

Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco

División de Ciencias Sociales y Humanidades

Maestría en Economía, Gestión y Políticas de Innovación

Área de Economía y políticas de innovación

Idónea Comunicación de Resultados:

**La biotecnología aplicada a la biorremediación de suelos
contaminados por hidrocarburos en México. Un estudio
exploratorio basado en el enfoque sociotécnico**

Presentada por el alumno:

Lic. en Biol. Mol. Kevin Nicolás Castillo

Para obtener el grado de:

Maestro en Economía, Gestión y Políticas de Innovación

Directores

Dra. Graciela Carrillo González

Dr. Daniel Hugo Villavicencio Carbajal

Miembros del Jurado

Dra. Claudia del Carmen Díaz Pérez

Dr. Arturo Rojo Domínguez

Agradecimientos

La realización de esta investigación no habría sido posible sin el incondicional apoyo de mi madre, padre y hermanas, por sus consejos que me permitieron mantener el impulso durante este proceso. Gracias a mis amigos, Alexis Vargas y Alfredo Padilla por ser una fuente constante de conocimiento y aprendizaje en el laberinto de las ciencias sociales, a mis amigos Daniel Sánchez, Alexis Báez y Elisua López por ser las raíces de mi árbol de vida desde hace trece años, gracias por las palabras de aliento y los momentos inolvidables. A Ana, gracias por ser mi refugio y protección en los momentos difíciles. Gracias a mis asesores Dr. Daniel Villavicencio y Dra. Graciela Carrillo por su dedicación y esmero para conducir la investigación. A mis lectores Dra. Claudia Díaz y Dr. Arturo Rojo, gracias por sus recomendaciones y comentarios que han servido para profundizar en los elementos sustantivos del documento. A la UAM, gracias por haber sido el lugar que me permitió formarme desde la multidisciplinariedad biológica y social, y me ha brindado la oportunidad de materializarlo a través de esta investigación. A CONACYT, gracias por el apoyo económico que recibí durante estos años.

Dedico esta investigación a mi país, especialmente para aquellos mexicanos y mexicanas que luchan sin descanso por el ideal de un medio ambiente sano para todos nosotros.

Contenido

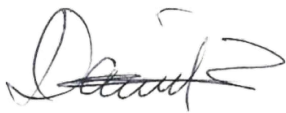
Capítulo 1. Introducción	8
Capítulo 2. Sistemas sociotécnicos, perspectiva multinivel y transiciones hacia la sustentabilidad.	16
2. 1. Los nichos de innovación.	18
2.2. Régimen sociotécnico	22
2.3. Las reglas institucionales	25
2.4. Paisaje sociotécnico.	27
2.5 Transiciones tecnológicas	31
2.6 Transición hacia la sustentabilidad	34
Capítulo 3. Importancia de la biotecnología y el contexto de la contaminación de suelos afectados por hidrocarburos en México.....	43
3.1 Biotecnología aplicada en la biorremediación y enfoque sociotécnico	43
3.2 Contexto de la actividad remedial de las empresas para la descontaminación de los hidrocarburos en México	47
3.3 Evolución por año de los procedimientos autorizados de remediación de suelos contaminados por hidrocarburos	49
3.4 Caracterización de las condiciones de la contaminación de suelo en México.....	51
Capítulo 4. Metodología	55
Capítulo 5. El sistema sociotécnico de la biorremediación de suelos y la transición hacia un sistema basado en la biotecnología sustentable.....	61
5.1 Nicho de innovación sustentable de biotecnología ambiental para la remediación de suelos contaminados por hidrocarburos.....	63
5.2 Contexto institucional en el que se involucran los nichos de innovación de biotecnología ambiental	74
5.3 Convenios internacionales en materia ambiental.....	87
5.4 Nivel de desarrollo del nicho de innovación sustentable de biotecnología ambiental.....	91
5.5 Barreras institucionales para el desarrollo del nicho de innovación sustentable.....	102
Capítulo 6. Conclusiones.....	107
Bibliografía.....	112
Anexos	116

Resumen

En México se ha incrementado en los últimos años el número de pasivos ambientales relacionados con la contaminación de suelos afectados por hidrocarburos. La crisis ambiental está acompañada de cambios en la sociedad, gobierno y empresas que utilizan los recursos a su disposición para responder a los impactos del aumento de los niveles de contaminación. Para entender este fenómeno con características dinámicas, inciertas y complejas hemos utilizado el enfoque de los sistemas sociotécnicos donde fue posible identificar a las condiciones institucionales y sociotécnicas que existen en nuestro país e inciden en la consolidación de espacios protegidos que se encuentran desarrollando nuevas metodologías de descontaminación. Como se demuestra en el documento, la contaminación de los suelos no ha sido ignorada por investigadores de instituciones académicas como universidades y centros públicos de investigación que han comenzado a desarrollar redes de colaboración con el objetivo de encontrar nuevas herramientas de restauración ambiental basadas en la biotecnología. Sin embargo, se ha encontrado que estos espacios protegidos de la biotecnología se encuentran en un nivel de desarrollo de proto-nicho envueltos en un arreglo institucional que ha levantado múltiples barreras para su aplicación en los sitios afectados.

Palabras clave

Biotechnología, sistemas sociotécnicos, innovación.



Dr. Daniel Hugo Villavicencio Carbajal



Dra. Graciela Carrillo González

Protocolo

El documento se realizó con base en las aportaciones del enfoque sociotécnico, particularmente en el análisis de la perspectiva multinivel en las transiciones sustentables. Para la discusión y análisis se optó por desarrollar una metodología documental exploratoria dirigida a obtener evidencia de las principales instituciones académicas que realizan biotecnología ambiental, así como la revisión de normas y leyes ambientales. Esto con el propósito de identificar a los actores que participan en nuevas tecnologías, sus interacciones y las condiciones institucionales en las que desarrollan sus actividades.

Impacto científico

Los resultados obtenidos en la investigación permitieron aportar conocimiento al enfoque de los sistemas sociotécnicos sobre las barreras institucionales que inciden en la transición de las tecnologías emergentes, así como la propuesta de una categorización del nivel de desarrollo de los nichos de innovación que permitió identificar la situación en la que se encuentra la biotecnología ambiental en México.

Impacto social

Las consecuencias de la contaminación de los suelos afectan directamente al entorno natural y la salud de las personas. El problema de la contaminación por hidrocarburos no se ha logrado resolver por las tecnologías tradicionales, por lo que fue importante conocer las condiciones institucionales y sociotécnicas que influyen en el desarrollo de nuevas tecnologías descontaminantes. La investigación aporta diferentes elementos para un estudio integral sobre la problemática ambiental, que permite entender las dificultades a las que se enfrentan las innovaciones que potencialmente pueden resolver la contaminación de los suelos.

Aportaciones a las soluciones de los problemas prioritarios

La investigación se encuentra directamente relacionada con el Programa Nacional Estratégico de CONACYT “Agentes tóxicos y procesos contaminantes” donde se ha encontrado que existen oportunidades de mejora en el arreglo institucional ambiental, en los procesos burocráticos en las solicitudes de las empresas para la descontaminación, en la vinculación entre el sector académico y empresarial, en la protección del Estado a través de incentivos económicos para el desarrollo de nuevas herramientas de descontaminación como la biotecnología y en la disponibilidad de los datos ambientales.

Lista de tablas y gráficas

Figura 1. Jerarquía anidada del análisis multinivel, los nichos de innovación atraviesan al régimen sociotécnico provocando nuevas configuraciones que constituyen al paisaje.

Figura 2. Análisis multinivel de las dimensiones del sistema sociotécnico (Geels, 2004).

Tabla 1. Relaciones entre los cambios en el entorno-paisaje y la presiones que ejercen en los regímenes. Construida a partir de Geels & Schot (2007).

Tabla 2. Categorización del nivel de desarrollo de los nichos de innovación.

Tabla 3. Caracterización de los estados de cambio y presión del paisaje.

Tabla 4. Ventajas y desventajas del uso de tecnologías remediales.

Gráfica 1. Lugares de procedencia de las empresas que hacen remediación de suelos contaminados por hidrocarburos

Gráfica 2. Procedimientos utilizados por empresas para la remediación de suelos por porcentaje

Gráfica 3. Cantidad de procedimientos autorizados por año a las empresas.

Gráfica 4. Evolución de los procedimientos autorizados por tipo y año.

Gráfica 5. Emergencias ambientales en México.

Gráfica 6. Pasivos ambientales en México.

Gráfica 7. Sitios remediados en México.

Tabla 5. Dimensión, categoría analítica e indicadores del sistema sociotécnico de la biorremediación de suelos en México utilizando biotecnología.

Figura 3. Interacción entre los actores y organizaciones del nicho de innovación.

Figura 4. Red de instituciones sobre biotecnología aplicada a la biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos en México.

