Manual N° 62

MANUAL BÁSICO PARA LA RESTAURACIÓN DE FORMACIONES XEROFÍTICAS DE LA REGIÓN DE COQUIMBO



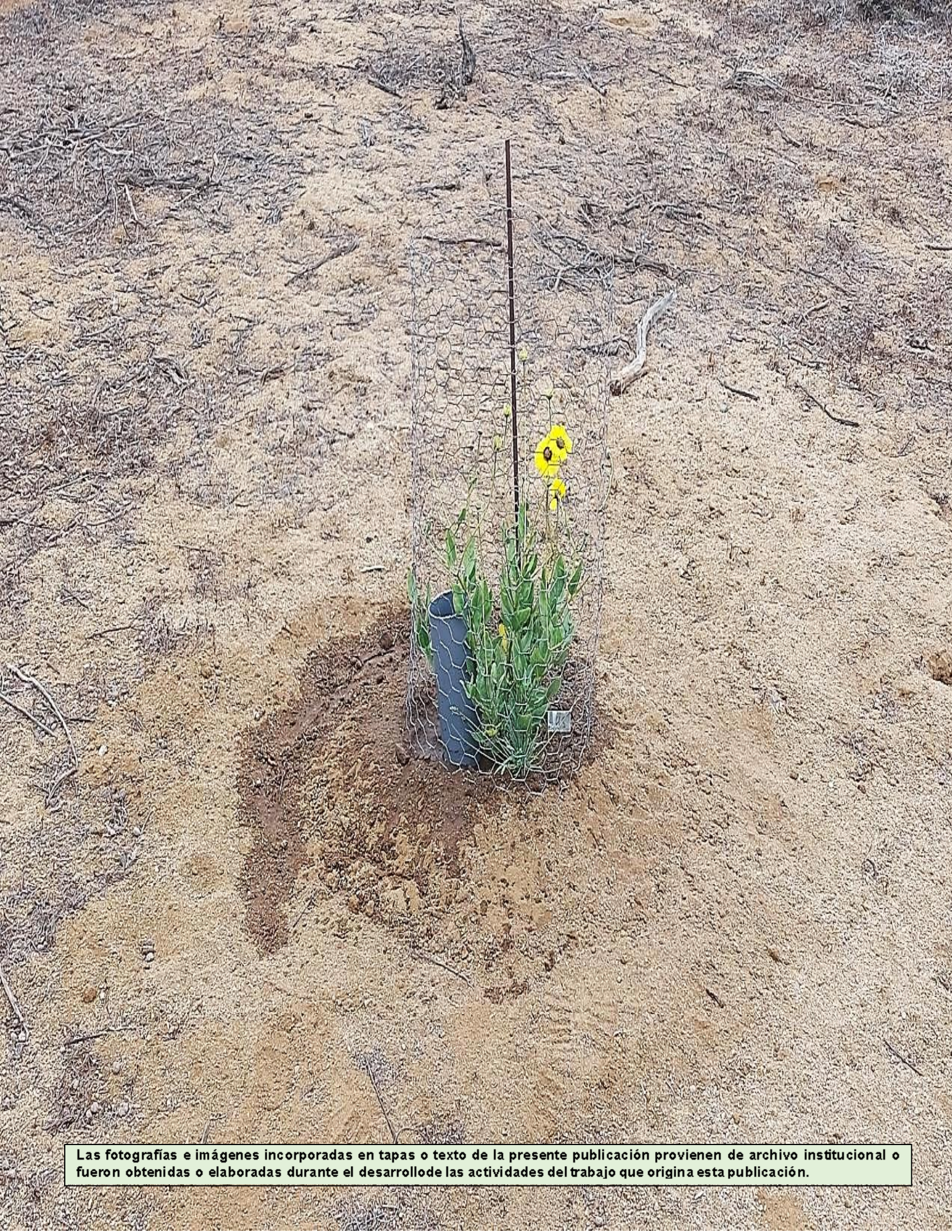
INSTITUTO FORESTAL
2023

Ministerio de Agricultura
Gobierno de Chile

Conaf

Fondo de Investigación del Bosque Nativo

INFOR



Las fotografías e imágenes incorporadas en tapas o texto de la presente publicación provienen de archivo institucional o fueron obtenidas o elaboradas durante el desarrollo de las actividades del trabajo que origina esta publicación.

Manual N° 62

MANUAL BÁSICO PARA LA RESTAURACIÓN DE LAS FORMACIONES XEROFÍTICAS DE LA REGIÓN DE COQUIMBO

Sergio I. Silva Soto [1]; Marcelo Rosas Cerda [2]
y Claus Westphal Kroon [3]

INSTITUTO FORESTAL
2023

1 Dr. Investigadores, Instituto Forestal sergio.silva@infor.cl
2 Dr. (c) Sistemática y Biodiversidad
3 Dr. Biología y Ecología Aplicada

La presente publicación entrega parte de los resultados del proyecto Financiado por el Fondo de Investigación del Bosque Nativo (FIBN) 018/2017 “Metodología para la caracterización y restauración de formaciones xerofíticas utilizando imágenes espejo como ecosistemas de referencia”

La Serena - Chile, 2023



Instituto Forestal
Sucre 2397 – Nuñoa. Santiago. CHILE
F. 52 2 223667115
www.infor.cl

ISBN N° 978-956-318-261-3 (Edición Impresa)
ISBN N° 978-956-318-262-0 (Edición Digital)
Registro de Registro de Propiedad Intelectual N° 2023-A-11492

Revisores: Santiago Barros Asenjo

Se autoriza la reproducción parcial de esta publicación siempre y cuando se efectúe la cita correspondiente:

Silva Soto, Sergio I.; Rosas Cerda, Marcelo y Westphal Kroon, Claus (2023). Manual básico para la restauración de las formaciones xerofíticas de la Región de Coquimbo. Instituto Forestal, Chile. Manual N° 62. P. 35. https://doi.org/10.52904/20.500.12220/32749

CONTENIDO

1. Introducción……..7

2. Conceptos Básicos de Restauración……8

3. Consideraciones para el Éxito en un Proyecto de Restauración Ecológica……10

4. Importancia Ecosistémica de las Formaciones Xerofíticas……11

5. Pérdida y Degradación de Formaciones Xerofíticas……...13

6. Limitantes para la Restauración……15

7. Problemas para la Restauración de Ambientes Degradados en la Región de Coquimbo……...16

8. Definir el Ecosistema o Comunidad de Referencia……18

9. Definir las Escalas y Niveles de Organización……19

10. Comunidades Vegetacionales para formaciones Xerofíticas de la Región de Coquimbo……20

11. Implementación……...23

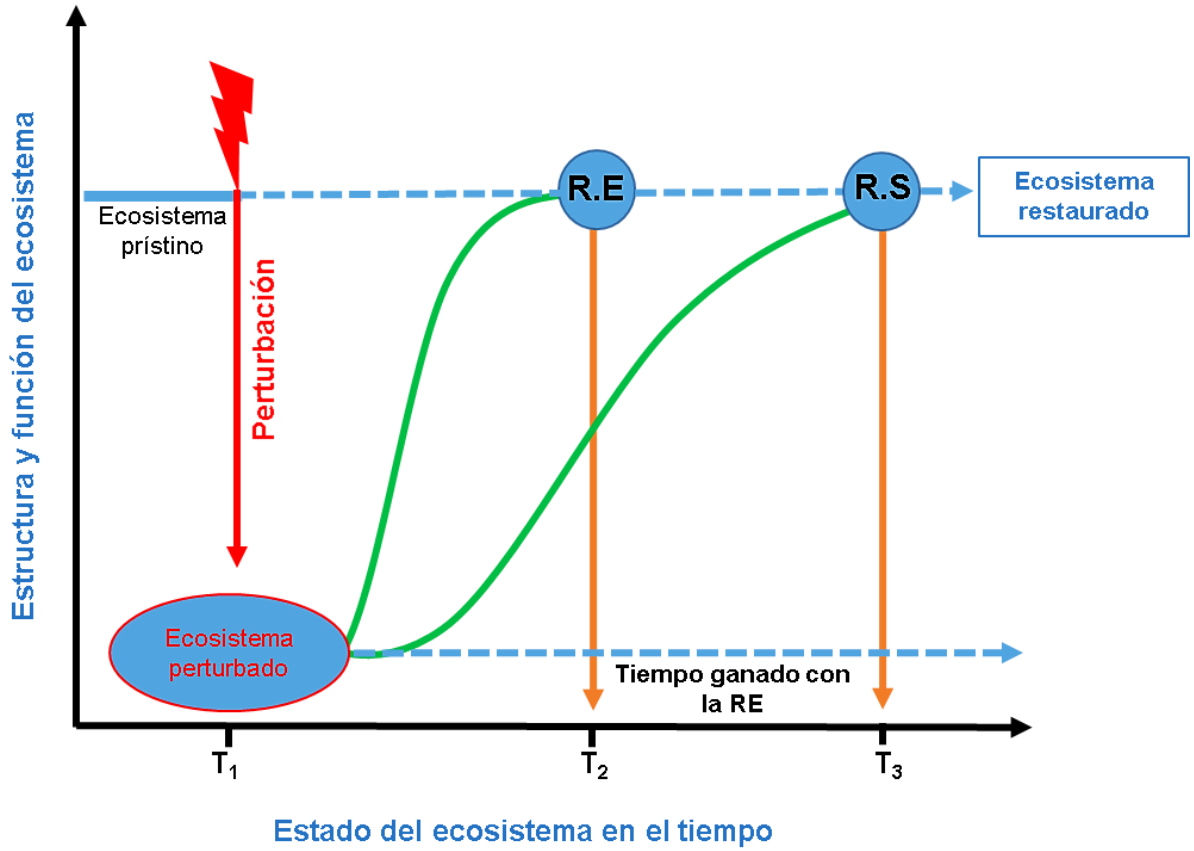
12. Referencias……..34

1. INTRODUCCIÓN

La degradación ambiental en los ecosistemas terrestres ocurre debido a cambios en el estado de uno o más recursos fundamentales: suelo, vegetación y agua. Las comunidades vegetales son esenciales como estructura básica para las redes tróficas, ya que dependen únicamente de la luz y del suelo como soporte físico y fuente primaria de agua y nutrientes. Por lo tanto, las interacciones entre el suelo y la vegetación son vitales en el proceso de degradación y recuperación de un ecosistema. La pérdida o deterioro de la vegetación y del suelo, a menudo causada por la erosión hídrica y eólica, suele desencadenar la degradación de las tierras. Además, otros factores como los incendios, la compactación del suelo, la salinización, las invasiones biológicas y la acumulación de sustancias tóxicas también contribuyen a este proceso de deterioro ambiental. Es crucial abordar estos factores para mitigar la degradación ambiental y promover la recuperación de los ecosistemas terrestres.

