

GUÍAS TÉCNICAS PARA LA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA DE LOS ECOSISTEMAS DE COLOMBIA

**Grupo de Restauración Ecológica
GREUNAL**



**Orlando Vargas Ríos
Julián Esteban Díaz Triana
Sandra Paola Reyes Bejarano
Pilar Angélica Gómez Ruiz**



Ministerio de Ambiente
y Desarrollo Sostenible
República de Colombia



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA
SEDE BOGOTÁ
FACULTAD DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA
GRUPO DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA



ACCEFYN

**GUÍAS TÉCNICAS
PARA LA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA
DE LOS ECOSISTEMAS DE COLOMBIA**

**Grupo de Restauración Ecológica
GREUNAL**

**Departamento de Biología
Facultad de Ciencias
Universidad Nacional de Colombia**

GUÍAS TÉCNICAS PARA LA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA DE LOS ECOSISTEMAS DE COLOMBIA

**Convenio de Asociación No. 22
entre Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT)
y Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
(ACCEFYN)**

**Orlando Vargas Ríos
Julián Esteban Díaz Triana
Sandra Paola Reyes Bejarano
Pilar Angélica Gómez Ruiz**

**Grupo de Restauración Ecológica
GREUNAL**

**Departamento de Biología
Facultad de Ciencias
Universidad Nacional de Colombia**



Libertad y Orden

**Ministerio de Ambiente
y Desarrollo Sostenible**

República de Colombia



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

SEDE BOGOTÁ

FACULTAD DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA

GRUPO DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA



ACCEFYN

**Bogotá D. C.
2012**

GUÍAS TÉCNICAS PARA LA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA DE LOS ECOSISTEMAS DE COLOMBIA

Convenio de Asociación No. 22
entre Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT)
y Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN)

© Departamento de Biología
Facultad de Ciencias
Universidad Nacional de Colombia

© Orlando Vargas Ríos
Julián Esteban Díaz Triana
Sandra Paola Reyes Bejarano
Pilar Angélica Gómez Ruiz

Grupo de Restauración Ecológica GREUNAL

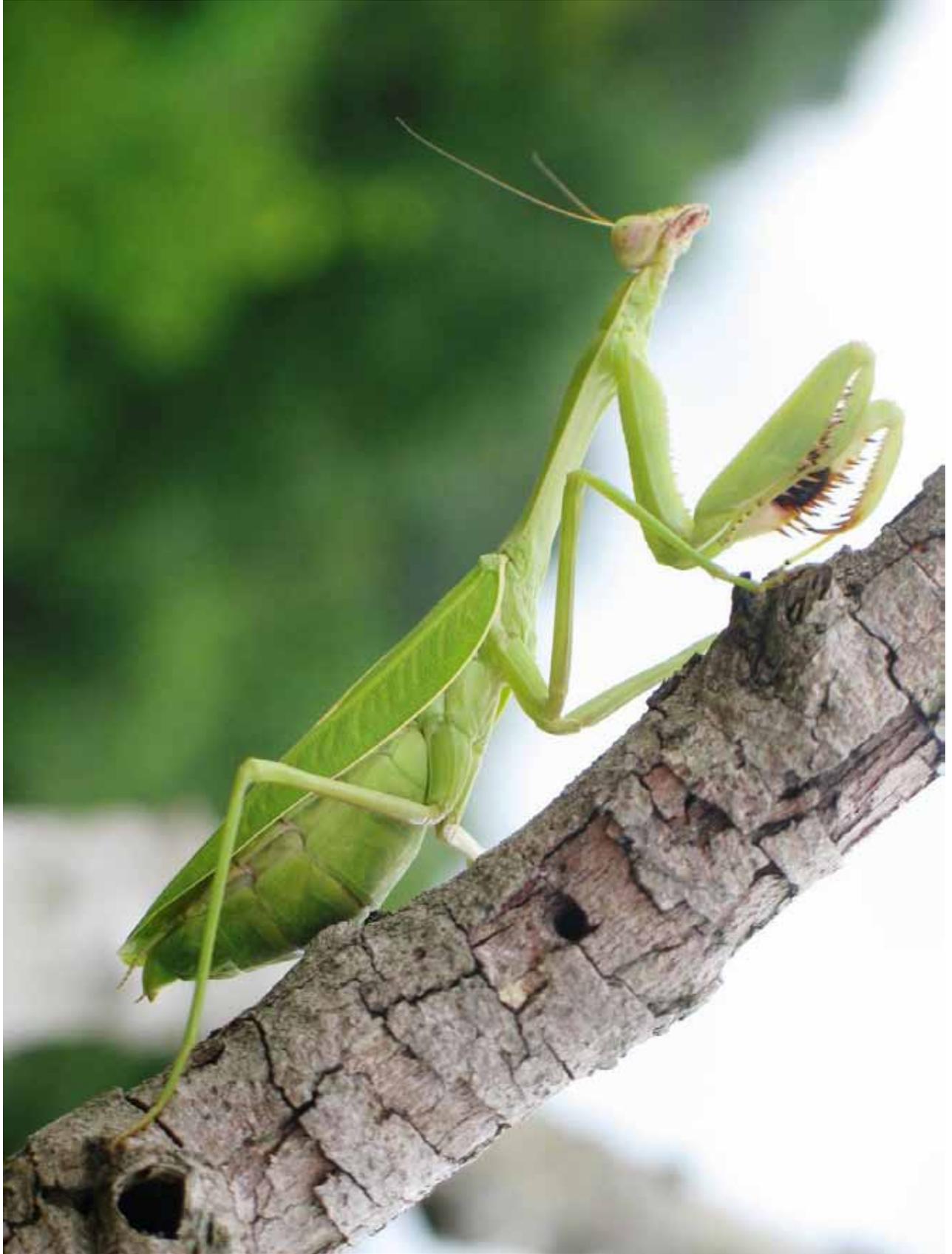
Bogotá D. C.
2012



TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
I PARTE	
Los pasos fundamentales de la restauración ecológica	
Introducción	9
II PARTE	
Ecosistemas Terrestres	
Introducción	41
1. Páramos	43
2. Bosques	53
3. Sabanas	72
4. Zonas secas	82
III PARTE	
Ecosistemas Acuáticos	
Introducción	93
1. Humedales	96
2. Ríos y bosques riparios	103
IV PARTE	
Sistemas Costeros	
Introducción	113
1. Manglares	116
2. Ecosistemas coralinos	121
3. Praderas de pastos marinos	126





PRESENTACIÓN

La Restauración Ecológica se concibe como la práctica de restaurar ecosistemas, en este sentido la presente guía técnica es una síntesis conceptual y metodológica basada en experiencias desarrolladas en muchos ecosistemas del mundo, con énfasis en los ecosistemas tropicales terrestres y acuáticos.

El presente documento se divide en cuatro partes: en la primera parte se desarrollan los pasos más comunes que siguen los proyectos de restauración, con explicaciones conceptuales que contribuyen a la comprensión de los procesos, procedimientos y técnicas. Se recomienda leer cuidadosamente esta primera parte para tener una visión integral del proceso, fijar metas, formular objetivos y precisar escalas.

La segunda parte presenta las guías técnicas para la restauración ecológica de ecosistemas terrestres de Colombia, comenzando con los páramos y ecosistemas boscosos (andinos, húmedos y secos), posteriormente se presentan las sabanas y finalmente las zonas secas.



En la tercera parte se desarrollan los ecosistemas acuáticos. Primero se hace una introducción general dadas las particularidades de estos ecosistemas y posteriormente se desarrollan las guías técnicas para la restauración de humedales, ríos y bosques riparios.

En la cuarta y última parte se presentan los ecosistemas costeros con énfasis en manglares, corales y praderas de pastos marinos. Esta parte inicia, como la anterior, con una introducción general a la particularidad de los ecosistemas costeros.

Esperamos que estas Guías Técnicas contribuyan de una forma efectiva en el desarrollo práctico y conceptual de la restauración ecológica en Colombia.

Agradecemos a todas las personas e instituciones que colaboraron en la revisión del texto.

**Grupo de Restauración Ecológica
GREUNAL
Departamento de Biología
Universidad Nacional de Colombia**

I. PARTE

LOS PASOS FUNDAMENTALES EN LA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA



INTRODUCCIÓN

Un ecosistema es un área de cualquier tamaño, con una estrecha relación o asociación de sus componentes físicos (abióticos) y biológicos (bióticos) y organizado de tal manera que si cambia un componente, o subsistema, cambian los otros componentes y en consecuencia el funcionamiento de todo el ecosistema.

Los ecosistemas se recuperan por sí solos cuando no existen tensionantes o barreras que impidan su regeneración. Si en un ecosistema degradado se eliminan estos tensionantes, se iniciará su regeneración natural; este proceso también se conoce como restauración pasiva o sucesión natural. Es por esto que una de las primeras acciones para recuperar un ecosistema es retirar los factores que impiden la expresión de los mecanismos de regeneración natural.

Cuando los ecosistemas están muy degradados o destruidos, han perdido sus mecanismos de regeneración y en consecuencia, es necesario ayudarles o asistirlos en su recuperación, a estas acciones se las denomina restauración activa o asistida (sucesión dirigida o asistida). Ésta implica, que con ayuda humana, se asista o ayude al ecosistema para garantizar el desarrollo de los procesos de recuperación y superar los tensionantes que impiden la regeneración.

La capacidad de restaurar exitosamente un ecosistema dependerá de gran cantidad de conocimientos, como por ejemplo: el estado del ecosistema antes y después del disturbio, el grado de alteración de la hidrología, la geomorfología y los suelos, las causas por las cuales se generó el daño; la información acerca de las condiciones ambientales regionales, la interrelación de factores de



carácter ecológico, cultural e histórico; la disponibilidad de la biota nativa necesaria para la restauración, las trayectorias sucesionales de la vegetación y su composición de especies y el papel de la fauna en los procesos de regeneración.

El éxito en la restauración también dependerá de los costos, las fuentes de financiamiento, la voluntad política de las instituciones interesadas en la restauración; pero ante todo de la colaboración y participación de las comunidades locales en los proyectos.

Es muy importante desarrollar la restauración ecológica en áreas con una situación clara en cuanto a la propiedad de la tierra, puesto que si se desarrollan proyectos, en medio de conflictos de propiedad de predios, todos los esfuerzos de restauración pueden perderse.

¿CÓMO EMPEZAR UN PROCESO DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA?

Al escoger un área para restaurar se puede presentar una gran variedad de factores, tanto naturales como sociales, de los que dependerán las acciones a realizar, las cuales serán diferentes para cada sitio dentro de un mismo ecosistema; por ejemplo, sectores muy cercanos unos de otros tienen una historia de transformación y de uso actual muy diferente, como es el caso de áreas sometidas a agricultura y/o pastoreo, con plantaciones forestales de especies exóticas, áreas con especies invasoras, áreas quemadas y/o pastoreadas, o erosionadas y utilizadas para minería, de manera que se presenta una gran heterogeneidad ambiental y una historia de uso difícil de reconstruir. Otras áreas han sido tan modificadas que no presentan relictos o fragmentos del ecosistema original.

Aunque no existen recetas para restaurar un ecosistema, por la particularidad intrínseca de cada sitio, sí existen recomendaciones generales basadas en las teorías y conceptos de la Ecología de la Restauración y en las experiencias acumuladas en los intentos de restaurar diferentes ecosistemas en el mundo.



Preguntas centrales durante el proceso de restauración ecológica

- ¿Cómo establecer el tipo de ecosistema que se va a restaurar?
- ¿Cuáles son los conocimientos básicos para iniciar un proceso de restauración?
- ¿Cuáles son los factores tensionantes que impiden la regeneración natural de los sitios a restaurar y cómo se pueden superar?
- ¿Cómo lograr la participación de las comunidades locales en todo el proceso?
- ¿Qué variables se pueden monitorear, para saber si la restauración se está desarrollando?
- ¿Cómo garantizar la continuidad del proyecto a largo plazo?

A continuación se presentan 13 pasos para tener en cuenta en un proyecto de restauración ecológica. No se trata de una receta para restaurar, sino de una forma de pensar e interpretar la complejidad y particularidad de los sitios a restaurar. Los pasos propuestos no necesariamente se deben seguir en el mismo orden, ni es necesario aplicarlos en su totalidad, todo depende de la particularidad de los sitios, el grado de alteración, de las escalas espaciales y los objetivos propuestos.



13 PASOS A TENER EN CUENTA EN LA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA

1. Definir el ecosistema o comunidad de referencia.
2. Evaluar el estado actual del ecosistema que se va a restaurar.
3. Definir las escalas y niveles de organización.
4. Establecer las escalas y jerarquías de disturbio.
5. Lograr la participación comunitaria.
6. Evaluar el potencial de regeneración del ecosistema.
7. Establecer los tensionantes para la restauración a diferentes escalas.
8. Seleccionar las especies adecuadas para la restauración.
9. Propagar y manejar las especies.
10. Seleccionar los sitios.
11. Diseñar acciones para superar los tensionantes para la restauración.
12. Monitorear el proceso de restauración.
13. Consolidar el proceso de restauración

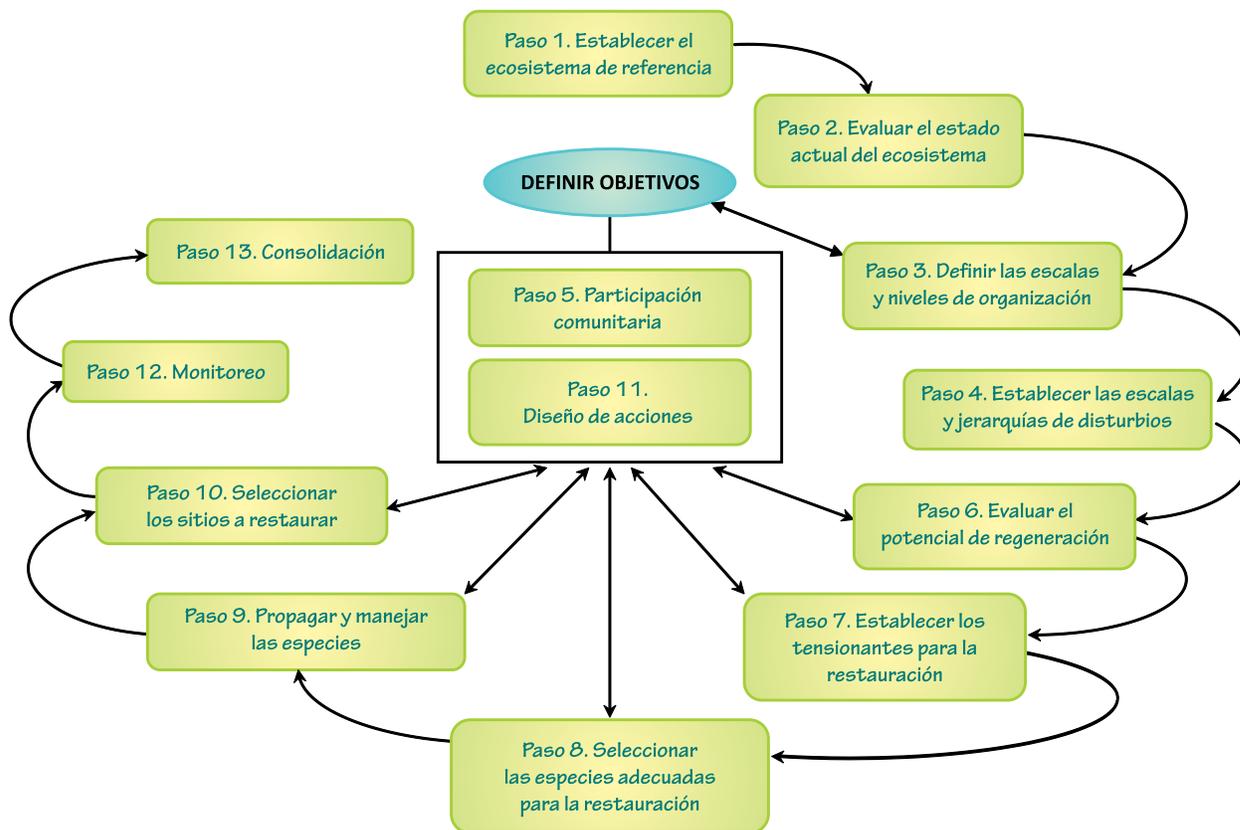


Figura 1. Secuencia y relaciones de los 13 pasos fundamentales en la restauración ecológica (Vargas 2007).

En la Figura 1 se presenta la secuencia de los 13 pasos fundamentales en la restauración ecológica. La participación comunitaria es muy importante en todo el proceso de restauración y el diseño de acciones se va retroalimentando con los conocimientos derivados de los pasos 6 a 10.

PASO 1. DEFINIR EL ECOSISTEMA DE REFERENCIA

El ecosistema de referencia sirve de modelo para planear un proyecto de restauración y más adelante, para su evaluación. No siempre es fácil identificar este referente pero la reconstrucción con base en la información de diferentes fuentes, puede dar mayor certeza de las condiciones anteriores a los disturbios. A continuación se presentan siete recomendaciones para establecer el ecosistema de referencia (SER 2004, Vargas 2007):

1. *Revisión de descripciones ecológicas y listas de especies antes de la perturbación.* Algunas de las fuentes que deben ser consultadas son: revistas científicas (Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Revistas: *Caldasia*, *Acta Biológica Colombiana* y *Biota Colombiana*, entre otras); Sistemas de Información Geográfica y Biológica como el Sistema Nacional Ambiental (SINA) y Sistema de Información sobre Biodiversidad de Colombia (SiB). Bases de datos de herbarios nacionales e internacionales (por ejemplo: Colecciones en línea del Instituto de Ciencias Naturales: <http://www.biovirtual.unal.edu.co/ICN/> y la página web Trópicos: <http://www.tropicos.org/>).
2. *Revisión de fotografías históricas y recientes, tanto aéreas como terrestres y mapas del sitio del proyecto antes del daño.* Buscar series de fotografías aéreas (Instituto Geográfico Agustín Codazzi) para estudiar la transformación del ecosistema y buscar relictos del ecosistema de referencia. Otras fuentes de información son: IDEAM, INGEOMINAS, Instituto Humboldt.
3. *Ubicación de remanentes del sitio que se va a restaurar que indiquen las condiciones físicas anteriores y la biota.* En los paisajes aun quedan relictos o parches de la vegetación original, que pueden indicar trayectorias sucesionales posibles del ecosistema original y que tienen una muestra importante de las especies sucesionales tempranas y tardías del ecosistema original.
4. *Revisión de descripciones ecológicas y listas de especies de ecosistemas similares e intactos.* Con base en la información de especímenes de herbario y museos. Los herbarios de Colombia, principalmente del Herbario Nacional Colombiano (COL), y los herbarios regionales como el PSO (Pasto) CAUP (Popayán), CUVC (Cali), LLANOS (Villavicencio), HUA (Antioquia), herbario amazónico COAH (Bogotá), JAUM (Antioquia), FMB (Villa de Leiva), ya que albergan mucha información sobre especies y su distribución. Adicionalmente la información proveniente de los institutos de investigación como: Instituto de Ciencias Naturales (ICN), Instituto Alexander Von Humboldt (IAvH), Instituto de Estudios Ambientales y Meteorología (IDEAM), Instituto de Investigaciones del Pacífico (IIAP), Instituto de Investigaciones Amazónicas (SINCHI) e Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR).
5. *Revisión de versiones históricas e historias orales de personas familiarizadas con el sitio del proyecto antes del daño.* Los cronistas de Indias, los viajeros y naturalistas, la Expedición Botánica, la Comisión Corográfica aportan muchos datos interesantes sobre distribución de plantas, que pueden ayudar a establecer tipos de vegetación que existieron en un lugar determinado. La reconstrucción por tradición oral, cuando es relativamente reciente, es una gran fuente de información de especies y su distribución.
6. *Evidencias paleoecológicas y paleohidrológicas.* En Colombia gracias a los trabajos del Dr. Thomas van de Hammen y colaboradores, se tiene una muy buena bibliografía de la historia de clima y vegetación de casi todos los grandes biomas (véase por ejemplo van der Hammen 1992 y las publicaciones de la serie EL CUATERNARIO DE COLOMBIA). En el caso de la paleohidrología, son necesarios levantamientos de información primaria, que se pueden complementar con estudios realizados por INGEOMINAS y estudios geológicos e hidrológicos.

PASO 2. EVALUAR EL ESTADO ACTUAL DEL ECOSISTEMA

En este paso se hace una evaluación de las condiciones previas y actuales del ecosistema. En esta fase se empieza a tener evidencia del problema para poder precisar posteriormente los objetivos de restauración. A continuación se presentan algunas recomendaciones para evaluar los atributos del estado actual del ecosistema:



CONDICIONES DEL PAISAJE

- a. Ubicación de relictos o parches del ecosistema original.
 - Número de parches, tamaño, forma, conectividad. En el caso de los ecosistemas acuáticos, es importante tener una visión de la cuenca en aspectos como la geomorfología, con el fin de definir el estado de la hidrodinámica; también es importante definir los componentes determinantes del flujo de agua, así como sus entradas y salidas, para determinar el estado hidráulico del ecosistema y su conectividad.
- b. Tipos de usos de la tierra donde se encuentran los relictos (potreros, cultivos, plantaciones). Usos de la tierra en un ciclo anual y su relación con las áreas a restaurar.

CONDICIONES BIÓTICAS

- a. Tipos de comunidades: Composición de especies, dinámica de la vegetación (tipos de sucesiones ecológicas: herbáceas, epífitas, arbustivas, arbóreas, estratificación).
- b. Ubicación de poblaciones de especies sucesionales tempranas y tardías.
- c. Fauna dispersora de semillas.
- d. Biota en el suelo.

CONDICIONES ABIÓTICAS

- a. Estado del suelo y el agua: Valoración físico-química, contaminación, erosión, niveles freáticos.
- b. Topografía, hidrodinámica, hidrología y geomorfología: Flujo de agua superficial, hidrodinámica estacional, hidroperiodo, cambios en niveles freáticos, acumulación de sedimentos, tipos de pendientes, batimetría y grado de inclinación de las orillas. Sedimentos (caracterización, tiempo y velocidad de depósito, cantidad).
- c. Clima regional: distribución de las precipitaciones, duración de la estación seca, fluctuaciones diarias de las temperaturas, frecuencia de heladas.

PASO 3. DEFINIR LAS ESCALAS Y NIVELES DE ORGANIZACIÓN

Los proyectos de restauración ecológica abarcan diferentes niveles de organización, desde poblaciones de especies y comunidades hasta ecosistemas o paisajes (Ehrenfeld 2000, Lake 2001). En cada nivel se definen objetivos de trabajo diferentes y consecuentemente los procesos críticos que se deben tener en cuenta para la restauración, cambian según la escala y el nivel de análisis. Para definir los objetivos de un proyecto de restauración es necesario primero precisar escalas y su relación con los niveles de organización.

- **Escala local y Nivel de especie**

Esta aproximación pretende la recuperación de poblaciones de una especie en particular, tratando principalmente de recrear el hábitat de dicha especie. La ventaja de esta aproximación es que posee un objetivo muy claro, que es el rescate mismo de la especie (Ehrenfeld 2000). Las especies clave deben ser prioridad, pues de ellas depende la persistencia de una gran cantidad de organismos. En algunos proyectos es necesario iniciar proyectos a una escala de parcela, principalmente en el caso de las plantas.

- **Escala local y Nivel de comunidad**

La restauración a nivel de comunidades hace énfasis en el restablecimiento de la comunidad original, especialmente con fines de preservación de comunidades raras o en peligro de extinción, o la restauración de trayectorias sucesionales de especies pioneras. La restauración de comunidades constituye el enfoque primario de una parte importante de los esfuerzos de restauración en la actualidad (Ehrenfeld 2000), para lo cual la teoría de la sucesión ecológica y su aplicación constituyen su base. Cuando es necesario hacer experimentos haciendo combinación de especies es necesario trabajar a escala de parcela con diseños de tratamientos.

- **Escala Regional o Nivel ecosistémico**

En la actualidad, la escala a la cual se recomienda establecer los objetivos para la restauración es la escala regional a nivel de ecosistema, en este caso el objetivo de la restauración es principalmente la recuperación de algunas funciones del ecosistema. Esta visión implica que lo que se debe retornar a su estado predisturbio, son las condiciones ecológicas que garantizan la recuperación de la composición, estructura y función del ecosistema, integrando los procesos a gran escala con los de pequeña escala (Herrick *et al.* 2006). La perspectiva ecosistémica posee la ventaja de que permite visualizar todos los procesos fundamentales de funcionamiento de un ecosistema, especialmente en los procesos ligados a las sucesiones naturales (Cairns 1987).

- **Escala de Paisaje**

La restauración a escala de paisaje implica la búsqueda de la reintegración de ecosistemas fragmentados y paisajes, más que el enfoque sobre un único ecosistema. De hecho, aún si el objetivo de la restauración es planteado a escala ecosistémica, se requiere una visión del proceso a una escala de paisaje, puesto que las funciones ecosistémicas están relacionadas con flujos de organismos, materia y energía entre las diferentes unidades del paisaje (SER 2004). Sin embargo, para la mayoría de paisajes un retorno completo a la situación histórica es poco probable, dado el cambio constante de los procesos que definen el desarrollo de comunidades y ecosistemas (van Diggelen *et al.* 2001).



Definición de objetivos

A partir del paso 3 se van precisando los objetivos del proyecto de restauración y sus escalas. Se va definiendo el estado deseado dentro de las trayectorias sucesionales posibles del ecosistema. Cuando el proyecto es de escala regional es importante que inicien activamente su participación las comunidades locales para definir los objetivos.

Los objetivos se deben establecer con mucha claridad para lograr que el proyecto tenga éxito en términos de efectividad y costos. Para lo cual es indispensable definir con la mayor precisión posible el tipo de influencias externas.

Un aspecto importante para la definición de los objetivos se relaciona con el presupuesto destinado para el desarrollo del proyecto de restauración, ya que de estos recursos depende la extensión del área a intervenir, el personal contratado para las

diversas funciones, la cantidad de acciones que puedan ser implementadas y el tiempo que dure la implementación, evaluación y monitoreo. Los presupuestos pueden variar dependiendo del objetivo de la restauración ya que si sólo se trata de una recuperación o rehabilitación implica menos inversión en rescatar el ecosistema con toda su estructura y funcionalidad.

En algunos proyectos es necesario hacer investigación básica y es necesario tenerlo en cuenta en los costos, en otros proyectos es necesario contratar muchos jornales para la siembra de especies, remoción de plantas invasoras y adecuación de las áreas, construcción y mantenimiento de viveros para la propagación y crecimiento de plantas nativas. En general hay que tener en cuenta los costos de personal, pago de jornales, compra de materiales, construcciones si son necesarias y pago de transportes. Es muy importante poder evaluar la relación costo-efectividad de diferentes técnicas de restauración.



PASO 4. ESTABLECER LAS ESCALAS Y JERARQUÍAS DE DISTURBIO

Todos los ecosistemas están sujetos a un régimen de disturbios naturales y antrópicos, la combinación de éstos establece una dinámica espacial y temporal en los paisajes (Pickett & White 1985, Collins 1987). Por ejemplo, algunos ecosistemas presentan un régimen de disturbio complejo que incluye fuego, pastoreo y disturbio del suelo por animales; cada uno de los cuales difiere en escala, frecuencia e intensidad.

Los principales disturbios naturales son: deslizamientos, vulcanismo, huracanes, tormentas, lluvias y vientos fuertes, inundaciones, heladas, cambio climático (fenómeno del Niño), fuego, sequía y procesos erosivos, disturbios producidos por animales y fuegos naturales. Los disturbios antrópicos se relacionan con ganadería y agricultura, minería, deforestación, quemas, la construcción de obras civiles (embalses, oleoductos y carreteras), explotación de especies, siembra de especies forestales exóticas e invasiones biológicas. La tabla 1 presenta los disturbios antrópicos y naturales más frecuentes en los ecosistemas colombianos.

Tabla 1. Principales disturbios antrópicos y naturales en los ecosistemas de Colombia.

Disturbios Antrópicos	Ecosistemas Terrestres	Ecosistemas de Agua Dulce	Ecosistemas Costeros
Sistemas de producción extensiva e intensiva (Agricultura y Ganadería)			
Deforestación			
Extracción de materiales a cielo abierto			
Desarrollo Industrial y Urbanístico			
Incendios forestales y/o quemas			
Desección de humedales			
Modificación de regímenes hidrológicos			
Invasiones Biológicas			
Sistemas productivos forestales no sostenibles			
Sobreexplotación de recursos biológicos			
Cultivos Ilícitos			
Contaminación			
Potrerización			
Sedimentación			
Pesca con dinamita y/o red de arrastre			

Disturbios Naturales	Ecosistemas Terrestres	Ecosistemas de Agua Dulce	Ecosistemas costeros
Huracanes			
Terremotos y Maremotos			
Fuegos			
Inundaciones			
Deslizamientos			
Vulcanismo			

Dimensión espacial y magnitud

La escala espacial se refiere a la extensión del disturbio, en términos de las dimensiones físicas de la zona afectada, expresadas en unidades de área o de volumen. La magnitud por su parte, se relaciona con la fuerza, intensidad o severidad del disturbio (Gleadow & van der Maarel 1992).



Dimensión temporal

Incluye frecuencia y predictibilidad del disturbio. En algunos casos, como por ejemplo los disturbios por fuego, la estación climática en que éste ocurre también debe considerarse en esta dimensión. Según la frecuencia, los disturbios pueden clasificarse como *raros*, si ocurren en un tiempo menor al lapso de vida de las especies más longevas; o *frecuentes*, si ocurren muchas veces dentro del lapso de vida de las especies menos longevas (Noble & Slatyer 1980). En la mitad del espectro están los disturbios *recurrentes*, como fuegos, inundaciones, eventos climáticos extremos y ataque de plagas. Existen también disturbios *continuos*, como el pastoreo intensivo, los cuales suelen tener un impacto significativo sobre las comunidades, especialmente, en aquellos ecosistemas que no han evolucionado con esta perturbación como parte de su dinámica.

PASO 5. CONSOLIDAR LA PARTICIPACIÓN COMUNITARIA

La restauración ecológica es una actividad con diferentes escalas espaciales y temporales, en las cuales los disturbios antrópicos juegan un papel importante en cualquier escala que se elija. La pérdida de los servicios ambientales de los ecosistemas es también una preocupación de las personas en cualquier región y por consiguiente hay que tener en cuenta tanto el manejo regional como las necesidades de las comunidades locales. Por eso es muy importante que la gente participe activamente, desde su formulación en los proyectos de restauración, lo cual puede garantizar su continuidad y consolidación (Cano y Vargas 2007).

Es muy importante explorar la aceptabilidad que tendría el eventual programa de restauración, en función del entorno socioeconómico que prevalezca en el área, con especial atención a las aspiraciones propias de las comunidades humanas locales, en términos del futuro que desean. En este contexto es necesaria la búsqueda de actividades económicas alternativas, como el desarrollo de especies vegetales promisorias o la zootecnia, viveros comunitarios con el fin de incentivar el aprovechamiento de recursos naturales propios de la región que contribuyan a valorar la biodiversidad existente y a garantizar a largo plazo la continuidad del proyecto.

Los conocimientos que tienen las poblaciones humanas locales sobre su región, su historia de uso, la ubicación de las especies y en algunos casos su propagación, son conocimientos de gran importancia en el éxito de los proyectos. De esta forma la educación ambiental se vuelve más práctica y se puede consolidar a corto y largo plazo una educación ambiental para la restauración ecológica de la región. La restauración ecológica es una actividad de largo plazo y por consiguiente quienes deben garantizar la continuidad de los proyectos son las poblaciones locales con apoyo de organizaciones locales, municipales, departamentales y nacionales.

Es necesario lograr que las comunidades locales se apropien de las labores de restauración para garantizar la continuidad del proceso, para lo cual es muy importante la capacitación para el establecimiento y manejo de viveros, así como del diseño y selección de plantas útiles para la restauración ecológica. La capacitación en aspectos prácticos permite que la gente se convierta en promotores del conocimiento (Insuasty-Torres 2011).



CLAVES PARA EMPRENDER UN PROYECTO DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA CON PARTICIPACIÓN COMUNITARIA (Cano y Zamudio 2006)

La comunidad debe ser contemplada como una unidad integral. Es necesario promover la participación de adultos (mujeres y hombres), jóvenes, niños y niñas y generar procesos de trabajo entre:

1. Comunidad campesina: Trabajadores agrícolas de diferentes edades y géneros.
2. Comunidad de pescadores.
3. Comunidades indígenas, afrodescendientes y raizales.
4. Unidad escolar: profesores, padres de familia y alumnos.
5. Entidades locales: Asociaciones comunitarias, ONGs, Organizaciones indígenas, Organizaciones Ambientales, Entidades estatales que participan en la conservación regional de los recursos.
6. Investigadores de la conservación y restauración ecológica: biólogos, ecólogos, ingenieros forestales, agrónomos, antropólogos, sociólogos, geógrafos, geólogos, trabajadores sociales, ingenieros agrícolas, civiles, ingenieros hidráulicos, ingenieros marítimos y oceanográficos.

Enfoques conceptuales

- Investigación Acción Participativa: Mediante este enfoque se plantea a las comunidades como grupo investigador y transformador de su propia realidad.
- Conservación con Base Comunitaria: Se refiere al manejo de recursos naturales a través de la participación de las comunidades.
- Manejo Local de Recursos: Corresponde a la recuperación, conservación y protección de la flora y fauna en su hábitat natural, teniendo en cuenta las características de los ecosistemas y el valor cultural que le otorgan las comunidades humanas.

Herramientas metodológicas

- Cartografía social: Esta metodología considera el territorio como referente espacio - temporal y busca su representación por medio de la construcción colectiva de mapas, en donde se muestran las percepciones locales del entorno natural, político, económico y cultural.
- Recorridos Territoriales: Metodología que complementa la cartografía social. A través de ellos se puede precisar y actualizar la información consignada en los mapas de territorio.
- Conversatorios: Son encuentros con diferentes participantes en los cuales se busca el diálogo de saberes sobre un tema específico. En ellos, aparecen puntos de vista distintos y se procura establecer consensos de opinión.
- “Aprender haciendo”: Actividad que ha probado ser muy efectiva para crear sentido de apropiación de las comunidades e interesarlas en el proyecto, también puede ser una de las mejores oportunidades de capacitarlas para que asimilen nuevos comportamientos hacia el manejo y uso racional de los recursos y cambio de actitudes negativas hacia el entorno.

Recomendaciones

- Diseñar participativamente acciones para recuperar los elementos de los ecosistemas.
- Seleccionar las áreas donde se implementarán las acciones de restauración (fincas, áreas de interés comunitario, áreas de conservación).
- Integrar el conocimiento local y promover su aplicación en las acciones de restauración.
- Difusión de técnicas de propagación de especies nativas y manejo de viveros e invernaderos.
- Difusión de varias técnicas de restauración (restauración de suelos, erradicación de especies invasoras, entre otras).
- Integración del tema de la restauración ecológica en los programas académicos de los centros educativos.
- Realización de actividades prácticas e investigativas con los estudiantes y padres de familia de escuelas y colegios.
- Fortalecimiento del conocimiento de los funcionarios públicos con relación a la restauración ecológica.
- Creación participativa de materiales que divulguen el conocimiento local y las acciones de restauración iniciadas (herbarios, plegables informativos, cartillas, boletines).
- Encuentros comunitarios en los cuales se reúnan diferentes tipos de participantes para intercambiar experiencias de Restauración Ecológica.

Para la conservación y restauración de ecosistemas es muy importante lograr que las instituciones del Estado puedan ofrecer incentivos económicos a las comunidades o propietarios locales. En este sentido la conservación y restauración deben ir juntas puesto que el mantenimiento de servicios ambientales se logra tanto por la conservación como por la restauración ecológica. Con la restauración ecológica se recuperan servicios ambientales como el agua, la fijación de CO₂, suelo, biodiversidad y control de la erosión, entre otros. Por esta razón es muy importante que quien demuestre recuperación de servicios ambientales, tenga una retribución económica.



PASO 6. EVALUAR EL POTENCIAL DE REGENERACIÓN

En la fase diagnóstica la evaluación del potencial de regeneración se refiere a la disponibilidad de especies en la región, su ubicación, abundancia y su etapa sucesional. El potencial de regeneración se define entonces, como el conjunto de especies nativas y trayectorias sucesionales que ofrece un paisaje. En esta fase se tiene una aproximación a las especies pioneras y a las especies de sucesión tardía, a las especies dominantes, codominantes y raras y sobre todo a las especies que potencialmente pueden ser utilizadas en experimentos y programas de

restauración. Muchas especies pueden estar extintas localmente, pero no regionalmente, es por esto que es necesario tener muy claro el contexto regional.

Algunas de las trayectorias sucesionales pueden servir como ecosistema o comunidad de referencia y es importante conocer muy bien su composición de especies, estratificación y los mecanismos de regeneración de las especies: bancos de semillas, bancos de plántulas, bancos de retoños y los mecanismos de dispersión en el paisaje.



PASO 7. ESTABLECER LOS TENSIONANTES PARA LA RESTAURACIÓN A DIFERENTES ESCALAS

Por tensionantes o barreras a la restauración ecológica se entiende todos aquellos factores que impiden, limitan o desvían la sucesión natural en áreas alteradas por disturbios naturales y antrópicos (Vargas *et al.* 2007).

Los tensionantes para la restauración ecológica pueden clasificarse en dos tipos: ecológicos y socioeconómicos. Los de tipo ecológico se relacionan con los factores bióticos y abióticos resultantes del régimen de disturbios natural y antrópico, los cuales influyen en los diferentes mecanismos de regeneración y colonización de las especies, es decir, los procesos necesarios para que ocurra la **dispersión** de propágulos (principalmente semillas), el **establecimiento** de las plántulas y la **persistencia** de los individuos y las poblaciones de plantas. Los de tipo socioeconómico son todos los factores políticos, económicos y sociales que limitan los procesos de regeneración natural, principalmente los tipos de uso de la tierra.