Figura 5. Red de instituciones principales que participan en la producción científica de biotecnología ambiental en la biorremediación de suelos.

Figura 6. Sistema sociotécnico de biotecnología ambiental para la biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos en México.

Tabla 6. Patentes relacionadas con la biotecnología y biorremediación de suelos por hidrocarburos.

Figura 7. Palabras principales de los artículos de investigación en biotecnología ambiental

Figura 8. Desarrollo evolutivo de las herramientas biotecnológicas ambientales en México.

Tabla 7. Nivel de desarrollo del nicho de innovación relacionado con la biotecnología.

Tabla 8. Barreras y obstáculos institucionales que inciden en el desarrollo de nicho de innovación sustentable de biotecnología ambiental.

Figura 9. Reconstrucción de la Figura 9; el Sistema sociotécnico de biotecnología ambiental para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos caracterizado y adecuado según la evidencia.

Anexo 1. Claves y procesos clasificados por la SEMARNAT para la remediación de suelos.

Anexo 2. Cantidad de emergencias y pasivos ambientales y sitios remediados en México por año.

Anexo 3. Entrevista a la Dra. Refugio Rodríguez Vázquez, investigadora del CINVESTAV.

Anexo 4. Matriz de interacciones de instituciones, universidades y CPI de biotecnología ambiental para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos.

Capítulo 1. Introducción

El problema de la contaminación en el mundo se ha agudizado en las últimas décadas a consecuencia de la intensa actividad de industrias como la petroquímica, textil, agrícola, minera y demás. Los desechos generados por estas industrias son vertidos en cuerpos hídricos, emitidos a la atmósfera y arrojados a los suelos. Los contaminantes causan desequilibrios ecológicos, erosión de los suelos, pérdida de la diversidad microbológica, daños a la salud de las personas y efectos en el cambio climático. Entre los principales desechos generados por las industrias contaminantes se encuentran los metales pesados, el petróleo y sus derivados, pesticidas, hidrocarburos, componentes orgánicos y folatos (Megharaj et al., 2011).

En México, por ejemplo, se ha reportado desde hace algunas décadas en los estados del Norte las altas concentraciones de metales pesados como el arsénico en los cuerpos hídricos y suelos derivado de la actividad minera que nos ha posicionado dentro de los diez países más afectados por este contaminante (Cebrian et al., 1983). Además del arsénico, el petróleo es una fuente importante de contaminación en suelo y agua y su exposición en el entorno se debe principalmente por las derramas accidentales en oleoductos, plataformas de extracción y refinerías. Sólo en el 2014 se reportaron fugas de más de 4000 barriles de petróleo crudo al Río de San Juan que cruza los estados de Nuevo León y Coahuila causando importantes daños a la salud, ecológicos y económicos al afectar la producción agrícola de árboles de naranjo de la región (López 2014). La industria textil en nuestro país es una de las más importantes que requiere de grandes cantidades de volumen de agua y dada su naturaleza de resistencia y durabilidad de los componentes químicos utilizados, presenta serias dificultades para la descontaminación del líquido vital. Existen más de mil tipos de pigmentos y colorantes sintéticos que son vertidos en ríos y lagos en varios estados del país, afectando directamente en los cultivos y la fertilidad de los suelos (Cortázar, 2012).

Para responder a la contaminación del agua, suelos y aire se han utilizado tecnologías de descontaminación cuyo principal objetivo es la reducción o eliminación de los compuestos contaminantes para regresar el entorno a su estado natural. A nivel mundial, han surgido

tecnologías para la descontaminación de suelos que a lo largo del tiempo se han diversificado en metodologías físicas, químicas, térmicas y biológicas¹.

La biorremediación es una metodología de descontaminación de suelos de origen biológico que es definida como un proceso para reducir (degradar, mineralizar o transformar) la concentración de moléculas contaminantes a un estado inocuo. Este proceso depende de una gran cantidad de variables para garantizar su eficacia: el tipo de contaminante, el sitio contaminado, cantidad de agentes contaminantes en el lugar, temperatura, salinidad del suelo entre otros, por lo que han surgido una gran variedad de técnicas que permiten a la biorremediación adaptarse a las condiciones específicas de los suelos (Azubuike et al., 2016).

En esta investigación se hará un especial énfasis en la contaminación de los suelos afectados por hidrocarburos y sus derivados, acotando la búsqueda de información de distintas fuentes en los productos generados por la industria petroquímica. Los principales compuestos contaminantes del petróleo y la gasolina son los hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAHs) que son moléculas orgánicas que consisten en dos o más anillos de benceno y los compuestos heterocíclicos aromáticos (HACs), que cuentan con átomos de oxígeno y nitrógeno que reemplazan a los carbonos del anillo de benceno (Liu et al. 2019). Estos compuestos se les ha identificado como potencialmente tóxicos por su efecto carcinogénico y mutagénico en humanos y otros organismos vivos, por lo que su presencia en el medio ambiente constituye un problema de salud.

De forma natural, existen distintos organismos vivos (principalmente hongos y bacterias) que degradan estos compuestos orgánicos. A través de diferentes estudios se ha identificado que las bacterias que pertenecen a los géneros de *Sphingobium* and *Sphingomonas* tienen habilidad para la biodegradación de los PAHs. La habilidad de biodegradación de los organismos vivos sobre los PAHs y los HACs se debe a que estos organismos utilizan los compuestos contaminantes como parte de sus procesos metabólicos lo que al final conduce en la excreción de compuestos químicos de menor impacto ambiental. Es importante entonces para la investigación científica, conocer los genes y enzimas que forman parte del

¹ En la investigación, al desarrollo de tecnologías físicas, químicas y biológicas que son utilizadas ampliamente para la descontaminación de suelos se les ha denominado “tradicionales” para identificar su diferencia con las tecnologías y metodologías emergentes.

mecanismo metabólico de las bacterias degradadoras de los compuestos orgánicos para entender su naturaleza biológica y lograr aplicaciones industriales.

Si bien los avances en la caracterización e identificación de organismos vivos descontaminantes han sido importantes, es necesario encontrar nuevos métodos para acelerar su aplicación en la biorremediación para restaurar el medio ambiente. De lo contrario, la capacidad y utilidad de descontaminación de los microorganismos se verá mermada por la rapidez que las actividades antropogénicas influyen en el entorno. La problemática ambiental de suelos contaminados por hidrocarburos representa un desafío para las tecnologías tradicionales por la complejidad del proceso de restauración, por lo que es común que se utilicen distintas tecnologías de remediación simultáneamente para mejorar los resultados. En el caso de la biorremediación, la investigación científica es importante porque constantemente se han reportado nuevos microorganismos con capacidades de degradación de contaminantes, por lo que determinar los mecanismos metabólicos y la composición molecular de las enzimas y genes resulta necesario en la búsqueda de nuevas metodologías de descontaminación.

El desarrollo de las herramientas moleculares de la biotecnología y las tecnologías de ingeniería genética en los microorganismos degradadores de compuestos químicos representan un conjunto de mejoras y ventajas para incrementar la habilidad para la descontaminación de suelos (Zhao, 2017). Sin embargo, para el avance de la biorremediación de suelos contaminados se requiere lograr superar las barreras intrínsecas de los suelos y considerar las propiedades de los microorganismos. Ante este escenario, desde la investigación científica se ha propuesto el uso de las tecnologías *ómicas*, la biología sintética, la ingeniería metabólica y otras herramientas biotecnológicas para propiciar la eficiencia de la biorremediación (Yang et al., 2021).

La producción de la industria petroquímica en México es una de las actividades más importantes para el desarrollo económico del país por su relevancia en el gasto público y por conformar las cadenas productivas de diversas industrias. Sin embargo, en los últimos años se han incrementado el número de tomas clandestinas a los ductos de Petróleos Mexicanos (PEMEX), así como accidentes de derrames en las refinerías y plataformas de extracción que ha causado un aumento en el número de sitios contaminados por

hidrocarburos particularmente en las entidades de Tamaulipas, Chihuahua, Guanajuato y Veracruz (Semarnat, 2019). Para atender a la problemática ambiental de suelos contaminados por hidrocarburos, se han desarrollado diferentes tecnologías de descontaminación que son utilizadas por las empresas para restaurar los suelos. En nuestro país, se han consolidado tecnologías para remediar los suelos afectados por hidrocarburos que son procedimientos que aplican metodologías de origen biológico, físico, químico y térmico.