La degradación ambiental implica la alteración de la estructura y composición biológica de un ecosistema, resultando en un deterioro de sus funciones. Sin embargo, los ecosistemas poseen una capacidad inherente para resistir y recuperarse de tales procesos. En este sentido, la sucesión ecológica juega un papel crucial, siendo un proceso evolutivo natural que ocurre como resultado de cambios en el ambiente, tanto internos como externos al ecosistema. A medida que avanza la sucesión, el ecosistema desarrolla una mayor complejidad y adquiere una mayor estabilidad y resiliencia frente a las perturbaciones. En términos de restauración ecológica, comprender la sucesión ecológica es esencial, ya que proporciona una base para entender cómo las comunidades bióticas dentro del ecosistema restaurado responden a las diferentes perturbaciones y evaluar si estas respuestas son similares a las condiciones de un ecosistema no perturbado.

La sucesión ecológica es un proceso gradual y natural que puede extenderse a lo largo de décadas o incluso siglos, mientras que la restauración ecológica implica intervenciones humanas deliberadas y planificadas para acelerar el restablecimiento de un ecosistema degradado. Cuando la degradación alcanza un nivel que sobrepasa la capacidad de recuperación natural del ecosistema hacia la estabilidad biológica, es necesario recurrir a la restauración ecológica. Esta busca reparar el daño causado por la degradación, ya sea provocada por agentes naturales o por actividades humanas. La restauración ecológica implica acciones destinadas a reiniciar o acelerar los procesos ecológicos, la estructura de la comunidad y la resiliencia del ecosistema. En resumen, su objetivo es recuperar la estructura y composición del ecosistema para que pueda llevar a cabo sus funciones de manera más rápida y sostenida en el tiempo (Figura 1).



(Fuente: Modificado de Stanturf, 2005).

Figura 1
ESQUEMA CONCEPTUAL QUE REPRESENTA LA RECUPERACIÓN SUCESIONAL (RS) Y LA RECUPERACIÓN A TRAVÉS DE LA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA (RE). LA RE ACELERA LOS PROCESOS ECOLÓGICOS, LA ESTRUCTURA DE LA COMUNIDAD Y LA RESILIENCIA DEL ECOSISTEMA

2. CONCEPTOS BÁSICOS DE RESTAURACIÓN

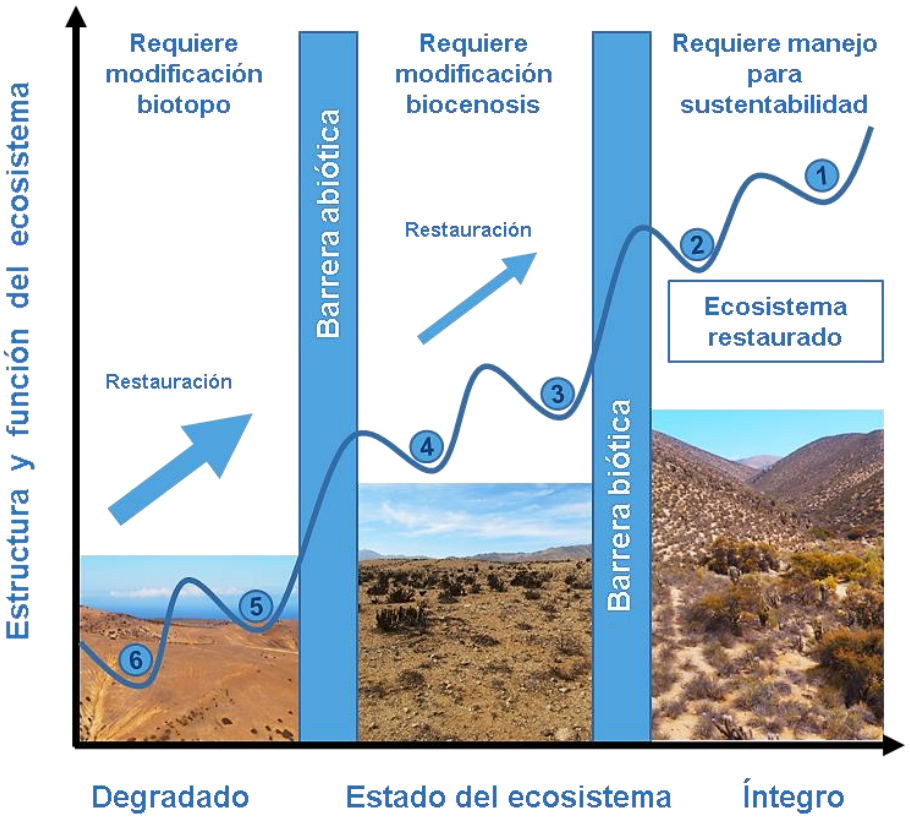
Antes de iniciar un proyecto de restauración ecológica de ecosistemas, es imprescindible tener una comprensión clara de los fundamentos de esta, vale decir, ¿Qué es la restauración ecológica y cómo se hace? La Sociedad Internacional para la Restauración Ecológica (*Society for Ecological Restoration International* – SER) la define como el proceso deliberado de asistir, iniciar o acelerar la recuperación de un ecosistema con respecto a su estructura, función, integridad y sostenibilidad. A menudo, el ecosistema que exige restauración ecológica ha sido dañado, degradado, transformado o totalmente destruido por causa directa o indirecta de las actividades antrópicas o en algunos casos causadas o empeoradas por causas naturales, tales como incendios, inundaciones o erupciones volcánicas (SER, 2004).

La restauración ecológica se hace necesaria cuando un ecosistema ha sufrido una degradación tan profunda que no puede recuperarse por sí solo a su estado anterior o a su trayectoria histórica de desarrollo (SER, 2004). Las acciones a emprender varían según la extensión y duración de las perturbaciones pasadas, las condiciones culturales, los usos del territorio que han transformado el paisaje y las oportunidades y restricciones actuales para su implementación. En situaciones más simples, se puede eliminar o modificar factores que impidan la expresión de mecanismos de regeneración natural, permitiendo así que los procesos ecológicos se recuperen por sí mismos, como la protección contra la herbivoría o la restauración de un régimen de inundación. Por otro lado, en circunstancias más complejas que requieren intervenciones a mayor escala, se pueden considerar la reintroducción de especies nativas que se habían perdido o la rehabilitación del suelo (Smith-Ramírez at al. 2015).

Dada la singularidad inherente de cada entorno, no existen fórmulas específicas para restaurar un ecosistema. Sin embargo, existen recomendaciones generales derivadas de teorías, conceptos de ecología de la restauración y experiencias acumuladas en esfuerzos de restauración en diversos ecosistemas (Hobbs & Harris, 2001; Smith-Ramírez *at al.*, 2015). Algunos ecosistemas requieren esfuerzos tanto para superar barreras abióticas como bióticas (Estado 5 y 6), mientras que otros solo necesitan intervenciones para vencer las barreras bióticas (Estado 3 y 4), y algunos requieren intervenciones menores para su restauración (Estado 1 y 2; Figura 2). Desde esta perspectiva, se pueden identificar al menos tres niveles de afectación, según la intensidad o el impacto de la perturbación:

- **Dañado (1 y 2):** Ha perdido, por lo menos, alguno de sus elementos fundamentales lo que no le permite funcionar de manera eficiente. Los ecosistemas dañados pueden recuperarse de manera espontánea, pero dependiendo de su condición y su localización. Dicho proceso no requiere modificaciones de la biocenosis para superar la barrera biótica.
- **Degradado (3 y 4):** Ha perdido elementos fundamentales por causa de las perturbaciones, que le impiden recuperarse de manera espontánea a su estado inicial. Por lo general, los sistemas degradados requieren intervenciones para superar la barrera biótica y a pesar de aquello el sistema puede incluso seguirse degradando. Estos ambientes por lo general corresponden a terrenos que son utilizados en agricultura y ganadería extensiva.
- **Destruido (5 y 6):** Ha perdido todos sus elementos (suelo, fauna y vegetación) y han cambiado drásticamente las condiciones microclimáticas. Cuando un sistema ha sido destruido y abandonado es probable que nunca vuelva a tener

unas características similares a las del ecosistema preperturbación. Estos ambientes requieren esfuerzos tanto para vencer la barrera abiótica como las bióticas.



(Fuente: Hobbs & Harris, 2001).

