraya la importancia de proteger las poblaciones naturales en su ambiente original.

La variedad *elata*, con su porte imponente y frutos característicos, representa una expresión única de la vida vegetal del desierto de Atacama. Más allá de su valor científico, es también un símbolo cultural e histórico, testimonio vivo de la relación entre los pueblos del desierto y una flora capaz de prosperar en uno de los lugares más áridos del planeta.





### **Semillas de *Eulychnia acida* (copao), especie cactácea nativa de las regiones de Atacama y Coquimbo**

Las semillas de *Eulychnia acida* (copao) representan el punto de partida para la conservación y propagación de una de las cactáceas más emblemáticas de las zonas áridas del norte de Chile. A pesar de su pequeño tamaño, contienen toda la información genética necesaria para dar origen a nuevas plantas capaces de sobrevivir en ambientes caracterizados por la escasez de agua, altas temperaturas y suelos de baja fertilidad.





Del fruto a la semilla: ciclo reproductivo de *Eulychnia acida* en la Región de Atacama.

## Germinación

Las semillas de *Eulychnia acida* pueden ser sembradas inmediatamente después de ser recolectadas y procesadas en el laboratorio, sin la necesidad de utilizar un pre-tratamiento germinativo. Se recomienda ser sembradas cuando la temperatura ambiental se encuentre entre los 20-25°C. Producto del tamaño de la semillas, esta pueda ser germinada en una primera etapa en placa Petri en un medio al 10% de agar-agar o ser sembradas en un contenedor pequeño y enterrada ligeramente, producto del pequeño tamaño de estas.

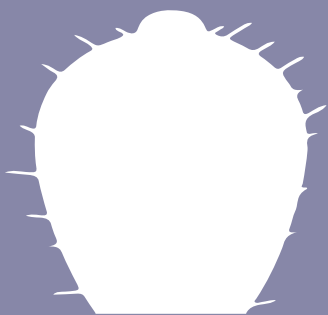
## Propagación

El crecimiento y desarrollo de la especie es lento, se sugiere mantener a los ejemplares en un ambiente seco con bastante luminosidad y a temperatura entre 20-25°C .



## 4. *Eriosyce confinis*

### Un cactus en disputa en los cerros de Copiapó



En los cerros que rodean a Copiapó, en pleno desierto de Atacama, crecen unos cactus de cuerpo globoso a alargado, cubiertos de espinas que, en la parte superior, apuntan hacia arriba. Son solitarios y escasos.

En muchas publicaciones y estudios ambientales se les identificó como *Eriosyce confinis*, pero este estudio muestra que en realidad corresponden en gran parte a otra especie: *Eriosyce kunzei*. El problema es que ambas especies son parecidas, viven cerca una de otra y se han confundido desde hace más de 150 años.

*Eriosyce confinis*

≠

*Eriosyce kunzei*







Sobreviviendo y reproduciéndose en la aridez: *Eriosyce confinis* con frutos en la Región de Atacama.



## Una historia de confusiones

La historia comienza en 1846, cuando el botánico alemán Carl Förster describió la especie *Pyrhocactus kunzei* en su “Manual de Cactología”. Basado en ejemplares enviados desde Copiapó, Förster la destacó como una planta cubierta de espinas largas que se curvan hacia arriba, rasgo que aún hoy permite reconocerla fácilmente.

Sin embargo, Förster no incluyó ilustraciones ni una localidad precisa. Con el tiempo, el nombre cayó en el olvido y las plantas de Copiapó fueron llamadas con otros nombres. Fue recién en los años 50 cuando el viajero y recolector Friedrich Ritter volvió a describirla con más detalle. Ritter, figura clave en el estudio de los cactus sudamericanos, dedicó décadas a explorar Chile y otros países, registrando minuciosamente cada hallazgo. Sus observaciones todavía sirven de referencia.

En 1961 Ritter describió otra especie hallada en Monte Amargo, al oeste de Copiapó: *Eriocyce confinis*. El nombre significa “vecina” o “adyacente”, en alusión a su parecido con *Eriocyce calderana*, otra especie de la zona costera de Caldera, y con *Eriocyce kunzei*.



## Tres especies parecidas

Según Ritter, *E. confinis* es un cactus más pequeño, de unos 8 cm de diámetro, abajo con espinas finas y con las superiores robustas y largas, poco curvadas. Se diferencia de *E. kunzei*, que es más grande, con más costillas, espinas robustas que cubren el ápice y flores de colores más intensos.

Por su parte, *E. calderana* crece más al norte, cerca de Caldera, de costillas más anchas y obtusas, areolas más separadas y hundidas, menos espinas radiales y flor sin banda roja.

En resumen, en los alrededores de Copiapó conviven tres especies emparentadas pero distintas:

1

***Eriosyce kunzei*:**  
robusta y  
frecuente en  
cerros interiores y  
más secos.

2

***Eriosyce confinis*:**  
menos robusta y  
escasa, en sectores  
planos o laderas  
bajas hacia el oeste  
de Copiapó.

3

***Eriosyce calderana*:**  
Muy escasa, de  
distribución muy  
restringida en la  
franja costera  
cercana a Caldera.



## Ciencia en debate

La taxonomía, es decir, la clasificación de estas plantas, no ha estado libre de polémicas.

### ● En los años 1990

El botánico estadounidense Fred Kattermann agrupó varias especies de cactus chilenos bajo el género *Eriosyce* y redujo el número de especies reconocidas, considerando a *E. confinis* un sinónimo de *E. kunzei*.

### ● Más recientemente, en 2019

Un estudio molecular liderado por el Dr. Pablo Guerrero analizó el ADN de 63 especies de *Eriosyce*. En su árbol filogenético, *E. kunzei* apareció como una especie, estrechamente emparentada con *E. confinis*. Sin embargo, al no incluir ejemplares de Monte Amargo, su localidad original, el análisis terminó fusionando ambas bajo un mismo nombre. Esta falta de material clave ha mantenido la duda sobre la verdadera identidad de *E. confinis*.

- El catálogo de cactus de Chile publicado en 2022 tampoco la reconoce como especie válida, reforzando la tendencia a considerarla un sinónimo. Aun así, la evidencia histórica y de campo muestra que *E. confinis* presenta diferencias claras en tamaño, espinación y hábitat.

## Una especie amenazada

Más allá de las discusiones taxonómicas, *Eriosyce confinis* enfrenta un problema mayor: su fragilidad frente a las amenazas humanas y ambientales.



Solo se conocen ocho registros confirmados de esta especie, distribuidos en un área de unos 1.400 km<sup>2</sup> entre Hacienda Toledo y la costa, con poblaciones muy pequeñas.

Cronistas ya en los siglos XVII y XVIII mencionaban la extracción de estos cactus para jardines en Europa, lo que diezmó sus poblaciones. En tiempos más recientes, el daño causado por burros asilvestrados ha sido devastador, arrancan los ápices tiernos de las plantas o las desentierran con sus pezuñas, dejando tras de sí restos secos en lo que antes fueron poblaciones abundantes.

La pérdida de hábitat, la recolección ilegal y la desertificación son hoy amenazas constantes.



## El valor de lo escaso

El caso de *Eriosyce confinis* es un ejemplo de cómo la ciencia se construye en diálogo entre observaciones históricas, estudios de campo y nuevas tecnologías, como el análisis de ADN. También recuerda la importancia de conservar las especies raras y endémicas del desierto de Atacama, un ecosistema único en el mundo.



Aunque pequeña y poco conocida, *E. confinis* encarna el desafío de proteger la biodiversidad frente a la presión humana. Reconocerla como especie válida y distinta no es solo un asunto de nombres: es un paso necesario para valorar y resguardar un patrimonio natural que, como sus espinas, se defiende en silencio desde hace siglos en los cerros de Copiapó.



## Flor

Las flores son de tonos blanco-rosados con una franja rojiza central.





**Semillas de *Eriosyce confinis*, cactácea nativa de los ambientes áridos costeros del norte de Chile. Su recolección y propagación constituyen una herramienta clave para la conservación de la especie**

Las semillas de *Eriosyce confinis* constituyen una herramienta fundamental para la conservación de esta cactácea nativa de los ecosistemas áridos costeros del norte de Chile. Adaptada a condiciones extremas de sequía y alta radiación solar, la especie depende de la producción y dispersión de semillas para asegurar su regeneración natural. Estas semillas son de color negro oscuro, forma ovoide a ligeramente irregular y presentan una superficie rugosa y reticulada, características que favorecen su identificación y adaptación a las condiciones del desierto.



## 5. *Atriplex clivicola*

### El arbusto de las laderas del desierto de Atacama



El nombre *Atriplex* nos conecta con la historia antigua. En la Grecia clásica ya se usaba un término para referirse a plantas de hojas verdes con motas como harina que crecían en suelos salinos.

Dioscórides y Teofrasto las mencionaron en sus escritos, y más tarde el naturalista romano Plinio el Viejo usó la forma latinizada *Atriplex* para designar hierbas comestibles como el armuelle (*Atriplex hortensis*). El epíteto específico *clivicola* proviene del latín *clivus* (ladera) y *cola* (habitante), lo que se traduce como “habitante de las laderas”.



*Individuo adultos de Atriplex clivicola  
creciendo en una ladera de la Región  
de Atacama.*



# Una especie descrita en el siglo XX



Aunque abundante en Atacama, *Atriplex clivicola* fue descrita recién en 1929 por el botánico estadounidense Ivan M. Johnston, de la Universidad de Harvard, durante sus expediciones al norte de Chile, entre Taltal y la Quebrada Botija. Su descripción apareció en la revista Contribuciones del Gray Herbarium bajo el título “Artículos sobre la flora del norte de Chile”.

Antes de ese hito, la especie había sido confundida con otras.

Rodulfo Philippi, en su Viaje al desierto de Atacama (1860), la llamó *Atriplex retusa* Remy, siguiendo la identificación de Jules Remy en la obra de Claude Gay, Historia física de Chile (1849), quien incluso la había asociado a *Atriplex halimus*, una planta del norte de África muy similar en apariencia.

Johnston también distinguió una variedad con bractéolas crestadas (*A. clivicola* var. *lopholepis*), pero la variabilidad dentro de las poblaciones, e incluso en la misma planta, llevó a descartar esta categoría.

**Actualmente se reconoce como una sola especie, distribuida desde Antofagasta (23° 38' S) hasta la Quebrada Los Choros (29° 10' S).**

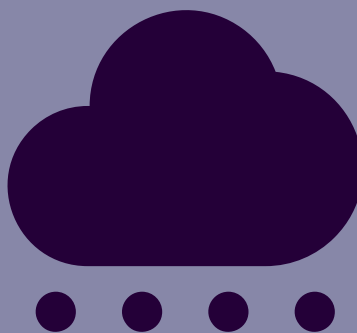




## Los “cachiyuyos” de Atacama

En la Región de Atacama, varias especies de *Atriplex* son conocidas popularmente como “cachiyuyos”. Entre ellas *Atriplex clivicola*, *A. mucronata* y *A. retusa* (antes *A. deserticola*). Las dos primeras predominan en cerros y planicies costeras hasta unos 600 metros de altitud, siendo *A. clivicola* la más abundante en extensas planicies como las de Travesía, entre Copiapó y Vallenar.

El desierto de Atacama, pese a su aridez extrema, presenta influencias mediterráneas, como lluvias invernales que favorecen la formación de densos matorrales. En estas condiciones, *Atriplex clivicola* se convierte en un componente clave de los ecosistemas áridos, aportando cobertura vegetal y estabilidad al suelo.



La resistencia del desierto: *Atriplex clivicola* adaptada a las condiciones extremas de la Región de Atacama.



