El Colegio de la Frontera Sur

Universidad de Sherbrooke

Saskab, grava y piedra: implicaciones socioambientales de la recuperación de minas de caliza en Yucatán

Tesina

presentada como requisito parcial para optar al grado de

Maestro en Ecología Internacional

Por

Felipe Arturo Cantón Ruz

Director

Dr. Gerald A. Islebe

2020

El Colegio de la Frontera Sur

Chetumal, Quintana Roo, México, agosto de 2020.

Las personas abajo firmantes, integrantes del jurado examinador de Felipe Arturo Cantón Ruz hacemos constar que hemos revisado y aprobado la tesina titulada Saskab, grava y piedra: implicaciones socioambientales de la recuperación de minas de caliza en Yucatán, para obtener el grado de Maestro en Ecología Internacional.

	Nombre	Firma
Director		
Evaluador		

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por las becas nacional y de movilidad.

Al Colegio de la Frontera Sur y Université de Sherbrooke por la oportunidad de estudiar el posgrado.

A Gerald Islebe por su orientación profesional.

A Mirna Valdez Hernández por sus observaciones para mejorar el documento.

A Nancy Vela Peláez por estar al pendiente en todo momento.

A José Gómez Morales por su excelente servicio bibliotecario.

A Alberto Sosa por compartir infinitas charlas, ricos alimentos y bellos silencios.

A Kibi y Bubu por su fiel compañía.

A Reyna y los Cantón Ruz por su cariño a través de tantos panuchos y salbutes.

A Carmen por estar ahí.

A Martine Migneault por su confianza.

A mis amigos cercanos por echarme porras.

Resumen

La extracción de piedra caliza en Yucatán ha aumentado en años recientes debido a la creciente demanda de materiales pétreos para la industria de la construcción. Este tipo de minería a cielo abierto causa la destrucción total de la vegetación y el suelo, así como la pérdida de productividad del sitio. El suelo perturbado y expuesto a la erosión es el principal impedimento para la sucesión ecológica natural; de manera que, es necesario intervenir mediante programas de recuperación. El objetivo del presente trabajo es analizar las implicaciones socioambientales que se relacionan con la teoría y la práctica de la recuperación de minas de caliza en Yucatán. Los cinco capítulos que integran este documento contienen los resultados de un proceso de investigación bibliográfica sobre el tema. Se encontró que la restauración, la rehabilitación y el reemplazo son los tres enfoques de recuperación de canteras en Yucatán. La elección del enfoque y uso del sitio dependen de los objetivos acordados por las partes interesadas en el proceso de recuperación de la mina. El restablecimiento de la fertilidad del suelo es la acción prioritaria de los tres enfoques. Los principales factores que influyen en los proyectos de intervención son: la eficacia de los tratamientos *in situ*, el financiamiento, la normatividad legislativa, la voluntad política de los gobiernos locales, estatales y nacionales, los intereses particulares de las compañías mineras, la corrupción, los procesos participativos en la toma de decisiones y el monitoreo. La sobreexplotación de la piedra caliza pone en riesgo la persistencia de los servicios ecosistémicos y la capacidad productiva del Estado. Por lo tanto, la recuperación de las minas activas y abandonadas debe convertirse en una política pública prioritaria en Yucatán.

Palabras clave: restauración de canteras, explotación de materiales pétreos, manejo de recursos minerales, regulación minero-ambiental, minería a cielo abierto en Yucatán.

Résumé

L'extraction de calcaire dans l'état du Yucatan a augmenté ces dernières années en raison de la demande croissante d'énergie pour les matériaux en pierre destinés à l'industrie de la construction. Ce type d'exploitation à ciel ouvert entraîne la destruction totale de la végétation et du sol, ainsi que la perte de productivité du site. Le sous-sol fragmenté et sujet à l'érosion entrave la succession écologique, d'où la nécessité d'intervenir par le biais de programmes de récupération. L'objectif de cet essai est d'analyser les implications socio-environnementales liées à la théorie et à la pratique de la récupération des mines de calcaire au Yucatan. Les cinq chapitres qui composent ce document contiennent les résultats d'un processus de recherche bibliographique sur le sujet. Il a été constaté que la restauration, la réhabilitation et le remplacement sont les trois approches de la récupération des carrières au Yucatan. Le choix de l'approche et de l'utilisation du site dépend des objectifs convenus par les parties prenantes au processus de récupération des mines. La restauration de la fertilité des sols est l'action la plus prioritaire des trois approches. Les principaux facteurs qui influencent les projets d'intervention sont : l'efficacité des traitements *in situ*, le financement, les réglementations législatives, la volonté politique des gouvernements locaux, étatiques et nationaux, les intérêts particuliers des sociétés minières, la corruption, les processus décisionnels participatifs et le suivi des projets. La surexploitation du calcaire met en danger la persistance des services écosystémiques et la capacité de production de l'État. Par conséquent, la récupération des mines actives et abandonnées doit devenir une politique publique prioritaire au Yucatan.

Mots clés : restauration des carrières, exploitation du calcaire, gestion des ressources minerales, réglementation minière et environnementale, mines à ciel ouvert au Yucatan.

Índice

Agradecimientos ii

Resumen iii

Résumé iv

Índice v

Lista de cuadros vii

Lista de figuras viii

Lista de abreviaciones y acrónimos ix

Introducción 1

Capítulo 1 Antecedentes geológicos, históricos, económicos y sociales de la minería en Yucatán 4

1.1 Geología e historia de la minería en la región 4

1.2 Proceso extractivo e industrial de la caliza 6

1.3 Dinámicas económicas y sociales de la caliza 9

Capítulo 2 Impactos ambientales de la minería de caliza 12

2.1 Minería a cielo abierto en el paisaje kárstico 12

2.2 Impactos sobre el medio biótico 15

2.3 Impactos sobre el medio abiótico 17

2.4 Impactos de la industria cementera 20

2.5 Caducidad y abandono de las canteras 20

Capítulo 3 Marco normativo minero-ambiental a nivel internacional, nacional y estatal 22

3.1 Directrices mundiales para la restauración de paisajes degradados 22

3.2 Legislación minero-ambiental en México 25

3.3 Legislación minero-ambiental en Yucatán 29

3.4 Inconsistencias de la normatividad minero-ambiental 34
3.5 La falacia del desarrollo sostenible en la minería 40
Capítulo 4 Consideraciones técnicas de las prácticas recuperativas 45
4.1 Principales enfoques de recuperación 45
4.2 Procedimientos técnicos de un programa de recuperación 48
4.2.1 Planeación y diseño 48
4.2.2. Implementación 51
4.2.3 Monitoreo, evaluación y manejo adaptativo 55
4.5 Ineficacia de los programas de recuperación 56
Capítulo 5 Conservación de las selvas secundarias y su relación con la caliza ... 60
5.1 Revalorización del monte en Yucatán 60
Conclusiones 63
Referencias 65

Lista de cuadros

Cuadro 1. Especificaciones del programa de restauración de canteras de Yucatán, de acuerdo con la Norma Técnica Ambiental NTA-002-SEDUMA-10. Elaborado con información de DOEY (2010b)..... 32

Cuadro 2. Acciones prácticas y administrativas de la restauración de canteras de Yucatán, de acuerdo con la Norma Técnica Ambiental NTA-002-SEDUMA-10. Elaborado con información de DOEY (2010b). 33

Cuadro 3. Información ambiental y socioeconómica para la evaluación preliminar del contexto minero. Elaborado con información de Jiménez et al. (2006) y Gann et al. (2019). 50

Cuadro 4. Consideraciones para la selección de objetivos, el enfoque de recuperación y el uso de la cantera. Elaborado con información de Weiss (2004); Carabias et al. (2007); Otto (2009); McDonald et al. (2016); Gann et al. (2019)... 51

Cuadro 5. Tratamientos generales aplicables a los tres enfoques de recuperación de minas de caliza en Yucatán. Elaborado con información de Sarmiento (2008); Jiménez et al. (2006); Favas et al. (2018); Gann et al. (2019); Navarro-Cano et al. (2019)..... 54

Cuadro 6. Principales causas que conducen al fracaso de los proyectos de recuperación de minas en México, incluidas las minas de caliza en Yucatán. Elaborado con información de Montañez-Escalante et al. (2005); Jiménez et al. (2006); Carabias et al. (2007); Montañez-Escalante (2009); Góngora-Castillo (2010); Neri y Sánchez (2010); López-Barrera et al. (2017). 56

Lista de figuras

Figura 1. Cadena productiva de la caliza, desde la exploración del sitio minado hasta la venta de los productos transformados. Elaborado con información de SE (2018); Jiménez et al. (2006); Acevedo y Guerra (2005). 6

Figura 2. Principales impactos ambientales potenciales de la minería de roca caliza. Los efectos negativos sobre los medios biótico y abiótico del ecosistema se presentan en la naturaleza como una red interconectada, así que las categorías en este diagrama se distinguen sólo con fines esquemáticos. Elaborado con información de Langer (2001); Jiménez et al. (2006); Hernández-Jatib et al. (2014). 14

Figura 3. Acuerdos internacionales vigentes sobre restauración que México ha firmado y ratificado. Elaborado con información de Gann et al. (2019) y Fagan et al. (2020). 22

Figura 4. Regulación minero-ambiental en México. Se observa la normatividad relacionada con la minería y la restauración, así como las principales secretarías y comisiones federales vinculadas. Elaborado con información de Gamboa y Gutiérrez (2018); SE (2015); Conabio (2012); Carabias et al. (2007). 26

Figura 5. Regulación minero-ambiental en Yucatán. Se observa la normatividad relacionada con la minería y la restauración, así como las principales secretarías estatales vinculadas. Elaborado con información de DOEY (2010a, 2010b); Congreso del Estado de Yucatán (2011); SDS (2018); Ayuntamiento de Mérida (2019). 29

Figura 6. Representación esquemática de los tres principales enfoques de recuperación de minas de caliza en Yucatán. Se observa el ecosistema natural, el paisaje alterado por la minería y los usos potenciales de los sitios recuperados. Elaborado por Alberto Sosa Soltero y Arturo Cantón Ruz, basado en Favas et al. (2018) con información de Montañez-Escalante et al. (2005); DOEY (2010b); Góngora-Castillo (2010). 45

Figura 7. Etapas principales e intermedias que debe contener el programa de recuperación de minas. Elaborado con información de Gann et al. (2019) y Favas et al. (2018). 48

Lista de abreviaciones y acrónimos

ASF	Auditoría Superior de la Federación
Camimex	Cámara Minera de México
CDB	Convenio sobre la Diversidad Biológica
CMNUUC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
CNULD	Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación
Conabio	Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad
Conafor	Comisión Nacional Forestal
Conagua	Comisión Nacional del Agua
Conanp	Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas
Conapo	Consejo Nacional de Población
Copremia	Consultores en Prevención y Mitigación de Impactos Ambientales S.C.P.
DOEY	Diario Oficial del Estado de Yucatán
DOF	Diario Oficial de la Federación
Ecosur	El Colegio de la Frontera Sur
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
GLF	Global Landscapes Forum
IPBES	Plataforma Intergubernamental Científico-normativa sobre Diversidad Biológica y Servicios de los Ecosistemas
LGEEPA	Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente
MIA	Manifestación de Impacto Ambiental

OCMAL	Observatorio de Conflictos Mineros de América Latina
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PIB	Producto Interno Bruto
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
Profepa	Procuraduría Federal de Protección al Ambiente
REDD+	Reducción de Emisiones causadas por la Deforestación y la Degradación de los Bosques
SCT	Secretaría de Comunicaciones y Transportes
SDS	Secretaría de Desarrollo Sustentable
SE	Secretaría de Economía
Sedatu	Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano
Seduma	Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente
Semarnat	Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales
Sener	Secretaría de Energía
SER	Sociedad Internacional para la Restauración Ecológica
SGM	Servicio Geológico Mexicano
TLCAN	Tratado de Libre Comercio de América del Norte
UdeS	Université de Shebrooke
UICN	Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza
Unesco	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
USGS	United States Geological Survey
WBCSD	Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible

Introducción

El consumo de recursos minerales en el mundo ha aumentado de manera exponencial con el avance de la ciencia y la tecnología, el desarrollo económico, la expansión industrial, la aceleración de la urbanización y el crecimiento de la población (Sheoran et al. 2010). México produce 60 minerales energéticos, metálicos y no metálicos (SGM 2019) que constituyen satisfactores claves para el transporte, la salud, la vivienda, la alimentación, las telecomunicaciones, el desarrollo tecnológico y en general, para las necesidades cotidianas de la civilización posmoderna (Jiménez et al. 2006). La abundancia, diversidad y calidad de los depósitos minerales a lo largo del territorio de México han permitido la explotación de yacimientos desde tiempos prehispánicos y constituyen la base de los procesos de modernización en el país (Gamboa y Gutiérrez 2018).

Yucatán es uno de los principales estados productores de caliza y agregados pétreos en México (SGM 2019), debido a la naturaleza kárstica del subsuelo de la Península (Estrada-Medina et al. 2019). En vista de la creciente demanda de materiales para la construcción, la actividad minera en Yucatán ha aumentado en las últimas décadas (Montañez-Escalante 2009). El resultado es la apertura cada vez más frecuente de minas de roca caliza que se suman al legado de canteras en estado de abandono que se distribuyen en las selvas secas de Yucatán (Góngora-Castillo 2010). Las selvas secas son el segundo tipo de vegetación más extenso de México y ocupa el 8% de la superficie del país (Trejo 1998). En Yucatán, este tipo de vegetación se encuentra sujeto a fuertes perturbaciones de origen natural y antrópico que han provocado la fragmentación del paisaje kárstico y la reducción de la cubierta forestal en los últimos años (Andrade 2010).

La explotación de roca caliza en Yucatán se realiza a cielo abierto mediante técnicas de perforación del subsuelo y explosión con dinamita (Góngora-Castillo 2010). Para acceder a la roca, el ecosistema es destruido por completo, la topografía se altera, el suelo original es removido y la roca huésped queda expuesta a la erosión, por lo tanto, la productividad total del área disminuye (Jiménez et al. 2006). El suelo es remplazado por un sustrato calcáreo infértil, sin

materia orgánica y con baja o nula actividad microbiana (Lottermoser 2010), la cual es esencial para la nutrición de las plantas y la regulación de los ciclos biogeoquímicos (Khasa y Beaudoin 2015). El bajo potencial de regeneración natural de estos sitios causa que el restablecimiento del ecosistema vía sucesión ecológica sea un proceso muy lento, por lo tanto, es necesario intervenir (McDonald et al. 2006).

La mayor parte del material bibliográfico consultado para realizar el presente trabajo emplea las palabras restaurar y restauración, pues son las más extendidas, incluso en la literatura científica (Carabias et al. 2007; Jiménez et al. 2006; McDonald et al. 2006). El significado teórico de restauración hace referencia a las acciones encaminadas a restablecer las condiciones biológicas preexistentes en el sitio antes del disturbio (SER 2002). No obstante, el sentido práctico varía según los autores o los organismos de regulación y ejecución (Favas et al. 2018). Por ejemplo, las leyes mexicanas emplean casi de manera exclusiva la palabra restauración, aunque el contexto no haga referencia al sentido clásico y purista del concepto (DOF 1917, 1988, 1992, 2012, 2013, 2018; DOEY 1918, 2010a, 2010b, 2013). Esto causa confusión y falsas expectativas en los proyectos, ya que el objetivo de la intervención en espacios mineros no siempre es recrear el ecosistema destruido (Montañez-Escalante 2009).

En aras de la claridad y con el propósito de homogeneizar conceptos clave, en el presente escrito se utilizará el término recuperación, con excepción del capítulo 3 que versa sobre legislación minera. La recuperación se define como el conjunto de manipulaciones encaminadas a mejorar las condiciones biológicas de los sitios mineros e incrementar su calidad ambiental de acuerdo con los objetivos acordados por las partes interesadas (Favas et al. 2018). En Yucatán, los estudios sobre recuperación de minas de caliza son escasos, pese a los impactos ambientales del sector y su presencia histórica en el estado. Las principales colaboraciones son de Cobá (1998), Montañez-Escalante (2009), Montañez-Escalante et al. (2005) y Góngora-Castillo (2010). Estas investigaciones se centran en los aspectos biológicos de la recuperación de canteras con fines

productivos y en el proceso de extracción de la caliza. Con el fin de ofrecer un panorama integrador sobre los múltiples factores que intervienen en la recuperación de minas de caliza en Yucatán, se plantean los siguientes objetivos:

Objetivo general

Analizar las implicaciones socioambientales que se relacionan con la teoría y la práctica de la recuperación de minas de caliza en Yucatán.

Objetivos específicos

1) Describir el contexto geológico, histórico, económico y social de la minería de caliza en Yucatán.

2) Identificar los principales impactos potenciales de la minería de caliza sobre el ambiente.

3) Describir las características del marco normativo minero-ambiental que regula la recuperación de minas de caliza en Yucatán.

4) Describir las consideraciones técnicas de los enfoques de recuperación y los usos potenciales de las minas de caliza en Yucatán.

5) Explicar la relación entre la explotación de caliza y la conservación de las selvas secundarias de Yucatán.

Este documento se presenta en cinco capítulos, cada uno corresponde a un objetivo específico. El primero brinda un panorama general sobre los aspectos geológicos, históricos y económicos de la minería de caliza en Yucatán. El segundo analiza los impactos ambientales de la minería en el paisaje kárstico del estado. El tercero describe los compromisos ambientales internacionales asumidos por México, así como la legislación minero-ambiental nacional y en Yucatán. El cuarto profundiza sobre las prácticas específicas de recuperación de canteras y el último capítulo subraya la conservación y revalorización de las selvas secundarias que albergan las minas de caliza. Las últimas secciones corresponden a las conclusiones y referencias.

Capítulo 1 Antecedentes geológicos, históricos, económicos y sociales de la minería en Yucatán

1.1 Geología e historia de la minería en la región

La historia minera de Yucatán se centra en la explotación de materiales pétreos (Góngora-Castillo 2010). El subsuelo tiene su origen en los arrecifes coralinos y sedimentos marinos de los periodos terciario y cuaternario de la era Cenozoica que, al exponerse a la superficie, formaron la roca caliza (Estrada-Medina et al. 2019). La gran plataforma calcárea se compone de tres estratos: la roca consolidada, el *saskab* y la coquina (Espinosa et al. 1998). La coraza calcárea que conforma la roca consolidada conocida localmente como laja o *cháaltun* corresponde a afloramientos rocosos de extrema dureza, de un espesor aproximado de 3 m y constituye la principal superficie del relieve en gran parte del territorio (García y Graniel 2010). Las calizas blandas, conocidas como *saskab* en lengua maya, son un material blanco y quebradizo que corresponde a la roca no consolidada de textura arenosa (Estrada-Medina et al. 2019). Su consistencia sugiere que la cristalización de aragonito a calcita, un proceso necesario para la consolidación de la roca no ocurrió (Villasuso y Méndez 2000). El *saskab* favorece el desarrollo de las formas cársticas subterráneas (Duch-Gary 1991). La coquina o conchuela es una roca fosilífera encontrada por encima del acuífero, con un alto porcentaje de vacío por sus abundantes macroporos y en la cual se encuentran conchas de moluscos, principalmente bivalvos y gasterópodos (Estrada-Medina et al. 2019). Los tres estratos carbonatados han moldeado el paisaje kárstico de la península de Yucatán y son la base estructural de la industria de la construcción (Estrada-Medina et al. 2019).

El aprovechamiento de los materiales pétreos no renovables de Yucatán se remonta a los tiempos prehispánicos, como lo evidencian los innumerables vestigios arqueológicos (Góngora-Castillo 2010). Los mayas utilizaban el material pétreo calcáreo para elaborar una matriz cementante con fuertes propiedades aglutinantes (Díaz-Coutiño et al. 2001). Esta matriz se elaboraba a partir de las rocas calizas quemadas, molidas y enriquecidas con intrusiones de materiales

arcillosos para elaborar piezas básicas de construcción, largos caminos, depósitos de agua, estucos, morteros y concretos (Díaz-Coutiño et al. 2001). En términos técnicos actuales, el concreto maya podría definirse como un cemento crudo, ya que los hornos utilizados por esta civilización para tratar la caliza no lograban temperaturas superiores a los 900 °C, la cual es necesaria para que la piedra pierda su CO_2 y para que se formen los compuestos presentes en los cementos modernos (Díaz-Coutiño et al. 2001). Los mayas lograron un alto grado de estandarización de su matriz cementante que se expandió a las principales ciudades-estado, tal como lo demuestran estudios sobre la composición química y física del concreto muestreado en diferentes sitios de Mesoamérica (Díaz-Coutiño et al. 2001; Ramírez de Alba et al. 1999).

Durante la Colonia, los materiales calcáreos se utilizaron en la construcción de las edificaciones religiosas, civiles y militares de la corona española (Góngora-Castillo 2010). Muchas de estas obras fueron erigidas con piedras calizas provenientes de las construcciones mayas (Góngora-Castillo 2010). La mampostería, técnica de construcción basada en piedras de diversos tamaños apiladas y aglutinadas a manera de bloques, fue la forma básica de la construcción urbana colonial (Cobá 1998). Landa (1986) señalaba que “Yucatán es una tierra la de menos tierra que yo he visto, porque toda ella es una viva laja y tiene a maravilla poca tierra, tanto que habrá pocas partes donde se puede cavar sin dar en grandes bancos de lajas muy grandes. La piedra es muy buena para cal, de que hay mucha, y es cosa maravillosa que sea tanta la fertilidad de esta tierra sobre las piedras y entre ellas”. Los fragmentos de rocas tuvieron un papel destacado en las haciendas henequeneras y, en general, en las unidades domésticas de la época, ya que delimitaban, como hasta ahora, los predios por medio de cercas perimetrales hechas con piedras sobrepuestas llamadas albarradas (Cobá 1998).

La técnica de mampostería duró hasta la segunda mitad del siglo XX y fue desplazada por el sistema de bloque prefabricado (Cobá 1998). La coraza calcárea se usa cada vez menos en su forma original, ya que ahora se tritura para producir el llamado polvo de piedra, cuya función aglutinante se lograba en épocas

pasadas con *saskab* y cal como cementantes (Góngora-Castillo 2010). El *saskab* se utiliza hoy en día como material de relleno para caminos, carreteras y para darle firmeza a los pisos (Cobá 1998). La industria moderna de la construcción, que aún utiliza la caliza como material de base, ha diversificado los productos y agregados pétreos estructurales necesarios en cualquier obra arquitectónica (Cobá 1998). Polvo de piedra, grava, gravilla, cal, cemento, bloques, vigas, concretos premezclados, entre otros materiales, son ejemplos de los productos que ofrecen las grandes compañías como Cemex, Apasco, Predeco, Cemento Maya, Mitza, Mapsa y Procon en Yucatán. El comercio por parte de estas empresas representa el último eslabón de la cadena productiva de la caliza, cuya historia de extracción comienza en la selva seca de Yucatán, donde se localizan los bancos de materiales llamados canteras o *saskaberas* (Cobá 1998).