Figura 2
ESQUEMA CONCEPTUAL SIMPLIFICADO RESPECTO DE LA TRAYECTORIA DEL ECOSISTEMA PRODUCTO DE LA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA. SE PUEDEN IDENTIFICAR AL MENOS TRES NIVELES DE AFECTACIÓN, SEGÚN LA INTENSIDAD O EL IMPACTO DE LA PERTURBACIÓN

3. CONSIDERACIONES PARA EL ÉXITO EN UN PROYECTO DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA

La restauración ecológica es un proceso complejo, no solo se trata de plantar árboles, aplicar abono, riego o construir obras de cosecha de aguas lluvias, sino de cómo y cuándo instalar cada elemento a restaurar y de cómo se relacionará cada uno con los elementos ya existentes del propio ecosistema.

Por esta razón, la primera consideración y quizás la más importante para asegurar el éxito del proyecto de restauración es que los investigadores deben

conocer en lo específico la zona destinada a restauración y definir el ecosistema que se quiere restaurar (ej. especies, capacidad de carga, condiciones climáticas). La capacidad de carga se refiere a la cantidad máxima de individuos de un conjunto de especies que un determinado ecosistema puede mantener de manera sostenible a lo largo del tiempo, sin que se produzca un deterioro del mismo. En este caso se evaluó por medio de la densidad de población (Individuos/ha).

Este conocimiento es fundamental para definir y planear las etapas para el adecuado desarrollo del proyecto, para ello se debe conocer al menos lo siguiente:

- Ubicación y área afectada.
- Definir el estado de degradación (Ej. estructura, composición, lo que queda del ecosistema natural anterior).
- Definir ecosistemas de referencia a emular.
- Definir la escala a la cual se trabajará (Ej. nivel de paisaje regional, corredores biológicos) y el nivel de intervención (Ej. manejo silvicultural, plantación).
- Establecer las metas y objetivos de la restauración ecológica.
- Definir la trayectoria a seguir en cuanto a estructura y función ecosistémica.
- Implementar un plan de monitoreo y evaluación para seguir el progreso del proyecto.

Otras consideraciones para el éxito del proceso de restauración son la eliminación o el control de lo que ha dañado, degradado o destruido al ecosistema (Ej. exclusión del ganado de la zona de restauración, control de plagas, control de especies invasoras, control de fuegos antrópicos). Todos estos riesgos deben ser identificados durante la fase de planeación conceptual del proyecto y debe evaluarse con realismo la posibilidad de que puedan ser subsanados. Otro aspecto importante es el compromiso de las autoridades y de las comunidades locales, actores que deben ser incluidos en todas las fases de planificación y tendrán que asumir compromisos, tanto en el corto como en el largo plazo. Por último y algo no menor, es absolutamente esencial para el éxito del proyecto asegurar los fondos y recursos suficientes para llevar a cabo el proyecto en su totalidad, incluyendo la implementación, el monitoreo y la evaluación.

4. IMPORTANCIA ECOSISTÉMICA DE LAS FORMACIONES XEROFÍTICAS

La vegetación de las zonas áridas de Chile, juega un rol fundamental en la persistencia y funcionamiento de los ecosistemas mediterráneos (Gutierrez & Squeo, 2004). Su rol es clave para el funcionamiento hídrico, especialmente aquellas

especies con raíces pivotantes que facilitan el reclutamiento dado que extraen agua desde las napas freáticas, transportándola a estratos superficiales y secos, dejando así recursos hídricos disponibles para otras especies con raíces menos profundas (Caldwell *et al.*, 1998; Horton & Hart, 1998; León & Squeo, 2004). Este proceso, conocido como levantamiento hidráulico, es importante para el sustento de la biodiversidad (Squeo *et al*., 1999; Squeo *et al*., 2009). La vegetación xerofítica, además contribuye a frenar el desgaste del relieve y la erosión causada por el viento y también puede interceptar neblina costera proporcionando humedad en las capas superficiales del suelo (Gutiérrez & Squeo, 2004). La reducción de la cobertura arbustiva aumenta el lavado de nutrientes, disminuye la disponibilidad de agua, aumenta la escorrentía, reduce el establecimiento y crecimiento de plantas, acelerando los procesos de erosión y desertificación (Shachak *et al*., 1998; Gutiérrez & Squeo, 2004). Estos procesos a nivel del paisaje apenas han sido cartografiados y cuantificados, y los cambios de trayectoria entre distintos tipos de cobertura del suelo para determinados tipos de formaciones xerofíticas aún no han sido examinados en detalle (Figura 3).



Figura 3
EFECTO DE LA HABILITACIÓN DE TERRENOS PARA AGRICULTURA Y GANADERÍA EXTENSIVA EN LAS FORMACIONES XEROFÍTICAS DE LA REGIÓN DE COQUIMBO

5. PÉRDIDA Y DEGRADACIÓN DE FORMACIONES XEROFÍTICAS

Los cambios de cobertura del suelo en el área de clima mediterráneo de la zona central de Chile revelan una tendencia general hacia la reducción continua de bosque y matorral xerofítico, a expensas de la biodiversidad y de los servicios ecosistémicos. Los bosques xerofíticos de la Región de Coquimbo se caracterizan por tener una elevada riqueza de especies y de endemismos.

El alto grado de endemismos y la cada vez mayor amenaza debida a los cambios en la cobertura del suelo han significado la inclusión de estos bosques como uno de los 36 *hot spots* de biodiversidad del planeta. A pesar de ello, las actividades económicas y el aumento poblacional en el centro-norte de Chile han provocado un alto impacto en los recursos naturales, produciendo grandes pérdidas de biodiversidad.

Los bosques xerofíticos han sido erradicados y degradados en grandes áreas de la Región de Coquimbo, las masas forestales que aún existen son usadas para la extracción de leña y pastoreo de ganado. Además, basado en fuentes históricas, el proceso de deforestación en la Región de Coquimbo fue causado mayoritariamente a causa de la extracción minera ocurrida en el período 1600-1900 (Santander, 2003). Se estima que el consumo de leña seca requerida para la producción de cobre metálico alcanzó 30 millones de toneladas, y el 84,3% fueron taladas entre 1835 y 1900, deforestando entre 3,36 y 6,73 millones de hectáreas abarcando a las regiones de Coquimbo y Atacama (Figura 4).

En la Región de Coquimbo se encuentra la parte más amenazada de las formaciones xerofíticas del país, dado que bajo un escenario de cambio climático global se aceleran los procesos de desertificación y erosión, afectando a las poblaciones de especies singulares, endémicas y de distribución restringida (Figura 5). Asimismo, cerca de un 84% de la superficie regional se encuentra muy degradada (CIREN, 2010) por efecto antrópico, ya sea por sobrexplotación de los recursos naturales, habilitación de terrenos para agricultura y ganadería, cambio climático global en los últimos años y, principalmente, por el cambio de uso de suelo para parcelas de agrado. Paradojalmente, en esta región las áreas protegidas alcanzan solo a alrededor del 3%, de la superficie regional (SNASPE y No SNASPE). La región posee alrededor de 4 millones de hectáreas.



Figura 4
EJEMPLO DE ÁREAS DEGRADADAS Y EROSIONADAS EN LA REGIÓN DE COQUIMBO, CON ESCASA COBERTURA DE FORMACIONES XEROFÍTICAS Y QUE REQUIEREN SER RESTAURADAS

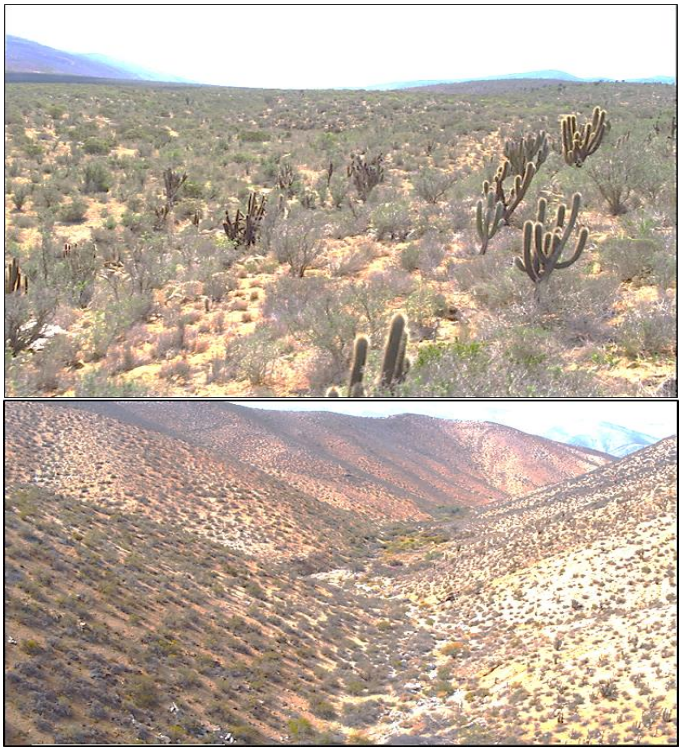


Figura 5
EJEMPLO DE ÁREAS PRÍSTINAS EN LA REGIÓN DE COQUIMBO, CON ALTA COBERTURA DE FORMACIONES XEROFÍTICAS

6. LIMITANTES PARA LA RESTAURACIÓN

La disponibilidad de germoplasma de las especies a utilizar en el proceso de restauración es el primer paso, lo que unido a la generación de protocolos para la germinación y viverización de plantas, sumado al éxito del trasplante de las especies objetivo a restaurar son identificados como uno de los principales cuellos de botella para la restauración del paisaje en Chile (Bannister *et al.,* 2018). De esta manera, la restauración de ecosistemas forestales xerofíticos, presenta desafíos desde la recolección de semillas y la viverización de plantas hasta el posterior establecimiento y consolidación. La generación de protocolos de viverización debiera estar focalizada en la obtención de atributos morfo-fisiológicos y de desempeño que promuevan la producción de plantas grandes, lo que, sumado a adecuadas técnicas silvícolas de establecimiento, permita desarrollar programas de restauración exitosos (Figura 6).

