

Figura 26. Instalación de cuadrantes para el monitoreo permanente de la regeneración (1 m^2). La persona que registra los datos deberá hacer un esquema tipo plano cartesiano para ubicar la vegetación monitoreada. Así mismo se estima el porcentaje de cobertura por especie de acuerdo con el número de cuadros que ocupen en la cuadrícula de $10 \times 10 \text{ cm}$.

Altura (m): con un flexómetro se toma la altura de cada individuo, desde la base hasta la terminación de la rama más apical, a los individuos con alturas superiores a 3 m se les estima la altura con la ayuda de una vara graduada a 1,5 m, o utilizando un hipsómetro (Figura 29).

Identificación taxonómica y origen de las especies: los individuos inventariados en campo se registran con el nombre común, suministrado por conocedores locales, así como los nombres científicos reconocidos por el equipo técnico y los auxiliares de campo. Las especies que no logran ser determinadas con nombres científicos deben



Figura 27. Medición del diámetro del tallo. Este se realiza en el área de marcación con pintura.

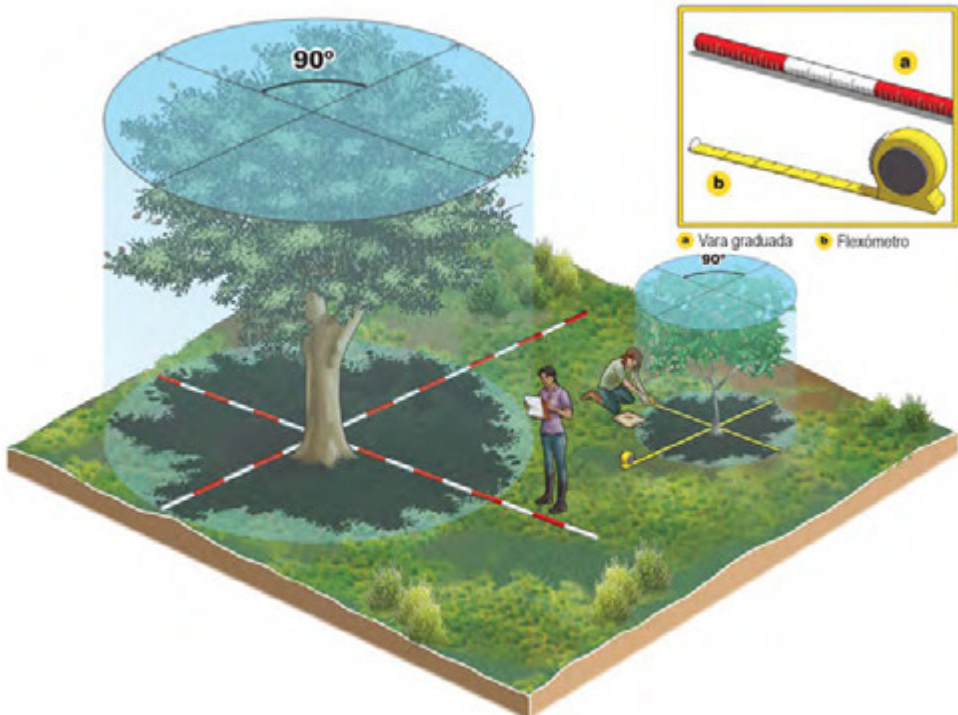


Figura 28. Medición del diámetro de copa. Posicionar las varas graduadas en los extremos de proyección de la copa.

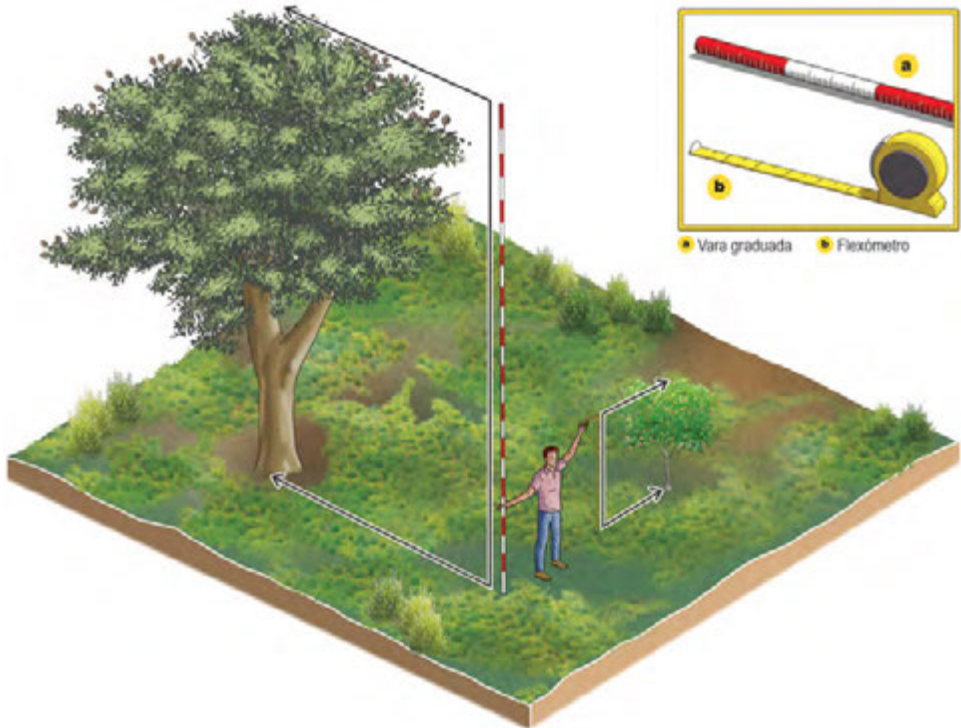


Figura 29. Medición de la altura.

ser colectadas para su posterior identificación con la ayuda de colecciones físicas o en línea de herbarios virtuales (e.g. Herbario Colombiano: <http://www.biovirtual.unal.edu.co/ICN/>; Herbario Forestal de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas: <http://herbario.udistrital.edu.co/herbario/>). Es importante seguir un único sistema clasificación taxonómica, se recomienda APG III (Angiosperm Phylogeny Group; *Haston et al.* 2009; *Stevens* 2010) para lo cual se deben actualizar y homologar los nombres científicos y las abreviaturas de los autores con la ayuda de bases de datos académicas (W3-Tropicos: <http://mobot.mobot.org/>, The International Plant Names Index: <http://www.ipni.org/> y The Plant List: <http://www.theplantlist.org/>), siguiendo las recomendaciones de nomenclatura de autores realizada por *Brummitt y Powell* (1992).

Fenología: se incluye en la base de datos información sobre la presencia de estructuras reproductivas (e.i. flores, frutos, brácteas) de los individuos registrados en campo, para cada monitoreo, así como la fecha de ocurrencia.

Origen: finalmente con la ayuda de literatura especializada se debe incorporar en la base de datos información asociada con el origen de las especies en dos categorías: nativa e introducida.

Espacialización de los individuos: teniendo en cuenta que el error de georeferenciación del GPS es de ± 3 m en relación al punto capturado, el georeferenciar cada individuo vegetal inventariado incurriría en la propagación de este error, una vez por cada individuo. Por lo tanto, con el fin de mantener constante esta variación, cada individuo

se debe especializar con coordenadas x, y en un plot (Figura 30) coordenado desde el punto de referencia central (ensayos circulares), vértices (ensayos regulares) o puntos de amarre (transectos). Posteriormente, estas coordenadas (x, y) se transformaron a las coordenadas reales con base en los puntos geo-referenciados en campo.

Regeneración: siguiendo la metodología propuesta por Barrera *et al.* (2010), la regeneración o vegetación asociada en los diferentes ensayos se debe registrar tomando la cobertura ocupada por las morfoespecies en 100 cuadrantes de 10 x 10 cm (cuadrícula de 100 x 100 cm). Así, la estimación de la cobertura se basa en la proporción de puntos (cuadrantes) en los que la morfoespecie se presenta, adicionalmente en cada cuadrante (1 m²) se registra la altura promedio de cada una.

Criterios e indicadores para el monitoreo de la vegetación

En la mayoría de los casos, las acciones de restauración son desarrolladas bajo escalas locales de planificación, a nivel de predio, donde las condiciones de disturbio son similares, mientras que las actividades de restauración son variadas (Barrera *et al.* 2010). Por ejemplo, en una cantera que ha sido aprovechada durante décadas se encuentra una pérdida total de la capa orgánica del suelo, en esta área se destinan

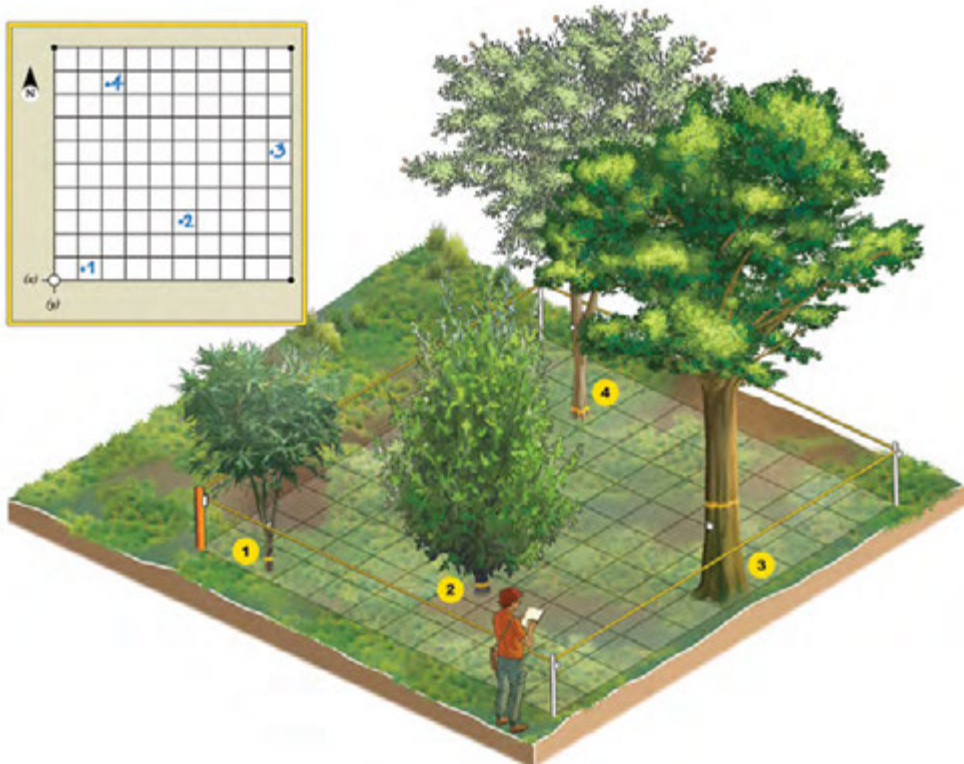


Figura 30. Mapeo o espacialización de los individuos.

actividades de rehabilitación en zonas de carcavamiento -aplicación de biomantos, zonas con pérdida de estrato orgánico del suelo - aplicación de biosólidos, áreas de invasión- corta, enmienda y siembra de especies nativas (Barrera *et al.* 2010). Sobre esta escala Vargas (2007) y Riberio *et al.* (2011) recomiendan registrar de manera permanente en el espacio y por periodos consecutivos de tiempo, los datos para el análisis de indicadores que aporten información sobre el efecto de las acciones de restauración y la trayectoria ecológica de determinada área, desde los criterios de estructura, composición y función sugeridos por Noss (1990) para evaluar la biodiversidad a nivel de comunidades y poblaciones. En tal sentido, es importante planificar desde la instalación de una plataforma de monitoreo las variables de toma directa en campo, en cada uno de los criterios de estudio y la posible interacción de estas a través de indicadores y su correspondiente interacción con los otros criterios (Figura 31), así se pueden optimizar costos de monitoreo y plantear desde un comienzo las pautas a seguir si un proceso de restauración toma determinada trayectoria.

Antes de iniciar con la descripción de indiciadores para monitorear la vegetación, es importante considerar la naturaleza de los datos que son posibles capturar de

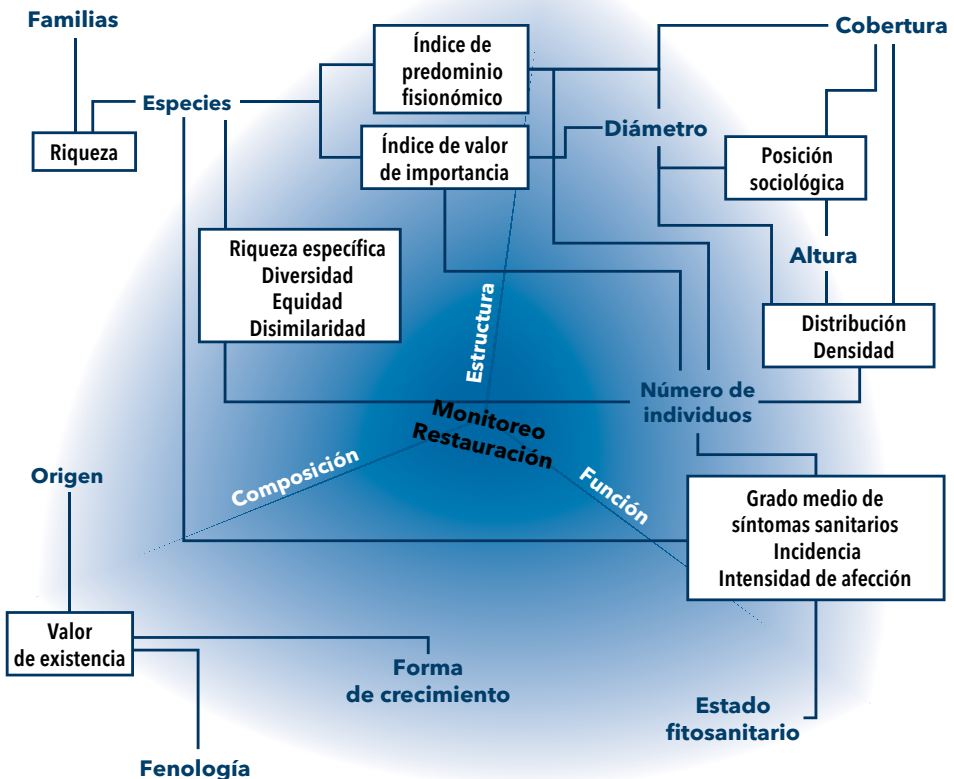


Figura 31. Variables de medición (en verde) para los diferentes criterios de estudio (en blanco) y la interacción entre variables y criterios (indicadores en negro) (elaboración propia).

forma directa para cada criterio (estructura, composición y función) los cuales son de carácter cualitativo y cuantitativo (Tabla 17). Como mencionan Vallejo *et al.* (2005), la selección de los cuantificadores a medir depende del objetivo de estudio, adicional al nivel de monitoreo que se plantea realizar periodo a periodo. Sin embargo, es importante considerar que existe una serie mínima de cuantificadores que son de fácil medición en cualquier plataforma de monitoreo y que generan información detallada y de calidad para evaluar rápidamente el efecto de las acciones de restauración en el corto plazo, y que a través de análisis más detallados (construcción de indicadores) y posteriores remediciones en tiempo y espacio pueden derivar análisis a mediano y largo plazo (Tabla 17).