1.2 Proceso extractivo e industrial de la caliza

La cadena productiva de la caliza se compone de seis eslabones enmarcados en dos etapas principales: la extractiva y la industrial. La figura 1 esquematiza el proceso general y los componentes de ambas etapas.

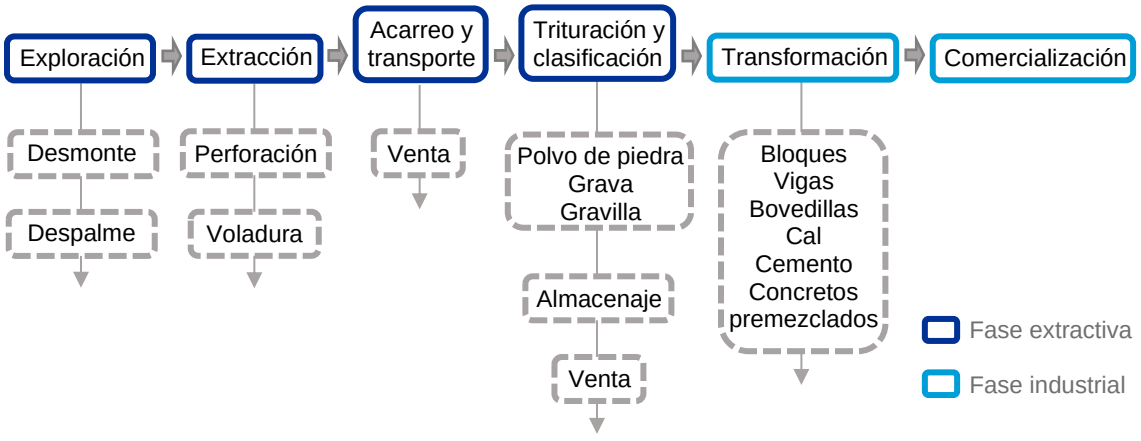

Figura 1. Cadena productiva de la caliza, desde la exploración del sitio minado hasta la venta de los productos transformados. Elaborado con información de SE (2018); Jiménez et al. (2006); Acevedo y Guerra (2005).

Exploración. La actividad minera comienza con la exploración del subsuelo mediante el reconocimiento general de un área extensa con el fin de identificar el

terreno con posibilidades de explotación rentable (Jiménez et al. 2006). Luego de la detección del área que será explotada, se determina con mayor precisión la extensión y el perímetro (Acevedo y Guerra 2005). Posteriormente se procede al desmonte, el cual consiste en la remoción total de la vegetación de la zona a minar (Jiménez et al. 2006). Luego se realiza el despalme o descapote, es decir, el retiro de la capa superficial de suelo que cubre el yacimiento (Acevedo y Guerra 2005). Esta etapa es con frecuencia ignorada cuando el suelo se retira junto con las rocas al momento de la extracción (Jiménez et al. 2006), lo cual causa que el material pétreo de interés se mezcle con la materia orgánica del suelo, acción que entorpece la calidad tanto del producto como de la materia orgánica (SE 2018).

Durante la exploración se observan los primeros acercamientos de las empresas con las comunidades humanas y, según sea el caso, puede derivar en respuestas positivas o negativas (Valladares de la Cruz 2017). No obstante, la mayoría de las veces existe una pobre relación entre empresa y comunidad porque el proceso informativo por parte de las mineras es pobre, incompleto y manipulado (Jiménez et al. 2016). Antes de ejecutar la fase de extracción, además del cumplimiento de la normatividad fiscal, laboral, salud y de seguridad social, es necesario realizar la Manifestación de Impacto Ambiental (MIA) ante las autoridades estatales y federales de medio ambiente (SE 2018).

Extracción. La fase de extracción se compone de dos subetapas, la barrenación que consiste en la perforación de la roca con retroexcavadoras, y la voladura que se refiere al uso de explosivos para fragmentar el material pétreo *in situ* (Jiménez et al. 2006). Es común observar prácticas de voladura secundaria conocidas como moneo y plasteo, en las que se hacen barrenos cortos y se aplican explosivos locales para reducir aún más las rocas de interés (SE 2018). Debido a que la extracción de minerales se ha tecnificado, el uso de maquinaria pesada de alta capacidad y el empleo de medios de transporte sofisticados exigen la demanda de mano de obra especializada (Cavioto 2019). En consecuencia, la generación de empleos, que representa la principal promesa beneficial de las empresas mineras, se ve disminuida porque las mineras adoptan la filosofía del capital intensivo, es

decir, se produce más con menos empleados y en menor tiempo (Jiménez et al. 2006). Esto reduce la cantidad potencial de personas locales que podrían ser contratadas durante la explotación, ya que no están capacitadas para operar la maquinaria (Jiménez et al. 2006).

Acarreo y transporte. Una vez que el material pétreo es extraído del banco, éste se embarca en camiones de volteo e inicia el transporte del material sin procesar hacia uno de los dos puntos siguientes: a) venta directa a granel a los propietarios de camiones de materiales o casas distribuidoras, b) o venta a una planta de trituración y clasificación que añade valor agregado mediante la venta de productos especializados de fácil acceso a los consumidores (SE 2018).

Trituración y clasificación. La caliza obtenida del proceso de extracción es de diversa granulometría, por lo que es sometida a procesos de trituración primaria y secundaria para uniformizar el tamaño de los fragmentos (Acevedo y Guerra 2005). La carga proveniente de la mina pasa a través de una quebradora, luego por una serie de mallas o cribas de diferentes aberturas (SE 2018). Los fragmentos con sobredimensión o que no atraviesan las cribas, pasan por un segundo equipo de trituración o quebradora y se regresan al circuito de entrada (SE 2018). Una vez que los productos se han clasificado con base en su granulometría, se almacenan en silos o tolvas que permiten el cargado directo en camiones, o bien, en montones apilados que requieren el traspaleo para su transporte (SE 2018). El destino del material clasificado puede ser la venta directa al consumidor o a las compañías que transforman el material pétreo (SE 2018).

Transformación. La roca caliza triturada es la base de numerosos materiales básicos para la industria de la construcción, de los cuales los más sobresalientes son el cemento y la cal (SE 2018). La producción mundial de cemento alcanzó los 4 100 000 000 de toneladas métricas en 2019 (USGS 2020), lo cual sitúa a la piedra caliza entre los principales minerales extraídos de la corteza terrestre. El porcentaje de caliza para la fabricación de cemento es variable y depende de la composición química de la propia caliza y de las materias primas utilizadas en su procesamiento, tales como arcillas, arena y mineral de hierro (Neri y Sánchez

2010). Con respecto a la cal, producto de la calcinación de la piedra caliza a altas temperaturas, existen tres variedades comerciales que se diferencian según sus propiedades fisicoquímicas y los fines de uso: cal viva, cal hidratada y cal hidráulica (SE 2014). La producción mundial de cal en el 2019 fue de 430 000 toneladas métricas (USGS 2020).

Comercialización. Los consumidores finales están representados por personas involucradas en obra civil, desde quienes realizan labores cotidianas de albañilería hasta las compañías constructoras que realiza obras de gran envergadura (SE 2018).

1.3 Dinámicas económicas y sociales de la caliza

En México existen minas en operación en casi todas las entidades federativas, pero la extracción actual se concentra en los estados del norte donde abundan los minerales metálicos (Jiménez et al. 2006). Tan sólo los estados de Chihuahua, Durango, Sinaloa, Sonora y Zacatecas albergan el 68% de las minas activas del país (Fundar 2018). No obstante, los materiales derivados de la roca caliza son de gran relevancia económica en el país, ya que constituyen la base la industria de la construcción (SE 2018). Los agregados pétreos y la caliza ocupan el segundo y el quinto lugar respectivamente en la lista de minerales con mayor valor monetario de la producción minera total en México (SGM 2019).

Yucatán está posicionado en el quinto lugar nacional en producción de caliza, el cuarto en sal y el quinto en yeso (SGM 2019), lo que demuestra la importancia y el crecimiento de la actividad minera en el estado. En 2018, la producción de minerales derivados de la roca caliza en Yucatán fue de 16 456 216 toneladas, lo que se tradujo en un valor total de producción de 3 374 403 629.30 pesos mexicanos (SGM 2019). La extracción se realiza en los bancos activos de materiales pétreos que conforman tres de las cuatro regiones mineras del estado (con excepción de la región costera Celestún-Ría Lagartos en la cual se extrae sal): a) Mérida-Valladolid, la cual abarca casi tres cuartas partes del estado; b) Sotuta, al centro-sur de Yucatán y c) Bacanchén, al sur poniente en la frontera con Campeche (SGM 2018). De acuerdo con el inventario de bancos de materiales de

la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, en el 2018 se registraron 116 minas activas de caliza en Yucatán (SCT 2018), aunque es probable que esta cifra oficial subestime la cantidad total de canteras, debido a los dos años transcurridos desde la publicación de los últimos resultados y a los sitios explotados de forma clandestina.

A pesar de que se desconoce el dato exacto sobre cuántas empresas mineras y de la industria de la construcción hay en Yucatán, se sabe que tanto las actividades extractivas como industriales han aumentado en los últimos años como consecuencia del crecimiento demográfico y económico del estado (Góngora-Castillo 2010). El incremento del número de habitantes se debe a dos factores, por un lado al crecimiento demográfico natural y, por el otro, al arribo de migrantes a través de movimientos inter e intra estatales, e internacionales (Pérez-Medina y Fargher 2014), sobre todo porque en años recientes Yucatán se ha convertido en un referente político y social en materia de seguridad (Gobierno del Estado de Yucatán 2018).

El crecimiento poblacional explosivo ha traído como consecuencia un desarrollo urbano horizontal desordenado en Mérida y su zona periurbana, en donde se observa la construcción constante de múltiples complejos habitacionales (Bolio 2014). La mayoría de las canteras se sitúan cerca de los centros poblacionales para rentabilizar los costos totales de transporte (Jiménez et al. 2006). El predominio de los intereses del mercado inmobiliario por encima de la rectoría del Estado de Yucatán y de la salvaguarda del interés público causa, además de vacíos urbanos y problemas sociales en la entidad (Bolio 2014), un alto consumo y una fuerte dependencia de los derivados de roca caliza. El problema es de escala, ya que para el 2050 se proyecta que la población de Yucatán alcance los 2 785 722 habitantes (Conapo 2019), lo cual supone un gran incremento en la demanda de minerales.

En Yucatán, en México y en general, en toda América Latina, los recursos minerales se encuentran dentro de los territorios de los pueblos indígenas, quienes lejos de recibir beneficios derivados del sector minero, sólo heredan los

problemas de toda índole que se derivan de esta actividad (Valladares de la Cruz 2017). Así, la minería no beneficia a las comunidades indígenas mayas de Yucatán ni de ninguna parte de México, pues las compañías mineras se llevan la mayor ganancia (Cárdenas 2013). Ni siquiera el gobierno que regula el capital natural y mineral del país resulta favorecido (Valladares de la Cruz 2017). De acuerdo con los datos aportados por la Auditoría Superior de la Federación (ASF), entre 2008 y 2013 las empresas mineras dejaron a México sólo 0.6% de los 1 200 000 000 de pesos que ganaron (Valladares de la Cruz 2017).

Fundada en 1986 en la Riviera Maya, la empresa subsidiaria mexicana Calizas Industriales del Carmen (Calica) del grupo estadounidense *Vulcan Materials Company*, exporta hoy en día a Estados Unidos 80% de su producción anual de piedra caliza (alrededor de 12 000 000 de toneladas), lo cual la convierte en la principal proveedora de material pétreo para la costa este de Estados Unidos (Sánchez 2014). El poder empresarial de Calica es un ejemplo de que la extracción y producción de calizas y agregados pétreos en la Península, ya no es sólo para satisfacer las crecientes demandas locales y regionales, sino también para responder a las exigencias del mercado internacional y generar divisas a través de la exportación. En Yucatán, hasta la fecha no se tiene registro de actividad extractiva con fines de venta al extranjero, pero no hay que descartar el hecho de que en un futuro este sector, sujeto a los acuerdos económicos entre países, gobiernos y proyectos como el tren maya, siga la misma línea de acción que Quintana Roo.

La orientación excesiva de los minerales no metálicos hacia la economía de mercado eclipsa uno de los aspectos más relevantes, preocupantes y desatendidos de la minería: los impactos ambientales (Jiménez et al. 2006). Santiago y Underwood (2016), en su documental “Erosión”, reportan y denuncian una serie de estragos ambientales causados por la empresa Calica en Quintana Roo, pero los reportes oficiales de esta compañía no contienen ningún tipo de información al respecto.

Capítulo 2 Impactos ambientales de la minería de caliza

2.1 Minería a cielo abierto en el paisaje kárstico

La minería superficial o también llamada a cielo abierto es la forma de explotación mineral más extendida en el mundo (Jiménez et al. 2006). El volumen total de producción obtenido por la minería a cielo abierto es superior a los procedentes de la minería subterránea y, aunque el tipo de minado abierto requiere de grandes capitales de inversión, los costos de operación son menores y las condiciones de seguridad para el personal suelen ser menos riesgosas a comparación del método subterráneo (Acevedo y Guerra 2005). La minería superficial se clasifica en dos categorías con base en los métodos de minado: en seco (o mecánico) y en húmedo (o acuoso) (Jiménez et al. 2006). La extracción húmeda incluye los métodos que dependen del agua o un líquido solvente para recuperar los minerales, ya sea por acción hidráulica o una solución de ataque, mientras que los métodos mecánicos operan en un ambiente seco para extraer los minerales del subsuelo, tales como los tajos para extraer minerales metálicos y las canteras para obtener rocas calizas (Jiménez et al. 2006).

Algunas canteras de Yucatán y otras partes del mundo son explotadas con ambos métodos de minado (Góngora-Castillo 2010). Una vez que se ha realizado la extracción de caliza en seco (sin llegar al freático), el sitio es perforado de nuevo en sentido vertical para continuar su aprovechamiento en húmedo, es decir, debajo del manto freático y, en ocasiones, sin un período de inactividad entre los ciclos extractivos (Langer 2001). Esta doble perforación es relativamente fácil en Yucatán, porque los depósitos de caliza, sobre todo los que están cerca del litoral, se encuentran a una baja profundidad (menos de 15 metros) (Bautista 2005). En consecuencia, aparte de los impactos ambientales asociados con las actividades mineras en general, la extracción intensiva de caliza causa una serie de impactos particulares en los terrenos kársticos (Parise 2010).

El karst constituye más del 20% de la superficie mundial terrestre y puede albergar depósitos minerales que contienen plomo, zinc, hierro y oro, como lo hacen otras

rocas, pero la mayoría de la extracción de recursos que se realiza en las zonas kársticas es de la roca misma (Langer 2001), tal como sucede en Yucatán. El karst es considerado uno de los entornos estratigráficos más susceptibles a los impactos de las actividades antrópicas, debido a sus características geológicas, morfológicas e hidrogeológicas (Parise 2010). Este hecho ocasiona que Yucatán sea una región vulnerable, ya que el 95% de su territorio es paisaje kárstico (Williams 2008). En virtud de su ubicación geográfica y sus condiciones altimétricas, Yucatán es también vulnerable a fenómenos hidrometeorológicos extremos como los huracanes y el retroceso progresivo de la línea de costa en el Golfo de México (García et al. 2010). En consecuencia, la intensificación de actividades extractivas en el estado amenaza la salud de los ecosistemas y sus recursos naturales susceptibles a la sobreexplotación (Góngora-Castillo 2010).

La intensidad de los impactos de la minería en el paisaje está determinada por varios factores, tales como el tipo de mineral explotado, su disponibilidad, la técnica empleada, la ubicación del yacimiento, su profundidad, la etapa del proceso, el tipo de subsuelo en el área, la cantidad de desechos generados, la inclinación de las pendientes y la capacidad de regeneración del ecosistema afectado (Fundar 2017). No obstante, todas las etapas del proceso extractivo impactan de manera directa o indirecta los ecosistemas desde el primer día en el que se abren los caminos de acceso (Jiménez et al. 2006). Los cambios ambientales son inmediatos, a veces irreversibles, y detonan un efecto cascada en la mina y en sus proximidades (Langer 2001). El efecto cascada altera los componentes de los medios biótico y abiótico del ecosistema, y se activa con las primeras labores de ingeniería, lo cual provoca un conjunto de respuestas en serie de los elementos sensibles del medio (Langer 2001). En la figura 2 se observa un diagrama que resume los principales impactos ambientales potenciales de la minería de roca caliza.

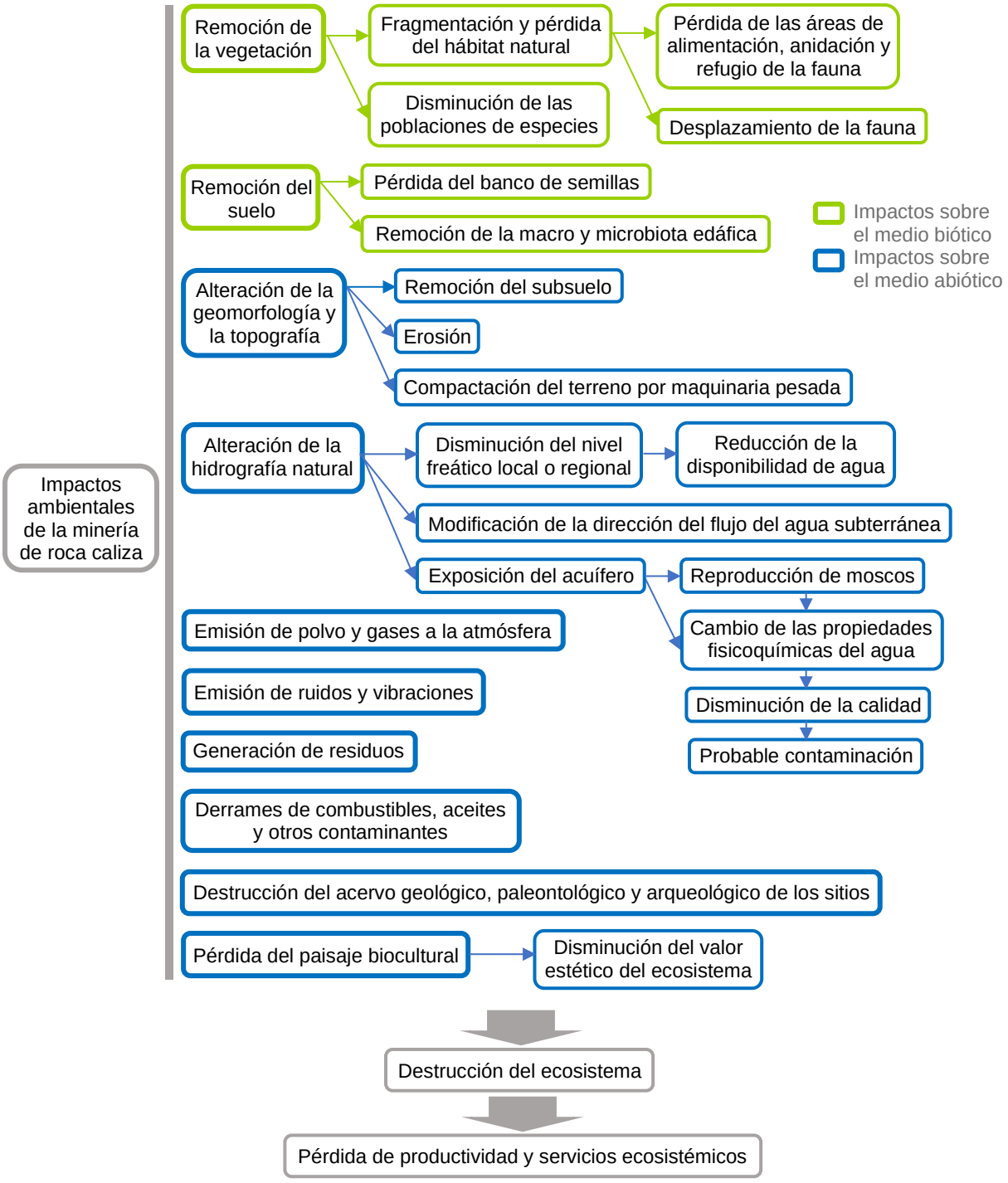

Figura 2. Principales impactos ambientales potenciales de la minería de roca caliza. Los efectos negativos sobre los medios biótico y abiótico del ecosistema se presentan en la naturaleza como una red interconectada, así que las categorías en este diagrama se distinguen sólo con fines esquemáticos. Elaborado con información de Langer (2001); Jiménez et al. (2006); Hernández-Jatib et al. (2014).

2.2 Impactos sobre el medio biótico

La primera operación necesaria para acceder al yacimiento de caliza es el descapote, es decir, la eliminación de las capas más externas: la vegetación y el suelo (Jiménez et al. 2006). La destrucción de la vegetación conlleva a la fragmentación y pérdida del hábitat natural de especies animales y vegetales, y por consiguiente, a la pérdida de servicios ecosistémicos (Primack et al. 2001). Esto obstaculiza los procesos de dispersión de semillas y frutos, limita la disponibilidad de alimento, reduce las áreas de anidación, afecta el éxito reproductivo de las especies, restringe las áreas de refugio de la fauna y limita los recursos forestales de las comunidades rurales (Primack et al. 2001). Lo anterior origina la reducción de las poblaciones de especies de fauna que no pueden salir del área de minado o el desplazamiento de aquellas que pueden trasladarse hacia otras áreas menos perturbadas (Jiménez et al. 2006). El desmonte también puede afectar la biodiversidad según la escala del proyecto, por ejemplo, si éste se realiza en áreas donde se encuentran especies endémicas (de distribución restringida) (Hernández-Jatib et al. 2014), con baja densidad poblacional, sin dispersión efectiva, con escasa variabilidad genética y con nichos especializados (Andrade, 2010).

El listado florístico más reciente reporta 203 especies endémicas para la porción mexicana de la Provincia Biótica Península de Yucatán (Campeche, Quintana Roo y Yucatán) (Carnevali et al. 2010). Las selvas secas de Yucatán son proveedoras de los siguientes servicios ecosistémicos: captura de carbono, regulación del clima a través de sus efectos en la temperatura y en la humedad relativa, regulación de la erosión y de la calidad del agua, provisión de alimentos, mantenimiento de la biodiversidad, suministro de leña, madera y otros materiales para construcción como el guano (*Sabal* sp.), plantas medicinales, bejucos y otras plantas que sirven como materia prima para elaborar artesanías, especies ceremoniales mayas, especies ornamentales, resinas, aceites esenciales, paisajes estéticos, y plantas nectapoliníferas para la apicultura y meliponicultura de la región (Chan-Dzul 2010). Aunque las poblaciones de maderas preciosas son más comunes en Quintana

Roo, Yucatán cuenta con la presencia de especies maderables de valor económico y cultural, tales como *Lysiloma latisiliquum*, *Piscidia piscipula*, *Brosimum alicastrum, Metopium brownei, Platymiscium yucatanum, Bursera simaruba*, *Guaiacum sanctum*, entre otras (Rebollar et al. 2002).