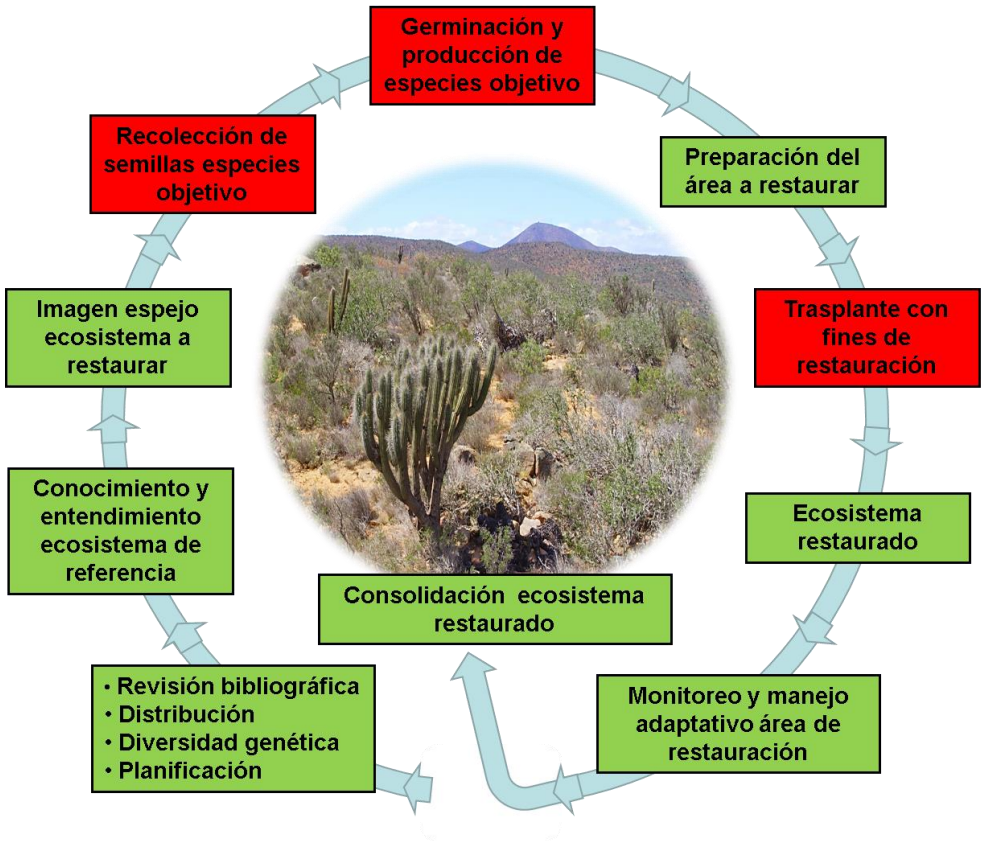


Figura 6
EN EL ESQUEMA SE ILUSTRA EL PROCESO DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA DE LOS ECOSISTEMAS. LOS CUELLOS DE BOTELLA CLAVE, QUE REPRESENTAN LOS PRINCIPALES DESAFÍOS A SUPERAR PARA LOGRAR UNA RESTAURACIÓN EFECTIVA, ESTÁN SEÑALADOS EN ROJO

7. PROBLEMAS PARA LA RESTAURACIÓN DE AMBIENTES DEGRADADOS EN LA REGIÓN DE COQUIMBO

La definición del ecosistema de referencia (imagen a emular) es uno de los problemas centrales de la recuperación de los ecosistemas desde la perspectiva de la restauración ecológica. La rápida destrucción y reemplazo de muchos ecosistemas ha hecho que no se tengan registros de la su condición histórica. Otros ecosistemas al ser degradados son colonizados masivamente por especies invasoras o por especies colonizadoras de ecosistemas aledaños. En consecuencia, los sitios que se van a recuperar no tienen un referente cercano de la comunidad o ecosistema. Esto conlleva una dificultad para concretar objetivos y para definir metas a largo plazo.

Sin embargo, y debido a la gran complejidad y heterogeneidad ambiental de las formaciones del tipo xerofítico presentes en la Región de Coquimbo, aún se puede encontrar fragmentos de los ecosistemas originales que pueden servir de referencia en proyectos de recuperación desde la perspectiva de la restauración ecológica. Estos fragmentos hay que conservarlos porque reflejan trayectorias posibles del ecosistema original. Muchas especies pueden estar extintas localmente, pero no regionalmente y el conocimiento de su distribución y etapa sucesional es una prioridad en programas regionales de recuperación de la cobertura vegetal.

Los esfuerzos de restauración ecológica en Chile, específicamente en la parte norte de la distribución de las formaciones xerofíticas, son escasas y solo se remiten a iniciativas particulares en el ámbito de planes de manejo para formaciones xerofíticas y/o compensaciones exigidas por la Ley 19.300 (Servicio de Evaluación Ambiental).

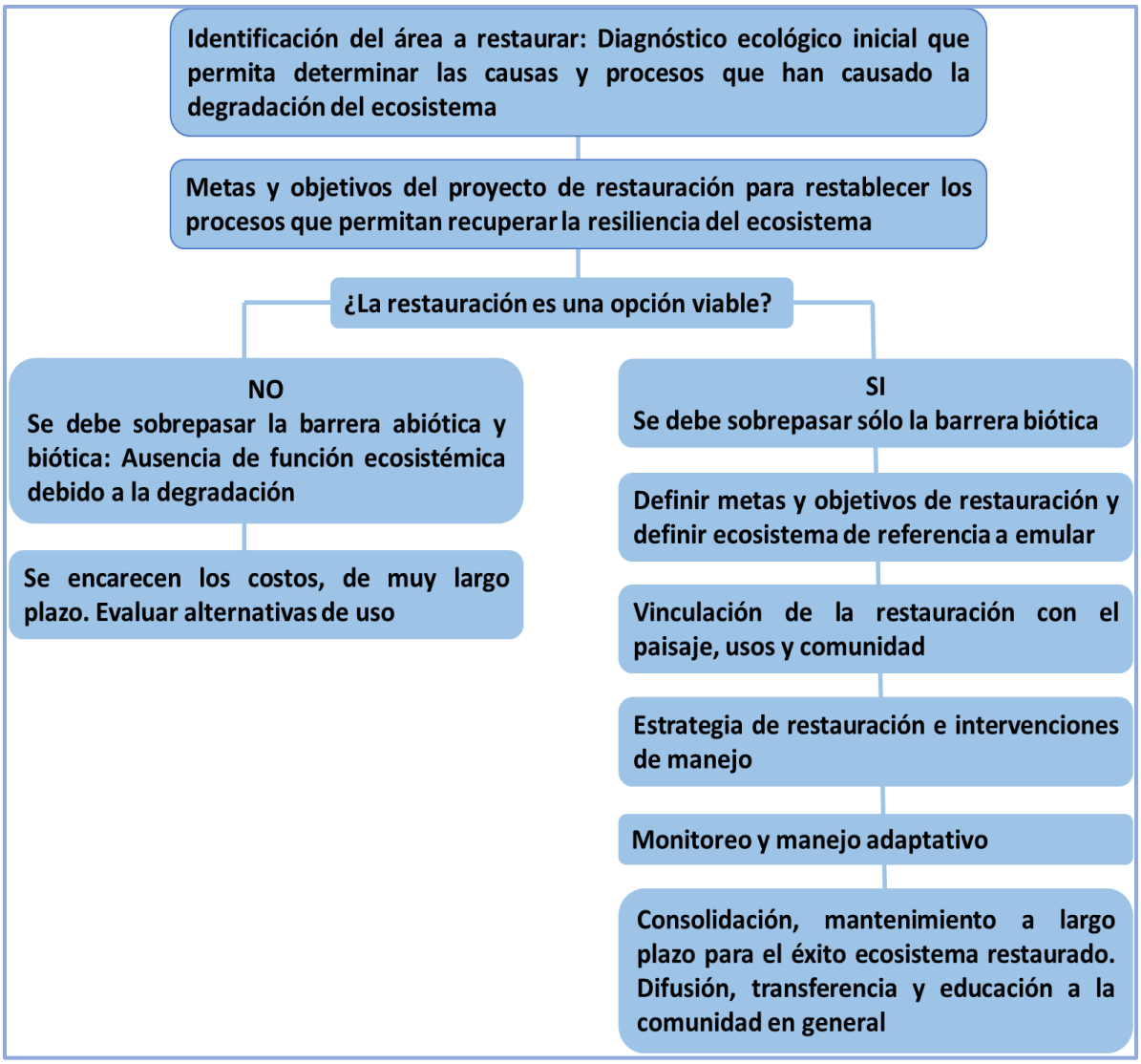
La falta de información sobre las características de los fragmentos de remanentes de estas formaciones vegetales (inventarios florísticos, grupos funcionales, etc.) hacen que las decisiones que se toman en torno a los proyectos de restauración o recuperación de formaciones vegetacionales degradadas, no sean las correctas, lo que desencadena en una actividad fallida.

El ecosistema de referencia sirve de modelo para planificar un proyecto de restauración ecológica y más adelante para su evaluación. No siempre es fácil identificar esta imagen a emular, pero la reconstrucción con base en la información de diferentes fuentes puede dar mayor certeza de las condiciones previas a las perturbaciones.

En casos extremadamente dañados, la restauración ecológica puede implicar una combinación de enfoques, que van desde la remediación del suelo y del agua hasta la reintroducción de especies nativas y la reconstrucción de hábitats. Sin embargo, es importante reconocer que, en algunos casos, la restauración completa

puede no ser posible y los objetivos de restauración pueden tener que adaptarse para reflejar las nuevas condiciones del sitio. En tales casos, el manejo adaptativo y la resiliencia del ecosistema pueden ser enfoques más apropiados (Figura 7).