De acuerdo con Krebs (1989) y Clifford y Taylor (2008) existen dos tipos de cuantificadores cualitativos y continuos, las cuales tienen distintas escalas de medición nominal, ordinal o derivadas (índices, proporciones, razón). Dependiendo el tipo de variable y su escala se tendrán ventajas frente a la medición y al análisis de la información. Por ejemplo, una variable cualitativa de escala ordinal es fácil de medir, sin embargo, tiene limitaciones frente a los análisis ya que a partir de esta solo se podrán construir análisis descriptivos (Tabla 18).

En los cuantificadores cualitativos la escala nominal es un tipo muy elemental que registra información de la variable sin una organización o relación entre individuos. En el monitoreo se asocia por lo general al tipo de especies que ocurren en un área dada, las formas de vida o el origen. Es fácil de medir al interior de una plataforma de monitoreo, pero los análisis se reducen por lo general a tablas y gráficos de frecuencia. La escala ordinal se presenta cuando existen datos cualitativos que tienen un orden lógico pero no tiene un sentido numérico; es decir, en donde no se puede realizar adiciones o sustracciones. Son fáciles de medir a partir de metodologías de plataformas de monitoreo permanente y los datos obtenidos, al igual que la escala nominal, solo pueden ser analizados de manera descriptiva.

En los cuantificadores cuantitativos, la escala de intervalo hace parte de una escala ordinal, en la que las distancias de los datos cuentan con un sentido lógico, generalmente tienen asociada una unidad de medida, pero no cuentan con un punto cero real, razón por la cual el nivel de referencia es fijado arbitrariamente. En tal sentido, tiene limitaciones en la interpretación de los datos para evaluar magnitudes reales de los elementos medidos. La escala de razón por su parte es reconocida por representar el nivel más potente de medición y cuenta con un punto cero verdadero que permite hacer comparaciones. Es el tipo de escala común en los monitoreos permanentes, se asocia a cuantificadores como diámetros, alturas y coberturas en

Tabla 18. Resumen de las escalas de medición de acuerdo con las descripciones de Clifford y Taylor (2008).

Escala	Diferencia orden	Diferencia distancia	Diferencia origen	Ejemplo
Nominal	No	No	No	Especie
Ordinal	Sí	No	No	Abundancia (abundante, escaso, raro)
Intervalo	Sí	Sí	Sí	Altitud, localización geográfica
Razón	Sí	Sí	Sí	Diámetro, altura, cobertura

la evaluación del componente estructural (desarrollo de las plantas) a través del tiempo. A nivel de análisis, permite la comparación entre datos y correlaciones con mayor soporte estadístico.

Teniendo en cuenta que existen unos cuantificadores (variables) de toma directa en campo que son de fácil medición y permiten minimizar costos en la implementación de una estrategia de monitoreo permanente a los procesos de restauración, en la Tabla 19 se presenta una serie de indicadores que pueden ser construidos *a posteriori* tan solo con el establecimiento de la plataforma de monitoreo permanente y la medición en diferentes periodos de tiempo de los cuantificadores descritas en la Tabla 17.

Tabla 19. Indicadores sugeridos para el seguimiento de los procesos de restauración en el espacio y tiempo a través del monitoreo permanente en el corto, mediano y largo plazo.

Criterios	Indicadores		Cuantificadores	Fuente	Plazo		
	Indicador	Análisis			C	M	L
Composición	Índice de riqueza de especies	Familias - especies	Riqueza (R)	Moreno 2001	x		
Composición - estructura	Índice de riqueza específica	Familias - especies - número de individuos	Menhinick (M)	Moreno 2001	x	x	x
Composición - estructura	Índice de diversidad y abundancia proporcional (equidad)	Familias - especies - número de individuos	Shannon-Wiener (H') Pielou (J')	Moreno 2001	x	x	x
Composición - estructura	Índice de diversidad y abundancia proporcional (dominancia)	Familias - especies - número de individuos	Simpson (D)	Moreno 2001	x	x	x
Composición	Índice de disimilaridad	Familias - especies	Bray-Curtis (D_{jk})	Ramírez 1999, Ochoa 2005	x	x	x
Composición - estructura	Índice de Valor de Importancia de las especies	Especies - número de individuos - diámetro - localización espacial	IVI relativo (abundancia relativa, frecuencia relativa y dominancia relativa)	Rangel-Ch y Velázquez 1997	x	x	x
Composición - estructura	Índice de predominio fisionómico	Número de individuos - diámetro - cobertura	IPF (Área basal relativa, cobertura relativa, densidad relativa)	Rangel-Ch y Velázquez 1997	x	x	x

Criterios	Indicadores		Cuantificadores	Fuente	Plazo		
	Indicador	Análisis			C	M	L
Estructura	Índice de densidad	Número de individuos - Localización espacial	Individuos por área	Rangel-Ch y Velázquez 1997	x	x	
Estructura	Tasas de mortalidad y reclutamiento	Número de Individuos	T_M, T_R	Swaine y Lieberman 1987, Phillips <i>et al.</i> 1994, Condit <i>et al.</i> 1995		x	x
Estructura	Relación de desarrollo del tallo	Diámetro - número de individuos	ICA (diámetro)	Contreras 1998		x	x
Estructura	Relación de crecimiento vertical	Altura - número de Individuos	ICA (altura)	Contreras 1998		x	
Estructura	Factor de ocupación del espacio	Cobertura de copa - número de individuos	ICA (cobertura)	Contreras 1998		x	
Estructura	Indicador de posición sociológica	Diámetro - altura - cobertura de copa - número de Individuos	Distribución por clases diamétricas, alturas y coberturas	Rangel-Ch y Velázquez 1997	x	x	x
Estructura - función	Indicador de adaptación de la vegetación	Número de individuos - estado fitosanitario	Grado medio de síntomas sanitarios o afecciones físicas (GM) Incidencia (INC) Intensidad o severidad (I)	Parra <i>et al.</i> 1999, Couto y Valverde 2007, Quirós y Scorza 2011		x	
Composición - función	Valor de existencia	Especies - origen	Nativa - introducida	Casanoves <i>et al.</i> 2011	x	x	
Función	Índice de adelanto floral		Maduración fenológica				x

Monitoreo de la vegetación y manejo adaptativo

Un aspecto fundamental que debe ser incorporado desde la fase de planeación del proceso de restauración ecológica es el manejo adaptativo, el cual parte del reconocimiento de la incertidumbre inherente en el manejo de recursos biológicos. Se centra principalmente en adquirir nuevo conocimiento a partir de las experiencias, el monitoreo, la investigación y la integración de esta información en el diseño de nuevas prácticas de manejo mejoradas (Lindermayer y Franklin 2002). Aplicado a la restauración ecológica, se basa en la colección de nuevos datos que permitan construir puentes sobre los vacíos que actualmente existen en el conocimiento acerca del funcionamiento de los ecosistemas y especialmente aquellos atributos que les permiten restablecerse después de episodios de disturbio.

La implementación del manejo adaptativo puede involucrar el cambio de acciones de manejo en respuesta al sistema de monitoreo para maximizar la eficacia de la restauración o lograr un estado ecológico deseado (Gunderson y Holling 2002).

Los pasos básicos para el manejo adaptativo incluyen la planeación de un programa o proyecto de restauración que incorpore el manejo adaptativo, el diseño de dicho proyecto, su implementación, operación, monitoreo, ajuste de las medidas de restauración de acuerdo con los resultados del monitoreo y nuevamente monitoreo de todo el proceso de restauración. A partir de la evaluación, el manejo adaptativo puede tomar tres caminos: 1) la continuidad en la implementación y operación del proyecto (el manejo adaptativo no revela fallas ni resultados adversos); 2) el ajuste necesario de metas y objetivos y la continuidad del proyecto (el manejo adaptativo revela alguna falla o resultado adverso); o 3) el ajuste y reformulación de la planeación del proyecto (el manejo adaptativo revela resultados adversos que afectan considerablemente la eficacia de las acciones de restauración implementadas). Este ciclo es iterativo, de manera que el monitoreo y la evaluación se encaminan a establecer el éxito de la restauración en el tiempo y si se han producido los resultados deseados en el proyecto, de manera que pueda considerarse su finalización. Los proyectos de restauración a escala local y de parcela pueden seguir estos mismos pasos para el manejo adaptativo. Particularmente, el manejo adaptativo de la vegetación significa la implementación de todas las acciones que contribuyan a garantizar la dispersión, establecimiento y permanencia de las plantas durante todo el proceso de restauración del ecosistema intervenido. De acuerdo con Pérez (2005), con el manejo adaptativo se mejoran las prácticas de manejo conforme se adquiere mayor conocimiento de los ecosistemas a través del monitoreo.

Davis *et al.* (2001) sostienen que el proceso de manejo adaptativo incluye reconocer las incertidumbres, desarrollar hipótesis alrededor de los resultados deseados y estructurar las acciones para comprobar, monitorear y evaluar dichas ideas. Sin embargo el reconocimiento y el manejo de la incertidumbre que existe al implementar el manejo adaptativo hace que muchos actores institucionales, tomadores de decisión y comunidades encuentren difícil aceptar las consecuencias prácticas de dicho enfoque porque muchas veces están esperando certeza y precisión en los resultados obtenidos. De acuerdo a los lineamientos propuestos OIMT y UICN (2005), los componentes clave del manejo adaptativo para un proyecto de restauración deberían ser:

- La comprensión del contexto social y biofísico en múltiples niveles: incluye la identificación de las partes interesadas y aborda sus múltiples intereses que en algunos casos pueden ser contradictorios.

- La negociación de los objetivos y metas para los diferentes niveles: este proceso inevitablemente requerirá intercambios recíprocos con todos los actores y el establecimiento de compromisos para generar resultados aceptables desde el punto de vista social y sostenible a largo plazo.
- Aplicación del proceso de aprendizaje activo (planificar, actuar, observar y reflexionar): esto facilita la ejecución. Este proceso a veces se conoce como "investigación activa" para subrayar la importancia de investigar o explorar enfoques nuevos o innovadores para abordar un problema.
- El control y evaluación de los impactos del proceso de restauración ecológica: un aspecto esencial del manejo adaptativo es un método de control y evaluación constante del impacto del proceso, porque permite a las partes interesadas desarrollar su capital social a través del intercambio de experiencias que se desprenden de tales evaluaciones. Así mismo, el control y evaluación permitirá ajustar las estrategias de restauración a medida que se vayan conociendo y evaluando los resultados parciales del monitoreo.

En la Tabla 20 se presenta un ejemplo de las posibles acciones de manejo adaptativo con base en los objetivos de restauración y del monitoreo de la vegetación, definidos a corto, mediano y largo plazo, en un área degradada por actividades de minería a cielo abierto (canteras). Estas acciones corresponden a implementaciones realizadas en proyectos de restauración cuya escala espacial es fina. Sin embargo, a partir del enfoque de manejo adaptativo, las conclusiones derivadas del proceso de monitoreo a esta escala pueden ser útiles en proyectos cuya escala espacial sea superior (ecosistema o paisaje). El monitoreo y manejo adaptativo permiten adquirir conocimiento que posteriormente sirve a la planificación de la restauración en proyectos con otra dimensión espacial. En este caso se comienza un nuevo ciclo de monitoreo y de manejo adaptativo con respecto a la escala definida.

Tabla 20. Posibles acciones de manejo adaptativo en el corto, largo y mediano plazo con base en objetivos de restauración y monitoreo de la vegetación a escala de parcela que podrían aplicarse a una escala espacial superior en áreas degradadas por minería a cielo abierto.