## Cómo reconocerla

*Atriplex clivicola* es un arbusto diclino, monoico (con flores masculinas y femeninas en la misma planta) que:

- Alcanza entre 60 y 120 cm de altura.
- Sus tallos y ramas son leñosos y muy ramificados.
- Las hojas, de 1 a 4 cm de largo, son anchas, ovadas hasta romboides, redondeadas en la punta y la base bruscamente contraída en un corto pecíolo, gruesas, de color verde claro cuando jóvenes y grises al madurar, cubiertas por una capa de pelos aplastados.
- Su textura y pelos protectores refleja la adaptación a la extrema aridez.
- Los frutos son su rasgo más distintivo: presentan las bractéolas más grandes de todas las especies nativas de *Atriplex* en Chile, de 8 a 14 mm de largo. Son gruesas, grisáceas y están densamente cubiertas de pelos que persisten hasta la dispersión.
- La semilla, de apenas 2 mm de diámetro, es de color café oscuro y con forma lenticular.



*Hojas, frutos y semillas de Atriplex clivicola, mostrando estructuras clave para su adaptación y reproducción en la Región de Atacama.*





### **Semillas de *Atriplex clivicola*, especie arbustiva nativa de los ecosistemas del norte de Chile.**

Las semillas de *Atriplex clivicola*, desempeñan un papel fundamental en la regeneración y permanencia de las poblaciones naturales. Adaptada a condiciones de alta salinidad, escasez hídrica y fuerte influencia marina, esta especie ha desarrollado estructuras reproductivas que favorecen la protección y dispersión de sus semillas en ambientes altamente restrictivos. Las semillas se encuentran protegidas por brácteas de color blanquecino a crema, de forma irregular y textura esponjosa, las cuales facilitan su dispersión y contribuyen a resguardar el embrión frente a las condiciones extremas del entorno.



## Importancia ecológica y potencial de uso

La abundancia, rápido crecimiento y follaje generoso de *Atriplex clivicola* la convierten en una especie de relevancia ecológica y potencialmente productiva. Sus poblaciones forman extensos manchones en terrenos homogéneos, donde contribuyen a frenar la erosión, retener humedad y ofrecer refugio a fauna asociada.

Los cachiuyuyos en general, y *A. clivicola* en particular, han sido considerados en estudios de revegetación y restauración de suelos, ya que prosperan en áreas degradadas y su follaje puede servir de forraje en condiciones de escasez hídrica.

## Una especie característica de Atacama

*Atriplex clivicola* es mucho más que un arbusto del desierto.

**Representa un ejemplo notable de adaptación a la aridez y un componente emblemático de la vegetación de Atacama.**

Sus hojas plateadas y sus densas formaciones verdes contrastan con el paisaje pedregoso y seco, recordándonos que incluso en uno de los lugares más áridos del planeta, la vida ha encontrado maneras ingeniosas de prosperar.





## Germinación

El análisis de lotes de semillas recolectadas indica una viabilidad del orden de 20%, por ello es importante evaluar y seleccionar semillas viables.

Un método recomendable es la extracción de las brácteas que recubren el fruto para dejar sólo las semillas desnudas disponibles.

Semillas instaladas a germinar a una temperatura de 15°C, logran un 50% de germinación.



*El inicio de una nueva generación: germinación y desarrollo temprano de Atriplex clivicola en condiciones controladas de laboratorio.*



## 6. *Krameria cistoidea*

### Especie emblemática de zonas áridas y semiáridas de Chile



*Krameria cistoidea* Hook. & Arn., conocida comúnmente como pacul, es una especie nativa de Chile perteneciente a la familia Krameriaceae, grupo botánico representado por arbustos adaptados a condiciones de alta aridez y marcada estacionalidad hídrica.

Se trata de una especie de notable valor ecológico y patrimonial, reconocida por sus vistosas flores de color púrpura intenso, su asociación con polinizadores especializados y su presencia característica en ecosistemas xerofíticos del norte y centro del país.

#### Forma, estructura y belleza natural

*Krameria cistoidea* corresponde a un subarbusto leñoso perenne, generalmente de porte bajo a medio, con alturas que fluctúan entre 30 y 100 cm, dependiendo de las condiciones ambientales del sitio. Presenta una arquitectura ramificada desde la base, formando ramas densas o arbustos abiertos de aspecto compacto.

Los tallos son rígidos, de color grisáceo a pardo, mientras que las hojas son pequeñas, simples, alternas, de forma ovalada a elíptica, cubiertas frecuentemente por pubescencia fina que ayuda a reducir la pérdida de agua por transpiración.

Su sistema radical es profundo y extendido, permitiéndole explorar horizontes subsuperficiales en busca de humedad residual, condición fundamental para persistir en ecosistemas desérticos y semiáridos.



## La flor del pacul: una joya floral de los paisajes áridos de Chile

Uno de los principales atributos ornamentales y ecológicos de la especie son sus flores altamente llamativas. Estas son zigomorfas, solitarias o dispuestas en pequeños grupos, con una coloración que varía entre rosado intenso, púrpura violáceo y magenta.

El perianto presenta sépalos petaloides conspicuos, mientras que los verdaderos pétalos son modificados y especializados. Las flores poseen estructuras productoras de aceites florales (elaióforos), recurso utilizado por abejas nativas especializadas, particularmente del género *Centris*, las cuales recolectan aceites en vez de néctar.

Este mecanismo de polinización convierte a *Krameria cistoidea* en una especie ecológicamente relevante dentro de las redes planta-polinizador de ambientes áridos chilenos.

La floración ocurre preferentemente entre primavera y comienzos de verano, pudiendo intensificarse en años lluviosos.



*Individuo adulto de Krameria cistoidea en proceso de floración en condiciones naturales de la Región de Atacama.*





*Fruto de Krameria cistoidea mostrando estructuras asociadas a la dispersión de semillas.*

## Frutos y semillas del pacul: origen de una nueva vida en el desierto.

Los frutos de *Krameria cistoidea* han sido reconocidos históricamente por comunidades locales debido a su forma espinosa y su capacidad de adherirse fácilmente al pelaje de animales o a la vestimenta, lo que facilitó su dispersión natural y llamó la atención en zonas rurales.

El fruto corresponde a una núcula globosa o subglobosa, endurecida, cubierta de espinas o protuberancias rígidas que facilitan su dispersión zoocora al adherirse al pelaje de animales.

Las semillas son pequeñas, duras y protegidas por una testa resistente. Presentan latencia física o fisiológica moderada, característica común en especies de ambientes impredecibles, donde la germinación se sincroniza con eventos de precipitación favorables.

La producción de semillas puede variar considerablemente entre años, dependiendo principalmente de la disponibilidad hídrica y del éxito reproductivo de la temporada.



## El territorio del pacul: viaje por los paisajes áridos de Chile

*Krameria cistoidea* es una especie endémica o casi endémica de Chile, distribuida principalmente entre las regiones de Atacama, Coquimbo y Valparaíso, extendiéndose localmente hacia sectores interiores de la zona central.

Su presencia es frecuente en ambientes costeros interiores, valles transversales, piedemontes y laderas secas con exposición norte, donde las precipitaciones son escasas y altamente variables.

En la Región de Coquimbo puede encontrarse asociada a matorrales xerofíticos y comunidades del secano interior, mientras que en Atacama forma parte de la flora característica de quebradas y sectores con influencia de camanchaca o lluvias episódicas.



*Individuo adulto de Krameria cistoidea en floración creciendo en una ladera de la Región de Atacama.*





*Frutos y germinación de Krameria cistoidea, evidenciando el rápido desarrollo de una raíz primaria extensa como adaptación a ambientes áridos*



## Sembrar futuro: propagación del pacul para la restauración de zonas áridas

La propagación por semillas constituye una de las estrategias más recomendadas para la conservación y recuperación del pacul, ya que permite resguardar la diversidad genética natural de sus poblaciones y producir nuevos individuos destinados a programas de restauración ecológica, revegetación y conservación *ex situ*.

Sin embargo, al igual que muchas especies adaptadas a ecosistemas áridos, sus semillas suelen presentar dormancia natural, mecanismo evolutivo que retrasa la germinación hasta que existan condiciones ambientales favorables. Esta característica asegura la supervivencia de la especie frente a lluvias impredecibles, aunque también puede dificultar su producción en vivero.

Para mejorar los porcentajes de germinación se recomienda aplicar tratamientos pregerminativos como escarificación mecánica suave, destinada a debilitar la cubierta seminal, junto con remojo en agua tibia entre 12 y 24 horas. Posteriormente, la siembra debe realizarse idealmente en primavera, utilizando bandejas o contenedores con sustratos arenosos y bien drenados, que imiten las condiciones naturales donde la especie se desarrolla.

Durante la etapa inicial se aconseja mantener riegos moderados y controlados, evitando la saturación del sustrato, ya que el exceso de humedad puede provocar pudrición o pérdida de viabilidad. Aun bajo manejo adecuado, la germinación puede ser lenta, escalonada e irregular, por lo que se requiere seguimiento constante y manejo paciente en vivero.



*Plántulas de Krameria cistoidea con sus primeras hojas verdaderas y una extensa raíz primaria en desarrollo.*



## Un tesoro del paisaje chileno: valor ecológico y cultural del pacul

Más allá de su singular belleza botánica, el pacul representa una valiosa expresión del patrimonio natural de los paisajes semiáridos de Chile. Su presencia en quebradas, laderas secas y matorrales xerofíticos refleja ecosistemas altamente especializados, adaptados por siglos a la escasez hídrica, la intensa radiación solar y los suelos pobres. Además, cumple un importante rol ecológico al aportar recursos florales para polinizadores nativos y contribuir a la diversidad biológica de estos ambientes extremos.



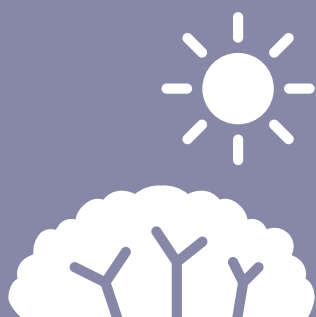
*Del vivero de INFOR al desierto: individuos juveniles de Krameria cistoidea propagados y establecidos en el área de revegetación de TEN.*

Desde una mirada cultural y estratégica, el pacul forma parte de la identidad vegetal del norte chico chileno y de la memoria ecológica de sus territorios. En un escenario marcado por el cambio climático, la desertificación y la pérdida de biodiversidad, su protección y propagación representan una oportunidad concreta para fortalecer programas de restauración ecológica, educación ambiental y valorización del paisaje nativo, posicionándola como una especie clave para el futuro de las zonas áridas de Chile.



## 7. *Aphyllocladus denticulatus*

### El arbusto invisible de los desiertos de Chile



Entre los paisajes secos, pedregosos y aparentemente silenciosos del norte de Chile habita una especie vegetal poco conocida, pero extraordinariamente adaptada a la vida en condiciones extremas: *Aphyllocladus denticulatus*. Este arbusto nativo, de apariencia singular y hojas casi ausentes, forma parte de la flora especializada que ha evolucionado en uno de los ambientes más áridos del planeta.

Su presencia en quebradas interiores, laderas secas y sectores desérticos refleja la enorme capacidad de la naturaleza para persistir frente a la escasez de agua, la alta radiación solar y los suelos pobres. Aunque discreta en apariencia, esta especie cumple funciones ecológicas relevantes y representa un valioso componente del patrimonio natural chileno.



Del vivero de INFOR al desierto: individuo juvenil de *Aphyllocladus denticulatus* propagado y establecido en el área de revegetación de TEN.



## Una forma distinta de ser planta: estructura y adaptación

*Aphyllocladus denticulatus* es un arbusto perenne y muy ramificado, que puede alcanzar entre 30 centímetros y más de un metro de altura, dependiendo del sitio donde crece. Su rasgo más llamativo es la casi total ausencia de hojas desarrolladas, condición que le permite reducir la pérdida de agua por transpiración.

En reemplazo de las hojas, la planta presenta ramillas verdes y aplanadas, conocidas como cladodios o ramas fotosintéticas, responsables de captar la luz solar y realizar la fotosíntesis. Esta adaptación constituye una estrategia altamente eficiente para sobrevivir en climas secos, entregándole además una apariencia única dentro de la flora chilena.







*Estructuras reproductivas de Aphyllocladus denticulatus*

## Flores pequeñas, vida importante: la reproducción de la especie

Aunque discretas y poco vistosas en comparación con otras plantas del desierto florido, las flores de *Aphyllocladus denticulatus* cumplen una función esencial en su ciclo de vida. Son generalmente pequeñas, agrupadas en capítulos o inflorescencias típicas de la familia Asteraceae, y presentan tonalidades claras o amarillentas.