Para el caso de este manual se utiliza parte de los resultados del proyecto de investigación FIBN N° 018/2017 denominado: “Metodología para la caracterización y restauración de formaciones xerofíticas utilizando imágenes espejo como ecosistemas de referencia”.



(Fuente: Elaboración propia, base en varios autores)

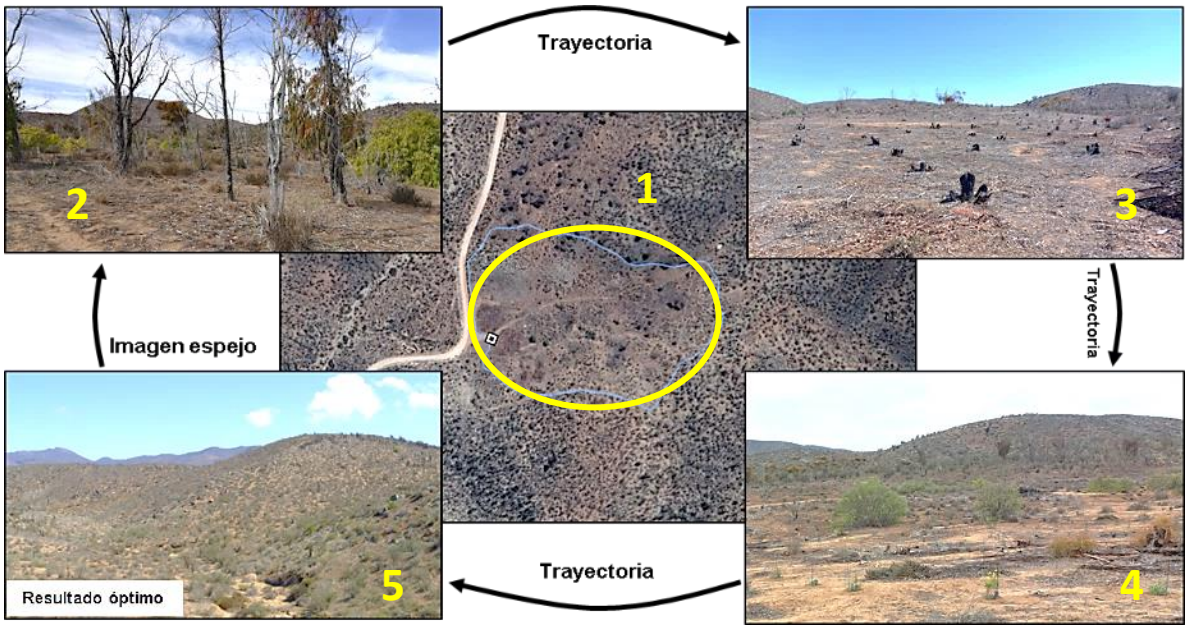
Figura 7
SÍNTESIS DE ETAPAS CLAVE EN UN PROCESO DE RESTAURACIÓN

8. DEFINIR EL ECOSISTEMA O COMUNIDAD DE REFERENCIA

El ecosistema de referencia sirve como modelo para planificar un proyecto de restauración y, posteriormente, para su evaluación. Identificar este referente no siempre es sencillo, pero la reconstrucción basada en información de diversas fuentes puede proporcionar una mayor certeza sobre las condiciones previas a los disturbios.

El proyecto de investigación FIBN N° 018//2017, titulado “Metodología para la caracterización y restauración de formaciones xerofíticas utilizando imágenes espejo como ecosistemas de referencia”, permitió definir, para ocho pisos vegetacionales según la clasificación de Luebert & Pliscoff (2006), la comunidad vegetal base para el proceso de restauración. No obstante, dependiendo del área, el sistema de referencia puede ser evaluado y seleccionado de la formación vegetacional que caracteriza el entorno del área a intervenir.

En la figura 8 se muestra un ejemplo que incluye la imagen del área a restaurar en el Parque Nacional Fray Jorge (1) y las labores de preparación del área (2, 3 y 4). Una vez consolidado el proceso de restauración, se obtiene un resultado similar al ecosistema de referencia (5).



(El área demarcada en amarillo, figura del centro, corresponde a 3 ha)

Figura 8
ÁREA PARA ENSAYO PILOTO DE RESTAURACIÓN EN EL PARQUE NACIONAL FRAY JORGE. LOS NÚMEROS Y FLECHAS INDICAN LA TRAYECTORIA A DONDE LLEGAR CON EL PROCESO DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA ESTABLECIDA INICIALMENTE

9. DEFINIR LAS ESCALAS Y NIVELES DE ORGANIZACIÓN

Para definir los objetivos de un proyecto de restauración es necesario primero precisar escalas. En general, los proyectos de restauración ecológica abarcan diferentes niveles de organización, poblaciones de especies, comunidades y hasta ecosistemas o paisajes (Ehrenfeld, 2000; Lake, 2001).

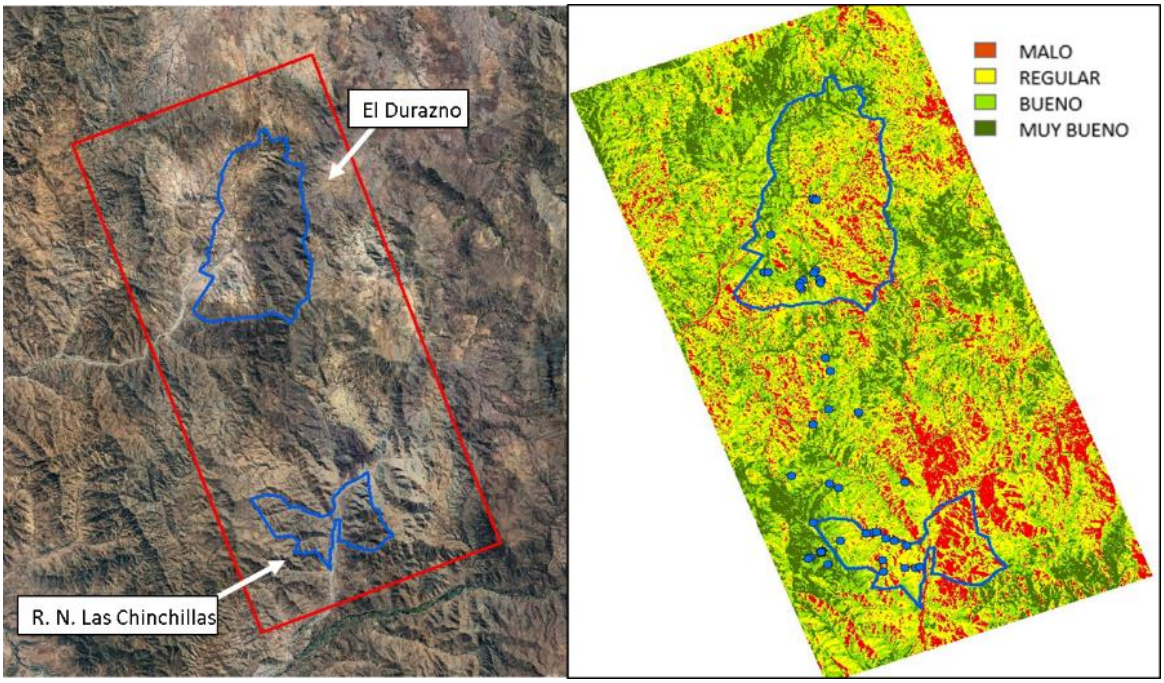
Para cada nivel se definen objetivos de trabajo diferentes, por lo tanto, los procesos críticos para el proceso, cambian según la escala (Figura 9).

- **Nivel de especie:** Lo que se pretende a este nivel de organización es la recuperación de poblaciones de una especie en particular, tratando principalmente de restaurar su hábitat. Esta aproximación tiene un objetivo específico y claro, que es el rescate mismo de la especie (Ej. *Myrcianthes coquimbensis*). Generalmente el proceso de restauración se implementa a escala de parcela.

- **Nivel de comunidad:** El énfasis está en la restauración de la comunidad vegetal original, focalizada en la conservación de comunidades raras o en peligro de extinción. La restauración de comunidades debería ser el enfoque primario de una parte importante de los esfuerzos de restauración para la Región de Coquimbo y constituye la base de la funcionalidad de los ecosistemas.

- **Nivel ecosistémico:** Es la escala a la cual se deberían establecer los objetivos para la restauración a escala regional, el objetivo está en recuperar funciones del ecosistema. Recuperar las condiciones ecológicas que garantizan la recuperación de la composición, estructura y función del ecosistema.

- **Escala de Paisaje:** La restauración a escala de paisaje implica recuperar integridad a través de la conectividad, generando corredores de conservación para la reintegración de ecosistemas fragmentados y paisajes. La visión a una escala de paisaje, necesariamente debe incorpora las componentes de escala ecosistémica para reponer los flujos de organismos, materia y energía entre las diferentes unidades del paisaje (SER, 2004).



Se evaluó un área rectangular (en rojo) de 22 km por 46 km con una superficie de 1.030 km^2. A la derecha el análisis de SAVI con las categorías para la vegetación presente. Los puntos azules indican presencia de fauna terrestre. Confeccionado con metodología desarrollada por el FIBN N° 018//2017.