Otro de los impactos ambientales de las canteras es la alteración de la composición y estructura del suelo, o incluso su completa desaparición (Valdez-Hernández et al. 2019). El suelo es vital en los ecosistemas terrestres, ya que regula los ciclos biogeoquímicos y permite el intercambio de materia y energía entre la litósfera y la atmósfera (Bautista 2005). La remoción de la pedósfera implica la destrucción de millones de organismos que componen la macro y microbiota edáfica, como virus, bacterias, protozoarios, invertebrados de diversos *phyla*, hongos y algas (Bautista 2005). Junto con la materia orgánica se pierde el banco de germoplasma vegetal formado por reservas de semillas maduras, viables y que permanecen inactivas en el suelo durante varios años (Zhang y Chu 2013). La capa superficial del suelo puede ser removida antes o durante la extracción de la roca (una vez retirada la vegetación); si es antes de la perforación, el suelo suele apilarse para su almacenaje en montículos cerca del borde del área de minado (Jiménez et al. 2006).

El suelo no es considerado ni apreciado como los demás recursos naturales (agua, selvas, yacimientos minerales) porque no es un bien directamente consumible y también porque existe la creencia común pero errónea de que los suelos son renovables a escala humana (Zinck 2005). Sin embargo, la formación de un suelo es un proceso lento que dura cientos o miles de años, por lo que se considera un recurso no renovable (Bautista 2005). Su degradación por actividades productivas y extractivas ha ido en aumento, lo que causa problemas ambientales de tipo global, regional y local (Bautista 2005). Esta situación es particularmente alarmante en Yucatán porque la geología superficial del estado se caracteriza por la existencia de suelos de escasa profundidad (20 cm) en 80% del territorio (García y Graniel 2010).

2.3 Impactos sobre el medio abiótico

La topografía del terreno donde se establecen las canteras se altera a medida que se extiende el clareo de grandes áreas para la mina, por la acumulación de escombros y desechos, por la construcción de vías de acceso y, en algunos casos, por la instalación de pequeñas plantas de cribado o procesamiento de materiales (Bartz 2015). El principal impacto geomorfológico es la remoción de la roca calcárea, lo que resulta en la destrucción del subsuelo kárstico (Langer 2001). La intensidad del impacto depende del tamaño de la cantera y su ubicación con respecto al paisaje general y las formas del terreno local (Langer 2001). Los cambios en la topografía y geomorfología natural aumentan los procesos de erosión hídrica y eólica, cuya magnitud depende de la longitud e inclinación de las pendientes de las laderas, y la frecuencia e intensidad de las lluvias y el viento (Jiménez et al. 2006).

Otra de las consecuencias de la extracción de caliza en Yucatán es la exposición del manto freático, cuya profundidad varía desde 8 m al norte de la sierra de Ticul, 15 m al pie de esta, hasta pocos metros en el litoral costero (Graniel 2010). Esto ocasiona que hasta las extracciones más cuidadosas y menos ambiciosas tengan probabilidades de llegar al acuífero, sobre todo porque las principales regiones mineras de Yucatán (Mérida-Valladolid y Sotuta) se localizan en la porción centro-norte del estado donde abundan suelos someros (Bautista 2010). A pesar de la ausencia de corrientes superficiales, en Yucatán existe una gran disponibilidad de agua porque parte de la precipitación pluvial se evapora y transpira, y el resto se infiltra al manto a través de los conductos cársticos de las calizas, de manera que la recarga del acuífero supera la extracción (Graniel 2010). No obstante, la alta permeabilidad del suelo permite una conexión directa entre la superficie y el acuífero subyacente, lo que provoca que el agua subterránea sea vulnerable a la contaminación (Gutiérrez et al. 2014).

La erosión y el lavado superficial de polvos, arcillas, residuos, aceites, combustible y basura pueden causar un cambio desfavorable en las propiedades fisicoquímicas del acuífero expuesto y, por ende, una disminución de la calidad del

agua (Langer 2001). Aun cuando el gradiente hidráulico en Yucatán es muy bajo, de 5-10 mm/km (Graniel 2010), hay probabilidades de que los contaminantes, incluidos los patógenos, sean transportados largas distancias sin ser filtrados por completo (Langer 2001). También existe el riesgo de que los contaminantes desemboquen en los cuerpos de agua litorales y ocasionen daños al ecosistema en su conjunto (Pech-Pool y Ardisson 2010). El agua de lluvia que se integra al acuífero sigue diferentes trayectorias de flujo controladas por el desarrollo y evolución del karst profundo (Bautista et al. 2005), pero la destrucción del subsuelo calizo por la minería puede modificar la ruta natural de recarga del agua subterránea (Langer 2001). Las variaciones en la disponibilidad del agua se deben a la estacionalidad de la precipitación pluvial, y al tipo y profundidad del subsuelo calcáreo (Graniel 2010), por lo tanto, la extracción de calizas podría disminuir el nivel freático local o regional, y reducir la disponibilidad de agua.

La principal fuente de contaminación del aire en la minería de caliza es la emisión de nubes de polvo arrojado por las perforaciones, la voladura, el tráfico de camiones de carga que transitan por caminos no pavimentados y el uso de maquinaria pesada durante la extracción (Hernández-Jatib et al. 2014). El polvo es uno de los impactos más visibles durante la fase de explotación de las canteras y es transportado por el viento a distancias variables según las corrientes de aire, la humedad, la estación del año y la magnitud de las operaciones mineras (Langer 2001). Las altas concentraciones de polvo pueden causar daños a la salud pública, tanto a los trabajadores de la mina como a los habitantes de las comunidades cercanas (Favas et al. 2018). El polvo, las tasas de deposición y los impactos potenciales tienden a disminuir lejos del banco de materiales (Langer 2001). Otros gases producidos son aquellos que provienen de la quema de combustible de la maquinaria especializada y de los vehículos que transportan el material extraído (Jiménez et al. 2006).

La contaminación por ruido es otra característica de los bancos de materiales (Langer 2001). Las explosiones que pueden ocurrir con frecuencia variable, además de ruido, también producen vibraciones en el suelo (Jiménez et al. 2006).

Los estallidos mal diseñados o mal controlados pueden provocar que las rocas se proyecten a grandes distancias (rocas sueltas), lo que representa una fuente de peligro y de accidentes (Langer 2001). Asimismo, las operaciones de perforación, carga y acarreo también originan ruido (Jiménez et al. 2006). La magnitud de los impactos del ruido depende de la profundidad y el tipo de roca a detonar, la topografía, la cantidad de explosivos empleados, la frecuencia de las detonaciones, las condiciones atmosféricas específicas, la localización del sitio y la cantidad de maquinaria y camiones que operan (Jiménez et al. 2006). Las barreras topográficas y las áreas con vegetación pueden proteger y absorber el ruido (Langer 2001).

Además de perturbar el entorno biológico y geohidrológico, la apertura de bancos de materiales también implica la pérdida del patrimonio cultural tangible (Hernández-Jatib et al. 2014). El paisaje kárstico de Yucatán contiene valiosos registros paleontológicos y arqueológicos en sus construcciones, grutas, cuevas, cenotes y *sakbes* (García y Graniel 2010). Estos ambientales representan los sitios ideales para realizar investigaciones científicas sobre las interacciones de los grupos humanos con el ambiente de la Península en el pasado (Götz 2013; Cabadas-Báez et al. 2018; Islebe et al. 2018). El paisaje kárstico también alberga evidencia histórica material sobre las épocas colonial y henequenera de la Península (Góngora-Castillo 2010; Ruiz y Arellano 2010). A diferencia de un ecosistema que puede ser restaurado, la destrucción del acervo cultural por actividades mineras representa la pérdida de información potencial que no puede ser recuperada (Hernández-Jatib et al. 2014).

La pérdida irreversible del patrimonio biocultural también conlleva a la disminución del valor estético del paisaje (Hernández-Jatib et al. 2014). Los impactos visuales están asociados a la introducción de elementos artificiales y discordantes, como excavadoras, inmuebles y caminos que modifican la estructura natural del paisaje local (Favas et al. 2018). Al cierre de las canteras, el entorno resultante está compuesto por parches de vegetación de la selva baja y mediana del estado, montículos de desechos conformados por materia orgánica mezclada con piedras

y polvo, y numerosas oquedades de gran extensión con apariencia desolada, estéril y expuestas a la erosión (Góngora-Castillo 2010).

2.4 Impactos de la industria cementera

El cemento es el insumo esencial en la producción de concreto, el material más usado en construcción y la segunda sustancia más utilizada en el planeta después del agua (Hanle et al. 2006). La piedra caliza es la principal materia prima para la elaboración del cemento, por lo que la mayoría de las plantas productoras están situadas cerca de las canteras (Gibbs et al. 2001). Hay tres aspectos de la producción de cemento que generan emisiones de CO_2 (Andrew 2018). El primero es la reacción química involucrada en la producción del principal componente del cemento, el *clinker*, ya que la piedra caliza ($CaCO_3$) se descomponen en cal (cal) y CO_2 por la acción del calor (Andrew 2018). La segunda fuente de emisiones es la quema de combustibles fósiles (gas y carbón) para generar la energía necesaria para calentar las materias primas a más de 1 000 °C (Andrew 2018). El tercer aspecto tiene su origen en las emisiones provenientes de la electricidad que consumen los equipos durante las operaciones de fabricación (Andrew 2018). En total, la suma de emisiones de la industria cementera contribuye hasta en un 8% de las emisiones globales de CO_2 (Andrew, 2018), uno de los gases invernadero que, junto con el metano, contribuyen en mayor medida al calentamiento global. Al panorama anterior se suman los impactos hídricos que caracterizan la producción de concreto, ya que se utiliza agua a lo largo de la cadena productiva en la que se emiten sustancias tóxicas (Gerbens-Leenes et al. 2018).

2.5 Caducidad y abandono de las canteras

Debido a que los minerales son recursos no renovables, la vida operativa de las minas es finita y la búsqueda de nuevos yacimientos de caliza es una constante del sector minero (Jiménez et al. 2006). Asimismo, la apertura de una mina implica el comienzo de otras más, pues una vez detectado un yacimiento importante existen mayores probabilidades de encontrar otros en la cercanía (Jiménez et al. 2006). Algunos proyectos del gobierno estatal de Yucatán y de la Secretaría de

Comunicaciones y Transportes consideran, aparte de la construcción de nuevas carreteras e infraestructura, la apertura de canteras cerca de los sitios de construcción (Montañez-Escalante et al. 2005).

Además de los efectos negativos derivados directamente de la explotación de las canteras, se presentan otras consecuencias después de la extracción, cuando las minas se abandonan y se convierten en tiraderos clandestinos de basura (Góngora-Castillo 2010). Estos vertederos de desechos causan la contaminación del subsuelo y del acuífero, generan malos olores, lixiviaciones con patógenos, fauna nociva como moscos y ratones, y en general, condiciones de elevada insalubridad para las poblaciones circundantes (Parise 2010; Jiménez et al. 2006). De esta manera, en Mérida y sus alrededores y en la mayoría de los municipios del estado, se han formado abundantes canteras inactivas, perturbadas y sin ninguna acción para recuperarlas (Góngora-Castillo 2010).

En Yucatán no existen mapas ni inventarios completos y actualizados que describan la cantidad de canteras activas y abandonadas, su ubicación y la superficie total afectada por esta actividad económica. La ausencia de un registro oficial se debe a los siguientes razones: a) desinterés y negligencia por parte de las autoridades estatales y federales; b) las canteras que iniciaron su explotación antes de la promulgación de la primera Ley de Protección al Ambiente del Estado de Yucatán (1989) se consideran exentas de su cumplimiento, por lo que son ignoradas; y por último c) hay numerosos sitios que se explotan en forma clandestina y son difíciles de detectar (Góngora-Castillo 2010).

Capítulo 3 Marco normativo minero-ambiental a nivel internacional, nacional y estatal

3.1 Directrices mundiales para la restauración de paisajes degradados

La agenda diplomática internacional contiene múltiples acuerdos que proponen proteger la biodiversidad, mejorar la salud de los ecosistemas, manejar los recursos naturales bajo un enfoque hipotético de sostenibilidad y restaurar a gran escala los paisajes degradados por diversas actividades económicas como la minería (Gann et al. 2019). La figura 3 muestra un diagrama con las principales iniciativas mundiales de restauración que México ha firmado y ratificado.

Figura 3. Acuerdos internacionales vigentes sobre restauración que México ha firmado y ratificado. Elaborado con información de Gann et al. (2019) y Fagan et al. (2020).

El Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB) de las Naciones Unidas (2010) está conformado por el Plan Estratégico para la Diversidad Biológica 2011-2020 y las 20 metas globales de Aichi. La meta 14 manifiesta que la restauración ecológica es fundamental para salvaguardar los biomas que proporcionan servicios ecosistémicos esenciales como el agua (ONU 2010). Por su parte, la meta 15 asegura la restauración de al menos 15% de los ecosistemas degradados

para el 2020 (ONU 2010). Las 193 partes comprometidas en el CDB adoptaron un plan de acción a corto plazo en el 2016 para intensificar los esfuerzos necesarios para alcanzar las metas de Aichi para finales del 2020 (CDB 2016).

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas (2015) para 2030 plantean la restauración de los ecosistemas marinos y costeros (objetivo 14), así como de los bosques y demás ecosistemas terrestres degradados (objetivo 15). En 2015, 193 países aprobaron el programa actualizado que se tituló Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. En esta nueva agenda se declaró que la conservación y la restauración de los ecosistemas en el mundo es esencial para lograr el fin de la pobreza (objetivo 1), hambre cero (objetivo 2), salud y bienestar (objetivo 3), agua limpia (objetivo 4), producción y consumo responsables (objetivo 12), y los demás objetivos (ONU 2015).

La Asamblea General de las Naciones Unidas declaró 2021-2030 la década para la restauración de ecosistemas en apoyo a los ODS y otras iniciativas internacionales (PNUMA 2020). Además de restaurar los ecosistemas en el mundo, el objetivo es que los paisajes participantes se comprometan más a prevenir y detener la degradación (PNUMA 2020). Los organismos comisionados para implementar y monitorear los programas son el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), *Global landscapes Forum* (GLF), y la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) (Gann et al. 2019).

La Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (CNULD) en los países afectados por la sequía grave o la desertificación promueve la restauración y rehabilitación de las tierras áridas y semi áridas en 2018-2030 (ONU 2007a). Las 197 partes del Convenio se comprometen a elaborar y aplicar medidas a largo plazo, que se centren en el aumento de la productividad de las tierras, la rehabilitación, la conservación y el aprovechamiento sostenible de los recursos de tierras y recursos hídricos. El fin último del convenio es mejorar las condiciones de vida de las poblaciones rurales a nivel comunitario con la

cooperación de las organizaciones no gubernamentales y locales, y la participación de mujeres y jóvenes (ONU 2007b).

La Plataforma Intergubernamental Científico-Normativa sobre Diversidad Biológica y Servicios de los Ecosistemas (IPBES) (2019) es un organismo intergubernamental que proporciona a los gobiernos, al sector privado y a la sociedad civil evaluaciones científicas, actualizadas e independientes sobre el estado de la biodiversidad del planeta y los servicios ecosistémicos, a fin de que puedan adoptar decisiones mejor fundamentadas en los planos local, regional e internacional (IPBES 2016). La plataforma brinda recomendaciones para rehabilitar y restaurar las tierras degradadas, e identifica estrategias de gestión para reducir las consecuencias ambientales de las actividades económicas. La Unesco participa en la plataforma como organismo especializado del sistema de Naciones Unidas y ha fomentado la inclusión de los valores culturales en las evaluaciones sobre biodiversidad (IPBES 2019).

El Desafío de Bonn es un esfuerzo global que busca restaurar 150 000 000 de hectáreas de tierras degradadas para el 2020 y 350 000 000 de hectáreas para el 2030. La base del desafío es el enfoque de la Restauración del Paisaje Forestal (FLR) que tiene por objetivo restaurar la integridad ecológica y mejorar el bienestar humano a través de paisajes multifuncionales (UICN 2017). En México, los reportes oficiales del 2018 indican que de las 700 000 hectáreas comprometidas en Quintana Roo, 170 944 se encuentran bajo restauración (UICN 2018).

En América Latina, la iniciativa 20 × 20 busca restaurar 20 000 000 de hectáreas de tierra degradada para el año 2020 (Instituto de Recursos Mundiales 2017). México se comprometió a restaurar 8 500 000 hectáreas (UICN 2014), pero no se cuenta con reportes oficiales actualizados de los avances. También se han propuesto actividades de restauración adicionales como parte de los proyectos Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación de los Bosques (REDD+), y de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) (Gann et al. 2019).

3.2 Legislación minero-ambiental en México

El marco normativo que regula las actividades de exploración, extracción, beneficio y cierre en las minas de México es producto de un período de apertura comercial y reformas estructurales de la década de los noventa (Cavioto 2019). La Ley Minera vigente fue promulgada en 1992, fecha que coincide con la firma del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN) por Carlos Salinas de Gortari y con la reforma del artículo 27 constitucional, en la que se retiró el carácter inalienable de la propiedad social de la tierra y se canceló el mandato de reparto de tierras correspondiente a la reforma agraria (Cavioto 2013). En la práctica, este cambio jurídico representó la entrega de concesiones mineras a capitales extranjeros y la consecuente apertura de grandes proyectos de inversión (Cavioto 2019).

La Ley Minera no refiere a la caliza ni a sus agregados pétreos porque son considerados minerales no concesibles, es decir, sustancias que no requieren una concesión federal para ser explotadas (artículo 5) (DOF 1992a). Los minerales no concesibles son explotados a cielo abierto y su regulación depende de los permisos expedidos por los gobiernos estatales, por lo que están exentos de pagos federales por derechos mineros y de las demás disposiciones que dicta la Ley Minera. No obstante, los materiales calizos están sujetos al cumplimiento de la legislación aplicable en aspectos técnicos, laborales, ambientales y sociales, tanto a nivel federal como estatal (SE 2018).

En México existen leyes, normas oficiales y otros instrumentos regulatorios ambientales que hacen referencia a la restauración ecológica de zonas degradadas por actividades extractivas. La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) constituye el documento con más estipulaciones legales sobre restauración, pues el tema es abordado 60 veces en todo el escrito (DOF 1988). La figura 4 presenta un resumen esquemático de la regulación mexicana en materia minero-ambiental, y de las principales dependencias de gobierno federal que tienen incidencia en el sector.

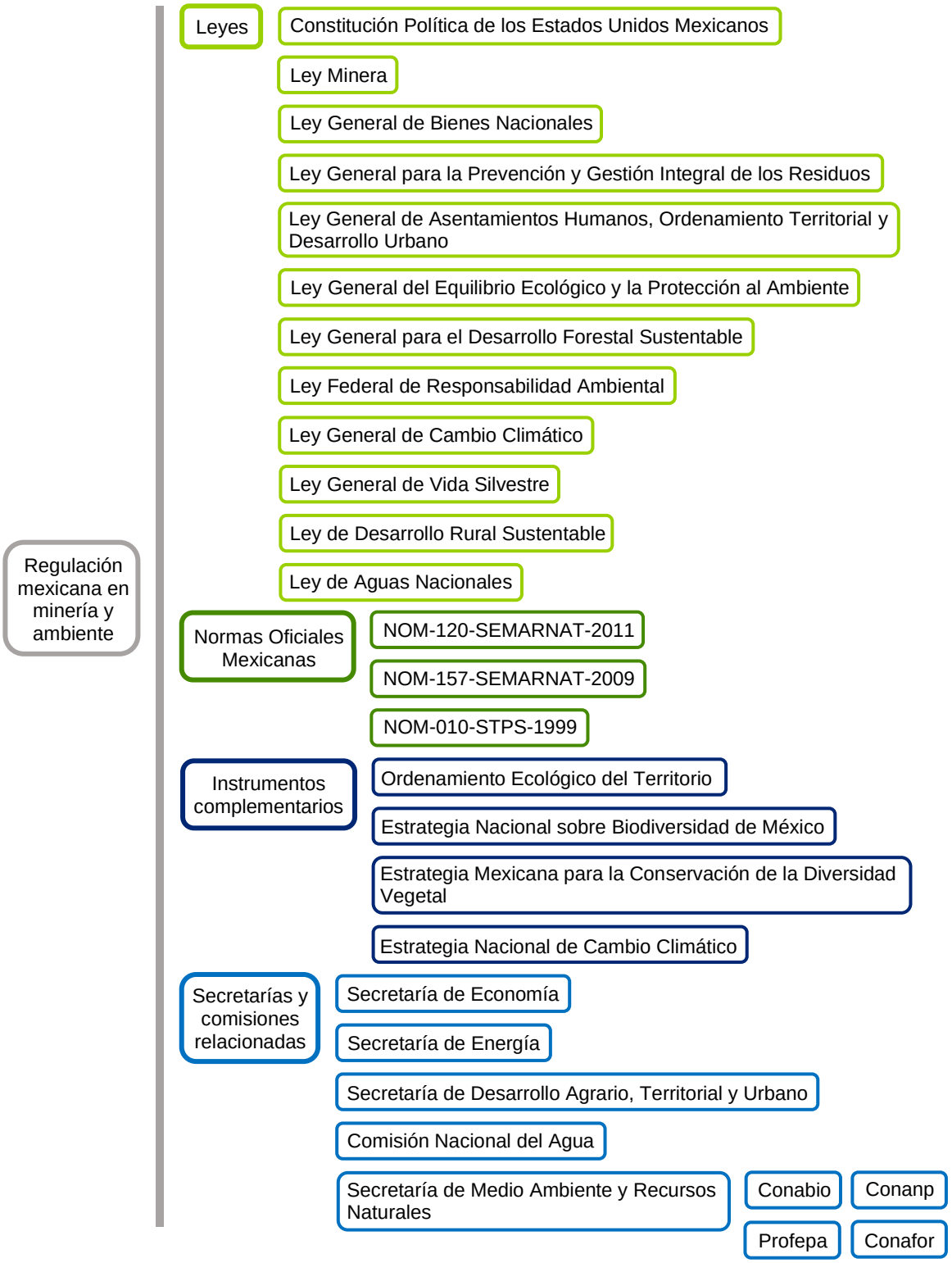

Figura 4. Regulación minero-ambiental en México. Se observa la normatividad relacionada con la minería y la restauración, así como las principales secretarías y comisiones federales vinculadas. Elaborado con información de Gamboa y Gutiérrez (2018); SE (2015); Conabio (2012); Carabias et al. (2007).