La floración suele ocurrir luego de temporadas favorables de humedad, especialmente tras lluvias ocasionales. En esos momentos, la planta invierte recursos en reproducirse y atraer insectos polinizadores que visitan sus pequeñas flores.



## Frutos y semillas: estrategias para sobrevivir

Después de la floración, la especie produce frutos secos pequeños que contienen semillas adaptadas a la dispersión por viento, gravedad o escorrentía superficial. Las semillas pueden permanecer viables en el suelo hasta que se presenten condiciones favorables para germinar.

Este mecanismo permite a la especie esperar años lluviosos y aprovechar breves ventanas ecológicas para regenerarse. La producción de semillas resulta clave para la permanencia natural de sus poblaciones y para futuros programas de conservación.



*Semilla de Aphyllocladus denticulatus procesada en laboratorio para su evaluación y propagación.*

## El territorio de la especie: distribución en Chile

*Aphyllocladus denticulatus* es una especie endémica de Chile, distribuida principalmente en las regiones del norte grande y norte chico, con registros en Tarapacá, Antofagasta, Atacama y sectores interiores áridos.

Su presencia se concentra en quebradas interiores, piedemontes, serranías secas y laderas rocosas, donde comparte hábitat con cactáceas, arbustos xerófitos y flora efímera asociada a lluvias excepcionales.

## Donde pocos sobreviven: hábitat y ecología

*Aphyllocladus denticulatus* habita algunos de los ambientes más extremos del norte de Chile, desarrollándose en laderas pedregosas, quebradas interiores áridas, planicies secas y suelos arenosos o gravosos de excelente drenaje. Estas zonas se caracterizan por precipitaciones muy escasas, alta radiación solar, fuertes oscilaciones térmicas entre el día y la noche y limitada disponibilidad de nutrientes, condiciones que restringen el establecimiento de gran parte de la vegetación.

Frente a este escenario, la especie ha desarrollado adaptaciones que le permiten persistir y completar su ciclo de vida bajo estrés hídrico prolongado. Su presencia contribuye a estabilizar suelos, generar refugio para pequeños organismos y formar parte de comunidades vegetales altamente especializadas. Debido a ello, posee gran valor ecológico y representa una especie estratégica para estudios de resiliencia y restauración en ecosistemas áridos.



## Sembrar futuro: propagación y restauración

La propagación de *Aphyllocladus denticulatus* representa una herramienta fundamental para fortalecer estrategias de conservación y recuperación ecológica en zonas degradadas. El método más directo corresponde al uso de semillas recolectadas de manera responsable desde poblaciones naturales, las que pueden ser sembradas en sustratos minerales de buen drenaje, bajo condiciones controladas de humedad y temperatura semejantes a su ambiente de origen.



El desarrollo de plantas en vivero permitiría disponer de ejemplares destinados a revegetación de taludes, restauración de faenas intervenidas y recuperación de suelos erosionados en el norte de Chile. Debido a su alta tolerancia a la sequía y adaptación a condiciones extremas, esta especie posee un importante potencial para proyectos de restauración ecológica frente a los desafíos actuales del cambio climático.

*Desarrollo temprano de Aphyllocladus denticulatus, desde la emergencia de la raíz primaria hasta la formación de plántulas en condiciones controladas de vivero.*





## X. Restauración a escala del paisaje

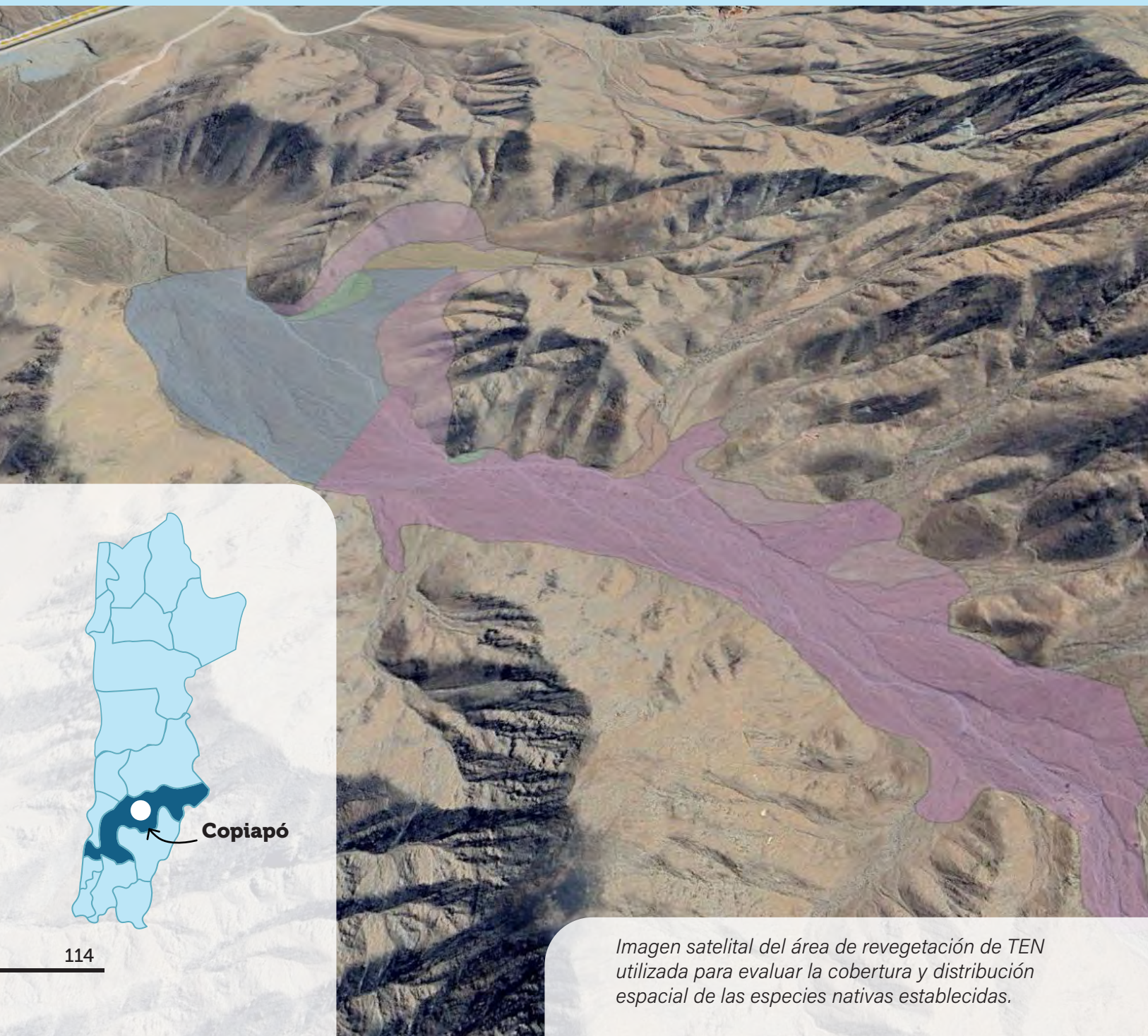




## Área de revegetación

El área de revegetación se localiza en la Región de Atacama, en las cercanías de la ciudad de Copiapó, aproximadamente a 7 km al norte del límite urbano. Su ubicación se enmarca en un contexto ambiental representativo de las condiciones ecológicas del área intervenida, lo que favorece la implementación de las medidas de restauración vegetal.

El sector destinado a la revegetación abarca una superficie aproximada de 59,44 ha, proporcionando el espacio suficiente para el establecimiento de las especies comprometidas y el desarrollo de las actividades asociadas al programa de revegetación y enriquecimiento ecológico.



*Imagen satelital del área de revegetación de TEN utilizada para evaluar la cobertura y distribución espacial de las especies nativas establecidas.*



## Implementación de la revegetación en terreno

El Programa de Revegetación de Transmisora Eléctrica del Norte (TEN) representa una experiencia inédita de restauración ecológica desarrollada en el desierto de Atacama, uno de los ecosistemas más áridos y frágiles del mundo.

Durante diez años, el programa ha impulsado investigación aplicada orientada a la propagación, rescate, relocalización y establecimiento de especies nativas xerofíticas, permitiendo generar conocimiento pionero sobre la conservación y restauración de flora en ambientes extremos. Esta experiencia ha contribuido significativamente al entendimiento ecológico y manejo de especies altamente sensibles del desierto costero del norte de Chile.



*Actividad de plantación de especies endémicas propagadas en vivero para su establecimiento en el área de revegetación de TEN, contribuyendo a la recuperación de la biodiversidad y cobertura vegetal nativa del desierto de Atacama*

La vegetación presente en el área se inserta dentro de la ecorregión de la estepa desértica, caracterizada por constituir una zona de transición entre el clima hiperárido del norte y condiciones relativamente más húmedas hacia el sur.

En sectores de interfluvios y quebradas se observa una cobertura vegetal discontinua, compuesta principalmente por especies leñosas espinosas y plantas perennes adaptadas a condiciones de alta aridez. Asimismo, en sectores con influencia costera, la presencia de neblinas litorales y precipitaciones invernales permite el desarrollo de una cobertura vegetal más densa, aunque su permanencia presenta una alta variabilidad interanual (Luebert y Pliscoff, 2006).



Desde el punto de vista fitogeográfico, el área corresponde a la formación de Matorral Desértico, específicamente al piso de vegetación denominado Matorral desértico mediterráneo interior de *Skytanthus acutus* y *Atriplex deserticola*.



Esta unidad se distribuye en el llano interior de la Región de Atacama y el sur de Antofagasta, entre los 200 y 1.500 msnm, bajo condiciones bioclimáticas termomediterráneas y mesomediterráneas inferiores, en ambientes ultrahiperáridos e hiperáridos con influencia oceánica. La estructura de esta formación se caracteriza por un matorral abierto dominado por especies leñosas de bajo porte, frecuentemente asociadas a elementos suculentos.



La restauración desde el aire: vista panorámica del área de revegetación de TEN y su integración al paisaje del desierto de Atacama.



## Proceso de revegetación en ambientes áridos

La revegetación en ambientes áridos constituye un proceso complejo que requiere integrar conocimiento ecológico, experimentación y manejo adaptativo.

En estos ecosistemas, caracterizados por precipitaciones escasas, irregulares y, en muchos casos, insuficientes para sostener el crecimiento vegetal, la disponibilidad de agua es el principal factor limitante. Esta condición impone fuertes restricciones al establecimiento de las plantas, obligando a diseñar estrategias que consideren tanto las características del medio físico como las adaptaciones fisiológicas de las especies nativas.



*Individuos de Encelia canescens propagados en vivero y establecidos en el área de revegetación de TEN.*

Las plantas que habitan estos ambientes han desarrollado mecanismos ecofisiológicos especializados, tales como la reducción de la superficie foliar, la presencia de tejidos succulentos para almacenar agua y sistemas radicales profundos o extensos.

En el caso de muchas cactáceas, destaca el metabolismo ácido de las crasuláceas (CAM), que permite fijar carbono durante la noche, reduciendo la pérdida de agua por transpiración. Sin embargo, a pesar de estas adaptaciones, las etapas iniciales de establecimiento siguen siendo altamente críticas, ya que los individuos aún no desarrollan plenamente estas capacidades.



En conjunto, la revegetación en ambientes áridos requiere comprender que, si bien las especies nativas están adaptadas a condiciones extremas, su establecimiento inicial es altamente vulnerable. Por ello, la combinación de riego, protección y monitoreo ambiental resulta fundamental para facilitar su adaptación, contribuyendo a la recuperación de la cobertura vegetal y de los procesos ecológicos del ecosistema.



## Habilitación y preparación del terreno

En el marco de la implementación del área de revegetación, se consideró como una etapa fundamental la instalación de infraestructura de protección perimetral, orientada a resguardar los individuos vegetales establecidos frente a perturbaciones externas, particularmente el ingreso de fauna de mayor tamaño y el tránsito no controlado. Esta medida resulta clave en contextos de restauración ecológica en ambientes áridos, donde la supervivencia de las especies depende en gran medida de la reducción de factores de estrés y daño mecánico durante las fases iniciales de establecimiento.