Figura 9
ANTECEDENTES PREVIOS PARA EL CORREDOR BIOLÓGICO R. N. LAS CHINCHILLAS-DERECHO REAL DE CONSERVACIÓN HACIENDA EL DURAZNO

10. COMUNIDADES VEGETACIONALES PARA FORMACIONES XEROFÍTICAS DE LA REGIÓN DE COQUIMBO

Para identificar las especies más importantes y que estructuran a cada comunidad vegetacional, utilizamos el método de “Análisis de Especies Indicadoras” (ISA) (De Cáceres *et al*., 2012). Esta técnica nos permite identificar especies que actúan como indicadores de ciertas condiciones ambientales o comunitarias, mostrando mayor constancia y distribución de abundancia en cada piso vegetacional. El término "indicador" se refiere a una especie cuya presencia, ausencia o abundancia está estadísticamente relacionado con la condición de mejor conservación (pristinidad) indicada por el savi en cada piso vegetacional. De este modo, las especies indicadoras proporciona información valiosa sobre la calidad del hábitat, los impactos de las perturbaciones ambientales y la salud general del ecosistema. Esta lista de especies es fundamental para iniciativas de restauración ecológica y es prioritaria en la selección de especies para el proceso de restauración.

Mediante el análisis ISA, logramos establecer las especies que presentan la mayor relación entre frecuencia y abundancia asociado a los sitios mejor conservados en cada uno de los pisos vegetacionales. En este contexto, y ordenadas de mayor a menor importancia, clasificamos las especies en tres categorías: especies significativamente importantes dentro de la comunidad del piso vegetacional (significativas), especies importantes dentro de la comunidad del piso vegetacional (importante), y especies acompañantes dentro de la comunidad del piso vegetacional (acompañantes).

Los resultados del FIBN 018/2017 permitieron generar una lista de especies para 8 pisos de la Región de Coquimbo, según la clasificación de Luebert & Pliscoff (2006).

A continuación, se entrega para cada piso vegetacional una lista de especies de la comunidad asociada a vegetación menos perturbada. Esta lista de especies es la indicada para usar en iniciativas de restauración ecológica y son prioritarias en la selección de especies.

Para tres de los pisos vegetacionales se entrega una tabla con la especie y la importancia del nivel de asociación, donde de importancia son las especies significativamente asociadas al sitio, independiente de si la asociación es significativa o no, especies acompañantes son especies que crecen en el sitio y también en otras condiciones.

Piso Matorral bajo desértico mediterráneo andino de *Senecio proteus* y *Haplopappus baylahuen*. En este piso vegetacional se muestrearon 28 sitios con una riqueza de 25 especies perennes. En la siguiente tabla se listan las especies asociadas al piso.

Especie	**Asociación**
Adesmia pedicellata	significativo
Lycium rachidocladum	importante
Balsamocarpon brevifolium	importante
Adesmia argyrophylla	importante
Adesmia argentea	acompañante
Adesmia hystrix	acompañante
Haplopappus racemiger	acompañante
Senecio proteus	acompañante
Krameria cistoidea	acompañante

Piso Matorral bajo tropical-mediterráneo andino de *Adesmia hystrix* y *Ephedra breana.* En este piso vegetacional se muestrearon 35 sitios con una riqueza de 45 especies perennes. En la siguiente tabla se listan las especies asociadas al piso.

Especie	Asociación
Spinoliva ilicifolia	importante
Chorizanthe peduncularis	importante
Guynesonia scoparia	importante
Eriosyce eriosysoides	importante
Mutisia cana	acompañante
Echinopsis chiloensis	acompañante
Mutisia acerosa	acompañante
Haplopappus pinea	acompañante
Haplopappus retinervius	acompañante
Vachellia caven	acompañante

Piso Matorral desértico mediterráneo costero de *Bahia ambrosioides* y *Puya chilensis.* *En* este piso vegetacional se muestrearon 40 sitios con una riqueza de 45 especies perennes. En la siguiente tabla se listan las especies asociadas al piso.

Especie	Asociación
Senecio hakeaefolius	significativo
Adesmia microphylla	importante
Eupatorium salvium	importante
Echinopsis chiloensis	importante
Colletia hystrix	importante
Schinus polygamus	importante
Heliotropium stenophyllum	importante
Schinus latifolius	importante
Baccharis linearis	importante
Bromus berterianus	importante
Colliguaja odorifera	importante
Llagunoa glandulosa	importante
Nolana crassulifolia	importante
Fabiana imbricata	importante
Puya berteroniana	importante

11. IMPLEMENTACIÓN

Participación Comunitaria

La restauración ecológica es una actividad con diferentes escalas espaciales y temporales, en las cuales las perturbaciones de origen antrópico juegan un papel importante. La pérdida de los servicios ecosistémicos tiene importantes efectos en las comunidades que utilizan el territorio, por lo tanto, su involucramiento es fundamental. Por ello es de gran importancia que la gente participe activamente en los proyectos de restauración desde su formulación, lo cual puede garantizar su continuidad y consolidación.

La recepción, aceptabilidad y empoderamiento que tendría el eventual programa de restauración en función del entorno socioecológico que prevalezca en el área a utilizar es una condición necesaria para lograr que las comunidades locales se apropien de las labores de restauración y de esta manera garantizar la continuidad del proceso (Figura 10).



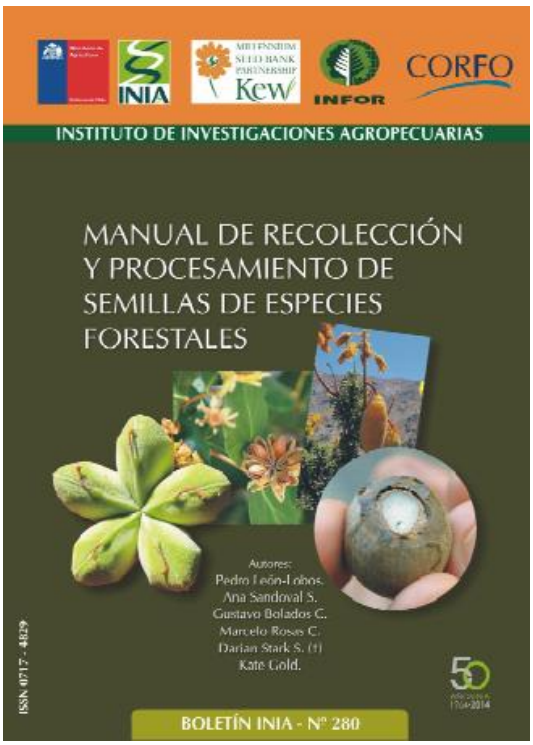
(Proyecto de Manejo Sustentable de la Tierra (MST) Corporación Nacional Forestal CONAF. Corredor de Conservación R. N. Las Chinchillas-Derecho Real de Conservación EL Durazno)

Figura 10
PROCESO DE CONSENTIMIENTO LIBRE, PREVIO E INFORMADO (CPLI)
SECTOR HUINTIL, HACIENDA ILLAPEL

Recolección de Semillas y Propagación

Considerando la existencia de cierta correlación entre el tamaño poblacional y la diversidad genética, el problema central en una estrategia de muestreo para recolectar germoplasma es definir el tamaño de muestra mínimo que contenga la diversidad genética representativa deseada. A nivel poblacional, lo ideal es recolectar semillas de entre 50-100 individuos muestreados al azar, para recoger gran parte, si no toda la diversidad genética presente. Sin embargo, en el caso de especies en peligro de extinción o fragmentos de una formación xerofítica remanente, es normalmente difícil obtener estos valores. En estos casos, un tamaño de muestra de 15 o 10 plantas por población es lo mínimo recomendable. Por supuesto, estos valores deben ser aumentados dependiendo del material disponible en el campo.

Otro criterio importante para la colecta de semillas es la calidad del material recolectado. Esto se refiere, semillas viables, enteras y libre de insectos y patógenos. Para asegurar la calidad, es importante recolectar semillas maduras, momentos antes o durante la etapa de dispersión o cosecha (Figura 11).



(www.infor.cl)

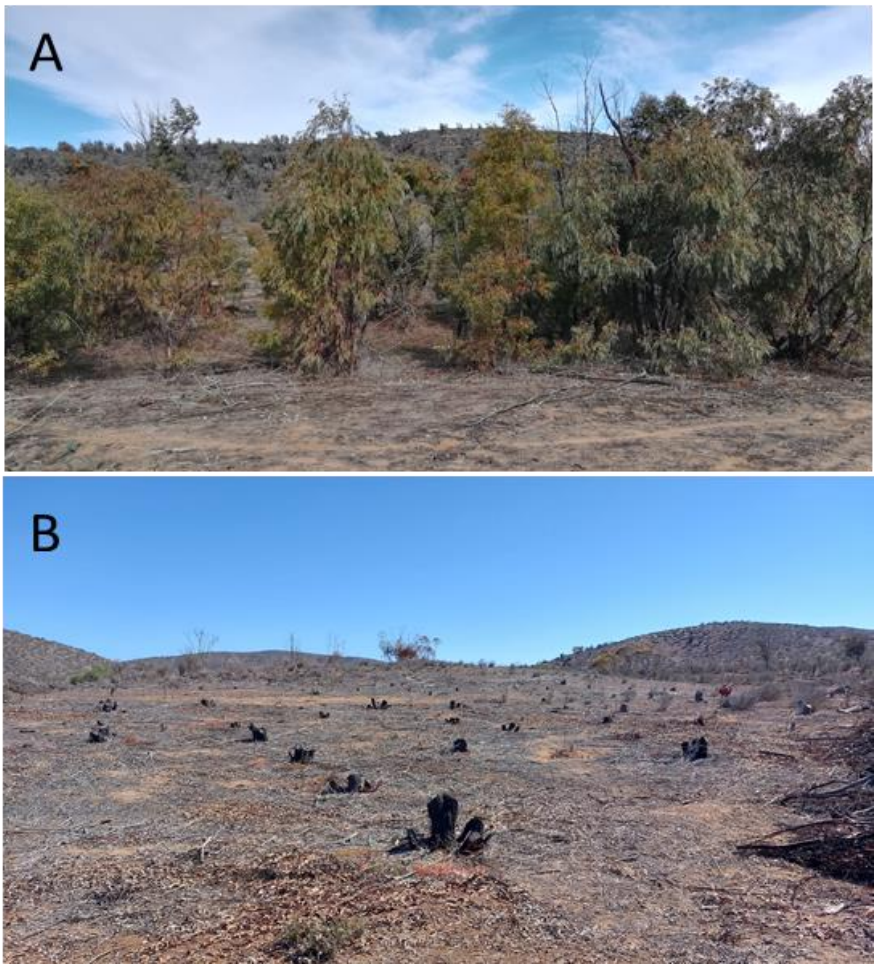
Figura 11
MANUAL DE RECOLECCIÓN DE GERMOPLASMA DISPONIBLE Y DE USO PÚBLICO.