1. Tensionantes relacionados con la dispersión de las plantas
2. Tensionantes relacionados con el establecimiento de las plantas
3. Tensionantes relacionados con la persistencia de las plantas
4. Tensionantes sociales

Tensionantes Ecológicos

1. Tensionantes relacionados con la dispersión de las plantas: Son causados generalmente por la fragmentación y pérdida de hábitats y la extensión de matrices de potreros, cultivos y especies exóticas. Estos tensionantes hacen referencia al destino de los propágulos (p. ej. el destino de las semillas), los más comunes a la dispersión son:

- Ausencia de polinizadores.
- Ausencia de propágulos (principalmente semillas).
- Ausencia de animales dispersores.
- Corta longevidad de las semillas y germinación impedida.
- Ausencia de plantas niñeras o plantas facilitadoras.
- Predación de semillas.
- Ausencia de un banco de semillas del ecosistema original.
- Matriz continua de pastos que impide la regeneración.
- Presencia de especies invasoras o colonizadoras agresivas.



2. Tensionantes relacionados con el establecimiento de las plantas: La fase de establecimiento comprende la germinación de las semillas y el crecimiento y supervivencia de las plántulas. Pueden clasificarse en dos grandes grupos relacionados con factores abióticos y bióticos.

Factores abióticos	Factores bióticos
<ol style="list-style-type: none"> 1. Ausencia de micrositios para el establecimiento de las plántulas 2. Restricciones climáticas (sequía, heladas, inundaciones) 3. Suelo inadecuado (erosión, compactación, contaminación, ausencia o exceso de nutrientes, pérdida de materia orgánica) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ausencia de micorrizas 2. Hojarasca gruesa que impide el establecimiento 3. Herbivoría 4. Competencia 5. Presencia de especies invasoras

3. Tensionantes relacionados con la persistencia de las plantas: La fase de persistencia hace referencia a que una especie una vez establecida pueda crecer y cumplir su ciclo normalmente, sin ser disminuida su biomasa o que algún factor le cause mortalidad. Ejemplos son:

Factores abióticos	Factores bióticos	Factores sociales
<ol style="list-style-type: none"> 1. Restricciones climáticas (Sequía, heladas, inundaciones) 2. Fuegos naturales 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Competencia 2. Herbivoría 3. Plagas 4. Presencia de especies invasoras 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Pastoreo y agricultura 2. Fuegos antrópicos 3. Introducción de especies invasoras 4. Corte

PASO 8. SELECCIONAR LAS ESPECIES ADECUADAS PARA LA RESTAURACIÓN

La selección de especies para la restauración es un aspecto muy importante, puesto que el éxito de los proyectos depende de la capacidad para dicha selección (Tabla 2). Del listado de especies y sus trayectorias sucesionales registrado en el potencial de regeneración, se seleccionan las especies más importantes bajo una escala de atributos o rasgos que pueden ser útiles en los sitios que se van a restaurar. Por ejemplo, para áreas en donde



hay que recuperar el suelo es muy importante combinar especies fijadoras de nitrógeno con especies que produzcan gran cantidad de hojarasca. En esta fase es necesario combinar el conocimiento de la gente y el conocimiento de expertos locales y científicos.

Tabla 2. Ejemplo de atributos para tener en cuenta en la selección de especies (Adaptado de Rodríguez y Vargas 2007)

ATRIBUTOS PARA LA SELECCIÓN DE PLANTAS		
Morfológicos	Reproductivos	Otros
Planta completa * Hábito: arbusto, árbol, hierba * Altura	* Reproducción sexual * Reproducción vegetativa	Nivel poblacional: frecuencia, abundancia y tipo de distribución de la especie (individuos aislados o agrupaciones).
Copa * Forma de la copa * Cobertura de la copa (diámetro aproximado) * Densidad de follaje	Estrategia de dispersión de las semillas: * Zoocoria, anemocoria y/o barocoria (tipo de fruto)	Asociación * Tipo de asociación con otras especies nativas y/o exóticas). * Presencia de micorrizas.
Hoja * Área foliar específica. * Contenido de Materia Seca. * Cociente peso fresco / peso seco * Tipo de hoja	Estrategia de Polinización * Ornitofilia, entomofilia o anemofilia (tipo de flor)	* Tolerancia a la luz. * Resistencia a Heladas. * Fijadora de Nitrógeno. * Producción de Hojarasca (diaria, semanal, mensual). * Defensas anti-herbívoros. * Estado fitopatológico: nivel de ataque.
	* Banco de semillas * Banco de plántulas * Banco de retoños	* Usos tradicionales y/o industriales potenciales: Protección de márgenes hídricos y nacederos; control de erosión, recuperación de suelos y protección de taludes; cerca viva; ornamental; barrera contra heladas. * Prestación de Servicios Ambientales.



PASO 9. PROPAGAR Y MANEJAR LAS ESPECIES

Una vez seleccionadas las especies se presenta el problema de la consecución del material, dado que muchas especies no se consiguen en los viveros locales, o las cantidades no son suficientes para las necesidades del proyecto. La propagación es la capacidad de las plantas para reproducirse, ya sea de forma sexual o vegetativa (asexual); la primera de estas se da por medio de las semillas y la segunda mediante células, tejidos y órganos. Existen tres tipos de propagación vegetativa: 1. la propagación por rizomas, estacas, esquejes, bulbos, tubérculos, estolones y segmentos de órganos como tallos y hojas, 2. la propagación por injertos donde segmentos de una planta se adhieren a otra receptiva más resistente de mejores características, y 3. la propagación *in vitro*, en la cual células, partes de tejido u órganos son cultivados en condiciones controladas de laboratorio (Cardona 2007).

La escasez de propágulos de especies pioneras que inicien la sucesión y de especies de estados sucesionales más avanzados que permitan la recuperación de la estructura y la composición del ecosistema, es una limitante para la implementación de acciones de restauración. La construcción de viveros o invernaderos es muy importante para la propagación y crecimiento permanente del material requerido. En ciertos casos, los costos de construcción de un vivero pueden ser altos. En estos casos es posible conseguir plántulas o rebrotes o sembrar directamente las semillas en el área a restaurar.



PASO 10. SELECCIONAR LOS SITIOS.

La selección de los sitios a restaurar, o donde se van a realizar experimentos, debe hacerse cuidadosamente. En este paso ya hay un conocimiento de lo que sucede a diferentes escalas, principalmente cómo actúa el régimen de disturbios naturales y antrópi-

cos. El conjunto de recomendaciones para la selección de los sitios hace referencia principalmente a una combinación de factores abióticos, bióticos y las poblaciones humanas locales (Vargas 2007).

1. Ubicación en sitios accesibles: Las facilidades logísticas son de gran importancia para garantizar el éxito del proyecto. Se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:
 - a. Vías o caminos de acceso, o sitios cercanos en donde no sea difícil el transporte de los materiales necesarios.
 - b. Fácil acceso para personas mayores y niños, con el fin de emprender acciones de participación y educación.
 - c. Facilidades para realizar la fase de monitoreo.
2. Áreas de interés comunitario: Es importante que se discuta con la comunidad los sitios prioritarios para restaurar, lo ideal es que la comunidad participe en la selección de los sitios, por algún interés especial relacionado con servicios ambientales, como agua, detener la erosión, recursos de amplia utilización por las comunidades.
3. Definir disturbios y tensionantes y su frecuencia: Si no se eliminan de una forma definitiva los factores tensionantes es posible que el proyecto no sea viable. En algunos ecosistemas donde los disturbios hacen parte de su dinámica natural es importante restaurar la frecuencia de disturbios, como por ejemplo inundaciones, fuegos, hidrología. Se debe tener en cuenta las recomendaciones de las comunidades locales en cuanto a fenómenos estacionales como inundaciones, fuegos, heladas.
4. Explicar a las comunidades locales el papel de los disturbios y perturbaciones en los procesos ecológicos.
5. Evaluar con las comunidades locales las actividades humanas, buscando la mayor compatibilidad posible con el proyecto. Evaluar si algunas prácticas culturales son compatibles con el desarrollo de proyectos de restauración. Por ejemplo el uso estacional de recursos.
6. Establecer si en el sitio o en sus alrededores se presentan poblaciones muy abundantes de pequeños herbívoros como conejos, curíes, que se puedan convertir estacionalmente o permanentemente en tensionantes.
7. Se debe evaluar si hay especies invasoras en el sitio o en los alrededores y evitar que se introduzcan estas especies tanto de plantas como de animales. Planear actividades continuas con la comunidad, para el manejo de especies invasoras.
8. No es recomendable remover especies introducidas naturalizadas (no invasoras), que cumplen una importante función ecológica.
9. Evaluar los gradientes topográficos naturales y patrones de drenaje.
10. Restablecer el régimen del flujo hidrobiológico natural.
11. Evaluar el estado del suelo.

PASO 11. DISEÑO DE ACCIONES PARA LA RESTAURACIÓN

Se plantean cinco conjuntos de acciones dependiendo del tipo de disturbio y sus tensionantes (Brown & Lugo 1994, Vargas 2007):



1. Basadas en la remoción y control de los tensionantes leves (frecuencia de quemas, sobrepastoreo, tasa de cosecha, erosión moderada).
2. Basadas en la adición de especies (plantas, animales o microorganismos) o materiales (fertilizantes, materia orgánica, agua).
3. Basadas en la regulación de la tasa de procesos ecosistémicos, es decir, los flujos entre los compartimientos (ej: regular la composición y estructura del suelo para sincronizar liberación de nutrientes y captación vegetal de estos).
4. Basadas en la remoción de los tensionantes severos.
5. Basadas en la regulación de las fuentes de entradas de energía.

En algunos pastizales de los trópicos se han utilizado muchas acciones, de las cuales, se destacan entre las más comunes: a) manejo de la regeneración natural, b) distribución de perchas para aves: artificiales y/o naturales, c) utilización de árboles aislados o vegetación remanente presente en el área a restaurar, d) incorporación de árboles de especies pioneras nativas, e) recolección y trasplante de plántulas presentes dentro de la misma área a restaurar o en los alrededores.

Se trabajan y plantean otras opciones de carácter específico, dependiendo del sitio de trabajo, igual o más apropiadas para la recuperación de áreas degradadas, algunas de ellas son: a) dispersión manual de semillas, b) aprovechamiento de rebrotes, c) utilización de troncos en descomposición, d) formación de micrositos en los cuales se favorezca la germinación y crecimiento de las plántulas, e) sistemas agroforestales, f) aplicación de

suelo donado proveniente del ecosistema de referencia, g) siembra de plántulas provenientes del banco de semillas, h) formación de islas de recursos o núcleos de facilitación, i) plantaciones forestales de especies nativas como catalizadoras de sucesión, j) uso del pastoreo para controlar el crecimiento de los pastos y para ayudar a dispersar semillas, k) cercos vivos y barreras rompevientos, l) establecimiento y ampliación de corredores riparios, m) tratamiento o reemplazo de los suelos degradados, n) formación de doseles, o) ampliación de bordes de bosque.

Todas las acciones anteriores se pueden clasificar en: a) manipulación del ambiente físico, b) manipulación del ambiente químico, c) manipulación del ambiente biótico (Perron & Davy 2002).

A continuación se explican brevemente algunas de las acciones más comunes en restauración ecológica (Vargas 2007):

Eliminación de disturbios y tensionantes

- Erradicación de las matrices de pastos invasores: para facilitar la recolonización por parte de las especies nativas, es necesario eliminar de las zonas de restauración los pastos que han colonizado estas áreas por causa del pastoreo y abandono de cultivos. Debido a que la mayoría de estas especies invasoras son altamente competitivas se requiere de varias acciones como erradicación manual, competencia con otras especies y tratamientos de sombra para lograr un control efectivo.
- Creación de refugios artificiales para fauna: con la acumulación de troncos, piedras y algo de vegetación, se pueden formar agrupaciones que pueden servir como albergues temporales o sitios de paso para la fauna nativa. Mejorar las condiciones abióticas para el desplazamiento de las especies de fauna, favorece simultáneamente la dispersión zoócora de muchas especies vegetales.
- Controlar los impactos del turismo mal dirigido: es importante que las comunidades locales y habitantes de la zona, reconozcan y valoren sus recursos naturales, por lo tanto se espera que las actividades turísticas puedan continuar de forma organizada. Para esto se requiere el establecimiento de una brigada ambiental local (entrenada en el manejo de los recursos y atención a los turistas), educación ambiental en escuelas y organizaciones locales, así como el establecimiento de un centro de información (Llambí *et al.* 2005).
- Utilización de perchas artificiales para aves: Con esta estrategia se busca aumentar la dispersión de semillas en potreros. Son estructuras en madera con diferentes arreglos, que permiten la llegada de aves a la matriz de pastizal, dando lugar a un aumento significativo de la tasa de deposición de semillas de plantas ornitócoras y la implantación de individuos que no llegan en condiciones naturales, teniendo consecuencias en la aceleración de la recuperación del bosque, así como en la acumulación de un banco de semillas del bosque.

Selección y propagación de especies

- Evaluación del banco de semillas: tomar muestras de suelo y hojarasca del sitio a restaurar para conocer su composición de especies y la distribución espacial de las semillas (Moscoso y Diez 2005, Borda y Vargas 2011, Cardona y Vargas 2011, Torrijos *et al.* 2011). Con base en esta evaluación se podría determinar la capacidad de regeneración natural del ecosistema y la variación estructural como consecuencia de las perturbaciones (Parker *et al.* 1989, Bakker *et al.* 1996). A partir del banco de semillas se puede obtener material vegetal para ser utilizado en el enriquecimiento de las áreas a restaurar.
- Propagación de material vegetal nativo adecuado para el sitio de intervención: a partir del ecosistema de referencia o de las áreas circundantes en buen estado de conservación se recolectan semillas y plántulas de las especies de interés (Cole 2007), lo cual evitaría los costos que implica la adquisición de semillas de vivero o individuos juveniles. La reintroducción de ciertas especies puede incrementar significativamente los niveles de materia orgánica y desencadenar el proceso de sucesión secundaria en áreas agropecuarias degradadas y abandonadas (Zahawi 2005). Esta estrategia puede estar acompañada con fertilización y deshierbe, en el caso de pastizales (Román-D. *et al.* 2007).
- Uso de árboles remanentes: los árboles remanentes desempeñan un papel crítico en la recuperación de los bosques naturales al aumentar la dispersión de semillas, mejorar las condiciones microclimáticas e incrementar los nutrientes del suelo. Debe alentarse la retención de algunos árboles semilleros en áreas intervenidas y la plantación o el mantenimiento de árboles en tierras agrícolas a fin de mejorar la calidad del hábitat mientras se usa la tierra para la agricultura y facilitar su recuperación si la tierra es abandonada (OIMT 2002).
- Siembra directa de semillas: hay muchas especies que no forman banco de semillas o que éste ha sido degradado por algún disturbio, por lo tanto, se puede su-





perar esta barrera a la dispersión, adicionando propágulos en sitios donde difícilmente pueden llegar las especies por sus propios mecanismos, más aun cuando han perdido potenciales dispersores animales (Vargas 2007). Esta estrategia es muy útil también para la restauración de ecosistemas degradados (OIMT 2002).

- Siembra de plántulas en parcelas de enriquecimiento: posterior a la propagación de las semillas en condiciones de vivero o invernadero, las plántulas obtenidas se siembran en conjunto con especies fijadoras de N o que tengan micorrizas para un mejor aprovechamiento de los nutrientes del suelo (Vargas 2007).
- Montaje de viveros locales: en asociación con las comunidades vecinas de las áreas a restaurar puede promoverse la propagación de las diferentes especies utilizadas en las acciones de restauración, de forma que se de continuidad a los procesos en escalas de tiempo mayores e igualmente pueden ser fuente para desarrollar otras acciones.



Creación de micrositios y matrices de vegetación

- Siembra de especies niñeras facilitadoras: Por facilitación se entiende el efecto positivo de una especie o cierto tipo de vegetación sobre el crecimiento, supervivencia y desarrollo de otra(s) especie(s), en comparación con unas condiciones existentes en el ambiente exterior. Se han desarrollado técnicas para restaurar potreros degradados en los trópicos por medio de la siembra de plántulas debajo de árboles, matorrales o cultivos niñeros; en estas acciones se propone también sembrar especies de crecimiento rápido, que forman dosel en poco tiempo y que mejoran las condiciones del suelo al fijar nitrógeno o asociarse con micorrizas. La siembra de especies niñeras debe estar acompañada también de un conjunto más diverso de especies cuando no hay suficiente dispersión de propágulos en el sitio (Ávila y Vargas 2011).
- Formación de núcleos activos de dispersión: por medio de la siembra de especies arbustivas y herbáceas nativas atrayentes de animales dispersores y polinizadores. Se utilizan individuos adultos, con altura superior a 1 m. y que estén dispersando semillas o en floración. Con esto no sólo se atrae fauna a la zona de restauración, también ayuda a la regeneración natural (Vargas 2007).
- Creación de un relieve microtopográfico para generar y aumentar los micrositios: por medio de pequeños aclareos en zonas donde el suelo está muy compactado, puede modificarse la estructura por medios mecánicos, creando espacios que puedan ser colonizados por las especies de la zona, permitiendo el flujo de gases y agua que serán aprovechados por los propágulos que allí se encuentren. También se facilita la consecución de nutrientes porque la remoción aumenta la heterogeneidad del suelo (Vargas 2007).
- Siembra de especies arbustivas nativas atrayentes de polinizadores y dispersores: seleccionar especies nativas que sirvan para atraer diversos animales que actúen como dispersores o polinizadores de otras especies también, por lo tanto, estas especies deben ser generalistas en este aspecto.

- **Regeneración natural:** Se debe utilizar en áreas poco perturbadas. En esta estrategia se utilizan los servicios de animales asociados a los frutos y/o semillas de la región. Permite la creación de “núcleos” de regeneración que tienen la función de facilitar el establecimiento de nuevas plantas. Esta estrategia se basa en los principios de la sucesión ecológica, sin embargo no siempre es posible prever las características de las especies que llegarán. Una ventaja importante de esta estrategia es el bajo costo, aunque su éxito dependerá de las características climáticas y del paisaje regional (Rondón y Vidal 2005).
- **Ampliación de bordes utilizando bancos de plántulas y retoños:** hacer rescate de plántulas y retoños de los parches de bosque existente y utilizarlos para el avance de los bordes del bosque (Acosta y Vargas-Ríos 2007).
- **Disturbios experimentales que inicien la sucesión:** En ambientes transformados la inducción de un disturbio en el sistema logra generar las condiciones que pueden iniciar o reactivar un proceso sucesional, disminuir la presencia de especies invasoras, liberar recursos que permitan el establecimiento de especies nativas, entre otros. Los disturbios experimentales simulan unas condiciones específicas y sus variaciones dependen de los objetivos planteados, los cuales están sujetos a las condiciones del sitio a restaurar: pueden enfocarse a controlar una especie invasora, reducir la influencia de una especie dominante y aumentar el recurso disponible como la especie de colonización, los nutrientes y el agua del suelo. Pueden efectuarse de manera manual o mecánica y pueden actuar de manera directa o indirecta. Con la aplicación de disturbios experimentales también se busca generar un cambio en el patrón sucesional, al reducir o eliminar la cobertura de las especies dominantes y con esto disminuir la competencia por el recurso. También busca reabastecer los recursos agotados, reducir la herbivoría, eliminar tóxicos acumulados en el substrato, generar condiciones como mayor intensidad lumínica y ampliar la fluctuación de la temperatura, que estimule la germinación de especies latentes en el banco de semillas.

Recuperación de Suelos

- **Remoción de la vegetación epigea e hipogea:** para facilitar el proceso de establecimiento de las especies nativas, es necesario remover la vegetación que no es propia del ecosistema para dar espacio a las nativas. No sólo basta remover las partes aéreas ya que, en el caso específico de los páramos, muchas plantas, pueden reproducirse clonalmente, por lo cual hay que eliminar también el sistema radicular hasta donde sea posible, sin remover o alterar mucho el suelo.
- **Enmiendas para mejorar las condiciones del suelo:** En sitios altamente deteriorados se requiere el enriquecimiento de nutrientes en el suelo, mediante el uso de enmiendas orgánicas y/o químicas. Los fertilizantes químicos poseen una alta capacidad para suplir nutrientes escasos y pueden servir para obtener una cobertura vegetal rápidamente. Este tipo de resultados pueden ser útiles en casos donde es necesario recuperar algunas características ambientales, tales como cobertura vegetal protectora, estabilidad de suelos, o retención de agua en un corto tiempo, sin esperar recuperar la composición o estructura del ecosistema.

Por otra parte la enmienda orgánica puede aumentar el potencial de reforestación, especialmente en sitios altamente degradados, sin embargo estudios realizados en áreas secas, han mostrado que este tipo de enmiendas puede causar una alta mortalidad en las primeras etapas de las plántulas (Vallejo 2011). Una enmienda orgánica muy utilizada para la recuperación de suelos en sitios altamente alterados son los biosólidos, obtenidos a partir de aguas residuales, que contienen altas cantidades de materia orgánica, fósforo (P), potasio (K) y alta humedad (Barrera *et al.* 2011).

- **Descompactación mecánica del suelo:** en sitios disturbados principalmente por ganadería, ya que el pisoteo del ganado modifica principalmente las características hidráulicas del suelo, lo cual afecta el desarrollo del sistema radicular de las especies haciendo que sean más susceptibles de ser removidas fácilmente (Basset & Mitchell 2005). Esta descompactación





puede hacerse con herramientas de labranza, de forma que no se genere una alteración más grave al usar maquinaria más pesada.

- Trasplante de suelo de zonas sin disturbio en bloques o desmoronado: Con esta estrategia se busca introducir al ecosistema a restaurar: microfauna del suelo, varias fuentes de propágulos y enriquecimiento de nutrientes y se aprovecha la capacidad de algunas especies de tener semillas que se mantienen viables en el suelo, formando bancos de semillas que podrían expresarse cuando se den las condiciones necesarias (Vargas 2007). Esta estrategia puede propiciar la formación de pequeños nichos de regeneración y colonización, además de favorecer la variabilidad genética (Tres y Reis 2007).
- Combinación de acciones entre remoción de la vegetación superficial, adición de enmiendas y siembra de especies (Cole 2007). Con esto se busca acelerar el proceso sucesional al realizar varios pasos simultáneamente que logren superar la barrera al establecimiento y reducir la escala de tiempo para la obtención de resultados.
- Restaurar la fertilidad del suelo, dejando que los periodos de descanso entre cultivos sean más de 5 años. Por medio del análisis de la biomasa microbiana se obtiene un buen estimativo del grado de disturbio debido a la agricultura (Llambí & Sarmiento 1999).
- Empleo de endomicorrizas: Los hongos formadores de micorrizas (HMVA) dependen de la planta para el suministro de carbono, energía y de un nicho ecológico, a la vez que entregan nutrientes minerales, especialmente los poco móviles como el fósforo, también estimulan la producción de sustancias reguladoras de crecimiento, incrementan la tasa fotosintética, promueven ajustes osmóticos cuando hay sequía, aumentan la fijación de nitrógeno al favorecer a las bacterias simbióticas asociativas, incrementan la resistencia a plagas y la tolerancia a estrés ambiental, contribuyen a mejorar la agregación del suelo y son mediadores de muchas de las acciones e interacciones de la microflora y la microfauna que

ocurren en el suelo, alrededor de las raíces. Luego de un disturbio forestal el inóculo de micorriza puede ser insuficiente, incrementar la densidad de micorrizas a través de la inoculación es crucial para una regeneración exitosa, además se pueden reducir los costos de producción, por la disminución de tiempo de permanencia de las plantas en el vivero. Se pueden variar las especies de HMVA que se emplean, las cuales pueden ser nativas o comerciales, la composición del inóculo el cual puede ser monoespecífico o poliespecífico y en cuanto al tipo de inóculo, que puede componerse de esporas aisladas, raicillas colonizadas por HMVA o suelo con esporas.

Acciones integrales de conservación y restauración ecológica en paisajes rurales se conocen como HERRAMIENTAS DE MANEJO DEL PAISAJE (Lozano-Zambrano 2009). El objetivo principal de esta estrategia es aumentar la calidad de los hábitats para la fauna, aumentar la cobertura nativa e incrementar la conectividad de los elementos del paisaje rural, restaurando corredores de hábitats.



Las principales acciones utilizadas son:

- Conservación de remanentes de ecosistemas naturales, para lo cual se hacen cerramientos de bosques remanentes con cercas vivas de aislamiento.
- Enriquecimiento del bosque secundario con especies nativas.
- Ampliación de parches de bosque o cañadas.
- Incremento de la conectividad a través de la formación y restauración de corredores biológicos.
- Cercas vivas mixtas en las fincas y ganadería sostenible.
- Mantenimiento y siembra de árboles dispersos en los potreros.

PASO 12. MONITOREAR EL PROCESO DE RESTAURACIÓN

Dentro de un proceso de restauración ecológica, el monitoreo consiste en el seguimiento y evaluación continuos de los cambios que experimenta el ecosistema, bajo los diferentes tratamientos de restauración aplicados. Tiene como objetivo final asegurar el éxito en la restauración ecológica, brindando información necesaria para evaluar y ajustar las prácticas de restauración, de modo que puedan ser modificadas en cualquier momento; de esta manera, si los resultados obtenidos en los tratamientos aplicados son negativos o indeseables, dichos tratamientos se modifican o detienen; por el contrario, si se obtienen resultados positivos, estos tratamientos se continúan, multiplican, y si es posible, se mejoran (Brunner & Clark 1997, Block *et al.* 2001, Díaz 2007).

El diseño del programa de monitoreo debe realizarse en el mismo momento en el que se plantean los objetivos de la restauración y se planean los tratamientos que serán aplicados. De esta manera, un monitoreo ecológico efectivo se entiende como un proceso que acompaña al proceso de restauración desde el diagnóstico del estado actual del ecosistema, y continúa durante la implementación de los tratamientos y el desarrollo de los mismos, terminando en el momento en que se considera que el ecosistema ha recuperado su integridad ecológica (Holl & Cairns 2002).

En el diseño de un programa de monitoreo, es importante tener en cuenta los siguientes aspectos (Díaz 2007):

- a. Definir los objetivos del programa de monitoreo en el mismo momento en que se definen los objetivos de la restauración ecológica, y en concordancia con estos.
- b. Establecer las escalas espaciales y temporales (monitoreo a corto y largo plazo), en las cuales se desarrollarán la restauración ecológica y el programa de monitoreo.
- c. Seleccionar los parámetros que se han de monitorear y los indicadores ecológicos adecuados para evaluar su desempeño.
- d. Escoger la metodología adecuada para el monitoreo de los diferentes indicadores ecológicos.



Tipos de monitoreo en restauración ecológica

Uno de los puntos importantes a tener en cuenta al diseñar el programa de monitoreo, es que existen dos tipos de monitoreo relevantes en restauración ecológica: el monitoreo de implementación o de corto plazo y el monitoreo de efectividad o de largo plazo (Block *et al.* 2001).

El monitoreo de implementación busca evaluar si los tratamientos de restauración se llevaron a cabo como fueron diseñados, cuantificando los cambios que ocurren en el ecosistema inmediatamente después de los tratamientos. Este seguimiento de los primeros cambios en el ecosistema en restauración, permite determinar si la estrategia de manejo implementada está cumpliendo con el objetivo propuesto, lo cual se logra a través del análisis de la respuesta del sistema ecológico a escalas espaciales y temporales pequeñas. Este monitoreo permite ajustar las acciones de manejo rápidamente, cuando los resultados de la evaluación indican que los cambios en el ecosistema están tomando direcciones indeseadas.

En el monitoreo de efectividad se busca determinar si se cumplió con el objetivo último de la restauración, mediante análisis realizados a escalas espacio-temporales más grandes. En este monitoreo se evalúa si los principales patrones y procesos ecológicos del ecosistema se restablecieron. La información obtenida en este monitoreo, permite además redefinir los objetivos de restauración ecológica y ajustar la estrategia de manejo (Herrick *et al.* 2006).

La elección de los indicadores ecológicos para el monitoreo de la restauración

Uno de los pasos cruciales en el diseño del monitoreo, es la selección de los indicadores adecuados. Estos son variables que permiten evaluar el estado del ecosistema en cualquier punto del proceso de restauración, con respecto a los objetivos de restauración.

En el momento de definir estas variables, es importante elegir aquellas que cumplan con ciertas características, entre las cuales se destacan las siguientes (véase Díaz 2007):

- Ser definibles claramente.
- Ser fácilmente medibles e interpretables.
- Ser útiles para múltiples análisis.
- No tener carácter destructivo.
- Brindar el máximo de información por unidad de área.
- Proveer información con respecto al incremento en las características deseables y la reducción de las no deseables.

El plan de restauración entonces debe tener las siguientes características:

- Los datos recopilados y los resultados deben ser acumulativos y estar disponibles para futuras experiencias de restauración.
- La eficiencia de los datos tomados debe ser maximizada y los costos minimizados para garantizar un menor esfuerzo de muestreo.
- El monitoreo debe realizarse a diferentes escalas que correspondan con los objetivos propuestos.
- Se deben seleccionar atributos que puedan ser monitoreados, los cuales permitan tener datos en mediciones repetidas en el tiempo.
- Los protocolos de seguimiento y toma de datos deben ser claramente delineados para que puedan tener continuidad.

PASO 13. CONSOLIDAR EL PROCESO DE RESTAURACIÓN

La consolidación de un proyecto de restauración implica que se han superado todos los tensionantes del disturbio y que el ecosistema marcha de acuerdo a los objetivos planteados, las labores de mantenimiento y monitoreo deben indicar que el proceso marcha satisfactoriamente y el ecosistema empieza a mostrar variables de autosostenimiento, como el enriquecimiento de especies, la recuperación de la fauna, el restablecimiento de servicios ambientales relacionados con la calidad del agua y el suelo.



La importancia de consolidar áreas en proceso de restauración se fundamenta en los siguientes aspectos (Vargas 2007):

1. Garantizan la permanencia de procesos que se pueden monitorear a largo plazo.
2. Permiten ajustar trayectorias sucesionales del ecosistema que se pretende restaurar, según los resultados del monitoreo.
3. Consolidan el conocimiento de las especies adecuadas (tasas de crecimiento, acciones reproductivas).
4. Se ponen a prueba conocimientos en ecología.
5. Facilitan el ensayo de nuevos grupos de especies sucesionales tempranas y tardías, dentro del potencial total de regeneración del ecosistema.
6. Se recupera adecuadamente la fauna nativa, principalmente su estructura trófica.
7. Son áreas permanentes de investigación, educación y divulgación para la conservación y restauración de ecosistemas.
8. Generan conocimientos aplicables a otras áreas del mismo ecosistema y a otros tipos de ecosistemas.
9. Permiten que las comunidades locales (niños y niñas, jóvenes y adultos), tengan una participación permanente en los programas de restauración.
10. Permiten que los funcionarios locales tengan una actividad en todas las fases de los proyectos de restauración.
11. Centralizan esfuerzos de instituciones de orden nacional, regional y local y consolidan grupos de investigación de instituciones académicas.

Literatura citada

- Acosta, M. y O. Vargas-Ríos. 2007. Ampliación de fragmentos de bosque altoandino. En: Vargas-Ríos, O. (ed.) Estrategias para la restauración ecológica del bosque altoandino. El caso de la Reserva Forestal de Cogua, Cundinamarca. Segunda edición. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. Pp. 266-281.
- Ávila R., L. A. y O. Vargas R. 2011. Núcleos de restauración de *Lupinus bogotensis* en claros de plantaciones de *Pinus patula* y *Cupressus lusitánica*. En: Vargas R., O. y S. P. Reyes-B. (eds.). La restauración ecológica en la práctica: Memorias I Congreso Colombiano de Restauración Ecológica & II Simposio Nacional de Experiencias en Restauración Ecológica. Universidad Nacional de Colombia. Gente Nueva Editorial. Bogotá D. C., Colombia. p. 444-455.
- Bakker, J., Pschlod, P., Strykstra, R., Bekker, R. & K. Thompson. 1996. Seed banks and seed dispersal: important topics in restoration ecology. Acta Bot. Neerl. 45(4): 461-490.
- Basset, I., Simcock, R. & D. Mitchell. 2005. Consequence of soil compactation for seedling establishment: implications for natural regeneration and restoration. Austral Ecology 30 p. 827-833.
- Barrera Cataño, J. I., Ochoa, A., Granados, A. y S. Guacaneme. 2011. La investigación con biosólidos, como enmienda orgánica, en áreas afectadas por minería a cielo abierto en Bogotá D. C.. En: Vargas R., O. y S. P. Reyes-B. (eds.). La restauración ecológica en la práctica: Memorias I Congreso Colombiano de Restauración Ecológica & II Simposio Nacional de Experiencias en Restauración Ecológica. Universidad Nacional de Colombia. Gente Nueva Editorial. Bogotá D. C., Colombia. p. 92-104.
- Block, W. M., A. B. Franklin, J. P. Ward, Jr., J. L. Ganey & G. C. White. 2001. Design and implementation of monitoring studies to evaluate the success of ecological restoration on wildlife. Restoration Ecology 9 (3): 293-303.
- Borda Niño, M. y O. Vargas R.. 2011. Caracterización del banco de semillas germinable de plantaciones de pinos (*Pinus patula*) y claros en regeneración natural (alrededores del Embalse de Chisacá, Bogotá - localidad de Usme - Bosque altoandino). En: Vargas R., O. y S. P. Reyes-B. (eds.). La restauración ecológica en la práctica: Memorias I Congreso Colombiano de Restauración Ecológica & II Simposio Nacional de Experiencias en Restauración Ecológica. Universidad Nacional de Colombia. Gente Nueva Editorial. Bogotá D. C., Colombia. p. 456-473.
- Brown, S y A.E. Lugo. 2002. Rehabilitation of tropical lands: a key to sustaining. Restoration Ecology 2(2): 97 – 111.
- Brunner, R. D. & T. W. Clark. 1997. A Practice-based Approach to Ecosystem Management. Conservation Biology 11: 48–58.
- Cairns, J. 1987. Disturbed Ecosystems as Opportunities for Research in Restoration Ecology. En: Jordan, W.R., Gilpin, M. & Aber, J. (eds.). Restoration Ecology. A Synthetic Approach to Ecological Research. Cambridge University Press. p. 307-320.
- Cano I. y N. Zamudio 2006. Recuperar lo nuestro: una experiencia de restauración ecológica con participación comunitaria. En: Vargas, O. y Grupo de Restauración Ecológica (eds). Universidad Nacional de Colombia, Acueducto de Bogotá, Jardín Botánico, DAMA.
- Cano, I. y O. Vargas. 2007. Lograr la participación comunitaria. En: O. Vargas (ed.). Guía Metodológica para la restauración ecológica del bosque altoandino. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. p. 114-116.
- Cardona, A. 2007. Propagación de especies En: Vargas, O. (ed.). Guía Metodológica para la restauración ecológica del bosque altoandino. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. p. 88-90.

- Cardona, A. y O. Vargas R. 2011. Potencial de regeneración del banco de semillas germinable de un bosque subandino: implicaciones para la restauración ecológica. (Reserva Biológica Cachalú ☐ Santander, Colombia). En: Vargas R., O. y S. P. Reyes-B. (eds.). La restauración ecológica en la práctica: Memorias I Congreso Colombiano de Restauración Ecológica & II Simposio Nacional de Experiencias en Restauración Ecológica. Universidad Nacional de Colombia. Gente Nueva Editorial. Bogotá D. C., Colombia. p. 430-443.
- Cole, D. 2007. Seedling Establishment and Survival on Restored Campsites in Subalpine Forest. *Restoration Ecology* Vol. 15, No. 3, p. 430-439.
- Collins, S. 1987. Interaction of disturbances in Tallgrass prairie: a field experiment. *Ecology* 68(5): 1243 – 1250.
- Díaz, R. 2007. El monitoreo en la restauración ecológica. En: O. Vargas (ed.). Guía Metodológica para la restauración ecológica del bosque altoandino. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. p. 119-122
- Ehrenfeld, J. G. 2000. Defining the limits of restoration: The need for realistic goals. *Restoration Ecology* 8(1): 2-9.
- Gleen-Lewin, D.C. & E. van der Maarel. 1992. Patterns and processes of vegetation dynamics. En: Gleen-Lewin, D.C., Peet, R. y Th. Veblen (eds.). *Plant Succession. Theory and Prediction*. Chapman and Hall. p. 11-59.
- Herrick, J.E., G.E. Schuman y A. Rango. 2006. Monitoring ecological processes for restoration projects. *Journal for Nature Conservation* 14: 161-171.
- Holl, K. & J. Cairns. 2002. Monitoring and appraisal. En: Perrow M. R. & A. J. Davy (eds.). *Handbook of Ecological Restoration*. Cambridge University Press. Cambridge U.K. p. 411-432.
- Insuasty Torres, J. 2011. Síntesis Simposio sobre Restauración Ecológica con participación comunitaria. En: Vargas-R., O. y S. P. Reyes-B. (eds.). La restauración ecológica en la práctica: Memorias I Congreso Colombiano de Restauración Ecológica & II Simposio Nacional de Experiencias en Restauración Ecológica. Universidad Nacional de Colombia. Gente Nueva Editorial. Bogotá D. C., Colombia. p. 607-609.
- Lake, P. S. 2001. On the Maturing of Restoration: Linking Ecological Research and Restoration. *Ecological Management and Restoration* 2(2): 110-115.
- Llambí, L.D., & L. Sarmiento. 1999. Ecosystem restoration during the long fallow periods in the traditional potato agriculture of the Venezuelan High Andes. En: Price, M. (ed.). *Global Change in the Mountains: Proceeding of the European Conference of Environmental and Societal Change in Mountain Regions*. Parthenon Publishing. New York, p. 190-192.
- Llambí, L. D., Smith, J., Pereira, N., Pereira, A., Valero, F., Monasterio, M. & M. Dávila. 2005. Participatory planning for biodiversity conservation in the high tropical Andes: are farmers interested?. *Mountain Research and Development* Vol. 25, No 3, p. 200-205.
- Lozano-Zambrano, F. H. (ed.). 2009. Herramientas de manejo para la conservación de biodiversidad en paisajes rurales. Instituto de Investigación de los Recursos Biológicos Alexander von Humboldt y Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) Bogotá D.C. Colombia 238 p.
- Moscoso, L. y M. Diez. 2005. Banco de semillas en un bosque de roble de la cordillera central colombiana. *Rev.Fac.Nal.Agr.Medellín*.Vol.58, No.2, p. 2931-2943.
- Noble I.R. y R.O. Slatyer. 1980. The use of vital attributes to predict successional change in plant communities subject to recurrent disturbances. *Vegetatio* 43: 5 – 21.