Los procesos que forman parte de las metodologías biológicas más utilizadas por las empresas son la “Biorremediación por biopilas a un lado del sitio contaminado” y la “Biorremediación por *landfarming* a un lado del sitio contaminado” mientras que para los procesos químicos el más utilizado por las empresas es la “Oxidación química a un lado del sitio contaminado”, por último, el proceso físico más usado para la remediación es la “Extracción de vapores en el sitio contaminado”. La suma de estos procedimientos usados por las empresas para la remediación de suelos representa casi el 70% del total de las metodologías de descontaminación autorizadas por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) por lo tanto son consideradas como las tecnologías dominantes para la restauración de los suelos en México. Sin embargo, las tecnologías de descontaminación físicas, químicas y térmicas son altamente costosas, requieren una gran cantidad de recursos humanos e infraestructura física para su operación y los subproductos de su proceso de remediación tienen impactos en el medio ambiente, por lo que las tecnologías de origen biológico como la biorremediación han complementado a estas tecnologías como una alternativa eficaz para las empresas al reducir costos en su aplicación y por sus subproductos de menor impacto en el entorno. Al ser la biorremediación una de las metodologías más aplicadas para la descontaminación de suelos, su mejoramiento se traduce en una estrategia indispensable para reducir los sitios contaminados.

La aplicación de las tecnologías tradicionales ha sido regulada a través de distintas leyes y normas gestionadas por la SEMARNAT, pero los resultados observados en su incidencia para disminuir la cantidad de los sitios contaminados por hidrocarburos son discutibles

porque los pasivos ambientales² se han incrementado en los últimos años de manera alarmante. Diferentes planteamientos pueden funcionar como puntos de partida para la investigación a partir de la información anterior; las condiciones institucionales que conforman el contexto para las tecnologías dominantes, las capacidades científicas y tecnológicas de biotecnología la que se encuentran en el proceso de desarrollo donde su difusión depende de las condiciones exógenas y los actores que participan en el sistema.

Es necesario entender las condiciones en las que se han consolidado las tecnologías tradicionales de descontaminación de suelos, es decir, conocer el contexto institucional que influye en el desarrollo de estas tecnologías. De esta manera, es posible entender los factores incrustados dentro de las leyes y normas que han surgido para resolver el problema ambiental y que a su vez pueden condicionar la difusión de nuevas tecnologías.

Si las tecnologías tradicionales tienen obstáculos operativos y económicos para resolver el problema de la contaminación de los suelos entonces surgen alternativas en forma de innovaciones que son concebidas con el único propósito de ser utilizadas como nuevas soluciones para los suelos afectados por los hidrocarburos. El mejoramiento del proceso de biorremediación con innovaciones y un enfoque basado en la sustentabilidad permitirá que las tecnologías tradicionales se sustituyan o complementen en el conjunto de metodologías disponibles para la descontaminación. La biotecnología aplicada a la biorremediación es entonces un mejoramiento en la descontaminación de suelos que se ha posicionado como una alternativa que tiene el potencial de permearse para convertirse en una nueva metodología para la restauración de los suelos.

El uso de mejoras incrementales en los sistemas sociales, tecnológicos, científicos e institucionales no ha sido suficiente para abordar los problemas de la contaminación actuales, por lo que se requieren cambios profundos en los sistemas en forma de soluciones prácticas (Savaget et al., 2019). Estos cambios deben ser analizados a la luz de un enfoque que integre distintos actores, instituciones y organizaciones involucradas en una dinámica inestable e incierta que incentivan o desincentivan los procesos de surgimiento de innovaciones sostenibles.

² Los pasivos ambientales son considerados los sitios contaminados que a lo largo del tiempo se han acumulado sin la aplicación de metodologías de restauración ambiental.

Por la razón anterior, se utilizará en esta investigación el enfoque del sistema sociotécnico y la perspectiva multinivel propuestos por Geels (2004) donde se retoma la idea que las innovaciones surgen y se desarrollan en nichos de innovación que si las condiciones sociotécnicas e institucionales son favorables pueden alcanzar a sustituir o complementar las tecnologías dominantes. Además, este enfoque permite entender que la estabilidad de las tecnologías tradicionales de descontaminación ha sido alterada por su ineficiencia al resolver la problemática ambiental, abriendo paso a nuevas tecnologías de restauración. Por lo tanto, como problema de la investigación es relevante conocer si nuestro país cuenta con las condiciones sociotécnicas e institucionales necesarias para la adopción de la biotecnología aplicada a la biorremediación por parte de las empresas para su uso como método de descontaminación. Aunado a esto, resulta importante determinar si existen nichos de innovación basados en la biotecnología ambiental en nuestro país, así como identificar a los actores y sus interacciones susceptibles de aplicarla en la biorremediación de los suelos contaminados y así sustituir o complementar las tecnologías tradicionales.

Por lo anterior, la principal pregunta de investigación es la siguiente *¿Cuáles son las condiciones sociotécnicas e institucionales que existen en nuestro país que favorecen o no la aplicación de la biotecnología en la biorremediación como metodología para la restauración de suelos contaminados por hidrocarburos?* Como preguntas de investigación que complementan a la principal se proponen:

- ¿Cuáles son los actores, elementos y el contexto que definen al régimen sociotécnico y los nichos de innovación relacionados con la aplicación de la biotecnología en la biorremediación de suelos en México?
- ¿Cuál es el grado de desarrollo de los nichos de innovación que incide en la potencial aplicación de la biotecnología en la descontaminación de suelos afectados por los hidrocarburos?

Objetivos de investigación:

Para responder a las preguntas de investigación, se ha construido como objetivo general al siguiente: *“Caracterizar las condiciones del sistema sociotécnico que indiquen en el desarrollo de los nichos de innovación y en la difusión de la biotecnología como metodología de descontaminación”*. Los objetivos específicos se han establecido acerca de:

- Identificar a los actores (empresas, instituciones educativas u organizaciones) que conforman el régimen y nicho sociotécnico de biotecnología y biorremediación de suelos en México.
- Determinar el nivel de desarrollo de los nichos de innovación asociados a la biotecnología ambiental para la descontaminación de suelos afectados por hidrocarburos.

Como hipótesis de la investigación se establece que la biotecnología en la biorremediación puede ser aplicada como una metodología confiable para la restauración de los suelos contaminados por hidrocarburos siempre y cuando existan condiciones sociotécnicas e institucionales que permitan su desarrollo y difusión para sustituir o complementar las tecnologías de descontaminación tradicionales.

En la presente investigación, se utilizará el enfoque sociotécnico como una metodología que permite la identificación de los actores y organizaciones que participan en un proceso dinámico de cambios que presionan sobre las configuraciones y arreglos institucionales en los procesos científicos y tecnológicos dominantes que permiten ventanas de oportunidad para la innovación. Por esta razón, la lógica del documento obliga a orientar el capítulo del marco contextual en términos del paisaje sociotécnico que aborda aspectos de nuestro país como la contaminación y las empresas descontaminantes, y del contexto del sistema sociotécnico que se analiza como las normas, instituciones y políticas públicas.

El documento está seccionado en capítulos donde en el Capítulo 2 se explicará los razonamientos recuperados de la bibliografía sobre sistemas sociotécnicos, un enfoque útil para entender fenómenos altamente dinámicos como puede ser el surgimiento de innovaciones y la manera en que se difunden en sistemas estables y estáticos. Además, en ese mismo capítulo se utiliza como base al sistema sociotécnico para entender cómo ocurren las transiciones sustentables y los diferentes enfoques que han surgido sobre las maneras en que se debe gestionar el nicho de innovación sustentable. Posteriormente, en el Capítulo 3 se abordará el contexto de la contaminación de suelos afectados por hidrocarburos en nuestro país a través de la construcción de diferentes gráficas y las metodologías de descontaminación predominantes en México. En el Capítulo 4 sobre la metodología de la investigación se describen las herramientas de análisis de datos utilizadas

para la construcción de redes de interacción y el mapeo de las palabras predominantes por artículos de investigación, que fueron útiles para entender la dinámica de los investigadores en diferentes instituciones. En el Capítulo 5 se discuten los hallazgos encontrados y se contrastan con la bibliografía encontrada, de tal manera que se proponen enfoques analíticos respecto a la categorización de los nichos de innovación y las barreras institucionales que en nuestro país se han levantado para la aplicación de la biotecnología en la biorremediación. Por último, en el Capítulo 6 se muestran las conclusiones de la investigación.

Capítulo 2. Sistemas sociotécnicos, perspectiva multinivel y transiciones hacia la sustentabilidad.

Para realizar esta investigación, es necesario analizar fragmentos de la realidad que permitan el entendimiento de los cambios en la sociedad causados por la contaminación de los suelos, los actores³ involucrados en su descontaminación y las condiciones tecnológicas, científicas e institucionales que prevalecen en los sistemas para responder a estos cambios. Para ello se tomará como referencia analítica a las aportaciones realizadas por Frank Geels (2004, 2007 y 2011) en el estudio de los sistemas sociotécnicos, sus componentes, interacciones, las dinámicas, la coevolución de las presiones en el entorno y la respuesta de los actores, así como la transición que puede darse entre los sistemas para entender la relación que guardan los actores, el contexto institucional y el entorno.