*Protegiendo el esfuerzo: área de revegetación cercada para favorecer la recuperación de la vegetación nativa.*



Para este propósito, se diseñó e implementó un cerco perimetral utilizando malla tipo ovejera Ursus de 7 hebras, recubierta completamente con malla raschel de color oscuro.



Esta solución no solo permite generar una barrera física efectiva, sino que además mejora la visibilidad de la estructura, reduciendo riesgos de colisión tanto para personas como para fauna nativa presente en el sector. La elección de materiales responde a criterios de durabilidad, adaptabilidad a condiciones ambientales extremas y funcionalidad en escenarios de restauración en zonas desérticas.

La estructura del cerco se compone de postes de madera impregnada, con diámetros entre 3" y 4" y una longitud mínima de 2,4 m, dispuestos a intervalos regulares de entre 2,8 y 3,2 m. Estos elementos fueron instalados a una profundidad aproximada de 0,50 m, mediante compactación del suelo, asegurando su estabilidad. Adicionalmente, se incorporaron refuerzos estructurales cada 30 m, dispuestos en ambas direcciones, con el objetivo de incrementar la resistencia del sistema frente a cargas mecánicas y condiciones ambientales adversas.



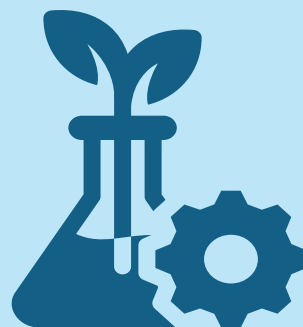
*Portón de acceso al área de revegetación de TEN, sector protegido para favorecer el establecimiento y recuperación de especies nativas del desierto de Atacama.*

Como parte del diseño funcional del sistema, se contempló la instalación de dos portones de acceso, cada uno con un ancho de 2,5 m, permitiendo el ingreso controlado de vehículos para labores de mantención, monitoreo y operación del área. Los postes asociados a estos accesos presentan un mayor diámetro (5"), una altura de 3 m y una profundidad de anclaje de al menos 1 m, lo que otorga mayor robustez estructural frente a esfuerzos operacionales. Esta infraestructura asegura la continuidad, integridad y funcionalidad del sistema de protección, contribuyendo de manera directa al éxito de las acciones de revegetación, al favorecer condiciones adecuadas para el establecimiento, crecimiento y supervivencia de las especies nativas introducidas.



## Ensayos experimentales antes de la revegetación

Como parte del proceso de implementación del área de revegetación, se incorporó una etapa de evaluación experimental orientada a analizar la respuesta de especies nativas frente a distintas condiciones de riego y protección. Este ensayo fue diseñado con el propósito de generar información técnica que permita optimizar las estrategias de establecimiento en ambientes áridos, bajo condiciones representativas del área de intervención.



Las especies consideradas en el ensayo de restauración corresponden a *Tetragonia angustifolia*, *Ephedra breana*, *Encelia canescens*, *Atriplex* sp. y *Cumulopuntia sphaerica*, seleccionadas en función de su relevancia ecológica y su uso en el programa de revegetación. Para cada especie se definieron unidades experimentales con un tamaño de muestra de cinco individuos por unidad, distribuidos en distintos tratamientos que combinan niveles de riego y condiciones de protección.



Ensayos de riego y establecimiento desarrollados para evaluar la supervivencia y crecimiento de especies nativas previo a la implementación del programa de revegetación.



El diseño experimental contempla cinco niveles de riego:

- **Condición ambiental** (sin riego),
- **Riego bajo** (5 mm),
- **Riego medio** (25 mm),
- **Riego alto** (50 mm)
- **Riego ad libitum**

Los niveles de riego se combinan con dos condiciones de protección: con malla y sin malla. Esta configuración da lugar a un total de diez tratamientos (0–9), cada uno replicado tres veces, lo que permite evaluar la variabilidad y consistencia de las respuestas observadas.

Desde una perspectiva metodológica, el ensayo responde a un diseño factorial 5x2, permitiendo analizar tanto los efectos individuales como la interacción entre los factores “riego” y “protección”. Este enfoque facilita la identificación de condiciones óptimas para el establecimiento de las especies, considerando variables clave como la supervivencia, el crecimiento y la resistencia al estrés hídrico.



*Registro continuo de variables climáticas en el área de revegetación para comprender y evaluar las condiciones que influyen en el establecimiento de las especies nativas.*

## Diseño Experimental

### Ensayo de Restauración



#### Niveles de Riego

Sin Riego (Ambiental)

Riego Bajo (5 mm)

Riego Medio (25 mm)

Riego Alto (50 mm)

Riego Ad Libitum

#### Uso de Malla Protectora

Sin Malla



Con Malla



**10 Tratamientos**

|                  | Sin Malla                                                                             |           | Con Malla                                                                             |           |
|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Riego Ambiental  |  | 5 Plantas |  | 5 Plantas |
| Riego Bajo       |  | 5 Plantas |  | 5 Plantas |
| Riego Medio      |  | 5 Plantas |  | 5 Plantas |
| Riego Alto       |  | 5 Plantas |  | 5 Plantas |
| Riego Ad Libitum |  | 5 Plantas |  | 5 Plantas |

3 Repeticiones por Tratamiento

Total: 720 Plantas



Los resultados obtenidos evidencian que, en ambientes áridos, la aplicación de riego constituye el factor más determinante para el éxito del establecimiento, siendo primordial para asegurar la supervivencia de los individuos durante las primeras etapas de crecimiento.

En comparación, el uso de malla de protección solar presenta un efecto secundario, contribuyendo a la reducción del estrés por radiación, pero con una influencia significativamente menor respecto al riego en las tasas de supervivencia y desempeño general de las plantas.

En este sentido, los tratamientos con aporte hídrico mostraron consistentemente mejores resultados que aquellos sin riego, independientemente de la presencia de protección.

En conjunto, esta etapa constituye un insumo fundamental para la toma de decisiones en el programa de revegetación, permitiendo priorizar el uso eficiente del recurso hídrico y complementar, de manera estratégica, el uso de medidas de protección que potencien el establecimiento.

Asimismo, la información generada posee un carácter transferible, contribuyendo al diseño de futuras intervenciones de restauración ecológica en ecosistemas áridos y semiáridos.

*Vista panorámica del paisaje desértico característico de la Región de Atacama.*



## Compatibilizar la infraestructura energética y la protección de la biodiversidad.

Las actividades humanas de subsistencia o las industriales relacionadas con la minería y energía causan un efecto directo sobre la naturaleza, en este caso con la vegetación. Siendo ambas actividades importantes y necesarias para el desarrollo de las sociedades organizadas, tienen que ir de la mano la protección con el cuidado del medio y de los organismos presentes. Se debe evitar o minimizar los daños sobre la naturaleza o, si estos son inevitables, buscar el modo de compensar el daño y pérdidas.

La crisis ambiental actual, de origen antropogénico, abarca el cambio climático, la destrucción del hábitat y la extinción de especies. El calentamiento global ha superado la variabilidad climática pasada, llevando la temperatura de la Tierra a niveles no vistos en los últimos 3 millones de años, incluyendo períodos interglaciares cálidos. Esta elevación de temperatura es vertiginosa en comparación con los cambios históricos, siendo 50 veces más rápida que en los últimos 5.000 años (Parmesan 2006).

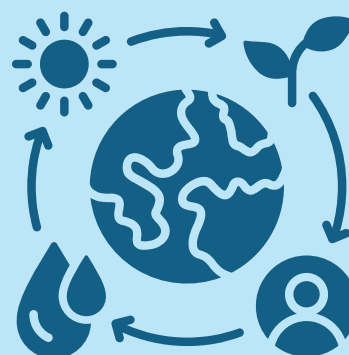
El cambio climático está causando alteraciones en la distribución de especies, la desintegración de comunidades y cambios en hábitats, lo que requiere un enfoque de restauración centrado en la adaptación y la resiliencia hacia las condiciones futuras.





A medida que nuestros sistemas naturales experimentan transformaciones, la comprensión de las raíces del cambio va más allá de la mera identificación de impulsores como el cambio climático. Esta realidad insta a evaluar cómo interactúan estos impulsores y los posibles efectos en cascada a nivel global, regional y local. Entender dónde y cómo es probable que impacten en la biodiversidad global se vuelve de importancia crucial para forjar un mundo donde tanto las personas como la naturaleza puedan prosperar (Marquet *et al* 2019, WWF 2020).

El período 2021-2030 ha sido definido como la década de la restauración de ecosistemas. De acuerdo con compromisos internacionales, para el año 2030 Chile ha comprometido la forestación de 200.000 ha, con al menos 70.000 hectáreas de especies nativas; el manejo sustentable y recuperación de 200.000 ha de bosques nativos; y la aplicación del Plan Nacional de Restauración del Paisaje, que incluye un millón de ha bajo procesos de restauración al 2030.



Estos compromisos, a nivel de adaptación al cambio climático y conservación de la biodiversidad, representan un enorme desafío para Chile en términos de gobernanza, implementación y monitoreo a largo plazo. Los esfuerzos dirigidos a la conservación de esta diversidad biológica, en consecuencia, constituyen una necesidad de relevancia y prioridad.

En Chile, aunque la investigación sobre los efectos del cambio climático y su acelerado efecto producto del calentamiento global en los ecosistemas y la biodiversidad es aún limitada, se dispone de evidencia que indica que los cambios ya han comenzado y se han incrementado, respaldados por modelos predictivos de las transformaciones esperadas a lo largo de este siglo.



*Inicio del programa de revegetación de TEN mediante el establecimiento de especies nativas adaptadas a las condiciones extremas del desierto de Atacama.*



Un ejemplo palpable se observa en el desierto costero del extremo norte del país, donde se han registrado períodos prolongados sin floración y una notable mortalidad de cactáceas. Asimismo, el bosque esclerófilo interior de Chile central evidencia los primeros signos de desertificación, producto de la impactante megasequía (Marquet *et al.*, 2019).

En la zona norte del país, el tipo forestal xerofítico corresponde a una de las vegetaciones más amenazada de Chile bajo un escenario de cambio climático global, hecho que acelera los procesos de desertificación y erosión, afectando a las poblaciones de especies singulares, endémicas y de distribución restringida. La riqueza biológica del norte de Chile, particularmente de su componente flora ha sido y es de especial interés para botánicos y conservacionistas, y ha sido reconocido a nivel mundial por el alto grado de endemismo de su flora.

Un ejemplo es la flora nativa de la Región de Atacama, donde existen 980 especies de plantas vasculares nativas, de las cuales el 9,6% se encuentra en la categoría En Peligro o Vulnerable. Además, sólo un 4,2% de la superficie total de la zona norte de Chile está incluida dentro del Sistema de Áreas Silvestres Protegidas del Estado, por lo que los esfuerzos de conservación *in-situ* para este tipo de formación vegetal son mínimos. Los esfuerzos dirigidos a la conservación de esta diversidad biológica, en consecuencia, constituyen una necesidad de relevancia y prioritaria.

El cambio climático afecta significativamente a la vegetación y los ecosistemas. Puede alterar los patrones de lluvia, aumentar las temperaturas y provocar fenómenos extremos, lo que impacta en la distribución de las plantas y la fauna, así como en la salud de los ecosistemas en general. Esto puede conducir a la pérdida de biodiversidad, la desertificación, la deforestación y otros cambios ambientales negativos. Es crucial abordar el cambio climático para proteger la vegetación y los ecosistemas.





El Programa de Revegetación se implementa para contribuir a la conservación y recuperación de la flora nativa afectada por las actividades constructivas del proyecto; considera la propagación, producción y establecimiento de vegetación nativa en ecosistemas áridos del norte de Chile.

El programa se desarrolla en la comuna de Copiapó, en una área ecológica y ambientalmente equivalente a los sectores intervenidos por el proyecto eléctrico. La definición del área de revegetación consideró variables edáficas, topográficas y microclimáticas propias de los ambientes desérticos y semiáridos.