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos establece el marco de referencia más general para la conservación y la restauración del patrimonio natural, y remite a las leyes secundarias la regulación de las acciones (Carabias et al. 2007). La Constitución decreta que el Estado a) posee el dominio inalienable y directo sobre los recursos naturales, incluidos los minerales (artículo 27); b) es quien reglamenta el aprovechamiento de los recursos naturales susceptibles de apropiación, con el objetivo de garantizar su conservación (artículo 27); c) y es quien otorga concesiones para la explotación, uso y aprovechamiento social de bienes de dominio de la Federación (artículo 28) (DOF 1917).

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) faculta a los órdenes de gobierno para que supervisen las actividades extractivas y el cumplimiento de las estipulaciones ambientales (artículos 153, 168 y 203). En su artículo 28 y en el reglamento correspondiente, la LGEEPA concierta las especificaciones sobre la evaluación de impacto ambiental para quienes realicen cambios de uso del suelo en áreas forestales, selvas y zonas áridas con fines económicos como la exploración y explotación minera (DOF 1988). La evaluación debe describir las obras que se realizarán, su impacto en el ambiente y las acciones preventivas y de mitigación necesarias para evitar y reducir al mínimo los desequilibrios ecológicos (DOF 2000a).

Otras leyes relacionadas con la protección ambiental y la restauración son la Ley General para el Desarrollo Forestal Sustentable (2001), Ley General de Vida Silvestre (2000), Ley Federal de Responsabilidad Ambiental (2013), Ley General de Cambio Climático (2012) y Ley de Desarrollo Rural Sustentable (2001), Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (2003), Ley General de Bienes Nacionales (2004), Ley de Aguas Nacionales (1992), Ley General de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano (2016), NOM-120-SEMARNAT-2011, NOM-010-STPS-1999 y NOM-157-SEMARNAT-2009. El cumplimiento de estos estatutos legales es supervisado por la Secretaría de Economía (SE), Secretaría de Energía (Sener), Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (Sedatu), Comisión Nacional del Agua

(Conagua) y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) a través de sus comisiones intersectoriales: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio), Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (Profepa), Comisión Nacional Forestal (Conafor) y Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp).

Existen herramientas federales de gestión ambiental cuyo objetivo es ayudar al cumplimiento de los trabajos de restauración en México. Por ejemplo, el Ordenamiento Ecológico del Territorio es un instrumento de planeación ambiental que busca regular las actividades productivas, el cambio de uso de suelo y el manejo sustentable de recursos forestarles a partir del análisis de las tendencias de deterioro y el aprovechamiento potencial de los recursos naturales (DOF 1988). El ordenamiento puede ser de tipo general, regional o marino, y en las tres modalidades se opera mediante unidades de gestión ambiental (DOF 1988). Cuando el ordenamiento es de tipo general, el gobierno federal es quien formula, ejecuta y evalúa el programa de regionalización ecológica para identificar las áreas sujetas a ordenamiento, es decir, se definen las áreas de aptitud sectorial en las que se pueden realizar actividades económicas productivas y las áreas de atención prioritaria que deben estar sujetas a lineamientos ecológicos de restauración. A pesar de que existe cierto grado de obligatoriedad para aplicar el ordenamiento ecológico, el marco legal es limitado y no se puede exigir su aplicación a ningún gobierno o particular (Carabias et al. 2007).

La Estrategia Nacional sobre Biodiversidad de México (2016), la Estrategia Mexicana para la Conservación Vegetal (2012) y la Estrategia Nacional de Cambio Climático (2013) son iniciativas ambientales de la agenda política que ayudan al cumplimiento de los compromisos internacionales y contienen líneas de acción, criterios metodológicos y metas vinculadas a la restauración ecológica. Por ejemplo, el tercer objetivo de la Estrategia Mexicana para la Conservación de la Diversidad Vegetal establece restaurar el 50% de los ecosistemas degradados en México para 2030 (Conabio 2012). No obstante, no hay reportes oficiales disponibles sobre los avances de esta iniciativa.

3.3 Legislación minero-ambiental en Yucatán

Existen disposiciones estatales y municipales que regulan, mediante fundamentos legales y normativos propios, las actividades económicas regionales que impactan el ambiente, como la minería de roca caliza en Yucatán. El artículo 86 de la Constitución Política del Estado de Yucatán establece que el Estado, por medio de sus poderes públicos, garantiza: a) que toda persona goce de un ambiente ecológicamente equilibrado, b) la protección de los ecosistemas que conforman el patrimonio natural de Yucatán, c) así como el uso racional de los recursos naturales de la entidad para alcanzar el desarrollo sostenido (DOEY 1918). La figura 5 muestra un diagrama del marco normativo minero-ambiental de Yucatán y de las principales secretarías estatales relacionadas.

Figura 5. Regulación minero-ambiental en Yucatán. Se observa la normatividad relacionada con la minería y la restauración, así como las principales secretarías estatales vinculadas. Elaborado con información de DOEY (2010a, 2010b); Congreso del Estado de Yucatán (2011); SDS (2018); Ayuntamiento de Mérida (2019).

Ley de Protección al Medio Ambiente del Estado de Yucatán garantiza a) proteger los ecosistemas del estado, con el fin de regular y evitar efectos nocivos de origen antropogénico y natural (artículo 1); b) restaurar el equilibrio de los ecosistemas y prevenir los daños que se puedan ocasionar, de tal forma que haya compatibilidad entre la obtención de beneficios económicos y la conservación de los recursos naturales y del ambiente (artículo 1); c) atender los asuntos que afecten el equilibrio ecológico en el Estado de manera coordinada con la federación y los municipios (artículo 6); d) regular las actividades que puedan constituir un riesgo para el equilibrio de los ecosistemas (artículo 90); e) y asegurarse que quienes realicen actividades que afectan el equilibrio ecológico estén obligados a prevenir o reparar los daños que causen y asumir los costos que dicha afectación implique (DOEY 2010a).

Respecto a la minería de calizas, la ley ambiental del estado establece que a) las personas físicas o morales que pretendan realizar la explotación, extracción, transformación y tratamiento de minerales no señalados en la Ley Minera (como la caliza) están obligadas a adherirse a lo decretado en esta ley (artículo 32); b) corresponde a la Secretaría de Desarrollo Sustentable (SDS, antes Seduma) vigilar que los responsables de la exploración, explotación y/o aprovechamiento de los recursos minerales, cumplan con las disposiciones que sobre la materia señala esta ley, su reglamento y demás preceptos legales aplicables (artículo 55); c) la SDS vigilará que el aprovechamiento de canteras, piedras, *saskab*, o cualquier tipo de suelo, yacimientos o depósitos de arena fuera de la zona federal marítima terrestre, se realice con sujeción a los estudios que demuestren que no alterarán el medio ambiente (artículo 56); d) la SDS vigilará que en el aprovechamiento de los minerales o substancias no reservadas a la federación, se eviten graves alteraciones topográficas, la contaminación del agua y se considere la protección de los suelos, la flora y fauna silvestres (artículo 63) (DOEY 2010a).

En cuanto a la restauración de sitios mineros, la ley estatal menciona que quienes desarrollen actividades relacionadas con la exploración, explotación, extracción y aprovechamiento de materiales o realicen obras que contaminen o degraden los

suelos, están obligados a a) fomentar prácticas y aplicar tecnologías que mitiguen o eviten los impactos ambientales (artículo 57); b) implementar programas de restauración, rehabilitación o remediación de las áreas utilizadas, o en su caso, compensar el daño, de conformidad con el programa de abandono del banco de materiales (artículo 57); c) y salvaguardar los bancos y canteras mediante obras de contención, protección y estabilización de los taludes que resulten (artículo 57) (DOEY 2010a).

La ley ambiental de Yucatán también dispone que a) la SDS solicitará a los responsables de la exploración, explotación y/o aprovechamiento de recursos minerales, la presentación de un programa de restauración con las medidas necesarias para implementar en el área utilizada (artículo 59); b) la SDS podrá exigir a los responsables de la exploración, explotación y/o aprovechamiento de los recursos pétreos, el otorgamiento de una fianza que garantice la restauración del área utilizada (artículo 69); c) el monto, plazo y demás modalidades de la fianza será fijado mediante el convenio que celebren la SDS y el responsable de la obra, de acuerdo con la superficie a restaurar y las acciones previstas en el programa de restauración (artículo 61); d) los permisos de explotación y aprovechamiento tendrán una duración máxima de 6 meses, prorrogables siempre que se haya cumplido con las obligaciones señaladas en el permiso y subsistan las condiciones que justificaron su expedición (artículo 62) (DOEY 2010a).

La Ley de Desarrollo Rural Sustentable del Estado de Yucatán promueve la sustentabilidad de las actividades socioeconómicas en los ecosistemas del estado (artículos 19 y 60) y la inversión para la restauración y mejoramiento de las tierras y servicios ambientales (artículo 78) (DOEY 2013b). Por su parte, la Ley para la Gestión Integral de los Residuos en el Estado de Yucatán responsabiliza a los propietarios, directores de obra y contratistas de la explotación de materiales pétreos, de las consecuencias que ocasionen a terceros o al medio ambiente en caso de un mal manejo de sus residuos sólidos (artículo 73) (DOEY 2011a). El programa de Ordenamiento Ecológico del Territorio del Estado de Yucatán circunscribe las canteras dentro de las unidades de gestión ambiental, pero no

contempla todas las regiones mineras del estado (Programa de Ordenamiento Ecológico del Territorio del Estado de Yucatán 2005).

La Norma Técnica Ambiental NTA-002-SEDUMA-10 es el instrumento estatal con mayores especificaciones sobre la regulación de la actividad minera, pues establece los parámetros que deben seguirse en los bancos de materiales pétreos para su localización, diseño, explotación y restauración. Esta norma señala que la infraestructura, maquinaria, vehículos, equipo y residuos deben ser retirados del sitio al concluir la explotación del banco, con el fin de liberar el área y comenzar los trabajos de restauración de acuerdo con el programa aprobado por la SDS (DOEY 2010b) y resumido en el cuadro 1. En la Norma Técnica se menciona que el área impactada por la actividad extractiva debe sujetarse a acciones que promuevan y aceleren los procesos naturales de recuperación de las condiciones ambientales del sitio, ya sea conforme se vayan liberando superficies disponibles o bien al término de las actividades mineras (DOEY 2010b). El cuadro 2 presenta una síntesis de los parámetros obligatorios de la restauración de canteras de Yucatán, conforme a lo establecido en la Norma Técnica Ambiental NTA-002-SEDUMA-10.

Cuadro 1. Especificaciones del programa de restauración de canteras de Yucatán, de acuerdo con la Norma Técnica Ambiental NTA-002-SEDUMA-10. Elaborado con información de DOEY (2010b).

Contenido del programa de restauración de minas de roca caliza en Yucatán Norma Técnica Ambiental NTA-002-SEDUMA-10
Conformación y adecuación de taludes, terrazas y terraplenes para el establecimiento de vegetación
Actividades para amortiguar el impacto visual y modelado del paisaje acorde con las características del entorno natural circundante
Acopio, manejo y destino de sustratos recuperados durante el desmonte y el despalme
Actividades para fomentar el establecimiento de vegetación de manera natural
Actividades para fomentar la recolonización del sitio por la fauna terrestre
Actividades para realizar la reforestación del área de explotación con base en la composición, diversidad y abundancia relativa de las especies que habitan en el paisaje natural de la zona
Selección de especies vegetales y densidad
Cronograma de actividades para la ejecución de las acciones
Indicadores del cumplimiento de las actividades de restauración del área de explotación
Manejo y uso posterior del sitio

Cuadro 2. Acciones prácticas y administrativas de la restauración de canteras de Yucatán, de acuerdo con la Norma Técnica Ambiental NTA-002-SEDUMA-10. Elaborado con información de DOEY (2010b).

Parámetros obligatorios de la restauración de minas de roca caliza en Yucatán Norma Técnica Ambiental NTA-002-SEDUMA-10	
Área	Obligación
Suelo	Usar los residuos vegetales y de suelo resguardados y recuperados durante la etapa de preparación del sitio para restablecer la capa de suelo (espesor de mínimo 30 cm) en áreas vulnerables a procesos erosivos. Se puede usar hasta 50 % de *saskab* o gravilla como material complementario Aplicar técnicas de ingeniería que eviten afectaciones en la dinámica de escurrimientos de aguas superficiales La compactación de la capa de suelo restituido no debe ser mayor a la condición original No se debe aplicar sustancias químicas en ninguna etapa del proceso restaurativo
Flora	Las especies vegetales que se utilizarán deben corresponder a las que se distribuyen de manera natural en la zona del proyecto. Se pueden usar especies exóticas bajo la autorización de la SDS Evitar especies de tamaño desproporcionado respecto a las que definen el paisaje de la zona
Agua	Realizar un monitoreo de la calidad del agua del sitio impactado al finalizar las actividades de explotación. Presentar el reporte a la SDS
Paisaje	Crear un espacio paisajístico que fomente el establecimiento de especies pioneras y otras adaptadas a la región Reproducir en lo posible la topografía del entorno natural del banco. Se pueden utilizar los materiales de desperdicio producto de la explotación para rellenar huecos y adaptarse a las sinuosidades del relieve Evitar la introducción de elementos que denoten artificialidad, como rectas, ángulos muy marcados, regularidad de formas geométricas, simetrías, entre otras características El sitio debe presenta una topografía final estructuralmente estable que minimice los riesgos de deslizamiento o colapso de los taludes, de manera que se facilite el drenaje natural del agua superficial
Lineamientos generales	Realizar la restauración en la totalidad del área afectada por la explotación de materiales pétreos Colocar un letrero que indique que el sitio se encuentra en proceso de restauración Realizar monitoreos periódicos con la ayuda de indicadores de eficiencia durante mínimo tres años a partir del establecimiento de las plantaciones. Entregar informes semestrales a la SDS Deberá cumplirse el cronograma de las acciones a realizar especificado en el programa de restauración El programa de restauración deberá ajustarse al ordenamiento territorial de Yucatán El prestador de servicios técnicos o la empresa consultora especializada que se contrate será responsable de la ejecución del programa de restauración Informar a la SDS sobre la fecha de inicio y conclusión de los trabajos de restauración El responsable debe presentarse en el sitio cuando sea requerido por la SDS

En vista de que el municipio de Mérida se localiza en la región minera más grande de Yucatán (SGM 2018), cuenta con reglamentos propios en materia ambiental. El Reglamento de Protección al Ambiente y del Equilibrio Ecológico del Municipio de Mérida hace referencia a los conceptos de prevención y restauración del equilibrio ecológico y describe los lineamientos de los permisos de exploración y explotación

de suelos (artículos 78, 79 y 80) (Ayuntamiento de Mérida 2009). El Reglamento para la Prevención y Control de la Contaminación del Agua en el Municipio de Mérida determina que las autoridades pueden limitar o suspender la instalación o funcionamiento de cualquiera actividad económica que pueda afectar el ambiente o causar desequilibrio ecológico del municipio (DOEY 1994).

Los programas estatales de desarrollo compendian los ejes de acción de los gobiernos en turno e incluyen apartados ambientales que cambian cada sexenio. Por ejemplo, en el plan general del ex gobernador Rolando Zapata Bello (2012-2018) sólo hay tres objetivos asociados al ambiente, pero su plan de desarrollo urbano declara el fomento al desarrollo sostenible de la actividad minera en Yucatán, la restauración de canteras y el condicionamiento de los asentamientos humanos en zonas colindantes a las minas (Gobierno del Estado de Yucatán 2013). En cambio, el plan de la administración actual dirigida por Mauricio Vila Dosal (2018-2024) contiene 14 objetivos ambientales y se habla de rehabilitación, restauración y reforestación de ecosistemas degradados, pero la minería de caliza no figura en el documento (Gobierno del Estado de Yucatán 2019). Esto implica la persistencia de los problemas socioambientales asociados a la extracción de caliza y el incremento de los espacios mineros abandonados en el estado.

3.4 Inconsistencias de la normatividad minero-ambiental

Considero que las iniciativas ambientales de la gobernanza internacional son ineficaces porque contienen metas ambiciosas que en la práctica son irrealizables y costosas. Así, prevalece la tendencia de que los acuerdos firmados y ratificados se incumplan una vez vencido el plazo. Esto resulta absurdo porque el cumplimiento de cualquier objetivo planteado debería ser el fin último de las directrices. Sin embargo, pareciera que la única constante en la diplomacia internacional es la creación de nuevos convenios, tratados, protocolos, convenciones, pactos, actas y declaraciones. Muchos de los países comprometidos experimentan altas tasas de deforestación y expansión agrícola que superan el área comprometida para restauración (Fagan et al. 2020). Esta paradoja pone en evidencia el hecho de que los modelos de desarrollo neoliberal

dan mayor prioridad al sistema económico globalizado que se alimenta de la sobreexplotación de los recursos naturales y minerales (Gudynas 2015).

Otro error común es la falta de contextualización de los programas ambientales internacionales, que como su nombre indica, no tienen por objetivo abordar problemas locales (Carabias et al. 2007). Si bien existen intercambios de experiencias y esfuerzos conexos a nivel mundial, los países partícipes tienen que asegurarse de que los tratados y su contenido se contextualicen en cada región según el entorno, la cultura, los valores y los recursos humanos y financieros disponibles (Laub 2013). Los manuales técnicos sobre restauración elaborados por los acuerdos internacionales representan sólo guías para orientar a los tomadores de decisiones y ayudarlos a definir sus objetivos de acuerdo con el tipo de proyecto y ecosistema (Keenleyside et al. 2012; Clewell et al. 2005). Cada gobierno debe ser responsable de realizar los ajustes necesarios para traducir el significado de los lineamientos internacionales en acciones concretas para restaurar los ecosistemas degradados, beneficiar a las comunidades locales y cumplir con los objetivos planteados (Laub 2013).

La formulación de una sola estrategia global de restauración no es posible debido a que a) los ecosistemas responden a condiciones ambientales de manera particular (Sarukhán 2008); b) los disturbios, su duración y el grado de perturbación en el ecosistema son específicos del sitio (Venâncio-Martins 2017); c) las condiciones culturales transforman los paisajes de maneras diferentes (SER 2004); d) en el caso de la minería, el sustrato resultante una vez concluida la extracción presenta condiciones físicas, químicas y ecológicas variadas que dependen de la historia del sitio (Hossner y Hons 1992); e) es necesario considerar el tipo de mina, su extensión y la intensidad de la extracción, pues una cantera pequeña presenta condiciones muy diferentes a los de una mina acidogénica de clase mundial (Otto 2009).

La evidencia histórica desde el primer llamado a la acción sobre la crisis ambiental mundial en la Cumbre de la Tierra en Estocolmo en 1972 demuestra que la restauración de paisajes degradados en el mundo no se llevará a cabo por

iniciativa propia; sobre todo porque los tratados internacionales son de carácter facultativo y los países comprometidos quedan exentos de sanciones monetarias u otro tipo de represalias por incumplimiento. Esto explica porque el gobierno de México y sus secretarías han adoptado la costumbre de asumir múltiples compromisos voluntarios para restaurar el paisaje forestal. La política ambiental mexicana, que data de los inicios de la década de los setenta, se ha sustentado en formas discursivas modernas que son comparables incluso con sus contrapartes en el extranjero (Lezama 2010). No obstante, pese a los grandes compromisos verbales, México no cuenta con un fondo nacional de restauración para los proyectos a largo plazo ni con una legislación congruente y sólida en el tema (Carabias et al. 2016). Por el contrario, la Ley Minera vigente favorece al capital económico nacional y extranjero en detrimento de la salud de los ecosistemas y del bienestar de las comunidades locales (Cavioto 2019).

En un contexto de recursos financieros limitados, grandes compromisos y un paisaje constituido por intrincados mosaicos de ecosistemas bioculturales y agudos problemas de pobreza, el diseño de una política mexicana de restauración ambiental es una labor complicada (Carabias et al. 2007; López-Barrera et al. 2017). Cárdenas (2013) afirma que la legislación minera vigente debe ser reformada para que cumpla con los principios constitucionales y determine obligaciones más precisas y transparentes sobre restauración y protección ambiental. El gobierno de México posee completa facultad para efectuar cualquier cambio legal, así como sucedió a finales del siglo XX, cuando las leyes se modificaron para crear condiciones competitivas para las inversiones mineras (Cavioto 2013).

Las leyes que conforman el marco minero-normativo de México contienen conceptos técnicos como conservación, preservación, protección ambiental, reforestación, restauración, rehabilitación, equilibrio ecológico, manejo integral de recursos, desarrollo sostenible, enfoque ecosistémico, entre otros que se definen en los glosarios correspondientes a cada ley (DOF 1917, 1988, 1992, 2012, 2013, 2018; DOEY 1918, 2010a, 2013a). No obstante, la aplicación de estos términos es

ambigua, contradictoria y obstaculiza el cumplimiento de las normativas (Cárdenas 2013). Por ejemplo, el artículo 39 de la Ley Minera ordena que las empresas mineras deben procurar el cuidado del medio ambiente y la protección ecológica (DOF 1992). La minería es una actividad extractiva y su carácter destructivo es inherente a su *modus operandi*, por lo que es imposible que este sector cuide y proteja al ambiente. El artículo 4 constitucional garantiza el derecho a un medio ambiente sano para el desarrollo y bienestar personal, y establece que el daño y deterioro ambiental generará responsabilidad para quien lo provoque (DOF 1917). Si este artículo de la Constitución se cumpliera de manera literal, no existirían desastres ecológicos causados por la industria minera que atenta contra el derecho a un medio ambiente sano (Cárdenas 2013). Tampoco existirían minas abandonadas en el país porque, tal como menciona el artículo 4 reformado en 1983, las compañías deberían reparar los daños ambientales (DOF 1917).

Otro ejemplo de las contradicciones legales se observa en lo establecido en la Ley de Protección al Medio Ambiente del Estado de Yucatán y en la Norma Técnica Ambiental NTA-002-SEDUMA-10. Estos documentos declaran la restauración obligatoria de canteras por parte de las compañías mineras y la prohibición de apertura de bancos de materiales en predios sujetos a restauración ecológica (DOEY 2010a, 2010b). Sin embargo, en la parte final de la Norma Técnica se menciona que es posible la reapertura del banco con previa autorización, es decir, se permite la doble extracción del material calizo por debajo del nivel freático en sitios explotados que, en teoría, deberían estar sometidos a trabajos de restauración. En el informe sobre actividades económicas estatales elaborado por la Semarnat (2001) se menciona la ausencia de recursos minerales en Yucatán, mientras que la Secretaría de Economía reporta que, además de caliza, en el estado se produce sal, mineral de gran valor para la región y el país (SGM 2019).

La falta de concordancia de los datos se suma a la escasa información oficial disponible sobre la minería de caliza en Yucatán. Peláez-Padilla (2015) afirma que el sector minero en México se caracteriza por presentar problemas de transparencia y acceso a la información pública porque existen candados legales y

ausencia de reportes escritos sobre las supuestas obligaciones de las empresas mineras. Durante la búsqueda bibliográfica para elaborar el presente escrito, no se encontraron reportes de los programas de restauración ecológica que la Secretaría de Desarrollo Sustentable de Yucatán exige a las compañías mineras desde el 2010. Ante tal situación, las únicas dos explicaciones son que los reportes no están disponibles en internet, aunque esto forma parte del derecho de los ciudadanos a recibir información sobre las actividades del gobierno (Cárdenas 2013), o que no se realizan trabajos de restauración al cierre de las canteras, pese a lo estipulado en las leyes estatales y federales (DOF 1988, 2012, 2013, 2018; DOEY 2010a, 2010b, 2013).