El enfoque de los sistemas sociotécnicos en esta investigación es útil porque permite identificar a los actores como las industrias contaminantes o empresas no contaminantes que se dedican a la remediación, a los grupos de interés que ejercen poder en el entorno, las instituciones como las leyes y normas que regulan la emisión de contaminantes de las industrias, y el paisaje como la forma del ambiente exógeno que tiene influencia directa en los nichos y las reglas del sistema.

Las necesidades de la sociedad son cumplidas a través de una gran escala de transformaciones conocidas como sistemas de innovación. La tecnología juega un papel muy importante para que los sistemas de innovación pueden realizar las funciones de la sociedad, pero se requieren de estructuras sociales y organizaciones que permitan a la tecnología orientarse a un propósito. Para Geels (2004), los artefactos tecnológicos no tienen sentido sin una organización social que les da soporte. Desde esta perspectiva, Hughes (1987) propone la metáfora de la red donde indica que los artefactos físicos, las organizaciones, los recursos naturales, los elementos científicos y los artefactos legislativos se combinan para cumplir con funcionalidades sociales. A través de estas consideraciones se propone a los sistemas sociotécnicos como un conjunto (*clúster*) de elementos que

³ Los actores tienen un papel crucial como los elementos que conducen actividades de forma individual o colectiva dentro del sistema sociotécnico que se encuentran en múltiples dimensiones con tareas específicas como la descontaminación de los suelos, la modificación de las leyes, el otorgamiento de permisos, la creación de conocimiento, entre otras.

incluyen tecnología, regulación, las practicas del usuario y del mercado, el sentido cultural y la infraestructura.

Uno de los aspectos de los sistemas sociotécnicos es la sustitución tecnológica que comprende tres procesos, la emergencia de nuevas tecnologías en el sistema, su difusión y el reemplazamiento de las tecnologías antiguas (Geels, 2004). Además, los sistemas tienen una característica evolutiva y van acompañados por el surgimiento de nuevas funcionalidades sociales. Desde el enfoque sociotécnico, la evolución de los sistemas puede ocurrir por la substitución tecnológica que es entendida por la transformación continua entre nuevas y viejas tecnologías. Las nuevas emergen en el contexto de las viejas y gradualmente se desarrollan a través de un enfoque de transformación que incluye la especialización y la diferenciación.

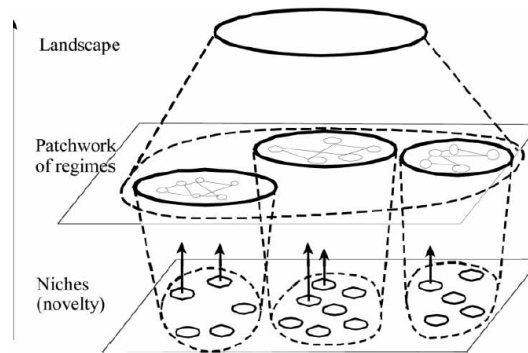
El análisis del sistema sociotécnico es complejo por la cantidad de elementos que lo conforman e interaccionan en múltiples dimensiones, desde la dimensión que ha alcanzado la estabilidad sistémica hasta la dimensión disruptiva que crea y desarrolla las innovaciones radicales. Por tanto, para entender la transición tecnológica entre la dimensión dominante por la disruptiva es necesario utilizar el enfoque multinivel que en la literatura es la integración de múltiples perspectivas de la economía evolutiva, la sociología y el enfoque sociotécnico.

En el proceso económico, los supuestos de la economía neoclásica son útiles en cortos periodos de tiempo al entender los estados estables, las racionalidades perfectas y la búsqueda de la optimización de los actores en sus decisiones, sin embargo, en el largo plazo en condiciones dinámicas el enfoque neoclásico es insuficiente para explicar los procesos de cambio. Además, las reglas y percepciones juegan un rol importante en el proceso sociológico que introducen certidumbre en las actividades de los actores. Durante los periodos dinámicos también se encuentran procesos de aprendizaje, experimentación e interacciones que son importantes para el surgimiento y consolidación de las innovaciones. La perspectiva multinivel en las transiciones de los sistemas sociotécnicos distingue tres niveles de conceptos analíticos: los nichos de innovación, el régimen y el paisaje sociotécnicos.

2. 1 Los nichos de innovación.

Desde la perspectiva multinivel de las transiciones en los sistemas sociotécnicos, los nichos de innovación se encuentran en el nivel micro y es el lugar donde las innovaciones radicales emergen. El corazón del enfoque multinivel es que las transiciones ocurren durante las interacciones entre los procesos de los múltiples niveles: los nichos de innovación en el nivel micro, el régimen sociotécnico en el nivel meso y el paisaje sociotécnico en el nivel macro. En la siguiente Figura 1, obtenida de Geels & Schot (2007) se observa la perspectiva multinivel con los tres conceptos analíticos y su interrelación. En la parte inferior, los nichos de innovación pueden permear al régimen sociotécnico cuando existen presiones en el paisaje de tal manera que si se sustituyen las tecnologías viejas se pueda conducir a nuevas configuraciones en el régimen en un proceso denominado jerarquía anidada.

Figura 1. Jerarquía anidada del análisis multinivel, los nichos de innovación atraviesan al régimen sociotécnico provocando nuevas configuraciones que constituyen al paisaje.



Fuente: Geels & Schot (2007)

La innovación que existe en los sistemas y los regímenes presentes es frecuentemente del tipo incremental y con características de *path dependence*⁴ que surgen por los mecanismos

⁴ El *path dependence* o “dependencia del camino” se debe entender como un proceso de rigidez en los sistemas sociotécnicos que produce distintos fenómenos evolutivos a lo largo del tiempo. Este proceso de dependencia es inevitable en los sistemas debido a las inversiones que han realizado empresas y organizaciones para desarrollar las tecnologías tradicionales.

de *lock in*⁵. Dentro de los sistemas sociotécnicos existen mecanismos de *path dependence* y estabilidad entre los regímenes tecnológicos donde a través de largos periodos de tiempo las tecnologías logran estados estables al resolver los problemas que se encuentran en las configuraciones del régimen sociotécnico. Es decir que mientras no se presente algún problema nuevo que resolver, es improbable que aparezcan nichos de innovación. En el caso de las industrias contaminantes, es posible identificar a las tecnologías tradicionales como parte de una estabilidad y *path dependence* de las industrias y empresas dedicadas a la remediación para descontaminar los suelos.

Hay un mecanismo de *lock in* tecnoeconómico el cual engloba a las inversiones estancadas en la competencia de las industrias que fomentan los intereses para resistirse a los cambios por la transición de las tecnologías emergentes de bajo costo y alto rendimiento en comparación con las tecnologías dominantes que se han generado en décadas de aprendizaje y optimización de los procesos. Por su parte, el mecanismo de *lock in* cognitivo y social incluye las rutinas y hábitos que impiden a los actores a desarrollar nuevos artefactos, el surgimiento de alineamientos sólidos entre los grupos sociales que han permeado en sus estilos de vida organizándose alrededor de la tecnología que se encuentra presente en el sistema. Por último, el mecanismo de *lock in* institucional y político se refiere a la existencia de regulaciones, estándares y redes de políticas públicas que crean obstáculos para el surgimiento de nuevas tecnologías o que frenan su difusión al mercado y la sociedad (Geels, 2019).

Tomando en cuenta las consideraciones de los mecanismos de *lock in*, *path dependence* y la estabilidad del sistema e innovaciones incrementales⁶, aparentemente no existen incentivos para generar nuevas innovaciones radicales⁷. Para Geels (2004), los nichos de innovación son el lugar donde surgen este tipo de innovaciones, encapsuladas en espacios protegidos de la selección del mercado y la existencia de tecnologías tradicionales. En algunas ocasiones, la protección de los nichos se da a través de subsidios gubernamentales que

⁵ El termino de *lock in* o “encierro” permite identificar las practicas dentro de los sistemas que se han estancado por la alta estabilidad que proveen a los mismos. Este proceso es estático, estable y con poca incertidumbre por las rutinas desarrolladas por los individuos.

⁶ Las innovaciones incrementales son procesos que agregan valor adicional a productos que ya existen. Los procesos de optimización, mejoramiento y eficiencia pueden ser entendidos en el margen de este concepto.

⁷ Las innovaciones radicales son procesos que conducen a la creación de nuevos productos y servicios.

buscan incentivar el desarrollo científico y tecnológico dirigido estratégicamente e incluso dentro de empresas que han decidido invertir en tecnologías que consideran potenciales en el futuro. Sobre la perspectiva de conceptualizar al nicho como una protección de las innovaciones radicales han surgido en la literatura diferentes enfoques que permiten abordar los mecanismos institucionales para la gestión estratégica de los nichos que se revisará más adelante en el capítulo.