Plazo	Objetivo restauración	Objetivo monitoreo	Acciones de manejo adaptativo
Corto	Generar cobertura vegetal sobre el suelo	Evaluar el desarrollo de cobertura herbácea sobre el suelo	1. Introducción de suelo y bancos de semillas externos (biomasa) 2. Control de erosión con estrategias físicas complementarias (trampas de suelo)
Mediano	Generar núcleos de vegetación arbustiva	Evaluar el desarrollo de parches de vegetación ensamblados con especies de sucesión temprana	1. Reemplazo de especies dominantes. 2. Cambio en las densidades de siembra o trasplante 3. Remoción de especies invasoras (reducción de competencia por exóticas)
Largo	Enriquecer núcleos de vegetación con especies seleccionadas	Evaluar el crecimiento y desarrollo de plantas de sucesión tardía	1. Trasplante de ensamblajes diferentes de especies 2. Entresacas (especies dominantes) 3. Control fitosanitario

Consideraciones finales para el monitoreo en proyectos de restauración ecológica desde la vegetación

El monitoreo y manejo adaptativo no deben olvidar el contexto social y de paisaje. Pueden darse casos en los cuales un proyecto de restauración integre las diferentes escalas desde sus inicios y contemple objetivos en todas las dimensiones. El contexto del paisaje es importante porque permite intuir la dinámica ecológica de un ecosistema, el potencial de regeneración y las barreras a la restauración. En el caso del contexto social, puede tomarse como otra de las escalas y el manejo adaptativo integrará en el tiempo el conocimiento tradicional sobre la vegetación y su aplicabilidad para conducir los proyectos de restauración hacia el logro de los objetivos. No obstante, la incertidumbre sobre los resultados y el éxito de los proyectos de restauración puede ser una de las barreras de tipo social que también requieran de manejo adaptativo. No debe olvidarse tampoco que el monitoreo de la restauración debe responder a diferentes necesidades de información y que aunque se trabajen aspectos de vegetación en el monitoreo, la restauración está ligada y sostenida por aspectos socioeconómicos en un proyecto

De acuerdo con Castillo (2005), la intervención comunicativa entendida como la dimensión social y comunitaria de un proceso de restauración ecológica, es complementaria a la intervención técnica. En la fase de monitoreo es posible vincular a las comunidades locales a través de un proceso de aprendizaje colectivo a través de la educación ambiental en el que se intercambien puntos y conocimientos con el equipo técnico y se realice un seguimiento efectivo a las estrategias de restauración. La gestión de información entre los diferentes actores retroalimenta el proceso y garantiza la continuidad de la interacción entre los mismos (enfoque participativo) y su integración incluso después de finalizadas las acciones de intervención sobre el ecosistema. El producto conjunto de la intervención técnica y comunicativa es el aprendizaje en red para la conservación de los ecosistemas, el aprovechamiento sostenible y el mejoramiento de la relación de la sociedad con la naturaleza. Los actores adquieren conocimientos sobre los ecosistemas y la capacidad de manejo adaptativo de los mismos.



LAS HORMIGAS EN EL MONITOREO DE LA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA

Elizabeth Jiménez-Carmona, Yamileth Domínguez-Haydar,
Natalia Henao, Gustavo Zabala, Selene Escobar, Inge
Armbrecht y Patricia Chacón de Ulloa

Las hormigas (*Hymenoptera: Formicidae*) constituyen el grupo de insectos sociales más diverso y exitoso, con más de 12.500 especies, 290 géneros y 21 subfamilias (Ward 2007). Características como su eusocialidad, diversidad taxonómica y funcional, abundancia local y regional, fidelidad ecológica, sensibilidad a cambios ambientales, estabilidad temporal de sus colonias, ubicuidad y facilidad de colecta las han posicionado entre los artrópodos mejor estudiados (Hölldobler y Wilson 1990, Alonso *et al.* 2000). Actualmente se cuenta con un avanzado grado de resolución taxonómica (Bolton 1994, Fernández y Palacio 2003, Fernández y Arias-Penna 2008) y con el desarrollo de métodos estandarizados para su muestreo, consolidándolo como grupo focal en bioindicación (Agosti 2000, Andersen y Majer 2004, Andersen 2010) y en estudios de conservación de la biodiversidad e iniciativas de monitoreo (Arcila y Lozano-Zambrano 2003).

En el marco de la restauración ecológica, el monitoreo de las hormigas debe concebirse como una herramienta complementaria para evaluar y valorar el éxito de las intervenciones a través del tiempo. En este contexto, las hormigas presentan atributos deseables dado que pertenecen a la fauna edáfica más abundante y conspicua, pueden considerarse organismos sedentarios que permanecen durante años en un mismo nido en estrecha relación con las condiciones microambientales del hábitat y son altamente afectadas por los cambios antropogénicos en los usos del suelo (Roth *et al.* 1994; Armbrecht *et al.* 2005). Las hormigas remueven constantemente partículas del sustrato donde habitan, favoreciendo el flujo de nutrientes y su mineralización (Wagner *et al.* 2004); además, contribuyen a mejorar su textura, afectan el pH (Wilson 2000; Lafleur *et al.* 2005) y promueven la actividad microbiana (Dauber y Wolters 2000). Participan activamente en la dispersión de semillas, por lo que son consideradas como agentes importantes en la recuperación de zonas degradadas por la explotación minera, así como en la evaluación de los procesos de restauración (Majer *et al.* 1983, Majer 1992, Majer y Kock 1992, Andersen y Sparling 1997, Maeto y Sato 2004, Ottonetti *et al.* 2006, Escobar *et al.* 2007, Domínguez-Haydar y Armbrecht 2011).

El uso de las hormigas como indicadores ecológicos y ambientales en procesos de restauración y rehabilitación ecológica es un tópico reciente en el país, con un gran potencial de cara a los desafíos en conservación impuestos por el auge y crecimiento

de la actividad minera y energética, así como por la agresiva modificación del paisaje rural para la adecuación expansiva de pasturas ganaderas, cultivos y centros urbanos.

En este capítulo se provee un protocolo general de monitoreo de la mirmecofauna para optimizar recursos y extraer información confiable, de manera rápida, sencilla y replicable, además se presentan varios estudios de caso evidenciando la utilidad de las poblaciones de hormigas como herramienta complementaria para la evaluación de las iniciativas de restauración y rehabilitación. Finalmente se proponen algunas especies con un importante potencial bioindicador, como elementos claves para los análisis de la información e interpretación de resultados.

Estudios de la fauna de hormigas en paisajes rurales colombianos como línea base

Los estudios de paisaje que involucran la caracterización de la diversidad de hormigas en diferentes tipos de hábitats o elementos del paisaje, proveen información de línea base fundamental para su utilización en el seguimiento de iniciativas de restauración. Así es posible conocer la composición de los ensamblajes en elementos que eventualmente pueden definirse como ecosistemas de referencia (los bosques o el tipo de vegetación nativa del área que se desea restaurar) y seleccionar especies para monitorear y evaluar el éxito de los procesos de restauración. Por otro lado, las especies asociadas a los elementos del paisaje más disturbados pueden representar indicadores negativos de estos procesos en caso de estar presentes y ser abundantes en las áreas restauradas. Es así como el ensamblaje de hormigas, su composición, abundancia y función han sido criterios usados en muchos estudios que permiten comparar diferentes tipos de hábitat y establecer su estado de conservación con respecto al ecosistema de referencia (Tabla 21). A escala de paisaje, las hormigas nos ayudan a detectar patrones generales relacionados con los cambios en los usos del suelo, la diversificación de los sistemas productivos o el impacto del manejo forestal. Resultados asociados a estos cambios se resumen en el Anexo 4, en el que se presenta una tabla con los patrones más relevantes de riqueza y pérdida de especies en diferentes elementos del paisaje.

Algunos estudios en la región andina han implementado el protocolo de caracterización de hormigas del suelo propuesto por el Instituto Humboldt (IAvH) en el año 2007 (Mendoza *et al.* 2007, Arcila *et al.* 2008, Chaves *et al.* 2008, García-Cárdenas *et al.* 2008, Jiménez *et al.* 2008a, Pereira 2008, Abadía *et al.* 2010, Herrera 2012, Jiménez-Carmona *et al.* en prep). Los resultados evidenciaron eficiencias de muestreo superiores al 70 % y una cobertura de la muestra según Chao y Jost 2012 superiores al 80 %, demostrando su efectividad para caracterizar la diversidad de hormigas en diferentes tipos de paisajes. El protocolo consiste en transectos (150 m de largo por 10 m de ancho) sobre los cuales se disponen, en los primeros y en los últimos 50 m, estaciones de muestreo cada 10 m (Figura 32). En cada estación se utilizan a lo ancho del transecto dos métodos de colecta que se alternan entre estaciones contiguas: una trampa de caída cuyo tiempo de acción es de 24 horas (Figura 33) y extracción de 1 m² de hojarasca que debe ser cernida en el lugar y posteriormente procesada en sacos mini Winkler durante 48 horas (Figura 34) (Mendoza *et al.* 2007, Lozano-Zambrano *et al.* 2009). El número y la ubicación de los transectos en los elementos del paisaje dependen del diseño experimental, el criterio del investigador o las limitaciones logísticas.

Tabla 21. Criterios, indicadores y cuantificadores para evaluar un programa de restauración usando como grupo focal las hormigas.

Criterio		Item	Descripción
Estructura: composición y abundancia de especies en las áreas en restauración, ecosistemas de referencia y controles negativos (áreas disturbadas o transformadas). Incluye relaciones de dominancia	Indicador	Ensamblaje de especies	Conjunto de especies presentes por tipo de hábitat evaluado
	Cuantificador	Riqueza de especie	Número de especies o morfo especies presentes por tipo de hábitat evaluado
	Cuantificador	Frecuencia de captura, proporción de la abundancia, etc.	Número de veces que una especie es capturada por trampa o estación de muestreo, también puede ser el número de nidos por unidad de muestra
	Indicador	Especies indicadoras	Especies que tiene rangos estrechos de amplitud con respecto a uno o más factores ambientales y su presencia indica una condición particular o conjunto de condiciones ambientales
	Cuantificador	Proporción de especies invasoras, endémicas, asociadas a bosque, áreas abiertas o disturbadas	Abundancia de especies invasoras, endémicas, asociadas a bosque, áreas abiertas o disturbadas en los diferentes hábitats evaluados
	Indicador	Relaciones de dominancia	Interacciones competitivas entre las especies dominantes y las demás especies de hormigas
	Cuantificador	Determinar si la abundancia de esta especie se relaciona con la riqueza de otras especies de hormigas en el recurso alimenticio	Partición del recurso alimenticio y estimación de índices de habilidad competitiva
Función Ecológica. Evaluación de interacciones Hormiga/ Planta/Otros Artrópodos, para monitorear la recuperación de funciones ecológicas en el sistema en restauración	Indicador	Gremios o grupos funcionales	Especies que comparten características como: tipo de alimentación, actividad de forrajeo, microhábitat etc.
	Cuantificador	Riqueza, composición y abundancia de los gremios o grupos funcionales.	Numero de gremios o grupos funcionales, número de especies que componen cada grupo
	Indicador	Remoción secundaria de semillas por hormigas	Transporte de semillas por hormigas fuera del lugar de dispersión primaria
	Cuantificador	Especies que dispersan semillas en áreas en restauración	Número e identidad de especies de hormigas que remueven semillas
	Cuantificador	Tasas de remoción de semillas nativas mirmecócoras y no mirmecócoras	Proporción de semillas removidas en periodos de 2 a 48 horas. Identificación de las especies removidas indicando la presencia de eliosomas o arilos atrayentes, y el destino final de las semillas

Criterio		Item	Descripción
	Indicador	Depredación de artrópodos	Hormigas que cazan artrópodos como parte de su dieta
	Cuantificador	Depredación de artrópodos por hormigas especialistas y generalistas en el área en recuperación	Proporción de presas removidas en periodos de 2 a 4 horas. Identificación de las especies predatoras especialistas (i.e. Poneromorfas) y facultativas

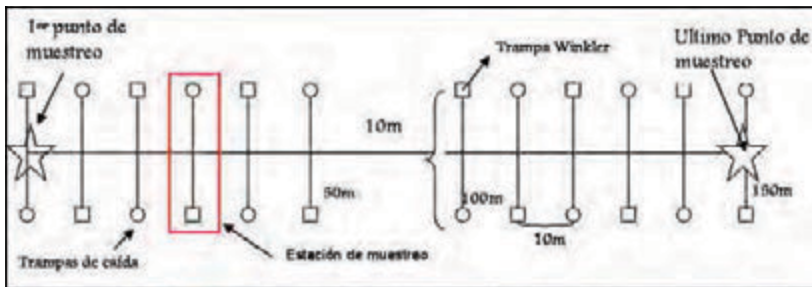


Figura 32. Arreglo espacial de las estaciones de muestreo y los métodos de captura de las hormigas del suelo (Jiménez-Carmona en prep).



Figura 33. Detalle de la instalación de una trampa de caída. a) Se cava un hoyo de 10 cm de profundidad; b) Usando doble vaso para que la trampa no se llene de tierra, se entierra el primer vaso plástico a ras de suelo (capacidad 10 a 14 onzas y de 10 cm de diámetro); c) una vez enterrado el vaso y acomodada la hojarasca alrededor, y se saca el vaso superficial y el que queda enterrado se llena hasta ¼ preferiblemente con etanol al 96 % para evitar la degradación de la muestra; d) dejar actuar por 24 horas. Las muestras se guardan en bolsas de sello hermético etiquetadas con la información de localidad, fecha, método de captura y colector. Fotografías: Elizabeth Jiménez.



Figura 34. Detalle de la extracción y cernido de la hojarasca y la instalación de un saco mini Winkler. a) se colecta 1 m² de hojarasca y se vierte en el cernidor agitándolo fuertemente para que caigan los animales y hojarasca fina en el frasco colector; b) se toma el contenido del frasco colector y lo que queda dentro del cernidor. Se guarda en una bolsa gruesa (preferiblemente de muselina) y se rotula; c) se vierte el contenido de cada bolsa dentro de unas bolsas de malla que se encuentran dentro del saco Winkler; d) el saco Winkler se debe colgar a una altura que resulte cómoda para su manipulación, preferiblemente en un lugar oscuro, seco, protegido de la lluvia, dejar por 48 horas y coleccionar los individuos que caen en el tarro colector. Las muestras se guardan en bolsas de sello hermético etiquetadas con la información de localidad, fecha, método de captura y colector. Fotografías: Elizabeth Jiménez.

En el contexto temporal, estudios como los de Domínguez-Haydar *et al.* (2008) en bosques secos del Atlántico y Jiménez *et al.* (en preparación) en bosques subandinos del Quindío han evaluado cambios en la mirmecofauna con la variación estacional, aportando información sobre su estabilidad a lo largo de las temporadas secas y lluviosas; en general, los resultados no muestran cambios significativos en la riqueza o en la composición y solo registran cambios leves en las abundancias. Para propósitos de monitoreo, con base en estos resultados, se sugiere un muestreo estandarizado anual en aras de optimizar recursos y garantizar el registro oportuno de información confiable y comparable. Según Jiménez *et al.* (datos sin publicar) los periodos de transición que se presentan con las primeras lluvias después de la época seca son propicios para realizar los muestreos dado que tienen lugar los vuelos nupciales de muchas especies y hay una gran actividad de las hormigas del suelo asociada al aumento de la humedad y el reverdecimiento de la vegetación. La utilización del protocolo del IAvH (2007), se recomienda en casos en los cuales no se cuente con información de línea base para el área en el cual se desee implementar el proceso de restauración.