El artículo 63 de la Ley de Protección al Medio Ambiente del Estado de Yucatán señala que el aprovechamiento de los minerales debe ser compatible con el Programa de Ordenamiento Ecológico Territorial del estado (DOEY 2010a). No obstante, este programa no contiene información sobre restauración de minas de caliza. Tampoco se menciona cuáles son las estrategias y lineamientos ecológicos de las canteras localizadas dentro de las unidades de gestión ambiental, pese a que esta información es solicitada por la Semarnat (2019). El programa tampoco precisa si en el ámbito minero se cumple el objetivo principal de minimizar los conflictos ambientales, maximizar el consenso y favorecer el desarrollo sostenible en la entidad. Esta ausencia de información y la omisión de la minería de caliza en el plan actual de desarrollo del estado de Yucatán refleja que el gobierno subestima la presencia y los impactos ambientales de esta industria extractiva en crecimiento.

Ante el acervo escueto de obligaciones ambientales caracterizado por un bajo régimen de sanciones por incumplimiento ambiental y la inexistencia de límites en la cantidad de permisos mineros aprobados, es necesario que el gobierno del estado de Yucatán adopte medidas regulatorias más estrictas (Montañez-Escalante 2009). La autorización de permisos mineros debe ser limitada y condicionada (Cárdenas 2013). El gobierno debería exigir a los solicitantes una garantía financiera para cubrir los costos de restauración antes de que comiencen

los trabajos de exploración y extracción (Cárdenas 2013). Los artículos 15 y 203 de la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente y el artículo 69 de la Ley de Protección al Medio Ambiente del Estado de Yucatán hacen referencia al concepto de pago por daños ambientales (DOF 1988; DOEY 2010a), pero su aplicación es potestativa y no se especifica que el pago deba realizarse antes de ejecutar los trabajos de extracción.

En Quebec, Canadá, para que las empresas mineras puedan iniciar sus actividades tienen que presentar un plan de restauración y realizar un depósito que cubra 70% del costo total estimado de las actividades restaurativas (Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles 2018). El gobierno del estado de Yucatán debería adoptar un esquema similar que incluya dos componentes más: a) asesoría científica por parte de expertos para que determinen, junto con las compañías mineras y la SDS, los costos aproximados de los trabajos de restauración y b) una cláusula firmada por las mineras en la que se rubrique el compromiso imperativo de restaurar la superficie utilizada, sin importar el estado financiero de la compañía. De esta forma se asegurarían los recursos económicos para la restauración y se impediría que las empresas se deslinden de sus responsabilidades al declararse en banca rota. Si esta medida entrara en vigor, el Estado tendría que rendir cuentas sobre la administración del fondo de restauración y así evitar el actual vacío de información referente al uso y destino del dinero proveniente de los permisos e impuestos del sector minero en Yucatán. La autorización condicionada también ayudaría a que el Estado deje de acumular la carga responsiva de resarcir el legado de problemas ambientales que dejan los sitios abandonados.

El escaso progreso en la aplicación de la legislación ambiental sobre restauración ecológica después de cuatro décadas de avances normativos e institucionales no se debe a la ignorancia del Estado mexicano en el tema (Lezama 2010). Antes de la publicación de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en 1988, se introdujo en la Constitución la idea de la preservación y restauración del equilibrio ecológico en el artículo 27. Desde 1972, México formó

parte de las discusiones internacionales que se dieron a partir de la Conferencia de Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente Humano, en Estocolmo (Sarukhán et al. 2015). Así, un marco institucional robusto con propuestas concretas como la autorización condicionada de los permisos mineros no es suficiente, pues se deben atacar las causas principales del problema: la apatía, el desinterés y la corrupción del gobierno mexicano (Cárdenas 2013). Una gran proporción de las leyes y normas ambientales mexicanas no se cumple por omisión y corrupción de la autoridad, sobre todo en presencia de agentes poderosos de las esferas públicas y privadas (Lezama 2010).

México es el segundo país en América Latina, después de Perú, con mayor número de conflictos socioambientales causados por empresas mineras (OCMAL 2016) y el país con la mayor tasa de sobornos en la región de América Latina y el Caribe (Pring 2017). La corrupción convierte las leyes ambientales en instrumentos flexibles que se emplean de forma parcial cuando alguien en su condición de autoridad decide cómo, cuándo y a quién deben aplicarse (Wigström 2018). Damiana y colaboradores (2003) descubrieron que, en ciertos países, los altos niveles de corrupción se observan en la nula o débil aplicación de las sanciones y políticas relacionadas, lo que se traduce en altos índices de degradación ambiental. Estas conclusiones reflejan la realidad del sector minero en México, donde la corrupción comienza en las etapas iniciales del proceso de explotación, se extiende durante las operaciones y continua en la fase de cierre (Cárdenas 2013), lo que podría explicar porque no siempre se llevan a cabo actividades de restauración. Se ha comprobado que los costos ambientales producto de la corrupción reducen las probabilidades de alcanzar el desarrollo sostenible (Morse 2006).

3.5 La falacia del desarrollo sostenible en la minería

La industria minera ha adoptado el concepto de sostenibilidad debido a la presión internacional en los últimos años para mejorar su reputación socioambiental (Miranda et al. 2003; Waye et al. 2009). Organismos internacionales como la ONU y el Banco Mundial promueven los beneficios de la minería sostenible en los

países en desarrollo (PNUMA 2018; Banco Mundial 2019). En 1999, las diez empresas de cemento más grandes del mundo crearon la Iniciativa para la Sostenibilidad del Cemento del Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible (WBCSD) con el fin de abordar problemas ambientales y contrarrestarlos mediante acciones como la restauración (Neri y Sánchez 2010). En México, la Cámara Minera (Camimex) asegura que las empresas mineras que forman parte de su organismo se rigen por los principios de la sostenibilidad para ayudar al desarrollo del país, sus regiones y comunidades (Camimex 2019)

El concepto de sostenibilidad minera se utiliza bajo el argumento de que esta industria puede contribuir al crecimiento económico y contrarrestar los niveles de pobreza en los países en desarrollo (Waye et al. 2009) mediante el mejoramiento de los servicios de educación y salud (Slack 2009). Waye y colaboradores (2009) afirman que la minería puede ser sostenible si las ganancias recaudadas se utilizan para promover proyectos a nivel local y nacional, es decir, si hay una transformación del capital mineral en capital social, con beneficios duraderos a través de las generaciones. No obstante, algunos autores sugieren que la sostenibilidad minera es un oxímoron (Miranda et al. 2003; Sarin et al. 2006; Slack 2009; Quintana 2014). Considero que el concepto sostenible sólo se une a otros rótulos genéricos de bajo efecto pragmático como “amigable con el ambiente”, “ambientalmente responsable” o los prefijos eco- y bio- que el sector empresarial ha adoptado para mejorar su reputación, aumentar el valor de sus productos y obtener así una ventaja comercial.

Existen varias razones que explican por qué la minería no puede ser sostenible (Miranda et al. 2002; Slack 2009; Waye et al. 2009). En primer lugar, hay una incompatibilidad fundamental entre el carácter no renovable de los recursos mineros y el mantenimiento de un nivel constante de consumo de recursos a través de las generaciones (Waye et al. 2009). En segundo lugar, las actividades extractivas conllevan impactos ambientales que contradicen la noción de que la sostenibilidad satisface las necesidades de las generaciones actuales y futuras (Waye et al. 2009). Además, gran parte de la población de los países donde se

extraen minerales vive en condiciones de pobreza (Miranda et al. 2002). También se ha identificado que los países en desarrollo con grandes reservas de recursos minerales son más propensos a la mala gobernanza, corrupción, conflicto político y desigualdades creadas en gran medida por las acciones del Estado (Sachs y Warner 1995), tal como sucede en México (Valladares de la Cruz 2017; Cárdenas 2013). Así, de los tres pilares de la sostenibilidad, ni el ambiente ni la sociedad resultan favorecidos por la minería.

En el ámbito económico, la experiencia de las minas de oro en Perú y Guatemala ilustran que las comunidades locales afectadas por la minería presentan costos socioambientales que superan los beneficios económicos que reciben (Sarin et al. 2006). En México, los recursos financieros que el gobierno federal recauda a través de los impuestos y concesiones mineras que ocupan el 11.3% del territorio nacional (Gamboa y Gutiérrez 2018), no se utilizan para beneficiar a las comunidades indígenas cuyos territorios albergan la mayor riqueza mineral del país (Cárdenas 2013; Quintana 2014; Valladares de la Cruz 2017), es decir, ni siquiera las generaciones presentes se benefician económicamente de la minería. Asimismo, el Producto Interno Bruto (PIB) no considera la depreciación del capital natural, por lo que el incremento del PIB mediante la explotación intensiva de recursos minerales implica la disminución del capital natural disponible para las generaciones futuras (Heath 2012), hecho que atenta contra los principios del desarrollo sostenible (ONU 2015).

Pese a la contradicción inherente de los términos, el Estado Mexicano ha incorporado el concepto de sostenibilidad en su paradigma de desarrollo energético, tal como lo demuestra el artículo 25 de la constitución política que promueve la implementación de una política nacional para el desarrollo industrial sustentable (sección reformada en 2013) (DOF 1917). La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente fomenta cambios en las actividades industriales para que sean compatibles con la protección ambiental y el desarrollo sostenible (artículo 21) (DOF 1988). No obstante, en ninguna de las

leyes anteriores se describen la política nacional ni los cambios necesarios para alcanzar la sostenibilidad de la industria en México.

En Yucatán, la Ley de Protección al Medio Ambiente (artículos 13 y 81) y la Norma Técnica Ambiental NTA-002-SEDUMA-10 señalan que el aprovechamiento de los recursos naturales no debe causar deterioro ambiental y, por el contrario, debe ser racional, sostenible y compatible con el equilibrio de los ecosistemas (DOEY 2010a, 2010b). Esto genera la interrogante sobre la manera en la que la extracción de caliza encaja en tales fracciones de ley, pues los bancos de materiales pétreos son antagónicos a la integridad y al equilibrio ecosistémico (Langer 2001). El sector privado también emplea frases ambientales en sus trucos publicitarios, por ejemplo, la empresa Mitza que fabrica y comercializa agregados pétreos afirma que sus productos provienen de canteras que respetan el medio ambiente (Productos Mitza 2013).

El titular de la Semarnat Víctor Manuel Toledo Manzur ha señalado que no hay minería buena o mala, pues lo importante es revisar caso por caso y confirmar a través de la inspección el cumplimiento a las normas (Camimex 2019). La afirmación del Dr. Victor Toledo podría ser grave y desatinada porque dota de neutralidad a un sector que en México ha causado despojo de pueblos indígenas, contaminación de cuerpos de agua, destrucción de ecosistemas y abandono de sitios mineros sin restaurar (Quintana 2014; Ornelas 2016; Valladares de la Cruz 2017). Las justificaciones a favor de la minería sólo contribuyen a limpiar la imagen de las empresas y perpetúan el uso pretensioso del concepto de sostenibilidad minera (Slack 2009).

Slack (2009) menciona que la eliminación del concepto de sostenibilidad del vocabulario minero ayudaría a generar expectativas más realistas sobre los posibles cambios positivos de esta industria, ya que hasta el momento no se conocen técnicas de extracción a cielo abierto que no destruyan los ecosistemas que se encuentran sobre los yacimientos (Langer 2001). El verdadero reto para la minería es desarrollar e integrar prácticas para aminorar el impacto ambiental de las operaciones, por ejemplo, reducir el consumo de agua y energía, disminuir los

desechos generados, prevenir la contaminación del suelo, el agua y el aire en las minas, realizar actividades exitosas de restauración y, en general, asumir la responsabilidad de todos los impactos socioambientales desencadenados (Widzyk-Capehart y Hekmat 2018).

Capítulo 4 Consideraciones técnicas de las prácticas recuperativas

4.1 Principales enfoques de recuperación

En Yucatán, la recuperación de minas de caliza comprende tres enfoques principales: restauración, rehabilitación y reemplazo (Montañez-Escalante et al. 2005; Góngora-Castillo 2010); Cada enfoque implica diferentes usos potenciales del sitio minero (DOEY 2010b; Favas et al. 2018), como se observa en la figura 6.

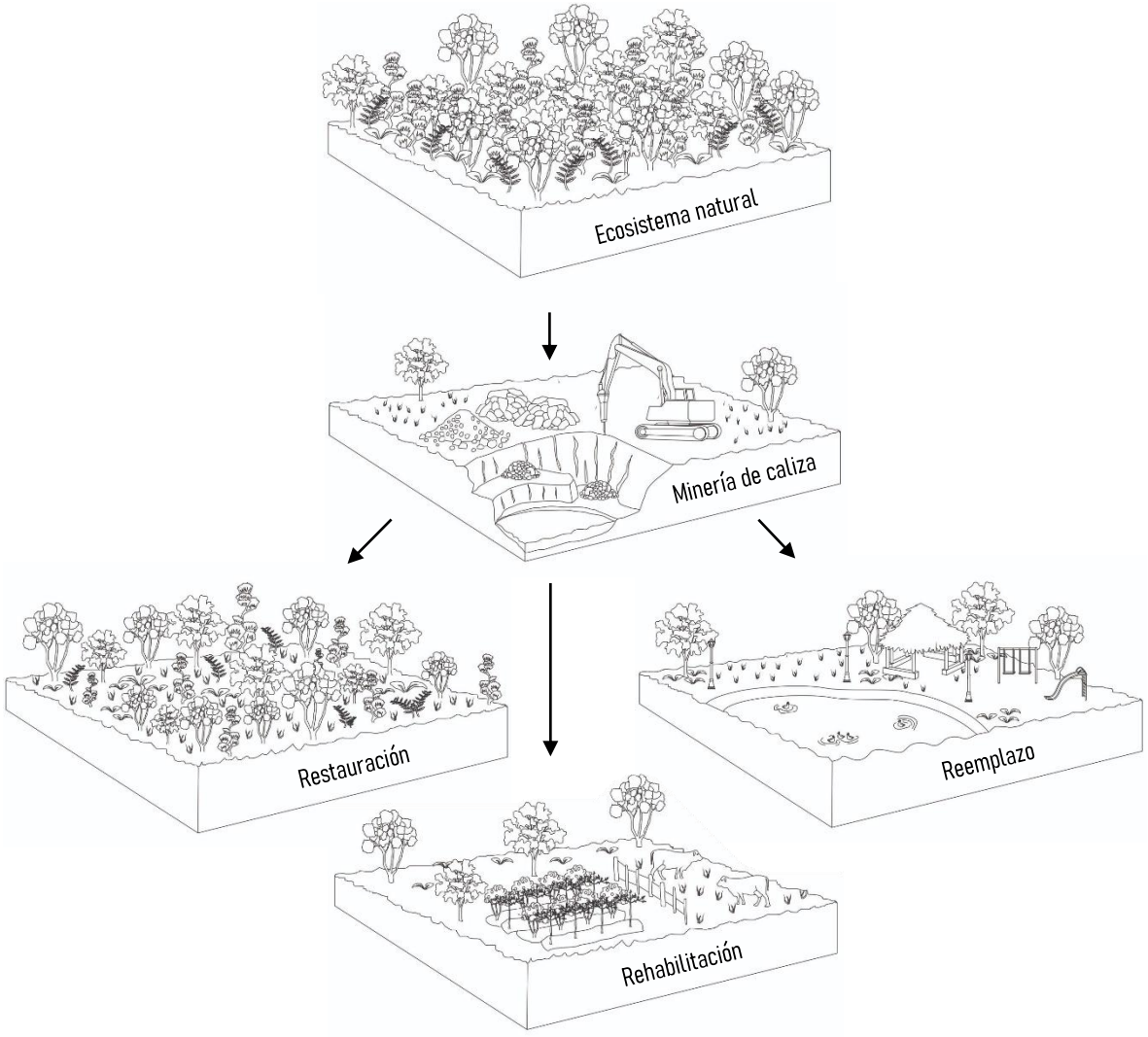

Figura 6. Representación esquemática de los tres principales enfoques de recuperación de minas de caliza en Yucatán. Se observa el ecosistema natural, el paisaje alterado por la minería y los usos potenciales de los sitios recuperados. Elaborado por Alberto Sosa Soltero y Arturo Cantón Ruz, basado en Favas et al. (2018) con información de Montañez-Escalante et al. (2005); DOEY (2010b); Góngora-Castillo (2010).

El propósito teórico de la restauración ecológica es restablecer el sitio minero a las condiciones biológicas existentes antes del disturbio para devolverle su trayectoria histórica (SER 2002). En este sentido, es necesario reconstituir la composición, estructura y funcionamiento del ecosistema destruido (Gann et al. 2019). Esto es imposible de alcanzar en la práctica debido a que los ecosistemas son dinámicos y sus múltiples propiedades son producto de complejas interacciones físicas, químicas y biológicas únicas e irrepetibles (SER 2002; Jiménez et al. 2006). Por lo tanto, la dirección de la restauración y los límites de la trayectoria se establecen mediante estudios del ecosistema afectado, modelos ecosistémicos de referencia, información sobre las condiciones ambientales regionales y referencias culturales e históricas relacionadas al sitio (Wali 1992; SER 2002, 2004).

El fin último de una cantera restaurada es la creación de hábitats de vida silvestre para la conservación de la biodiversidad (Favas et al. 2018). Volis (2019) considera que la restauración debe ser el enfoque de recuperación más utilizado debido a que la designación de áreas naturales protegidas no es suficiente para hacer frente a la pérdida acelerada de biodiversidad. Sin embargo, la restauración de ecosistemas destruidos de manera irreversible por disturbios severos como la minería es muy difícil de lograr en el plano operativo (Gann et al. 2019). Además, el costo total de los trabajos de restauración es alto porque se requiere de financiamiento constante durante varios años (Jiménez et al. 2006). Por tales motivos es necesario que los trabajos iniciales de intervención sean efectivos y garanticen la regeneración natural (pasiva) de la cantera en los años posteriores (Favas et al. 2018).

La rehabilitación tiene por objetivo el restablecimiento de la productividad y los servicios de un ecosistema, en lugar de la composición de especies y estructura originales (SER 2002). En Yucatán, los sitios rehabilitados son destinados a la agricultura, silvicultura, ganadería o una combinación de estas actividades productivas (Montañez-Escalante et al. 2005; DOEY 2010b; Góngora-Castillo 2010). La rehabilitación es una opción viable cuando la recuperación íntegra de los ecosistemas nativos no es posible y hay centros de población próximos a la mina

(Gann et al. 2019). Los sistemas productivos aseguran bienes ecosistémicos (comida, leña, madera) para las zonas rurales (Favas et al. 2018), les proporcionan una rentabilidad económica inmediata (Montañez-Escalante et al. 2005), detienen la erosión hídrica y eólica del sitio (Gann et al. 2019), recrean sitios de refugio para fauna silvestre (Favas et al. 2018) y mejoran la imagen y aceptación de la minería (Jiménez et al. 2006).

El reemplazo tiene por objetivo instaurar paisajes estéticos y socialmente útiles con fines recreativos, deportivos o educativos, sobre todo cuando las minas están cerca de los centros poblacionales (Favas et al. 2018). En Yucatán, las canteras sometidas al esquema de reemplazo son transformadas en parques o unidades deportivas (DOEY 2010b; Góngora-Castillo 2010). Las áreas verdes son una alternativa factible y viable desde el punto de vista económico (Favas et al. 2018) y ayudan a la regulación de la temperatura local, la reducción del ruido (Rakhshandehroo et al. 2017), la conectividad con otros parches de vegetación (Yang et al. 2019) y pueden fungir como sitios de refugio y alimento para aves (Leveau et al. 2019). Sin embargo, el enfoque de reemplazo afecta de manera crítica el valor potencial de conservación a futuro de las minas (Tropek et al. 2012), pues la construcción de áreas recreativas interrumpe la sucesión natural que, si bien es lenta en zonas mineras, favorece altos valores de biodiversidad a largo plazo (Tropek et al. 2010).

Cuando no es posible aplicar ningún enfoque de recuperación por falta de recursos económicos o por tratarse de minas abandonadas, la sucesión ecológica puede acelerarse mediante algunas acciones, por ejemplo, el control mecánico de especies invasoras, la siembra directa de especies nativas (u otras de interés) y la dispersión de semillas en etapas intermedias de la sucesión (Favas et al. 2018). Estas intervenciones de bajo costo, además de canalizar los procesos de regeneración natural, también detienen los procesos erosivos y pueden planificarse con un programa breve a corto plazo (Tropek et al. 2010).

4.2 Procedimientos técnicos de un programa de recuperación

La recuperación de minas debe fundamentarse en un programa metodológico que integre diferentes procedimientos técnicos divididos en las siguientes fases secuenciales: a) planeación y diseño, b) implementación, y c) monitoreo y evaluación (Gann et al. 2019; Favas et al. 2018). La figura 7 muestra estas etapas interdependientes aplicables a los tres enfoques de recuperación de canteras en Yucatán.

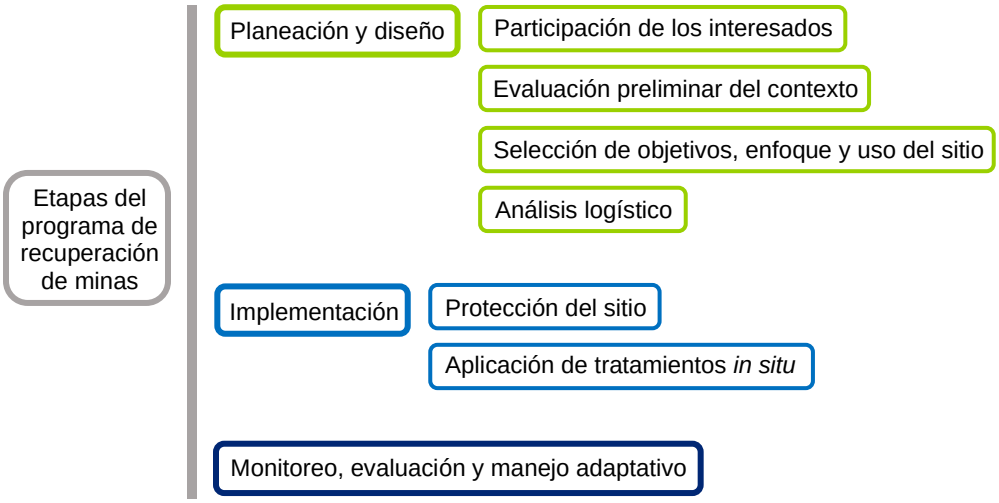

Figura 7. Etapas principales e intermedias que debe contener el programa de recuperación de minas. Elaborado con información de Gann et al. (2019) y Favas et al. (2018).