Los nichos ofrecen espacios para los procesos de aprendizaje y al no estar incorporados todavía en las reglas del régimen sociotécnico, pueden desviarse de sus limitaciones. Las tres dimensiones analíticas del sistema sociotécnico, es decir, las reglas, los actores y el sistema pueden ser identificados en los nichos, aunque presentes de forma distintiva. Contienen reglas, aunque no se han logrado cristalizar completamente, existe un alto grado de incertidumbre en las preferencias del usuario, patrones de comportamiento, en el efecto que tendrán las políticas públicas y las redes entre actores sociales se encuentran apenas construidas (Geels, 2004).

Para entender la relación que guardan los nichos de innovación con la sustentabilidad, en la literatura se ha estudiado el enfoque de la *Gestión Estratégica de los Nichos* (Schot, 2008) de tal manera que las organizaciones puedan promover la creación de nichos tecnológicos específicos. Este enfoque se refiere a la protección orientada por parte de políticas públicas, gestión empresarial y vinculación académica con el objetivo de desarrollar los nichos adecuados para la innovación sustentable. Para Schot (2008), si los nichos de innovación enfocados a la sustentabilidad son desarrollados de forma apropiada entonces pueden actuar como bloques de construcción que resuelven los cambios sociales motivados por la contaminación. El surgimiento y substitución de la tecnología tradicional por los nichos de innovación conlleva a mecanismos de selección adaptativa donde las nuevas tecnologías no pueden inmediatamente tomar el lugar de las tecnologías tradicionales. Por lo tanto, algunas políticas públicas pueden orientarse a generar y proteger los nichos de innovación porque dentro de los objetivos y metas de la política se encuentra el desarrollo tecnológico que deriva de las innovaciones radicales en los nichos.

Para que la innovación de los nichos pueda emerger al nivel meta, tienen que surgir tres procesos internos para asegurar el desarrollo de la innovación: la articulación de las

expectativas y visiones, que son consideradas importantes en el desarrollo del nicho porque proveen dirección en el proceso de aprendizaje, atraen la atención y proveen de legitimidad a la protección continua de la innovación; la construcción de redes de actores sociales que permite la creación de interacciones entre los grupos de interés (*stakeholders*) y proveen los recursos necesarios, y por último las múltiples dimensiones del proceso de aprendizaje (Schot & Geels, 2008).

El desarrollo de los nichos puede conceptualizarse a través de dos niveles, el nivel de desarrollo en proyectos locales y el nivel global. Para Geels & Raven (2006), los proyectos locales pueden agregarse en un proceso que inicia con uno o pocos proyectos seguidos de la existencia en el nivel micro de redes de actores locales que tienen intereses en común. Las expectativas que tienen los actores del micro nivel en la innovación de los nichos locales es una regla cognitiva que van a guiar los proyectos en su etapa temprana a través del entorno amplio, inestable e incierto. Si el nivel local de los proyectos permite la agregación de los proyectos y la difusión del aprendizaje entonces las reglas cognitivas de los actores avanzan a un nivel global más articulado de características específicas y estables. Tomando en cuenta estas consideraciones, los nichos de innovación no solamente se caracterizarán por un ambiente protegido del mercado sino por situaciones de desarrollo local con estados inestables/estables con actores y redes que cuentan con reglas cognitivas.

El enfoque de *Gestión Estratégica de los Nichos* permite abordar las presiones selectivas a las tecnologías presentes en el régimen sociotécnico consideradas como tradicionales y sobre los nichos de innovación en el nivel micro de tal manera que las nuevas tecnologías sustentables como la biorremediación pueden eventualmente conducir a una substitución y reemplazamiento de las tecnologías tradicionales.

La biotecnología ambiental aplicada a la biorremediación de suelos en algunos países como Estados Unidos y China ha sido estudiada y utilizada desde hace algunos años dentro de los nichos de innovación donde emerge en forma de innovaciones radicales y se protege frente a la selección de los mercados de las tecnologías tradicionales. Durante el transcurso de esta investigación se propone que la aplicación de la biotecnología implica el desarrollo pleno del nicho de innovación asociado a la biorremediación. En diversos estudios sobre la investigación en biorremediación se identifica entre sus procesos de mejora una

oportunidad potencial para utilizar a la biotecnología para incrementar la efectividad de la descontaminación de los suelos.

2.2 Régimen sociotécnico

El concepto de régimen sociotécnico propuesto por Geels (2007) se construye a partir de las conclusiones generadas por Nelson & Winter (1982) que las rutinas cognitivas están incorporadas en la mente de los ingenieros pero las reglas se encuentran en un sentido más amplio en comunidades sociales de tal manera que las trayectorias tecnológicas no solamente dependen de las reglas cognitivas de los ingenieros sino que también influyen los usuarios, creadores de políticas públicas, grupos sociales, grupos de interés (*stakeholders*), científicos, inversionistas y demás. Sobre los regímenes tecnológicos, Rip & Kemp (1998) proponen que el régimen tecnológico es un conjunto de reglas incorporadas en un complejo arreglo de prácticas de ingeniería, procesos de producción tecnológico, habilidades, procedimientos y formas de definir los problemas donde todo esto se encuentra incrustado en instituciones e infraestructuras.

Retomando estos aspectos, Geels (2007) propone el término de régimen sociotécnico como el conjunto de reglas semi-coherentes que son acarreadas por diferentes grupos sociales. A través de la orientación y la coordinación de las actividades de los actores centrales, el régimen sociotécnico dota de estabilidad a los sistemas sociotécnicos. La estabilidad como se ha mencionado se refiere a que la tecnología utilizada ha alcanzado un nivel de desarrollo donde las innovaciones que ocurren son de naturaleza incremental, promoviendo trayectorias tecnológicas entre los sistemas sociotécnicos. Si las direcciones de los actores se encuentran alineadas entonces las trayectorias tecnológicas serán estables y resilientes, pero si las direcciones tienen distorsión o desajustes entonces las trayectorias tendrán un desalineamiento e inestabilidad (Geels, 2004).

En la literatura, existen diferentes descripciones acerca del régimen sociotécnico, debido a la interpretación que realiza cada autor sobre el sistema lo que dificulta una definición universal sobre el régimen. Para Smith (2005 y,} 2010) el nivel meso del sistema sociotécnico se conceptualiza como una estructura constituida de una acumulación coevolutiva y alineamiento de conocimientos, inversiones, objetos, infraestructuras y normas. Son configuraciones estables de instituciones, técnicas, artefactos, reglas, normas y

redes que determinan el desarrollo normal y el uso extendido de las tecnologías. Savaget (2016) menciona que el análisis del régimen es esencial para responder a las preguntas de ¿Por qué algunas alternativas tecnológicas no son exploradas? y ¿Por qué la mayoría de los esfuerzos de innovación tienen por objetivo los cambios incrementales en lugar de la transformación del régimen?

El enfoque de los sistemas sociotécnicos con la perspectiva multinivel ahonda en la descripción de los fenómenos de transición tecnológica entre las innovaciones radicales de los nichos y la eventual sustitución de las tecnologías dominantes en el régimen. Sin embargo, poco se ha mencionado en la literatura acerca de las innovaciones incrementales como fuente disruptiva dentro de los nichos de innovación para la transformación de la configuración del régimen sociotécnico, lo cual es posible que suceda en países en vías de desarrollo como el nuestro.

Sobre el último punto, Viotti (2001) menciona que el cambio tecnológico en las economías de los países en vías de desarrollo tiene diferencias significativas respecto con los países industrializados. Esto se debe a que el cambio tecnológico que ocurre en países como México se especializa en los procesos de aprendizaje en mayor medida que en la creación de innovaciones radicales. Este aprendizaje asociado con la incursión de nuevas tecnologías en los países menos industrializados se determina por su difusión, la absorción y frecuencia de las innovaciones incrementales. Las diferencias entre los países industrializados y en vías de desarrollo no solamente se reducen al aspecto económico y tecnológico, también existen en el aspecto institucional. El conjunto de leyes y normas, sus combinaciones e interacciones que constituyen el arreglo institucional determinan la acumulación de capital y tecnología entre los países (Metcalf, 2006).

En nuestro país, Cimoli (2000) enfatiza la estrecha conexión que tienen los sistemas de producción con los sistemas de ciencia y tecnología, donde las universidades como organizaciones de este último se caracterizan por carecer de relaciones comerciales sólidas. En México, las universidades concentran la principal fuente de talento científico y tecnológico, sin embargo, esta misma concentración debilita la capacidad que tienen las industrias para la difusión y absorción de las tecnologías (Metcalf, 2006).

Entender el contexto económico, científico, tecnológico e institucional de países como México es determinante al abordar el enfoque de los sistemas sociotécnicos. Como se ha descrito en las aportaciones de Viotti (2001) y Metcalfe (2006), los países en vías de desarrollo como nuestro país se caracterizan por tener arreglos institucionales deficientes para conducir al cambio tecnológico; el talento científico y tecnológico se desarrolla y concentra principalmente dentro de universidades y centros públicos de investigación que conducen sus actividades con pocos vínculos con el sector productivo; y las innovaciones incrementales forman parte de las capacidades de absorción para el cambio tecnológico. Lo anterior tiene implicaciones en el sistema sociotécnico en el caso mexicano de la biotecnología, porque si no existen las condiciones económicas, científicas, tecnológicas e institucionales que permitan la formación de innovaciones radicales dentro de los nichos entonces se favorecerá el surgimiento de las innovaciones incrementales.