En donde se disponga de buena información de línea base, se recomiendan muestreos dirigidos a coleccionar únicamente especies o grupos de especies indicadoras. Para estos casos la colecta manual de nidos o la búsqueda directa sobre el suelo y la vegetación son útiles para especies crípticas pequeñas, con hábitos de anidación que faciliten su detección (Figura 35); las trampas de caída son eficientes para coleccionar



Figura 35. Detalle de la colecta manual de nidos. a) se recogen todas las ramitas que se encuentren en 1m²; b) se revisa el interior de las ramitas; c) con ayuda de una pinza (o pincel con alcohol para hormigas pequeñas) se colecta el nido en un tubo eppendorf con alcohol al 96 %. Fotografías: Elizabeth Jiménez.



Figura 36. Detalle de la instalación de trampas cebadas con atún. Cada cebo consiste en un cuadrado de papel bond blanco de 10 x 10 cm con una pequeña cantidad de atún. a) se pueden ubicar sobre el suelo retirando un poco la vegetación o en los árboles usando una tachuela; b) se deja como mínimo 40 minutos o más dependiendo de las condiciones de humedad; c) cada cebo puede guardarse individualmente en una bolsa plástica con alcohol al 96 % y debidamente rotulada o extraer las hormigas con un pincel impregnado con alcohol y guardarlas directamente en tubo eppendorf con alcohol al 96 % debidamente rotulado. Fotografías: Elizabeth Jiménez.

hormigas epígeas que son muy activas sobre la superficie del suelo y la hojarasca (Figura 33) (Underwood y Fisher 2006) y los cebos de atún para la captura de especies generalistas y oportunistas, con estrategias de reclutamiento masivo (Figura 36) (Achury *et al.* 2008). En general, para los muestreos de hormigas se suelen usar transectos entre 100 y 200 m y con un número de estaciones entre 10 y 20, en cada estación el uso de diferentes métodos de captura combinados es recomendable ver el Anexo 5.

Especies indicadoras

En Colombia se ha explorado el potencial bioindicador de las hormigas y se ha incursionado en la búsqueda y definición de especies o grupos de especies indicadoras, tanto en diferentes estadios de sucesión (Bustos y Ulloa-Chacón 1996, Aldana y Chacón de Ulloa 1999, Estrada y Fernández 1999) como en elementos representativos de paisajes agrícolas y ganaderos (Rivera y Armbrrecht 2005, Mendoza *et al.* 2007, Chaves *et al.* 2008, Jiménez *et al.* 2008a, Abadía *et al.* 2010, Zabala *et al.* 2013).

En cuanto a las acciones de manejo en los sistemas productivos, Ramírez y Enriquez (2003), Sanabria-Blandón y Chacón de Ulloa (2011) demostraron que en áreas ganaderas donde se han implementado sistemas silvopastoriles (SSP), la riqueza de hormigas es mayor que en los sistemas con manejo intensivo. Los SSP pueden conservar entre el 92 y 61 % de la riqueza de hormigas dependiendo de la

especie arbórea que se utilice, de la densidad de árboles por hectárea y del tiempo que lleve instalado el sistema (Ramírez y Enriquez 2003, Ramírez et al. 2010, Sanabria-Blandón y Chacón de Ulloa 2011, Rivera et al. 2013).

Rivera et al. (2013) propusieron al género *Pachycondyla* como grupo indicador, el cual se correlacionó positivamente con la cobertura de dosel, desapareciendo de las pasturas sin árboles. Por otro lado, *Ectatomma ruidum* es propuesta como indicador negativo pues se asocia con la baja cobertura arbórea y menor diversidad en los sistemas ganaderos de Valle y Quindío. De este modo, un monitoreo rápido de la abundancia de estas hormigas podría ser de bajo costo y tiempo para medir el estado de avance de la restauración. Sin embargo, es de enorme importancia situarse en el contexto, pues *E. ruidum* en la costa Atlántica fue indicadora más de la recuperación de los bosques, posiblemente por las condiciones de baja humedad y altas temperaturas de la zona subxerofítica del Cerrejón (La Guajira), bajo estas condiciones la hormiga se favorece por la sombra del dosel.

Las hormigas también responden a la llegada de especies invasoras, como el caso de la hormiga loca (*Nylanderia fulva*), cuya presencia afecta negativamente la diversidad de otras hormigas (Chacón de Ulloa et al. 2000). En el bosque seco, la pequeña hormiga de fuego (*Wasmannia auropunctata*) ha sido identificada como indicadora negativa y aunque no es una especie invasora en nuestro país, en áreas altamente disturbadas llega a ser muy abundante debido a que es una excelente competidora y desplaza a otras especies (Armbrecht y Ulloa-Chacón 2003, Arcila 2007, Salguero et al. 2011, Achury et al. 2012). En el Anexo 5 se resumen los diferentes trabajos realizados en Colombia, en los cuales se han identificado especies de hormigas indicadoras de diferentes tipos de hábitats y sistemas productivos con potencial para indicar el avance y éxito de los procesos de restauración.

A continuación se presenta de manera detallada tres estudios de caso donde las hormigas han sido usadas como indicadoras para medir el avance de la restauración o rehabilitación de áreas degradadas.

Caso 1. Ocho años de monitoreo de hormigas del suelo en áreas en proceso de restauración de bosque subandino

En el paisaje rural ganadero del río Barbas (Filandia, Quindío) se realizó en el 2003 la restauración ecológica de 50 ha a partir de suelos que fueron plantaciones forestales y otros que eran pastizales, las áreas que fueron escogidas se encontraban contiguas a franjas de bosque ripario, lo cual favorece una configuración espacial que puede tener el potencial para aumentar la conectividad de 1.600 ha de bosque nativo en este paisaje.

El paisaje del río Barbas está ubicado en la vertiente occidental de la Cordillera Central, entre los municipios de Filandia y Pereira (Risaralda), entre las coordenadas 75°35'42"W-4°40'48"N y 75°39'38"W-4°42'47"N. El área se encuentra entre los 1.700 y 2.100 m.s.n.m., presenta una precipitación promedio anual de 2.000 a 3.000 mm y una temperatura promedio de 19 °C. El tipo de vegetación se caracteriza como bosque subandino, el cual cubre el 46 % del área de estudio (Rodríguez et al. 2004, Mendoza et al. 2007).

Para el muestreo de las hormigas se utilizó el protocolo de muestreo de hormigas de suelo en paisajes rurales propuesto por el IAvH (Mendoza *et al.* 2007). Los muestreos se realizaron del 2005 al 2007 y luego del 2010 al 2011, se evaluaron cinco tipos de hábitats: 1) bosques: Cañón del río Barbas y la Reserva Forestal Bremen; 2) bosques riparios; 3) áreas restauradas (R-forestal): áreas en proceso de restauración provenientes de suelos de plantaciones forestales de pino y ciprés; 4) áreas restauradas (R-past): áreas en proceso de restauración provenientes de suelos de pastizales; 5) Pastizales (Past): áreas para la cría de ganado dominado principalmente por *Pennisetum clandestinum* (kikuyo) que corresponden a la matriz del paisaje. Los resultados que se presentan a continuación se basan en un muestreo intensivo donde se extrajeron 1.504 m² de hojarasca y se instalaron 1.504 trampas de caída.

Después de ocho años de iniciado el proceso de restauración, encontramos un total de 132 especies de hormigas, los fragmentos de bosques y los bosques riparios presentan la mayor riqueza (112 -105 spp. respectivamente), fueron más estables en el tiempo como era de esperarse del ecosistema de referencia y conservaron entre el 84-79 % de las especies encontradas en el paisaje, además aportaron el mayor número de especies exclusivas (18 spp.).

Las áreas restauradas (R-forestal y R-past) mantienen cerca del 60 % de las especies del paisaje, muy por encima de los pastizales que solo albergan 47 %; sin embargo, en los últimos años las áreas restauradas han mostrado una pérdida de árboles por la entrada de ganado o por las fuertes lluvias y esto se ha visto reflejado en una disminución de la riqueza en las R-forestal, observando una pérdida del 50 % de las especies entre el 2005 al 2011. Se destaca a *Linepithema pilliferum* como la especie más abundante y dominante en los pastizales y en las áreas restauradas R-past y R-forestal. Contribuye a la similitud entre estos tipos de hábitat en un 51.6 % y forman un grupo separado de los bosques y de los bosques riparios donde su abundancia es menor al 1 %.

Algunas especies de hormigas asociadas a hábitats boscosos como *Pheidole pygmaea*, *Cyphomyrmex rimosus*, *Gnamptogenys bisulca*, *Pachycondyla aenescens*, *P. becculata*, entre otras. Con abundancias ≥ 44 % en bosques comienzan a aparecer en las R-forestal de siete años con abundancias ≤ 14 %, indicándonos el avance de las áreas restauradas hacia las condiciones boscosas. Los resultados del monitoreo evidencian el gran aporte de las áreas restauradas a la conservación de hormigas del paisaje (60 %), su estrecha relación con el microhábitat revela los cambios físicos observados en la estructura y composición de la vegetación en las áreas restauradas; factores como la cantidad de hojarasca y la presencia de ramas huecas y troncos en descomposición en las áreas restauradas pueden estar limitando el establecimiento de las hormigas del bosque.

Por otro lado, las áreas restauradas son franjas pequeñas y estrechas rodeadas de extensas áreas de pastizal, pueden estar sometidas a un fuerte efecto de borde y esto puede estar favoreciendo la presencia y abundancia de *Linepithema pilliferum* que también puede ser una fuerte competidora para las especies del bosque.

Se recomienda monitorear la abundancia de *Linepithema pilliferum*, *Gnamptogenys bisulca*, *Pachycondyla aenescens*, *P. becculata* y *Cyphomyrmex rimosus*. Estas especies son fáciles de identificar y de muestrear, y su presencia y abundancia está fuertemente relacionada con la calidad del hábitat y reflejarán el estado de la restauración.

Una vez detectadas las especies claves para el monitoreo no es necesario un muestreo intensivo como los realizados en este estudio, los muestreos pueden ser dirigidos a la búsqueda de las especies indicadoras, el trabajo de campo y de

laboratorio y la obtención de información rápida y precisa del avance de la restauración en los bosques subandinos del Quindío.

Linepithema pilliferum y *Pachycondyla aenescens* son especies activas sobre la superficie del suelo, con amplias áreas de forrajeo, mientras que *Gnamptogenys bisulca*, *Cyphomyrmex rimosus* y *P. becculata* son más fáciles de encontrar buscando en ramitas huecas o en troncos en descomposición. La captura manual es recomendada como el método más efectivo y selectivo para la colecta de todas las especies propuestas.

Caso 2. Monitoreo de hormigas en áreas mineras y suelos severamente degradados

La minería del carbón es un sector con un progresivo desarrollo en Colombia; entre el año 2003 y el 2007 la producción de carbón se incrementó en un 39.72 %, al pasar de 50 millones a casi 70 millones de toneladas. (Ministerio de Minas y Energía 2008). La principal forma de extracción del carbón es a cielo abierto, que consiste en la remoción total del suelo para exponer los mantos de carbón, trayendo consigo consecuencias ecológicas directas como la pérdida de hábitats y de biodiversidad.

En la mina de carbón del Cerrejón (La Guajira), se examinó el cambio en la composición y diversidad de las hormigas en áreas con diferentes edades de rehabilitación ecológica (Domínguez-Haydar y Armbrecht 2011). Para ello, se seleccionó un área donde aún no se ha habido iniciado el proceso de restauración, áreas en diferentes etapas iniciales, intermedias y avanzadas y otras no intervenidas en minería. La cronosecuencia fue la siguiente: inicial (0, 1 y 2 años), intermedio (4, 6, 7 y 8 años) y avanzado (12, 13 y 14 años). Tres bosques subxerofíticos sin intervención por actividad minera se utilizaron como sitios de referencia. Se realizaron dos muestreos entre diciembre de 2006 y julio de 2007 y en cada área se establecieron dos transectos con 10 estaciones donde se usaron trampas de caída por 48 horas, y también la captura manual de 10 minutos, realizada por dos personas.

Los resultados mostraron una respuesta positiva del ensamblaje de hormigas, en áreas entre dos o tres años de rehabilitadas la riqueza aumenta en un 70 % y la de 14 años presenta un 20 % más en relación a las áreas intermedias, lo cual estuvo correlacionado con el incremento de la cobertura arbórea y la disminución de la temperatura. Los grupos funcionales también se incrementaron con el tiempo de rehabilitación; se observó una disminución en los gremios de dominantes omnívoros y oportunistas del suelo. Especies como *Solenopsis geminata* y *Dorymyrmex biconis*, representantes de estos gremios, aportaron entre el 60 y el 77 % a la abundancia en las áreas con menor tiempo de rehabilitación, mientras que en los bosques y en las otras áreas no alcanzan un 2%; estas especies suelen encontrarse en hábitats abiertos y con poca cobertura vegetal. El ensamblaje de hormigas del sitio de 14 años fue el más similar a los bosques de referencia; sin embargo, aún dista de tener la misma composición. Estos bosques presentan 19 especies exclusivas, frente a siete en las otras áreas, lo cual es consistente con los resultados de Majer y *et al.* (2013) quienes encontraron que después de 37 años se ha logrado la rehabilitación de los sitios pero el ensamblaje original no ha sido restablecido, sugiriendo que puede tardar más años o se puede estar ante un cambio en la trayectoria del ensamblaje hacia un nuevo ecosistema. En este estudio también se evaluó la capacidad de remoción de semillas, para ello se diseñó un experimento tipo cafetería, en el que se le ofrecieron

a las hormigas semillas de tres especies nativas. Los resultados mostraron que la tasa de remoción de semillas fue similar entre las áreas con mayor tiempo rehabilitación y el bosque. Las hormigas podrían contribuir a la restauración de funciones ecológicas (Lomov 2009) como el avance de la sucesión vegetal mediante la posdispersión de semillas y el establecimiento de plántulas en los nidos.