OIMT-Organización Internacional de las Maderas Tropicales. 2002. Directrices de la OIMT para la restauración, ordenación y rehabilitación de bosques tropicales secundarios y degradados. OIMT - Serie de políticas forestales N° 13. En colaboración con el Centro de Investigación Forestal Internacional (CIFOR), la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), la Unión Mundial para la Naturaleza (UICN) y el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF) Internacional.

Parker, V., Simpson, R. & M. Leck. 1989. Pattern and process in the dynamics of seed banks. En: Leck, M., Parker, V. & R. Simpson (eds.) *Ecology of Soil Seed Banks*. Academic Press Inc. San Diego, California.

Perrow, M. R. y A. J. Davy (eds.). 2002. *Handbook of Ecological Restoration*. Cambridge University Press.

Pickett, S. T. & P. White (eds.). 1985. *The ecology of natural disturbance and patch dynamics*. Academic Press Inc., San Diego, California, 472 pp.

Rodríguez, N. y O. Vargas 2007. Especies leñosas nativas claves para la restauración ecológica del embalse de Chisacá, basados en rasgos importantes de su historia de vida. En: O. Vargas (ed.). *Restauración ecológica del bosque altoandino. Estudios Diagnósticos y experimentales en los alrededores del embalse de Chisacá (Localidad de Usme, Bogotá D. C.)*. Universidad Nacional de Colombia y Acueducto de Bogotá. p: 181 – 198.

Román-D., F., Levy T. S., Perales R. H., Ramírez M., N., Douterlungne, D. y S. López Mendoza. 2007. Establecimiento de seis especies arbóreas nativas en un pastizal degradado en La Selva Lacandona, Chiapas, México. *Ecología Aplicada*, 6: (1,2).

Rondón, J. A. y R. Vidal. 2005. Establecimiento de la Cubierta Vegetal en áreas degradadas (Principios y Métodos). *Rev. For. Lat.* N° 38, p. 63-82.

SER. Society for Ecological Restoration International Science, Grupo de Trabajo sobre Ciencia y Política. 2004. *Principios de SER Internacional sobre restauración ecológica*. www.ser.org y Tucson: Society for Ecological Restoration International.

Torrijos, P., Prieto, D. y E. Jiménez. 2011. Evaluación del potencial natural de restauración en sabanas y bosque de piedemonte en Casanare, Colombia. En: Vargas-R., O. y S. P. Reyes-B. (eds.). *La restauración ecológica en la práctica: Memorias I Congreso Colombiano de Restauración Ecológica & II Simposio Nacional de Experiencias en Restauración Ecológica*. Universidad Nacional de Colombia. Gente Nueva Editorial. Bogotá D. C., Colombia. p. 346-358.

Tres, D. y A. Reis. 2007. La nucleación como propuesta para la restauración de la conectividad del paisaje. II Simposio Internacional sobre restauración ecológica. Disponible en: http://iras.ufsc.br/images/stories/cuba_paisagem_deisy.pdf

Vallejo, V. R., Alloza, J. A., Bautista, S., Bladé, C., Cortina, J., Fuentes, D. y J. Llovet J. 2011. Recuperación de suelos en el con-

texto de la restauración forestal en clima seco: el caso de la cuenca mediterránea. En: Vargas R., O. & S. P. Reyes-B. (eds.). La restauración ecológica en la práctica: Memorias I Congreso Colombiano de Restauración Ecológica & II Simposio Nacional de Experiencias en Restauración Ecológica. Universidad Nacional de Colombia. Gente Nueva Editorial. Bogotá D. C., Colombia. p. 67-91.

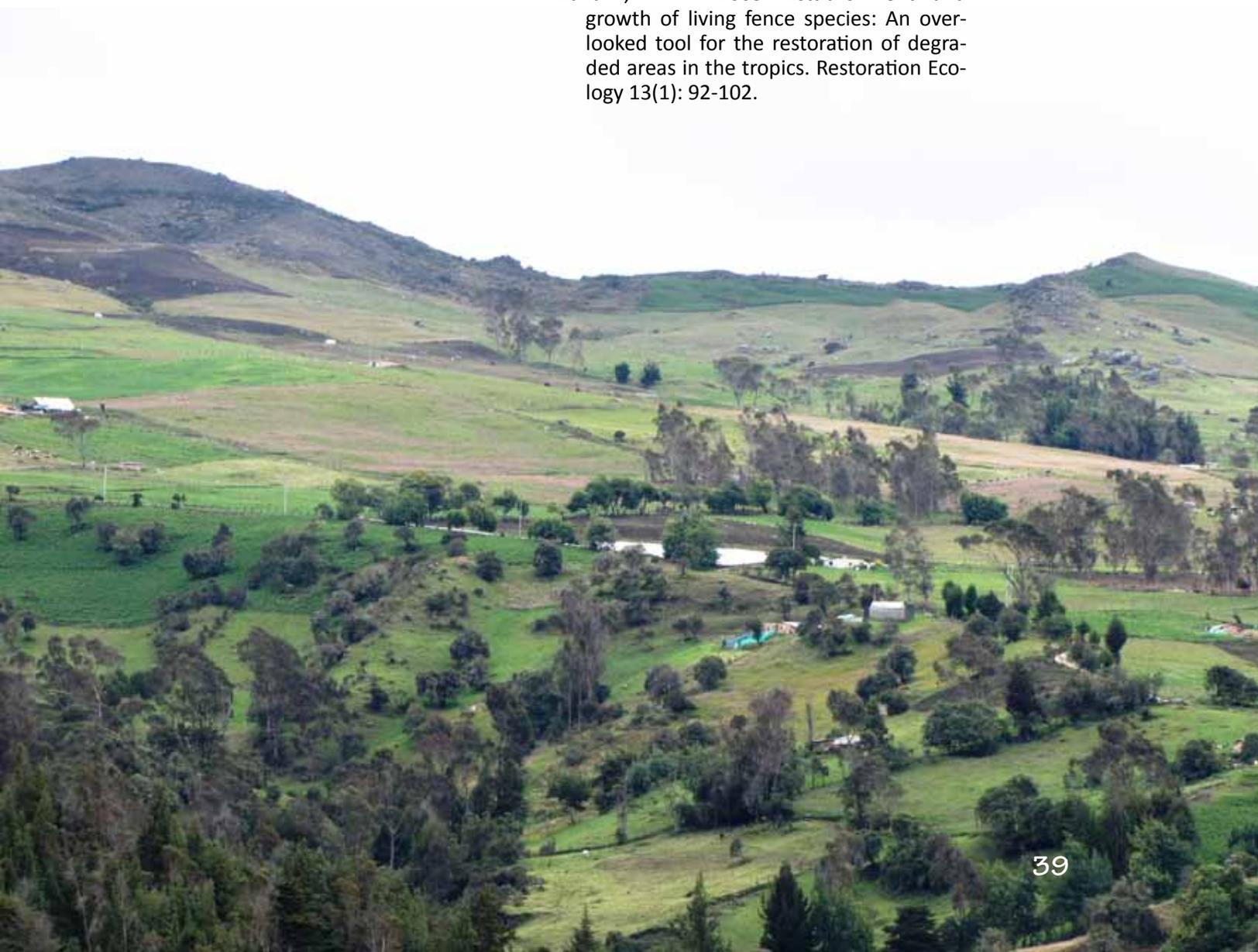
Van der Hammen, T. H. 1992. Historia, Ecología y Vegetación. Corporación Colombiana para la Amazonía (COA). Bogotá.

Van Diggelen, R., Grootjans, A. P. & J. A. Harris. 2001. Ecological Restoration: State of the Art or State of the Science?. *Restoration Ecology* 9 (2): 115-118.

Vargas, O. (Ed.). 2007. Guía Metodológica para la restauración ecológica del bosque altoandino. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.

Vargas O., Díaz, A., Trujillo, L., Velasco, P., Díaz, R., León O. & A. Montenegro. 2007. Barreras para la Restauración Ecológica. En: Vargas, O. (ed.). Estrategias para la restauración ecológica del bosque altoandino. Universidad Nacional de Colombia - Colciencias. p. 46-66.

Zahawi, R. A. 2005. Establishment and growth of living fence species: An overlooked tool for the restoration of degraded areas in the tropics. *Restoration Ecology* 13(1): 92-102.



II PARTE

ECOSISTEMAS TERRESTRES



INTRODUCCIÓN

El objetivo central de la restauración ecológica es la recuperación y sostenibilidad de los servicios ecosistémicos. En consecuencia el ideal de la restauración es aprender a manejar paisajes que es donde se manifiestan en toda su dimensión los servicios de los ecosistemas naturales, seminaturales y agroecosistemas como: agua, suelo, ciclos de materia, biodiversidad, coberturas vegetales y fijación de CO₂.

Cada paisaje está compuesto por muchas cuencas, por consiguiente en los ecosistemas terrestres la unidad de restauración debe ser la cuenca hidrográfica dada su importancia para la sostenibilidad de servicios ecosistémicos como el agua, la estabilidad de las laderas y la sostenibilidad de los agroecosistemas.

Colombia como país de montañas debe tener como prioridad el manejo de sus cuencas hidrográficas dada su influencia en todos los ecosistemas: terrestres, acuáticos y costeros.

El aumento de desastres por inundaciones, derrumbes, deslizamientos de tierra se debe a la pérdida de servicios ecosistémicos como las coberturas vegetales en ladera.

Ecosistemas como los páramos son vitales para el mantenimiento de economías regionales por la producción de agua para agricultura y bienestar humano de alta calidad. La relación entre conservación, biodiversidad y restauración ecológica es cada día más evidente. El funcionamiento de los ecosistemas solo se puede mantener en tiempo y espacio con altos valores de biodiversidad y la restauración ecológica solo es posible si se conservan ecosistemas en donde se ex-



presa todo el potencial de especies a escala local y regional. La conservación de ecosistemas y la restauración de la biodiversidad van de la mano. Colombia, como país megadiverso, tiene gran responsabilidad en la conservación y restauración de su biodiversidad, la cual es la base de economías locales, regionales y nacionales y uno de los indicadores de sostenibilidad es la integridad de sus cuencas hidrográficas.

El éxito de la restauración de los ecosistemas terrestres está en el conocimiento regional de múltiples fenómenos como los disturbios que los afectan, el potencial de regeneración del ecosistema y la oferta regional de especies, la selección de especies, la rehabilitación del suelo y el entusiasmo de las entidades locales y las comunidades en recuperar sus ecosistemas para beneficio de todos.

En la figura 2 se presentan algunos patrones generales que se pueden aplicar a los ecosistemas terrestres.

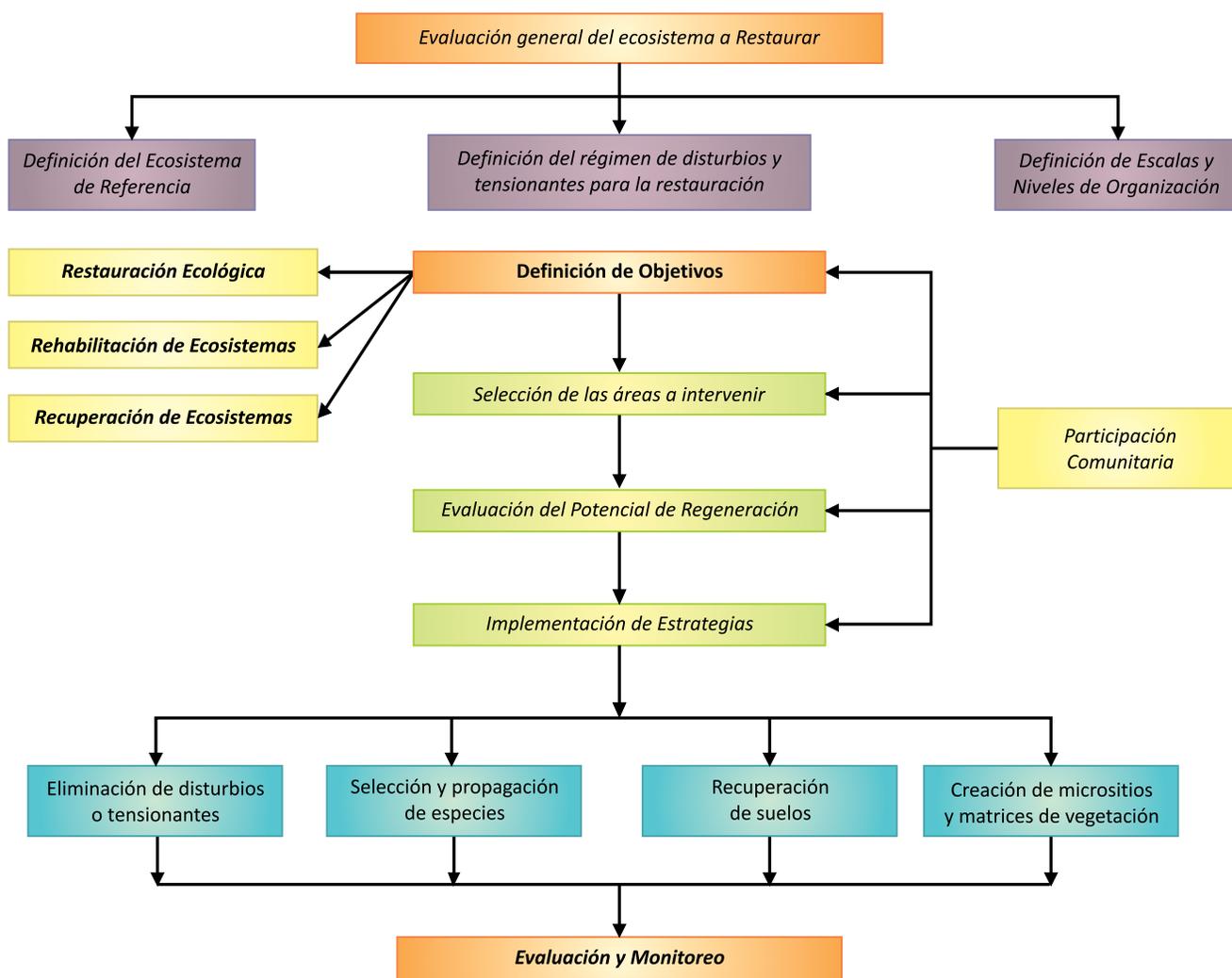


Figura 2. Esquema general de restauración ecológica para los ecosistemas terrestres de Colombia.

I. PÁRAMOS

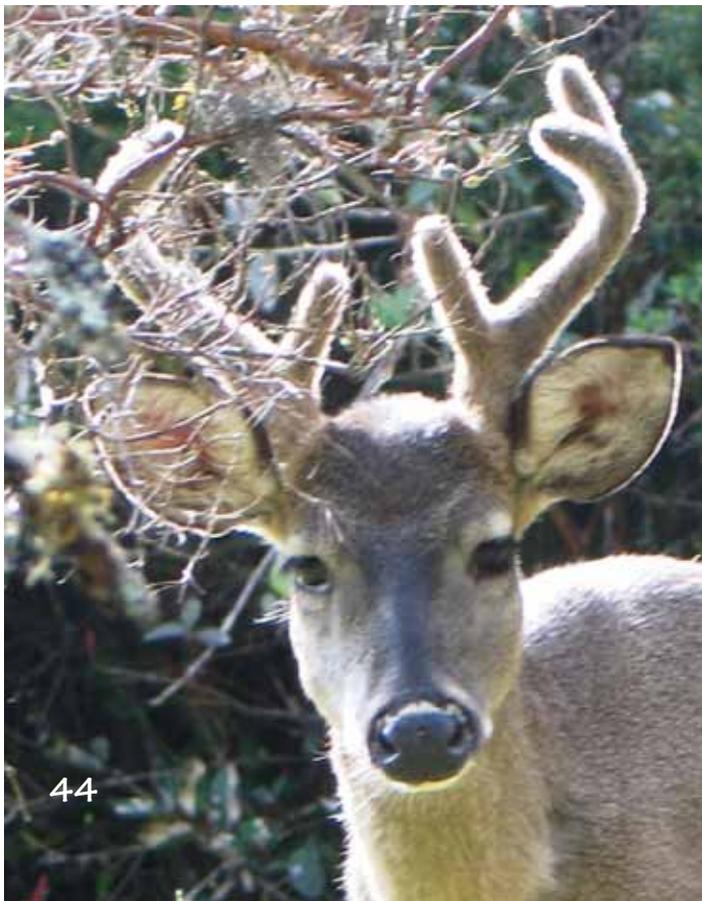
Definición

Los páramos son ecosistemas de alta montaña presentes por encima de los 3.200 - 3.900 m hasta el inicio de la zona nival aproximadamente a los 4.800 - 5.000 m (Rangel 2000, Van der Hammen & Hooghiemstra 2001), las condiciones locales de temperatura, humedad y vientos, disminuyen o amplían sus rangos altitudinales. Son de gran importancia principalmente por su capacidad de interceptar y almacenar agua, regular los flujos hídricos superficiales y subterráneos, albergar una rica flora endémica y otros servicios ambientales como cuencas abastecedoras de agua para consumo humano (MAVDT 2002), además de su extraordinaria belleza.



Determinantes

- La posición orográfica junto con la intensidad y distribución de las precipitaciones condiciona la presencia de páramos atmosféricamente húmedos y atmosféricamente secos (Lauer 1979, Cleef 1981, Sturm y Rangel 1985, Rangel 2000). La temperatura en las altas montañas tropicales disminuye aproximadamente 0,6 °C por cada 100 m de incremento en altura, por lo cual se forman gradientes térmicos representados en diferentes tipos de páramos con cambios fisonómicos y florísticos muy evidentes: subpáramo, páramo propiamente dicho y superpáramo.
- Los páramos húmedos tienen una precipitación anual superior a los 2000 mm, mientras que en los páramos secos está alrededor de 600 mm (Monasterio 1980, Rangel 2000, Rodríguez *et al.* 2006).
- La alternancia térmica diaria produce grandes cambios diarios de temperatura, lo que comúnmente se denomina “verano de día e invierno de noche” (Monasterio 1980, Azócar y Fariñas 2003). El fuerte descenso de la temperatura en la noche produce heladas en la época seca, lo cual genera grandes oscilaciones diarias en la temperatura del aire y del suelo en sus capas superiores.
- La temperatura media anual permanece constante durante todo el año (régimen isotérmico anual), pero existe un gradiente térmico desde los 10°C hasta -0,4 °C de temperatura media anual (Azócar y Fariñas 2003).
- El fotoperiodismo tiende a ser constante (Monasterio 1980), debido a la ubicación geográfica de los páramos en la región ecuatorial. La duración del día efectivo (entrada de luz) es casi siempre igual, por lo cual las plantas están adaptadas a periodos constantes de luz durante todo el año. La cantidad de luz incidente depende de los niveles de nubosidad locales.
- Los suelos son humíferos, entre los que predominan inceptisoles y entisoles (Malagón y Pulido 2000), con gran capacidad de almacenamiento de agua y pH ácido (3,7 - 5,5).
- Las comunidades vegetales están dominadas por formas de crecimiento típicas del ecosistema, como rosetas caulescentes y acaulescentes, bambusoides y macollas, cojines y arbustos, entre las más importantes (Vargas y Pedraza 2004)
- La vegetación presenta una baja biomasa, crecimiento lento, productividad primaria baja, descomposición lenta de la materia orgánica, acumulación de necromasa tanto en pie como en el suelo y bancos de semillas superficiales que son fácilmente degradables.
- Las bajas temperaturas del suelo, la alternancia diaria de la temperatura ambiental, el efecto desecante de vientos fuertes sobre la vegetación, baja presión atmosférica y en consecuencia alta radiación ultravioleta y bajas concentraciones de oxígeno, constituyen los principales limitantes ecológicos para el establecimiento y permanencia de las plantas en este ecosistema (Vargas-Ríos *et al.* 2004).





Disturbios

La intervención y transformación de los páramos se ha incrementado considerablemente en los últimos años como consecuencia de los siguientes disturbios: sistemas de producción no sostenible como agricultura y ganadería, invasiones biológicas, quemadas ocasionadas por el hombre, extracción de materiales a cielo abierto (minería) y plantaciones forestales de pinos, eucaliptos y acacias.

En una escala más puntual, otros disturbios comunes en los páramos son:

Extracción de leña para combustible y cercas vivas: aunque de menor impacto, la extracción de los elementos leñosos principalmente de la franja de subpáramo afecta la estructura del ecosistema y a largo plazo su composición y funcionamiento, creando condiciones favorables para el establecimiento de especies invasoras.

Desección de turberas para ampliación de la frontera agrícola: el régimen hidrológico de los páramos ha sido seriamente afectado por las alteraciones relacionadas con la eliminación de su vegetación nativa, cambio en los cursos naturales de agua, relleno de turberas y daños mecánicos del suelo para introducir sistemas de cultivos como el monocultivo de papa o ganadería intensiva.

Cacería: algunos animales de la fauna nativa están amenazados por ser muy apetecidos para consumo humano y comercio. El impacto de la cacería para el ecosistema puede ser muy severo, ya que las poblaciones de estas especies podrían estar cerca a la extinción o quedar demasiado fragmentadas. Así mismo se alteran las comunidades vegetales a las cuales están asociadas ya que son dispersores y polinizadores de muchas especies de plantas.

Objetivos de la restauración

- Restaurar la vegetación de ribera de las cuencas y microcuencas de los páramos, principalmente las especies de arbolitos que conformaban la vegetación original, como por ejemplo *Polylepis* y *Escallonia* y otras de interés local.
- Recuperar las turberas y cubetas que conforman redes hídricas locales, para lo cual se recomienda aislarlas de actividades como el pisoteo y pastoreo de ganado.
- Restaurar los bordes de las grandes lagunas de páramo las cuales tenían una vegetación leñosa de arbustos y arbolitos.
- Crear viveros para la propagación de especies vegetales nativas con las comunidades locales y vecinas de los páramos, junto con las entidades gubernamentales y privadas y pedir el apoyo a universidades e institutos de investigación cuando la propagación de las especies no es fácil en condiciones de vivero.
- Acelerar la recuperación de los páramos degradados por diferentes actividades antrópicas como agricultura, ganadería y quemadas, con la reintroducción de especies nativas que hayan sido propagadas o trasplantadas de sitios sin disturbios.
- Establecer diferentes trayectorias sucesionales a partir de especies pioneras (herbáceas y arbustivas), para restaurar áreas quemadas, pastoreadas y erosionadas.
- Restaurar áreas con presencia de especies invasoras como el retamo espinoso (*Ulex europaeus*) y pastos exóticos (*Holcus lanatus* y *Pennisetum clandestinum*).
- Rehabilitar los suelos de zonas erosionadas y pastoreadas.
- Restablecer el régimen hidrológico con base en la recuperación de la vegetación asociada a lagunas, turberas y cursos de agua.
- Eliminar los agentes de disturbio para estimular la restauración natural del ecosistema.
- En áreas degradadas o destruidas por minería es importante rehabilitar el suelo con enmiendas orgánicas y sembrar especies fijadoras de nitrógeno propias de páramo como especies del género *Lupinus*.



Acciones de restauración ecológica en Páramo

La recuperación de los páramos es una necesidad cada vez más urgente debido a la acelerada destrucción y transformación de este ecosistema. Aunque en Colombia son muy recientes los estudios y experimentos sobre restauración en los páramos, es posible proponer algunas acciones (Figura 3) como resultado de estas investigaciones y de experiencias internacionales, (véase por ejemplo: UAESPNN 2007, Insuasty-Torres *et al.* 2011, Sarmiento y Llambi 2011, Sarmiento y Smith 2011, Vargas y Velasco 2011).

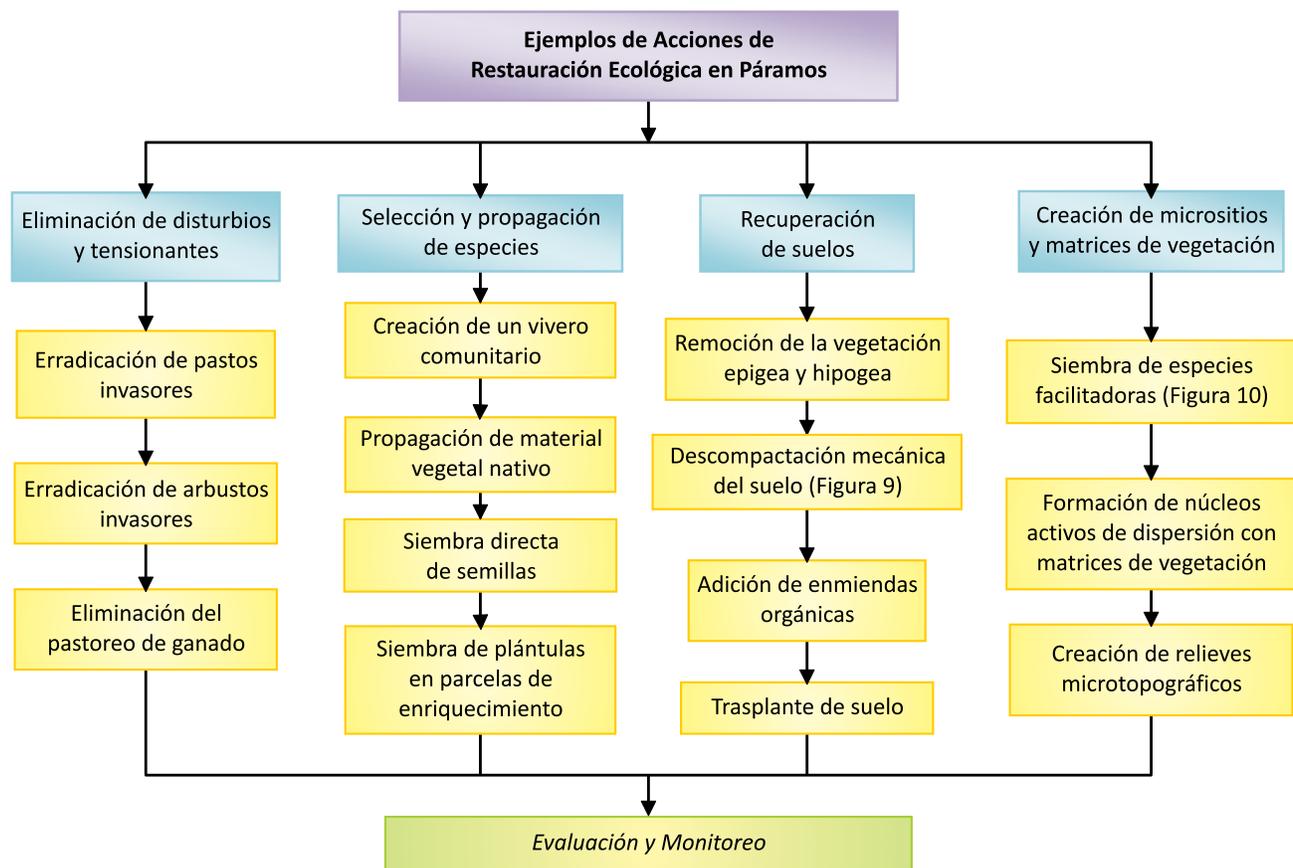


Figura 3. Esquema de acciones de restauración ecológica de los páramos

En Colombia se ha evaluado la utilización de algunas de estas estrategias, en páramos potrerizados, degradados por la implementación de cultivos y por la ocurrencia de incendios, algunos ejemplos son:

- **Restauración pasiva:** La eliminación o disminución de disturbios como la agricultura y el pastoreo por sí sola, permite la recuperación de la vegetación de las comunidades naturales del páramo, con las especies típicas de los diferentes estratos y hábitos, como lo han confirmado observaciones en páramo en la cordillera Oriental, donde Jaimes y Sarmiento (2002), concluyeron que se requiere de al menos 12 años de eliminación de dichos disturbios, para recuperar una parte significativa de la vegetación típica del páramo.

Insuasty-Torres *et al.* (2011), evaluaron la implementación de diversas estrategias de restauración activa en el páramo del Parque Nacional Natural Chingaza y encontraron los siguientes resultados:

- **Descompactación mecánica del suelo y el trasplante de mantos de suelo provenientes de zonas conservadas:** la descompactación del suelo, da lugar a la creación de micrositios, que es efectiva para permitir el establecimiento de nuevas especies. Aunque estas especies no sean las más abundantes, su permanencia puede determinar la dirección de la sucesión, cuando ocurra el reemplazo de las especies de ciclo de vida corto. Según los resultados de este estudio, a mayor tiempo transcurrido aumenta la aparición de nuevas especies. Esta estrategia requiere de un monitoreo a largo plazo para poder identificar diferentes niveles de sucesión, ya que después de 18 meses de observaciones no es posible llegar a las condiciones naturales de páramo, aunque es posible identificar la presencia de algunos elementos pioneros característicos como plántulas de *Espeletia argentea* (Figura 4). En este estudio el trasplante de suelo no arrojó los resultados esperados después de un año de monitoreo, puesto que no se observó una expresión importante del banco de propágulos del suelo de páramo sin disturbio; sin embargo, si se presentó mayor riqueza de especies en los sitios con suelo trasplantado, entre ellas algunas típicas de páramo, lo cual puede estar indicando que si hay una expresión del banco de propágulos del suelo trasplantado, pero a una escala de tiempo muy lenta.



Figura 4. Descompactación de suelo en parcelas experimentales dentro del PNN Chingaza (Izquierda: 0 meses, centro: 3 meses, derecha: 10 meses).

- **Siembra de *Lupinus bogotensis* como facilitadora del crecimiento y supervivencia de *Espeletia grandiflora* y macollas de pajonal:** Se encontraron resultados positivos al implantar esta estrategia, puesto que la supervivencia de *E. grandiflora* siempre fue superior al 75% y la tasa de crecimiento fue aumentando con el tiempo, mientras que la supervivencia de las macollas de pajonal fue del 100%. Aunque la mortalidad de los individuos de *E. grandiflora* aumentó con el tiempo, aquellos que sobrevivieron lograron un mayor crecimiento con el paso de los meses, lo cual podría ser un efecto positivo, consecuencia de la vecindad con la especie leguminosa fijadora de nitrógeno. También se observó un incremento significativo en todos los elementos mayores del suelo, después de 18 meses de observación, lo cual significa que la siembra de *L. bogotensis* también fue benéfica para que otros elementos, además del nitrógeno, estén disponibles para las especies vecinas, lo cual es fundamental para la recuperación de la cobertura vegetal de la zona disturbada.
- **Trasplante de individuos de *E. grandiflora* y especies de macollas:** Dados los altos porcentajes de supervivencia, la estrategia de trasplante de individuos es efectiva para llevar a cabo enriquecimiento en áreas potrerizadas con especies típicas de comunidades vegetales de estados sucesionales avanzados de páramo, como lo son *E. grandiflora* y especies de pajonal como *Calamagrostis effusa*. El rendimiento de *E. grandiflora* en pastizales abandonados en el páramo, se ve afectado por el tamaño inicial de los individuos trasplantados.
- **Propagación de especies de páramo:** UAESPP (2007) y Lotero *et al.* (2011) encontraron, en condiciones de invernadero en el PNN Los Nevados, que la propagación por semillas presenta menor porcentaje de mortalidad, mientras que en la propagación por estacas se presentó mayor pérdida de individuos. Las especies del género *Lupinus* se propagan muy bien por semilla.



Por el contrario las especies propagadas por estacas, rodamonte (*Escallonia myrtilloides*), Colorado (*Polylepis sericea*) y otros arbustos, están muy condicionadas por la identificación de individuos adultos aptos para la extracción de material, y el proceso de enraizamiento requiere un mayor cuidado y atención para su efectividad.

- **Selección de especies:** En el PNN Los Nevados entre las especies herbáceas se han identificado varias como claves para la restauración, puesto que presentan ciclos de vida cortos, con una rápida y abundante producción de frutos y semillas, que se dispersan por barocoria, anemocoria o zoocoria: *Gentianella dasyantha*, *Castilleja fissifolia*, *Baccharis genistelloides*, *Satureja nubigena*, *Pernettya prostrata*, *Senesio formosus*, *Bidens andicola* y varias especies de *Lupinus*. La mayoría de éstas especies han regenerado eficazmente luego de un incendio a partir de rebrotes vegetativos y en algunos casos a partir de semillas; en el caso de *Lupinus* spp., germinan y se desarrollan rápidamente en condiciones de invernadero, siendo además especies que ayudan a la fijación del nitrógeno en el suelo, mejorando sus características (UAESPP 2007 y Lotero *et al.* 2011)



Evaluación y Monitoreo

La restauración ecológica de los páramos es un proceso que requiere de mucho tiempo, debido a que los procesos ecosistémicos que se dan entre los factores bióticos y abióticos son mucho más lentos en comparación con otros ecosistemas. Por lo tanto, desde el momento de la implementación de las acciones, es necesario evaluar si se están recuperando los principales componentes del ecosistema como las especies clave, suelos y fauna nativa. Para mayor precisión sobre los aspectos a considerar en el monitoreo se deben tener en cuenta las siguientes variables:

Suelos

- Recuperación de la estructura física y química del suelo.
- Recuperación del régimen hidrológico del suelo.
- Recuperación de los Bancos de Semillas de las especies nativas.
- Presencia de micorrizas.

Flora y vegetación

- Presencia de semillas y plántulas de especies sucesionales tempranas y sucesionales tardías según el tipo de páramo y su flora regional. Aumento de la riqueza de especies típicas de páramo y disminución de especies invasoras.
- Supervivencia y crecimiento de los individuos de especies trasplantadas.
- Aumento de la cobertura de arbolitos de páramo en las riberas de los ríos.

Fauna

- Artropofauna presente en el suelo.
- Disponibilidad de hábitats para especies locales como pequeños mamíferos.
- A largo plazo registro de la presencia de especies grandes como venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*) y oso de anteojos (*Tremarctos ornatus*).
- Recuperación de la estructura demográfica de especies en peligro.

Régimen hidrológico

- Mejoramiento de los caudales de agua

Literatura citada

- Azócar, A., Fariñas, M. 2003. Páramos. En: Aguilera, M., Azócar, A., González-Jiménez, E. (Eds): Biodiversidad en Venezuela. Tomo II. FONACIT-Fundación Polar, Caracas, p. 716-733.
- Cleef, A. M. 1981. The vegetation of the páramos of the Colombian Cordillera Oriental, Tesis Doctorado, U. Utrecht.
- Insuasty-Torres, J., Gómez-Ruíz, P. A., Rojas-Zamora, O., Cárdenas, C. y O. Vargas Ríos. 2011. Estrategias para la restauración ecológica de los páramos en áreas afectadas por pastoreo (Parque Nacional Natural Chingaza, Colombia). En: Vargas R., O. y S. P. Reyes-B. (eds.). La restauración ecológica en la práctica: Memorias I Congreso Colombiano de Restauración Ecológica & II Simposio Nacional de Experiencias en Restauración Ecológica. Universidad Nacional de Colombia. Gente Nueva Editorial. Bogotá D. C., Colombia. p. 507-525.
- Jaimes, V. y L. Sarmiento. 2002. Regeneración de la vegetación de páramo después de un disturbio agrícola en la Cordillera Oriental de Colombia. *Ecotropicos* 15(1): 61-74.
- Lauer, W. 1979. La posición de los páramos en la estructura del paisaje de los Andes Tropicales. En: M.L. Salgado - Labouriau (ed.). El Medio Ambiente Páramo. Actas del Seminario de Mérida. Venezuela. p. 29 - 45.
- Lotero, J., Nadashowsky, E., Páez, G., Castellanos, O., Murillo, O., Suárez, A. L., Durance Manrique, J., Vargas, W. y L. Trujillo. 2011. Proceso de restauración ecológica del área afectada por el incendio de julio de 2006, cuenca alta del río Otún, en PNN Los Nevados. En: Vargas R., O. y S. P. Reyes-B. (eds.). La restauración ecológica en la práctica: Memorias I Congreso Colombiano de Restauración Ecológica & II Simposio Nacional de Experiencias en Restauración Ecológica. Universidad Nacional de Colombia. Gente Nueva Editorial. Bogotá D. C., Colombia. p.: 383-402.
- Malagón, D. y C. Pulido. 2000. Suelos del Páramo Colombiano. En: Rangel, O. (ed.). Colombia Diversidad Biótica III, la región de vida paramuna de Colombia. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia. Instituto Alexander von Humboldt. Bogotá, Colombia, p. 37-84.
- MAVDT - Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2002. Programa para el Manejo Sostenible y Restauración de Ecosistemas de la Alta Montaña Colombiana: PÁRAMOS. Bogotá D.C., Colombia.
- Monasterio, M. (ed.). 1980. Estudios Ecológicos en los Páramos Andinos. Universidad de los Andes. Mérida. Venezuela.
- Rangel-Ch. J.O. (ed). 2000. Colombia Diversidad Biótica III, la región de vida paramuna de Colombia. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia. Instituto Alexander von Humboldt. Bogotá, Colombia.
- Rodríguez, N., Armenteras, D., Morales, M y M. Romero. 2006. Ecosistemas de los Andes colombianos. 2da. Edición. Instituto de Investigación en recursos biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, Colombia.
- Sarmiento, L y L.D. Llambi. 2011. Regeneración del páramo después de un disturbio agrícola: síntesis de dos décadas de investigaciones en sistemas con descansos largos de la cordillera de Mérida. En: La restauración ecológica en Venezuela: Fundamentos y experiencias. Herrera F y I. Herrera, Eds. Ediciones IVIC. Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas. Caracas. Venezuela. Pp 123 - 145.
- Sarmiento, L. y J.K. Smith. 2011. Degradación de laderas durante el ciclo triguero en los Andes venezolanos y factores que limitan su restauración. En: La restauración ecológica en Venezuela: Fundamentos y experiencias. Herrera F y I. Herrera, Eds. Ediciones IVIC. Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas. Caracas. Venezuela. Pp 17 - 34.