Dentro de los regímenes sociotécnicos se han establecido entre sus elementos (instituciones, actores, organizaciones e interacciones) algunas *características no sustentables*⁸. Es decir, dentro del sistema se han mantenido y protegido las prioridades industriales y económicas para la producción de bienes y servicios sin tener en consideración el impacto ambiental. Estas características se han intercalado con los patrones y las prácticas del *path dependence* y del *lock in* del sistema sociotécnico y actúan como una barrera para las tecnologías sustentables. La estabilidad alcanzada en el régimen sociotécnico estará continuamente reforzando su estructura, misma que se considera eficiente frente a otro tipo de configuración o nuevos elementos. Por tanto, es importante conocer la causalidad que ha incidido para la formación de las características no sustentables dentro de los sistemas sociotécnicos (Savaget, 2019).

En el régimen sociotécnico coexisten otros tipos de regímenes además del tecnológico, como el científico, político, sociocultural y de usuarios que cuentan con tres tipos de reglas: regulativas, normativas y cognitivas. Los diferentes regímenes que coexisten con el régimen sociotécnico están interrelacionados a través de las reglas y normas donde el alineamiento de las actividades entre los distintos grupos sociales ocurre en una meta-

⁸ Para Savaget (2019), las características no sustentables de los sistemas sociotécnicos son los aspectos contaminantes que prevalecen en los niveles de los sistemas que forman parte de su dinámica y comprenden tecnologías, políticas y comportamientos sociales.

coordinación y los regímenes tienen autonomía e interdependencia de forma acotada. Las reglas entonces son el cauce por el que se involucran los regímenes, unidas y organizadas en un sistema de reglas donde el cambiar una regla inevitablemente altera otras. El alineamiento entre las reglas en un régimen provee de estabilidad y certidumbre a las actividades que se coordinan entre los actores de los multiniveles.

2.3 Las reglas institucionales

Ahora bien, el enfoque de los sistemas sociotécnicos tiene como centro de atención la evolución de la tecnología y la sociedad, donde se presentan adaptaciones mutuas y retroalimentaciones en la dinámica al considerar en el enfoque el lado del usuario. Además, los sistemas sociotécnicos otorgan un rol importante a las instituciones donde no solamente sirven para dotar de certidumbre a los individuos, sino para promover o inhibir las actividades de innovación. En este sentido, para Scott (1995), la definición de institución se refiere a sus componentes como las estructuras, actividades cognitivas, normativas y regulativas que proveen estabilidad y sentido social al comportamiento, y estas instituciones operan en múltiples niveles y están incorporadas en construcciones sistema-cognitivas simbólicas que se adaptan al comportamiento social. Cada componente de las instituciones es interdependiente, por lo que se refuerzan mutuamente en un sistema integrado.

El mencionado autor propone tres aspectos de las reglas que resumen sus principales atributos: el pilar regulativo, el pilar normativo y el pilar cognitivo. El pilar regulativo hace referencia a la restricción y regulación del comportamiento de los individuos es donde se involucran las capacidades para establecer las reglas, su inspección y la manipulación de los sancionadores o el castigo para los que no siguen las reglas. En el caso de la biorremediación, las reglas regulativas engloban a las leyes: como la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, la Ley de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente y la Ley Federal de Responsabilidad Ambiental, así como las Normas Oficiales Mexicanas relacionadas con la regulación de la emisión y vertimiento de los contaminantes. Según la normatividad nacional, las empresas deben estar sometidas a un conjunto de requerimientos dispuestos en la ley que las obligan a remediar los daños causados en el ambiente en relación con un índice de concentración de contaminantes

liberados. Si las empresas no están sujetas a una revisión de sus actividades contaminantes por parte del Estado, entonces no habrá castigos y podría agudizarse el problema de la contaminación.

El pilar normativo se define como las reglas que introducen una dimensión prescriptiva, evaluativa y obligatoria en la vida social (Scott, 1995). Los sistemas normativos incluyen valores y normas; los primeros son concepciones de las preferencias y deseos junto con la construcción de estándares con los que se pueden comparar y evaluar las estructuras o comportamientos existentes y las segundas especifican cómo se deben hacer las cosas y definen los medios legítimos para perseguir fines valiosos. Las normas y valores que prevalecen vigentes entre los miembros del régimen son aplicadas para todos, pero algunas son selectivas entre algunos individuos dependiendo su posición social, donde estos valores y normas específicos se les denominan roles. El enfoque normativo, enfatiza las distintas maneras en que los valores y normas estructuran las elecciones individuales racionales a través de la decisión. La acción racional se basará en el contexto social y la acción adquiere su racionalidad por las reglas que predominan en la sociedad, así como las pautas en el comportamiento. En este pilar normativo, se reflejan las rutinas, los procedimientos, las convenciones, los roles, estrategias, formas organizacionales y tecnologías en las obligaciones sociales frente a una acción que demanda una posición. El último pilar, el cognitivo se centra en elementos institucionales vinculados a las reglas que constituyen la naturaleza de la realidad. En este paradigma cognitivo, lo que los individuos hacen es una función de la representación interna que tienen sobre su entorno dirigiendo su atención a los aspectos simbólicos de la vida social.

Las reglas forman conjuntos coherentes llamadas régimen de reglas dentro del sistema sociotécnico y estarán unidas y en sincronía entre todas, si algún cambio es promovido por el gobierno o grupos de interés entonces se alterará una regla e inherentemente se verá afectada otra y al mismo tiempo se modificará el régimen de las reglas.

Algunos ejemplos de reglas en los regímenes del sistema sociotécnico son el régimen tecnológico con reglas regulativas como los estándares técnicos, especificaciones del producto o subsidios para la investigación y desarrollo; reglas normativas como el giro comercial en el que se especializan las empresas y las estructuras generadas por el gobierno

para las comunidades técnicas y reglas cognitivas para el régimen tecnológico incluyen a las rutinas, expectativas, estrategias de solución de problemas, representaciones de los usuarios entre otros.

2.4 Paisaje sociotécnico.

El concepto de paisaje sociotécnico fue propuesto por Rip & Kemp (1998) para referirse a un paisaje en el sentido literal de un entorno que rodea a distintos actores y puede ser recorrido por ellos, en un sentido metafórico algo del cual todos son parte y los sostiene.

El paisaje sociotécnico contempla a las trayectorias tecnológicas que se han generado en el régimen sociotécnico que consiste en un conjunto de tendencias estructurales entre los regímenes. El paisaje sociotécnico contiene los factores heterogéneos y de ritmo cambiante lento como los valores normativos, aspectos sociales, coaliciones políticas, desarrollo económico, acumulación de problemas ambientales, migración entre otros, además de fenómenos impredecibles de fuerte cambio como las guerras, burbujas inflacionarias y la volatilidad de los precios en el petróleo.

El corazón de la conceptualización del paisaje sociotécnico es que da forma al contexto externo para los regímenes y los actores en el nivel micro y meso. Sobre este contexto externo, suceden presiones y cambios que afectan a los regímenes y crean ventanas de oportunidad para los nichos de innovación derivado de las tensiones entre los elementos del sistema sociotécnico y las actividades desalineadas de los grupos sociales. Geels (2004) identifica cinco múltiples razones para la desestabilización entre los niveles.

1. Los cambios en el paisaje sociotécnico imprimen presión sobre el régimen sociotécnico, por ejemplo, el cambio climático o la contaminación presionan a los sistemas de transporte y energético.
2. Los problemas técnicos internos que ocurren en los regímenes existentes crean oportunidades para los nichos de innovación.
3. Las externalidades negativas presionan a los regímenes.
4. Los cambios en las preferencias de los usuarios pueden conducir a tensiones entre las tecnologías existentes, de tal modo que se demanden nuevos procesos o productos. Además, la preferencia del usuario conduce a la generación de nuevos

mercados donde las tecnologías tradicionales o dominantes tienen problemas para desarrollarse.

5. Los juegos competitivo-estratégicos entre las empresas fuerzan la apertura del régimen sociotécnico.

En términos relativos, el paisaje sociotécnico es estático casi comparable como los suelos, ríos y las montañas donde en su superficie ocurren todo tipo de procesos biológicos evolutivos dinámicos. Para Van Driel & Schot (2005), el concepto de paisaje distingue tres tipos: los factores que no promueven los cambios o cambian muy lento como el clima; los cambios a largo plazo y los shocks repentinos. Geels (2007) utiliza una diferenciación del paisaje basándose en los cambios ambientales propuestos por Suarez & Olivia (2005) cuyo interés se enfoca en las distintas maneras que las empresas reaccionan a los cambios en el entorno comercial. Distinguen cuatro dimensiones para explicar el cambio externo: la frecuencia del número de disrupciones en el ambiente por unidad de tiempo, la amplitud como la magnitud de la desviación de las condiciones iniciales causadas por las disrupciones, la velocidad de las disrupciones y el número de dimensiones ambientales que son afectadas simultáneamente por las disrupciones.