Selección de Sitios para Restauración

La selección de sitios para restauración debe hacerse cuidadosamente, en esta etapa ya se conoce lo que sucede a diferentes escalas y se tiene conocimiento del ecosistema a recrear. En la etapa se evalúa principalmente el estado del suelo a escalas locales y de parcela. Algunos de los criterios de selección de sitios son su accesibilidad, cercanía de asentamientos humanos, estado del suelo e hidrología, condición edáfica, régimen de perturbaciones, proximidad a alguna fuente hídrica de dimensiones suficientes que asegure el abastecimiento de agua permanente en el o los sectores recreados, entre otras (Figuras 12 y 13).



Figura 12
FORMACIÓN CARACTERÍSTICA DEL MATORRAL XEROFÍTICO
EN EL PARQUE NACIONAL FRAY JORGE



(A: bosquete de *Eucalyptus spp.* y B: terreno con el bosque removido)

Figura 13
SITIO AL INTERIOR DEL PARQUE NACIONAL FRAY JORGE
DESTINADO A RESTAURACIÓN

Densidad de Plantación y Distribución Espacial de Plantas

Las densidades de plantación se deben obtener mediante la evaluación de la capacidad de carga del ecosistema, medición que se debe realizar en las áreas prístinas a emular (Figura 14). La distribución espacial se obtiene de igual manera desde los ecosistemas prístinos mediante la medición de los distanciamientos entre individuos (Figura 15).

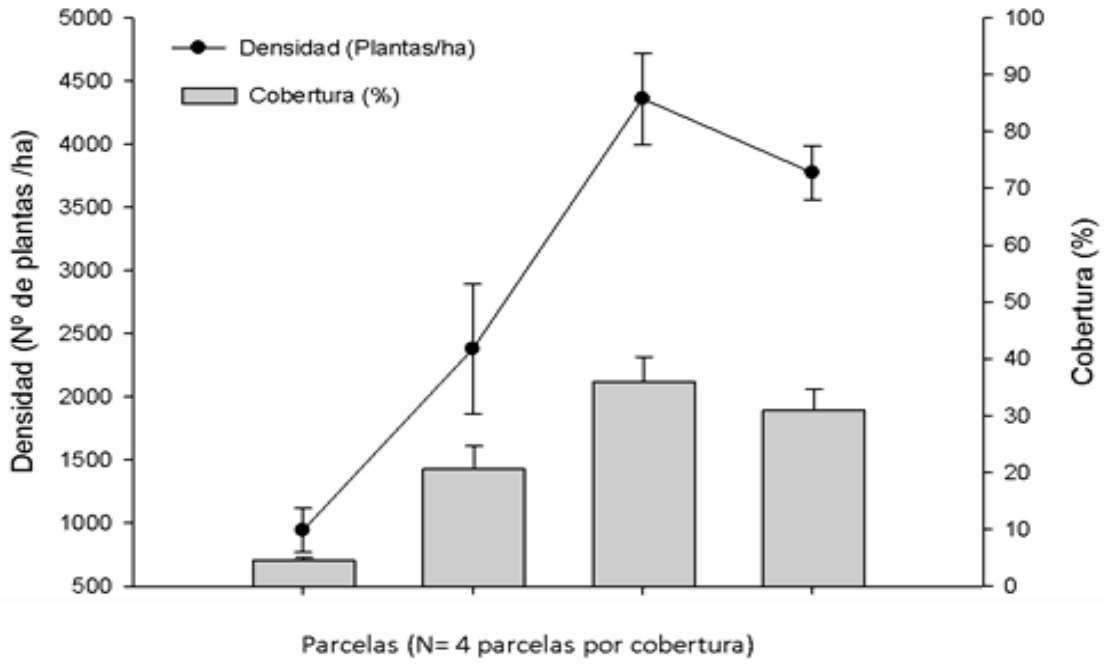
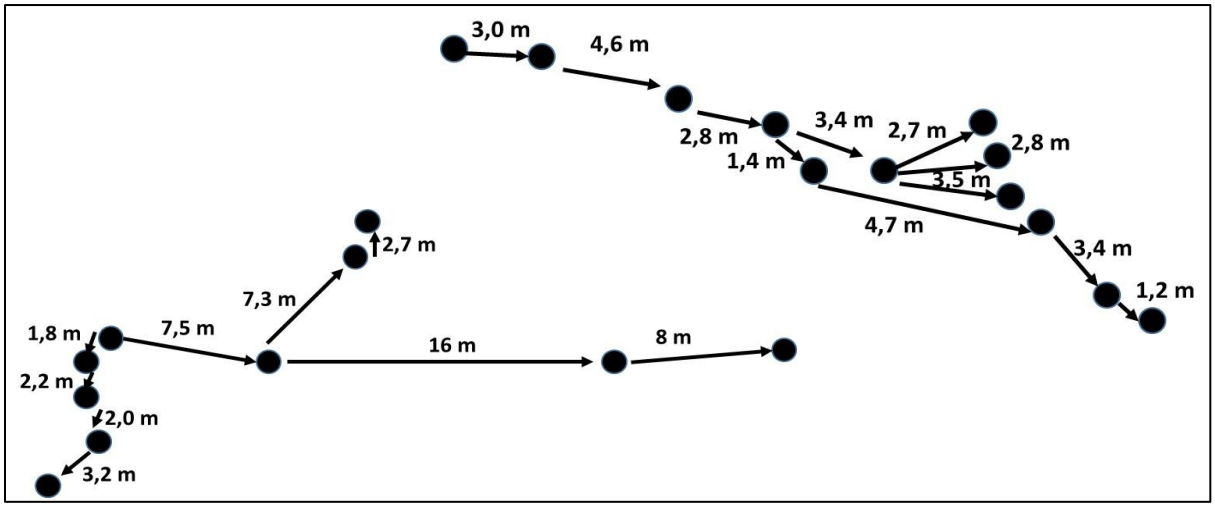


Figura 14
CAPACIDAD DE CARGA EVALUADA EN 16 PARCELAS REALIZADAS EN LAS ÁREAS ALEDAÑAS AL ÁREA DESTINADA PARA RESTAURACIÓN EN EL PARQUE NACIONAL FRAY JORGE



(La configuración se obtuvo a través del distanciamiento entre vecinos próximos. Imagen espejo a emular en el área de restauración. Las medidas corresponden a las tomadas en terreno)

Figura 15
EJEMPLO DE CONFIGURACIONES DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL OBTENIDAS PARA *Encelia canescens*

Preparación del Sitio y Hoyadura

En el área a restaurar, dependiendo de su condición, se debe realizar una limpieza de las especies exóticas. En cuanto a las especies nativas se deberá evaluar su condición sanitaria y se deberá realizar poda o raleo controlado, teniendo especial cuidado con las especies que proveerán de protección a los individuos a ser plantados. Además, se deberá favorecer la retención de humedad mediante la adición, en la medida que el área lo permita, de obras de cosecha de aguas lluvias (Figura 16).



Figura 16
LABOREO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL ÁREA A RESTAURAR

La hoyadura dependerá del tamaño de las plantas y del pan de tierra en el cual se mantienen. Se debe preparar hoyos de una profundidad adecuada, teniendo especial cuidado en el mullido de la tierra en su interior. Se recomienda una dimensión de 40 x 40 x 40 cm para asegurar un mejor arraigamiento de la planta. En función de estas dimensiones el rendimiento esperado es en suelo blando de 25 hoyos/día/hombre y en suelo duro de 10 a 5 hoyos/día/hombre (Figura 17).



Figura 17
CONFECCIÓN DE HOYOS PARA PLANTACIÓN

Endurecimiento y Sanidad de las Plantas Propagadas en Vivero

Las plantas deberán sufrir el menor estrés posible durante el transporte al sitio elegido, se deberán transportar protegidas del viento y en contenedores que eviten su volcamiento o el desmembramiento del pan de tierra.

Para endurecer las plantas, se expondrán parcialmente al sol y se les disminuirá el riego al menos dos semanas antes de la plantación.

Las plantas deberán mantenerse permanentemente libres de toda clase de ataques de insectos, enfermedades, o cualquier otro organismo patógeno susceptible de ocasionar una alteración anormal en su crecimiento y desarrollo.

De ser indispensable se deberá realizar aplicaciones de pesticidas según lo demande la evolución de la sanidad de las plantas. Se debe instalar un cerco individual contra herbívoros (Figuras 18 y 19).

Riego

Debe contemplarse un programa de riego que considere el mejor sistema a utilizar según necesidades de cada especie, considerando como norma general una profundidad mínima de riego de 20 cm para árboles y arbustos.