- Sturm, H. y O. Rangel. 1985. Ecología de los Páramos Andinos: una visión preliminar integrada. ICN-MHN. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.
- UAESPNN 2007. Restauración Ecológica de la Cuenca Alta del Río Otún y Áreas Afectadas por el Incendio Forestal de Julio de 2006. Parque Nacional Natural los Nevados y CARDER.
- Van der Hammen, T y H. Hooghiemstra. 2001. Historia y paleoecología de los bosques montanos andinos neotropicales. En: Kappelle, M. y A. Brown (eds.). Bosques Nublados del Neotrópico. Instituto Nacional de Biodiversidad INBio. Costa Rica.
- Vargas-Ríos, O. 2000. Sucesión - Regeneración del páramo después de quemadas. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. 147 p.
- Vargas-Ríos, O., Jaimes, V., Castellanos, L. y J. Mora. 2004. Propuesta de actividades de investigación para los páramos de Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Vargas, O. & P. Pedraza 2004. Parque Nacional Natural Chingaza. Universidad Nacional, Colciencias, Parques Nacionales, Acueducto de Bogotá. 197 p.
- Vargas-Ríos, O y P. Velasco 2011. Reviviendo Nuestros Páramos. Restauración Ecológica de Páramos. Proyecto Páramo Andino



2. BOSQUES

Definición

Los bosques son ecosistemas con una cubierta continua de árboles, que tienen gran variabilidad en respuesta a la heterogeneidad ambiental (clima, geología, geomorfología, suelo, exposición, altitud). Debido a esto, en Colombia es posible encontrar varios grandes tipos de bosques tres de los cuales serán tratados en este documento: andinos, húmedos y secos.





Bosques Andinos: Son formaciones vegetales continuas, en gradientes altitudinales, ubicadas entre 1000 y 3900 m de altitud. Estos gradientes determinan tipos de bosques andinos: sub-andino (montano bajo), ubicado entre 1000 - 2300 m, andino (montano alto), ubicado entre 2300 - 3500 m y altoandino, ubicado entre 3500 – 3900 m de altitud, los cuales están influenciados por cambios de temperatura y humedad, además de su exposición a las corrientes de aire húmedo (Cavelier *et al.* 2001, Van der Hammen y Hooghiemstra 2001, Rodríguez *et al.* 2006, Tobón 2009). Un tipo de bosque andino muy característico es el bosque de niebla con presencia frecuente de nubes o neblina que forman la precipitación horizontal (Brown y Kapelle 2001, Cavelier *et al.* 2001).

Bosques Húmedos: Son formaciones vegetales ubicadas por debajo de los 1000 m de altitud, corresponden a los bosques tropicales húmedos, muy húmedos y pluviales de Holdridge (1967), Zonobioma Húmedo Ecuatorial (Hernández & Sánchez 1992) y al bosque ombrófilo de baja altitud (UNESCO 1973). La mayoría de estos ecosistemas se ubica en planicies bajas con altitudes menores a 300 m) (Etter 1998).

Bosques Secos: Son formaciones vegetales ubicadas entre 0 y 1000 m de altitud, en áreas donde existen dos períodos de sequía: uno prolongado entre diciembre o enero hasta marzo o abril y uno más corto (conocido como veranillo de San Juan) entre junio hasta julio o agosto (Hernández-C. y Sánchez 1992).



Determinantes

Tanto los bosques andinos, como los húmedos y secos, presentan características de temperatura, precipitación y edáficas, que determinan diferencias en la estructura y composición de especies, productividad y adaptaciones morfológicas y fisiológicas, resumidas en la tabla 3.

Tabla 3. Principales determinantes de los ecosistemas boscosos tropicales más importantes.

Determinante	Bosques Andinos	Bosque húmedo tropical	Bosque seco tropical
Precipitación	Variaciones de la precipitación relacionados con la altitud, con rangos entre 500 y 4000 mm. anuales, que no permiten deficiencias de humedad en el año.	Varía en un rango entre 1.800 mm (Magdalena Medio, Arauca) y 10.000 mm (Chocó) al año.	Entre 700 y 2000 mm anuales. La evapotranspiración supera ampliamente la precipitación durante el año, generando un déficit de agua.
Temperatura	Varía entre 6 y 12°C, la media anual disminuye con la altitud.	Temperatura media anual de 28°C.	La temperatura es superior a 24°C, con un valor máximo de 38°C.
Suelos	Presentan cambios asociados a variaciones florísticas que generan: cambios en los horizontes orgánicos, en la materia orgánica, en la relación C:N, en contenidos de N y P, espesor en la capa de raíces y actividad de lombrices.	Presentan en general características de baja fertilidad, que se manifiesta en la tendencia a la acidez (pH menores a 5.0) y en la baja disponibilidad de nutrientes.	Suelos muy fértiles, por lo que han sido objeto de intensa transformación.
Productividad	La productividad de hojarasca disminuye con la altitud, así como la concentración de CO ² , la de N foliar, las tasas de fotosíntesis y las de descomposición.	Reciclaje de nutrientes rápido y eficiente.	La mayor parte de la hojarasca anual se produce en la estación seca.
Estructura y Composición	Con el aumento de la altitud disminuye la altura del dosel, el número de estratos y el tamaño foliar; pero aumenta la densidad de individuos.	El bosque primario presenta gran complejidad florística y estructural, con árboles de 40 a 60 m de alto, albergan la mayor diversidad de especies, entre los bosques tropicales.	La altura del dosel oscila entre 15 y 25 m, y se presentan hasta cuatro estratos vegetativos, incluyendo el herbáceo; altos niveles de endemismo.
	En bosques sub-andinos abundantes epífitos vasculares y en bosques andinos abundantes epífitos no vasculares (musgos, líquenes y hepáticas).	Las familias de plantas más diversificadas incluyen las Leguminosae, Arecaceae, Sapotaceae, Annonaceae, Lauraceae, Rubiaceae y Melastomataceae.	Sus índices de diversidad corresponden a 1/2 la diversidad de bosques húmedos y a 1/3 de la diversidad de bosques muy húmedos del trópico. A excepción de familias como Cactaceae, Capparidaceae y Zygophyllaceae, se presenta familias de plantas, similares a las que se encuentran en los bosques húmedos y muy húmedos.
Otras	Presencia de gradientes altitudinales, con una disminución de la temperatura media del aire y del suelo como consecuencia de una disminución de la presión atmosférica y de la densidad del aire. Intercepción de neblina, especialmente en bosques altoandinos.	La humedad relativa varía entre 70 y 80%. La geología se caracteriza por la presencia de diferentes tipos de sustratos: sedimentarios, ígneos y metamórficos, aunque predominan los sedimentos arcillosos y arenosos de consolidación variable y de Edad Terciaria o Cuaternaria.	Adaptaciones fisiológicas al déficit hídrico: pérdida total o parcial del follaje en época seca, hojas compuestas y foliolos pequeños y presencia de aguijones o espinas.

Fuente: Grubb 1977, Hernández y Sánchez (1992), Álvarez *et al.* (1997), Etter 1998, IAvH (2000), Cavellier *et al.* 2001, Rodríguez *et al.* 2006.

Objetivos de la restauración ecológica

- Restaurar los bosques de las riberas de los ríos que conforman las principales cuencas hidrográficas del país.
- Restaurar la vegetación boscosa en laderas degradadas y en peligro de deslizamientos.
- Mejorar y acelerar los procesos naturales de regeneración natural en áreas de bosque convertidas en potreros y aquellas degradadas por el establecimiento de sistemas productores forestales no sostenibles (pinos, eucaliptus, acacias, urapanes) y cultivos ilícitos.
- Adquirir conocimiento de las especies de sucesión temprana y avanzada, para emplearlas en planes de restauración a corto, mediano y largo plazo.
- Acelerar la recuperación de bosques secundarios con la introducción de especies de árboles claves de bosques primarios (sucesionales tardías).
- Desarrollar trayectorias sucesionales con especies pioneras (sucesionales tempranas: herbáceas, arbustivas y leñosas), que presenten las mayores tasas de crecimiento y fijación de CO₂, para acelerar el proceso de sucesión.
- Restaurar áreas con presencia de especies invasoras.
- Ampliar parches o fragmentos de bosque y conformar núcleos de regeneración en potreros abandonados para restablecer la conectividad del paisaje.
- Recuperación de las propiedades físicas y químicas de suelos alterados en áreas muy erosionadas.
- Restablecer gradientes altitudinales completos de bosques andinos, principalmente en las cuencas hidrográficas que abastecen de agua a los acueductos locales.
- Recuperar áreas boscosas destruidas por todo tipo de minería.
- Utilizar Herramientas de Manejo del Paisaje para garantizar el máximo de biodiversidad regional en las cuencas hidrográficas y en general en grandes paisajes.

Disturbios

Los bosques se encuentran entre los ecosistemas con mayor presión antrópica en todo el país, por lo cual los procesos de transformación y pérdida son cada vez más acelerados. Los disturbios de mayor impacto son: deforestación; sistemas de producción no sostenible (producción extensiva e intensiva en agricultura y ganadería), siendo la potrerización una de las consecuencias más graves, sistemas productores forestales no sostenibles; reemplazo por cultivos ilícitos: coca (*Erythroxylon coca*), marihuana (*Cannabis indica*) y amapola (*Papaver somniferum*); extracción de materiales a cielo abierto; invasiones biológicas, fuegos antrópicos; sobreexplotación de recursos biológicos y fragmentación y pérdida de hábitat (Figura 5).

Existen tres grandes fenómenos relacionados con la pérdida de las coberturas boscosas: la paramización, la sabanización y la aridización. La paramización ocurre cuando se destruye el bosque altoandino y en consecuencia baja el páramo al encontrar áreas abiertas. La sabanización ocurre cuando se destruye el bosque seco y el bosque húmedo y especies de ecosistemas abiertos como las sabanas colonizan estas áreas, esta sabanización es un fenómeno de invasión de gramíneas africanas. La aridización ocurre cuando especies de ecosistemas secos invaden áreas que originalmente eran bosque seco, generalmente colonizan cactáceas y leguminosas.

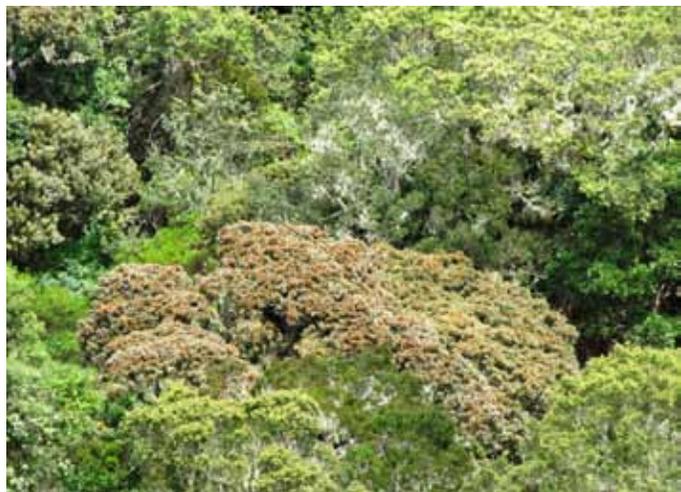




Figura 5. Algunos de los disturbios que afectan los bosques en Colombia. a) Fuego antrópico en bosque seco tropical, b) Deforestación de bosque húmedo tropical en el Amazonas, c) Pastoreo en Bosque seco tropical, d) Potrerización en bosque andino.

Acciones para la Restauración Ecológica de Bosques

La restauración ecológica de los bosques debe abordarse desde diferentes escalas espaciales y temporales, según las necesidades y objetivos del bosque en particular, sin embargo, existen acciones de restauración aplicables tanto en bosques andinos, como en bosques húmedos y secos, las cuales se resumen en la figura 6. Por otra parte, teniendo en cuenta que algunos bosques pueden tener más limitaciones que otros para la aplicación de dichas estrategias, como consecuencia de sus características propias, se hará referencia a dichas limitaciones y se mencionarán experiencias recientes de aplicación de estrategias de restauración de bosques, desarrolladas en Colombia y otros países del Trópico.



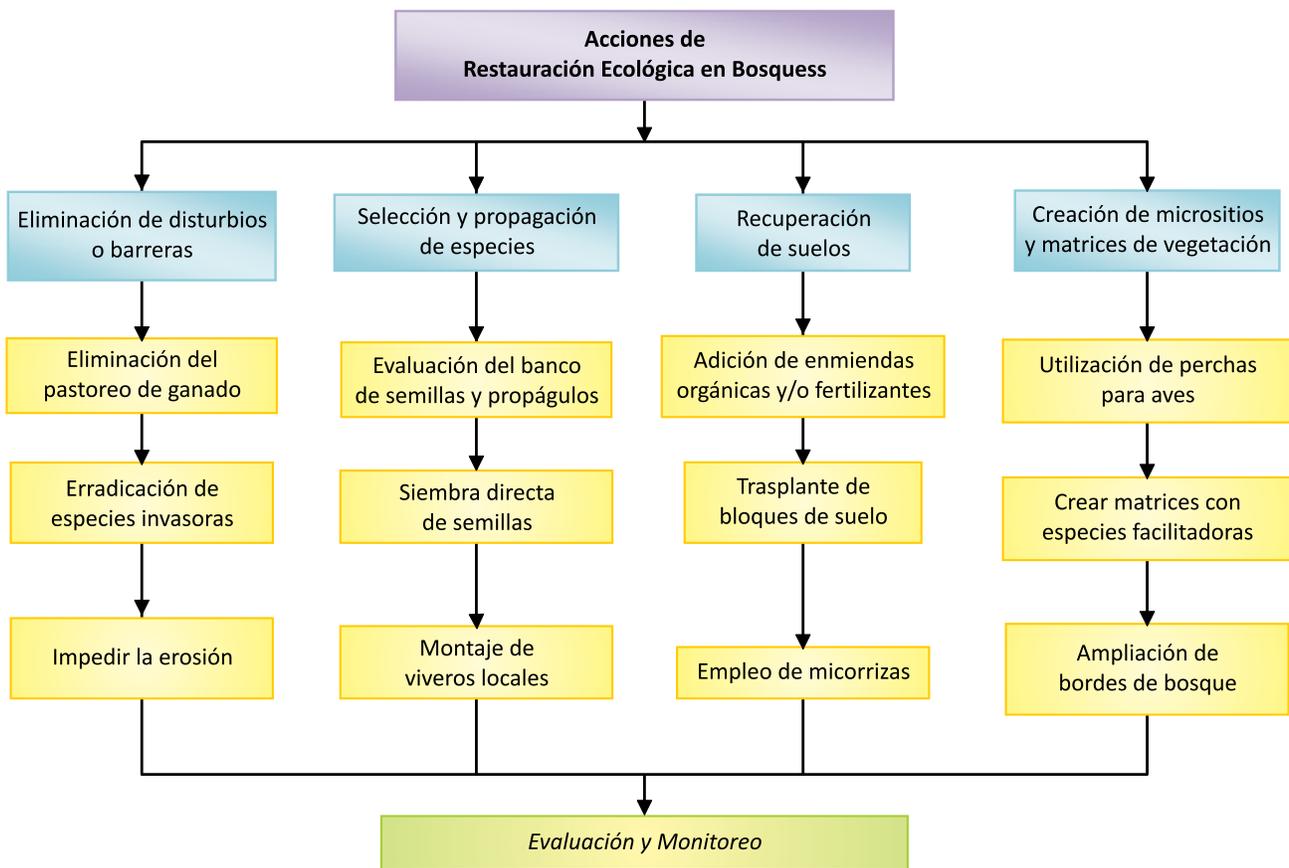


Figura 6. Esquema de acciones de restauración ecológica para los bosques





Bosques Andinos

- **Selección de especies:** En Filandia, Quindío, W. Vargas *et al.* (2011), evaluaron la capacidad de rebrote de once especies de árboles andinos, algunos de ellos usados con frecuencia en la formación de cercas vivas. Sus resultados sugieren que las especies del género *Ficus* son las más recomendadas por sus tasas de producción y baja mortalidad de rebrotes. En general los estacones de diámetros intermedios y pertenecientes a la parte media de las ramas presentan los mejores rebrotes. Esta práctica puede ser de gran importancia en el enriquecimiento de bosques secundarios con especies de alta producción de recursos para la fauna y en la aceleración de procesos de sucesión en proyectos de restauración ecológica.

Gómez y Vargas (2011) identificaron grupos funcionales de especies, a partir de rasgos de historia de vida, en la Reserva Natural Ibanasca (Tolima) y propusieron como las mejores especies para procesos de restauración ecológica del bosque andino de la reserva a las siguientes: *Cecropia mutisiana*, *Bocconia frutescens*, *Lochroma fuchsoides*, *Saurauia cuatrecasana*, *Tibouchina lepidota*, *Solanum sycophanta*, *Montanoa quadrangularis*, *Croton magdalenensis* y *Weinmannia pubescens*. Estas especies son las que mejor representan la mayoría de los rasgos evaluados y por lo tanto tienen un alto potencial para recuperar las zonas degradadas o alteradas de la reserva.

- **Evaluación del banco de semillas:** Cardona y Vargas (2011) evaluaron la importancia del Banco de Semillas Germinable (BSG) dentro del proceso de sucesión y regeneración natural del bosque subandino en la Reserva de Cachalú (Santander). En el estudio se encontró que muchas especies pioneras están disponibles en el suelo de bosques maduros y de sucesión avanzada, de manera que se observó una adecuada expresión del BSG al exponerlo a los factores ambientales que estimulan la germinación de semillas dormantes. Las especies con mayores densidades para el bosque maduro fueron: *Cestrum tomentosum*, *Cecropia telealba* y *Cecropia angustifolia*; para el secundario las especies dominantes fueron: *Clethra fagifolia*, *Tibouchina lepidota*, *Cecropia telealba* y *Sabicea coccocypselum*. Según el alto grado de diversidad encontrado en los dos BSG estudiados, éstos tendrían el potencial genético suficiente para recuperar la diversidad perdida de sitios degradados en este tipo de ecosistema, en relativamente poco tiempo a través de la sucesión vegetal.

Borda y Vargas (2011), caracterizaron el BSG de los suelos de plantaciones de pinos (*Pinus patula*) y de dos claros en regeneración natural, en los alrededores del Embalse Chisacá. El BSG de las plantaciones presentó una menor riqueza y densidad y no contenía especies leñosas nativas que pudiesen aportar a la regeneración del bosque, luego de la apertura de un claro. Dos de las especies catalogadas como deseables (*Verbesina crassiramea* y *Solanum oblongifolium*) forman BSG en los claros analizados en este estudio, por esta razón, es posible que el trasplante de suelo desde los claros estudiados, resulte ser una estrategia útil en la restauración de las aéreas dominadas por individuos de *P. patula*, siempre y cuando se realicen claros controlados y se remueva el colchón de acículas. Adicionalmente, si el banco de semillas de los claros es expresado bajo condiciones controladas - preferiblemente bajo invernadero-, se puede convertir en una fuente de plántulas de *V. crassiramea* y *S. oblongifolium*, que podrían ser trasplantadas a lugares donde se necesite introducir especies colonizadoras facilitadoras.



- **Núcleos de regeneración:** Ávila y Vargas (2011) evaluaron el uso de núcleos de restauración usando una matriz de *Lupinus bogotensis* combinada con las especies pioneras *Verbesina crassiramea*, *Smallanthus pyramidalis* y *Solanum oblongifolium*, como estrategia para la activar los procesos de sucesión dentro de plantaciones forestales de *Pinus patula* y *Cupressus lusitánica*, en alrededores del embalse de Chisacá. Durante el tiempo evaluado *L. bogotensis* tuvo un efecto positivo en el crecimiento de *S. pyramidalis*, un efecto neutro sobre *V. crassiramea* y un efecto negativo en *S. oblongifolium*. Las condiciones ambientales juegan un papel importante y es preferible que los núcleos de regeneración se establezcan en claros bien despejados y con buena calidad de luz. Las condiciones del suelo son un elemento crucial para el éxito de la siembra y es necesario un análisis de suelo antes de la siembra para saber si es necesaria la aplicación de enmiendas.
- **Disturbios experimentales:** En la Reserva Forestal Municipal de Cogua, se ha evaluado la activación de la regeneración por medio de pequeños disturbios como remoción de chusque, utilización de sombra artificial y traslado de hojarasca del bosque, los cuales aumentaron la germinación, aunque la expresión de especies leñosas requirió largos períodos de tiempo siendo más ágil en el traslado de hojarasca (León 2011).
- **Siembra de especies nativas:** En la Reserva de Cogua se evaluó la siembra de especies leñosas nativas, para la restauración de bosque andino, y se encontró que esta es una estrategia de enriquecimiento acertada, siempre que se tengan en cuenta los requerimientos específicos para su óptimo desarrollo (León 2011).

Bosques Húmedos

- **Restauración pasiva:** Norden *et al.* (2011), evaluaron la resiliencia de bosques secundarios en Costa Rica, con diferentes tiempos de abandono, después de ser utilizados para ganadería y agricultura. Encontraron una rápida recomposición florística, que atribuyen a tres factores clave: la presencia de parches de bosque maduro, altos niveles de dispersión y la presencia de especies generalistas en la flora regional. Aunque se ha encontrado que el bosque húmedo tiene alta capacidad de resiliencia y puede recuperarse rápidamente después de un disturbio, en cuanto a riqueza de especies se refiere, las características estructurales de los bosques secundarios, son muy diferentes a las de los bosques maduros, de manera que pueden tardar cientos de años en recuperar la estructura típica de bosques maduros, hecho que puede implicar retrasos en la sucesión de la fauna, mayores a los retrasos en la sucesión vegetal (Letcher & Chazdon 2009).
- **Evaluación del banco de semillas:** Castillo y Stevenson (2010) evaluaron la importancia del banco de semillas y de la lluvia de semillas, en la regeneración temprana de claros en la Amazonía colombiana. Encontraron que durante 8 meses de estudio, el banco de semillas contribuyó con un número mayor de individuos y especies que la lluvia de semillas. En este caso, se considera que los índices bajos de reclutamiento de plántulas, pueden estar asociados a las poblaciones reducidas de dispersores de semillas debido a la caza y/o a los bajos niveles de producción de frutos en el bosque.



- **Siembra directa de semillas:** Según lo encontrado por Doust (2011) ésta estrategia de restauración en bosques tiene algunas implicaciones que deben tenerse en cuenta, principalmente en el caso de bosques húmedos: La siembra amplia de semillas en áreas dominadas por malezas leñosas, puede resultar en altos niveles de remoción/predación de semillas por parte de roedores y mamíferos pequeños, lo cual también dependerá del sitio. El uso de semillas grandes, con cubierta dura y realizar la siembra durante el período de máxima producción de frutos, puede posiblemente reducir la pérdida de semillas por predación y desecación.
- **Uso de plantaciones forestales con especies nativas:** En evaluaciones del efecto de plantaciones forestales con especies nativas, sobre la dispersión de semillas, en un bosque húmedo del Guaviare, Muñoz *et al.* (2011), encontraron que dichas plantaciones no tienen un efecto marcado sobre la abundancia y riqueza de semillas dispersadas, ni sobre la riqueza y diversidad de las plántulas recientemente reclutadas, razón por la que proponen que el establecimiento a pequeña escala de plantaciones maderables de especies nativas, como herramientas de aprovechamiento sostenible no altera el proceso de sucesión, por lo menos con respecto a la dispersión de semillas y la regeneración temprana.

Bosques Secos

Teniendo en cuenta que el bosque seco tropical presenta características especiales de régimen climático, así como adaptaciones ecofisiológicas a los períodos de extrema sequía que experimenta, varias de las estrategias de restauración empleadas en los bosques tropicales, pueden tener restricciones para ser aplicadas en bosques secos. La tabla 4 presenta las características más relevantes de la regeneración de los bosques secos y los aspectos que merecen más atención para implementar estrategias de restauración (Vieira & Scariot 2006).

De acuerdo con Ceccon (2011) la marcada estacionalidad climática que caracteriza a los bosques secos, afecta los patrones de fenología, producción de semillas, germinación, sobrevivencia y desarrollo de las especies, lo cual tiene grandes implicaciones al momento de implementar estrategias de restauración. Por otra parte, se ha encontrado que las especies de bosque seco presentan una alta susceptibilidad ecofisiológica al fuego, por lo tanto este disturbio puede afectar severamente las acciones de restauración, especialmente en áreas de pastos, cercanas a zonas que aún son utilizadas para ganado, donde el uso del fuego es frecuente en época de verano.

- **Restauración Pasiva:** El éxito de esta estrategia para la restauración de bosques secos, depende de relictos de bosque secos cercanos en buen estado de conservación, como fuentes de propágulos cercanas, puesto que no existen bancos de semillas persistentes en estos ecosistemas y en el caso específico de la regeneración de pasturas abandonadas, se ha encontrado que la disponibilidad de agua es el factor que más influye en dicho proceso (Maza-Villalobos *et al.* 2011).
- **Banco de semillas:** El banco de semillas de los bosques secos es efímero, pocas semillas tienen un alto porcentaje de germinación después de permanecer largo tiempo en el suelo, lo que dificulta almacenar semillas por largo tiempo, para su posterior siembra (Rico-Gray & García 1992).



Tabla 4. Características de la regeneración natural de los bosques tropicales secos y aspectos a considerar en los planes de restauración (Modificado de Vieira & Scariot 2006).

Aspectos de la regeneración natural	Bosque seco	Estrategias de restauración / Aspectos a considerar para la restauración de bosque seco
Fenología	Dispersión de semillas secas y barocóricas concentrada al final de la estación seca, frutos carnosos en la estación de lluvias, con la germinación en la siguiente temporada de lluvias.	<ul style="list-style-type: none"> - Las semillas pueden ser colectadas y guardadas hasta que se presenten mejores condiciones de humedad, lo cual puede maximizar la duración de las lluvias para las plántulas, potencializa su crecimiento y su posibilidad de supervivencia. - Las plántulas también deben sembrarse en la época de mayor humedad.
Tipos de semillas, formas de dispersión y bancos de semillas	<p>Se presenta una proporción relativamente alta de frutos y semillas secas y semillas latentes, dispersadas por el viento.</p> <p>Pocas especies tienen banco de semillas en este tipo de bosque.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Las semillas transportadas por el viento se dispersan fácilmente en las áreas abiertas adyacentes. - Potencial de almacenamiento de semillas latentes. - Se presenta una alta proporción de especies con semillas dispersadas por vertebrados que deben ser consideradas.
Predación de semillas	Literatura escasa. Al parecer es dependiente del tipo de semilla y de la estructura de la vegetación.	Sepultar semillas, seleccionar especies menos susceptibles a la predación; sembrar plántulas y esquejes.
Germinación y establecimiento de plántulas	<ul style="list-style-type: none"> - La cobertura de plantas facilita la germinación y el establecimiento de plántulas. - Alto crecimiento de plántulas en áreas abiertas. - Mortalidad de plántulas muy alta en comparación con el bosque húmedo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Es importante eliminar las malezas presentes alrededor de árboles jóvenes y plántulas establecidos.
Resistencia al fuego	El fuego no es un disturbio natural frecuente.	La protección contra el fuego ayuda el desarrollo de la sucesión.
Capacidad de rebrote	Alta proporción de especies con capacidad para rebrotar.	Considerar el rebrote como una estrategia de restauración. Evaluar el uso de esquejes.



- **Propagación de material vegetal:** El uso de plántulas cultivadas en invernadero, presenta algunas restricciones, puesto que deben tener un tamaño óptimo al momento de la siembra, para que en época seca cuenten con un sistema radicular bien desarrollado que les permita soportar las condiciones de estrés hídrico. También se ha encontrado que la mortalidad de plántulas después de ser reclutadas, es mucho mayor comparada con la que se presenta en los bosques húmedos.

Por otra parte, las semillas utilizadas para siembra directa, deben ser cosechadas con un tiempo máximo de seis meses antes de su germinación, hecho que sumado a las restricciones que implica la siembra de plántulas, limita el uso de esta estrategia para proyectos a gran escala, de manera que el esfuerzo de colecta y siembra de semillas deberá ser muy alto (Ceccon 2011).



Investigadores de bosques secos en Venezuela recomiendan la evaluación de la dependencia que tienen las especies nativas de la presencia de propágulos de hongos formadores de micorrizas arbusculares (HMA), especialmente en el caso de áreas severamente perturbadas, en las que se ha encontrado una recuperación del inóculo de micorrizas arbusculares a través de una cronosecuencia de áreas degradadas por extracción de arena, siendo mayor la colonización en la localidad de 20 años (Reyes 2011). Allen *et al.* (2005), encontraron que el uso de inóculos de especies nativas de micorrizas estimula por varios años el crecimiento de especies de árboles en áreas muy degradadas, resultados que son apoyados por diversos estudios citados por Cecon (2011), los cuales reportan efectos muy positivos del uso de inóculos de hongos en el crecimiento de especies trasplantadas. También se ha recomendado el uso de hidrogel como una estrategia más efectiva para promover el crecimiento de especies propagadas, comparada con el uso de fertilizantes, ya que el uso de hidrogel garantiza la disponibilidad de agua para las plantas, mientras que el uso de fertilizantes promueve la contaminación ambiental e incrementa los costos (Fajardo *et al.* 2011, Reyes 2011).

En el caso de suelos afectados por tala y quema para ganadería, se ha encontrado que la remoción de los 10 primeros centímetros del suelo, tiene un efecto positivo en el crecimiento de especies trasplantadas, aunque este efecto es particular para cada especie (Reyes 2011).

Melo *et al.* (2008) sugieren la apertura de aproximadamente el 40% del dosel en fragmentos de bosque seco en proceso de regeneración, con el fin de disminuir las tasas de mortalidad de especies sucesionales tempranas y mejorar su reclutamiento.



Teniendo en cuenta estas restricciones para el uso de estas técnicas de propagación, algunos autores han propuesto considerar la capacidad de rebrote como una estrategia para la restauración de bosques secos, mediante el uso de esquejes, puesto que las especies de árboles y arbustos con las mayores densidades, regeneran por rebrote (Miller *et al.* 1998, Vieira & Scariot 2006, Mostacedo *et al.* 2009). Castellanos y Bonfil (2010) sugieren la reintroducción de plantas de *Bursera*, producidas a partir de estacas pequeñas, como técnica factible para la restauración de sitios perturbados, pero se deben considerar aspectos particulares de la especie utilizada y las características del suelo.

Siembra de especies nativas atrayentes de polinizadores y dispersores de semillas:

En bosques secos el crecimiento de las plántulas en su fase inicial es lento en la parte aérea y es mayor en la raíz, hecho que en ciertos casos puede convertirse en competencia radicular con efectos negativos en el crecimiento de las plántulas, lo cual implica que la utilidad de las plántulas, como perchas atrayentes de fauna dispersora requerirá más tiempo que en bosques húmedos (Cecon 2011).

Plantaciones de enriquecimiento: Las plantaciones de enriquecimiento con especies nativas, han mostrado ser una técnica útil para acelerar la recuperación de áreas afectadas por actividades agropecuarias, siendo la participación de la comunidad en los procesos de diseño y evaluación de la restauración, uno de los factores más determinantes del éxito de las plantaciones (Carrasco y Martínez 2011). Esta estrategia es una opción para las tierras que han perdido casi todos los remanentes de bosque nativo y donde los suelos y la vegetación han cambiado a nuevos estados de estructura y función; la conversión de pasturas a plantaciones de árboles, puede facilitar la regeneración natural por debajo de ellas y es apropiada cuando los pastos son propensos a fuegos y/o existe una carencia de fuentes cercanas de semillas (Griscom & Ashton 2011).

Evaluación y Monitoreo de la restauración en Bosques

Para lograr la restauración de los bosques, es indispensable recuperar la cobertura vegetal a partir de especies pioneras que inicien la sucesión, recuperar el banco de propágulos y reactivar el potencial de regeneración (Figura 7). A nivel de individuos, es importante monitorear el crecimiento por medio de datos de altura, cobertura, número de ramas, tiempo de floración y fructificación. A nivel de paisaje, identificar especies de diferentes estados sucesionales y estratos, recuperación del horizonte orgánico de los suelos y fauna asociada.



Figura 7. Restauración de áreas de bosque andino, invadidas por retamo espinoso en Usme, Bogotá D. C.

Teniendo en cuenta los parámetros observados en los cambios sucesionales de los diferentes tipos de bosque (Finegan 1996, Henry & Jouard 2007, van Breugel *et al.* 2007, Babweteera & Brown 2009), se recomiendan entre otras, las siguientes variables para la evaluación del éxito de la restauración:

- Reclutamiento, mortalidad y crecimiento de individuos.
- Cambios en la diversidad, estructura y complejidad de la vegetación.
- Recuperación de la fauna edáfica: Se ha reportado que grupos de artrópodos presentes en el suelo, junto con cambios en la producción de hojarasca, constituyen un buen indicador del estado de restauración de bosques húmedos que han sido reemplazados por pastos; entre los grupos de artrópodos útiles se encuentran: hormigas, cienpies, milpiés, isópodos y anfípodos (Nakamura *et al.* 2003).

Estudios realizados en zonas rehabilitadas de bosque seco, después de la explotación de carbón, han mostrado que los gremios de hormigas son indicadores de la recuperación del hábitat, de manera que los gremios aumentan con la edad de la rehabilitación y son más parecidos en su composición a los gremios característicos de bosques (Dominguez y Armbrrecht 2009, 2011).

En bosques secos del Valle del Cauca se ha empleado el estudio de Coleópteros de la familia Staphylinidae, como grupo bioindicador de paisajes naturales y alterados (García y Chacón 2005).

- Evaluación de la estructura de comunidades de aves, murciélagos y anfibios: Aves y murciélagos desempeñan un papel fundamental como dispersores de semillas y en consecuencia determinan las características de composición y estructura de los bosques secundarios. Por otra parte, en la medida que avanza la sucesión del bosque, se han observado cambios en la composición y estructura de comunidades de frugívoros y de anfibios (García *et al.* 2007, Peña *et al.* 2012).





Literatura citada

- Allen, M. F., Allen, E. B. & A. Gómez-Pompa. 2005. Effects of Mycorrhizae and Nontarget Organisms on Restoration of a Seasonal Tropical Forest in Quintana Roo, Mexico: Factors Limiting Tree Establishment. *Restoration Ecology* 13(2): 325–333.
- Álvarez, M., Escobar, F., Gast, F., Mendoza, H., Repizzo, A. y H. Villareal. 1998. Bosque Seco Tropical. En: Chávez, M. E. y N. Arango. (eds.). Informe Nacional sobre el estado de la biodiversidad Colombia 1997. Tomo I. Diversidad Biológica. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. SantaFé de Bogotá, Colombia. p: 56 - 71.
- Ávila, L. A. y O. Vargas. 2011. Núcleos de restauración de *Lupinus bogotensis* en claros de plantaciones de *Pinus patula* y *Cupressus lusitánica*. En: Vargas R., O. y S. P. Reyes-B. (eds.). La restauración ecológica en la práctica: Memorias I Congreso Colombiano de Restauración Ecológica & II Simposio Nacional de Experiencias en Restauración Ecológica. Universidad Nacional de Colombia. Gente Nueva Editorial. Bogotá D. C., Colombia. p. 444-455.
- Babweteera F. & N. Brown. 2009. Can remnant frugivore species effectively disperse tree seeds in secondary tropical rain forests?. *Biodivers. Conserv.* 18: 1611–1627.
- Borda, M. y O. Vargas. 2011. Caracterización del banco de semillas germinable de plantaciones de pinos (*Pinus patula*) y claros en regeneración natural (alrededores del Embalse de Chisacá, Bogotá - localidad de Usme - Bosque altoandino). En: Vargas R., O. y S. P. Reyes-B. (eds.). La restauración ecológica en la práctica: Memorias I Congreso Colombiano de Restauración Ecológica & II Simposio Nacional de Experiencias en Restauración Ecológica. Universidad Nacional de Colombia. Gente Nueva Editorial. Bogotá D. C., Colombia. p. 456-473.
- Brown, A.D. y M. Pappelle. 2001. Introducción a los bosques nublados del neotrópico: una síntesis regional. M. Kappelle y A.D. Brown (Eds) Bosques nublados del neotrópico. Instituto Nacional de Biodiversidad. Costa Rica.
- Cardona, A. y O. Vargas R. 2011. Potencial de regeneración del banco de semillas germinable de un bosque subandino: implicaciones para la restauración ecológica. (Reserva Biológica Cachalú, Santander. Colombia). En: Vargas R., O. y S. P. Reyes-B. (eds.). La restauración ecológica en la práctica: Memorias I Congreso Colombiano de Restauración Ecológica & II Simposio Nacional de Experiencias en Restauración Ecológica. Universidad Nacional de Colombia. Gente Nueva Editorial. Bogotá D. C., Colombia. p. 430-443.
- Carrasco-C., V. y C. Martínez-G. 2011. Recuperación de la Biodiversidad con Plantaciones Experimentales de especies nativas en selvas húmedas y secas de México. Tres estudios de caso. En: Vargas R., O. y S. P. Reyes-B. (eds.). La restauración ecológica en la práctica: Memorias I Congreso Colombiano de Restauración Ecológica & II Simposio Nacional de Experiencias en Restauración Ecológica. Universidad Nacional de Colombia. Gente Nueva Editorial. Bogotá D. C., Colombia. p. 297-305.
- Castellanos-Castro, C. y C. Bonfil-Sanders. 2010. Establecimiento y crecimiento inicial de estacas de tres especies de *Bursera Jacq. ex L.* Rev. Mex. Cien. For. Vol. 1 Núm. 2: 93-108.
- Castillo, L. S. & P. R. Stevenson. 2010. Relative Importance of Seed-bank and Post-disturbance Seed Dispersal on Early Gap Regeneration in a Colombian Amazon Forest. *Biotropica* 42(4): 488–492.
- Cavelier, J., D. Lizcano & M.T. Pulido. 2001. Colombia. En: M. Kappelle y A. Brown (eds.). Bosques Nublados del Neotrópico. Instituto Nacional de Biodiversidad INBio. Costa Rica.