Caso 3. Las hormigas como indicadoras de la recuperación de cárcavas

La erosión en cárcavas se da cuando abundantes volúmenes de escorrentía se acumulan por periodos cortos de tiempo en cauces estrechos, removiendo el suelo de esta área a profundidades considerables (Poesen *et al.* 2003). La incidencia y severidad de este tipo de erosión es acrecentada por factores naturales, como la precipitación, o antrópicos como la deforestación y el pastoreo (Nadim *et al.* 2006, Rivera y Sinisterra, 2006). Una de las estrategias para el control de esta problemática es la estabilización del suelo mediante bioingeniería, la cual se basa en el uso de elementos mecánicos asociados a elementos naturales (Gray y Sotir 1996, Rivera y Sinisterra 2006). Recientemente Calle *et al.* (2013) realizaron una primera aproximación al estudio de hormigas como indicadoras de la recuperación en cárcavas ubicadas en la cuenca alta del río Cali (Valle del Cauca) ($3^{\circ}29'55.6''\text{W}-76^{\circ}37'57''\text{N}$) y en la cuenca del río Jamundí ($3^{\circ}18'32''\text{W}-76^{\circ}34'9.6''\text{N}$). En el estudio se comparó la estructura de la vegetación y la composición de hormigas entre 10 cárcavas sin ningún tipo de intervención (control) y 10 cárcavas en recuperación, intervenidas con estructuras biomecánicas (*Guadua angustifolia*) y siembra de plantas pioneras en alta densidad (*Trichanthera gigantea*, *Tithonia diversifolia* y *Croton gossypifolius*). En cada cárcava, el muestreo de hormigas se realizó en transectos de 30 m de largo por 10 m de ancho mediante dos métodos: cebos de atún con miel y búsqueda de nidos.

Los resultados mostraron diferencias en la riqueza y composición de hormigas entre cárcavas en recuperación y cárcavas control. De un total 74 especies, el 33 % fueron compartidas mostrando el efecto de la recuperación de cárcavas sobre la composición de hormigas. La riqueza de especies (59 spp.) y número de especies exclusivas (34 spp.) fue mayor en las cárcavas restauradas en comparación con las cárcavas control, que en total albergaron 40 especies y 15 de estas fueron exclusivas. De forma similar, el anidamiento fue mayor en las cárcavas en recuperación (52 % de las especies), respecto a los controles (30 %) debido a una mayor oferta de sustratos de anidamiento asociados al trabajo de restauración (bioestructuras, vegetación viva, hojarasca, ramitas y troncos), en comparación con los controles donde el suelo es el único sustrato de anidamiento y la cobertura vegetal es escasa favoreciendo especies que prefieren hábitats abiertos y secos para su forrajeo y anidamiento como *Dorymyrmex biconis*, la cual se registró exclusivamente en estos sitios (Cuezzo 2003, Cuezzo y Guerrero 2012). También se registró con mayor abundancia en el control a *Ectatomma ruidum*, *Linepithema angulatum*, *Solenopsis geminata* y especies de los géneros *Camponotus*, *Brachymyrmex* y *Pheidole*. Por el contrario, las especies registradas de forma exclusiva para las cárcavas en recuperación se han visto fuertemente asociadas con hábitats de mayor cobertura vegetal y aporte de hojarasca como bosques secundarios, bosques de regeneración e incluso bosques primarios como es la cazadora solitaria *Heteroponera inca* (Aldana y Chacón de Ulloa 1999). También se presentaron especies reportadas para cafetales de sombra como son *Crematogaster erecta* y *Procrystocerus scabriusculus*

(Gallego-Ropero *et al.* 2009), depredadoras especializadas como *Octostruma balzani* y *Strumigenys gundlachi* (Roger 1862) (Agosti *et al.* 2000; Silvestre *et al.* 2003) y depredadoras generalistas como *Odonthomachus chelifera* (Jiménez *et al.* 2008b).

A partir de los resultados, se recomiendan los cebos de atún y miel y búsqueda de nidos como métodos de poca perturbación para el estudio de hormigas como indicadores de la recuperación de cárcavas. Además, cabe resaltar que la búsqueda de nidos proporciona información adicional sobre la permanencia y colonización de unidades reproductivas de las hormigas en estos sitios, generalmente pequeños (20 x 20 m) y con pocos recursos (control), en que los resultados obtenidos con los cebos de atún con miel podrían reflejar la composición de sitios aleaños por la presencia de hormigas visitantes.

Consideraciones finales

Basados en la revisión de 53 estudios realizados en Colombia encontramos que las hormigas pueden utilizarse como herramientas para detectar: 1) el estado de conservación de los bosques, los cuales albergan la mayor riqueza y el mayor número de especies exclusivas (Mendoza *et al.* 2007, Jiménez *et al.* 2008, Chaves *et al.* 2008, Abadía *et al.* 2010); 2) especies indicadoras, según los cambios o diferencias entre la abundancia y presencia de especies o grupos de especies indicadoras (positivas: asociadas a bosques y negativas: asociadas a áreas disturbadas) (Armbrecht y Ulloa-Chacón 2000, Arcila 2007, Achury *et al.* 2012, Herrera 2012); 3) la importancia de los fragmentos de bosque y bosques riparios como reservorios de la biodiversidad de hormigas (Mendoza *et al.* 2007, Jiménez *et al.* 2008, Chaves *et al.* 2008, Abadía *et al.* 2010, Chacón de Ulloa *et al.* 2012, Herrera 2012); 4) la alta diversidad de hormigas en los bosques riparios ofrece un potencial como áreas en las cuales enfocar los esfuerzos de restauración para mejorar la conectividad del paisaje (Mendoza *et al.* 2007, Jiménez-Carmona *et al.* en prep); 5) la presencia de especies invasoras o con comportamiento "invasor" el cual se ha correlacionado con la pérdida de diversidad de otras hormigas, (Chacón de Ulloa *et al.* 2000, Armbrecht y Ulloa-Chacón 2003, Arcila 2007, Achury *et al.* 2012); 6) cambios en las prácticas de manejo de los agroecosistemas (Ramírez y Enriquez 2003, Ramírez *et al.* 2010, Sanabria-Blandón y Chacón de Ulloa 2011, Rivera *et al.* 2013); 7) cambios en los hábitats de referencia y restaurados a lo largo del tiempo (Domínguez-Haydar y Armbrecht 2010, Herrera 2012, Jiménez-Carmona *et al.* en prep).

En la actualidad, la llamada "locomotora mineroenergética" impulsada por las políticas de estado para el desarrollo económico del país, ha incrementado la producción de la industria minera en Colombia, tan solo desde el 2008 al 2012 en un 50 % (Boletín estadístico de Minas y Energía) y se prevé que aumentará para el 2014 en un 3 % más, lo que se traduce en 35 mil millones de dólares en exportaciones, siendo el sector petrolero y la minería de carbón los que más aporten al PIB. Por otro lado, la falta de regulación por parte del estado y la ineficiencia de los organismos de control han permitido el crecimiento desordenado y la minería ilegal, lo cual nos pone de frente ante una inminente crisis ambiental. En este contexto, los trabajos de restauración y el potencial del monitoreo de las hormigas como herramienta complementaria para la evaluación de las iniciativas de restauración y rehabilitación en diferentes escenarios toman gran relevancia para desarrollar protocolos que permitan una rigurosa evaluación técnica, determinar los impactos negativos de un proyecto y proponer las medidas necesarias para hacerlo sostenible y para que la recuperación del ecosistema sea exitosa.



LOS ESCARABAJOS COPRÓFAGOS Y SU MONITOREO EN LA RESTAURACIÓN DE ECOSISTEMAS

Carlos A. Cultid-Medina y Claudia A. Medina

Los escarabajos coprófagos son un grupo de insectos ampliamente estudiados como indicadores ecológicos de disturbios antrópicos (Halffter y Favila 1993, Nichols *et al.* 2007, Escobar y Chacón 2000, Gardner *et al.* 2008). Debido a que muchas especies de escarabajos dependen de bosques nativos, los ensamblajes de escarabajos coprófagos son altamente sensibles a procesos de disturbios como fragmentación y transformación de los bosques (Klein 1989, Nichols *et al.* 2007, Gardner *et al.* 2008). Los escarabajos coprófagos reúnen una serie de características que los hacen un grupo clave en el monitoreo de conservación y restauración ecológica: 1) muestreo fácil y estandarizado; 2) taxonomía accesible; 3) presentan amplio rango de distribución geográfica; 4) los ensamblajes presentan diferencias interespecíficas en la respuesta ante los cambios y disturbios; 5) tienen gran importancia ecológica y económica y 6) su respuesta ecológica se correlaciona con la diversidad de otros taxones, especialmente vertebrados (Spector 2006, Nichols *et al.* 2008, 2009).

Los escarabajos coprófagos son diversos, abundantes y se encuentran ampliamente distribuidos. Actualmente, se conocen en el mundo cerca de 5.700 especies y 227 géneros (Scholtz *et al.* 2009) de los cuales unas 1.300 especies y 70 géneros se encuentran distribuidos en el trópico. En Colombia se han registrado 283 especies y 35 géneros (Medina *et al.* 2001) pero se considera que el número de especies puede estar cerca de las 400 (Cultid *et al.* 2012). A pesar de ser llamados coprófagos, es importante resaltar que algunas especies son carroñeras y otras detritívoras; pueden encontrarse en hojarasca, frutos en descomposición o asociadas a hongos, otras presentan especializaciones particulares como ser depredadores de quílopodos y estar asociados a nidos de hormigas o a bromelias (Morón 2003).

Colombia cuenta con una larga historia de muestreos de escarabajos coprófagos, que abarca por lo menos 35 años (no continuos) de estudios realizados a diferentes escalas (e.g. Howden y Nealis 1975, Escobar *et al.* 2005, Barraza *et al.* 2010, Delgado *et al.* 2010, Concha *et al.* 2010). Durante los últimos 15 años se han realizado esfuerzos para compilar y analizar bajo una perspectiva multiescalar la información ecológica obtenida a partir de inventarios, que en su mayoría tuvieron alcance local (Escobar 2000, Medina *et al.* 2002, Escobar *et al.* 2007, Cultid *et al.* 2012). Sin embargo, antes

del presente libro no existía una iniciativa nacional dirigida hacia el diseño de un programa de monitoreo de escarabajos coprófagos (ni para muchos de los grupos que aquí se presentan). No obstante, a escala global se han publicado recientemente trabajos que ofrecen pautas generales para el monitoreo, a mediano y largo plazo de la diversidad de escarabajos coprófagos en ecosistemas tropicales (Quintero y Roslin 2005, Escobar *et al.* 2008, Barnes *et al.* 2014). En este capítulo se presenta un protocolo general para el monitoreo de escarabajos coprófagos en procesos de restauración ecológica, basado en el análisis de los cambios de la diversidad de los ensamblajes a corto (1-3 años), mediano (3-10 años) y largo plazo (> 10 años). El protocolo presenta una estructura sencilla que puede ser implementada por personas no especializadas. En este sentido, se espera que este protocolo facilite el seguimiento de los ensamblajes de escarabajos coprófagos en un proceso de restauración ecológica.

Clasificación taxonómica y características generales de los escarabajos coprófagos

Los insectos a los que nos referimos en esta sección del libro pertenecen al orden megadiverso de los coleópteros y a la familia Scarabaeidae, subfamilia Scarabaeinae; ampliamente conocidos como escarabajos coprófagos, por su asociación con el excremento de vertebrados, principalmente de mamíferos. Se distinguen de otros escarabajos por que tienen antenas con 9 o 10 antenómeros, mandíbulas parcialmente membranosas, escutelo generalmente no visible dorsalmente (a excepción en América del género *Eurysternus*) y pigidio expuesto, no cubierto por

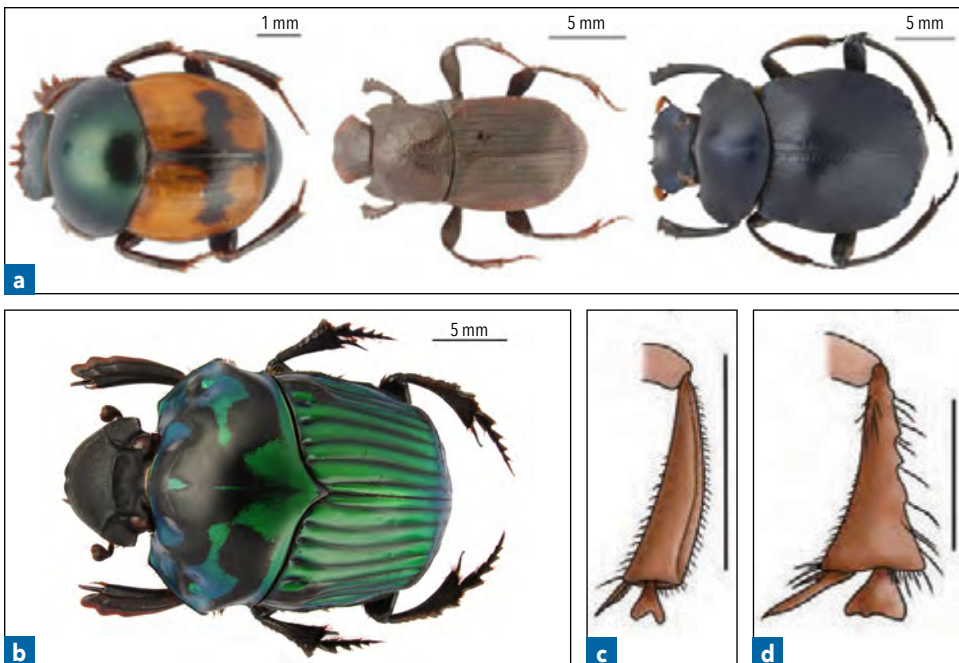


Figura 37. a) ejemplos de formas corporales de los escarabajos coprófagos; b) partes corporales (vista dorsal); c) y d) forma general de las patas de rodadores y cavadores. Fotografías: Carlos Cultid.

los élitros (Figura 37 a, b). Se reconocen externamente por su forma ovalada (algunas pocas especies son aplanadas o rectangulares) la cabeza aplanada (en forma de pala) y patas muy desarrolladas. La mayoría de las especies en los Andes son oscuras, de color café o negro, pero algunas presentan colores iridiscentes, principalmente las especies de tierras bajas. Los machos de algunas especies pueden tener cuernos o tubérculos en la cabeza y protórax (Figura 37 a).