4.2.1 Planeación y diseño

Participación de los interesados. Los programas de recuperación se elaboran con la participación informada y recíproca de las partes interesadas: representantes de las compañías mineras, funcionarios públicos de las secretarías gubernamentales relacionadas, autoridades locales, propietarios o administradores de tierras, personas de la comunidad local, científicos, técnicos y especialistas de campo (Kuter 2013). La formación de un equipo multidisciplinario de expertos ayuda a conciliar los conocimientos biológicos y prácticas ecológicas con los sistemas de valores e intereses de los agentes implicados, la voluntad

política de los diferentes órganos de gobierno y los marcos institucionales de los programas (Weiss 2004).

Cuando los terrenos mineros son de propiedad privada o social se requiere un alto grado de involucramiento de las comunidades, ejidos o propietarios privados (Carabias et al. 2007). Esto se debe a que el enfoque seleccionado no siempre se traduce en beneficios económicos, como en el caso de la restauración, sino en rentabilidad ambiental a largo plazo (Carabias et al. 2007). Los mecanismos y espacios de participación científica y pública son indispensables para el entendimiento de la necesidad de intervención, para la planificación de las acciones de manera participativa, para el monitoreo post-recuperativo y, en general, para el éxito del programa (Gann et al. 2019). En los casos en que se requiere restaurar áreas de interés público o de responsabilidad de la nación es necesario que se cuente con la participación de organizaciones expertas en el tema, ya que la capacidad técnica y económica del gobierno es limitada en México (Carabias et al. 2007). Ya sea un área pública, privada, o social, es recomendable que se incluya la participación de los empleados o ex empleados de la mina, pues conocen el terreno y sus particularidades (Neri y Sánchez 2010).

Evaluación preliminar del contexto. La evaluación inicial del contexto registra la intensidad de la degradación y los impactos locales de la actividad minera (Favas et al. 2018). Cada sitio debe ser analizado de manera individual porque las minas tienen problemas particulares producto de su propio contexto físico, ecológico, social y económico (Otto 2009). El diagnóstico contiene una valoración socioeconómica del área (Jiménez et al. 2006) y una caracterización ambiental para conocer los riesgos, las fuentes de contaminación, la presencia de especies vegetales y animales en el sitio, la calidad de los relaves o del suelo remanente y las condiciones topográficas de la mina (Gann et al. 2019), tal como se observa en el cuadro 3. En los casos en que existe contaminación es necesario conocer la composición, concentración y distribución de los contaminantes (Jiménez et al. 2006). Esto es común en minas abandonadas convertidas en basureros, donde también pueden encontrarse remanentes patrimoniales del proceso extractivo

(Favas et al. 2018). Los resultados de esta fase de evaluación condicionan el desarrollo de los usos futuros de la mina y determinan la necesidad de realizar estudios más detallados de la zona explotada (Gann et al. 2019).

Cuadro 3. Información ambiental y socioeconómica para la evaluación preliminar del contexto minero. Elaborado con información de Jiménez et al. (2006) y Gann et al. (2019).

Especificaciones de la evaluación preliminar del contexto minero Jiménez et al. (2006) y Gann et al. (2019)	
Factor	Información requerida
Geología	Estratigrafía Geomorfología Caracterización fisicoquímica de los relaves
Topografía	Relieve Pendientes/inclinación Altitud Zonas de riesgo
Hidrología	Plano freático Calidad del agua subterránea Potencial de recarga Patrones de drenaje
Clima	Tipo de clima (precipitación, humedad, temperatura y patrones de viento)
Suelo	Caracterización fisicoquímica del suelo
Comunidades vegetales y animales	Caracterización de la vegetación y de la fauna Grado de perturbación biológica del sitio (establecer una escala de referencia) Identificación de focos de regeneración espontánea
Fisionomía	Tamaño y profundidad de la mina
Ubicación y accesibilidad	Localización de la mina Distancia, tiempo, vías de acceso y redes de transporte a los centros de población cercanos
Tipo de propiedad	Comunal, ejidal, federal o privada
Valor de uso del suelo	Uso actual e histórico del sitio Uso de las tierras circundantes Ordenamiento ecológico territorial del área
Poblaciones humanas	Población total Densidad poblacional Ocupaciones Ingreso promedio Servicios públicos

Selección de objetivos, enfoque y uso del sitio. La formulación de objetivos claros, realistas y medibles determinan el enfoque y el uso del sitio minero (McDonald et al. 2016). Es necesario tomar en cuenta los resultados de la evaluación preliminar del contexto y los criterios que ser observan en el cuadro 4. Los objetivos deben incluir acciones concretas enmarcadas en la normatividad ambiental aplicable, plazos específicos e indicadores cuantificables para detectar el éxito o fracaso de los proyectos (Gann et al. 2019). Es importante asegurarse

de que todos los participantes del proyecto tengan una visión y comprensión en común de los objetivos acordados y que cada persona identifique su responsabilidad en el cumplimiento del programa (Weiss 2004).

Cuadro 4. Consideraciones para la selección de objetivos, el enfoque de recuperación y el uso de la cantera. Elaborado con información de Weiss (2004); Carabias et al. (2007); Otto (2009); McDonald et al. (2016); Gann et al. (2019).

Criterios para la selección de objetivos, enfoque y uso del sitio minero Weiss (2004); Carabias et al. (2007); Otto (2009); McDonald et al. (2016); Gann et al. (2019).
Resultados de la evaluación preliminar del contexto minero
Presupuesto
Nivel de conocimiento científico de los procesos biológicos que intervienen en la sucesión del sitio
Valores culturales del área
Intereses en común de los centros poblacionales próximos al sitio minero
Recursos humanos disponibles
Capacidades técnicas, científicas, tecnológicas y de ingeniería del equipo de trabajo
Normatividad ambiental local, regional y nacional

Análisis logístico. El financiamiento establece los límites logísticos de los proyectos de recuperación de minas (Otto 2009). Si los recursos económicos no son suficientes para abordar todas las etapas del programa, se debe contar con alternativas para la obtención de fondos complementarios y un plan de posibles riesgos (McDonald et al. 2016). El plan de riesgos incluye acuerdos de contingencia para cambios inesperados en las condiciones ambientales, en los fondos o en la planta laboral (McDonald et al. 2016). Es importante enmarcar todas las acciones en la normatividad ambiental aplicable e informarse sobre las especificaciones de los permisos y autorizaciones legales (Gann et al. 2019). Se recomienda elaborar un mapa del sitio y un calendario que contemple la duración total del proyecto, las fechas límite para el cumplimiento de las tareas de cada una de las etapas del programa, así como los costos totales de cada fase (Otto 2009).

4.2.2. Implementación

Protección del sitio. Antes de implementar los tratamientos en campo es necesario asegurarse de que el disturbio ha sido eliminado por completo (Gann et al. 2019). Cuando la recuperación inicia durante la fase extractiva se deben identificar y señalizar las zonas del sitio prestas a recibir los trabajos de

recuperación (McDonald et al. 2016). La protección del área también contempla un plan de limpieza para remover el legado material de la extracción (Otto 2009).

Aplicación de tratamientos *in situ.* Los esfuerzos iniciales de todo proyecto de recuperación, sin importar el enfoque elegido, deben dirigirse hacia la reconstitución de las capas orgánico-minerales del suelo antes de implementar cualquier tratamiento con especies vegetales (Yuan et al. 2006). Existen tres métodos principales para restablecer el suelo en las minas: a) la reutilización del suelo original que fue retirado en las etapas de desmonte y despalme (Sarmiento 2008), b) la revegetación (Favas et al. 2018), y c) la transferencia de suelo externo a la mina (Chenot et al. 2018). En cualquiera de los tres casos el objetivo es lograr que el suelo posea las propiedades físicas, químicas y biológicas mínimas para albergar vida vegetal y animal (fertilidad) (Sarmiento 2008) y que el volumen de suelo disponible en el sitio sea suficiente para sostener las primeras etapas de regeneración de la cantera (Yuan et al. 2006).

A pesar de que la transferencia de suelo es la técnica más rápida, este método es costoso y poco operativo debido al transporte desde la fuente de obtención hasta la mina y a las toneladas de suelo que es necesario importar (Chenot et al. 2018). En cambio, la reutilización del suelo original es una opción viable y de bajo costo, tal como lo establece la Norma Técnica Ambiental NTA-002-SEDUMA-10 de Yucatán (DOEY 2010b). El suelo original del sitio contiene el banco de semillas nativas y los fragmentos vegetativos que contribuyen a la riqueza de especies y la densidad de plantas en los primeros estados de sucesión (Zhang et al. 2001). Antes de utilizar el suelo apilado es recomendable retirar la capa superficial que se deteriora a causa de la exposición solar y el largo tiempo de almacenaje (Chenot et al. 2018). Pese a que este método es eficaz y exigido por la ley, las compañías mineras en Yucatán no lo realizan con frecuencia (Montañez-Escalante 2009).

Una alternativa para acelerar la pedogénesis en los sitios mineros es la revegetación, es decir, el establecimiento de una o varias especies vegetales para cubrir una superficie desprovista de plantas (Li et al. 2017). La revegetación es viable porque minimiza el uso de insumos externos y evita las emisiones de CO2

asociadas con el transporte de grandes cantidades de suelo y fertilizantes (Li et al. 2017). Las especies seleccionadas deben presentar una alta capacidad de supervivencia a la sequía, a la erosión, a la escasez de nutrientes esenciales y, en general, al conjunto de factores ambientales que tienden a inhibir el crecimiento vegetal y la consiguiente formación del suelo en los sitios mineros (Zupunski et al. 2018). Se recomienda promover la sucesión con especies pioneras con funciones de fitomejoramiento y después plantar especies con requisitos de hábitat más restringidos (Borišev et al. 2018), es decir, introducir las especies vegetales en el orden de sucesión (Sarmiento 2008).

El diseño de las estrategias de revegetación requiere un alto nivel de conocimiento científico sobre las comunidades vegetales que crecen en suelos mineros degradados para determinar con precisión el potencial de recuperación de las especies (Favas et al. 2018). Valdez-Hernández y colaboradores (2019) reportan la alta tolerancia de *Paspalum* sp., *Eragrostis secundiflora*, *Chloris inflata, Borreria verticillata, Calea jamaicensis, Metopium brownei, Caesalpinia gaumeri* y *Lysiloma latisiliquum* a las condiciones de estrés de las canteras de la península de Yucatán. Por su parte, Hernández-Stefanoni y Dupuy (2008) señalan que *Cecropia obtusifolia, Guettarda combsii* y *Hampea trilobata* son especies pioneras intolerantes a la sombra, productoras de numerosas y pequeñas semillas que se dispersan de manera rápida, y presentan un rápido crecimiento y madurez reproductiva. Ambos estudios concluyen que la recuperación de sitios perturbados depende de la presencia y cercanía de parches de vegetación en etapas de sucesión avanzada, los cuales son la fuente dispersora de semillas (Hernández-Stefanoni y Dupuy 2008; Valdez-Hernández et al. 2019).

Con el fin de garantizar el restablecimiento exitoso de los suelos de las minas se debe considerar el uso de especies pertenecientes a diferentes grupos taxonómicos y ecológicos, pues desempeñan distintas funciones en el proceso de remediación (Favas et al. 2018). Por ejemplo, las selvas secas de Yucatán se caracterizan por la abundancia de especies de la familia Fabaceae (Flores y Espejel 1994) que poseen el potencial de enriquecer el contenido de nutrientes del

suelo en formación debido la simbiosis entre las plantas y las bacterias fijadoras de nitrógeno en los nódulos radiculares (Walker y Del Moral 2003). Otro ejemplo es el uso combinado de plantas perennes y deciduas o semideciduas; las primeras limitan los esfuerzos para el control de hierbas no deseadas, mientras que las segundas proporcionan aportes sustanciales de materia orgánica y reciclaje de nutrientes al sitio (Favas et al. 2018).

El énfasis en el aumento de la cantidad y calidad del suelo se debe a que la microbiota edáfica es el principal impulsor para mejorar el estado nutricional del sustrato minero y otras propiedades fisicoquímicas durante las primeras etapas de la sucesión, las cuales conforman la fase más crítica en la recuperación de minas (Yuan et al. 2006). Otras medidas que se aplican en campo son la adición de bacterias, hongos o lombrices al suelo, el control de plagas de animales y plantas, y el uso de fertilizantes orgánicos (Green et al. 1992; Sarmiento 2008; Gann et al. 2019; Navarro-Cano et al. 2019). El cuadro 5 muestra un resumen de los tratamientos generales de recuperación aplicables a los tres enfoques de canteras de Yucatán. Esta información no representa la totalidad de medidas recuperativas ni contempla las particularidades de cada enfoque.

Cuadro 5. Tratamientos generales aplicables a los tres enfoques de recuperación de minas de caliza en Yucatán. Elaborado con información de Sarmiento (2008); Jiménez et al. (2006); Favas et al. (2018); Gann et al. (2019); Navarro-Cano et al. (2019).

Tratamientos *in situ* para la recuperación de sitios mineros Sarmiento (2008); Favas et al. (2018); Gann et al. (2019); Navarro-Cano et al. (2019)
Relleno y/o nivelación del terreno
Eliminación mecánica o biológica de la contaminación del sitio (por ejemplo, biorremediación)
Restablecimiento de las capas de suelo: • Uso del suelo original (en caso de que haya sido almacenado) • Revegetación con plantas herbáceas y arbustivas • Transferencia de suelo externo al sitio
Fertilización
Adición de organismos vivos en forma de cultivos de hongos, bacterias o lombrices
Control de plagas de animales y plantas
Reintroducción de especies vegetales nativas capaces de sobrevivir, crecer y reproducirse en condiciones de erosión, estrés hídrico, altas temperaturas y suelos deficientes en nutrientes

4.2.3 Monitoreo, evaluación y manejo adaptativo

El monitoreo y la evaluación de los proyectos de recuperación de canteras es una etapa imperativa que comienza desde la planeación con la elaboración de un plan de vigilancia (Gann et al. 2019). Este plan se basa en la toma de datos cuantitativos y cualitativos que conforman un sistema metodológico replicable y con rigor científico (McDonald et al. 2016). La evaluación se realiza de manera periódica para medir el cumplimiento de los indicadores en cada una de las fases y al final del programa para determinar el cumplimiento del objetivo principal (Gann et al. 2019). Por ejemplo, para evaluar la calidad de un suelo sometido a tratamientos de revegetación se pueden realizar análisis de fertilidad (contenido de nutrientes) o de la actividad enzimática microbiana (Sheoran et al. 2010). La evaluación global del proyecto debe tomar en cuenta que los fenómenos naturales y los impactos antropogénicos en las zonas próximas a las minas pueden inferir en la recuperación de los sitios (Jiménez et al. 2006); por lo que, es necesario contar con un manejo adaptativo que se ajuste a los cambios impredecibles que se presentan durante el programa y que son ajenos al proyecto de recuperación (Gann et al. 2019).

La etapa de monitoreo y evaluación debe incluir las características que definen el proyecto concluido con el fin de evitar conflictos con las partes interesadas (McDonald et al. 2016). Para esto deben considerarse las fases finales de los tratamientos en campo, los últimos fondos disponibles, los ajustes estructurales, los resultados del monitoreo y la disminución de la planta de trabajadores y voluntarios (Gann et al. 2019). El cierre de los proyectos debe ser realizarse de manera responsable, incluso cuando no se cumpla con el objetivo principal del programa (McDonald et al. 2016). En México, por ejemplo, muchos proyectos concluyen mal porque los indicadores de la etapa de cierre sólo miden la producción y siembra de plantas y no contemplan su sobrevivencia a corto, mediano o largo plazo ni la consolidación del área restaurada (Carabias et al. 2007). En este caso, los evaluadores tienen la obligación de realizar un análisis para identificar y explicar las causas del fracaso parcial o total del programa y

expedir recomendaciones para evitar incurrir en los mismos errores (McDonald et al. 2016).

4.5 Ineficacia de los programas de recuperación

Pese a la falta de información disponible sobre el bajo éxito o fracaso definitivo de los proyectos de recuperación de minas en Yucatán, es posible extraer explicaciones hipotéticas de acuerdo con las tendencias generales observadas en México por Jiménez et al. (2006), Carabias et al. (2007) y López-Barrera et al. (2017) y los estudios realizados en Yucatán por Cobá (1998), Montañez-Escalante et al. (2005), Montañez-Escalante (2009) y Góngora-Castillo (2010). El cuadro 6 resume las principales causas que explican la ineficacia de los programas de recuperación de minas en México.

Cuadro 6. Principales causas que conducen al fracaso de los proyectos de recuperación de minas en México, incluidas las minas de caliza en Yucatán. Elaborado con información de Montañez-Escalante et al. (2005); Jiménez et al. (2006); Carabias et al. (2007); Montañez-Escalante (2009); Góngora-Castillo (2010); Neri y Sánchez (2010); López-Barrera et al. (2017).

Factores que explican la ineficacia de los programas de recuperación de minas en México Cobá (1998); Montañez-Escalante et al. (2005); Jiménez et al. (2006); Carabias et al. (2007); Montañez-Escalante (2009); Góngora-Castillo (2010); Neri y Sánchez (2010) y López-Barrera et al. (2017)
Elección de objetivos que no son realistas
Financiamiento insuficiente
Planeación y toma de decisiones sin la participación de los habitantes de las comunidades próximas a la mina
Corrupción
Interesas particulares
Visión purista que considera a la restauración como el único enfoque aplicable a los sitios mineros
Desconexión entre teoría y práctica ecológica
Programas incompletos o mal estructurados (incluso inexistentes)
Falta de monitoreo y evaluación de los proyectos
Falta de sentido de compromiso por parte de los agentes responsables de los proyectos de recuperación
Falta de intervención progresiva

En México, la restauración ecológica es considerada con frecuencia como la única alternativa de recuperación de espacios mineros debido a su potencial para regenerar los ecosistemas perdidos y preservar la biodiversidad (Jiménez et al. 2006). En Yucatán, pese a la existencia de tres enfoques diferentes de recuperación, la restauración es el más promovido por las leyes y la comunidad

científica (Montañez-Escalante 2009). Pese a las ventajas de conservación, este enfoque requiere de estudios de diagnósticos previos para diseñar tecnologías específicas para cada sitio minero y de un largo tiempo para que se recuperen los componentes y funciones del ecosistema (Carabias et al. 2016). El contexto ambiental en México se caracteriza por la falta de voluntad política, recursos económicos limitados, altos niveles de corrupción en los distintos órganos de gobierno y leyes que benefician a las grandes compañías mineras (Carabias et al. 2016). Por lo tanto, muchos proyectos de restauración en México permanecen inconclusos (López-Barrera et al. 2017).

Los esfuerzos actuales para recuperar las minas de México deben tomar en cuenta que el 51.34% del territorio nacional se encuentra bajo propiedad social en ejidos o bienes comunales (Cavioto 2019). La mayoría de las minas se localizan en las zonas rurales de México, donde la mayor parte de la población vive en condiciones poco privilegiadas (Jiménez et al. 2006). El uso de diversos enfoques de recuperación es respaldado por leyes ambientales nacionales y estatales que establecen lineamientos sobre el aprovechamiento racional de los recursos naturales de manera compatible con la obtención de beneficios económicos para la sociedad (DOF 1988; DOEY 2010a). El objetivo de expandir los horizontes clásicos de la ecología de la restauración es legitimar tanto las necesidades de recuperar la estructura y función de los ecosistemas, como las necesidades de desarrollo socioeconómico de los centros poblacionales cercanos a los sitios mineros (López-Barrera et al. 2017).

En Yucatán, el desarrollo de sistemas agrosilvopastoriles y la creación de áreas recreativas en espacios mineros representan una oportunidad redituable para motivar a las compañías y al gobierno a invertir en la costosa recuperación de canteras, sobre todo aquellas en estado de abandono (Montañez-Escalante et al. 2005). La expansión demográfica de Mérida y su zona periurbana ha provocado la creación de corredores metropolitanos (Bolio 2014) cuya ubicación geográfica coincide con la presencia de bancos de materiales (SGM 2018), de manera que algunos de estos espacios podrían ser aprovechados con fines productivos y

recreativos por las comunidades humanas circundantes. Cuando la restauración ecológica no es posible y se eligen enfoques alternativos de recuperación es recomendable que se reserven sitios mineros sin intervención alguna para que se regeneren por sí solos mediante sucesión ecológica y contribuyan a la conservación de la biodiversidad a largo plazo (Chazdon y Uriarte 2016).

La falta de vinculación entre la teoría y la práctica ecológica es otra de las razones que explican la ineficacia de los programas de restauración (López-Barrera et al. 2017). Algunas publicaciones científicas sobre restauración resaltan la existencia de vacíos de información y concluyen que es importante realizar más investigaciones para tener una mayor comprensión de las variables y así poder aplicar planes adecuados de manejo, restauración y conservación de recursos naturales (Montañez-Escalante et al. 2005; Conabio 2012; Sarukhán et al. 2015; Carabias et al. 2016; Conabio 2016; Valdez-Hernández et al. 2019). No obstante, aunque la comprensión de los procesos biológicos que intervienen en la sucesión es fundamental para lograr la restauración efectiva de una mina (Boscutti et al. 2016), el verdadero problema en México no es de carácter biológico sino político y socioeconómico (Cárdenas 2013; Cavioto 2019).

Los altos costos de la restauración, la falta de financiamiento público a largo plazo y la escasa inversión del sector empresarial minero en temas ambientales obstaculizan la ejecución y el éxito de los programas de recuperación de minas en México (Carabias et al. 2007). Los recursos económicos necesarios para revertir los efectos de la degradación ambiental histórica de la minería en el país son cuantiosos (López-Barrera et al. 2017), por lo que es necesario identificar sitios prioritarios (Carabias et al. 2007). Jiménez y colaboradores (2006) afirman que el grado de perturbación y contaminación de la mina determinan los costos de restauración, así que recomiendan realizar prácticas extractivas más eficientes para ahorrar costos, obtener más material y así incrementar los ingresos destinados a los trabajos de recuperación. Otra opción es transformar los bloques de piedra inutilizables y los desechos que se producen en los bancos de materiales en productos con valor agregado como el concreto autocompactante

(Felekoglu 2007; Kopecskó 2018). De esta manera se obtienen ingresos complementarios para los trabajos de restauración y se reducen tanto los desechos generados como los impactos ambientales (Kopecskó 2018).

Otro error frecuente es que las actividades de recuperación de canteras casi siempre se planean y ejecutan en la fase de cierre (Montañez-Escalante 2009). Cuando esto sucede hay mayores probabilidades de que los programas fracasen debido a monitoreos insuficientes y al desinterés de las compañías que incluso abandonan los sitios sin intervenir (Jiménez et al. 2006). En las minas activas, la recuperación progresiva permite reducir los costos finales gracias a un proceso ordenado de intervención que detecta y evalúa tanto los tratamientos más apropiados como los problemas asociados (Hossner y Hons 1992). Los tratamientos experimentales *in situ* se basan en el uso de especies nativas de la región y brindan un panorama completo de los procesos biológicos locales (Otto 2009). Se recomienda incluir el conocimiento empírico local en el diseño de los ensayos, ya que puede ser una herramienta valiosa para complementar la información de carácter científico (Jiménez et al. 2006).