- Ceccon E. 2011. Los bosques tropicales estacionalmente secos: ¿Una prueba ácida para la restauración?. En: Vargas R., O. y S. P. Reyes-B. (eds.). La restauración ecológica en la práctica: Memorias I Congreso Colombiano de Restauración Ecológica & II Simposio Nacional de Experiencias en Restauración Ecológica. Universidad Nacional de Colombia. Gente Nueva Editorial. Bogotá D. C., Colombia. p. 119-130.
- Dominguez, Y. y I. Armbrecht. 2009. Restablecimiento de Funciones Ecológicas: Movimiento de Semillas por Hormigas y la Rehabilitación después de Minería en La Guajira Colombia. Rev. Bras. De Agroecologia. Nov. Vol. 4 No. 2: 2908-2911.
- Dominguez-Haydar, Y. & I. Armbrecht. 2011. Response of Ants and Their Seed Removal in Rehabilitation Areas and Forests at El Cerrejón Coal Mine in Colombia. Restoration Ecology Vol. 19, No. 201: 178-184.
- Doust, S. J. 2011. Seed Removal and Predation as Factors Affecting Seed Availability of Tree Species in Degraded Habitats and Restoration Plantings in Rainforest Areas of Queensland, Australia. Restoration Ecology Vol. 19, No. 5, p. 617-626.
- Etter, A. 1998. Bosque húmedo tropical. En: Chavez. M. E. y N. Arango. (eds.). Informe Nacional sobre el estado de la biodiversidad Colombia 1997. Tomo I. Diversidad Biológica. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. SantaFé de Bogotá, Colombia. p. 106-133.
- Fajardo, L., J.P. Rodríguez, V. González y J.M. Briceño. 2011. Ensayos preliminares para la restauración de áreas degradadas por la actividad de extracción de arena en la península de Macanao, Isla de Margarita. En: La restauración ecológica en Venezuela: fundamentos y experiencias. Herrera F y I. Herrera Eds. Ediciones IVIC. Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas. Caracas Venezuela. Pp 199-213.
- Finegan, B. 1996. Pattern and process in neotropical secondary rain forests: the first 100 years of succession. TREE Vol. 11, no. 3: 119-124.
- García-C. & P. Chacón de Ulloa. 2005. Estafilíidos (Coleoptera: Staphylinidae) en fragmentos de bosque seco del valle geográfico del río Cauca. Rev. Colomb. Entomol. v.31 n.1: 43-50.
- García, J. C., Cárdenas, H. H. y F. Castro C. 2007. Relación entre la diversidad de anuros y los estados sucesionales de un bosque muy húmedo montano bajo del Valle del Cauca, suroccidente colombiano. Caldasia 29(2): 363-374.
- Gómez-R., P. A. y O. Vargas R. 2011. Grupos funcionales de especies promisorias para la restauración ecológica con base en sus rasgos de historia de vida en la Reserva Natural Ibanasca (Ibague, Tolima, Colombia). En: Vargas R., O. y S. P. Reyes-B. (eds.). La restauración ecológica en la práctica: Memorias I Congreso Colombiano de Restauración Ecológica & II Simposio Nacional de Experiencias en Restauración Ecológica. Universidad Nacional de Colombia. Gente Nueva Editorial. Bogotá D. C., Colombia. p. 239-247.
- Griscom, H. P. & M. S. Ashton. 2011. Restoration of dry tropical forests in Central America: A review of pattern and process. Forest Ecology and Management 261: 1564-1579.
- Grubb, P. J. 1977. Control of forest growth and distribution on wet tropical mountains, with special reference to mineral nutrition. Annual Review of Ecology and Systematics 8: 83 - 107.
- Henry M. & S. Jouard. 2007. Effect of Bat Exclusion on Patterns of Seed Rain in Tropical Rain Forest in French Guiana. BIOTROPICA 39(4): 510-518.



- Hernández-C., J. I. y H. Sánchez. 1992. Biomás terrestres de Colombia. En: G. Halffter, comp. La Diversidad Biológica de Iberoamérica I. Acta Zoológica Mexicana. Vol. Esp. México. p. 153-173.
- Holdridge, L. R. 1967. Life zone ecology. Tropical Science Center, San José, Costa Rica. 206 p.
- IaVH - Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. 2000. Colombia megadiversa: cinco años explorando la riqueza de un país biodiverso. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Villa de Leyva. Boyacá, Colombia. 262 p.
- León, A. 2011. Síntesis simposio sobre Restauración de Ecosistemas Andinos. En: Vargas R., O. y S. P. Reyes-B. (eds.). La restauración ecológica en la práctica: Memorias I Congreso Colombiano de Restauración Ecológica & II Simposio Nacional de Experiencias en Restauración Ecológica. Universidad Nacional de Colombia. Gente Nueva Editorial. Bogotá D. C., Colombia. p. 526-535.
- Letcher S. G. & R. L. Chazdon. 2009. Rapid Recovery of Biomass, Species Richness, and Species Composition in a Forest Chronosequence in Northeastern Costa Rica. *Biotropica* 41(5): 608–617.
- Maza-Villalobos, S., Balvanera, P & M. Martínez-Ramos. 2011. Early Regeneration of Tropical Dry Forest from Abandoned Pastures: Contrasting Chronosequence and Dynamic Approaches. *Biotropica* 43(6): 666–675.
- Melo-Cruz, O., Paz, M. M. y P. Guerra. 2008. Restauración de la regeneración natural Del Nogal (*Cordia alliodora* R. & P.), en áreas de bosque seco tropical, norte del Tolima. En: Barrera-Cataño, J. I., M. Aguilar-Garavito y D. C. Rondón-Camacho (eds.). Experiencias de Restauración Ecológica en Colombia. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, D. C. 274 p.
- Miller P.M. & J. B., Kauffman. 1998. Seedling and sprout response to slash-and-burn agriculture in a tropical deciduous forest. *Biotropica*, 30: 538-546.
- Mostacedo, B., Putz, F., Fredericksen, T., Villca A. & T. Palacios. 2009. Contributions of root and stump sprouts to natural regeneration of a logged tropical dry forest in Bolivia. *Forest Ecology and Management* 258: 978–985
- Muñoz, J. C., Castaño, N. y P. Stevenson. 2011. Dispersión de semillas y regeneración temprana bajo plantaciones maderables en un fragmento de bosque amazónico en Guaviare, Colombia. En: Vargas R., O. y S. P. Reyes-B. (eds.). La restauración ecológica en la práctica: Memorias I Congreso Colombiano de Restauración Ecológica & II Simposio Nacional de Experiencias en Restauración Ecológica. Universidad Nacional de Colombia. Gente Nueva Editorial. Bogotá D. C., Colombia. p. 325-334.
- Nakamura, A., Proctor, H. & C. P. Catterall. 2003. Using soil and litter arthropods to assess the state of rainforest restoration. *Ecological Management & Restoration* Vol. 4 supplement February: S20-S28.
- Norden, N., Chazdon, R. L., Chao, A., Jiang, Y. H. y J. B. Vélchez-Alvarado. 2011. Resiliencia en bosques tropicales húmedos: reensamblaje de las comunidades de árboles en bosques secundarios. En: Vargas R., O. y S. P. Reyes-B. (eds.). La restauración ecológica en la práctica: Memorias I Congreso Colombiano de Restauración Ecológica & II Simposio Nacional de Experiencias en Restauración Ecológica. Universidad Nacional de Colombia. Gente Nueva Editorial. Bogotá D. C., Colombia. p. 359-365.
- Peña-Cuéllar de la, E., Stoner, K. E., Avila-Cabadilla, L. D., Martínez-Ramos, M. & A. Estrada. 2012. Phyllostomid bat assemblages in different successional stages of tropical rain forest in Chiapas, Mexico.

Reyes B., S. P. 2011. Síntesis simposio sobre restauración ecológica de ecosistemas de baja altitud. En: Vargas R., O. y S. P. Reyes-B. (eds.). La restauración ecológica en la práctica: Memorias I Congreso Colombiano de Restauración Ecológica & II Simposio Nacional de Experiencias en Restauración Ecológica. Universidad Nacional de Colombia. Gente Nueva Editorial. Bogotá D. C., Colombia. p. 375-382.

Rico-Gray, V. & J. García-Franco. 1992. Vegetation and soil seed bank on successional stages in tropical lowland deciduous forest. *Journal of Vegetation Science*, 3, 617-624.

Rodríguez, N., Armenteras, D., Morales, M y M. Romero. 2006. Ecosistemas de los Andes colombianos. 2da. Edición. Instituto de Investigación en recursos biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, Colombia.

Tobón, C. 2009. Los bosques andinos y el agua. Serie Investigación y sistematización #4. Programa regional ECOBONA-INTERCOOPERATION. CONDESAN. Quito, Ecuador.

UNESCO. 1973. Clasificación internacional para la cartografía de la vegetación. Unesco. París, Francia.

van Breugel M., Bongers, F. & M. Martínez-Ramos. 2007. Species Dynamics during Early Secondary Forest Succession: Recruitment, Mortality and Species Turnover. *BIOTROPICA* 35(5): 610-619.

Van der Hammen, T. y H. Hooghiemstra. 2001. Historia y paleoecología de los bosques montanos andinos neotropicales. En: Kappelle M. y A. Brown (eds.). *Bosques Nublados del Neotrópico*. Instituto Nacional de Biodiversidad INBio. Costa Rica.

Vargas, W., Lozano, F. H. y L. M. Renjifo. 2011. Evaluación de la capacidad de rebrote en once especies arbóreas andinas, su potencial en el establecimiento de cercas vivas y en la aceleración de procesos de sucesión y restauración. En: Vargas R., O. y S. P. Reyes-B. (eds.). La restauración ecológica en la práctica: Memorias I Congreso Colombiano de Restauración Ecológica & II Simposio Nacional de Experiencias en Restauración Ecológica. Universidad Nacional de Colombia. Gente Nueva Editorial. Bogotá D. C., Colombia. p. 220-229.

Vieira D., L. M., Scariot A., Sampaio, A. B. & K. D. Holl. 2006. Tropical dry-forest regeneration from root suckers in Central Brazil. *Journal of Tropical Ecology*, 22, p. 353-357.



3. SABANAS

Determinantes

Las sabanas son formaciones climáticas tropicales, del piso térmico cálido con una cobertura continua de gramíneas, en las cuales pueden aparecer entremezclados subarbustos esparcidos e inclusive árboles y palmeras. Se desarrollan por lo general en planicies con muy ligero declive y en ocasiones en terrenos quebrados u ondulados. Entre las sabanas se encuentra extensiones variables de bosques deciduos y bosques estacionales siempreverdes, formando patrones complejos con la vegetación herbácea (Sarmiento 1983).

De acuerdo con Sarmiento (1994), Hernández y Sánchez (1994) y Romero-R. (2009), las sabanas tropicales presentan las siguientes características:

- El clima presenta alternancia entre una estación lluviosa y otra seca.
- Las temperaturas son constantemente altas durante todo el año, los promedios de precipitación se encuentran entre 1000 y 2500 mm anuales y se distingue un régimen unimodal o bimodal de lluvias, pero siempre con 4-9 meses de sequía pronunciada durante el año.
- Los suelos muy pobres en materia orgánica y nutrientes minerales, ricos en óxidos de hierro.
- El fuego es uno de los factores ecológicos más importantes para el mantenimiento de la dinámica de las sabanas, es responsable de la mineralización de una parte muy significativa de la materia orgánica producida. Por otra parte, el fuego tiene efectos sobre la dinámica de los bancos de semillas del ecosistema, determinando la finalización del período de dormancia de algunas semillas, así como una reducción en la densidad de semillas de subarbustos, monocotiledóneas y pastos (Williams *et al.* 2005).

La dinámica del fuego es compleja y depende de varios factores: a. Las características biológicas de cada tipo de sabana, que determina la cantidad de biomasa susceptible a ser quemada, b. Las especies determinan la presencia y severidad del fuego, mediante controles físicos o de combustión, c. De factores como topografía, precipitación, suelos y vientos (Mbon *et al.* 2004)

- Diversidad de adaptaciones morfológicas, fenológicas y funcionales de las plantas a las condiciones extremas de sequía estacional, al exceso periódico de agua, la falta de nutrientes y a la acción repetitiva de quemas y la herbivoría.



Disturbios

- Sistemas de producción no sostenible: producción extensiva e intensiva en agricultura y ganadería, con predominio de ganadería extensiva (López-Hernández *et al.* 2005).
- Minería: Extracción de petróleo.
- Invasiones biológicas: En los últimos cuarenta años los pastos nativos de las sabanas de Sur América, han sido reemplazados por pastos introducidos de África, principalmente de los géneros: *Bachiarria*, *Andropogon* y *Panicum*, en Colombia, los pastos nativos han sido asociados con leguminosas forrajeras introducidas como *Arachis pintoj*, *Desmodium ovalifolium* y *Centrosema acutifolium* (López-Hernández *et al.* 2005) y entre los pastos introducidos se destacan: *Brachiaria decumbens*, *B. dictvoneura*, *B. brizantha* y *B. humidicola* (Romero 2004).
- Sistemas de producción forestal no sostenible: Plantaciones de *Pinus caribea* (Cortés *et al.* 2005, López *et al.* 2005).



Objetivos de la restauración

- Restaurar ecosistemas de sabana degradados por sobrepastoreo, quemas frecuentes e introducción de pastos exóticos.
- Restaurar sabanas con plantaciones de pino (*Pinus caribea*).
- Restaurar los ecotonos sabana-bosque.
- Restaurar sabanas arboladas, matas de monte y morichales.
- Propagar especies propias de los ecosistemas de sabana.

Acciones para la restauración ecológica de Sabanas

La figura 8 muestra un resumen de pasos a tener en cuenta para la restauración ecológica de sabanas. A continuación se presenta una explicación breve de algunos de estos pasos y de las acciones que se han implementado para la restauración de sabanas en el Trópico.

- **Definición del ecosistema de referencia:** Es fundamental distinguir el tipo de sabana que se va a restaurar. En Colombia existen tres grandes tipos ecológicos de sabanas (Hernández y Sánchez 1994):
 - Sabanas estacionales: Dominadas por gramíneas, frecuentemente con árboles o arbustos dispersos, sometidas a las condiciones más fuertes y prolongadas de sequía, hasta cinco o seis meses consecutivos y a la mayor frecuencia de quemas, comúnmente una cada año o cada dos años, aunque en ocasiones se presenta más de una anual.
 - Sabanas hiperestacionales: Ubicadas sobre suelos inundables durante varios meses y que se desecan totalmente durante otros meses, normalmente están sobre suelos más fértiles, aunque son muy impermeables y casi imposibles de aprovechar para un uso diferente al ganadero.
 - Sabanas inundadas o semiestacionales: en las cuales el suelo permanece muchos meses anegado o saturado y solamente durante un corto período se seca por evaporación o por drena-

je, pero nunca totalmente, de manera que siempre queda agua disponible en el suelo. Sólo prosperan unas pocas especies arbóreas, de manera que generalmente toman el aspecto de vastas extensiones gramíneas sin ninguna especie leñosa, exceptuando ciertas palmas como el caso del moriche *Mauritia minor*.

- **Definición de escalas y niveles de organización y de disturbio:** El régimen natural de fuego presente en los ecosistemas de sabana, está fuertemente ligado con la conservación de biodiversidad (Andersen & Hoffmann 2011).

Según Romero-R. (2009) aunque el fuego es uno de los factores ecológicos más importantes para el mantenimiento de la dinámica de las sabanas, en Colombia no existen estudios que permitan estimar la importancia y escala de este disturbio natural. Entre diciembre de 2007 y abril de 2008, temporada seca en la Orinoquía, Romero evaluó la frecuencia de fuego natural en sabanas naturales y encontró que este disturbio se presenta en un 99% de la cobertura de estas sabanas, siendo los meses de febrero y marzo, los que presentaron mayor área quemada; las sabanas de altillanura fueron las que tuvieron mayor área quemada. Comprender la dinámica y escalas de los fuegos en las sabanas, es indispensable para entender todo su funcionamiento, su estado actual y así mismo, plantear acciones para su restauración.

Se ha encontrado también, que el fuego es primordial en la ruptura del período de dormancia de semillas de un amplio rango de especies de sabana y que este efecto, es más drástico durante los fuegos que ocurren a finales de la estación seca, que a comienzos de la misma (Williams *et al.* 2005). También se ha encontrado que el fuego de origen antrópico, genera un aumento significativo de la actividad de herbívoros, que puede ser responsable, al menos en parte, de la mortalidad de árboles observada en áreas recientemente quemadas (Lopes y Vasconcelos 2011).

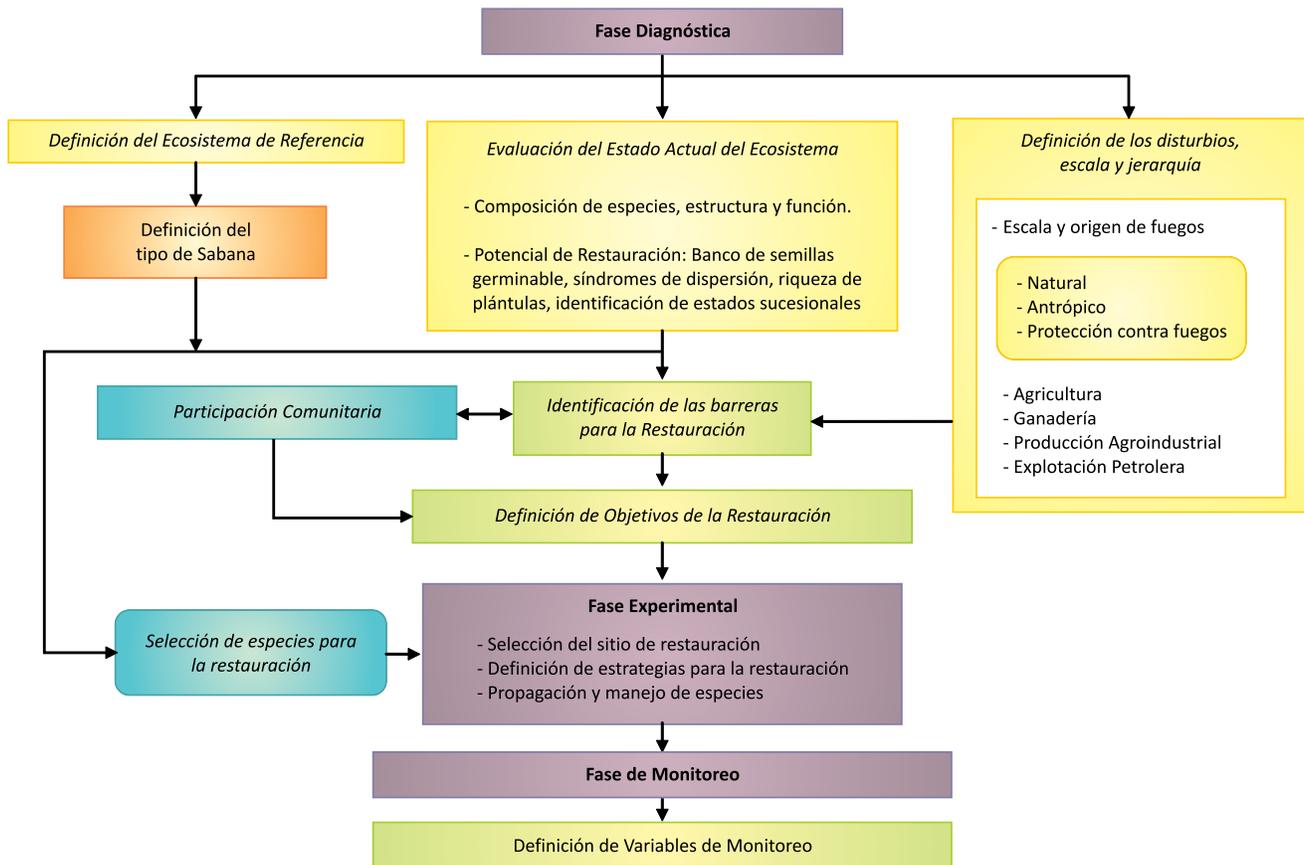


Figura 8. Pasos a seguir en la restauración ecológica de sabanas naturales.

El fuego actúa como un disturbio temporal y espacialmente heterogéneo, que puede abrir espacios para el establecimiento de plántulas. Un máximo reclutamiento e incremento del tamaño poblacional, dependerá de frecuencias de fuego lo suficientemente cortas, para permitir oleadas periódicas de establecimiento de plántulas, pero lo suficientemente largas para permitir el desarrollo de un tamaño suficiente, para alcanzar la tolerancia al fuego (García-Núñez y Azócar 2004).

Por otra parte, la protección contra fuegos como disturbio natural da lugar a cambios en la estructura de las sabanas, de manera que se incrementa el crecimiento de especies leñosas y se favorece la presencia de las especies más sensibles al fuego (Moreira *et al.* 2000).

La presencia de especies invasoras, también afecta la dinámica natural del fuego. En las sabanas colombianas aún no se han evaluado los efectos de la extensión de gramíneas invasoras, sin embargo, estudios realizados en Brasil, mostraron que la presencia de la gramínea invasora *Melinis minutiflora* tiene efectos devastadores puesto que genera una extensión anormal del fuego, aún en épocas en las que normalmente la incidencia del mismo es baja (Mistry & Bernardi 2005).





En las sabanas colombianas la frecuencia del fuego como disturbio natural, ha sido alterada por el establecimiento de sistemas productivos forestales no sostenibles, como es el caso de las plantaciones de *Pinus caribea*. Se ha encontrado que este cambio de uso del suelo, da lugar a cambios en la fisiología y composición de la vegetación: disminución en el número de especies y cobertura de gramíneas, ciperáceas y leguminosas, aumento del número de especies y cobertura de melastomatáceas, dilleniáceas, rubiáceas e hipericáceas, así como la aparición de cuatro niveles de vegetación (herbáceo, arbustivo, arbolito y arbóreo), frente al herbáceo de sabana. Las especies que van apareciendo dentro de las plantaciones de menor edad (*Vismia cayannensis*, *Casearia ulmifolia*, *Miconia rufescens* y *M. prasina*), constituyen elementos propios de matas de monte o bordes de selvas.

- **Evaluación del potencial de restauración:**

- Evaluación del Banco de semillas: En el banco de semillas superficial (5 mm de suelo) se ha observado la menor densidad de semillas (semillas/m²) al comienzo del período de lluvias y se incrementa sostenidamente, haciéndose máxima en el período de sequía (abril), época en la que también se incrementa el número de especies presente en dicho banco. Las familias Gramineae, Leguminosae y Cyperaceae son las mejor representadas en este banco de semillas, siendo también las más abundantes. Durante la época de lluvias, las gramíneas dominan ampliamente el banco (Pérez y Santiago 2001). Torrijos *et al.* (2011) encontraron que las especies mejor representadas en el banco de semillas germinable de sabana nativa en Casanare fueron: *Acisanthera quadrata*, *Eleocharis minima* y *L. crustacea*.

- **Estrategias de Restauración activa**

- *Propagación de plántulas de árboles nativos:* Se recomienda tener en cuenta los siguientes aspectos (García-Núñez y Azócar 2004):
 - ♦ Las especies siempreverdes de sabana producen una cantidad considerable de propágulos viables con capacidad para germinar en condiciones de campo, aunque la proporción varía dependiendo de la especie. Este hecho resalta la importancia de la reproducción sexual en el mantenimiento de las poblaciones.
 - ♦ Varios estudios realizados en sabanas del Cerrado de Brasil y de los Llanos de Venezuela, muestran que las plántulas pueden producir una cantidad suficiente de biomasa subterránea en la primera estación de crecimiento, permitiéndoles rebrotar y sobrevivir después del fuego durante la estación seca. También se ha encontrado en plántulas y juveniles de especies de leñosas siempreverdes, una alta tolerancia del proceso fotosintético al déficit hídrico.
 - ♦ El reclutamiento de las plántulas se da cuando las raíces han alcanzado las capas húmedas del suelo y empiezan a desarrollar un tallo permanente.
 - ♦ Teniendo en cuenta que se ha observado que los propágulos tanto sexuales como vegetativos de las especies leñosas siempre-verdes, muestran una alta resistencia al fuego, se deduce que es la disponibilidad espacio-temporal de agua, el factor más determinante de la dinámica de establecimiento de estas especies.
 - ♦ Se ha encontrado que las especies leñosas son longevas y tienen baja mortalidad una vez se han establecido.
- *Uso de herbicidas y fuego para eliminar plantas leñosas invasoras:* James & Castellano (2006) encontraron que el uso de herbicidas es efectivo para reducir la cobertura de especies leñosas invasoras y recuperar la fisiología de sabana, sin causar daño a especies herbáceas. Por otra parte aunque se ha sugerido el uso del fuego como estrategia para reducir el dosel de arbustos y restaurar la productividad de herbáceas, los fuegos intensos rara vez eliminan por completo los doseles de arbustos, que alcanzan una mortalidad inferior al 5% de toda la planta. El fuego genera un incremento en la producción de herbáceas, pero a corto plazo (hasta 5 años), tiempo después del cual, el componente leñoso rebrota de forma vigorosa.
- *Uso de endomicorrizas:* Se ha encontrado que en sabanas naturales la alta diversidad de hongos micorrízicos arbusculares (HMA), disminuye severamente ante una perturbación, lo cual reduce la capacidad de recuperación del ecosistema (Lovera y Cuenca 2007). El uso de micorrizas arbusculares, junto con dosis relativamente bajas de fósforo, propician el reclutamiento de especies nativas de sabanas, especialmente en zonas muy degradadas, en las cuales la sucesión no ha podido reiniciarse por la falta de nutrientes en el suelo y la falta de propágulos de micorrizas (Cuenca *et al.* 2002), sin embargo los resultados de esta estrategia, variarán dependiendo de la especie inoculada (Cuenca *et al.* 2006).



- *Selección de especies para la restauración:* Ramírez (2006) propone hacer la selección de especies con base en el rendimiento reproductivo, teniendo en cuenta las siguientes características: 1. Producción de semillas abundante y continua, 2. Sistema reproductivo que promueva la auto-polinización, 3. Morfología floral que permita una gran diversidad de visitantes, 4. Un sistema de polinización biótica generalista y, 5. Síndrome de dispersión abiótica de diásporas y/o capacidad para la colonización y eventual inmigración. Por otra parte, teniendo en cuenta que la introducción inicial de muchas especies puede estar limitada por su asociación obligada con micorrizas y un bajo porcentaje de germinación, esta información también debe incluirse en los criterios de selección.



Literatura citada

- Andersen A. N. & B. D. Hoffmann. 2011. Conservation value of low fire frequency in tropical savannas: Ants in monsoonal northern Australia. *Austral Ecology* 36 (5): 497–503.
- Cortés P. F., Dueñas H. y H. Cardozo. 2005. Cambios en la vegetación de sabana ocasionados por la plantación de *Pinus caribea* en Vichada-Colombia. *Rev. Aca. Colomb. Cienc. Vol. 29, N° 110*: 69-84.
- Cuenca, G., De Andrade, Z., Lovera, M., Fajardo, L., Meneses, E., Márquez, M. y R. Machuca. 2002. El uso de arbustos nativos micorrizados para la rehabilitación de áreas degradadas de la Gran Sabana, Estado Bolívar, Venezuela. *Interciencia* 27 (4): 165 - 172.
- Cuenca, G., Lovera, M., Fajardo, L. y E. Meneses. 2006. Efecto de las micorrizas arbusculares sobre el crecimiento y supervivencia de dos especies nativas de la Gran Sabana, al trasplantarlas a un área degradada. *Acta Científica Venezolana*, 57 (2): 42-48.
- García-Núñez C. y A. Azócar. 2004. Ecología de la Regeneración de Árboles de la Sabana. *Ecotrópicos* 17(1-2): 1 - 24.
- Hernández-C., J. y H. Sánchez. 1994. Sabanas de Colombia. En: Hernández-C., J. (ed.). *Sabanas naturales de Colombia*. Banco de Occidente. Colombia.
- James Ansley, R. & M. J. Castellano. 2006. Strategies for Savanna Restoration in the Southren Great Plains: Effects of Fire and Herbicides. *Restoration Ecology*. Vol. 14, N° 3: 420-428.
- Lopes C. T. & H. L. Vasconcelos. 2011. Fire Increases Insect Herbivory in a Neotropical Savanna. *Biotropica* 43(5): 612–618.
- López-Hernández, D., Hernández-H., R. M. y M. Brossard. 2005. Historia del uso reciente de las tierras de sabanas de América del Sur. *Estudios de caso en sabanas del Orinoco*. *Interciencia* Vol. 30, No. 10, p: 623-630.
- Lovera M. y G. Cuenca. 2007. Diversidad de los Hongos Micorrízicos Arbusculares (HMA) y potencial micorrízico del suelo de una sabana natural y una sabana perturbada de la Gran Sabana, Venezuela. *Interciencia* 32 (2): 108-114.
- Mistry, J. & A. Berardi. 2005. Assessing Fire Potential in a Brazilian Savanna Nature Reserve. *Biotropica* 37(3): 439–451.
- Mbon C., Goita K. & Benie G. 2004. Spectral indices and fires behaviour simulation for FIRE risk assessment in savannas ecosystems. *Remote Sensing of Environment* 91: 1-13.
- Moreira, A. 2000. Effects of fire protection on savanna structure in Central Brazil. *Journal of Biogeography*, 27, 1021–1029.
- Pérez, E. H. y E. T. Santiago. 2001. Dinámica estacional del banco de semillas en una sabana en los Llanos Centro-Orientales de Venezuela. *Biotropica* 33: 435-446.
- Ramírez N. 2006. Reproductive biology and plant species selection for habitat restoration in the Venezuelan Gran Sabana plateau. *Interciencia* Vol. 31 N° 5, p: 330-337.
- Romero, M., Galindo, G., Otero, J. y D. Armenteras. 2004. Ecosistemas de la cuenca del Orinoco colombiano. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá.
- Romero-R., M. H. 2009. Dinámica de fuegos de las sabanas orientales de Colombia para el período seco (diciembre 2007 a abril 2008). En: IAvH. Informe sobre el estado de la biodiversidad en Colombia 2007-2008: Piedemonte orinoquense, sabanas y bosques asociados al norte del río Guaviare. Marzo 2009. p. 95-102. Disponible en: http://www.humboldt.org.co/download/andes/informe_estado_biodiversidad_mar26.pdf

Sarmiento, G. 1983. The savannas of tropical America. En: Bourliere, F. (ed.). Ecosystems of the world 13, Tropical Savannas. Elsevier Scientific. Publishing Company. Amsterdam, The Netherlands.

Sarmiento, G. 1994. Sabanas Naturales, génesis y ecología. En: Hernández-C., J. (ed.). Sabanas naturales de Colombia. Banco de Occidente. Colombia. p. 245-288.

Torrijos, P., Prieto, D. y E. Jiménez. 2011. Evaluación del potencial natural de restauración en sabanas y bosque de piedemonte en Casanare, Colombia. En: Vargas-R., O. y S. P. Reyes-B. (eds.). La restauración ecológica en la práctica: Memorias I Congreso Colombiano de Restauración Ecológica & II Simposio Nacional de Experiencias en Restauración Ecológica. Universidad Nacional de Colombia. Gente Nueva Editorial. Bogotá D. C., Colombia. p. 346-358.

Williams, P. R., Congdon R. A., Grice, A. C., & Clarke, P. J. 2005. Germinable soil seed banks in a tropical savanna: seasonal dynamics and effects of fire. *Austral Ecology* 30: 79–90



4. ZONAS SECAS

Determinantes

Las zonas secas se caracterizan principalmente por la ocurrencia de un clima cálido árido, con precipitaciones promedio anuales inferiores a 500 mm. Incluye también áreas marginales en clima cálido muy seco y cálido seco, donde la precipitación anual media varía entre 500 y 1000 mm, y entre 1000 y 2000 mm, respectivamente, con un índice de aridez que oscila entre 0,5 y 0,65. Están ubicadas por debajo de los 800 m. s. n. m., y se presentan también algunos enclaves secos en las tierras altas de la Cordillera Oriental, entre 2500 y 3000 m. s. n. m. (Rodríguez *et al.* 2004). La cobertura vegetal es densa, rala o escasa. Corresponden al zonobioma desértico tropical y zonoecotono subxerofítico tropical de Hernández-C. (1990). Estas zonas también incluyen los enclaves secos altoandinos, correspondientes al pedorobioma quersofítico del piso térmico frío (Hernández-C. y Sánchez-P. 1992).

De acuerdo con Hernández-C. y Sánchez-P. (1992), Hernández-C. *et al.* (1995) y Hassan & Dregne (1997), las zonas secas se caracterizan por los siguientes factores:

- Un clima desértico o seco, en el cual el promedio anual de precipitación es inferior a la evaporación potencial de la superficie del suelo y la transpiración de la vegetación, dando lugar a un déficit de agua para las plantas.
- La geología de estas zonas se caracteriza por superficies rocosas de meteorización lenta o la presencia de sales en los suelos.
- La humedad ambiental durante el ciclo diario es generalmente baja, con promedios diarios menores a 60 - 70%, hecho que contribuye a favorecer la evaporación y evapotranspiración, no obstante la ocurrencia de nieblas nocturnas.

- Los vientos son una característica muy importante para determinar estas zonas, puesto que su capacidad erosiva posiblemente es mayor que en las zonas húmedas.
- La temperatura muestra gran amplitud durante el día, en la Guajira colombiana la temperatura promedio diaria, supera casi los 30°C.
- Los suelos generalmente presentan baja fertilidad, asociada con bajos niveles de materia orgánica y nitrógeno.
- La vegetación de estos ecosistemas está particularmente adaptada a las condiciones de sequía y de alta temperatura: presencia de espinas en cambio de hojas, arbustos espinosos con copas aparasoladas, como sombrillas, follaje escaso y caducifolio.

Disturbios

En las zonas áridas de Colombia se presentan principalmente los siguientes disturbios:

- Sistemas de producción no sostenible (producción extensiva e intensiva en agricultura y ganadería).
- Extracción de materiales a cielo abierto.
- Altos grados de erosión.
- Desertificación.
- Salinización de suelos.



- Eventos climáticos extremos: Los eventos climáticos extremos representan perturbaciones que cambian la disponibilidad de recursos. Hemos estudiado sus efectos sobre los Un estudio que evaluó los efectos del cambio climático sobre grupos de plantas anuales en un ecosistema semiárido de Chile, en el cual se analizaron datos de 130 años de precipitación generalizada, con valores extremos de distribución para determinar los eventos extremos, indicó que el cambio climático restablece la sequía extrema de la dinámica del sistema y lo hace más susceptible a la invasión. Por otra parte, al

favorecer el establecimiento de especies anuales nativas, los eventos moderadamente húmedos pueden cambiar la composición de especies y hacer a la comunidad más resiliente a la sequía extrema. Teniendo en cuenta que la probabilidad de sequía extrema se ha duplicado en los últimos 50 años, las investigaciones sobre la interacción del cambio climático y las invasiones biológicas, son relevantes para determinar el potencial de los efectos futuros de este fenómeno, sobre la dinámica de comunidades de plantas anuales en zonas semiáridas (Jiménez *et al.* 2011).



Objetivos de la Restauración

- Recuperar la capacidad productiva de los suelos en avanzado estado de deterioro.
- Restaurar la cobertura vegetal de las zonas secas.
- Iniciar núcleos de vegetación con especies niñeras.
- Conectar parches de zonas secas.
- Reducir el riesgo por sequías.



Acciones para la Restauración Ecológica de Zonas Secas

La restauración ecológica de las Zonas Secas en Colombia, hace parte de las acciones que para tal efecto se determinan en el Plan de Ordenamiento y Manejo de Zonas Secas, instrumento de planificación que permite implementar en lo local y regional, el Plan de Acción Nacional de Lucha contra la Desertificación y la Sequía, para el cumplimiento de los compromisos adquiridos en el marco de la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación y la Sequía.

Los lineamientos de este Plan de Ordenamiento y manejo de Zonas Secas, actualmente se encuentra en revisión y deben ser incorporados en los Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas Hidrográficas POMCAS. En la última parte de estos lineamientos se presenta una zonificación, que incluye áreas susceptibles a conservar, a restaurar (restauración ecológica, rehabilitación y recuperación) y de uso sostenible.

La figura 9 muestra un esquema de las principales acciones a tener en cuenta en la restauración de zonas secas y posteriormente, se hacen algunas aclaraciones de aspectos particulares de la restauración de zonas secas.