*Los primeros pasos de una década de revegetación: personal iniciando las actividades del programa de revegetación de TEN.*

Bajo un enfoque de investigación aplicada y manejo adaptativo, se ha diseñado e implementado metodologías de propagación, establecimiento y monitoreo, orientadas a mejorar la supervivencia y desempeño de las especies nativas, incorporando herramientas de seguimiento ecológico, técnicas de restauración y aprendizajes obtenidos a partir de más de una década de experiencia en revegetación en zonas áridas.

Más allá de su componente operacional, el programa ha permitido consolidar una base de conocimiento científico y técnico sobre la ecología, propagación y establecimiento de flora nativa en condiciones de extrema aridez, transformándose en una experiencia de referencia para futuros procesos de restauración ecológica y conservación de ecosistemas áridos en el norte de Chile.



El programa considera la implementación de un enriquecimiento vegetal a través de la plantación selectiva de ejemplares de especies sensibles de la región

## **13 especies nativas** de alto valor ecológico correspondientes a:

- 9 especies arbustivas
- 4 especies de cactáceas

**En particular, el programa busca establecer y enriquecer un área de aproximadamente 50 ha, con alrededor de 20.000 ejemplares de especies nativas xerofíticas:**

- *Atriplex clivicola*
- *Atriplex deserticola*
- *Ephedra breana*
- *Heliotropium chenopodiaceum*
- *Nolana albescens*
- *Encelia canescens*
- *Tetragonia angustifolia*
- *Aphyllocladus denticulatus*
- *Krameria cistoidea*.



El programa también estableció ejemplares de *Tillandsia landbeckii* obtenidos en los ensayos de propagación efectuados en el programa mismo.

**En relación con las cactáceas, el programa incluyó el establecimiento de:**

- *Copiapoa megarhiza*
- *Cumulopuntia sphaerica*
- *Eulychnia acida*
- *Pyrrhocactus confinis*

El programa se implementó de manera progresiva siguiendo las etapas: recolección de semillas, estudios de germinación, estudios de propagación (sexual y asexual) en vivero, establecimiento en terreno y monitoreo de sobrevivencia. En conjunto, estas acciones contribuyen a la restauración de la cobertura vegetal, la recuperación de la biodiversidad y la mantención de los procesos ecológicos en el área de influencia del proyecto eléctrico, en concordancia con los compromisos ambientales asumidos.



Área de revegetación implementada para el establecimiento, manejo y monitoreo de especies nativas del desierto de Atacama.



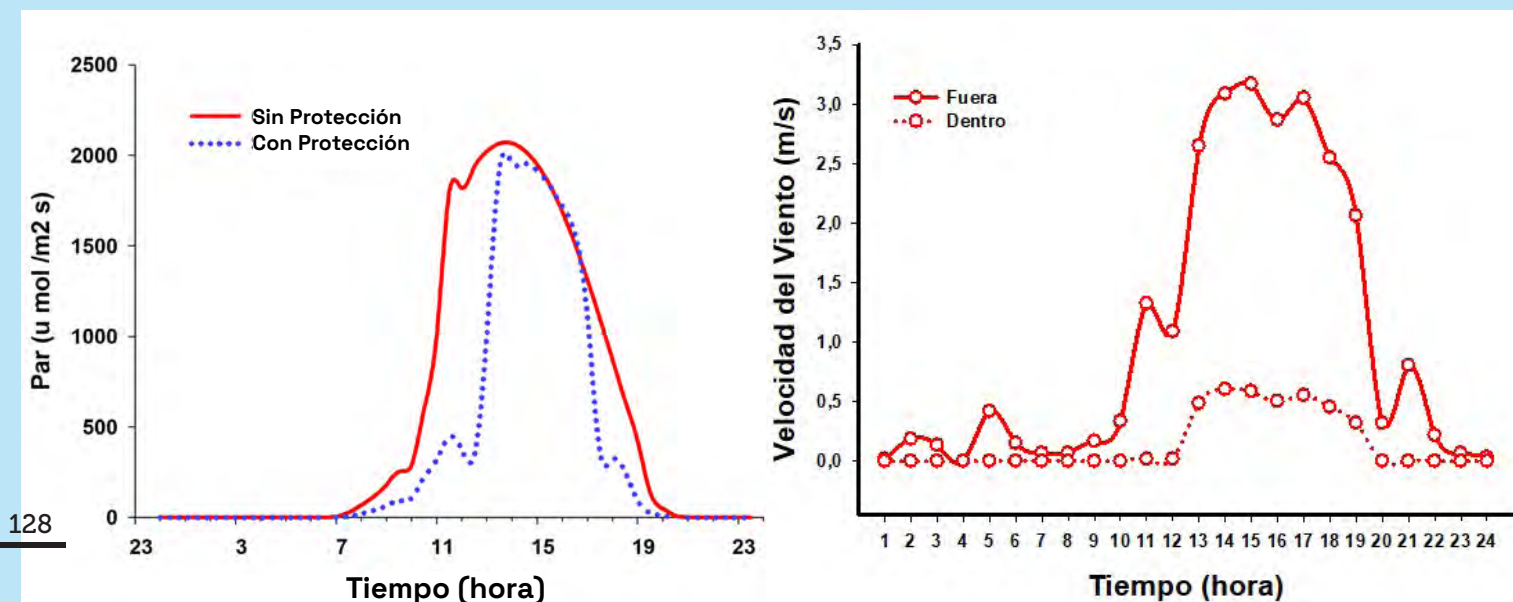
## Monitoreo de variables climáticas en terreno

En el área de revegetación se instaló un sistema de monitoreo de variables climáticas, con el objetivo de caracterizar las condiciones ambientales del sitio y evaluar su influencia en el establecimiento de las plantas en terreno. Este sistema permite registrar de manera continua parámetros como temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar (PAR), velocidad del viento y precipitación, generando una base de información representativa y confiable para el área de estudio.



El análisis de los registros evidenció diferencias entre condiciones con y sin protección mediante malla, permitiendo identificar su efecto sobre el microclima local. En términos generales, la malla actúa como un elemento modulador de las condiciones ambientales, reduciendo la velocidad del viento durante las horas de mayor intensidad, atenuando la radiación solar incidente y amortiguando las temperaturas máximas registradas durante el día.

En particular, los resultados observados en los gráficos muestran que la velocidad del viento presenta reducciones significativas bajo condiciones de protección durante el periodo diurno, mientras que la radiación PAR alcanza valores máximos menores en comparación con condiciones sin protección, evidenciando un efecto de sombreo efectivo.



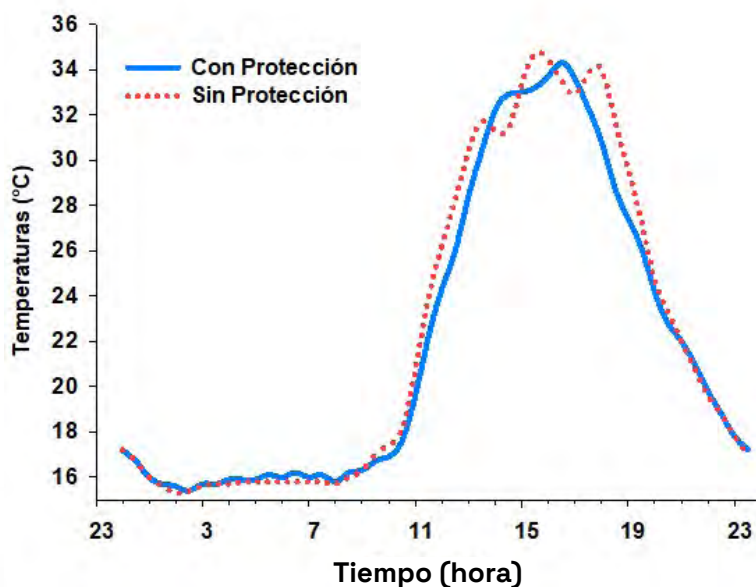
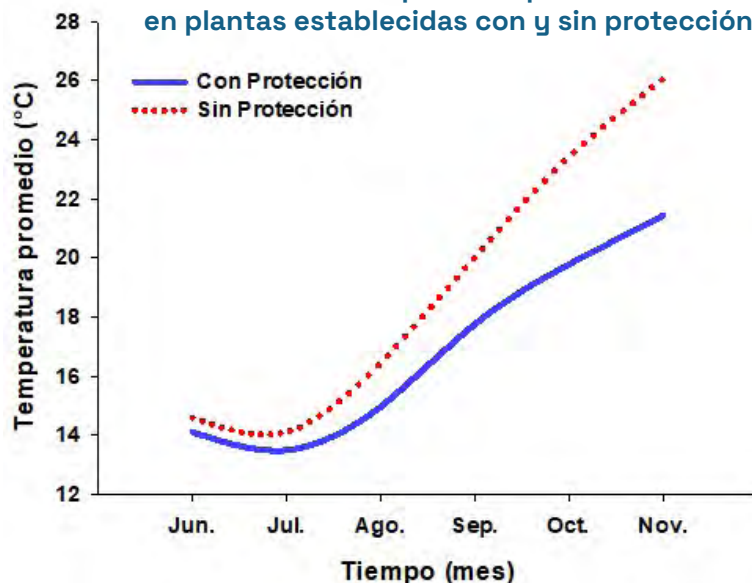




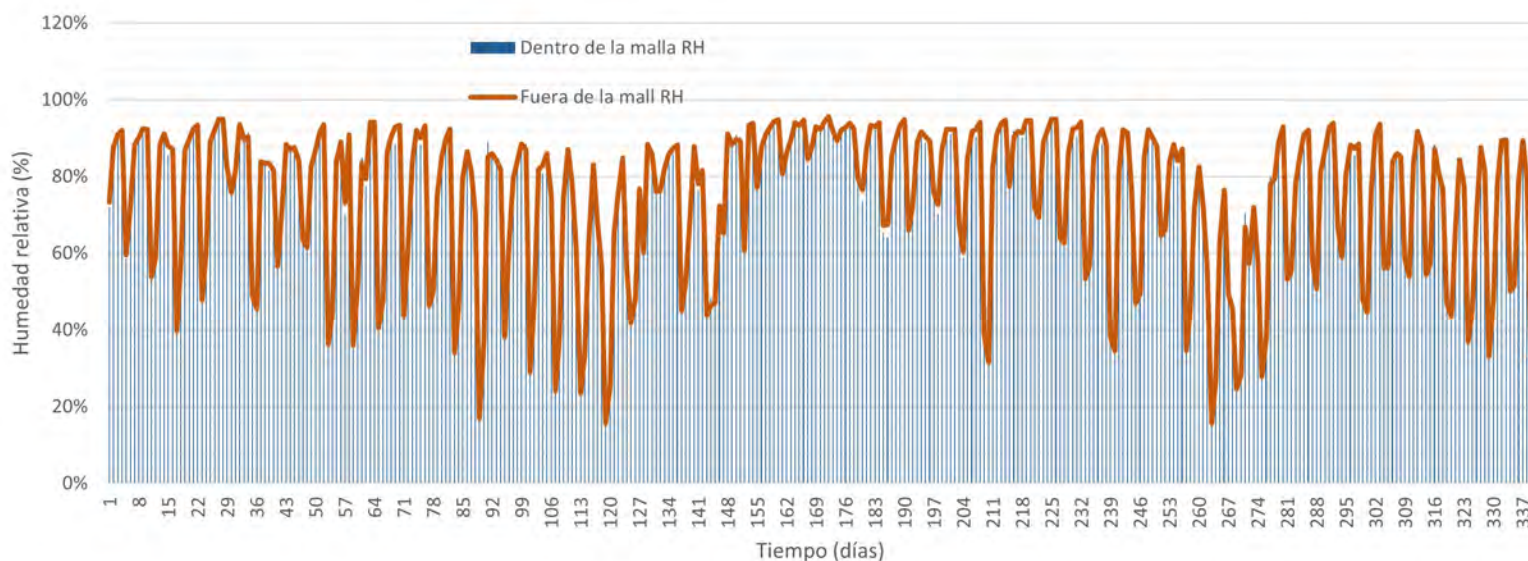


Asimismo, las temperaturas máximas diarias son sistemáticamente más bajas dentro de la malla, especialmente en las horas de mayor radiación, mientras que la humedad relativa presenta variaciones menos pronunciadas, con una leve tendencia a mayor estabilidad en condiciones protegidas. A escala mensual, estos patrones se mantienen, confirmando el efecto consistente de la malla en la regulación del microclima.