Capítulo 5 Conservación de las selvas secundarias y su relación con la caliza

5.1 Revalorización del monte en Yucatán

Las selvas secundarias ocupan cerca del 70% del total de la cubierta forestal de las tierras bajas en México (FAO 2010). En Yucatán, la evidencia paleoecológica muestra que la vegetación de la Península ha estado sujeta a presiones antropogénicas durante los últimos 3 500 años (Islebe et al. 2018). Las principales presiones humanas que han moldeado el paisaje forestal de Yucatán son el sistema de roza-tumba-quema de las milpas, la tala para obtener leña y madera para construcción (Hernandez-Xolocotzi et al. 1995), las plantaciones de henequén (*Agave fourcroydes* Lem.) y de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) (Ramírez-Carrillo 2010), la conversión de la selva en pastizales para el ganado (Edwards 1986) y la reciente intensificación de la minería de caliza (Montañez-Escalante 2009). Esto quiere decir que el mosaico forestal contemporáneo de Yucatán está compuesto por ecosistemas culturales y un conjunto de selvas secundarias (no originales) subcaducifolias y subperennifolias en diferentes etapas de sucesión (Hernández-Stefanoni y Dupuy 2008) conocidas en la región como montes (Jiménez-Osornio et al. 2010).

El monte, llamado *k'aax* en lengua maya, posee una complejidad simbólica relacionada con la vegetación terrestre que cubre el estado de Yucatán, pero también con la milpa, la fauna silvestre (carne de monte), los cenotes, las plantas medicinales, las leyendas, los rituales, la fertilidad, la territorialidad e incluso con las piedras calizas (García-Quintanilla 2000). Los mayas clasifican el monte de acuerdo con los disturbios y el barbecho, es decir, reconocen las diversas etapas de vegetación secundaria: *jubche'* (>2 años), *sak'aab-jubche'* (2-5 años), *tamkelen jubche'* (<10 años) *ka'anal jubche'* (10-15 años), *kelenche'* (15-30 años), *ka'anal-k'aax* (>30 años) y *sujuy k'aax* (selva madura) (Toledo et al. 2008). Este conjunto de mosaicos conformado por diferentes etapas seriales de selvas secas albergan la riqueza de recursos genéticos y minerales del estado (Góngora-Castillo 2010). Cada una de las etapas de regeneración del monte posee un valor ecológico para la conservación de la biodiversidad (Jiménez-Osornio et al. 2010).

Para los mayas, la conservación del monte implica la preservación de los bienes y servicios ecosistémicos de los que dependen (Jiménez-Osornio et al. 2010). Sin embargo, los tomadores de decisiones y la sociedad en general usan con frecuencia la palabra monte para referirse a la vegetación joven de menor valor. Por ejemplo, en una Manifestación de Impacto Ambiental realizada para la constructora Mool S.A de C.V, la vegetación del sitio a explotar se describe como "perturbada por sustitución previa para la siembra de henequén" (Copremia 2006). Si se considera el hecho de que las últimas plantaciones de henequén corresponden a la mitad del siglo XX, la vegetación del área lleva varios años de regeneración natural. Otro caso que no está relacionado a las canteras, pero que expresa la subestimación de las selvas secundarias en Yucatán es el estudio de impacto ambiental para el proyecto Tren Transpeninsular Mérida-Punta Venado (SCT 2019). En esta MIA se señala "evitar la fragmentación de zonas con vegetación primaria", pero no se contempla la protección de las selvas secundarias (SCT 2019).

La mayor parte de los esfuerzos de conservación en el mundo se dirigen hacia la vegetación primaria o más vieja (Chazdon et al. 2009), a pesar de que existen escasa selvas que pueden considerarse primarias (Willis et al. 2004). No obstante, la regeneración natural o asistida de las selvas secundarias del trópico puede mitigar la extinción causada por la disminución de las zonas originales de hábitat de vida silvestre (Wright y Muller-Landau 2006). Además, las actividades recuperativas de las minas y otros sitios perturbados contribuyen a la captura de carbono, la regulación del ciclo hídrico y, en general, al restablecimiento de los servicios ambientales de las selvas secundarias (Góngora-Castillo 2010). Stanton (1990) afirma que la piedra caliza tiene más valor *in situ* como sostén geológico de los ecosistemas, como fuente de reserva del acuífero y por su valor escénico, que como piedra triturada para construcción.

En un escenario como el de Yucatán donde la deforestación, los incendios, los huracanes y los cambios climáticos extremos se presentan con mayor frecuencia e intensidad (Sánchez-Sánchez 2015), es necesario aumentar los esfuerzos tanto

de protección como de restauración de las selvas secundarias que dominan el paisaje forestal kárstico (Durán-García et al. 2010). En 2011 se decretaron 1 358.48 km^2 de áreas en conservación bajo el nombre de reserva estatal biocultural del Puuc (DOEY 2011) y en 2013 se decretó la reserva estatal geohidrológica del anillo de cenotes con una superficie de 2 192.08 km^2 (DOEY 2013). La superficie estatal bajo algún esquema de protección asciende a 7 957.56 km^2, lo que representa el 20.13% del territorio (Estrada-Medina et al. 2019).

Con respecto a los bancos de materiales en Yucatán, el gran reto es armonizar la extracción de recursos minerales y la conservación de la vegetación (Góngora-Castillo 2010). Este desafío se complica por el desajuste temporal entre la escala humana de la toma de decisiones y la recuperación de los ecosistemas (Holl y Aide 2011). La sociedad quiere ver un cambio inmediato cuando la mayoría de los ecosistemas destruidos por la actividad minera tardan años en recuperarse mediante intervenciones recuperativas (Holl y Aide 2011) y aún más tiempo por sucesión natural (Ashley y Lottermoser 1999).

Conclusiones

Se concluye que las implicaciones socioambientales de carácter biológico, histórico, económico, político y legal que se relacionan con la teoría y la práctica de recuperación de minas de caliza en Yucatán son: la magnitud de los impactos ambientales, el enfoque de recuperación elegido, la eficacia de los tratamientos *in situ*, el financiamiento, las presiones económicas de costo-beneficio, las inconsistencias y contradicciones de la normatividad legislativa, la voluntad política de los gobiernos locales, estatales y nacionales, los intereses particulares de las compañías mineras, la corrupción, la planificación y ejecución de programas de intervención contextualizados, el monitoreo y la evaluación de los proyectos, y la participación de las comunidades humanas que habitan cerca de los bancos de materiales.

La recuperación de minas de caliza en Yucatán es un proceso adaptativo de alta complejidad técnica, debido a la inevitable destrucción del ecosistema y el subsuelo. El restablecimiento de la fertilidad del suelo, factor limitante en la selva del estado (García y Graniel 2010) representa la acción más prioritaria de la restauración, la rehabilitación y el reemplazo. Estos tres enfoques están regulados por un marco normativo minero-ambiental deficiente, contradictorio y transigente. La falta de monitoreo y evaluación por parte de los gobiernos corruptos de Yucatán y México causa que las compañías mineras no siempre realicen proyectos de recuperación. La consecuencia es el incremento del número de canteras en abandono inmersas en paisaje forestal del estado.

Considero que la recuperación de minas de caliza debe convertirse en una política pública prioritaria en Yucatán. Los gobiernos de los distintos niveles están obligados a ejercer presión reguladora hacia las compañías mineras para que intervengan de manera imperativa en los sitios explotados. Los programas de intervención tienen que considerar las implicaciones socioambientales que caracterizan cada uno de los contextos mineros. En caso de incumplimiento, las autoridades ambientales tienen la responsabilidad de aplicar las sanciones administrativas civiles y penales correspondientes, y así evitar que el problema de

las minas abandonadas pase a la escala del interés público. La legislación minero-ambiental que promueve el derecho humano a un ambiente sano debe ser privilegiada por encima de leyes sectoriales que favorecen los intereses de las empresas mineras. De lo contrario, la sobreexplotación de caliza pondrá en riesgo la capacidad productiva del estado y la integridad de los servicios ecosistémicos de Yucatán. La revalorización del monte es clave para su conservación y para la recuperación de las minas abandonadas y aquellas que tarde o temprano cerrarán.

A pesar de la escasa información disponible sobre recuperación de minas de caliza en Yucatán, las tendencias generales detectadas en las investigaciones a nivel nacional e internacional permitieron realizar aproximaciones bibliográficas sobre la realidad minera en Yucatán. Con el fin de complementar el análisis expuesto en este trabajo, propongo establecer bases de datos de acceso abierto sobre experiencias exitosas y fallidas en la práctica de recuperación de canteras de la región. Estas publicaciones con contenido técnico-científico, como informes sobre avances de los proyectos, reportes finales, capítulos de libros, tesis de pregrado y posgrado, entre otras, podrían ser manejadas por universidades y centros públicos de investigación con el propósito de promover el intercambio de conocimiento, visibilizar la presencia del sector minero en Yucatán y participar en el desarrollo de estrategias eficaces de intervención.

Referencias

Acevedo H, Guerra R. 2005. Factibilidad técnica y económica de la explotación de un yacimiento de Caliza en la Región Metropolitana. Documento interno de la Universidad de Chile. Escuela de Economía y Negocios. Ingeniería Comercial. Santiago de Chile.

Andrade M. 2010. Transformación de los sistemas naturales por actividades antropogénicas. En: Durán R, Méndez M (Eds). Biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán. CICY, PPD-FMAM, Conabio, Seduma. 496 p.

Andrews RM. 2018. Global CO_2 emissions from cement production, 1928-2017. Earth Syst. Sci. 10:195-217.

Ashley PM, Lottermoser BG. 1999. Geochemical, mineralogical and biogeochemical characterization of abandoned metalliferous mine sites, southern New England Orogen. In Proceedings of the NEO'99 Conference. Armidale, Division of Earth Sciences, University of New England. P. 409–418.

Ayuntamiento de Mérida. 2009. Reglamento de Protección al Ambiente y del Equilibrio Ecológico del Municipio de Mérida. Publicado en la Gaceta Oficial del Municipio de Mérida. México.

Ayuntamiento de Mérida. 2019. Normatividad Relativa al Desarrollo Sustentable. Mérida Sustentable 2018-2024. [Acceso abril 2020] www.merida.gob.mx/sustentable

Banco Mundial 2019. Building Resilience A Green Growth Framework for Mobilizing Mining Investment. Estados Unidos.

Bartz D. 2015. Soil atlas: Facts and figures about earth, land and fields. Berlin: Heinrich Böll Foundation. Alemania.

Bautista F, Palacio-Aponte G, Ortíz-Pérez M, Batllori-Sampedro E, Castillo-González M. 2005. El origen y el manejo maya de las geoformas, suelos y aguas en la Península de Yucatán. En: Bautista F, Palacio G (Eds.) Caracterización y manejo de los suelos de la península de Yucatán: implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales. Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Autónoma de Yucatán, Instituto Nacional de Ecología. 282 p.

Bautista F. 2005. Información edafológica para el manejo de recursos naturales. En: Bautista F, Palacio G (Eds.) Caracterización y manejo de los suelos de la península de Yucatán: implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales. Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Autónoma de Yucatán. 282 p.

Bautista F. 2010. El Suelo. En: Durán R, Méndez M (Eds). Biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán. CICY, PPD-FMAM, Conabio, Seduma. 496 p.

Bolio J. 2014. Mérida metropolitana: evolución histórica y rasgos actuales – una perspectiva histórica. En: López R, Ramírez LA (Eds.). Crecimiento urbano y cambio social: escenario de transformación en la zona metropolitana de Mérida. México, D.F. Universidad Nacional Autónoma de México, p. 21-60

Borisev M, Pajevic S, Nikolic N, Pilipovic A, Arsenov D, Zupunski M. 2018. Chapter 7. Mine site restoration using silvicultural approach. Bio-geotechnologies for mine site rehabilitation. Elsevier.

Boscutti F, Vianello A, Bozzato F, Casolo V. 2017. Vegetation structure, species life span, and exotic status elucidate plant succession in a limestone quarry reclamation. Restor. Ecol, 25, 595–604.

Cabadas-Báez HV, Sedov S, Jiménez-Álvarez SP, Leonard D, Lailson-Tinoco B, García-MolL R, Ancona-Aragón I, Hernández-Velázquez ML. 2018. Soils as a source of raw materials for ancient ceramic production in the Maya region of Mexico: Micromorphological insight. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana 70(1):21-48).

[Camimex] Cámara Minera de México. 2019. Reitera CAMIMEX su compromiso con Semarnat por una minería sustentable. Boletín informativo de la Cámara Minera de México. Edición diciembre 2019. [Acceso abril 2020]. https://www.camimex.org.mx/index.php/boletines/?boletin=13%20de%20Diciembre%20de%202019

Carabias J, Arriaga V, Cervantes-Gutiérrez V. 2007. Las políticas públicas de la restauración ambiental en México: limitantes, avances, rezagos y retos. Boletín de la Sociedad Botánica de México 80S: S85-S100.

Carabias J, Ruíz L, Rabasa A. 2016. El marco legal de la restauración de ecosistemas forestales en México. En Ceccon E, Martínez-Garza C (Eds.) Experiencias mexicanas en la restauración de los ecosistemas, p. 37–74. Cuernavaca: Conabio, CRIM-UNAM, UAEM. México.

Cárdenas J. 2013. La minería en México: despojo a la nación. revista Mexicana de Derecho Constitucional 28(1):35-74.

Carnevali G, Tapia JL, Duno R, Ramírez I. 2010. Flora ilustrada de la península de Yucatán: listado florístico. Centro de Investigación Científica de Yucatán, Mérida, 326 pp.

Cavioto F. 2013. La legislación minera vigente en México. FUNDAR. México.

Cavioto F. 2019. La normatividad minera en México: problemas y propuestas de modificación. Nota informativa CCMSS. México.

[CDB] Convenio sobre la Diversidad Biológica (Convention on Biological Diversity. 2016. Ecosystem restoration: short-term action plan. CBD/COP/DEC/XIII/5. CANADA.

Chan-Dzul. 2010. Diversidad florística y funcional de una crono-secuencia de la selva mediana subperennifolia en la zona de influencia de la Reserva de la Biósfera Calakmul, Campeche, México. Tesis de Maestría. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica. 145 pp.

Chazdon RL, Peres CA, Dent D, Sheil D, Lugo A, Lamb D, Stork NE, Miller SE. 2009. The Potential for Species Conservation in Tropical Secondary Forests. Conservation Biology 23(6): 1406–1417.

Chazdon RL, Uriarte M. 2016. Natural regeneration in the context of large-scale forest and landscape restoration in the tropics. Biotropica 48(6) 709–715.

Chenot J, Jaunatrec R, Buissonb E, Bureaud F, Dutoit T. 2018. Impact of quarry exploitation and disuse on pedogénesis. Catena 160 (2018) 354–365.

Clewell A, Rieger J, Munro J. 2005. Guidelines for Developing and Managing Ecological Restoration Projects, 2nd edition. Society for Ecological Restoration International. Estados Unidos.

Cobá F. 1998. Estudio sobre características y alternativas de manejo de los bancos de materiales abandonados en la ciudad de Mérida, Yucatán. Tesis de maestría en Ciencias sobre Manejo y Conservación de Recursos Naturales Tropicales. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán, México. 114 p.

[Conabio] Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 2012. Estrategia Mexicana para la Conservación Vegetal, 2012-2030. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.

[Conabio] Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad 2016. Estrategia Nacional sobre Biodiversidad de México (ENBioMex) y Plan de Acción 2016 - 2030. México.

[Conapo] Consejo Nacional de Población. 2019). Colección proyecciones de la población de México y de las entidades federativas 2016-2050; Yucatán. Secretaría de Gobernación. Gobierno de México. 68 p.

Congreso del Estado de Yucatán. 2011. Constitución política, leyes, códigos y reglamentos. Poder Legislativo del estado de Yucatán. [Acceso abril 2020]

http://www.congresoyucatan.gob.mx/gacetaParlamentaria/index.php?page=bGVnaXNsYWNpb24=

[Copremia] Consultores en Prevención y Mitigación de Impactos Ambientales. 2006. Manifestación de Impacto Ambiental modalidad particular del sector minero para el banco de material ubicado en Santa Gertrudis Copó, Mérida, Yucatán.

Damiana R, Fredriksson PG, List JA. 2003. Trade liberalization, corruption, and environmental policies formation: Theory and evidence. Journal of Environmental Economics and Management, 46(3):490-512.

De Landa D. 1986. [1574]. Relación de las cosas de Yucatán. Ediciones Dante, Colección Sureste. Yucatán, México.

Díaz-Coutiño H, Ramírez de Alba H, Pérez R. 2001. Aspectos químicos y estructurales de la matriz cementante utilizada en la cultura Maya. Ingeniería, Investigación y Tecnología 2(3):139-146.

[DOEY] Diario Oficial del Estado de Yucatán. 1918. Constitución Política Del Estado De Yucatán. México.

[DOEY] Diario Oficial del Estado de Yucatán. 1994. Reglamento para la Prevención y Control de la Contaminación del Agua en el Municipio de Mérida. México.

[DOEY] Diario Oficial del Estado de Yucatán. 2010a. La Ley de Protección al Medio Ambiente del Estado de Yucatán. México.

[DOEY] Diario Oficial del Estado de Yucatán. 2010b. Norma Técnica Ambiental NTA-002-SEDUMA-10. México.

[DOEY] Diario Oficial del Estado de Yucatán. 2011a. Ley Para La Gestión Integral De Los Residuos En El Estado De Yucatán. México.

[DOEY] Diario Oficial del Estado de Yucatán. 2011b. Decreto que establece el área natural protegida denominada reserva estatal biocultural del Puuc. Gobierno del estado de Yucatán. México.

[DOEY] Diario Oficial del Estado de Yucatán. 2013a. Ley de Desarrollo Rural Sustentable del Estado de Yucatán. México.

[DOEY] Diario Oficial del Estado de Yucatán. 2013b. Decreto que establece el área protegida denominada reserva estatal geohidrológica del anillo de cenotes. Gobierno del estado de Yucatán. México.

[DOF] Diario Oficial de la Federación. 2000b. Ley General de Vida Silvestre. México.

[DOF] Diario Oficial de la Federación. 1917. Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. Última reforma el 13 de abril de 2011. México.

[DOF] Diario Oficial de la Federación. 1988. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. SEDUE. Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. Última reforma el 13 de mayo de 2016.

[DOF] Diario Oficial de la Federación. 1992a. Ley Minera. Última reforma el 26 de julio de 2006.

[DOF] Diario Oficial de la Federación. 1992b. Ley de Aguas Nacionales. México.

[DOF] Diario Oficial de la Federación. 2000a. Reglamento de la LGEEPA en materia de evaluación del impacto ambiental. México.

[DOF] Diario Oficial de la Federación. 2001. Ley de Desarrollo Rural Sustentable. México.

[DOF] Diario Oficial de la Federación. 2001. Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable. México.

[DOF] Diario Oficial de la Federación. 2012. Ley General de Cambio Climático. México.

[DOF] Diario Oficial de la Federación. 2013. Ley Federal de Responsabilidad Ambiental. México.

Duch-Gary J. 1991. Fisiografía del Estado de Yucatán. 1a edición, Universidad Autónoma de Chapingo, México. 229 p.

Durán-García R, Arellano-Morín J, Méndez-González ME. 2010. Hacia la estrategia estatal de biodiversidad. En: Durán R, Méndez M (Eds). Biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán. CICY, PPD-FMAM, Conabio, Seduma. 496 p.

Edwards RC. 1986. The human impact on the forest in Quintana, Roo, México. Journal of Forestry History 30:120–127.

Espinosa L, Ceron M, Sulub A. 1998. Limestone Rocks of the Yucatan Peninsula. Description of the Lithology and Physical Properties Based on the Results of Exploration, Investigation and Laboratory Tests. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics 35.

Estrada-Medina H, Jiménez-Osornio J, Álvarez-Rivera O, Barrientos-Medina RC. 2019. El karst de Yucatán: su origen, morfología y biología. Acta Universitaria 29, e2292.

Fagan ME, Reid JL, Holland MB, Drew JG, Zahawi RA. 2020. How feasible are global forest restoration commitments? Conservation Letters 2020.

Favas PJC, Martino LE, Prasad MNV. 2018. Chapter 1 - Abandoned mine land reclamation—challenges and opportunities (holistic approach). Bio-geotechnologies for mine site rehabilitation. Elsevier.

[FAO] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 2010. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2015: informe Nacional México, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. ed, FRA2010/132. FAO, Roma, Italia.

Felekoglu B. 2007. Utilisation of high volumes of limestone quarry wastes in concrete industry (self-compacting concrete case). Resources, Conservation and Recycling 51:770–791.

Flores JS, Espejel I. 1994. Tipos de vegetación de la Península de Yucatán. Etnoflora Yucatanense, Fascículo 3. Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida.

Fundar. 2017. Las actividades extractivas en México: minería e hidrocarburos hacia el fin del sexenio. Anuario 2017. Natural Resources Governance Institute (NRGI). Fundar, Centro de Análisis e Investigación A.C. México.

Fundar. 2018. Las actividades extractivas en México; desafíos para la 4T. Anuario 2018. Natural Resources Governance Institute (NRGI). Fundar, Centro de Análisis e Investigación A.C. México.

Gamboa C, Gutiérrez M. 2018. Regulación de la Minería en México. Dirección general de servicios de documentación, información y análisis. Subdirección de análisis de política interior. Poder Legislativo Federal. Cámara de diputados. Gobierno de México.

Gann GD, McDonald T, Walder B, Aronson J, Nelson CR, Jonson J, Hallett JG, Eisenberg C, Guariguata MR, Liu J, et al. 2019. International principles and standards for the practice of ecological restoration. 2nd edition. Restoration Ecology 27(S1): S1–S46.

García G, Graniel E. 2010. Geología. En: Durán R, Méndez M (Eds). Biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán. CICY, PPD-FMAM, Conabio, Seduma. 496 p.

García G, Méndez L, Aguilar WJ, Orellana R. 2010. Ambientes terrestres. En: Durán R, Méndez M (Eds). Biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán. CICY, PPD-FMAM, Conabio, Seduma. 496 p.

García-Quintanilla A. 2000. El dilema de Ah Kimsah K'ax, "el que mata al monte" significados del monte entre los mayas milperos de Yucatán. Mesoamérica 39:255-285.

Gentry AH. 1995. Diversity and floristic composition of neotropical dry forest. In: Bullock S, Mooney HA, Medina E (Eds.) Seasonallí Dry Tropical Forest. Cambridge University Press. Cambridge. Pp 146-190.