Estos cuatro atributos se combinan en cinco tipos de cambio ambiental propuestos por Geels (2007) que son:

- el *cambio regular* que corresponde a los cambios de baja intensidad en el entorno de forma gradual;
- la *hiperturbulencia* donde se manifiestan cambios de alta velocidad y de alta frecuencia en una sola dimensión;
- el *shock específico* que corresponde a cambios rápidos y de alta intensidad, pero de frecuencia rara;
- el *cambio disruptivo* que implica cambios infrecuentes que ocurren de forma gradual, pero tienen un efecto de alta intensidad en una dimensión
- el *cambio de avalancha* que sucede con poca frecuencia, pero es de alta intensidad, alta velocidad y afecta simultáneamente múltiples dimensiones del ambiente, estos cambios a menudo conducen a efectos permanentes.

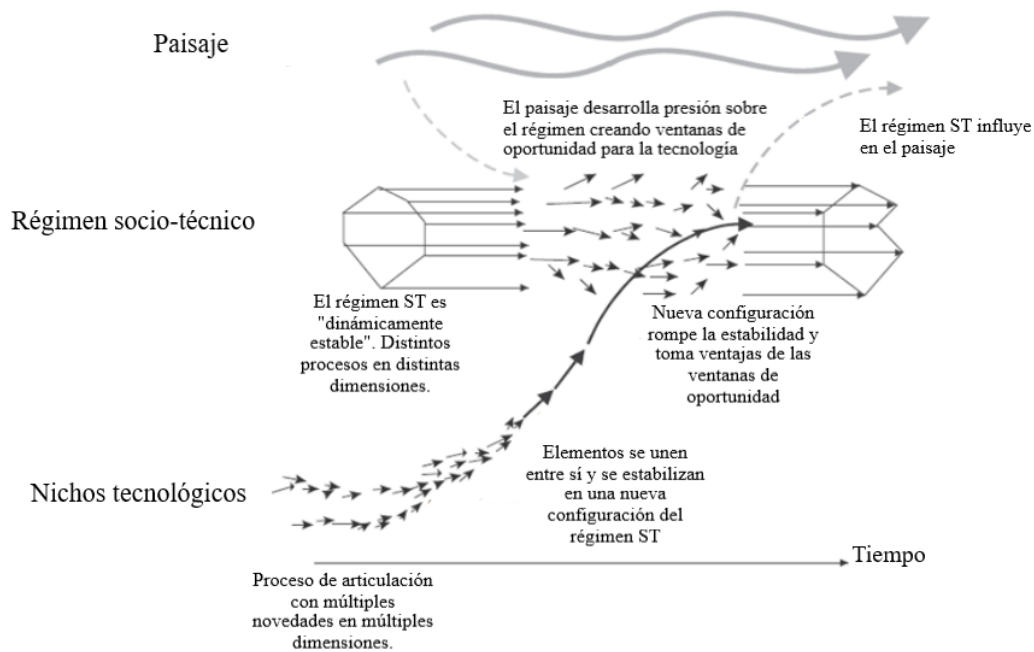
Las interacciones que surgen dentro de los sistemas sociotécnicos se efectúan entre los regímenes de actores, regímenes de reglas, regímenes tecnológicos, regímenes culturales, los nichos de innovación y las presiones del entorno según Geels & Schot (2007). Si no existen presiones del entorno sobre los regímenes entonces habrá un periodo de estabilidad entre los componentes donde las innovaciones radicales dentro de los nichos de innovación estarán presentes, pero tendrán pocas posibilidades de romper la estabilidad. Además, la falta de presiones del entorno genera mecanismos de *path dependence* con las tecnologías tradicionales que refuerzan los estados estables del sistema a través de las innovaciones incrementales.

Los diferentes tipos de cambios que son inducidos en el régimen pueden tener diferentes orígenes y causas que provocan tensiones entre las configuraciones del sistema sociotécnico y funcionan como fuentes que introducen dinamismo a las interacciones de los elementos. En estos cambios se pueden encontrar a las transformaciones en el régimen, las revoluciones tecnológicas, los sistemas de innovación y las transiciones hacia la sustentabilidad (Savaget, 2016). En el caso de la contaminación de suelos afectados por hidrocarburos, hipotéticamente la difusión de nuevas metodologías basadas en la biotecnología en la biorremediación puede provocar un cambio disruptivo en la configuración del régimen sociotécnico con el potencial de modificar el arreglo institucional ambiental para proteger y extender su uso como metodología dominante para la restauración de los suelos.

Las presiones que ejercen los paisajes sobre los regímenes están dadas por cambios que pueden ser disruptivos, divergentes o ligeros pero que deben ser percibidos y enfrentados por los actores como se puede ver en la Figura 2. Entre las estrategias que puede ejecutar el régimen sociotécnico, se encuentra utilizar los medios, materiales y energía internas existentes para resolver el problema, pero si persiste la presión entonces el régimen deberá encontrar en los nichos de innovación la solución a los problemas, si el nicho se encuentra lo suficientemente desarrollado y tiene la capacidad de resolver el problema entonces podrá sustituir a la tecnología tradicional de tal manera que con el paso del tiempo se logre una re-configuración del régimen. En contraste, para que el régimen sociotécnico pueda utilizar sus recursos propios o encaminar a los nichos de innovación debe ser capaz de entender e

identificar que existe un problema producido por una presión del paisaje. El régimen de reglas retoma importancia porque no solamente dotará de certidumbre a los actores en su comportamiento, sino que los conducirá hacia las mejores estrategias que tienen para entender los problemas del paisaje.

Figura 2. Análisis multinivel de las dimensiones del sistema sociotécnico (Geels, 2004).



En la Figura 2, se observa la visión de los autores sobre el sistema sociotécnico con un análisis multinivel. En el nivel del paisaje, existen leyes y normas que inciden en las interacciones entre los actores que conforman el régimen y el nicho. En el nivel meso, el régimen sociotécnico la configuración existente de tecnologías están incorporadas en el contexto institucional. Si existen presiones externas que afectan a los distintos niveles entonces se van a generar respuestas para resolver la presión, si los elementos que constituyen el nivel meso han creado procesos de estabilidad entonces el paso del nicho de innovación al régimen tendrá dificultades, de lo contrario de abrirán ventanas de oportunidad que potencialmente aprovechará el nicho. Por último, en el nivel micro de los nichos tecnológicos surgen las innovaciones radicales que comienzan en un estado “embrionario” y se agrupan para alcanzar un nivel de desarrollo consolidado para transitar al régimen.

2.5 Transiciones tecnológicas

Las transiciones tecnológicas han sido estudiadas desde la perspectiva histórica utilizando el enfoque de los sistemas sociotécnicos para describir la difusión del automóvil después de la revolución industrial y el desplazamiento de los barcos impulsados por el viento por los buques de vapor. Se ha encontrado que los diferentes grados de presión que existen en el paisaje sociotécnico provocan una adaptación del régimen sociotécnico, si éste tiene las condiciones necesarias para sobrevivir a la presión entonces dará origen una reconfiguración de su estructura. Sin embargo, como se muestra en la Tabla 1, si el régimen no tiene la capacidad de adaptarse a los cambios del paisaje se abrirán ventanas de oportunidad que puede aprovechar el nicho de innovación en un proceso de transición tecnológica de complementación o desplazamiento. Los cambios que surgen desde el paisaje pueden ser de distintos tipos como se ha mencionado, que condicionan la respuesta del régimen y afectan en la velocidad, amplitud y desarrollo de las transiciones de los nichos de innovación.

El tipo de cambios, el nivel de presión que tiene el paisaje sobre los regímenes y el grado de desarrollo que tienen los nichos de innovación van a condicionar la transición que ocurre en el sistema. Cambios y alteraciones como el cambio climático van a generar una presión en los regímenes, donde los actores están utilizando sus recursos disponibles como la remediación tradicional para enfrentar los cambios en el paisaje. Sin embargo, si la respuesta a los cambios por los elementos del régimen no es adaptativa se propone que esto puede abrir ventanas de oportunidad para la biorremediación que se encuentra en nichos de innovación.