**Variación de la temperatura promedio mensual en plantas establecidas con y sin protección.**

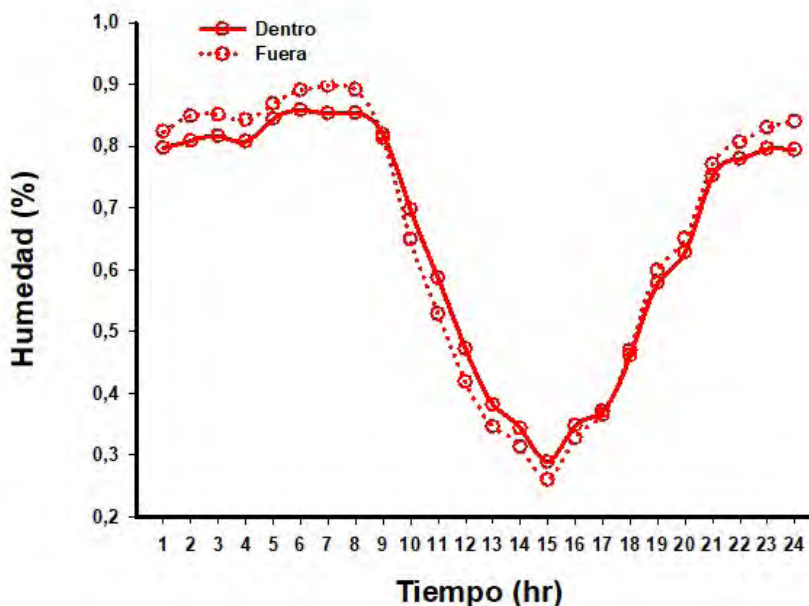


**Variación temporal de la humedad relativa en plantas establecidas dentro y fuera de la malla de protección**





### Comportamiento diario de la humedad relativa dentro y fuera de la malla de protección.



Desde una perspectiva ecofisiológica, la reducción de estos parámetros tiene efectos directos sobre el desempeño de las plantas en ambientes áridos. La disminución de la radiación incidente reduce la carga energética sobre los tejidos vegetales, evitando daños fotooxidativos y disminuyendo la fotoinhibición del aparato fotosintético (Lambers *et al.*, 2008). A su vez, la reducción de la temperatura y del viento contribuye a disminuir la demanda evaporativa del ambiente, lo que se traduce en menores tasas de transpiración y una mejor mantención del estado hídrico de las plantas (Taiz *et al.*, 2015; Nobel, 2009).

Adicionalmente, la moderación de las condiciones microclimáticas favorece una mayor eficiencia en el uso del agua, permitiendo que las plantas mantengan actividad fisiológica durante más tiempo bajo condiciones menos restrictivas (Chaves *et al.*, 2003).

En ambientes áridos, estas respuestas son clave para sostener procesos como la fotosíntesis y el crecimiento bajo condiciones de estrés hídrico recurrente (Noy-Meir, 1973).



No obstante, y en concordancia con los resultados experimentales del programa, se establece que el efecto de la malla es complementario, manteniéndose el riego como el factor más determinante para asegurar la supervivencia de los individuos durante las primeras etapas de crecimiento.

En este sentido, la información generada mediante el monitoreo climático resulta clave para ajustar las estrategias de manejo, optimizando la aplicación de riego y el uso de medidas de protección en función de las condiciones reales del entorno.

De esta forma, esta etapa fortalece el enfoque de manejo adaptativo del programa de revegetación, integrando información ambiental en la toma de decisiones y contribuyendo a mejorar la eficiencia y sostenibilidad de las acciones de restauración ecológica en ambientes áridos.



## Selección de los sectores a revegetar

La selección de los sectores se realizó en base a criterios técnicos orientados a asegurar la viabilidad del establecimiento de las especies, considerando la comparación entre el área de origen y el área de destino en términos de composición florística, densidad poblacional, distribución espacial y características edáficas.

Se constató que el área de origen presenta la totalidad de las especies objetivo del proyecto, mientras que en el área de relocalización se registró la presencia de *Atriplex clivicola*, *Encelia canescens*, *Nolana albescens*, y las suculentas *Copiapoa megarhiza* y *Eulychnia acida*.



*Diez años de esfuerzo y compromiso reflejados en el paisaje: área de revegetación de TEN al atardecer en la Región de Atacama.*

No obstante, ambas áreas presentan condiciones edáficas similares, particularmente en cuanto a textura, pendiente y pedregosidad, lo que permite inferir la compatibilidad del sustrato para el establecimiento de las especies a trasladar. Adicionalmente, se consideró criterios de resguardo del área, tales como su ubicación y condiciones de protección, que contribuyen a reducir riesgos asociados a perturbaciones antrópicas y presión de herbivoría.

Además, se evaluó la estructura y configuración del sistema vegetal mediante el análisis de la densidad y distribución espacial de las especies, utilizando parcelas de muestreo circulares de 8 m de radio (200 m<sup>2</sup>). Este análisis permitió definir un gradiente de ocupación del espacio o “capacidad de carga”, identificando sectores con menor densidad de cobertura vegetal, los cuales presentan mayor disponibilidad de espacio y menor competencia intra e interespecífica. En función de estos resultados fueron seleccionados los micrositos de plantación que cumplieran con condiciones óptimas de establecimiento, asegurando así la compatibilidad ecológica, la disponibilidad de nicho y la sustentabilidad del sistema.



## Distribución espacial de las plantas en terreno

La densidad de plantación y la distribución de las plantas se determinó a partir de patrones espaciales de las especies en el medio natural.

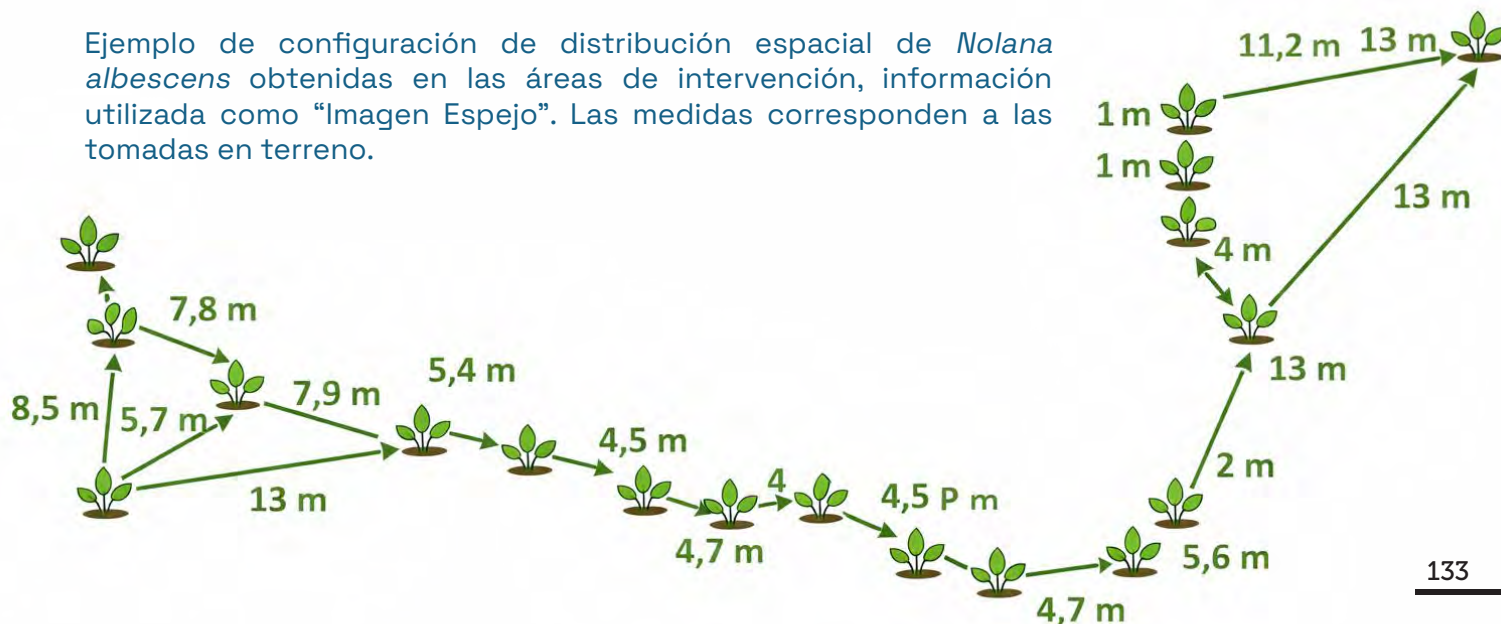
Los patrones de distribución de las plantas obtenidas en poblaciones vegetales vecinas fueron utilizadas como referencia para el diseño de la revegetación, bajo el concepto de “imagen espejo”, es decir, replicando en el área de destino las distancias y arreglos espaciales observados en el área de origen.

Este procedimiento permitió ajustar de manera más precisa la densidad de los individuos a establecer, evitando la saturación del sitio y respetando la capacidad de carga del sistema. De esta forma, se favorece la reducción de la competencia intra e interespecífica, promoviendo condiciones más adecuadas para el establecimiento, desarrollo y supervivencia de las plantas establecidas en terreno.



Distribución espacial de los individuos en el área de revegetación, diseñada a partir de los patrones observados en las poblaciones naturales de las especies nativas

Ejemplo de configuración de distribución espacial de *Nolana albescens* obtenidas en las áreas de intervención, información utilizada como “Imagen Espejo”. Las medidas corresponden a las tomadas en terreno.



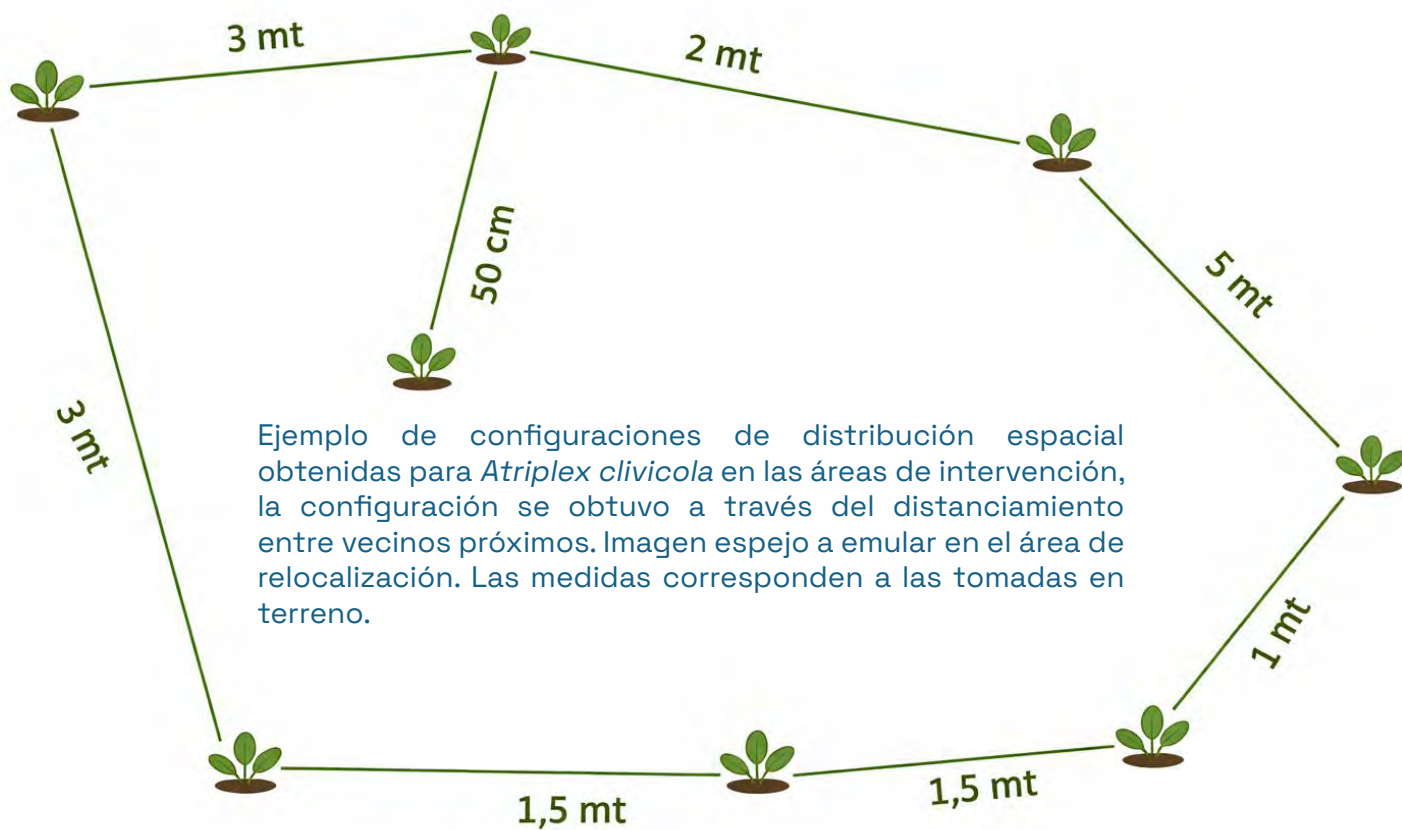


Las figuras presentan ejemplos de las configuraciones de distribución espacial obtenidas para las distintas especies objetivo, entre ellas *Nolana albescens*, *Encelia canescens*, *Atriplex clivicola*.