En el caso del trabajo de restauración en el Parque Nacional Fray Jorge se utilizó riego profundo (Figura 18). La frecuencia de riego fue de 3 L cada 15 días, durante los primeros 6 meses.



Figura 18
PLANTAS CON MALLA PROTECTORA CONTRA HERBÍVOROS Y RIEGO PROFUNDO



Figura 19
PROTECCIÓN MALLA PROTECTORA CONTRA HERBÍVOROS Y RIEGO PROFUNDO

Etapas de Evaluación del Proceso de Restauración Ecológica

La evaluación del proceso de restauración ecológica es una fase crítica que permite medir el éxito de las intervenciones realizadas y ajustar las estrategias si es necesario. Esta etapa implica varias acciones clave:

1. **Establecimiento de Indicadores de Éxito:** Se definen criterios específicos que reflejan los objetivos de la restauración, como el establecimiento exitoso de la vegetación utilizad, la recuperación de la biodiversidad, la mejora de la calidad del suelo, la restauración de las funciones del ecosistema, y la estabilidad de las comunidades vegetales y animales.
2. **Monitoreo Continuo:** Se realiza un seguimiento regular de los indicadores definidos. Esto incluye la recolección de datos sobre la diversidad de especies, la cobertura vegetal, la salud del suelo, la calidad del agua, riego y otros parámetros relevantes.
3. **Análisis Comparativo:** Se comparan los datos obtenidos con las condiciones de referencia (pre-restauración) y con los objetivos establecidos. Esto ayuda a determinar si se están logrando las metas de restauración.
4. **Evaluación de Desempeño:** Se evalúa el desempeño de las diferentes prácticas y técnicas empleadas en el proceso de restauración. Esto incluye la identificación de factores que contribuyen al éxito o al fracaso de las intervenciones.
5. **Ajustes y Adaptaciones:** Basado en los resultados del monitoreo y análisis, se realizan ajustes en las estrategias de restauración. Esto puede implicar la modificación de técnicas, la reintroducción de especies, el control de especies invasoras, o cambios en la gestión del sitio.
6. **Informe de Resultados:** Se elabora un informe detallado que documenta los hallazgos, las lecciones aprendidas y las recomendaciones para futuras acciones de restauración.

Las fases y obras de restauración que utilizan sistemas de regeneración ecológicos necesitan, a diferencia de las obras civiles, un tiempo a partir de la ejecución durante el cual van actuando los procesos naturales. Además, estas labores están influenciadas por múltiples factores ambientales que determinan procesos dinámicos no siempre predecibles. Estos factores ambientales, como son los temporales, el viento y otros, condicionan el éxito y la homogeneidad de los resultados (Figura 19).

Las labores de mantenimiento consisten fundamentalmente en controlar y en promover la adecuada evolución y desarrollo de las plantaciones realizadas, con la reposición de las plantas que sea necesario realizar y comprobando que se adquieren

las coberturas y portes deseables con el paso del tiempo, manteniendo las condiciones de conservación y dinámica adecuadas.



Figura 19
TOMA DE MEDIDAS, REGISTRO DE DIÁMETRO Y ALTURA DE LAS PLANTAS

En términos generales, debe recalcarse la utilidad que tiene la metodología descrita en este manual, ya que establece los lineamientos básicos para la restauración de los procesos ecosistémicos. El proceso descrito tiene como base a la comunidad vegetal que debiese estar presente en el área perturbada y de esta manera restablecer la estructura, el funcionamiento, la diversidad y las dinámicas del ecosistema específico.

Se debe reiterar la importancia de la utilización de las diferentes herramientas en el estudio y posterior elaboración de protocolos de trabajo, así como la gran cantidad de usos y aplicaciones. Destacar, por ejemplo, en el caso de la restauración ecológica, la complementación de datos de terreno con modelos generados a partir de imágenes satelitales, sumado a la utilización de modelos de probabilidad de distribución de especies, herramientas que al unirlas entregan información mucho más robusta para saber dónde enfocar los esfuerzos en restauración ecológica. Esto gracias al índice SAVI, que entrega información precisa de la ubicación de los lugares

con vegetación xerofítica en 4 categorías desde muy bueno (alta riqueza y cobertura), pasando por bueno, regular y llegando hasta la categoría malo (baja riqueza y cobertura). Junto a esto, los modelos de probabilidad de distribución permiten corroborar los sitios con mayor probabilidad de presencia de las especies que componen la comunidad formación xerofítica, tanto en las condiciones actuales como bajo escenarios de cambio climático.

¿Qué Sucede si la Restauración Ecológica No Tiene Éxito?

Si el proceso de restauración ecológica no tiene éxito, pueden ocurrir varias consecuencias negativas:

1. **Pérdida de Biodiversidad:** La falta de éxito puede llevar a una continua o mayor pérdida de biodiversidad, afectando negativamente las especies nativas y sus hábitats.
2. **Degradación del Ecosistema:** La incapacidad de restaurar las funciones del ecosistema puede resultar en la degradación continua del suelo, la calidad del agua y otros recursos naturales, afectando la salud y la productividad del ecosistema.
3. **Invasión de Especies No Nativas:** Un proceso de restauración fallido puede dar lugar a la invasión de especies exóticas que desplazan a las especies nativas, alterando las dinámicas del ecosistema.
4. **Impacto Económico:** Los recursos invertidos en el proceso de restauración pueden ser desperdiciados si no se logran los objetivos, y puede haber costos adicionales asociados con la necesidad de implementar nuevas estrategias de restauración.
5. **Desconfianza en los Proyectos de Restauración:** El fracaso puede disminuir la confianza de las comunidades locales, financiadores y otras partes interesadas en futuros proyectos de restauración.
6. **Necesidad de Revaluación:** El fracaso puede requerir una revaluación completa del enfoque, incluyendo una investigación más profunda sobre las causas del fracaso y el desarrollo de nuevas estrategias basadas en un mejor entendimiento del ecosistema y sus necesidades.

En resumen, la etapa de evaluación es esencial para asegurar que el proceso de restauración ecológica esté en camino de alcanzar sus objetivos. Si no tiene éxito, se requiere una reflexión crítica y adaptativa para abordar los desafíos y reorientar los esfuerzos hacia el éxito futuro.

12. REFERENCIAS

Bannister, J. R.; Vargas-Gaete, R.; Ovalle, J. F.; Acevedo, M.; Fuentes-Ramirez, A.; Donoso, P. J.; Promis, A. y Smith-Ramírez, C. (2018). Major bottlenecks for the restoration of natural forests in Chile. Restoration Ecology 26: 1039–1104.

Caldwell, M.; Dawson, T. y Richards, J. (1998). Hydraulic lift: consequences of water efflux from the roots of plants. Oecologia. 131: 151-161.

CIREN. (2010). Determinación de la erosión actual y potencial de los suelos de Chile : Región de Coquimbo. https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/2059 (Visitada en septiembre 2022).

De Caceres, M.; Legendre P.; Wiser S. y Brotons L. (2012). Using species combinations in indicator value analyses. Methods in Ecology and Evolution 3: 973–982.

Ehrenfeld, J. G. (2000). Defining the Limits of Restoration: The Need for Realistic Goals. Restoration Ecology 8: 1-9.

Gutiérrez J. y Squeo, F. (2004). Importancia de los arbustos leñosos en los ecosistemas semiáridos de Chile. Ecosistemas. 13(1).

Hobbs, R. J. y Harris, J. A. (2001). Restoration Ecology: Repairing the Earth's Ecosystems in the New Millennium. Restoration Ecology 9: 239–246.

Horton, J. y Hart, S. (1998). Hydraulic lift: a potentially important ecosystem process. Trends in Ecology & Evolution 13 (6): 232 – 235.

Lake, P. S. (2001). On the maturing of restoration: Linking ecological research and restoration. Ecological Management & Restoration 2: 110-115.

León, M. y Squeo, F. (2004). Levantamiento hidráulico: La raíz del asunto. Fisiología Ecológica en Plantas: Mecanismos y Respuestas a Estrés en los Ecosistemas Ediciones Pontificia Universidad Católica de Valparaíso Valparaíso CL. 99-109 (2004).

Luebert, F. y Pliscoff, P. (2006). Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile. Santiago de Chile: Editorial Universitaria.

Santander, A. (2003). Norte chico (Chile). Consumo de combustibles en el procesamiento de los minerales de cobre y su impacto sobre los recursos arbóreos y arbustivos: 1601 - 1900. (Livenais, P. y Aranda, X dinámica de los ecosistemas agrarios en Chile árido: La Región de Coquimbo LOM Ediciones Ltda La Serena Chile. 5: 159-177.

Shachak, M.; Sachs, M. y Moshe, I. (1998). Ecosystem management of desertified shrublands in Israel. Ecosystems 1: 475-483.

Squeo, F.; Olivares, S.; Olivares, N.; Pollastri, A.; Aguirre, E.; Aravena, R.; Jorquera, C. y Ehleringer, J. (1999). Grupos funcionales en arbustos desérticos definidos en base a las fuentes de agua utilizadas. Gayana Botánica 56: 1-15.

Squeo, F.; Tracol, Y.; Lopez, D. y Gutiérrez, J. (2009). Vegetación nativa y variación temporal de la productividad en la Provincia del Elqui. In (J. Cepeda ed.) “Los sistemas Naturales de la Cuenca del Río Elqui (Región de Coquimbo Chile) Vulnerabilidad y Cambio del Clima” Ediciones Universidad de La Serena. 162-185.

SER. (2004). The SER primer on ecological restoration. Society for Ecological Restoration, Science and Policy Working Group. https://www.ser.org/page/SERDocuments.

Stanturf, John A. (2005). What is forest restoration?. Restoration of boreal and temperate forests CRC Press Boca Raton p. 3-11.