De acuerdo a su comportamiento y estilo de vida, presentan algunas adaptaciones morfológicas, que son usadas para definir, de forma general, algunos gremios funcionales. En la literatura, la clasificación más usada considera tres grupos o gremios: rodadores, cavadores y residentes (endocópidos). Los rodadores presentan generalmente patas delgadas y alargadas (Figura 37 c) que les facilita formar y rodar bolas de excremento antes de enterrarlas, mientras que los cavadores se caracterizan por presentar patas robustas y espinosas (Figura 37 d) con las cuales extraen pedazos de excremento (sin formar bolas perfectas) que luego entierran cerca al sitio donde encontraron el alimento. Por su parte, los endocópidos prefieren anidar al interior del excremento o entre el excremento y el suelo. El comportamiento reproductivo de los escarabajos coprófagos y sus estrategias para minimizar competencia en el uso del recurso son muy complejas, por lo tanto, para conocer más detalles, se recomienda revisar los siguientes autores: Halffter y Edmonds (1982), Cambefort y Hanski (1991), Gill (1991), Feer y Pincebourde (2005).

Protocolo para el monitoreo de escarabajos coprófagos basado en datos de abundancia, biomasa y diversidad

El diseño e implementación de un programa de monitoreo debe seguir las mismas pautas que un programa de muestreo. Una de las principales ventajas de trabajar con escarabajos coprófagos radica en que existe un método de muestreo estándar (al menos en conceso), económico y basado principalmente en un único método de captura: trampas de caída acondicionadas con cebo (excremento o carroña). No obstante, hacer un monitoreo no es igual a muestrear, el muestreo hace parte del monitoreo y este último tiene un componente temporal orientado hacia el seguimiento de los ensamblajes, para lo cual un método de muestreo estándar y sencillo garantiza repeticiones en el tiempo y el espacio.

Para el desarrollo del monitoreo se seguirán tres fases: 1) selección del sistema o "hábitat de referencia"; 2) premuestreo y montaje de la colección de referencia; 3) implementación del monitoreo con base a criterios, indicadores y verificadores. Las tres fases deben estar articuladas y es importante que se ejecuten bajo la estrecha colaboración entre dos niveles de implementación: técnico y experto (Figura 38). El nivel técnico incluye aquellas personas que no son necesariamente biólogas o que no tienen experiencia en el trabajo con escarabajos coprófagos, pero serán quienes ejecuten el programa de monitoreo. El nivel experto involucra a los biólogos con experiencia en ecología y taxonomía de escarabajos coprófagos, ellos asesoran la separación e identificación de las especies, y guiarían el análisis de la información ecológica a lo largo del tiempo.

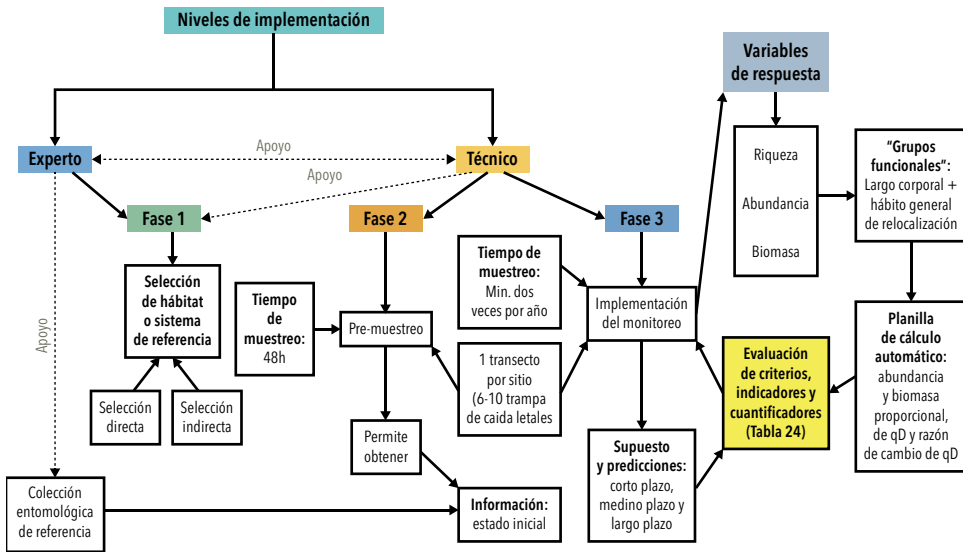


Figura 38. Resumen del protocolo para el ajuste e implementación del programa de monitoreo con escarabajos coprófagos. Modificado de Cultid *et al.* 2012.

Fase 1. Selección del sistema o hábitat de referencia: a diferencia de otras regiones del mundo, en el neotrópico gran parte de la diversidad de escarabajos coprófagos se concentra al interior de los bosques nativos (Gill 1991, Escobar *et al.* 2007). Por esta razón, la fragmentación y deterioro de los bosques afectan negativamente a los ensamblajes de estos escarabajos. En este sentido, el sistema de referencia o hábitat de referencia para el monitoreo de los Scarabaeinae será el bosque nativo. Sin embargo, en paisajes con alto nivel de fragmentación (e.g. escenarios agropecuarios), no es posible encontrar bosques nativos de gran tamaño y maduros. Por lo tanto, es probable que la fauna de Scarabaeinae asociada a los parches de bosque remanentes sea apenas una muestra de la riqueza que en algún momento estuvo presente en el paisaje; normalmente persisten aquellas especies más resistentes a los disturbios antrópicos. En consecuencia, la selección del sistema o hábitat de referencia tendrá dos aproximaciones:

Selección directa: será posible cuando en el paisaje existan parches de gran tamaño (> 100 ha). Normalmente, y dependiendo de la altitud e historia de disturbio del paisaje, parches de bosque con un área superior a las 100 ha pueden conservar una muestra representativa de la fauna de escarabajos coprófagos asociada a bosque maduro.

Selección indirecta: en paisajes muy fragmentados (e.g. valles interandinos de los ríos Cauca y Magdalena o la llanura del Caribe) normalmente persisten parches con un área inferior a las 100 ha y muy aislados; por lo tanto, la selección del sistema de referencia y establecimiento de la diversidad esperada al final del proceso de restauración requiere un proceso más amplio. En primer lugar, se deben muestrear los parches de bosque que persisten en el paisaje. En segundo lugar se deben buscar todas las listas de especies disponibles para zonas similares a la que será restaurada. De esta forma se establecerá el rango de diversidad posible asociada al bosque

nativo; esta información otorgará un riqueza potencial de los bosques con bajo nivel de disturbio antrópico. Tercero, se debe establecer cuánto aportan los parches de bosque remanentes a la riqueza esperada bajo una circunstancia de menor disturbio (a la lista potencial de especies, paso anterior).

Precauciones en la selección del sistema o hábitat de referencia:

1. Esta fase se enmarca en la fase analítica del proceso de restauración ecológica, por lo tanto, la búsqueda de información base para definir el sistema de referencia, debe estar en sintonía con los objetivos de restauración.
2. La información base para la selección del sistema o hábitat de referencia debe ser otorgada por el nivel especializado. Aunque se cuenta con un marco conceptual muy desarrollado para el muestreo de escarabajos coprófagos de Colombia, la taxonomía del grupo en el país se encuentra en revisión y es muy importante que las listas compiladas sean consensuadas por el nivel especializado.
3. En la selección directa, la lista de especies base se obtendrá a partir del premuestreo. Aunque exista una lista de especies para el paisaje de interés, es importante contar con un muestreo del momento inmediatamente previo al proceso de restauración.
4. En la selección indirecta nunca se tendrá una lista de especies fija, en su lugar se debe considerar un rango de especies y un rango de valores de diversidad (si es el caso).
5. Aunque en la selección directa es posible obtener una lista de especies *in situ* de uno o varios parches grandes, es importante recordar que un muestreo rápido de diversidad nunca ofrecerá una visión absoluta de la diversidad de escarabajos coprófagos (Escobar *et al.* 2008). Por lo tanto, en la fase analítica y con base a la información compilada, es importante considerar que especies están o no presentes en la lista de referencia del paisaje de interés.
6. En la compilación de la información para la construcción de la lista de especies de referencia es importante tener precaución de usar datos que provengan de localidades similares al paisaje de interés, con respecto a la historia de manejo, rango altitudinal, contexto biogeográfico y tipo de formación vegetal.
7. En la compilación de la información se debe dar prioridad a listas de especies obtenidas con el mismo método de muestreo que será usado durante el monitoreo (en este caso, trampas de caída con cebo). Nunca se debe descartar la información obtenida con métodos complementarios de muestreo (e.g. trampas de intercepción área, necrotrampas, captura manual, colecta ocasional).

Fase 2. Premuestreo y montaje de colección entomológica de referencia: el premuestreo de escarabajos coprófagos es un inventario rápido de diversidad del área seleccionada para el proceso de restauración (fase diagnóstica, Figura 5). El premuestreo debe permitir: a) conocer las especies asociadas a los parches de bosque (sistemas o hábitats de referencia) presentes en el paisaje de interés; b) refinar aspectos operativos del monitoreo (e.g. número de transectos y trampas por transecto); c) obtener información sobre el estado inicial de los ensamblajes antes del proceso de restauración, esto se considera no solo para las zonas que serán restauradas sino también para los sistemas o hábitats de referencia; d) construir una colección entomológica de referencia. Está última actividad es muy importante,

debido a que los niveles técnico y especializado deben colaborar de forma directa para afinar el protocolo y diseño del monitoreo.

Método de captura-transecto y trampas de caída con cebo: para efectos de un muestreo rápido, comparativo e informativo, se recomienda la instalación de transectos compuestos por trampas de caída. Para el desarrollo de este protocolo se recomienda usar el modelo de trampa letal (Figura 39), que está constituida por un vaso o bote de plástico con una capacidad mínima de 500 ml, el cual se entierra a ras del suelo. En el momento de ser instalada, la trampa se debe cubrir con un plato desechable de más o menos 20 cm de radio sostenido por dos soportes metálicos en forma de U invertida, de tal forma que la cubierta quede a 20 cm de la boca del vaso. El cebo o atrayente se ubica en un vaso más pequeño de 30 o 50 ml sujetado por dos alambres sostenidos desde la parte superior de los soportes metálicos (Figura 39). En el fondo del vaso se vierte una solución para el sacrificio de los escarabajos, se recomienda usar agua saturada de sal o alcohol entre el 50-70 %. Otras soluciones, como agua jabonosa, pueden comprometer la integridad de los especímenes y reducir la captura por el olor del detergente.

Número de transectos y trampas: Dependerá de la escala del proceso de restauración y el número de sitios a ser intervenidos. Se recomienda que por cada sitio de interés (hábitats de referencia y sitios que serán restaurados) se instale un transecto compuesto por seis o 10 trampas de caída, separadas entre sí por 50 metros. Si se instala más de un transecto se recomienda que estén separados por una distancia mínima de 200 m. En general, se usan transectos lineales pero en muchos casos el tamaño de los parches de hábitat no permite instalar una línea recta de trampas. La forma en que se disponen espacialmente las trampas no influye en el muestreo, siempre y cuando se mantenga la distancia de separación entre las trampas y que éstas se ubiquen

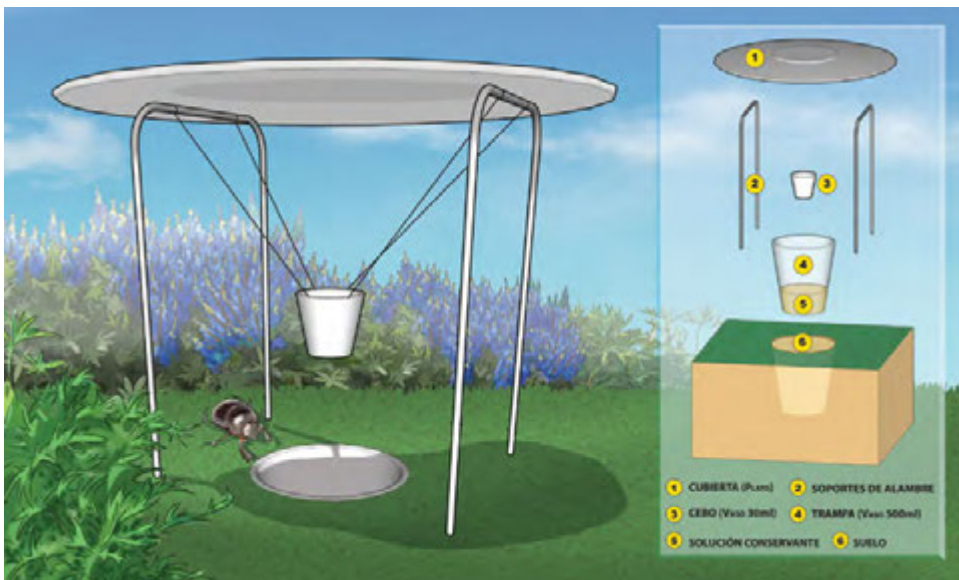


Figura 39. Diseño general de una trampa de caída letal. El plato debe incrustarse en el alambre para que este quede sujeto.

al interior de un mismo parche de hábitat. La Tabla 22 reúne información sobre las pautas y materiales requeridos para el montaje de un transecto de seis trampas.

Tiempo de actividad de las trampas: tanto en el muestreo como todos los momentos del monitoreo, las trampas deben estar activas 48 horas. Se recomienda realizar una revisión de las trampas a las 24 horas, en ese momento se deben renovar o reemplazar los cebos secos o perdidos y recolectar los escarabajos que hayan sido capturados. En la Tabla 23 se presentan las pautas y materiales de campo necesarios para la revisión de las trampas (Modificado de Cultid *et al.* 2012).