En todos los casos, las configuraciones fueron obtenidas a partir de mediciones en terreno del distanciamiento entre vecinos próximos, constituyendo la base para la definición de los arreglos espaciales a implementar en el área de relocalización.







Ejemplo de configuraciones de distribución espacial obtenidas para *Atriplex clivicola* en las áreas de intervención, la configuración se obtuvo a través del distanciamiento entre vecinos próximos. Imagen espejo a emular en el área de relocalización. Las medidas corresponden a las tomadas en terreno.



Individuos juveniles establecidos en el área de revegetación siguiendo los patrones de distribución natural observados en las poblaciones de la especie.



## Instalación del sistema de riego

La instalación de un sistema de riego tecnificado se definió como una etapa clave en la implementación del área de revegetación, orientada a asegurar el establecimiento de los individuos de especies nativas incorporadas en la primera fase del programa. Su diseño se basó en los resultados de los ensayos, los cuales evidenciaron que el riego constituye el factor más determinante para la supervivencia de las plantas en ambientes áridos.

El sistema considera la instalación de goteros individuales por planta, permitiendo una aplicación localizada del recurso hídrico directamente en la zona radicular. Esta configuración optimiza la eficiencia en el uso del agua, reduciendo pérdidas por evaporación y escorrentía, en un contexto de alta limitación hídrica. Cada gotero se encuentra calibrado para entregar un caudal de 4,0 litros por hora. El sistema opera durante 0,5 horas por evento de riego, proporcionando un volumen total de 2 litros de agua por individuo en cada aplicación.

La operación del sistema se definió en función de los requerimientos hídricos de las especies y de las condiciones climáticas del sitio. Durante el periodo estival, comprendido entre los meses de diciembre y marzo, el riego se aplica con una frecuencia quincenal durante la estación estival, mientras que en las estaciones de otoño, invierno y primavera la frecuencia se reduce a una aplicación mensual. En cada ocasión se aplican 2 litros de agua por individuo. Este esquema permite complementar la disponibilidad natural de agua en periodos críticos, favoreciendo el desarrollo radicular y la supervivencia en etapas iniciales.

A medida que los individuos se establecen en terreno, proceso estimado en aproximadamente dos años, se contempla una reducción progresiva tanto en la frecuencia como en el volumen de riego. Esta estrategia busca promover la aclimatación de las plantas a las condiciones locales, incentivando el desarrollo de sistemas radicales más profundos y eficientes en la captación de agua, contribuyendo así a su autonomía hídrica en el largo plazo.



*Instalación del sistema de riego en el área de revegetación, utilizando volúmenes de agua definidos a partir de los resultados obtenidos en los ensayos de establecimiento realizados previamente.*



## Transporte y traslado de plantas

El proceso de revegetación se inició con el traslado de plantas desde el vivero del Instituto Forestal (INFOR), Sede Diaguitas (La Serena), hacia el área de revegetación en Copiapó. Esta etapa es crítica, dado que el transporte puede afectar el estado fisiológico de los individuos y su desempeño posterior en terreno.



El traslado se realizó bajo condiciones controladas, orientadas a minimizar el estrés hídrico, térmico y mecánico. Se evitó la exposición directa a radiación solar y altas temperaturas, reduciendo el riesgo de deshidratación, cierre estomático y disminución de la actividad fotosintética (Taiz *et al.*, 2015). Asimismo, se implementaron medidas para evitar daños estructurales en tejidos y sistemas radicales, resguardando la capacidad de absorción hídrica (Landis *et al.*, 2010).

Las plantas fueron dispuestas de manera que se asegurara ventilación adecuada y se evitara la deformación de contenedores, optimizando además los tiempos de traslado para reducir la exposición a condiciones estresantes. Estas acciones permitieron mantener la turgencia celular y el balance hídrico, factores clave para la sobrevivencia post-plantación (Lambers *et al.*, 2008).

Una vez en destino, los individuos fueron descargados y ubicados en sectores previamente definidos, evitando su exposición prolongada a condiciones extremas. Este manejo facilitó la aclimatación inicial y redujo el shock de trasplante, contribuyendo a mejorar la supervivencia en etapas posteriores del programa (Grossnickle, 2012).



*Transporte de plantas nativas hacia el área de revegetación, protegidas mediante cubiertas para reducir la deshidratación y minimizar el estrés durante el traslado*



## Plantación

La etapa de plantación corresponde al establecimiento de los individuos en los micrositios previamente definidos; constituye una de las fases más críticas del proceso de revegetación, especialmente en ambientes áridos donde las condiciones de estrés hídrico, radiación y temperatura son elevadas. Su correcta ejecución resulta determinante para asegurar la supervivencia y adaptación inicial de las especies.



El proceso se inicia con la marcación de los puntos de plantación, realizada de forma manual mediante el uso de cinta geológica, permitiendo definir con precisión la ubicación de cada individuo en función de la densidad y distribución espacial de las especies.

Posteriormente, se ejecuta la hoyadura, consistente en la construcción manual de casillas de plantación de dimensiones estandarizadas de  $40 \times 40 \times 40$  cm, utilizando herramientas como pala plantadora.

Este procedimiento contempla la remoción controlada del sustrato y la generación de cavidades homogéneas, asegurando condiciones adecuadas para el acomodo del sistema radical de los individuos.



*Del vivero al desierto: establecimiento de individuos nativos en el área de revegetación de TEN, desde su plantación hasta su adaptación en terreno.*





*Individuo juvenil de Krameria cistoidea establecido en el área de revegetación de TEN, contribuyendo a la recuperación de la vegetación nativa del desierto de Atacama*

Durante la plantación es fundamental que las raíces queden correctamente dispuestas dentro de la casilla, evitando deformaciones, dobleces o compactación excesiva. Una adecuada instalación del sistema radical permite mantener su capacidad de absorción de agua y nutrientes, favoreciendo el desarrollo inicial de la planta. Asimismo, el buen contacto entre el suelo y las raíces facilita la infiltración del agua hacia la zona radicular y reduce la presencia de espacios de aire que podrían afectar la hidratación del individuo.



En ambientes áridos se realiza una depresión o “taza” alrededor de cada planta, con la finalidad de captar y retener el agua proveniente del riego o de eventuales precipitaciones. Esta estructura permite disminuir la escorrentía superficial y aumentar la infiltración hacia la zona radicular, mejorando la disponibilidad hídrica en el entorno inmediato de la planta.

Desde una perspectiva ecofisiológica, estas prácticas permiten que las raíces exploren un mayor volumen de suelo y accedan de manera más eficiente al agua disponible, lo que incrementa la capacidad de la planta para resistir condiciones de sequía. Esto resulta especialmente relevante en las primeras etapas de establecimiento, donde el sistema radical aún es limitado y la supervivencia depende directamente de la humedad presente en el micrositio.

En conjunto, la correcta ejecución de la marcación, hoyadura y plantación, así como la construcción de “tazas”, constituyen una base fundamental para el éxito del establecimiento, asegurando condiciones favorables para el desarrollo y supervivencia de los individuos en ambientes áridos.



*Establecimiento de plantas xerofíticas en el área de revegetación, etapa clave para la recuperación de la vegetación y biodiversidad.*



## Etiquetado de individuos y monitoreo digital

Como parte del proceso de establecimiento, se implementó un sistema de identificación individual de los ejemplares plantados, mediante el uso de etiquetas de aluminio resistentes a las condiciones ambientales del sitio. Cada individuo cuenta con un número único asignado, el cual se encuentra vinculado a una base de datos que contiene información detallada asociada a cada planta.



Esta base de datos incluye antecedentes como la ubicación georreferenciada (coordenadas), nombre científico de la especie, fecha de plantación, tratamiento aplicado, así como registros de estado de sobrevivencia y condición general del individuo. El sistema asegura la trazabilidad completa de cada planta desde su establecimiento, y facilita el seguimiento de su desempeño a lo largo del tiempo.



*Georreferenciación e identificación individual de los ejemplares establecidos, permitiendo registrar y monitorear la evolución de cada planta a lo largo del tiempo.*



El monitoreo de los individuos se realiza mediante el uso de herramientas digitales en terreno, específicamente a través de aplicaciones tipo *Survey*, las cuales permiten acceder y actualizar en tiempo real la información asociada a cada ejemplar.

Mediante este sistema es posible registrar variables como supervivencia, vigor, crecimiento y presencia de daños, e integrar estos datos directamente en la base de datos central.

Este enfoque mejora la recolección de información, reduce errores de registro y mejorar la eficiencia del monitoreo, especialmente en áreas de gran extensión. Asimismo, facilita el análisis posterior de los datos, permitiendo identificar patrones de comportamiento, evaluar el éxito del establecimiento y apoyar la toma de decisiones en el marco del manejo adaptativo del programa.

En conjunto, la integración del etiquetado individual con sistemas digitales de monitoreo constituye una herramienta clave para la gestión técnica de programas de revegetación, permitiendo un seguimiento preciso, sistemático y en tiempo real de la plantación.



*Cada planta cuenta: individuos identificados y monitoreados uno a uno mediante códigos únicos y coordenadas GPS para evaluar su evolución en el tiempo.*



## Medidas de control de contingencia

Las medidas de control de contingencia corresponden a un conjunto de acciones preventivas y correctivas destinadas a enfrentar situaciones que puedan comprometer el éxito del proceso de revegetación, particularmente en ambientes áridos donde la variabilidad climática y las condiciones extremas representan un riesgo permanente para el establecimiento de los individuos.

En este contexto, uno de los principales factores abordados corresponde a las condiciones de estrés hídrico y térmico asociadas a periodos de altas temperaturas y escasez de precipitaciones. Frente a estos escenarios, ha sido necesario ajustar el manejo hídrico del sistema, incrementando de manera puntual el volumen de agua aplicado a las plantas, con el objetivo de compensar el aumento en la demanda evaporativa y evitar pérdidas por deshidratación. Esta medida se implementa de manera focalizada y temporal, en función de la información obtenida a partir del monitoreo climático y del estado fisiológico de los individuos.

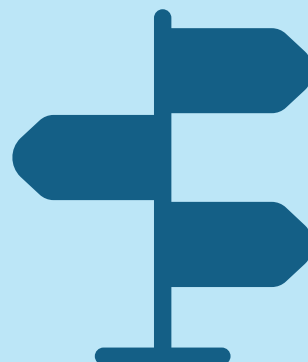
Adicionalmente, se ha debido considerar contingencias asociadas a factores antrópicos, tales como el robo o vandalización de infraestructura y equipamiento, incluyendo componentes del sistema de riego y sensores destinados al monitoreo continuo de variables climáticas. Para mitigar estos riesgos, se han implementado medidas de resguardo físico del área de revegetación, como portones con candado y la delimitación del sitio con un cerco perimetral.