Gerbens-Leenes PW, Hoekstra AY, Bosman R. 2018. The blue and grey water footprint of construction materials: Steel, cement and glass. Water Resources and Industry 19:1-12.

Gibbs M, Soyka P, Conneely D. 2001. CO_2 Emissions From Cement Production. In I. Change, Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories, p. 175-182.

Gobierno del Estado de Yucatán. 2013. Plan estatal de desarrollo 2012-2018. México.

Gobierno del Estado de Yucatán. 2018. Paz, justicia y gobernabilidad. Programa Especial. Gobierno estatal 2018-2024. Mérida. México.

Gobierno del Estado de Yucatán. 2019. Plan estatal de desarrollo 2018-2024. México.

Góngora-Castillo J. 2010. Explotación de canteras y su abandono. En: Durán R, Méndez M (Eds). Biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán. CICY, PPD-FMAM, Conabio, Seduma. 496 p.

Götz C. 2014. La alimentación de los mayas prehispánicos vista desde la zooarqueología. An. Antrop. 48-I:167-199.

Graniel E. 2010. Hidrología. En: Durán R, Méndez M (Eds). Biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán. CICY, PPD-FMAM, Conabio, Seduma. 496 p.

Green JE, Van Egmond TD, Wylie C, Jones I, Knapik L, Paterson L. 1992. A user guide to pit and quarry reclamation in Alberta. Alberta Land Conservation and Reclamation Council. Alberta Forestry, Lands and Wildlife.

Gudynas E. 2015. Derechos de la naturaleza. Ética biocéntrica y políticas ambientales. Editorial Tinta Limón. Argentina.

Gutiérrez F, Parise M, De Waele J. 2014. A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst. Earth-Science Reviews 138: 61–88.

Hanle L, Maldonado P, Onuma E, Tichy M, Van Oss HG. 2006. Mineral industry emissions. In: 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, edited by: Eggleston S, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K. IGES, Japan.

Heath J. 2012. Lo que indican los indicadores. Cómo utilizar la información estadística para entender la realidad económica de México. Colección INEGI. México.

Hernández-Jatib N, Ulloa-Carcasés M, Almaguer-Carmenate Y, Ferrer R. 2014. Evaluación ambiental asociada a la explotación del yacimiento de materiales de construcción La Inagua, Guantánamo, Cuba. Luna Azul, p. 146-158. Revista de la Universidad de Caldas, Colombia.

Hernández-Stefanoni J, Dupuy JM. 2008. Effects of landscape patterns on species density and abundance of trees in a tropical subdeciduous forest of the Yucatan Peninsula. Forest Ecology and Management 255:3797–3805.

Hernández-Xolocotzi E, Baltaza E, Tache S. 1995. La milpa en Yucatán: un sistema agrícola tradicional. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.

Holl KD, Aide TM. 2011. When and where to actively restore ecosystems? For Ecol Manage 261:1558–1563.

Hossner LR, Hons FM. 1992. Reclamation of mine tailings. In Lai, R. & Stewart, B. Soil Restoration. Advances in Soil Science 17:311-351.

Instituto de Recursos Mundiales. 2017. Sustainability index for landscape restoration: a tool for monitoring the biophysical and socioeconomic impacts of landscape restoration. Programa Regional de Investigación sobere Desarrollo y Medio Ambiente. El Gobierno del Salvador. GIZ. REDD+ Landscape.

[IPBES] Plataforma Intergubernamental Científico-Normativa sobre Diversidad Biológica y Servicios de los Ecosistemas. 2019. Resumen para los encargados de la formulación de políticas del informe de la evaluación mundial de la IPBES sobre la diversidad biológica y los servicios de los ecosistemas. UNESCO. Executive Board. Hundred and eighty-fifth sesión. Francia.

[IPBES] Plataforma Intergubernamental Científico-Normativa sobre Diversidad Biológica y Servicios de los Ecosistemas. 2016. The methodological assessment report on scenarios and models of biodiversity and ecosystem services. summary for policymakers. UNESCO. Alemania.

Islebe GA, Torrescano-Valle N, Aragón-Moreno A, Vela-Peláez AA, Valdez-Hernández M. 2018. The Paleoanthropocene of the Yucatán Peninsula: palynological evidence of environmental change. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana 70(1):49-60.

Jiménez C, Huante P, Rincón E. 2006. Restauración de minas superficiales en México. Instituto de Ecología UNAM. Secretaría de medio ambiente y recursos naturales. México.

Jiménez-Osornio J, Durán R, Dupuy JM, González-Iturbe, JA. 2010. Uso del suelo y vegetación secundaria. En: Durán R, Méndez M (Eds). Biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán. CICY, PPD-FMAM, Conabio, Seduma. 496 p.

Keenleyside K, Dudley N, Cairns S, Hall C, Stolton S. 2012. Ecological Restoration for Protected Areas - Principles, Guidelines and Best Practices. International Union for Conservation of Nature (IUCN). Estados Unidos.

Khasa, D. & Beaudoin, M. 2015. Les symbioses racinaires : un outil à exploiter sur les sites miniers pour la reconstruction rapide d'écosystèmes productifs. Vecteur Environnement, Édition Novembre 2015: 44-49.

Kopecskó K. 2018. Self-compacting concrete produced with limestone waste. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 442(1):1-14.

Kuter N. 2013. Reclamation of degraded landscapes due to opencast mining, advances in landscape architecture. Acesso marzo 2020. http://www.intechopen.com/books/advances-in-landscape-rchitecture/reclamation-of-degraded-landscapes-due-to-opencast-mining.

Langer WH. 2001. Potential Environmental Impacts of Quarrying Stone in Karst - A Literature Review. USGS Open-File Report. Estados Unidos.

Laub T. 2013. Contextualizing Global Standards to Local Settings: Challenges and Lessons Learned. Inter-Agency Network on Education in Emergencies. Estados Unidos.

Leveau LM, Ruggiero A, Matthews TJ. 2019. A global consistent positive effect of urban green area size on bird richness. Avian Research, 10(30): 1-14.

Lezama JL. 2010. Sociedad, Medio Ambiente y Política Ambiental: 1970-2000. En: Lezama JL, Graizbord B (eds). Los grandes problemas de México Tomo IV. Medio Ambiente. El Colegio de México. México.

Li W, Bin J, Yuehua H, Runging L, Wei S. 2017. A review on in situ phytoremediation of mine tailings. Chemospher 184: 594-600.

López-Barrera F, Martínez-Garza C, Ceccon C. 2017. Ecología de la restauración en México: estado actual y perspectivas. Revista Mexicana de Biodiversidad 88: 97–112.

López-Leyva S, Alvarado-Borrego A, Mungaray-Moctezuma AB. 2018. La difusión de la ciencia en México a través de artículos científicos. Condiciones y contextos. Revista de la Educación Superior 47(188):157-176.

Lottermoser BG. 2010. Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts, Third Edition. Springer, Berlin, Heidelberg, p. 400.

McDonald T, Gann GD, Jonson J, Kingsley W. 2016. Dixon International standars for the practice of ecological restoration – including principles and key concepts. Society for Ecological Restoration Washington USA.

Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles. 2018. Restauration des sites miniers abandonnés. In Gouvernement du Québec, Énergie et Ressources naturelles. [Acceso abril de 2020] https://mern.gouv.qc.ca/mines/res-tauration-miniere/restauration-des-sites-miniers-abandonnes/.

Miranda M, Burris P, Bingcang JF, Shearman P, Briones JO, La Viña A, Menard S, Kool J, Miclat S, Mooney C, Resueño A. 2003. Mining and Critical Ecosystems: Mapping the Risks, World Resources Institute. Estados Unidos.

Mitza. 2013. Productos Mitza. Mérida, Yucatán. [Acceso abri 2020] http://www.mitza.com.mx/agregados/

Montañez-Escalante P, García-Barrios L, Jiménez-Osornio J. 2005. Quarry reclamation in Mérida, Yucatán, México: A review about the achievements and current limitations. Tropical and Subtropical Agroecosystems 5:101-108.

Montañez-Escalante P, García-Barrios L., Jiménez-Osornio J. 2005. Quarry reclamation in Mérida, Yucatán, México: A review about the achievements and current limitations. Tropical and Subtropical Agroecosystems 5:101-108.

Montañez-Escalante P. 2009. Establecimiento de sistemas agroforestales para rehabilitar canteras en Mérida, Yucatán. Tesis de doctorado. Ecosur.

Morse S. 2006. Is corruption bad for environmental sustainability? a cross-national analysis. Ecology and Society 11(1): 22-31.

Navarro-Cano JA, Goberna M, Verdú M. 2019. Using plant functional distances to select species for restoration of mining sites. J Appl Ecol 56(10):1–10.

Neri AC, Sánchez LE. 2010. A procedure to evaluate environmental rehabilitation in limestone quarries. Journal of Environmental Management 91(11):2225-2237.

[OCMAL] Observatorio de Conflictos Mineros de América Latina. 2016. Base de datos de conflictos mineros en México. [Acceso abril 2020] http://basedatos.conflictosmineros.net/ocmal_db/?page=lista&idpais=02024200

[ONU] Naciones Unidas. 2007a. United Nations Convention to combat desertification in those countries experiencing serious drought and/or desertification, particularily in Africa. NY, Estados Unidos.

[ONU] Naciones Unidas. 2007b. Convención de Lucha contra la Desertificación: informe de la conferencia de las partes sobre su octavo período de sesiones celebrado en Madrid del 3 al 14 de septiembre de 2007. España.

[ONU] Naciones Unidas. 2010. Convenio sobre la Diversidad Biológica (Convention on Biological Diversity) - Strategic Plan for Biodiversity 2011–2020 and the Aichi Targets. Secretariat of the Convention on Biological Diversity. Canadá.

[ONU] Naciones Unidas. 2015. Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development. United Nations. Estados Unidos.

Ornelas J. 2016. Sociedades posneoliberales en América Latina y persistencia del extractivismo. Economía Informa 396:184-95.

Otto JM. 2009. Global Trends in Mine Reclamation and Closure Regulation. In: Richards JP (Ed). Mining, Society and a Sustainable World. Springer. New York.

Parise M. 2010. The impacts of quarrying in the Apulian karst. In: Carrasco F, La Moreaux JW, Duran Valsero JJ, Andreo B. (eds), Advances in research in karst media. Springer, p 441-447.

Pech-Pool D, Ardisson L. 2010. Diversidad en el bentos marino-costero. En: Durán R, Méndez M (Eds). Biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán. CICY, PPD-FMAM, Conabio, Seduma. 496 p.

Peláez-Padilla J. 2015. Legislación minera y derechos humanos: el derecho en la encrucijada. El Cotidiano 194:107-120. Revista de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, Distrito Federal, México.

Pérez-Medina S, Fargher LF. 2014. Expansión periurbana de Mérida ¿integrada o marginada? En: Crecimiento urbano y cambio social: escenarios de transformación en la zona metropolitana de Mérida. López-Santillán R, Ramírez-Carrillo LA (eds). Universidad Nacional Autónoma de México, p. 105-139.

[PNUMA] Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente. 2018. Managing mining for sustainable development. Executive summary. [acceso el 19

de abril de 2020]. UNDP Bangkok Regional Hub and Poverty-Environment Initiative Asia-Pacific of UNDP and UN Environment.

[PNUMA] Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente. 2020. Decenio de las Naciones Unidas sobre la Restauración de los Ecosistemas (2021-2030). Fomento de la restauración de los ecosistemas degradados y destruidos. FAO. ONU. Canadá.

Primack R, Rozzi R, Feisinger P, Dirzo R, Massardo F. 2001. Fundamentos de Conservación Biológica. Perspectivas latinoamericanas. Fondo de Cultura Económica. México. 797 p.

Pring C. 2017. Las personas y la corrupción: América Latina y el Caribe. Barómetro Global de la corrupción. Transparency International. Alemania.

Quintana RD. 2014. Actores sociales rurales y la nación mexicana frente a los megaproyectos mineros. Revista Problemas del Desarrollo 179(45):159-180.

Rakhshandehroo M, Yusof MJM, Arabi R, Parva M. 2017. The environmental benefits of urban open green spaces. ALAM CIPTA, International Journal on Sustainable Tropical Design Research & Practice 10(1):10-16.

Ramírez de Alba H, Pérez-Campos R, Díaz-Coutiño H. 1999. El cemento y el concreto de los mayas. Ciencia Ergo Sum 6(3):234-241.

Ramírez-Carrillo A. 2010. Las relaciones peligrosas: sociedad, naturaleza y construcción de la modernidad. En: Durán R, Méndez M (Eds). Biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán. CICY, PPD-FMAM, Conabio, Seduma. 496 p.

Rebollar D, Santos J, Sánchez A. 2002. Estrategias de recuperación de selvas en dos ejidos de Quintana Roo, México. Madera y Bosques 8(1):19-38.

Ruiz H, Arellano J. 2010. Áreas Naturales Protegidas. En: Durán R, Méndez M (Eds). Biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán. CICY, PPD-FMAM, Conabio, Seduma. 496 p.

Sachs J, Warner A. 1995. Natural Resource Abundance and Economic Growth. NBER Working Paper No. W5398.

Sánchez A. 2014. Cantera de Riviera Maya pavimenta las autopistas de Estados Unidos. El financiero. Revista en línea. [Acceso febrero 2020]. https://www.elfinanciero.com.mx/fotogalerias/cantera-de-riviera-maya-pavimenta-las-autopistas-de-eu.html

Sánchez-Sánchez O, Islebe GA, Ramírez-Barajas P, Torrescano-Valle N. 2015. Chapter 7 - Natural and Human Induced Disturbance. En: Vegetation. Islebe

GA et al. (eds.) Biodiversity and Conservation of the Yucatan Peninsula. Springer International Publishing Switzerland.

Santiago S, Underwood S. 2016. Erosión. Película documental. Saudade Producciones. México. 77 minutos.

Sarin R, Reisch N, Kalafut J, Slack K. 2006. Tarnished Gold: mining and the unmet promise of development. Bank Information Center and Oxfam International. UK.

Sarmiento YC. 2008. Restauración en explotaciones de minas caliza. Revista Luna Azul ISSN 1909-2474. Colombia.

Sarukhán J, Urquiza-Haas T, Koleff P et al. 2015. Strategic Actions to Value, Conserve, and Restore the Natural Capital of Megadiversity Countries: The Case of Mexico

Sarukhán J, Urquiza-Haas T, Koleff P, Carabias J, Dirzo R, Ezcurra E,Cerdeira-Estrada S, Sober´on J. 2015. Strategic actions to value, con-serve, and restore the natural capital of megadiversity countries: thecase of Mexico. BioScience 65:164–173.

Sarukhán J. 2008. Restauración ambiental. El Universal. [Acceso abril de 2020] https://archivo.eluniversal.com.mx/editoriales/39813.html

[SCT] Secretaría de Comunicaciones y Transporte. 2019. Manifestación de Impacto Ambiental modalidad regional para el proyecto denominado Tren Maya Transpeninsular Mérida-Punta Venado. Subsecretaría de Transporte. Dirección General de Transporte Ferroviario y Multimodal.

[SCT] Secretaría de Comunicaciones y Transportes. 2018. Inventario de bancos de materiales en Yucatán. Subsecretaría de Infraestructura. Centro S.C.T. Yucatán. Unidad General de Servicios.

[SDS] Secretaría de Desarrollo Sustentable. 2018. Marco Jurídico de la Secretaría de Desarrollo Sustentable. del Gobierno del Estado de Yucatán 2018-2024. [Acceso abril 2020] http://sds.yucatan.gob.mx/marco-juridico/index.php?Offset=15

[SE] Secretaría de Economía. 2014. Perfil de mercado de la caliza. Coordinación general de Minería. Dirección general de desarrollo minero. Gobierno de México.

[SE] Secretaría de Economía. 2015. Minería, legislación, normatividad y convenios internacionales. Gobierno de México. [Acceso abril 2020].

torhttps://www.gob.mx/se/acciones-y-programas/mineria-legislacion-normatividad-y-convenios-internacionales-6986?state=published

[SE] Secretaría de Economía. 2018. Estudio de la cadena productiva de los materiales pétreos. Documento de análisis. Dirección general de desarrollo minero. Subsecretaría de minería. Gobierno de México.

[Semarnat] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2013. Estrategia Nacional de Cambio Climático Visión 10-20-40. México.

[Semarnat] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2019. Ordenamiento Ecológico del Territorio. Gobierno de México. [Acceso abril 2020] https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/ordenamiento-ecologico-del-territorio

[Semarnat]. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2001. Descripción de los subsistemas productivos en Yucatán.

[Semarnat]. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2015. Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales. indicadores clave, de desempeño ambiental y de crecimiento verde. Edición 2015. Ciudad de México.

[SER] Sociedad Internacional para la Restauración Ecológica. Grupo de trabajo sobre ciencia y políticas. 2004. Principios de SER International sobre la restauración ecológica. www.ser.org y Tucson: Society for Ecological Restoration International.

[SER] Sociedad Internacional para la Restauración Ecológica. Science and Policy Working Group. 2002. The SER primer on ecological restoration. Society for Ecological Restoration.www.ser.org/

[SER] Sociedad para la Restauración Ecológica. 2004. Principios de SER International sobre la restauración ecológica. [Acceso abril 2020] www.ser.org

[SGM] Servicio Geológico Mexicano. 2018. Panorama minero del estado de Yucatán. Secretaría de Economía. Secretaría de Fomento Económico del estado de Yucatán. 40 p.

[SGM] Servicio Geológico Mexicano. 2019. Anuario estadístico de la producción minera. Secretaría de Economía. Gobierno de México. 544 p.

Sheoran V, Sheoran AS, Poonia P. 2010. Soil Reclamation of Abandoned Mine Land by Revegetation: A Review. International Journal of Soil, Sediment and Water3(2):1-21.

Slack K. 2009. The Role of Mining in the Economies of Developing Countries: Time for a New Approach. In: Richards JP (ed.). Mining, Society, and a Sustainable World. Springer.

Stanton W. 1990. Hard limestone – too valuable to quarry: Minerals Planning 43:3-9.

Toledo VM, Barrera-Bassols N, García-Frapolli E. 2008. Uso múltiple y biodiversidad entre los mayas yucatecos (México). Interciencia 33(5):345-352.

Trejo L. 1998. Distribución y diversidad de selvas bajas de México: relaciones con el clima y el suelo. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias, UNAM. México. 109 pp.

Tropek R, Kadlec T, Hejda M, Kocarek P, Skuhrovec J, Malenovsky I. 2012. Technical reclamations are wasting the conservation potential of post-mining sites. A case study of black coal spoil dumps Ecological Engineering 43:13-18.

Tropek R, Kadlec T, Karesova P, Spitzer L, Kocarek P, Malenovsky I. 2010. Spontaneous succession in limestone quarries as an effective restoration tool for endangered arthropods and plants. Journal of Applied Ecology 47:139-147.

[UICN] Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza. 2017. The Bonn Challenge: catalysing leadership in Latin America. IUCN Forest Brief No.14. Suiza.

[UICN] Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza. 2014. Países de Lati-noamérica y el Caribe lanzan la iniciativa 20×20 para restaurar 20 millonesde hectáreas de tierra degradada. [Acceso abril 2020]. http://www.iucn.org/es/?18699/20-20-cop-20

[UICN] Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza. 2018. Bonn Challenge Barometer in Quintana Roo, México. INFOFLR. [Acceso abril 2020]. Bonn-challenge-barometer/mexico-quintana-roo.

USGS [USGS] United States Geological Survey. 2020. Mineral Commodity Summaries. National Minerals Information Center. [Acceso febrero 2020]. https://www.usgs.gov/centers/nmic/cement-statistics-and-information.

Valdez-Hernández M, Gil-Medina R, López-Martínez JO, Torrescano-Valle N, Cabanillas-Terán N, Islebe GA. 2019. Succession and the Relationship between Vegetation and Soil in the Marl Quarries of the Yucatan Peninsula, Mexico. Forests 10(2)116.

Valladares de la Cruz L. 2017. El despojo de los territorios indígenas y las resistencias al extractivismo minero en México, E-Cadernos, Universidad de Coimbra, Portugal.

Venâncio-Martins S. 2017. Alternative Forest Restoration Techniques. Alternative Forest Restoration Techniques, New Perspectives in Forest Science, Helder Filipe dos Santos Viana and Francisco Antonio García Morote, IntechOpen. [Acceso abril 2020].https://www.intechopen.com/books/new-perspectives-in-fores4.

Villasuso M, Méndez R. 2000. A Conceptual model of the aquifer of the Yucatán Peninsula. In: Lutz W, Prieto L, Sanderson W (Editors). Population, Development, and Environment on the Yucatan Peninsula. Austria. p. 120-139.

Volis S. 2019. Plant Conservation: The Role of Habitat Restoration. Cambridge. 492 pp.

Wali MK. 1992. Ecology of the rehabilitation process. En: Wali MK (Ed.). Ecosystem Rehabilitation-Preamble to Sustaintable Development. SBP Academic Publishing, La Haya.

Walker LR, Del Moral R. 2003. Primary Succession and Ecosystem Rehabilitation. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Waye A, Young D, Richards JP, Doucet JA. 2009. Sustainable Development and Mining: An Exploratory Examination of the Roles of Government and Industry, Springer. 482 p.

Weiss G. 2004. The political practice of mountain forest restoration — comparing restoration concepts in four European countries. Forest Ecology and Management 195: 1–13.

Williams P. 2008. World Heritage Caves and Karst: A Thematic Study: A global review of karst World Heritage properties: present situation, future prospects and management requirements. Suiza: World Commission on protected Areas (WCPA)-International Union for Conservation of Nature (IUCN).

Willis K, Gillison L, Brncic T. 2004. How “virgin” is virgin rainforest? Science 304:402–403.

Wright SJ, Muller-Landau H. 2006. The future of tropical forest species. Biotropica 38:287–301.

Yang J, Lv Z, Wielstra B, Wei J, Xu F, Si Y. 2019. Prioritizing Green Spaces for Biodiversity Conservation in Beijing Based on Habitat Network Connectivity. Sustainability 11 (7):2042-2057.

Yuan JG, Wei F, Fan L, Chen Y, Wang DQ, Yang ZY. 2006. Soil formation and vegetation stablishment on the cliff face of abandoned quarries in the early stages of natural colonization. Restoration Ecology 14(3):349-356.

Zhang H, Chu LM. 2013. Changes in Soil Seed Bank Composition during Early Succession of Rehabilitated Quarries. Ecological Engineering 55:43-50.

Zinck A. 2005. Suelos, información y sociedad. En: Bautista F, Palacio G (Eds.) Caracterización y manejo de los suelos de la península de Yucatán: implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales. Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Autónoma de Yucatán. 282 p.

Zupunski M, Pajevic S, Arsenov D, Nikolic NM Pilipovic A, Borisev M. 2018. Chapter 13- Insights and lessons learned from the long-term rehabilitation of abandoned mine lands—a plant based approach. Bio-geotechnologies for mine site rehabilitation. Elsevier