Tipo de cebo: excremento humano es el cebo más usado en los muestreos de escarabajos coprófagos en todo tipo de ecosistemas. Por cuestiones operativas, se recomienda usar una mezcla de excremento humano y cerdo en una proporción 7:3, evitando usar excremento de cerdos alimentados con concentrado. En tierras bajas (≤ 1000 m) se recomienda usar necrocebos, los cuales pueden consistir en entrañas de pollo o de pescado descompuestas. En estos casos se sugiere alternar los cebos entre las trampas, por ejemplo: trampa 1-coprocebo, trampa 2-necrocebo, trampa 3-coprocebo, etc.

Colección entomológica de referencia: para la construcción de la colección de referencia es importante seguir las pautas para el procesamiento de las muestras en campo (Tabla 23). Esto garantizará el buen estado de los especímenes para su posterior determinación taxonómica y almacenamiento final en una colección entomológica.

Tabla 22. Materiales y pautas para la construcción de trampas de caída e instalación de los transectos de muestreo.

Actividad	Cantidad	Material
Construcción de las trampas	6	Vasos plásticos o desechables de 500 ml
	6	Platos desechables plásticos de mayor diámetro posible (e.g. 25–30cm): estos representan la cubierta plástica. Los platos blancos son particularmente útiles para ver fácilmente las trampas en el interior del bosque o en cultivos muy densos
	6	Vasos o copas desechables de 30ml (aprox. 1 onza): se usarán para el cebo
	2 (m)	Alambre dulce calibre 12 o 14: este se usa para los soportes que sostendrán el cebo y la cubierta plástica
	1 (m)	Alambre delgado: se usa para colgar el recipiente del cebo en el soporte de alambre
Instalación del transecto	1	Decámetro: no obstante, en algunos casos es muy útil usar una cuerda de 100 m marcada a 50 m
	1	Pala de jardinería (cuando el suelo lo permite), en casos donde el suelo es muy duro se recomienda usar un barretón de caña o barretón delgado, en algunas regiones se conoce como sacabocados y lo usan en el campo para hacer hoyos
	1	Rollo de cinta para marcar: esta cinta puede ser reflectiva o cinta "Peligro" que se encuentra en cualquier ferretería. Esta cinta se usará para marcar la posición de cada trampa

Tabla 23. Pautas generales para la revisión de las trampas de caída durante el muestreo.

Proceso	Pautas
Revisión de trampas de caída en campo. Se requiere el uso de guantes de forma permanente, recuerde que está trabajando con excremento. Por lo tanto antes de salir a campo revise que cuenta con guantes desechables, pinzas, libreta de campo (resistente al agua), lápiz (o rapidógrafo), etiquetas y la cantidad necesaria de bolsas	Retire el vaso del suelo. Tenga cuidado en caso de estar inundada la trampa, en dicho caso guarde primero los especímenes que estén flotando en la parte superior
	Vierta el contenido del vaso en un colador sobre una bandeja amplia (en lo posible blanca), se puede usar la cubierta de la trampa como bandeja. Busque especímenes entre residuos (barro, excremento o material vegetal) que se hayan acumulado en la muestra
	Prepare una etiqueta temporal para rotular la muestra (papel pergamino marcado con lápiz), esta debe ser marcada con el nombre del hábitat, número de transecto y de la trampa, fecha y algún nombre o código adicional que sea requerido para diferenciar el sitio de estudio
	Guarde la muestra lo más seca y limpia posible en una bolsa de cierre hermético y rotúlela. Si no es posible llegar pronto a una estación de trabajo (en el lapso de un día) agregue alcohol
Preparación de las muestras en estación de trabajo en campo. Si no hay una estación de trabajo en la zona de estudio, no olvide agregar alcohol a las muestras colectadas en campo y guardarlas ordenada y debidamente rotuladas (interna y externamente). Procure procesar las muestras en el menor tiempo posible	En una bandeja blanca vierta la muestra y el contenido de cada bolsa, cuente y registre en la libreta de campo el número de individuos por muestra. Es posible que algunos especímenes sigan vivos, por lo tanto coloque los individuos en una cámara letal (con acetato de etilo o de metilo) durante media hora
	Lave y limpie lo mejor posible los especímenes
	Si es posible, deje secar al sol y en camas de papel absorbente los individuos de cada muestra (sin mezclar muestras)
	Después de secar los individuos, guarde cada muestra en bolsas herméticas pequeñas debidamente rotuladas. Antes de cerrar la bolsa, vierta una pequeña cantidad de Isoconazol (antimicótico) diluido con un poco de alcohol. En lo posible, una bolsa por muestra pero si hay una gran cantidad de individuos por muestra (> 30 individuos y de diferentes tamaños), divida la muestra en varias bolsas debidamente rotuladas; trate de separar individuos grandes de los pequeños, de esta forma evitará el daño de los especímenes

En las figuras 40 y 41 se dan las pautas generales para dos métodos de montaje: sobres de colección en seco y montaje en alfiler entomológico respectivamente. La determinación taxonómica debe involucrar el nivel especializado. Para quienes ya han tenido experiencia en entomología y en el estudio de los Scarabaeinae, la separación de los géneros se puede hacer usando claves taxonómicas o guías de campo (Medina y Lopera 2000, Vaz de Mello *et al.* 2011). Se recomienda que la identificación taxonómica de las especies sea verificada por un taxónomo o verificadas con la Colección de Referencia de Escarabajos Coprófagos de Colombia (CRECC) que se encuentra actualmente en el Instituto Humboldt.

Fase 3. Implementación del monitoreo de escarabajos coprófagos en un proceso de restauración ecológica: para esta fase se deben evaluar los cambios en la diversidad de los ensambles de escarabajos coprófagos a través de una herramienta de análisis

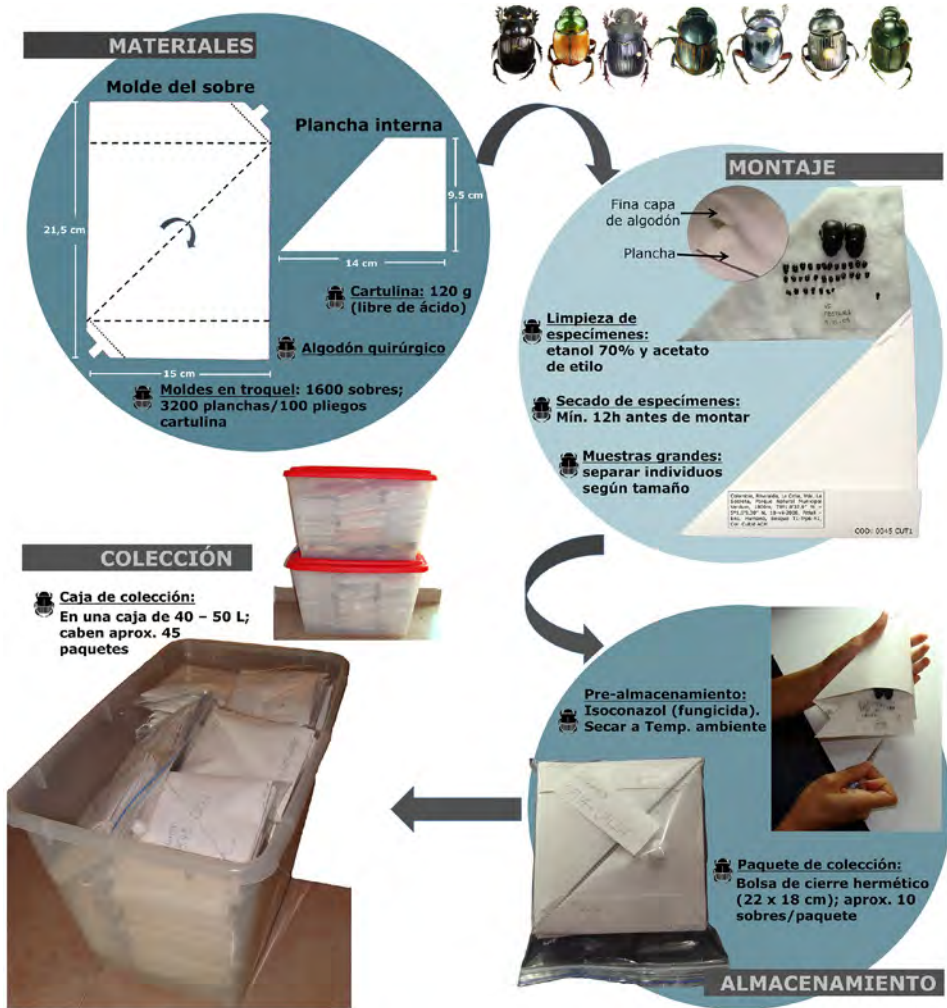


Figura 40. Pasos para la curaduría y montaje de la colección de referencia. Modificado de Cultid *et al.* 2012.

que permitirá verificar tres criterios: diversidad ecológica, composición de especies y grupos funcionales (Tabla 24).

Base conceptual: esta herramienta se basa principalmente en la diversidad ecológica medida en número efectivo de especies o diversidad de orden q (qD) (ver detalles en Jost 2006, Moreno *et al.* 2011). La diversidad qD es una medida comparable e intuitiva que tiene ventajas sobre los índices de entropía clásicos de Shannon y Simpson: la diversidad se expresa en unidades biológicamente interpretables "número efectivo de especies" y permite determinar directamente cuantas veces es más diverso un ensamblaje con respecto a otro. Este último aspecto es valioso para el monitoreo de procesos de restauración ecológica ya que puede ayudar a determinar directamente cuántas veces se incrementa o disminuye la diversidad con respecto al sistema o hábitat de referencia o en relación con el momento inicial.

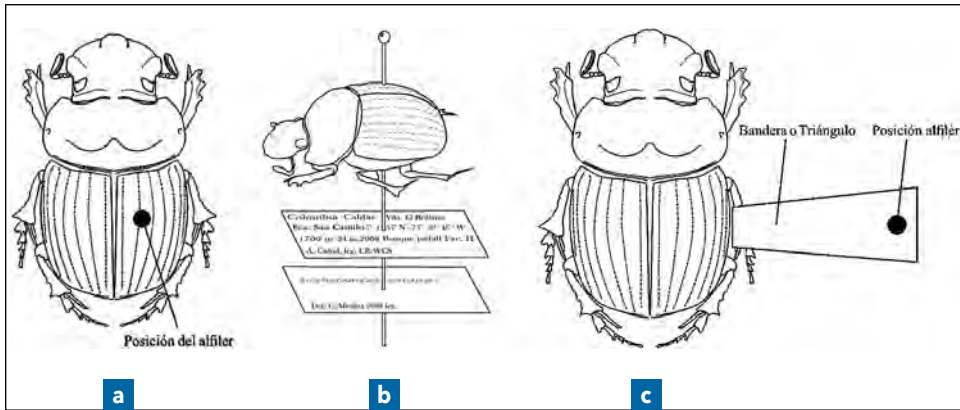


Figura 41. Montaje en alfiler (Individuos con largo corporal > 10 mm): a) se muestra la posición relativa donde debe ser insertado el alfiler (calibre 2); b) se muestra el orden en que deben ser colocadas las etiquetas de localidad y determinación taxonómica. Especímenes con un largo corporal entre 5 y 10 mm pueden ser montados usando alfileres de calibre 1 o 0; c) montaje en banderilla (Individuos con largo corporal < 10 mm): se recomienda hacer las banderillas con papel Bond (120 gr.) libre de ácido. Tomado de: Clutid *et al.* 2012.

Para el cálculo de ${}^{\circ}D$ se usarán dos expresiones de la abundancia: número de individuos y biomasa. El número de individuos es comúnmente usado para estimar la diversidad de un ensamblaje dado y se ha usado ampliamente en la evaluación ecológica de los escarabajos coprófagos. Sin embargo, trabajos publicados recientemente han retomado la idea de incorporar la biomasa como una medida sustituta de la abundancia debido a que puede dar información complementaria sobre la respuesta de los ensamblajes de escarabajos ante los disturbios antrópicos (Nichols *et al.* 2007, Gardner *et al.* 2008).

Supuesto: el éxito de un proceso de restauración ecológica en un hábitat determinado se reflejará en cambios relativamente rápidos en la distribución de la abundancia y biomasa de las especies del ensamblaje, así como en la ganancia de especies propias de bosque. Estos cambios se reflejarán en la diversidad de escarabajos coprófagos entre sitios de muestreo y a lo largo de los momentos del proceso de restauración.

Predicción: teniendo en cuenta que los ensamblajes de escarabajos coprófagos en Colombia están compuestos principalmente por especies de afinidad neotropical con una alta preferencia por bosques maduros, se espera que a medida que avance el proceso de restauración la diversidad de los ensamblajes se incremente y se acerque a la diversidad del sistema o hábitat de referencia, composición e suficiencia de grupos funcionales del hábitat o sistema de referencia. Aún no existe suficiente información o casos de estudios que permitan predecir en detalle que pasará a corto (0-1 año), mediano (2-5 años) y largo plazo (5-10 años o > 10 años). Sin embargo, es posible que a corto y mediano plazo las zonas en regeneración puedan contener entre el 25 y 50 % de la diversidad contenida en el sistema de referencia y que se presente un incremento en la abundancia de especies propias de hábitats nativos y de gremios sensibles tales como los grandes y pequeños rodadores. En ningún caso, y por razones asociadas a factores espaciales, históricos y la dinámica temporal de las comunidades, es posible esperar que se alcance un 100 % de regeneración.

Tabla 24. Criterios, indicadores y cuantificadores para la evaluación del éxito de procesos de restauración ecológica con base a la respuesta de ensamblajes de escarabajos coprófagos. Los cuantificadores se obtienen con la herramienta de cálculo propuesta para la implementación del monitoreo.