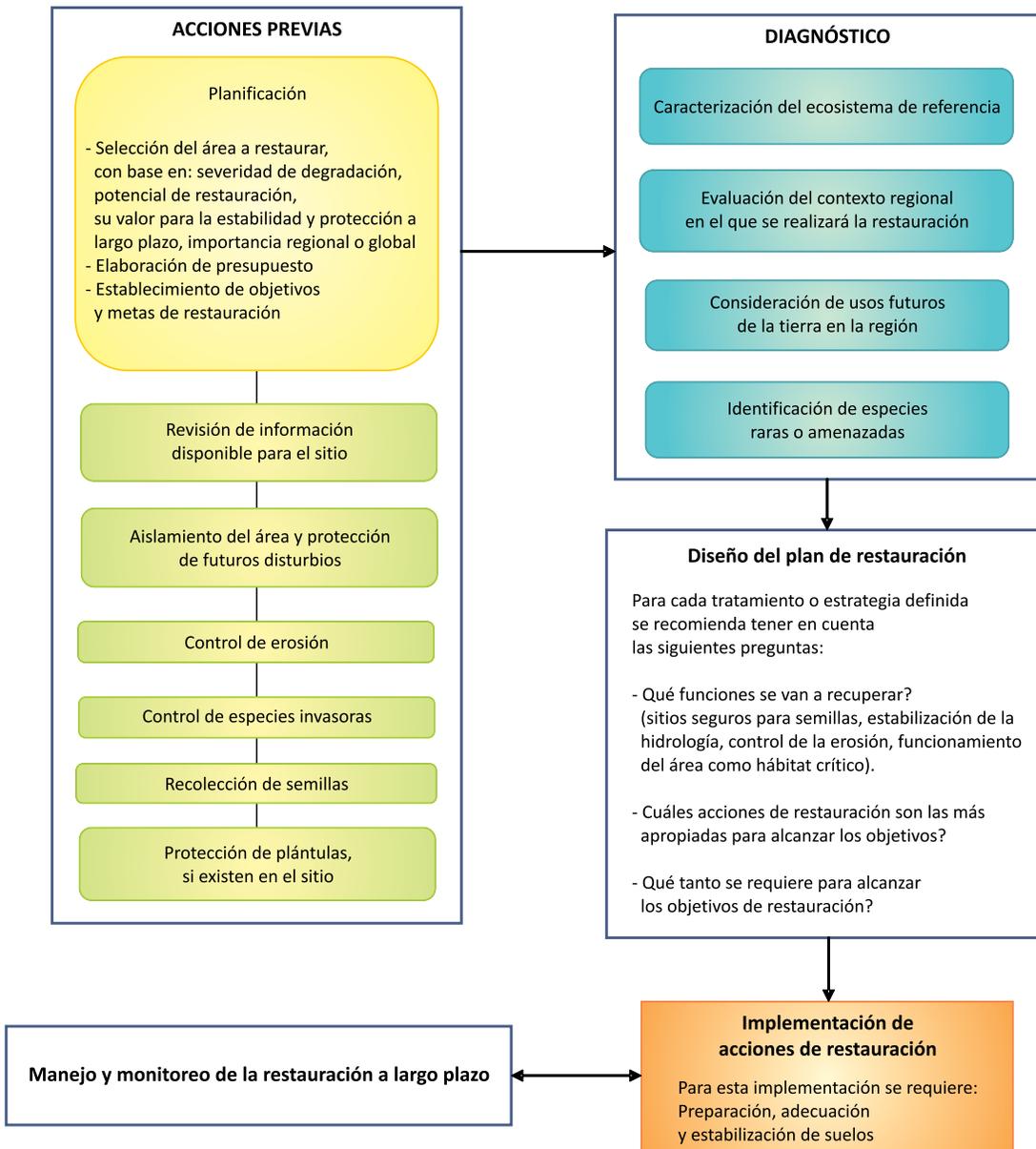


Figura 9. Principales pasos a tener en cuenta en la restauración de zonas secas (Elaborado de acuerdo con la propuesta de Bainbridge 2007).



- **Evaluación del sitio a restaurar - Identificación de tensionantes para la restauración:** Los proyectos de restauración en zonas secas presentan serios inconvenientes relacionados con efectos adversos de compactación, erosión y salinización de suelos, los cuales disminuyen su capacidad de infiltración. Los aspectos de mayor importancia para analizar en suelos son (Bainbridge 2007):
 - Caracterización química y física.
 - Porcentaje de saturación: indicador de la capacidad de retención de nutrientes y agua.
 - Fertilidad: especialmente en el caso de áreas muy degradadas.
 - Biología del suelo: probablemente es la característica más alterada en los suelos de zonas áridas, especialmente en áreas sometidas a intensos disturbios, durante largos períodos de tiempo, afectando su fauna, microorganismos, propágulos de plantas y semillas.
 - Cobertura vegetal: Tipos de especies, cantidad y distribución.
- **Evaluación del potencial de restauración:**
 - **Banco de semillas:** Los disturbios que compactan la superficie del suelo o mezclan la capa superior del suelo con capas profundas, alteran las características de la superficie que controla la dispersión de semillas y la composición del banco de semillas. La dispersión de semillas que entran al banco de semillas es vulnerable al daño por fauna colectora de semillas y a la descomposición por hongos. Aquellas semillas que persistan germinarán y se establecerán únicamente cuando la precipitación adecuada esté sincronizada con temperaturas adecuadas para la germinación (DeFalco *et al.* 2009). Aunque las hormigas colectoras de semillas y otros granívoros, han sido considerados anteriormente como perjudiciales para los bancos de semillas en sistemas áridos (Ibañez y Soriano 2004), se ha encontrado que pueden mejorar los movimientos de semillas y deben ser considerados en relación con los objetivos de la rehabilitación pasiva o activa (DeFalco *et al.* 2009).
- **Estrategias de Restauración activa:**
 - **Estabilización del terreno:** Se refiere a la modificación o estabilización de la topografía del paisaje, con el fin de que el área degradada sea similar a las áreas circundantes. Esta etapa es fundamental para garantizar el adecuado establecimiento de la vegetación, durante las etapas sucesivas del proyecto (Bainbridge 2007).
 - **Preparación mecánica del suelo:** Implica una mejora inmediata del suelo, pero a corto plazo, puesto que aumenta la tasa de infiltración del agua, la recolección de escorrentía, la porosidad del suelo, la penetración de las raíces, la profundidad efectiva de las raíces y el lecho de enraizamiento y de germinación. La preparación debe ser efectiva para la restauración del ecosistema; debe evitar o minimizar los efectos colaterales de la degradación, la mezcla de los horizontes y el afloramiento de horizontes poco fértiles (horizontes profundos) (Vallejo 2011).
 - **Adecuación del terreno:** Crear condiciones para la retención de la humedad a través de obras biomecánicas como las banquetas o zanjas de infiltración, siembra o establecimiento de barreras o cortinas rompevientos. La siembra de herbáceas, la aplicación de cubiertas o enmiendas (mulch), el uso de barreras discontinuas de troncos, los diques de almohadillas o balas de paja, de troncos, ramas, piedras o gaviones para su aplicación en la red de drenaje y tratamientos de ladera, son los tratamientos más comúnmente utilizados para la mejora del suelo. Esta acción de restauración debe tener en cuenta los patrones naturales de los sitios afectados y la vegetación natural de referencia (Carrick & Krüger 2007, Vallejo 2011).

- **Obtención de semillas, siembra y trasplante:** Las semillas para siembra deberán obtenerse de ser posible, en los sitios con vegetación presentes en áreas cercanas al sitio de restauración (Bainbridge 2007). Las ventajas del trasplante incluyen una mayor diversidad en composición y estructura y una mayor estabilidad del suelo en menor tiempo. Por otra parte, la estabilidad del suelo aportada por las plantas sembradas, incrementará las probabilidades de establecimiento de plántulas y de igual forma, aportará una fuente de semillas para el área. Las plantas sembradas aumentarán la diversidad de microhábitats (Carrick & Krüger 2007).

Para la revegetalización de zonas áridas, se requieren profundos conocimientos sobre la fisiología de las especies a utilizar, fundamentalmente en lo que relacionado con la resistencia al estrés hídrico o salino, sin los cuales toda tarea de mejoramiento podría conducir a resultados erróneos y en muchos casos, hasta resultar inútil (Cony 1995).

En zonas secas se ha encontrado que la emergencia de plántulas es una fase crítica para su reclutamiento, siendo las condiciones físicas del suelo y el ataque de patógenos, los factores que más afectan este proceso. En este sentido, el uso de cubiertas sintéticas para las semillas y de enmiendas en el suelo, pueden reducir el efecto de los factores de estrés que afectan la emergencia (James *et al.* 2011).

- **Selección de especies:** En buena parte de los casos se tiene un conocimiento muy limitado sobre las especies nativas en zonas secas, lo cual hace necesario el establecimiento de ensayos de progenie-procedencia de las especies autóctonas, en una área representativa de la zona a reforestar (Cony 1995).

Sinisterra *et al.* (2011) definen algunos atributos importantes en la selección de especies para revegetalizar un área de cárcava, que pueden ser utilizadas en zonas áridas degradadas (Tabla 5). Otro criterio de importancia en la selección de plantas para revegetalizar estas áreas, es la capacidad para fijar nitrógeno (Schwencke & Caru 2001).

- **Siembra de especies niñeras facilitadoras:** En las zonas secas y semi-secas se considera que las relaciones de nodricismo son uno de los mecanismos que determina los patrones de distribución espacial no azarosa de plantas perennes (Silvertown & Wilson 1994) y que estas relaciones son más frecuentes en estos ecosistemas áridos y semi-áridos, que en otros ecosistemas. Entre los beneficios que aporta esta relación se han sugerido los siguientes: la captura de semillas, el aumento de los niveles de nutrientes, la protección contra acción de herbívoros y la disponibilidad de agua (Flores & Jurado 2003). Teniendo en cuenta que el género *Prosopis* es un elemento muy importante en las zonas secas y semi-secas y que se ha encontrado que pueden influir sobre la abundancia de algunas especies y la composición florística de plantas que crecen bajo su sombra (Larrea *et al.* 2005), se sugiere evaluar su efecto como planta nodriza en estos ecosistemas.

- **Siembra de especies de arbustos de etapas de sucesión avanzada:** Un aumento moderado en la densidad y la cobertura de vegetación, podría mejorar la supervivencia de algunas especies a largo plazo y la resiliencia del ecosistema, especialmente cuando se usan arbustos que producen rebrotes (Bonet 2002).

- **Monitoreo y evaluación:** Las características del suelo constituyen un buen indicador del éxito de la restauración en zonas áridas; entre las variables de más utilidad se encuentran la infiltración, el contenido de materia orgánica y la composición de la biota edáfica (Bainbridge 2007).



Tabla 5. Atributos de especies empleadas para la revegetalización en zonas secas degradadas (Modificado de Sinisterra *et al.* 2011).

Atributos	Función
Propagación vegetativa fácil y rápida. Anclaje profundo. Atracción de la fauna silvestre. Frutos comestibles.	Reducir, fragmentar y derivar caudales. Sellado de escarpaduras. Recursos para las comunidades aledañas y la fauna silvestre.
Arquitectura recta y robusta. Fácil propagación vegetativa.	Estabilización de cauces, zonas de tránsito, taludes y socavación. Barreras altas cortafuego y rompevientos.
Alta disponibilidad de plántulas. Facilidad de siembra. Alta tolerancia al fuego.	Reducir, fragmentar y evitar la socavación. Protección contra vientos y fuego.
Crecimiento rastrero denso y rápido. Atracción de la fauna silvestre.	Frenar el desprendimiento del suelo.
Crecimiento rastrero denso y rápido.	Frenar el desprendimiento del suelo.



Literatura citada

- Bainbridge, D. A. 2007. A Guide for Desert and Dryland Restoration: A new hope for Arid Lands. Society for Ecological Restoration International. Island Press. Washington D. C. USA.
- Bonet A. 2002. Secondary succession of semi-arid Mediterranean old-fields in south-eastern Spain: insights for conservation and restoration of degraded lands. *Journal of Arid Environments* 56: 213–233.
- Carrick P. J. & R. Krüger. 2007. Restoring degraded landscapes in lowland Namaqualand: Lessons from the mining experience and from regional ecological dynamics. *Journal of Arid Environments* 70: 767–781.
- Cony, M. 1995. Reforestación racional de zonas áridas y semiáridas con árboles de múltiples propósitos. *INTERCIENCIA* 20(5): 249-253
- DeFalco L. A., Esque T. C., Kane, J. M. & M. B. Nicklas. 2009. Seed banks in a degraded desert shrubland: Influence of soil surface condition and harvester ant activity on seed abundance. *Journal of Arid Environments* 73: 885–893
- Flores J. & E. Jurado. 2003. Are nurse-protégé interactions more common among plants from arid environments?. *Journal of Vegetation Science* 14: 911-916.
- Hassan H. & H. E. Dregne. 1997. Natural Habitats and Ecosystems Management in Drylands: A Overview. Environmental department papers. Paper N° 51. The World Bank.
- Hernández-C., J. 1990. Ensayo preliminar sobre los biomas terrestres de Colombia. En: H. Sánchez, J. Hernández C., J. V. Rodríguez & C. Castaño (eds.). *Nuevos Parques Nacionales de Colombia*. INDERENA. Colombia.
- Hernández-C., J. I. y H. Sánchez. 1992. Biomas terrestres de Colombia. En: Halffter, G. (comp.). *La Diversidad Biológica de Iberoamérica I*. Acta Zoológica Mexicana. Vol. Esp. México. p. 153-173.
- Hernández-C. J., Rodríguez, V. y H. Sánchez. 1995. Zonas áridas y semiáridas de Colombia. Banco de Occidente. Diego Samper Ediciones. Bogotá. Colombia.
- Ibáñez J. y P. J. Soriano. 2004. Hormigas, aves y roedores como depredadores de semillas en un ecosistema semiárido andino de Venezuela. *Ecotrópicos* 17(1-2):38-51.
- James J. J., Svejcar T. J. & M. J. Rinella. 2011. Demographic processes limiting seedling recruitment in arid grassland restoration. *Journal of Applied Ecology* 48: 961–969.
- Jiménez M. A., Jaksic F. M., Armesto J. J., Gaxiola A., Meserve P. L., Kelt D. A. & J. R. Gutiérrez. 2011. Extreme climatic events change the dynamics and invasibility of semi-arid annual plant communities. *Ecology Letters* 14: 1227–1235.
- Larrea-Alcázar D. M., López R. P. & D. Barrientos. 2005. The nurse-plant effect of *Prosopis flexuosa* d.c. (Leg-Mim) in a dry valley of the Bolivian Andes. *Ecotropicos* 18(2):89-95
- Rodríguez N., Armenteras D., Morales M. y Romero M. 2004. Ecosistemas de los Andes colombianos. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá D. C., Colombia.
- Schwencke J. & M. Caru. 2001. Advances in Actinorhizal Symbiosis: Host Plant-Frankia Interactions, Biology, and Applications in Arid Land Reclamation. A Review. *Arid Land Research and Management*, 15:285 – 327
- Silvertown J. & J. B. Wilson. 1994. Community Structure in a Desert Perennial Community. *Ecology*, Vol. 75, No. 2: 409-417.



Sinisterra-R., J. A., Calle-Díaz, Z., Murgueitio-R., E., Sánchez-H., M. y G. Rodríguez- C. 2011. Avances en la rehabilitación ecológica de la cárcava Monte Caldera, San Luis Potosí. En: Vargas R., O. y S. P. Reyes-B. (eds.). La restauración ecológica en la práctica: Memorias I Congreso Colombiano de Restauración Ecológica & II Simposio Nacional de Experiencias en Restauración Ecológica. Universidad Nacional de Colombia. Gente Nueva Editorial. Bogotá D. C., Colombia. p. 335-345.

Vallejo, V. R., Alloza, J. A., Bautista, S., Bladé, C., Cortina, J., Fuentes, D. y J. Llovet J. 2011. Recuperación de suelos en el contexto de la restauración forestal en clima seco: el caso de la cuenca mediterránea. En: Vargas R., O. y S. P. Reyes-B. (eds.). La restauración ecológica en la práctica: Memorias I Congreso Colombiano de Restauración Ecológica & II Simposio Nacional de Experiencias en Restauración Ecológica. Universidad Nacional de Colombia. Gente Nueva Editorial. Bogotá D. C., Colombia. p. 67-91.





III PARTE

ECOSISTEMAS ACUÁTICOS





INTRODUCCIÓN

En la Figura 10 se presenta la secuencia de pasos propuesta para la restauración de los ecosistemas de agua dulce.

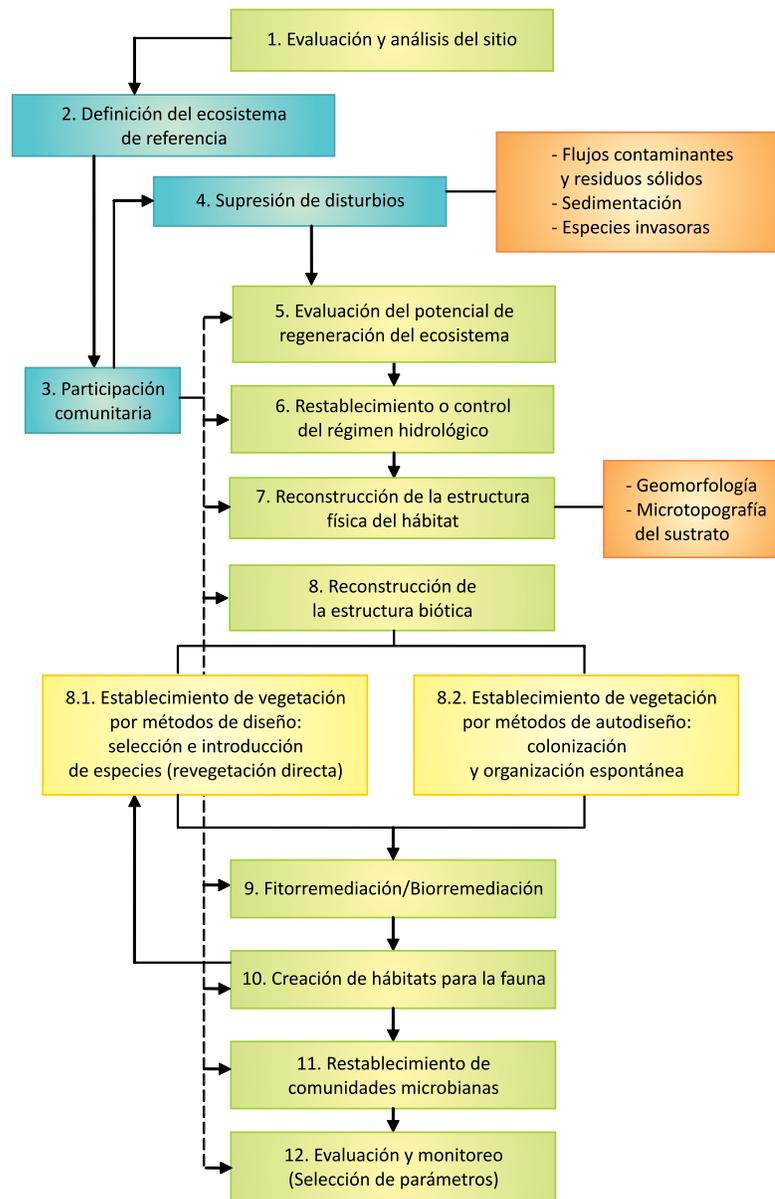


Figura 10. Secuencia y relaciones de los pasos para la restauración ecológica de ecosistemas de agua dulce.

PASO 1. EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DEL SITIO

Corresponde a la planeación del proceso de restauración. En este paso se realiza la evaluación de aspectos ecológicos y sociales del lugar, para plantear un modelo de respuesta que abra paso a las opciones de restauración, y decidir las metas y objetivos del plan. La evaluación de aspectos ecológicos incluye el estudio de condiciones físico-bióticas del ecosistema principalmente en cuanto a geomorfología y cobertura de la tierra. La evaluación de aspectos sociales se refiere al estudio previo de las comunidades humanas existentes en el sitio, su relación con el ecosistema y su potencial participación en el proceso.

PASO 2. DEFINICIÓN DEL ECOSISTEMA DE REFERENCIA

El ecosistema de referencia debe ser en lo posible un ecosistema de la misma ubicación geográfica en buen estado de conservación, y con las mismas condiciones naturales del ecosistema degradado. Es fundamental procurar que el ecosistema de referencia corresponda a la misma cuenca hidrográfica y tomar en cuenta la distribución geográfica del cauce de los cursos de agua.

PASO 3. PARTICIPACIÓN COMUNITARIA

La participación comunitaria es un paso transversal que garantiza el logro de los pasos subsiguientes. Esta no involucra exclusivamente a comunidades campesinas u organizaciones comunitarias urbanas, sino que también vincula instituciones educativas, entidades públicas y empresas privadas. Debe



propiciarse la articulación de la participación y acción comunitaria para lograr con éxito la restauración de los ecosistemas de agua dulce. En Colombia esta situación es especial por cuanto humedales y ríos son fuertemente afectados por el desarrollo industrial y urbano y sus consecuentes efectos.

PASO 4. SUPRESIÓN DE DISTURBIOS

Antes de emprender cualquier acción de restauración es fundamental suprimir los disturbios presentes en el ecosistema. La supresión de disturbios permitirá posteriormente efectuar la evaluación del potencial de regeneración del mismo, en cuanto algunas barreras se superen parcialmente con la desaparición de estos. En ese sentido el sitio debe ser preparado haciendo los cambios pertinentes para la ocurrencia de procesos naturales. En los ecosistemas de agua dulce de Colombia por lo general se debe impedir la entrada de flujos contaminantes y residuos sólidos, la sedimentación y la introducción de especies invasoras.

PASO 5. EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE REGENERACIÓN DEL ECOSISTEMA

La evaluación del potencial de regeneración del ecosistema se logra a partir de la medición de indicadores de estado. Estos indicadores pueden ser físico-químicos o biológicos. Los ecosistemas deben contar con suficiente libertad de exhibir su dinámica natural.

PASO 6. RESTABLECIMIENTO O CONTROL DEL RÉGIMEN HIDROLÓGICO

Uno de los principales determinantes de los ecosistemas de agua dulce es el régimen hidrológico, es decir, la época, magnitud, frecuencia, duración y tasa de cambio del flujo de agua superficial y subterránea en el área. La supresión de disturbios contribuye a restablecer el régimen hidrológico en cierta medida cuando se eliminan taponamientos e infraestructura que drenan o acumulan el flujo del agua. Sin embargo, no depende totalmente de esto sino de alternativas conjuntas que van desde la suspensión de acciones deliberadas hasta la propia protección de las zonas de captación.

PASO 7. RECONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA FÍSICA DEL HÁBITAT

Algunas acciones referentes al paso anterior contribuyen a la reconstrucción de la estructura física del hábitat. En este paso el objetivo es reconformar los bordes y orillas de los cuerpos de agua y garantizar el mantenimiento de las conexiones hidráulicas. A gran escala involucra reconstruir la geomorfología del sitio y a pequeña escala la microtopografía del sustrato.

PASO 8. RECONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA BIÓTICA

Este paso se refiere principalmente al establecimiento de comunidades vegetales acuáticas, semiacuáticas y terrestres. Este proceso puede ser inducido por el hombre (paso 8.1 selección e introducción de especies) o natural (paso 8.2 colonización y organización espontánea).

PASO 9. FITORREMEDIACIÓN/ BIORREMEDIACIÓN

Una vez reconstruidas las estructuras físicas y bióticas del hábitat la implementación de métodos de fitorremediación y biorremediación (remediación del suelo, agua o aire a través del uso de plantas y microorganismos), contribuye a la transformación de compuestos químicos de difícil degradación, eventualmente llevados a los cuerpos de agua y suelo, por escorrentía y vertimientos. Este paso es especialmente útil en los casos de ecosistemas con eutrofización y contaminación de suelos.

PASO 10. CREACIÓN DE HÁBITATS PARA LA FAUNA

La creación de hábitats para la fauna se relaciona con el paso 8.1. La selección de especies vegetales debe realizarse tomando en cuenta su utilidad como recurso para los animales, es decir, como refugio y alimento.

PASO 11. RESTABLECIMIENTO DE COMUNIDADES MICROBIANAS

Este paso aplica especialmente en el caso de los humedales, al igual que en los ecosistemas terrestres se considera la introducción de micorrizas en el suelo.

PASO 12. EVALUACIÓN Y MONITOREO

Existen dos alternativas para medir el éxito de la restauración: evaluación y monitoreo. En la evaluación los parámetros escogidos solo se miden una vez mientras que en el monitoreo se hace una repetición sistemática de la evaluación en tiempo (veáse Callaway *et al.* 2001).



I. HUMEDALES

Determinantes

Los humedales son áreas de marismas, pantanos y turberas, ya sean naturales o artificiales, temporales o permanentes, con agua que permanece estática o fluye, dulce, salobre o salada, incluyendo áreas de agua marina hasta una profundidad en que la marea baja no excede de 6 m (RAMSAR 1971, EAAB y CI 2003).

Las características, propiedades y funciones de cualquier humedal son determinadas por el clima, régimen hidrológico, sustrato, posición y dominancia en el paisaje (Lewis 1995), fertilidad, disturbios, herbivoría, competencia y dinámica de la sedimentación (Keddy 2000).

- El régimen hidrológico controla características abióticas como color y textura del suelo.
- La distribución y movimiento del agua determinan la calidad del agua y abundancia, diversidad y productividad de plantas, vertebrados e invertebrados.
- Las geoformas en los humedales son depresiones en el terreno con capacidad de captación y retención de agua (Kusler *et al.* 1994).
- Los nutrientes como fósforo y nitrógeno son introducidos por precipitación, flujos y fijación directa (nitrógeno) y se acumulan en el humedal determinando su fertilidad.

Disturbios

Los disturbios naturales como fuego, inundaciones y herbivoría mantienen las características de las comunidades vegetales.



Los disturbios antrópicos más importantes en este ecosistema son:

- Modificación de regímenes hidrológicos.
- Sistemas de producción extensiva e intensiva.
- Desarrollo industrial y urbanístico (expansión de la frontera urbana o agrícola).
- Sedimentación y colmatación.
- Contaminación (principalmente de aguas).
- Sobreexplotación de recursos hidrobiológicos.
- Desección (por ejemplo. turberas y ciénagas) y sequías prolongadas.
- Invasiones biológicas.

Objetivos de la restauración

- Restaurar los humedales en áreas urbanas, degradados principalmente por expansión urbana y/o agropecuaria, vertimientos de aguas servidas, obstrucción de flujos hídricos, rellenos de escombros y especies invasoras.
- Restaurar las turberas de páramos degradadas por desección y reemplazo de tierras por pastizales para ganado.
- Restablecer los regímenes hidrológicos de las ciénagas costeras e interiores.
- Rehabilitar las funciones ecológicas de los humedales relacionadas con los servicios ambientales prestados a los entornos urbanos y rurales.
- Diseñar acciones para el establecimiento de la vegetación característica de los humedales por selección e introducción de especies y colonización natural.
- Construir humedales artificiales como medida de mitigación y compensación de daño a humedales fuertemente degradados.
- Construir humedales con fines de saneamiento de aguas residuales.



Acciones para la Restauración Ecológica de Humedales

La restauración es un componente de la planificación nacional para la conservación y uso racional de los humedales. De acuerdo con la 8ª reunión de la Conferencia de las partes contratantes en la convención sobre humedales (Ramsar, Irán) (2002) se establecen principios y lineamientos para la restauración de humedales en el documento Ramsar COP8 Resolución VIII.16 (el cual, se recomienda consultar). A continuación se enuncian algunos principios de consideración en los proyectos de restauración de humedales:

1. Comprensión y declaración clara de metas, objetivos y criterios de rendimiento.
2. Planificación detenida para reducir posibilidades de efectos secundarios no deseados.
3. Examen de procesos naturales y condiciones reinantes durante la selección, preparación y elaboración de proyectos.
4. Incrementar esfuerzos para conservar los humedales naturales existentes.
5. Planificación a escala mínima de cuenca de captación, sin desestimar el valor de hábitats de tierras altas y los nexos entre estos y hábitats propios de humedales.
6. Tomar en cuenta principios que rigen la asignación de recursos hídricos y el papel que la restauración puede desempeñar en el mantenimiento de las funciones ecológicas de los humedales.
7. Involucrar a todos los interesados directos en un proceso abierto.
8. Gestión y monitoreo continuos (custodia a largo plazo).
9. Incorporar el conocimiento de la gestión tradicional de los recursos que contribuyen a la configuración del paisaje.
10. Aplicar el principio de manejo adaptable.
11. Emplear proyectos eficaces como ejemplo y aliento para la participación y formulación de nuevos proyectos.
12. Ejecutar actividades complementarias con medidas para promover la concienciación.

En la planeación del proceso de restauración de un humedal se realiza el análisis del sitio en cuanto a aspectos ecológicos y sociales, se define un modelo de respuesta y se contemplan opciones de restauración junto con la definición de metas y objetivos. Las actividades de planeación sugeridas se plantean en la figura 11. En la actividad 2 se sugiere establecer la comunidad de referencia estudiando la composición, estructura y función de humedales conservados del mismo tipo y con condiciones geográficas y climáticas parecidas.

- **Evaluación del potencial de restauración:** El potencial de restauración de humedales puede determinarse mediante el estudio del banco de semillas, puesto que este constituye reservas de semillas que pueden ser utilizadas para la restauración de la vegetación, conservando una buena parte de su diversidad y estructura (Montenegro *et al.* 2006). Por otra parte, la composición del banco de semillas, brinda información para el diseño de acciones orientadas al control de especies invasoras y oportunistas, como lo han realizado varios investigadores en los humedales de Bogotá (Torres 2011).

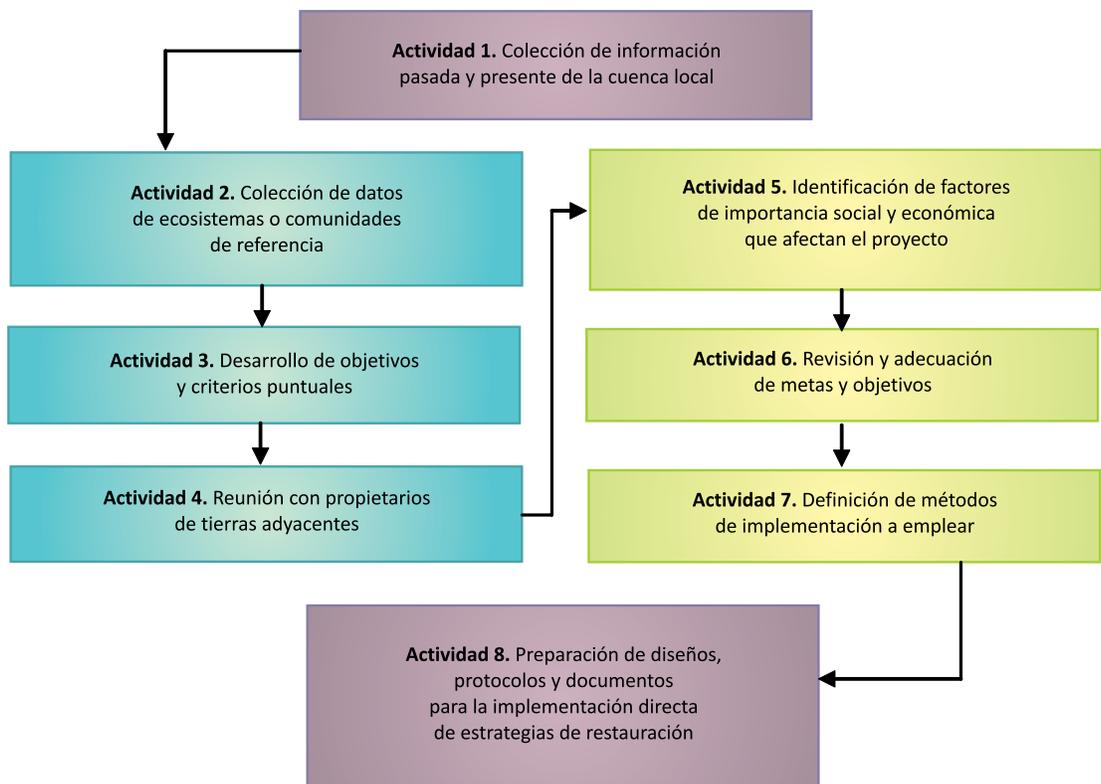


Figura 11. Actividades sugeridas para la planeación de la restauración de los humedales (IWWR, s.f.).

- Restablecimiento del régimen hidrológico:** Lograr la restauración o rehabilitación de un humedal requiere en primer lugar del restablecimiento del régimen hidrológico, lo cual depende de actividades que consisten principalmente en eliminar obras de infraestructura que impidan el flujo de agua al humedal, o tubos y canales que drenan el agua de este. Sin embargo, la regulación hídrica del humedal también se relaciona con actividades de control de la entrada de sedimentos, residuos sólidos y flujos contaminantes y la reconfiguración geomorfológica del sitio (Figura 12).

El régimen hidrológico puede recuperarse de manera indirecta si se controla la calidad del agua a partir de las concentraciones de nutrientes, la explotación de acuíferos y manantiales abastecedores y se mantiene la cobertura vegetal en las partes altas de las cuencas. Dado que el aporte de sedimentos está relacionado con el régimen hidrológico, en ocasiones es necesario construir gaviones o estructuras de retención de suelo. En otros casos se deben quitar las presas que retienen el sedimento o construir playas y dunas protectoras.

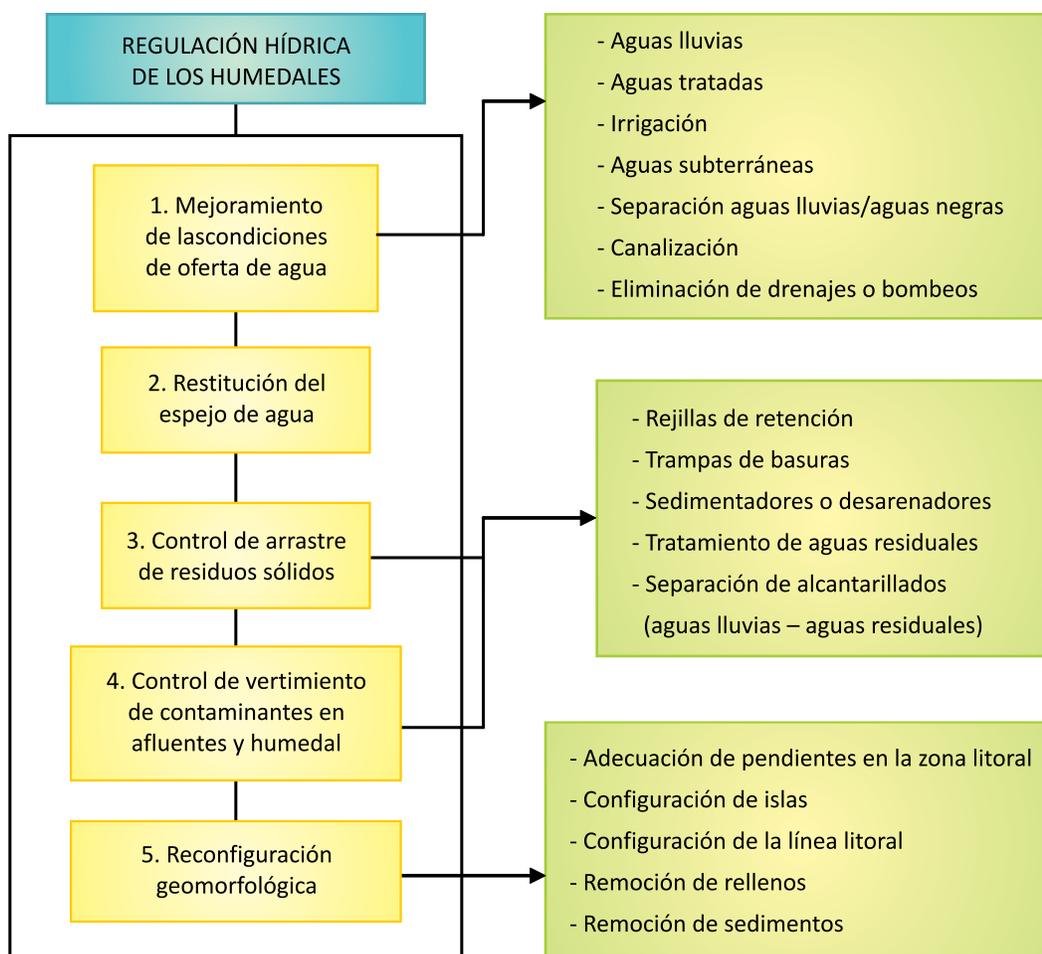


Figura 12. Pasos para la regulación hídrica de los humedales (SDA 2008).

- **Reconstrucción de la estructura física del hábitat:** Otro de los factores relacionados con el ambiente físico es la restitución de la microtopografía del sustrato, que determina la variación de factores como el potencial de oxidoreducción y temperatura, y/o la distribución y establecimiento de las especies. Las especies vegetales de los humedales son susceptibles a variaciones pequeñas en el relieve del sustrato, en escalas de centímetros a metros (Collins *et al.* 1982, Titus 1990). La reconformación física del humedal involucra técnicas de empleo de maquinaria y manuales, para estabilizar la geoforma y al mismo tiempo propiciar la heterogeneidad en el relieve.

- **Reconstrucción de la estructura biótica:** Es necesario el control de especies invasoras acuáticas, semiacuáticas y terrestres. Esto puede realizarse a través de métodos como el entresacado manual o la remoción con maquinaria liviana. Es conveniente hacer este control antes del establecimiento de especies vegetales nativas, ya que las invasoras constituyen una de las barreras a la restauración. El establecimiento de especies vegetales en los humedales tiene dos alternativas metodológicas (Lindig-Cisneros & Zedler 2005):

- **Métodos de diseño:** esta aproximación toma en cuenta la estrategia de historia de vida de las especies, como el factor más importante en el desarrollo de la vegetación en un sitio. Esta estrategia enfatiza aproximaciones intervencionistas basadas en resultados predecibles, ya que involucra la selección e introducción de especies con implementación de medidas necesarias para su permanencia.
- **Métodos de autodiseño:** consisten en permitir que las comunidades vegetales se organicen espontáneamente dejando que las especies se establezcan de manera natural colonizando el sitio. El restaurador puede plantar especies vegetales o no, pero las condiciones ambientales naturales determinarán la permanencia de la vegetación (véase Middleton 1999). Ya que las condiciones ambientales

determinan finalmente si la vegetación establecida prospera, lo más recomendable es hacer ensayos que permitan establecer cuáles especies colonizan por sí solas y cuáles requieren ser plantadas.

Al igual que los métodos de diseño la creación de hábitats para la fauna, requiere de la selección de especies vegetales de acuerdo a las especies animales. Restablecer la vegetación de los alrededores del humedal involucra sembrar especies nativas que sirvan como barrera, perchas vivas y refugios. Al final del proceso es imprescindible restablecer también la vegetación de los alrededores. Algunos criterios para el manejo de la cobertura vegetal terrestre de un humedal son: diseño de las plantaciones, diversidad de especies, conectividad interna, atrayentes (perchas y árboles de fructificación), condiciones edáficas, alternancia de corredores, estratificación, protección de la franja litoral, zonas de recreación y vegetación de transición.