*Implementación de medidas de control y contingencia destinadas a garantizar la protección y conservación del área de revegetación durante todo el programa de monitoreo y manejo.*





Como complemento, se han incorporado señaléticas informativas que advierten sobre la presencia de cámaras de vigilancia y el monitoreo del área, con el objetivo de disuadir intervenciones no autorizadas. Estas acciones pueden ser reforzadas mediante la instalación de sistemas de vigilancia remota, registros fotográficos periódicos y el control de accesos, medidas que contribuyen a la protección de la infraestructura y al resguardo de la información generada.



*Letreros informativos y cámaras de seguridad instalados para proteger el área de revegetación y resguardar el desarrollo de las especies nativas establecidas.*





## Resultados del programa de revegetación

La implementación progresiva del programa de revegetación durante el **período 2022–2025**, alcanzó un total de:

**17.138** individuos  
establecidos

correspondientes a **13 especies de flora nativa**.

La distribución temporal de las plantaciones refleja una ejecución sostenida, con una mayor intensidad en los años 2023 y 2025, lo que responde a un proceso de ajuste adaptativo en función de la disponibilidad de material vegetal, las condiciones climáticas y la experiencia acumulada en terreno.

Desde el punto de vista de la composición florística, se observa un predominio de especies arbustivas y herbáceas altamente adaptadas a condiciones de aridez. Entre ellas destacan: *Nolana albescens*, *Atriplex clivicola*, *Ephedra breana* y *Atriplex deserticola*, las cuales cumplen un rol clave en la estabilización del suelo, la generación de cobertura vegetal y la recuperación de procesos ecológicos en ambientes desérticos.

Estas especies, además, actúan como facilitadoras ecológicas, contribuyendo a la retención de humedad, la acumulación de materia orgánica y la creación de microhábitats favorables para el establecimiento de otras especies.

*Cuatro años de propagación, cuidado y dedicación culminan con el establecimiento de los primeros individuos de *Eulychnia acida* en el área de revegetación de TEN.*





A partir del año 2024, hubo una incorporación progresiva de nuevas especies, incluyendo cactáceas como *Copiapoa megarhiza*, *Eulychnia acida* y *Pyrrhocactus confinis*; y herbáceas como *Heliotropium chenopodiaceum*. Esta diversificación responde a una estrategia de restauración escalonada, orientada a aumentar la complejidad estructural y funcional del sistema, incorporando especies con distintos roles ecológicos y grados de adaptación.

La implementación de criterios espaciales, como la replicación de la distribución natural de las especies y la consideración de la capacidad de carga del sitio, ha permitido evitar la sobrecompetencia y favorecer el establecimiento de los individuos.

El uso de riego tecnificado en las etapas iniciales del proceso de revegetación ha sido un factor determinante para mejorar el establecimiento en un contexto de alta aridez.

En términos generales, el programa de revegetación ha avanzado de manera consistente hacia el cumplimiento de sus objetivos, evidenciando una recuperación progresiva de la cobertura vegetal y un aumento en la diversidad florística del sistema.

No obstante, el éxito a largo plazo dependerá de la capacidad de las especies para adaptarse al medio silvestre sin apoyo artificial (riego, protección), lo que refuerza la importancia del monitoreo continuo y del manejo adaptativo frente a la variabilidad climática y las condiciones del entorno.



Primeros individuos de *Copiapoa megarhiza* propagados durante cuatro años en vivero y posteriormente establecidos en el área de revegetación de TEN.



## XI. Bibliografía





- Arroyo, M. T. K., Marquet, P., Marticorena, C., Simonetti, J., Cavieres, L., Squeo, F., & Rozzi, R. (2004). Chilean Winter Rainfall–Valdivian Forests. En: Mittermeier, R. A. *et al.* (Eds.), *Hotspots Revisited: Earth's Biologically Richest and Most Endangered Terrestrial Ecoregions*. Conservation International.
- Armesto, J. J., Smith-Ramírez, C., Rozzi, R., & Arroyo, M. T. K. (2007). La biodiversidad de Chile: patrimonio y desafíos. En: *Biodiversidad de Chile, Patrimonio y Desafíos*. CONAMA, Santiago, Chile.
- Armesto, J. J., Manuschevich, D., Mora, A., Smith-Ramírez, C., Rozzi, R., Abarzúa, A. M., & Marquet, P. A. (2010). From the Holocene to the Anthropocene: A historical framework for land cover change in southwestern South America in the past 15,000 years. *Land Use Policy*, 27(2), 148–160.
- Armesto, J. J., Smith-Ramírez, C., Rozzi, R., & Arroyo, M. T. K. (2007). Biodiversidad y conservación en Chile: una tarea pendiente. En: *Biodiversidad de Chile, Patrimonio y Desafíos*. Comisión Nacional del Medio Ambiente, Santiago, Chile.
- Barthlott, W., Mutke, J., Rafiqpoor, M. D., Kier, G., & Kreft, H. (2005). Patterns of vascular plant diversity at continental to global scales. *Biologische Skrifter*, 55, 521–531.
- Cowling, R. M., Rundel, P. W., Lamont, B. B., Arroyo, M. T. K., & Arianoutsou, M. (1996). Plant diversity in Mediterranean-climate regions. *Trends in Ecology & Evolution*, 11(9), 362–366.
- Chaves, M. M., Maroco, J. P., & Pereira, J. S. (2003). Understanding plant responses to drought: From genes to the whole plant. *Functional Plant Biology*, 30(3), 239–264. <https://doi.org/10.1071/FP02076>
- Chávez, R. O., Moreira-Muñoz, A., Galleguillos, M., Olea, M., Aguayo, J., Latín, A., & Muñoz, A. A. (2019). GIMMS NDVI time series reveal the extent, duration, and intensity of “desierto florido” events in the hyper-arid Atacama Desert, Northern Chile. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 76, 193–203.
- Gutiérrez, J. R. (2008). Sustentabilidad de los ecosistemas áridos y semiáridos de la Región de Atacama. En: Squeo, F. A., Arancio, G. & Gutiérrez, J. R. (Eds.), *Libro Rojo de la Flora Nativa y de los Sitios Prioritarios para su Conservación: Región de Atacama*. Ediciones Universidad de La Serena, La Serena, Chile.
- Garreaud, R. D., Vuille, M., Compagnucci, R., & Marengo, J. (2009). Present-day South American climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 281(3–4), 180–195. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.10.032>
- Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H., & Veloso, C. (2019). The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40, 421–439.
- Grossnickle, S. C. (2012). Why seedlings survive: Influence of plant attributes. *New Forests*, 43, 711–738. <https://doi.org/10.1007/s11056-012-9336-6>.



- Kreft, H., & Jetz, W. (2007). Global patterns and determinants of vascular plant diversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, 104(14), 5925–5930. <https://doi.org/10.1073/pnas.0608361104>.
- Landis, T. D., Dumroese, R. K., & Haase, D. L. (2010). *The Container Tree Nursery Manual. Volume 7: Seedling Processing, Storage, and Outplanting*. Agriculture Handbook 674. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Washington, D.C.
- Lambers, H., Chapin III, F. S., & Pons, T. L. (2008). *Plant Physiological Ecology* (2nd ed.). Springer, New York.
- Lambers, H., Chapin III, F. S., & Pons, T. L. (2008). *Plant Physiological Ecology* (2nd ed.). Springer, New York.
- Letelier, L., Squeo, F. A., Arancio, G., Marticorena, A., Muñoz-Schick, M., Arroyo, M. T. K., León-Lobos, P., Montecinos, S., & Gutiérrez, J. R. (2008). Diversidad vegetal de la Región de Atacama, Chile. En: Squeo, F. A., Arancio, G. & Gutiérrez, J. R. (Eds.), *Libro Rojo de la Flora Nativa y de los Sitios Prioritarios para su Conservación: Región de Atacama* (Capítulo 7, pp. 123–135). Ediciones Universidad de La Serena, La Serena, Chile.
- Luebert, F., & Pliscoff, P. (2006). *Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile*. Editorial Universitaria, Santiago, Chile.
- Luebert, F., & Pliscoff, P. (2006). *Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile*. Editorial Universitaria, Santiago, Chile.
- Mauseth, J. D. (2006). Structure–function relationships in highly modified shoots of Cactaceae. *Annals of Botany*, 98(5), 901–926.
- Miranda, A., Lara, A., Altamirano, A., Di Bella, C., González, M. E., & Camarero, J. J. (2019). Forest browning trends in response to drought in a highly threatened Mediterranean landscape of South America. *Ecological Indicators*, 115, 106401.
- Mittermeier, R. A., Robles-Gil, P., Hoffmann, M., Pilgrim, J., Brooks, T., Mittermeier, C. G., Lamo-reux, J., & da Fonseca, G. A. B. (2004). Hotspots Revisited: Earth's Biologically Richest and Most Endangered Terrestrial Ecoregions. CEMEX.
- Myers, N., Mittermeier, R. A., Mittermeier, C. G., da Fonseca, G. A. B., & Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403, 853–858.
- Nobel, P. S. (2009). *Physicochemical and Environmental Plant Physiology* (4th ed.). Academic Press, San Diego.
- Nobel, P. S. (2002). *Cacti: Biology and Uses*. University of California Press.
- Noy-Meir, I. (1973). Desert ecosystems: Environment and producers. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4, 25–51. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000325>.
- Pinto, R. (2007). Evaluación del estado de conservación y regeneración de poblaciones de *Eulchnia iquiquensis* en el desierto costero del norte de Chile. Informe técnico.



Pliscoff, P., & Fuentes-Castillo, T. (2011). Representatividad y conservación de ecosistemas terrestres de Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 84, 421–436.

Rodríguez, R., Marticorena, C., Alarcón, D., Baeza, C., Cavieres, L., Finot, V., Fuentes, N., Kiessling, A., Mihoc, M., Pauchard, A., Ruiz, E., Sánchez, P., & Marticorena, A. (2018). Catálogo de las plantas vasculares de Chile. *Gayana Botánica*, 75(1), 1–430.

Rundel, P. W., Dillon, M. O., Palma, B., Mooney, H. A., Gulmon, S. L., & Ehleringer, J. R. (1991). The phytogeography and ecology of the coastal Atacama and Peruvian deserts. *Aliso*, 13, 1–49.

Rundel, P. W., Villagra, P. E., Dillon, M. O., Roig-Juñent, S., & Debandi, G. (2007). Arid and semi-arid ecosystems. En *The Physical Geography of South America*. Oxford University Press.

Schulz, N., Aceituno, P., & Richter, M. (2011). Phytogeographic divisions, climate change and plant diversity in the northern Chilean coastal desert. *Erdkunde*, 65(1), 55–70.

Squeo, F. A., Arancio, G., & Gutiérrez, J. R. (Eds.). (2008). *Libro Rojo de la Flora Nativa y de los Sitios Prioritarios para su Conservación: Región de Atacama*. Ediciones Universidad de La Serena.

Squeo, F. A., Arancio, G., & Gutiérrez, J. R. (2006). *Flora y vegetación de la Región de Atacama*. Universidad de La Serena.

Stuessy, T. F., Crawford, D. J., López-Sepúlveda, P., & Ruiz, E. (2017). *Plants of oceanic islands*. Cambridge University Press.

Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2015). *Plant Physiology and Development* (6th ed.). Sinauer Associates, Sunderland, Massachusetts

Vidiella, P. E., Armesto, J. J., & Gutiérrez, J. R. (1999). Vegetation changes and sequential flowering after rain in the southern Atacama Desert. *Journal of Arid Environments*, 43, 449–458.

Villagrán, C., & Hinojosa, L. F. (1997). Historia de los bosques del sur de Sudamérica. *Revista Chilena de Historia Natural*, 70, 241–267.









# PROGRAMA DE Revegetación

Una década de investigación, ensayo y  
aprendizaje en la Región de Atacama