Item	Nombre	Descripción
1. Criterio	Diversidad ecológica (estructura)	Diversidad definida por la distribución de la abundancia/biomasa entre las especies (estructura) que componen los ensamblajes asociados a cada hábitat o cobertura vegetal (intacta, perturbada o en regeneración)
1.1. Indicador	Riqueza	Número de especies en cada hábitat o cobertura vegetal (intacta, perturbada o en regeneración)
1.1.1. Cuantificador	Diversidad 0D	Sumatoria de la abundancia proporcional de cada especie elevada a cero ($q=0$) por hábitat o cobertura vegetal (intacta, perturbada o en regeneración). Unidades: número de especies
1.2. Indicador	Diversidad general	Diversidad no sesgada por la incidencia de especies raras y abundantes (poco o muy pesadas) en cada hábitat o cobertura vegetal (intacta, perturbada o en regeneración)
1.2.1. Cuantificador	Diversidad 1D	Exponencial del índice de entropía de Shannon, $\text{Exp}(H')$. Unidades: número efectivo de especies
1.3. Indicador	Diversidad de las especies abundantes/pesadas	Diversidad definida por las especies dominantes (en abundancia o biomasa) en cada hábitat o cobertura vegetal (intacta, perturbada o en regeneración)
1.3.1. Cuantificador	Diversidad 2D	Sumatoria de los cuadrados de la abundancia/biomasa proporcional de cada especie ($q=2$) en cada hábitat o cobertura vegetal (intacta, perturbada o en regeneración). Recíproco del índice de dominancia de Simpson (J): $(1/(1 - J))$. Unidades: número efectivo de especies abundantes/pesadas
1.3. Indicador	Cambio de la diversidad (qD)	Cambio de la diversidad (qD) a través de los estados de regeneración y con respecto al hábitat o sistema de referencia
1.3.1. Cuantificador	Razón de cambio de diversidad qD	Razón entre la diversidad (qD) de cada momento posterior a la intervención de restauración y la diversidad del hábitat o sistema de referencia. También se puede calcular con respecto al momento inicial
2. Criterio	Composición de especies	Aspectos de la composición de especies de los ensamblajes asociada a cada hábitat o cobertura vegetal (intacta, perturbada o en regeneración)
2.1. Indicador	Composición de especies típicas de hábitats o coberturas nativas	Identificación de aquellas especies que se consideran propias de hábitats nativos con bajo nivel de disturbio antrópico. Grupo de especies indicadoras positivas de regeneración

Item	Nombre	Descripción
2.1.1. Cuantificador	Incidencia de especies típicas de hábitats o coberturas nativas	Identificar y listar con en el apoyo de los expertos y la información-base, aquellas especies típicas de hábitats o coberturas nativas que presentan bajo nivel de disturbio, o que están asociadas a nuestra hábitat de referencia o meta de restauración. Por cada especie reportar el número de individuos en cada cobertura vegetal evaluada
2.2. Indicador	Composición de especies típicas de hábitats o coberturas disturbadas	Identificación de aquellas especies que se consideran típicas de hábitats o coberturas vegetales disturbadas. Grupo de especies indicadoras negativas
2.2.1. Cuantificador	Incidencia de especies típicas de hábitats o coberturas con disturbios antrópicos medios o altos	Identificar y listar con en el apoyo de los expertos y la información-base, aquellas especies típicas de hábitats o coberturas nativas que presentan disturbios antrópicos medios o altos. Por cada especies reportar el número de individuos en cada cobertura vegetal evaluada
2.3. Indicador	Especies exótica	Identificación de aquellas especies que se consideran típicas de hábitats o coberturas vegetales disturbadas. Grupo de especies indicadoras negativas
2.2.1 Cuantificador	Incidencia de especies exóticas	Identificar y listar especies exóticas, no nativas del neotrópico. En el caso de Colombia y para tierras bajas (< 1500 m), solo se conoce el caso de <i>Digintonthophagus gazella</i> , especie que aprovecha hábitats abiertos o sin cobertura de dosel, principalmente potreros con actividad ganadera intensiva
3. Criterio	Grupos funcionales	Incidencia de grupos funcionales definidos por tres atributos generales: comportamiento de recolonización y uso del recurso (rodadores, cavadores y endocopridos) y tamaño corporal (grandes > 10mm largo corporal y pequeños < 10 mm)
3.1. Indicador	Incidencia de grandes y pequeños rodadores	Abundancia del gremio de rodadores en los hábitats o coberturas en regeneración. En la mayoría de los casos (en Colombia), las especies rodadoras tanto grandes como pequeñas, son las más susceptibles a los disturbios antrópica de sus hábitats
3.1.1. Cuantificador	Riqueza, Abundancia y Biomasa del gremio de rodadores	

Cuantificadores: la herramienta considera cuatro variables de respuesta las cuales se obtienen directamente del protocolo de muestreo y son la base para los verificadores de cada indicador y respectivo criterio (Tabla 24):

1. *Número de individuos:* número de escarabajos por especie en cada trampa, transecto, sitio y momento de evaluación.
2. *Biomasa:* para escarabajos coprófagos se calcula como el producto entre el peso seco promedio de cada especie/morfoespecies y su respectiva abundancia en cada sitio o momento del proceso de restauración (Peck y Forsyth 1984; Horgan 2005).

3. **Diversidad (qD):** esta variable de respuesta es compuesta y se calcula con base en la abundancia y biomasa. Para efectos del monitoreo se pueden usar tres expresiones de qD , 0D =riqueza de especies, 1D =número efectivo de especies abundantes/pesadas y 2D = número efectivo de especies muy abundantes/muy pesadas.
4. **Incidencia de grupos funcionales:** los grupos funcionales se definirán con base en el largo corporal de las especies (pequeñas < 10 mm; grandes > 10 mm) y el hábito de relocalización del recurso (cavador, rodador y residentes). Esta clasificación es la más básica y se recomienda su aplicación a nivel técnico. La asignación del grupo funcional será apoyado por el nivel especializado y se deriva de los datos obtenidos en el muestreo. La incidencia se define simplemente como la abundancia/biomasa proporcional de cada gremio en cada sitio de muestreo o momento de restauración.

Componentes de la herramienta: esta herramienta introduce componentes de fácil uso para obtener los valores de cada cuantificador:

1. **Planilla de campo:** puede ser impresa o copiada en las libretas de campo y servirá para el registro de los datos en campo. Se recomienda que exista una plantilla de campo para cada sitio y momento del muestreo (Anexo 7).
2. **Tabla de datos en hoja de cálculo tipo Excel:** para garantizar la persistencia de la información y que otros investigadores puedan verificar la calidad de la misma, se recomienda construir una tabla de datos digital. La tabla de datos se construirá en formato tipo Excel y es una modificación del formato recomendado por Villarreal *et al.* (2003) para el registro de datos de muestreo de escarabajos coprófagos (Anexo 8).
3. **Plantilla de cálculo de diversidad:** esta herramienta es digital en formato Excel y permite calcular de forma automática las tres expresiones de la diversidad, 0D =riqueza; 1D =diversidad dada por el número efectivo de las especies abundantes/pesadas y 2D =diversidad dada por el número efectivo de especies muy abundantes/muy pesadas. Esta plantilla esta compuesta por tres bloques (Anexo 9):
 - a. **Bloque de datos (A):** presenta los datos de abundancia (número de individuos) y el peso seco promedio de cada morfoespecie (masa corporal en gramos). Al hacer lo anterior, la biomasa por cada especie se calcula de forma automática. No se deben cortar celdas y no se debe modificar ninguna de las otras columnas. Se debe ingresar de forma independiente los datos de cada sitio o momento del proceso de restauración.
 - b. **Bloque de salida de medidas de diversidad (B):** una vez ingresados los datos en el bloque anterior, aquí se generan automáticamente el total de individuos y de biomasa y las tres expresiones de la diversidad (0D , 1D , 2D).
 - c. **Bloque de aporte porcentual (C):** aquí se calcula automáticamente el aporte porcentual de cada especie a la abundancia y biomasa total para sitio o momento del proceso de restauración.
4. **Plantilla de cálculo de razón de cambio de diversidad:** este componente permite obtener de forma automática la razón de cambio de la diversidad para cada expresión de la diversidad (0D , 1D , 2D), entre cada momento de la restauración y el momento inicial (e.g. 1 año después vs. 0 años) (Anexo 10). A medida que se

van ingresando los datos en la plantilla 3, se deben copiar y pegar manualmente los valores de diversidad en la plantilla 4 (Anexo 10).

¿Cada cuánto se deben hacer los muestreos de escarabajos coprófagos? esto depende de la región del país y de la altitud. En general, los ensamblajes de escarabajos coprófagos en tierras bajas (< 1.000 m) presentan estacionalidad anual en sus picos de abundancia y en la incidencia de algunas especies (Escobar 2000). Por su parte, los ensamblajes andinos (> 1.000 m) tienden a presentar una abundancia constante a lo largo del año (Escobar 2000). Estas diferencias en los patrones anuales de la abundancia son importantes para establecer la frecuencia de los muestreo para el monitoreo. Si es posible, se recomienda, más aún en zonas con fuerte estacionalidad, que durante el primer año se hagan por lo menos dos muestreos, uno en cada temporada (lluvias y seca) y a partir de esta información ajustar la frecuencia de los muestreo. Esto además permitirá acotar los intereses de la evaluación ya que algunas especies pueden presentar preferencias muy restringidas, no solo por el hábitat sino también por la estación. En localidades andinas se puede hacer dos muestreo al año, uno por cada momento de transición entre temporadas, momentos en los cuales se han detectado picos de abundancia, principalmente al pasar de la temporada seca a la de lluvias (Escobar y Chacón 2000).

Ejemplo para la interpretación de los datos obtenidos con la herramienta: suponga que se ha aislado un potrero abandonado. En el premuestreo del potrero se capturaron siete especies de cinco géneros (Anexo 11); para el premuestreo y el monitoreo se usó un transecto de seis trampas de caída letales cebadas con excremento (humano y cerdo). Se realizaron tres muestreos después del aislamiento: a un año (un potrero con mayor densidad de pioneras y algunos arbustos), a cinco años (un bosque secundario temprano) y a diez años (un bosque secundario intermedio con algunas especies arbóreas). En cada momento de muestreo se registró la abundancia de las especies y se estimó la biomasa. Al final de los 10 años se registraron 10 géneros y 24 especies de escarabajos coprófagos (Anexo 11).

Cambio de la diversidad: al examinar la razón de cambio de la diversidad se observó un incremento importante de las tres expresiones de la diversidad, tanto en términos de la abundancia como de la biomasa (Anexo 12). En el primer año el incremento estuvo entre 1,2 y 1,6 veces. A los diez años y en relación con la abundancia, la riqueza (0D) se incrementó casi tres veces, mientras que la diversidad de las especies abundantes y muy abundantes se incrementó un factor de dos. En términos de la biomasa, se presentó una tendencia similar de incremento, pero con una mayor magnitud, donde la diversidad de las especies pesadas y muy pesadas se incrementó aproximadamente en cinco y cuatro veces respectivamente.

Gremios funcionales: para evaluar el cambio en la incidencia de los gremios funcionales se requiere sumar el aporte porcentual de cada especie a la abundancia y biomasa con respecto a su gremio (Anexo 12). Esto se debe hacer para cada momento del monitoreo. Una vez construido este resumen en una hoja de cálculo tipo Excel, es posible determinar de forma visual y directa como cambia la incidencia de los gremios. Para este ejemplo, se observa como al cabo de cinco años aparecen los grandes y pequeños rodadores, al cabo de 10 años se incrementa la incidencia de los pequeños rodadores y se cuenta con representantes de cinco gremios funcionales. Esto implica que el ensamblaje de escarabajos coprófagos, además ganar especies, también ha incrementado su diversidad funcional en relación con

el rango de tamaños corporales y estrategias de relocalización del recurso. Es muy importante recordar que lo anterior es un ejemplo. Hasta la fecha no sabemos cómo es el patrón de “recuperación” de los ensamblajes de Scarabaeinae para un paisaje real en Colombia.

Géneros y especies indicadoras: para el ejemplo nos basamos en la información disponible para ensamblajes de escarabajos coprófagos que habitan los Andes occidentales de Colombia (entre los 1.300 y 2.000 m). En este sentido, y como se ha observado en otras localidades andinas, a medida que se incrementa la complejidad de la estructura vertical del hábitat, aparecen especies propias de interior de bosque andino o indicadores positivas: *Deltochilum mexicanum*, *Genieridium bosdinae*, *Ontherus lunicollis*, *Onthophagus mirabilis*. En contraste, vemos como se reduce o desaparecen especies tolerantes a disturbios antrópicos (indicadores negativos): *Onthophagus curvicornis*, *Onthophagus nasutus* y *Oxysternon conspiciatum*.

Especies propuestas como indicadoras positivas y negativas: como ya se mencionó al comienzo de este protocolo, la taxonomía de los Scarabaeinae en Colombia está en proceso de revisión y por lo tanto para muchas regiones del país no es posible, por el momento, asegurar la identidad específica de elementos de los ensamblajes, principalmente de géneros como *Uroxys*, *Canthidium* y *Dichotomius* (Medina y González 2014). No obstante, algunas especies plenamente determinadas se asocian de forma clara a determinadas circunstancias o niveles de disturbio antrópico. En el Anexo 13 se muestran alguna de dichas especies, las cuales se han dividido en especies indicadoras positivas y negativas, la presencia e incremento de la abundancia de las primeras pueden indicar recuperación de los hábitats o coberturas vegetales en restauración, las segunda estarán asociadas a niveles bajos de recuperación. El ajuste e implementación del presente protocolo en diferentes regiones del país, y bajo diferentes circunstancias de regeneración, más el avance en la resolución taxonómica a nivel de especies, incrementará y hará más región-específica la lista de especies indicadoras (Anexo 13).

Consideraciones finales

La implementación y el mejoramiento del protocolo propuesto para diseñar un programa de monitoreo de escarabajos coprófagos depende de dos aspectos fundamentales: definir los objetivos de restauración y garantizar la interacción constante entre los niveles especializado y técnico. El nivel especializado debe ofrecer el soporte académico para concentrar los alcances de los objetivos de restauración y garantizar la calidad de los diferentes componentes de la Herramienta propuesta en este protocolo (e.g. programación de la hoja en Excel del Anexo 9). Por su parte, el nivel técnico es la vía directa para la retroalimentación del protocolo, las personas que se involucren a en este nivel, serán los gestores principales para el mejoramiento del protocolo, debido a que ellos estarán en campo observando y cualificando las condiciones en las cuales se desarrollará el proceso de restauración.