- **Evaluación y monitoreo:** Algunas actividades propuestas para realizar el seguimiento a través de la evaluación o monitoreo se presentan en la figura 13. Dentro de los atributos o variables de medición recomendables en el monitoreo de la restauración de humedales se reconocen los siguientes (Callaway *et al.* 2001):

- Hidrología: régimen de inundación, nivel freático, tiempo de retención de agua, caudales de entradas y salidas, tasas de flujo, elevación, sedimentación y erosión.
- Calidad del agua: temperatura del agua y oxígeno disuelto, pH, turbidez y estratificación de la columna de agua, nutrientes.
- Suelos: contenido de agua, textura, salinidad, densidad aparente, pH, potencial de reducción, contenido de materia orgánica, nitrógeno total, nitrógeno inorgánico, procesos del nitrógeno, descomposición, sustancias tóxicas.
- Vegetación acuática: porcentaje de cobertura, composición de especies, etapas de sucesión.



- Vegetación terrestre: mapeo, cobertura y altura de plantas vasculares, arquitectura del dosel, tamaño de parches y distribución de especies particulares, biomasa epigea, biomasa hipogea, estimación visual de algas y tipo dominante, concentración de nitrógeno en tejidos.
- Fauna: tasa de colonización, composición de especies, densidad, estructura poblacional, crecimiento, periodos de migración, anidación y cuidado de crías, relación reptiles/mamíferos. Entre los grupos considerados como indicadores biológicos para realizar el seguimiento de estos parámetros se encuentran los invertebrados bentónicos, como indicadores de una adecuada restauración hidrológica (Suren *et al.* 2011), peces y aves acuáticas (Gyurác *et al.* 2011).

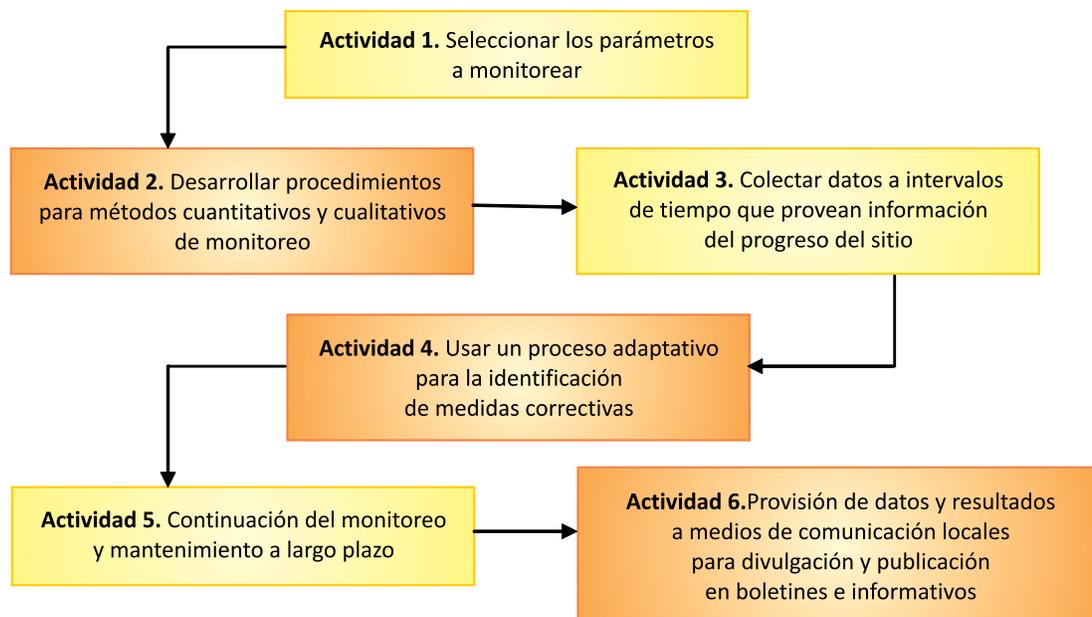


Figura 13. Actividades de evaluación o monitoreo de proyectos de restauración en humedales (IWWR, s.f.).



Literatura citada

- Callaway, J. C., G. Sullivan, J. S. Desmond, G. D. Williams & J. B. Zedler. 2001. Assessment and Monitoring. En: J. B. Zedler (ed.). Handbook for Restoring Tidal Wetlands. CRS Press, Boca Raton, Florida.
- Collins, S. L., J. V. Perino & J. L. Vankat. 1982. Woody vegetation and microtopography in the bog meadow association of Cedar Bog, a west central Ohio USA fen. *American Midland Naturalist* 108: 245-249.
- Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) y Conservación Internacional (CI). 2003. Los humedales de Bogotá y la Sabana. Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, Conservación Internacional. Bogotá.
- Gyurácz J., Bánhidi P. & A. Csuka. 2011. Successful restoration of water level and surface area restored migrant bird populations in a Hungarian wetland. *Biologia* 66/6: 1177-1182.
- Interagency Workgroup on Wetland Restoration (IWWR). S. F. An Introduction and User's Guide to Wetland Restoration, Creation and Enhancement. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Marine Fisheries Service, Office of Habitat Conservation, Habitat Protection Division, Habitat Restoration Division.
- Keddy, P. A. 2000. *Wetland Ecology: Principles and Conservation*. Cambridge University Press. United Kingdom.
- Kusler, J. A., W. J. Mitsch & S. Larson. 1994. Wetlands. *Scientific American* January:64B-70.
- Lewis, W. 1995. *Wetlands: Characteristics and Boundaries*. National Academic Press. Washington, D. C.
- Lindig-Cisneros, R. & J. B. Zedler. La restauración de humedales. En: Sánchez, O., E. Peters, R. Márquez-Huitzil, E. Vega, G. Portales, M. Valdez y D. Azuara (eds.). 2005. *Temas sobre restauración ecológica*. Instituto Nacional de Ecología. México D. F.
- Middleton, B. 1999. *Wetland Restoration: Flood Pulsing and Disturbance Dynamics*. Wiley and Sons. United States of America.
- Montenegro-S. A. L., Ávila Y. A., Mendiverso-Ch H. A. y O. Vargas. 2006. Potencial del Banco de Semillas en la regeneración de la vegetación del humedal Jaboque, Bogotá, Colombia. *Caldasia* 28(2):285-306.
- Naiman. R. J. & R. E. Bilby. 1998. River Ecology and Management in the Pacific Coastal Ecoregion - Lessons from the Pacific Coastal Ecoregion. En: Naiman, R. J., R. E. Bilby & S. Kantor. (eds.). *River Ecology and Management*. 1 ed. Springer. p. 1-12.
- RAMSAR. 1971. Convención sobre los humedales. Ramsar, Irán.
- RAMSAR-COP8. 2002. Humedales agua, vida y cultura: Principios y lineamientos para la restauración de Humedales - Resolución VIII.16. Valencia, España.
- Secretaría Distrital de Ambiente (SDA). 2008. Protocolo de recuperación y rehabilitación ecológica de humedales en centros urbanos. Secretaría Distrital de Ambiente, Bogotá. D. C.
- Suren A. M., Lambert P. & B. K. Sorrell. 2011. The Impact of Hydrological Restoration on Benthic Aquatic Invertebrate Communities in a New Zealand Wetland. *Restoration Ecology* Vol. 19, No. 6: 747-757.
- Titus, J. H. 1990. Microtopography and woody plant regeneration in a hardwood floodplain swamp in Florida. *Bulletin of the Torrey Botanical Club* 117: 429-437.
- Torres I. S. 2011. Síntesis simposio sobre restauración ecológica de humedales y ríos. En: Vargas-R., O. y S. P. Reyes-B. (eds.). *La restauración ecológica en la práctica: Memorias I Congreso Colombiano de Restauración Ecológica & II Simposio Nacional de Experiencias en Restauración Ecológica*. Universidad Nacional de Colombia. Gente Nueva Editorial. Bogotá D. C., Colombia. p. 592-598.

2. RÍOS Y BOSQUES RIPARIOS

Determinantes

Los ríos se definen como volúmenes de agua relativamente grandes que se mueven dentro de un cauce visible, incluyendo el agua subterránea que fluye en la misma dirección, el área de inundación asociada y la vegetación riparia (Naiman & Bilby 2001). No existe diferencia exacta entre ríos y arroyos más que el volumen de agua que corre a través del canal, en los arroyos éste es relativamente pequeño. Las zonas riparias son la interface entre los ecosistemas terrestres y acuáticos, áreas semiterrestres regularmente influenciadas por agua dulce y que se extienden desde los cuerpos de agua hasta los límites de las comunidades vegetales eminentemente terrestres (Gregory *et al.* 1991, Naiman *et al.* 2007).

La existencia de los ríos como ecosistemas en el paisaje es determinada por factores como relieve, geomorfología fluvial y régimen de temperaturas, precipitaciones, evapotranspiración y escorrentía en la región biogeográfica. En los ríos se pueden reconocer características únicas, así como una dinámica natural propia, determinada por la heterogeneidad espacio-temporal y sus límites interactivos (Ward 1994). Muchos de los rasgos que poseen (continuo, espiral de nutrientes, estrés hidráulico y deriva), son manifestaciones del flujo unidireccional (Castro y Donato 2008). De acuerdo con Lindig-Cisneros y Zambrano (2007) los factores abióticos determinantes de ríos comprenden:





- La penetración de la luz permite el desarrollo en aguas transparentes de comunidades de plantas saludables que sirven de refugio y alimento a otros organismos.
- Los sólidos suspendidos regresan a la columna de agua, los nutrientes retenidos en el fondo para promover el desarrollo de algas flotantes.
- La concentración de oxígeno disuelto es un factor limitante para cualquier organismo que requiera de este elemento para su crecimiento (producción primaria).
- La concentración de nutrientes (fósforo y nitrógeno) es determinante para el crecimiento de poblaciones de algas en la columna de agua (producción primaria).

Disturbios

Los disturbios antrópicos presentes en los ríos y vegetación riparia son:

- Deforestación.
- Modificación de regímenes hidrológicos.
- Sistemas de producción no sostenible (producción extensiva e intensiva en agricultura y ganadería).
- Contaminación.
- Extracción de materiales a cielo abierto.
- Sedimentación.
- Invasiones biológicas.
- Sobreexplotación de recursos biológicos.

Objetivos de la restauración

- Restauración o rehabilitación de ríos con influencia rural, urbana e industrial.
- Restauración o rehabilitación de ríos afectados por explotaciones mineras.
- Recuperación del régimen hidrológico en las cuencas altas de los ríos, arroyos y quebradas.
- Restauración o rehabilitación de la vegetación y rondas a lo largo de gradientes altitudinales.
- Restauración de deltas.

Acciones para la restauración ecológica de ríos y bosques riparios

De acuerdo con el Instituto de Restauración de Ríos (NCSRI) y la Concesión de Mar de Carolina del Norte (NCSG) (s.f.) el procedimiento propuesto para la restauración ecológica de los sistemas fluviales es el que se presenta en la figura 14. A continuación se describen aspectos relevantes de este procedimiento.

- **Evaluación del sistema fluvial:** La evaluación física y geomorfológica del sistema fluvial degradado se realiza a partir de diferentes métodos existentes como: *Estilos geomórficos del río, Evaluación del estado del río, Evaluación del hábitat del río, Sistema de evaluación integrada del hábitat y Metodología instruida de incremento de flujo* (Newson *et al.* 1998, Dunn 2000, Phillips *et al.* 2001, Parson *et al.* 2002). Esta evaluación incluye la evaluación de las características geomorfológicas del lecho del río y su valle, la distribución de hábitats dentro del canal (caídas, rápidos y pozos), la presencia y variedad de parches de sustrato uniforme, vegetación y velocidad de corriente y acceso de luz, y preservación de características longitudinales (zonación) (Krauze *et al.* 2008).
- **Diseño de procedimientos:** Algunas de las técnicas para la reconstrucción física del hábitat en los sistemas fluviales se presentan en la tabla 6. Para rehabilitar la dinámica (régimen) hidrológica del río puede recurrirse a acciones como la atenuación de picos de flujo, mediante el uso de reservorios de almacenamiento en la cuenca de captación o en el propio cauce, manejo del alto régimen de flujo en planos de inundación y cauces, a través del refuerzo de cauces con materiales naturales y artificiales combinados, aseguramiento de flujos mínimos durante la temporada de sequía y alféizares dispuestos en el río para disminuir el gradiente longitudinal, la velocidad máxima y erosión. El mantenimiento de la conectividad hidráulica, permite el movimiento de agua y biota entre el río, canales abandonados y planos de inundación adyacentes.

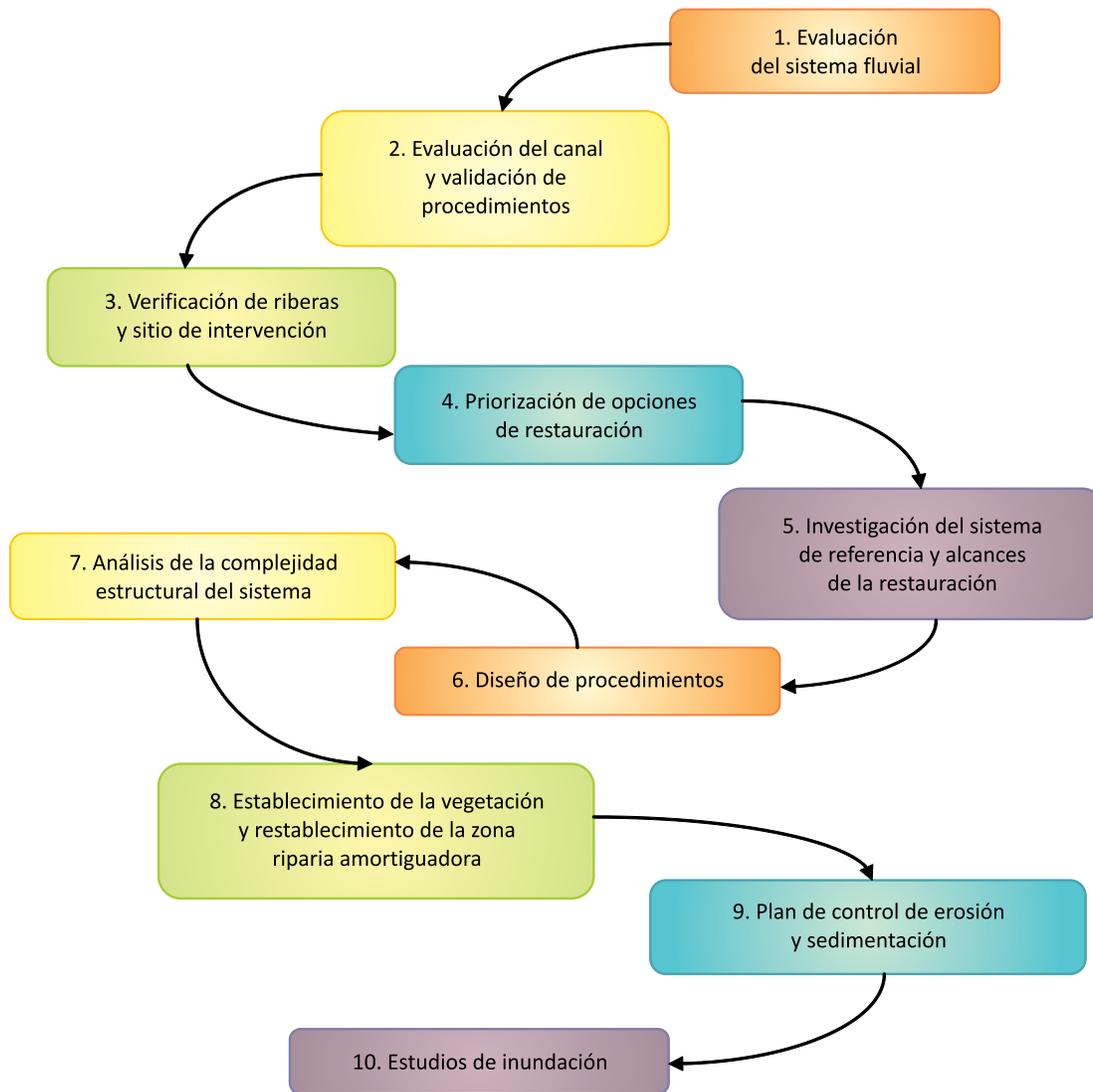


Figura 14. Procedimiento propuesto para la restauración ecológica de sistemas fluviales (NCSRI & NCSG, s.f.).

Tabla 6. Técnicas para la restauración de la estructura física de los bancos de los ríos (Lapinska 2004).

TECNICA	DESCRIPCIÓN	APLICACIÓN
Estacas vivas	Cortes leñosos vivos colocados al interior del suelo, las raíces que crecen forman un tapete viviente que estabiliza el suelo y envuelve las partículas por extracción de la humedad.	Efectiva en los sitios donde las condiciones no son complicadas, su tiempo de construcción es limitado y no es un método costoso. Es apropiado para reparar pequeñas caídas y deslices de tierra frecuentemente húmedos.
Fajinas vivas	Cortes de ramas en dormancia unidos en manojo y colocados en zanjas superficiales sobre las pendientes, para reducir erosión y deslizamientos superficiales.	Pueden atrapar y mantener el suelo en los bancos, creando estructuras pequeñas con forma de represa y reduciendo la longitud de la pendiente en una serie de pendientes pequeñas.
Refuerzo de leños, fajo de raíces y cantos rodados	Atados de cantos rodados y leños con masas de raíces, ubicados en los bancos para proveer protección contra la erosión, trampas de sedimentos y mejorar la diversidad del hábitat.	Amplia resistencia con atados bien hechos. Adecuado para ríos donde existe deficiencia de hábitat para peces.
Rip-rap	Manto de piedras de tamaño apropiado extendidas desde la punta de una cuesta a una altura necesaria.	Es comúnmente usado para proveer protección al banco en los ríos en los que se necesita durabilidad de largo plazo.
Protección de la punta del banco (<i>bank-toe</i>) con piedra	Cresta de piedra excavada (de cantera) o guijarros del río, colocados en la punta del banco como armadura para desviar el flujo del mismo, estabilizar la pendiente y promover la deposición de sedimentos.	Debe ser empleada en los ríos donde la vegetación no puede ser usada. Las piedras previenen la remoción de material caído al banco, se acumula allí permitiendo la revegetación y estabilización de este.
Refuerzo de árboles	Fila de árboles interconectados unidos a la punta del banco de un río o en las cabezas muertas para reducir la velocidad del flujo a lo largo de bancos erosionados, proveer trampas de sedimentos y sustratos, para el establecimiento de plantas y control de erosión.	Trabajan mejor en ríos con alturas de banco inferiores a 3,6 m y velocidades con banco lleno inferiores a 1,8 m por segundo. Capturan sedimento y mejoran las condiciones para la colonización por especies nativas, particularmente en ríos con altas cargas de material en el lecho.
Geomallas vegetadas	Capas alternadas de cortes de ramas vivas y suelo compacto, ajustadas con geotextil natural o sintético y dispuestas alrededor de suelo levantado para reconstruir y revegetar bancos erosionados.	Establecimiento rápido de la vegetación riparia, si son apropiadamente diseñadas e instaladas. Pueden ser instaladas en una pendiente escarpada y muy alta, tienen muy alta tolerancia inicial a la velocidad del flujo.

Para crear rápidos, pozos y caídas, que son componentes importantes de la estructura física de un río en la rehabilitación del meso-hábitat, se emplean prácticas como: aglomerados de cantos rodados, presas, pasadizos de peces, resguardos de leños/rastrojo/roca, barreras de migración, cobertura de árboles, deflectores de viento y medidas de grado de control.

- **Establecimiento de la vegetación y restablecimiento de la zona riparia amortiguadora:** La reconstrucción de la estructura biótica de los sistemas fluviales incluye 3 pasos: establecimiento de comunidades macrófitas en los lechos, estructuración de la cobertura vegetal en los bancos y desarrollo de la vegetación en los valles o zonas riparias (Krauze *et al.* 2008). El establecimiento de plantas acuáticas requiere la aplicación de procedimientos especiales y técnicas para prevenir el daño de las plantas y su deslave en estados tempranos de sucesión. Algunos procedimientos son la creación de flujos bajos, zonas parcialmente aisladas dentro del lecho del río y la preparación de sustrato para plantación. En cuanto a la restauración de zonas riparias Naiman *et al.* (2007), proponen los siguientes principios ecológicos y lineamientos para el manejo de bosques riparios:

1. Los regímenes de caudal naturales modelan la evolución de la biota riparia y los procesos ecológicos en el área.
 - Los disturbios son esenciales porque son eventos que influyen fuertemente en la dinámica ecológica y los patrones espaciales del ecosistema.
 - Las interacciones entre los flujos de agua superficial y subterránea son esenciales en la integridad ecológica del ecosistema acuático-ripario.
2. Las redes de interacción entre individuos y especies tienen fuertes efectos en los procesos ecosistémicos.
3. El manejo de las zonas riparias demanda gran cooperación debido a la complejidad de la información y su eventual cambio, esto excede la capacidad de trabajo de un grupo singular.
4. Las actividades humanas apropiadas que afectan la zona riparia, son elementos ecológicos fundamentales de la captación.
5. Conservar y restaurar las propiedades biofísicas de las zonas riparias, mejora todos los valores de los recursos naturales y el bienestar humano.

Las acciones de restauración correspondientes a reconstrucción física y biológica del hábitat, son complementadas por técnicas de fitorremediación que incluyen fitoextracción o fitoconcentración, fitodegradación, biodegradación de la rizósfera, volatilización y estabilización. Para la implementación de estas técnicas deben tomarse en cuenta factores como:

- Selección apropiada de especies vegetales.
- Especies nativas localmente adaptadas y resistentes a las sustancias contaminantes del suelo.
- Tolerancia de las plantas a la variabilidad de condiciones ambientales y capacidad de adaptación a características del hábitat acuático.



Según Chará *et al.* (2011) el establecimiento de franjas protectoras de vegetación, así como la eliminación de factores de disturbio, son fundamentales para recuperación de las funciones de los ecosistemas de ríos, sin embargo en el caso de disturbios como la ganadería, una vez eliminado el pastoreo, se estimula el crecimiento de gramíneas exóticas que retrasan el proceso de regeneración natural. Por esta razón recomiendan realizar la siembra de vegetación nativa de rápido crecimiento en el área ribereña, que compita con las gramíneas y facilite su eliminación y la regeneración de nuevas especies de árboles.

No existe un acuerdo general sobre el ancho mínimo para un bosque ripario y se han publicado diversas propuestas para el cálculo de esta dimensión, las cuales son de carácter local, por lo que son aplicables a las condiciones particulares del sitio (Magdaleno 2011). Teniendo en cuenta que en el caso específico de ríos y bosques ribereños, degradados por ganadería, el ancho del bosque restaurado, dependerá en gran medida de los acuerdos logrados con los propietarios del terreno, Chará *et al.* (2011), recomiendan un ancho mínimo de 3 m a cada lado, desde la orilla de la quebrada, para garantizar la protección del río.

- **Evaluación y Monitoreo:** Respecto al monitoreo de la restauración de los sistemas fluviales Palmer *et al.* (2005) definen 5 criterios de éxito para la restauración ecológica de los ríos:

1. Imagen guía de estado dinámico, es decir, un punto ecológico dinámico de llegada identificado a priori y usado para guiar la restauración.
2. Mejoramiento del ecosistema, es decir, condiciones ecológicas de río apreciablemente mejoradas.
3. Incremento de la resiliencia, es decir, el ecosistema es más autosostenible que antes de la restauración.
4. Daños no perdurables provocados, es decir, la implementación de la restauración no causa daños irreparables.
5. Evaluación ecológica completa, es decir, algún nivel de evaluación pre y post proyecto es transmitida y su información se hace disponible.

Se recomienda la medición de los siguientes parámetros:

- Microclima: gradientes microclimáticos que indican condiciones en ambientes terrestres y sistemas acuáticos adyacentes.
- Heterogeneidad de parches: indicador de la integridad del régimen de descargas.
- Biodiversidad: Incrementos en las unidades de vegetación, así como en la riqueza de especies de plantas y de escarabajos carábidos, son indicadores de procesos de restauración hidromorfológica exitosos (Januschke *et al.* 2011).
- Terrestrialización: incremento en la abundancia relativa de especies terrestres.
- Seston: material particulado suspendido.
- Macroinvertebrados acuáticos: el incremento de la diversidad, la riqueza de taxones y el porcentaje de Ephemeroptera y Trichoptera son indicadores de una buena calidad de agua (Chará *et al.* 2011).
- Reducción en la abundancia absoluta y el porcentaje de Moluscos, los cuales son indicadores de sedimentación y contaminación por materia orgánica (Chará *et al.* 2011).



Literatura citada

- Castro, M. I. & J. C. Donato. 2008. Aspectos generales sobre la ecología de ríos. En: Donato, J. C. (ed.). *Ecología de un Río de Montaña de los Andes Colombianos (Río Tota, Boyacá)*. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias. Bogotá.
- Chará, J. D., Giraldo, L. P., Zúñiga, M. C., Chará-Serna, A. M. y G. X. Pedraza 2011. Cambios en el ambiente acuático asociados a la restauración del corredor ribereño en una quebrada afectada por ganadería en la cuenca del río La Vieja, Colombia. En: Vargas-R., O. y S. P. Reyes-B. (eds.). *La restauración ecológica en la práctica: Memorias I Congreso Colombiano de Restauración Ecológica & II Simposio Nacional de Experiencias en Restauración Ecológica*. Universidad Nacional de Colombia. Gente Nueva Editorial. Bogotá D. C., Colombia. p. 564-571.
- Dunn, H. 2000. Identifying and protecting rivers of high ecological value LWRDC Occasional Paper No. 01/00.
- Gregory, S. V., F. J. Swanson, W. Arthur McKee & K. W. Cummins. 1991. An Ecosystem Perspective of Riparian Zones: Focus on links between land and water. *Bioscience* Sep 41, 8 Research Library 540.
- Januschke K., Brunzel S., Haase P. & D. Herring. 2011. Effects of stream restorations on riparian mesohabitats, vegetation and carabid beetles. *Biodivers Conserv* 20:3147–3164.
- Krauze, K., M. Zawilski & I. Wagner. 2008. Aquatic habitat rehabilitation: Goals, constraints and techniques. En: Wagner, I., J. Marsalek y P. Breil (Eds.). *Aquatic habitats in sustainable urban water management: Science, Policy and Practice*. Unesco Publishing. Taylor & Francis Group. Londres - Paris.
- Magdaleno F. 2011. Restauración de bosques riparios de ríos y humedales. En: Vargas-R., O. y S. P. Reyes-B. (eds.). *La restauración ecológica en la práctica: Memorias I Congreso Colombiano de Restauración Ecológica & II Simposio Nacional de Experiencias en Restauración Ecológica*. Universidad Nacional de Colombia. Gente Nueva Editorial. Bogotá D. C., Colombia. p. 131-141.
- Naiman, R. J. & R. E. Bilby (eds.). 1998. *River Ecology and Management. Lessons from the Pacific Coastal Ecoregion*. Springer-Verlag. New York.
- Naiman, R. J., H. Decamps & M. E. McClain. 2007. *Riparia: Ecology, Conservation, and Management of Streamside Communities*. Elsevier Academic Press. China.
- Newson, M. D., D. M. Harper, C. L. Padmore, J. L. Kemp y B. Vogel. 1998. A cost-effective approach for linking habitats, flow types and species requirements. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 8: 431- 446.
- North Carolina Stream Restoration Institute (NCSRI) and North Carolina Sea Grant (NCSG). S.F. *Stream Restoration: A Natural Channel Design Handbook*. Nc Stream Restoration Institute, Sea Grant North Carolina, State of North Carolina Department of Transportation, United States Environmental Protection Agency.
- Lapinska, M. 2004. Streams and rivers: Defining their Quality and Absorbing Capacity. *Management of streams and rivers: how to enhance absorbing capacity against human impacts*. pp. 75-97, 169-188. En: Zalewsky M. y I. Wagner-Lotkowska (Eds.). *Integrated Watershed Management – Ecohydrology - Phytotechnology – Manual*. UNESCO IHP, UNEP-IETC.
- Lindig-Cisneros, R. & L. Zambrano. Aplicaciones prácticas para la conservación y restauración de humedales y otros ecosistemas acuáticos. En: Sánchez, O., E. Peters, R. Márquez y L. Zambrano (eds.) 2007. *Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México*. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, United States Fish and Wildlife Service, Unidos para la Conservación A. C., Escuela de Biología de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México D. F.

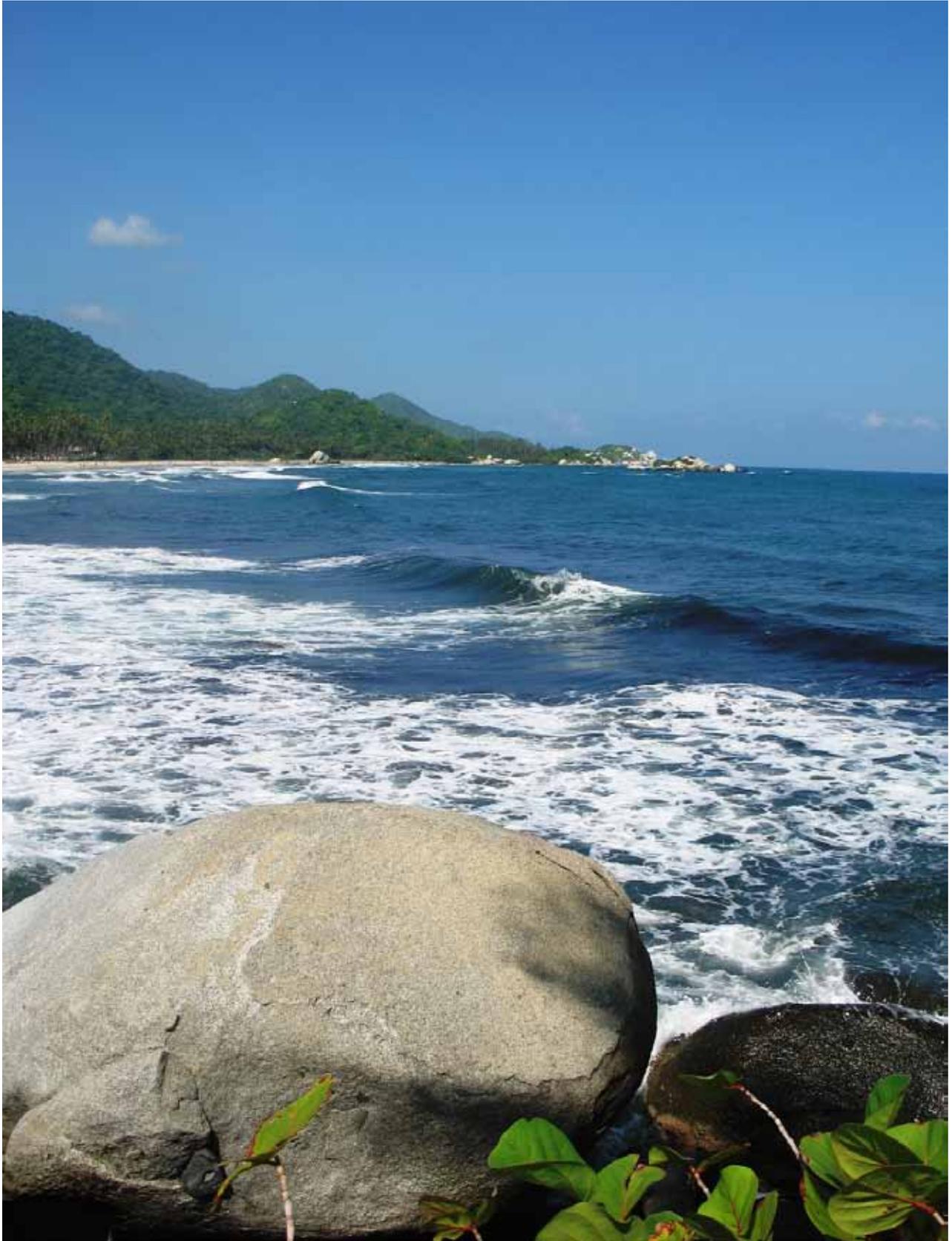


- Palmer, M. A., E. S. Bernhardt, J. D. Allan, P. S. Lake, G. A. Alexander, S. Brooks, J. Carr, S. Clayton, C. N. Dahm, J. Follstad, D. L. Galat, S. G. Loss, P. Goodwin, D. D. Hart, B. Hassett, R. Jenkinson, G. M. Kondolf, R. Lave, J. L. Meyer, T. K. O'Donnell, L. Paganano & E. Sudduth. 2005. Standards for ecologically successful river restoration. *Journal of Applied Ecology* 42: 208-217.
- Parson, M., M. Thomas & R. Norris. 2002. Australian River Assessment System: Review of Physical River Assessment Methods - A Biological Perspective. Monitoring River Health Initiative Technical Report 21, Environment Australia.
- Phillips, N., J. Bennett & D. Moulton. 2001. Principles and tools for the protection of rivers, Queensland Environmental Protection Agency report for LWA.
- Ward, J. V. 1994. The structure and dynamics of lotic ecosystems. pp. 195-218. En: R. Margalef (ed.). *Limnology now. A paradigm of planetary problems*. Elsevier Science. B. V. Amsterdam.



IV PARTE

SISTEMAS COSTEROS





INTRODUCCIÓN

En la figura 15 se presenta la secuencia de pasos propuesta para la restauración ecológica de ecosistemas costeros, los cuales se describen brevemente a continuación.

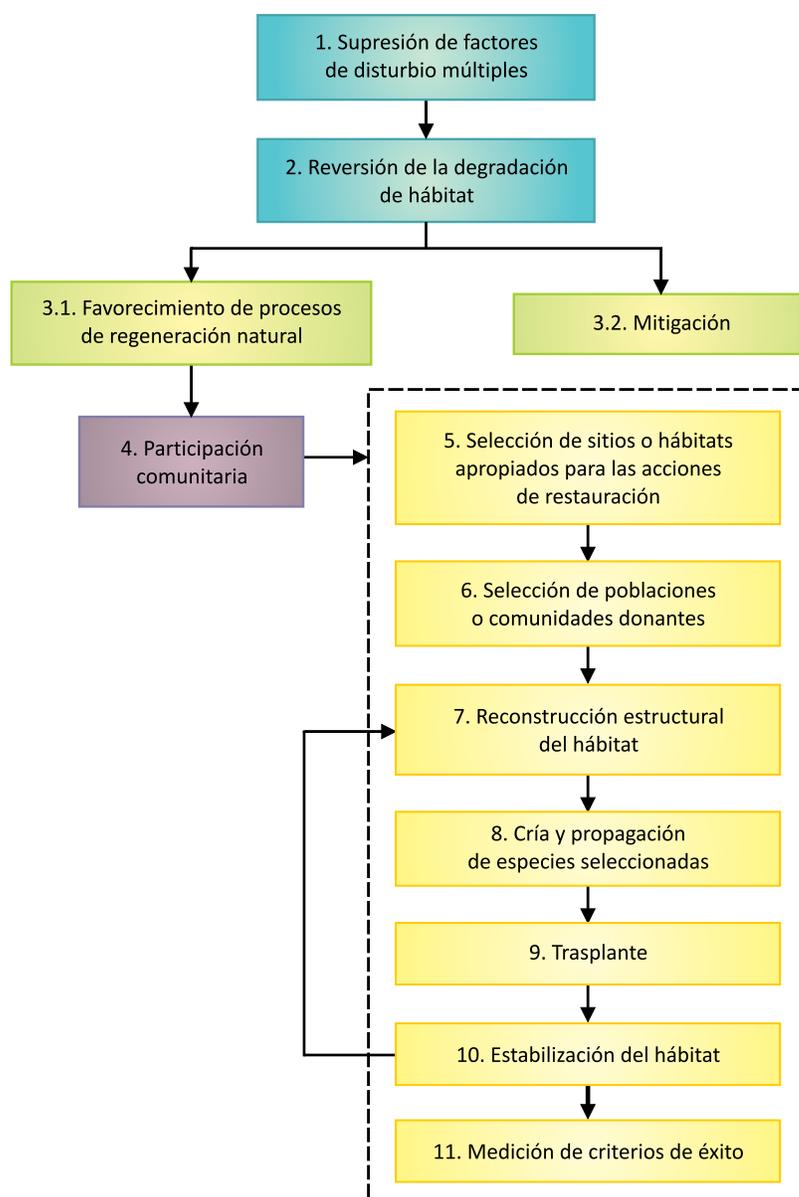


Figura 15. Secuencia y relaciones de los pasos para la restauración ecológica de los ecosistemas costeros.

PASO 1. SUPRESIÓN DE FACTORES DE DISTURBIO MÚLTIPLES

En este paso se deben suspender todas aquellas actividades que generan impacto en los ecosistemas costeros. Debido a su vulnerabilidad es un paso fundamental antes de la evaluación misma de la degradación. Tal es el caso de ecosistemas de coral y praderas de pastos marinos, los cuales se ven afectados por actividades náuticas, sedimentación, contaminación química y térmica. Algunos de los factores de disturbio operan en forma simultánea; sin embargo, los efectos de estos también se combinan en el tiempo independientemente de su ocurrencia.

PASO 2. REVERSIÓN DE LA DEGRADACIÓN DEL HÁBITAT

Este paso es particularmente importante cuando los ecosistemas han tenido algún tipo de alteración en el régimen hidrológico (manglares) o están eutrofizados. Antes de observar la regeneración natural o emprender acciones de restauración, debe restablecerse el régimen hidrológico y descontaminar el agua y el sustrato.

PASO 3. FAVORECIMIENTO DE PROCESOS DE REGENERACIÓN NATURAL (3.1)

Luego de la reversión de la degradación del hábitat se espera la recuperación del ecosistema por sí solo. Favorecer los procesos de regeneración natural requiere observar la capacidad de reclutamiento de nuevos individuos, sin embargo existen barreras físicas que impiden la dispersión y establecimiento de propágulos, por lo cual el reclutamiento no es suficientemente efectivo para la recuperación del ecosistema. Estas barreras deben eliminarse y en lo posible cuando el caso lo amerite, intervenir en la adecuación de las condiciones físicas para propiciar los procesos de dispersión, establecimiento y persistencia de organismos.

PASO 3. MITIGACIÓN (3.2)

En los casos en los cuales la situación no permite la regeneración natural ni la intervención del hombre a través de acciones de restauración, la mitigación es una alternativa válida. Dentro de las opciones de mitigación se incluyen principalmente programas de educación ambiental o implementación de acciones de restauración en otros sitios degradados para compensar los daños producidos en áreas afectadas.

PASO 4. PARTICIPACIÓN COMUNITARIA

La importancia de este paso radica en la acción conjunta de las comunidades que utilizan y aprovechan recursos provistos por los ecosistemas costeros. Es el caso de pescadores y artesanos cuya participación y capacitación es herramienta fundamental en los procesos de restauración. Este paso se integra a los pasos subsiguientes pero también podría ser esencial eventualmente en el paso 2.



PASO 5. SELECCIÓN DE SITIOS O HÁBITATS APROPIADOS

Luego de comprobar que la regeneración natural no ocurre o no es suficiente para la recuperación de los ecosistemas costeros, deben seleccionarse los sitios o hábitats apropiados para emprender acciones de restauración activa. Estos sitios deben ofrecer las condiciones propicias para garantizar la efectividad de los métodos y acciones empleados en la restauración. Los principales criterios de selección en zonas costeras dadas las características físico-bióticas de los ecosistemas presentes, se relacionan con aspectos logísticos, dimensiones del área, acceso y condiciones similares a ambientes previamente restaurados con éxito.

PASO 6. SELECCIÓN DE POBLACIONES O COMUNIDADES DONANTES

La selección de poblaciones o comunidades donantes se hace con el criterio de obtener organismos para la cría y propagación. Los organismos deben seleccionarse de hábitats o ecosistemas en buen estado de conservación, evitando que su extracción involucre cambios severos o drásticos en la supervivencia y viabilidad de las poblaciones donantes. Deben tenerse recomendaciones especiales en el transporte y manipulación de los organismos.

PASO 7. RECONSTRUCCIÓN ESTRUCTURAL DEL HÁBITAT

Algunas perturbaciones en los ecosistemas costeros involucran la reconstrucción estructural del hábitat. La mayoría de organismos dominantes en los ecosistemas costeros requieren de sustratos estables para desarrollarse.

PASO 8. CRÍA Y PROPAGACIÓN DE ESPECIES SELECCIONADAS

Al igual que en la restauración de ecosistemas terrestres, en los ecosistemas costeros existen especies clave para la restauración. Sean mangles, corales, esponjas o pastos marinos, existen métodos de cría y propagación específicos para cada uno de estos organismos.

PASO 9. TRASPLANTE

El trasplante es el paso mediante el cual los organismos criados y propagados son implantados en el sitio o hábitat seleccionado. De acuerdo con el ambiente de cada ecosistema deben seguirse recomendaciones específicas.

PASO 10. ESTABILIZACIÓN DEL HÁBITAT

En algunos casos la reconstrucción estructural del hábitat y trasplante es insuficiente para garantizar la viabilidad de las poblaciones y debe recurrirse a técnicas de estabilización con el fin de que los organismos prosperen.

PASO 11. MEDICIÓN DE CRITERIOS DE ÉXITO

Este paso permitirá establecer aquellos parámetros o atributos útiles en la evaluación y monitoreo de la restauración. De acuerdo a las condiciones iniciales del ecosistema se hará el seguimiento de estos parámetros.



I. MANGLARES

Determinantes

Los manglares son las formaciones vegetales intermareales características de litorales tropicales y subtropicales, se hace referencia a estas como bosques costeros, bosques mareales o bosques de mangle (manglar) (Saenger 2002). Están constituidos por especies de mangle con adaptaciones a fluctuaciones en la salinidad y oxígeno disponible, alta radiación y suelos inestables. En condiciones no óptimas los manglares conforman coberturas dispersas y de arbustos enanos poco parecidas a bosques productivos extensos.



Dentro de los determinantes de este ecosistema se incluyen:

- La geomorfología, puesto que los manglares crecen en llanuras litorales de los deltas formados a partir de sedimentos fluviales depositados en la desembocadura de los ríos, están protegidos por el oleaje y cuando el río sube este reduce su velocidad. La forma depende de los sedimentos acarreados, los cuales son determinantes en la estructura de los bosques de manglar.
- La hidrología, ya que la cantidad de agua dulce que drena a los manglares depende del tamaño de la cuenca, del caudal de los ríos, de las precipitaciones y la desviación de los cauces por intervención del hombre. Las principales tasas de transporte de agua ocurren durante periodos cortos (1-2 horas) del ciclo de marea.
- El flujo dentro de la vegetación es lento a pesar de la velocidad que lleve la corriente; se estima que no excede los 5 cm/s. Los manglares más grandes se establecen en regiones con aporte abundante de agua dulce, pero sin grandes descargas.
- La temperatura, puesto que altas temperaturas en combinación con una alta radiación solar, aumentan la evapotranspiración y por lo tanto incrementan los niveles de salinidad del suelo.
- La precipitación es determinante en el control de la salinidad del suelo, pues altas tasas de precipitación reducen la hipersalinidad, aunque es variable según la zona latitudinal y la ubicación geográfica (climas húmedos y áridos).
- Los manglares se establecen en suelos inestables y pobres en nutrientes provistos de sedimentos derivados de costas, riberas de ríos y tierras altas erosionadas (Cardona & Botero 1998). También se encuentran en suelos inorgánicos con depósitos de limo y arcillas, en llanuras aluviales y terrazas de sedimentos que se depositan a lo largo del cauce de los ríos como producto de la erosión, estos generalmente son ricos en nutrientes (Ca, Mg y K), retenidos temporalmente; y existen en suelos orgánicos con alta acumulación de restos orgánicos, que tienen poco contenido de arcilla, limo y arena.

Disturbios

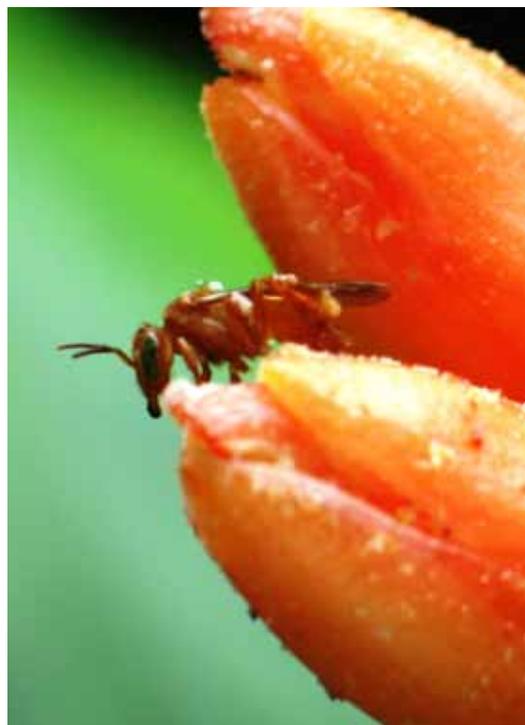
Los principales disturbios en los manglares son (Sánchez-Páez 1994, Sánchez 2009):

- Deforestación.
- Modificación del régimen hidrológico.
- Contaminación.
- Sobreexplotación de recursos biológicos.
- Desarrollo industrial y urbanístico.
- Sedimentación.

Objetivos de la restauración

Como objetivos generales para la restauración ecológica de los manglares se proponen los siguientes:

- Restaurar áreas de manglar deforestadas, contaminadas y sedimentadas.
- Restaurar áreas de manglar afectadas por huracanes.
- Rehabilitar áreas de manglar convertidas en playones y basureros a cielo abierto.
- Restablecer el régimen hidrológico de los manglares afectados por sedimentación y obras de infraestructura como carreteras.
- Promover proyectos comunitarios para la construcción de viveros y propagación de especies de mangle.



Acciones para la restauración ecológica de manglares

Debido a que los manglares pueden recuperarse sin esfuerzos de restauración activa, la restauración ecológica de los mismos debe empezar por cumplir con las siguientes acciones (basado en Lewis 2005):

1. Establecer la existencia de una o más barreras a la restauración (Elster y Polanía 2000) (análisis de modificaciones del ambiente ocurridas) que impiden la sucesión secundaria, por ejemplo el bloqueo de la inundación mareal.
2. Una vez identificadas las barreras se deben eliminar antes de emprender cualquier acción de restauración.
3. Determinar por observación la ocurrencia de reclutamiento de plántulas. Esto significa entender la autoecología de las especies de mangle en el sitio, es decir, sus patrones de reproducción, la distribución de propágulos y el éxito de establecimiento de plántulas (esto influirá en la selección de especies en la siguiente fase). También los patrones hidrológicos normales que controlan la distribución y el éxito del establecimiento y crecimiento de las especies objetivo (profundidad, duración y frecuencia y flujo mareal en comunidades de referencia cercanas o parecidas al sitio objetivo de restauración).
4. Favorecer la regeneración natural si esta ocurre (Lema-Vélez y Polanía 2005), solamente si no ocurre emplear acciones de restauración activa y pasar a la fase de experimental o de implementación.
5. Diseño del programa de restauración para restaurar inicialmente el régimen hidrológico apropiado y el reclutamiento natural y voluntario de los propágulos de mangle para el establecimiento de las plantas.

Si las acciones anteriores son implementadas y no son suficientes para favorecer la regeneración natural, es necesario proceder con el desarrollo de las acciones que se presentan en la figura 16. El trasplante de propágulos a través de la colección y cultivo de plántulas se requiere cuando el reclutamiento natural, no provee suficiente cantidad de plántulas establecidas con éxito, o las tasas de establecimiento y crecimiento no cumplen con las metas de restauración planteadas. En esta acción la participación comunitaria es fundamental cuando se decide construir viveros comunitarios temporales (Ulloa *et al.* 2004) para la producción de plántulas.

La preparación de los lugares de siembra o trasplante debe hacerse imitando al máximo la topografía del terreno y sus variaciones sutiles. Estas variaciones controlan la profundidad, duración y frecuencia de la inundación mareal. La construcción y apertura de canales se hace para favorecer el flujo y drenaje al interior del área y favorecer la entrada y salida de peces con las mareas. Por último es de gran utilidad la evaluación de los costos del proyecto en una etapa temprana, con el fin de hacer los recursos más efectivos con la consecuente replica de acciones para la restauración.

Garantizar el éxito del proyecto requiere de la evaluación y seguimiento de los resultados del mismo. En esta instancia es útil la implementación de parcelas experimentales en las cuales se tengan réplicas y controles a través de los cuales parámetros como la supervivencia del mangle y las tasas de colonización y crecimiento de las especies puedan ser registrados (véase Sánchez 2009).





Figura 16. Acciones para la restauración activa de ecosistemas de manglar (Adaptado de Lewis 2005).

Literatura citada

Cardona, P. & L. Botero. 1998. Soil Characteristics and Vegetation Structure in a Heavily Deteriorated Mangrove Forest in the Caribbean Coast of Colombia. *Biotropica* 30(1): 24-34.

Elster, C. & J. Polanía. 2000. Posibilidades de recuperación del manglar en la ciénaga grande de Santa Marta (Colombia). *Actual Biol* 22(72): 29-36.

Lema-Vélez, L. F. & J. Polanía. 2005. Regeneración natural y producción del manglar del delta del Río Ranchería, Caribe Colombiano. *Actual Biol* 27 (82): 25-33.

Lewis, R. R. 2005. Ecological engineering for successful management and restoration of mangrove forest. *Ecological Engineering* 24: 403-418.

Saenger, P. 2002. *Mangrove Ecology, Silviculture and Conservation*. Kluwer Academic Press. Netherlands.



Sánchez-Paez, H. Los Manglares de Colombia. En: Universidad de Miami. 1994. *El ecosistema de Manglar en América Latina y la cuenca del Caribe: su manejo y conservación*. Editorial Universidad de Miami.

Sánchez, H. 2009. Experiencias de zonificación y restauración de los manglares en la costa Caribe de Colombia. XII congreso forestal mundial. Buenos Aires, Argentina. http://www.cfm2009.org/es/programapost/trabajos/Experiencias_de_zonificacion_y_restauracion_FD.pdf

Ulloa, G. A., H. Sánchez-Páez & H. A. Tavera. 2004. *Restauración de Manglares Caribe de Colombia. Proyecto Manejo Sostenible y Restauración de los Manglares por Comunidades Locales del Caribe de Colombia*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial - CONIF - OIMT. Bogotá.

2. ECOSISTEMAS CORALINOS

Determinantes

Los ecosistemas coralinos son formaciones de coral que van desde simples coberturas discontinuas (comunidades y alfombras de coral), hasta inmensos complejos arrecifales (Márquez 1996, López-Victoria y Díaz 2000). Un arrecife es una estructura construida por organismos vivos que modifica sustancialmente la topografía del lecho marino y cuya dimensión es tal que influye las propiedades físicas y por ende ecológicas del medio circundante; su consistencia es lo suficientemente compacta para resistir las fuerzas hidrodinámicas y por lo tanto, está en la capacidad de conformar un hábitat duradero, estable y característicamente estructurado para albergar organismos especialmente adaptados (Shuhmacher 1982).



Los factores físicos que determinan el asentamiento y desarrollo de una comunidad coralina y en especial la producción primaria y biomasa de un arrecife son (algunos enunciados por Alongi 1998):

- La profundidad y luz es determinante para los corales porque requieren de aguas claras con suficiente penetración de luz, como condición para que las zooxantelas realicen fotosíntesis. Su profundidad límite de crecimiento activo es de 45 a 75 m.
- La temperatura determina el desarrollo óptimo de los corales en el rango entre los 23 y 25 °C.
- La salinidad es un factor crítico, los corales presentan tolerancia a salinidades de 27 a 40 ppm.
- La sedimentación y turbidez son factores que afectan los corales en altas concentraciones de sedimentos produciendo bloqueo de la luz y taponamientos.
- La complejidad estructural y estabilidad física del sustrato son importantes para la formación de grandes comunidades de corales en sustratos duros de tipo rocoso.
- Las concentraciones y disponibilidad de nitrógeno y fósforo.
- La hidrodinámica local determina el suministro de nutrientes y alimento para corales y zooxantelas de acuerdo a la circulación del agua.

Disturbios

Los disturbios más importantes en este ecosistema son (Garzón-Ferreira & Díaz 2003):

- Sedimentación.
- Contaminación.
- Sobreexplotación de recursos biológicos.
- Desarrollo de obras, espacios urbanos e infraestructura.
- Huracanes.
- Invasiones biológicas.
- Pesca con dinamita.

Objetivos de la restauración

Se proponen los siguientes objetivos generales para la restauración ecológica de los ecosistemas de corales en Colombia:

- Restaurar arrecifes coralinos y alfombras de coral destruidas por embarcaciones.
- Restaurar formaciones coralinas con alta incidencia de sedimentación.
- Restaurar formaciones coralinas con episodios de blanqueamiento, proliferación de algas y enfermedades epidémicas.
- Promover la conectividad de las áreas coralinas con los demás ecosistemas costeros.
- Estudiar los métodos de cría y propagación de especies de esponjas, corales y otros organismos claves para la restauración.

Acciones para la restauración ecológica de ecosistemas coralinos

De acuerdo con Pretch (2006) la restauración ecológica de los ecosistemas de coral debe comenzar por evaluar y tener presentes los siguientes puntos, con la finalidad de establecer en un sitio específico los beneficios de la restauración, según la capacidad de los recursos y servicios del área para recuperarse naturalmente:

- La sensibilidad y vulnerabilidad de recursos y/o servicios afectados.
- El potencial reproductivo y de reclutamiento de las especies.
- La resistencia y resiliencia (estabilidad) del ambiente afectado.



De acuerdo con lo anterior y a pesar de la vulnerabilidad de los ecosistemas de coral y situaciones de riesgo extremas es necesario un examen minucioso sobre:

- Costos de las alternativas a emplear.
- Alcances esperados de acuerdo a alternativas planteadas y metas y objetivos propuestos para retornar los recursos y servicios naturales afectados.
- Probabilidades de éxito de las alternativas.
- Alcance de las alternativas para prevenir degradaciones como resultado de incidentes futuros.
- Prevención de degradaciones colaterales como resultado de la implementación de las alternativas.

La figura 17 muestra las acciones generales para la restauración de los ecosistemas de coral. Todo proceso de restauración de ecosistemas de corales debe comenzar por la supresión de los disturbios, independientemente de la elección de alternativas pasivas o activas. De inmediato, si las condiciones son óptimas los arrecifes y otras formaciones se regeneran por sí solos. Cuando esto ocurre las mejores alternativas son de carácter pasivo y corresponden básicamente al aislamiento y mantenimiento del área degradada, su monitoreo y todas las acciones necesarias para lograrlo.

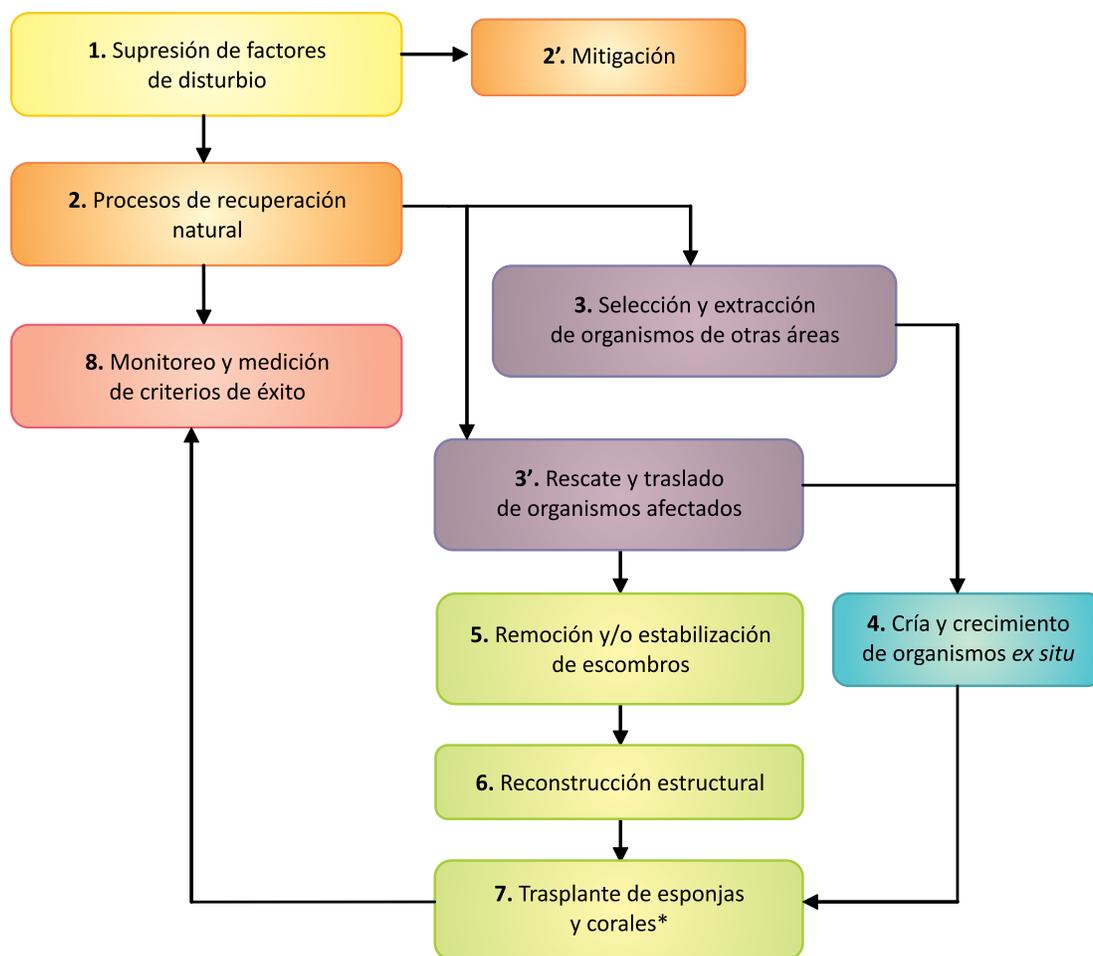


Figura 17. Acciones generales para la restauración ecológica de ecosistemas de corales (Adaptado de Jaap 2000).

Cuando la regeneración natural no resulta por condiciones adversas del medio y/o bajo reclutamiento de organismos, debe recurrirse a la restauración activa. Esto comprende acciones diferentes dependiendo del tipo de alteración ocurrida en el ecosistema. De forma general, debe recurrirse a poblaciones o comunidades donantes de las cuales se obtienen organismos como esponjas y corales para su cría, propagación y posterior trasplante en los sitios afectados.

En el caso específico de derribamiento de formaciones coralinas por embarcaciones, las acciones de restauración que deben emprenderse se enumeran a continuación (Jaap 2000):

1. Rescatar los recursos afectados tan rápido como es posible y movilizarlos a un lugar seguro hasta tener la posibilidad de trasplantarlos en el arrecife implicado (es la acción más importante de todas).
2. Realizar la investigación preliminar del daño y proveer un estado de priorización (en emergencia), de los recursos bentónicos afectados.
3. Enderezar los corales derribados y recuperar los fragmentos de coral para almacenarlos en un lugar seguro temporalmente.
4. Trasladar formaciones grandes con la ayuda de tornos portátiles y bolsas especiales de levantamiento. Las cajas plásticas son útiles para trasladar y almacenar fragmentos pequeños de coral entre dos buzos.
5. Permanecer en labor intensiva por dos mil o tres mil horas para evaluar todo el campo afectado.
6. En áreas con fuertes corrientes y oleaje trasladar el material de inmediato a un lugar fuera de peligro (aguas más profundas o tierra).

En casos especiales en los cuales no es viable realizar acciones de restauración ecológica por dificultades de acceso al sitio, por condiciones de oleaje y profundidad, la alternativa real es la implementación de acciones de mitigación. Esto incluye programas de educación ambiental, mejora de ayudas o guías para navegación, compensación en sitios adyacentes degradados (sin acciones de restauración implementadas por los responsables del daño o disturbio) e investigación en restauración y monitoreo.

El monitoreo de la restauración puede hacerse a través de observaciones directas, registro fotográfico o de video y experimentos a través de la medición de criterios de éxito como (ver Jaap 2000):

- Estabilidad: los elementos reconstruidos deben ser lo suficientemente resistentes a olas y corrientes.
- Toxicidad: si hay zonas alrededor de las estructuras restauradas donde plantas y animales mueren o muestran signos de estrés.
- Estética: si es factible las características del ecosistema restaurado deben ser lo más semejantes posibles al hábitat natural sin emplear materiales de residuo (barcos y aviones hundidos).
- Trasplante de organismos: inspección del estado de organismos a través de observación visual, fotografía y video. Evaluación de color, blanqueamiento, competencia con algas bentónicas, enfermedades y porcentaje de cobertura de grupos funcionales.
- Reclutamiento de corales: observaciones visuales, fotografía, video y experimentos para evaluar la colonización y ocupación espacial de áreas degradadas por parte de organismos bentónicos sésiles.



Literatura citada

- Alongi, D. M. 1998. Coastal ecosystem processes. CRC Press. USA.
- Garzón-Ferreira, J. & J. M. Díaz. The Caribbean coral reefs of Colombia. En: Cortés, J. (ed.). 2003. Latin American Coral Reefs. Elsevier Science.
- Japp, W. C. 2000. Coral Reef Restoration. Ecological Engineering 15: 345-364.
- López-Victoria, M. & J. M. Díaz. 2000. Formaciones coralinas del archipiélago de San Bernardo, Caribe Colombiano. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 24 (91): 219-230.
- Márquez, G. 1996. Biodiversidad marina: aproximación con referencia al Caribe. 67.102 pp. En: Ecosistemas estratégicos y otros estudios de ecología ambiental. Fondo FEN Colombia. Bogotá.
- Precht, W. F. 2006. Coral reef restoration handbook. Taylor & Francis Group. Boca Ratón-Florida, USA.
- Schuhmacher, H. 1982. Korallenriffe, ihre Verbreitung, Tierwelt und Ökologie. BLV Verlagsgesellschaft, München, 274 p.



3. PRADERAS DE PASTOS MARINOS

Determinantes

Las praderas de pastos marinos (praderas de fanerógamas) son ecosistemas muy similares a las praderas terrestres que se desarrollan sobre fondos arenosos y fangosos costeros (Márquez 1996). Están compuestas por plantas monocotiledóneas típicamente de hojas largas con forma de tira (*strap*), pero no son verdaderos pastos. Los pastos marinos dominan el hábitat y estabilizan el sustrato en el cual crecen, las praderas que forman crean un ambiente físico y proveen una fuente de producción primaria de la cual depende otra comunidad de organismos (Hogard 2007).

Los requerimientos ambientales de los pastos marinos se mencionan a continuación (Díaz *et al.* 2003):

- La luz controla la supervivencia y distribución batimétrica de los pastos marinos (Morris y Tomasko 1993).
- La temperatura preferida por las especies de pastos marinos está entre los 20 y 30 °C.
- La salinidad es un factor que la mayoría de especies tolera en amplio rango, sin embargo, el óptimo se encuentra entre 24 a 35 ppm.
- Los sedimentos sobre los cuales se establecen los pastos marinos deben tener suficiente profundidad, en general las plantas deben contar con buena estabilidad física del sustrato.
- Los nutrientes requeridos por los pastos (CO_2 , nitrógeno y fósforo), se obtienen disueltos de los sedimentos a través de las raíces y rizomas y de la columna de agua a través de las hojas (Mc Roy 1983).



Disturbios

En Colombia las praderas de pastos marinos están continuamente sometidas a los siguientes disturbios:

- Huracanes.
- Terremotos y maremotos.
- Sedimentación.
- Contaminación.
- Pesca con dinamita y/o red de arrastre.
- Sobreexplotación de recursos biológicos.

Objetivos de la restauración

Se proponen los siguientes objetivos generales para la restauración ecológica de las praderas de pastos marinos en Colombia:

- Restaurar praderas de pastos marinos degradadas o destruidas por sedimentación, dragado o remoción de sedimentos marinos y contaminación térmica.
- Crear nuevas praderas de pastos marinos en áreas adecuadas para su crecimiento con el fin de compensar su pérdida en otras áreas (mitigación).
- Difundir la importancia de las praderas de pastos marinos como ecosistemas costeros a través de la participación comunitaria y la educación ambiental.
- Propiciar la conectividad entre praderas de pastos marinos de diferentes áreas.

Acciones para la restauración ecológica de praderas de pastos marinos

Antes de iniciar cualquier plan de restauración de praderas de pastos marinos es fundamental impedir la disminución de estas. Los planes de conservación deben identificar y resolver problemas a escalas que permitan la interconectividad entre los ecosistemas costeros y los mecanismos que afectan a las praderas y producen su disminución. Una vez cumplido esto se evaluará la capacidad de recuperación natural de las praderas (Orth *et al.* 2006). Es importante mantener sitios de referencia prístinos para el estudio científico a través de acciones como el cierre de áreas al tránsito de embarcaciones motorizadas, lo cual también permitirá el éxito de programas de restauración sin riesgos de impacto adicionales.

Antes de emprender cualquier acción de restauración deben determinarse al menos los siguientes parámetros del sitio a ser restaurado: historia de la pradera (composición de especies, causas de pérdida), exposición al aire, olas y corrientes; tipo de sustrato y alta presencia sedimentos orgánicos; tasa de sedimentación, presencia de disturbios por animales; requerimientos de personal y cronogramas con presupuestos.

Las acciones para la restauración de las praderas de pastos marinos se exponen y resumen en la figura 18. Los métodos de plantación clasificados por Fonseca *et al.* (2002) comprenden: métodos libres de sedimentos, métodos de pastos marinos con sedimentos, siembra de semillas y estirpes cultivadas en laboratorio. La implementación de estos métodos depende de factores como la extensión del área en proceso de restauración y su distancia con respecto a praderas donantes, naturaleza del sustrato, dificultades de transporte, costos e impactos.



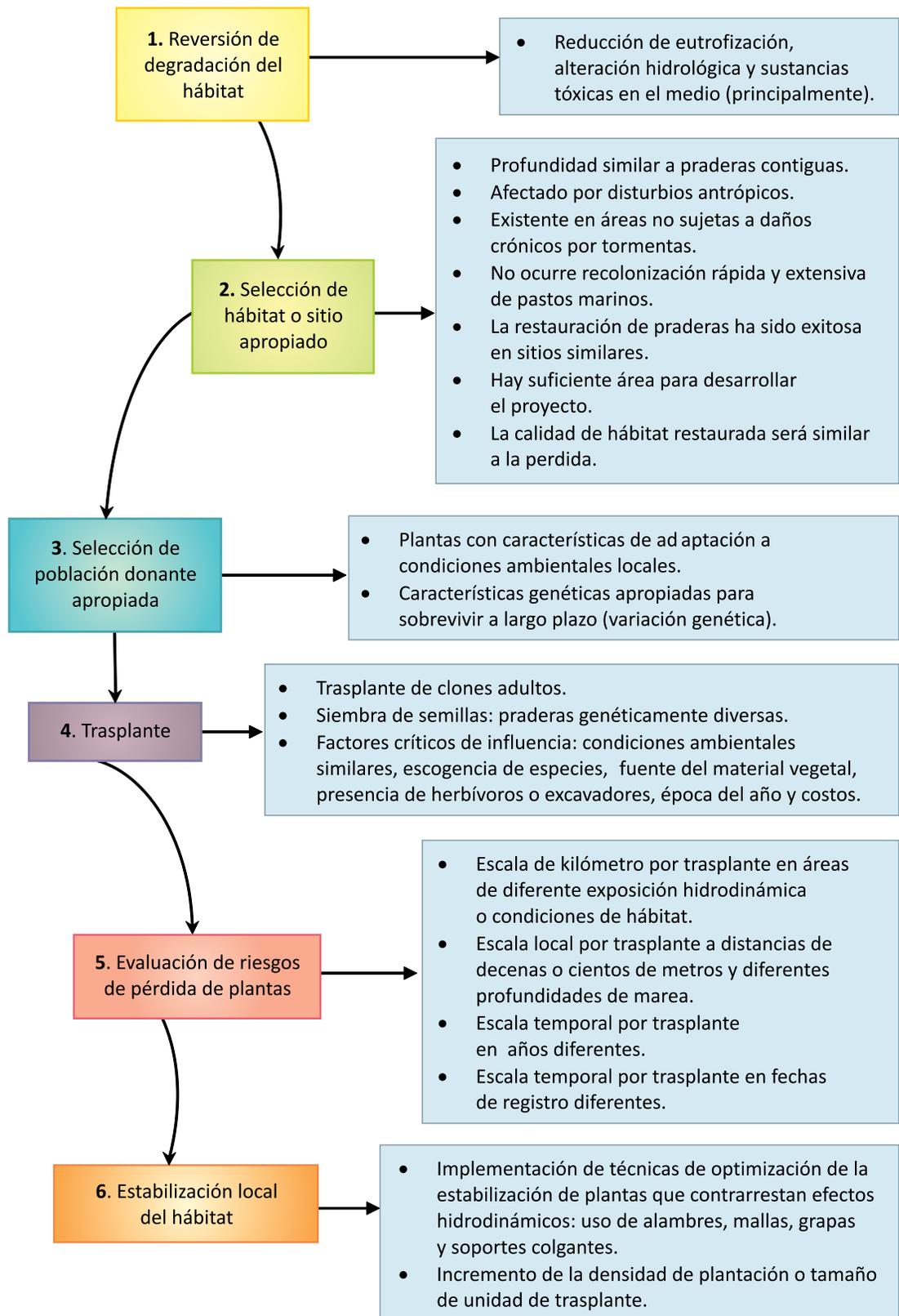


Figura 18. Pasos para la restauración de de pastos marinos en la fase experimental (van Katwijk *et al.* 2009).

Técnicas

En los métodos libres de sedimento las plantas son extraídas con pala, el sedimento es sacudido de los tallos y rizomas, y se mantienen en tanques con agua de mar o jaulas flotantes. Es recomendable usar al menos un retoño apical por unidad de trasplante. Las plantas se colectan y trasplantan el mismo día, por lo cual deben mantenerse en las mismas condiciones de temperatura y salinidad mientras se trasplantan. El trasplante puede ser directo o a través del uso de dispositivos como anillos, varas y clavos.

En los métodos con sedimentos el método de césped (*sod, turf*) consiste en trasplantar una pala llena de pasto marino con sedimentos y rizomas intactos y aunque es el más fácil representa la mayor inhibición de la recuperación en la pradera donante. El método de taco (*plug*) utiliza tubos como dispositivos para extraer las plantas con el sedimento y rizomas intactos. Los tacos o bloques son colocados directamente luego de la apertura de un hoyo para recibir el contenido del tubo.

La siembra de semillas es un método aplicado en zonas de baja energía donde las semillas pueden establecerse y germinar y prosperar con pocos predadores. Con este método se desarrollan experimentos para facilitar el hundimiento e incrustación de semillas en mallas de material biodegradable para incrementar su densidad en un área.

El desarrollo de estirpes en laboratorio involucra la cría y crecimiento de pastos marinos partiendo de fragmentos de plantas. Es aplicable cuando se requieren grandes cantidades de unidades en áreas extensas y además puede proveer plantas genéticamente variables y resistentes a enfermedades. Es favorable en cuanto que evita mayor daño, eliminación o reducción de pastos en las praderas donantes.

Monitoreo y evaluación

La toma de datos para el monitoreo debe realizarse por cuatro años después del trasplante. Fonseca *et al.* (2002) sugieren un calendario como el siguiente señalando que los trasplantes originales deben monitorearse por 3 años y las plantaciones potenciales de reparación (desde el año 2) por 3 años:

Año 1: días 60, 180, 365.

Año 2 a 4: días 180 y 365.

Los atributos o parámetros de medición en el caso de las praderas de pastos marinos son los siguientes:

- Número de ápices
- Supervivencia de unidades trasplantadas
- Densidad del tallo
- Cobertura areal

Es importante tomar registros de video en transectos de 100 m a lo largo de porciones de praderas seleccionadas al azar para documentar de forma visual la progresión de la cobertura a través del tiempo. Del monitoreo dependerá la toma de decisiones para optimizar la eficiencia de los recursos y la reducción de costos en futuros proyectos de restauración.



Literatura citada

- Díaz, J. M., L. M. Barrios & D. I. Gómez. 2003. Las praderas de pastos marinos en Colombia: Estructura y distribución de un ecosistema estratégico. INVERMAR - Serie Publicaciones Especiales No. 10. Santa Marta.
- Fonseca, M. S., W. J. Kenworthy, B. E. Julius, S. Shutler & S. Fluke. Seagrasses. pp. 149-170. En: M. R. Perrow y J. Davy (Eds.). 2002. Handbook of Ecological Restoration, Vol. 2. Cambridge University Press, New York.
- Lewis III, R. R. The Restoration and Creation of Seagrass Meadows in the Southeast United States. En: Durako, J. M., R. C. Phillips & R. R. Lewis III. (Eds.). 1987. Florida Marine Research Publications Number 42. Proceedings of the Symposium on Subtropical-Tropical Seagrasses of the Southeastern United States. Florida Department of Natural Resources Bureau of Marine Research. St. Petersburg, Florida, USA.
- Hemminga, M. A. & C. M. Duarte. 2000. Seagrass Ecology. Cambridge University Press. UK.
- Hogart, P. J. 2007. The Biology of Mangroves and Seagrasses. Oxford University Press. New York.
- Mc Roy, C. P. 1983. Nutrients Cycles in Caribbean Seagrass Ecosystem. UNESCO Reports in Marine Science 23: 69-79.
- Marquez, G. 1996. Biodiversidad marina: aproximación con referencia al Caribe. pp. 67-102. En: Ecosistemas estratégicos y otros estudios de ecología ambiental. Fondo FEN Colombia. Bogotá.
- Morris, L. J. & D. A. Tomasko (Eds.) 1993. Proceedings and conclusions of workshops of submerged aquatic vegetation and photosynthetically active radiation.. Especial publication SJ93-SP13 St. Jones River Water Management District, Palatka Florida.
- Orth, R. J., M. C. Harwell & G. J. Inglis. Cap. 5. Ecology of Seagrass Seeds and Dispersal Strategies. En: Larkum, A. W. D., R. J. Orth y C. M. Duarte. 2006. Seagrasses: Biology, Ecology and Conservation. Springer. Netherlands.
- South Florida Natural Resources Center. 2008. Patterns of Propeller Scarring of Seagrass in Florida Bay: Associations with Physical and Visitor Use Factors and Implications for Natural Resource Management. Resource Evaluation Report. SFNRC Technical Series 2008:1.
- van Katwijk, M. M., A. R. Bos, V. N. de Jonge, L. S. A. M. Hanssen, D. C. R. Hermus & D. J. de Jong. 2009. Guidelines for seagrass restoration: importance of hábitat selection and donor population, spreading of risks, and ecosystem engineering effects. Marine Pollution Bulletin 58: 179-188. <http://www.seagrassrestorationnow.com/publications.html>.





Fotografías

Orlando Vargas Ríos

4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 16, 18, 19,
21, 22, 23, 24, 25, 26, 28, 29, 30, 31, 32, 33,
35, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47,
49, 50, 52, 53, 54, 55, 58, 59, 60, 61, 62, 64,
67, 69, 70, 71, 72, 73, 75, 76, 77, 78, 79, 81,
82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 90, 91, 92, 93, 94,
95, 96, 97, 98, 100, 101, 102, 103, 104, 106,
107, 108, 109, 112, 113, 114, 115, 116, 117

Pilar Gómez Ruíz

48, 66, 118, 119, 120

Sven Zea

121, 122, 124, 125, 126, 127, 129, 130

Sandra Paola Reyes B.

57, 63, 65, 68, 105, 111, 131

Este libro se terminó de editar
en la ciudad de Bogotá en octubre de 2012.

GRE UNAL
Grupo de Restauración Ecológica



Libertad y Orden

**Ministerio de Ambiente
y Desarrollo Sostenible**

República de Colombia



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

SEDE BOGOTÁ

FACULTAD DE CIENCIAS

DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA

GRUPO DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA



ACCEFYN