Cambios nulos o imperceptibles por el régimen sociotécnico conducirán a un periodo de estabilidad donde los nichos de innovación se mantienen encapsulados en momentos específicos, incapaces de atravesar por sus propios medios al nivel sociotécnico. Si existen cambios en el paisaje que inducen presiones sobre el régimen, entonces los actores utilizarán sus recursos propios para enfrentar los problemas, promoviendo modificaciones en su estructura para generar soluciones inmediatas. En esta posición, no importa el grado de desarrollo de los nichos de innovación puesto que el régimen sociotécnico tiene la capacidad de reorientar sus capacidades internas (Geels, 2004).

En el caso opuesto, donde los problemas generados por el paisaje que presionan al régimen no pueden ser resueltos por las reorientaciones de los actores, entonces se abrirán ventanas de oportunidad para que los nichos de innovación con un grado de desarrollo consolidado puedan alcanzar el nivel sociotécnico. Sin embargo, cuando los nichos no están desarrollados entonces el régimen promoverá la creación de múltiples nichos donde a través de mecanismos evolutivos y de selección, solo los mejores podrán perfilarse. Si los cambios y las presiones persisten y los nichos desarrollados alcanzan el régimen sociotécnico resolviendo los problemas de forma satisfactoria entonces se desencadenará una sustitución de la tecnología tradicional por la tecnología emergente creando nuevas configuraciones en el régimen sociotécnico.

Utilizando como referencia la metodología del enfoque sociotécnico se propone como nicho de innovación al conocimiento depositado acerca de biorremediación en universidades, empresas o personas que pueden encontrarse en diferentes niveles de desarrollo, donde un estado consolidado se relaciona con la aplicación de los procesos biotecnológicos.

El régimen sociotécnico incluye a los actores encargados de solucionar el problema de la contaminación que utilizan tecnologías tradicionales para cumplir con su propósito, un conjunto de reglas regulativas, normativas y cognitivas que determinan el comportamiento de los actores frente a sus elecciones, el conjunto de tecnologías tradicionales de descontaminación que son utilizadas por los actores entre otros componentes del régimen sociotécnico.

En el aspecto del paisaje sociotécnico, los cambios persistentes sobre la contaminación presionan directamente al régimen sociotécnico motivando las transiciones descritas con anterioridad. La siguiente Tabla 1 resume los distintos niveles de presión que surgen desde el paisaje con los diferentes cambios acompañados por estas presiones sobre el régimen sociotécnico que en composición influyen en el nivel de desarrollo de los nichos de innovación. Diferentes presiones, cambios y niveles de desarrollo del nicho resultan en varias combinaciones dentro del sistema sociotécnico que condicionan a las transiciones tecnológicas.

Tipo de patrón	Nivel de presión del entorno-paisaje sobre el régimen	Grado de cambios en el entorno-paisaje	Desarrollo de nichos de innovación
Reproducción	Nulo	Nulo	Presentes, pero no pueden atravesar el régimen por su estabilidad.
Transformación	Moderado	Disruptivo	No desarrollados, el régimen modificará la dirección de actividades de innovación creando reorientaciones.
Alineamiento y realineamiento	Alto	Divergente, amplio y repentino	Pueden estar o no desarrolladas, si lo están entonces la presión sobre el régimen abrirá ventanas de oportunidad, de lo contrario el vacío creará múltiples nichos embrionarios donde al final ganará el nicho predominante.
Substitución tecnológica	Nula o alta	Nulo o disruptivo	Si existe alta presión, y los nichos tecnológicos se han desarrollado entonces podrán reemplazar al régimen actual.
Reconfiguración	Nula o moderada	Ligeros	El desarrollo de los nichos se ha hecho con simbiosis con el régimen para resolver problemas locales y cambios ligeros por lo que pueden ser fácilmente adoptadas por el régimen.
Secuencia de vías de transición	Moderado al comienzo, depende de la capacidad de los actores	Disruptivos de forma específica	Si se encuentran desarrollados pueden aprovechar las ventanas de oportunidad en el proceso de reconfiguración.

Tabla 1. Relaciones entre los cambios en el entorno-paisaje y la presiones que ejercen en los regímenes. Construida a partir de Geels & Schot (2007).

2.6 Transición hacia la sustentabilidad

En los últimos años, el desarrollo económico y tecnológico de las sociedades ha causado impactos irreversibles en el entorno lo que ha causado que la búsqueda de soluciones innovadoras a estos problemas se enfoque en la sustentabilidad. Los sistemas económicos basados en tecnologías contaminantes (características no sustentables) de la actualidad han comenzado a sufrir deterioros por su incapacidad de solucionar los problemas ambientales ocasionados por sus procesos. Para explicar los fenómenos de abandono, sustitución o modificación de los sistemas dominantes asociados a la contaminación por alternativas sustentables ha surgido entre la literatura de los sistemas sociotécnicos el término de transición sustentable. Según Loorbach (2017) los procesos de transición son entendidos como los cambios entre un equilibrio dinámico a otro, desde un sistema dominante y estable con características no sustentables por un sistema alterno no estable y sustentable.

El enfoque de las transiciones sustentables se usa cada vez más para referirse a la disrupción de gran escala con cambios significativos en los sistemas sociales que surgen durante un largo período de años. Las transiciones sustentables y los cambios que las motivan representan una amenaza para las configuraciones dinámicamente estables y dominantes que enfrentan constantemente las presiones del Estado, sociedad y preferencias de los usuarios por alternativas sustentables (Loorbach et al, 2017). Las transiciones de sustentabilidad son a largo plazo, multidimensionales y requieren de procesos fundamentales de transformación a través de los cuales los sistemas sociotécnicos se desplazan hacia modos de producción y de consumo más sostenibles derivado de presiones por la contaminación que se ejercen en los sistemas (Markard, 2011).

La necesidad de abandonar las configuraciones actuales en los sistemas energéticos⁹ basados en combustibles fósiles para reducir las emisiones de carbonos ha causado el surgimiento de transformaciones para lograr la eficiencia energética y reducir la demanda de la energía. Sin embargo, los sistemas dominantes cuentan con una alta estabilidad en su configuración que dificulta la transición hacia modelos sustentables (Geels et al., 2018).

⁹ Las transiciones sustentables de los sistemas energéticos hacia modelos basados en la sustitución del petróleo han sido estudiadas por Geels (2018). Según la investigación, una de las mejores herramientas analíticas para entender estas transiciones son los sistemas sociotécnicos con el análisis multinivel.

Para Geels (2019), el enfoque de la perspectiva multinivel es uno de los abordajes académicos más importantes en el debate de las transformaciones hacia la sustentabilidad, con un énfasis en los cambios en los sistemas causados por problemas ambientales. Este planteamiento es útil para la investigación porque la contaminación de los suelos por los hidrocarburos es la presión sobre el sistema sociotécnico que permite un proceso de búsqueda de nuevas metodologías en las innovaciones radicales, como la aplicación de la biotecnología en la descontaminación.

Existen algunas diferencias entre las transiciones históricas de cambio tecnológico y las transiciones de sustentabilidad. La primera es que las transiciones históricas¹⁰ son emergentes donde las innovaciones radicales han sido puestas a prueba y han sido seleccionadas en el régimen sociotécnico para resolver los problemas causados por cambios en el paisaje mientras que las transiciones sustentables están orientadas a cumplir objetivos y propósitos definidos, es decir, reducir la contaminación, cambiar tecnologías contaminantes por tecnologías limpias, disminuir el impacto ambiental, entre otras (Smith et al., 2005). Además, en las transiciones de sustentabilidad los actores privados tienen incentivos limitados para abordar el desarrollo de las innovaciones porque el objetivo está relacionado con un bien colectivo, por lo que el gobierno y la sociedad civil tiene un papel crucial para impulsar los recursos públicos necesarios en el desarrollo de los nichos sustentables (Geels, 2011). La segunda diferencia entre las transiciones históricas y sustentables es que las soluciones ambientales de las innovaciones no necesariamente ofrecen beneficios a los usuarios porque la sustentabilidad es un bien colectivo y a menudo su desempeño en el precio/rendimiento es menor que las tecnologías tradicionales establecidas en el régimen. Por lo tanto, existe una posibilidad muy baja que las innovaciones sustentables tengan la capacidad de reemplazar los sistemas que componen el régimen sin cambios en las condiciones económicas-institucionales, que a su vez se requiere de la participación de las políticas públicas para evitar la resistencia a los cambios y dar apertura a la innovación sustentable. Por último, la tercera diferencia entre las

¹⁰ Las transiciones históricas son entendidas como procesos de cambio en los regímenes tecnológicos dominantes donde las innovaciones emergentes de los nichos han logrado desplazarlos y conducir a nuevas configuraciones. Por ejemplo, la sustitución de los carruajes por los automóviles; el desuso de los barcos impulsados por el viento por buques de vapor, entre otros.

transiciones es que existe un dominio empírico donde las transiciones sustentables son más necesitadas como en los sistemas de transporte, energía y agrícola. Estos dominios se caracterizan por tener empresas grandes y consolidadas que componen a los sistemas por lo que su involucramiento es fundamental para acelerar el desarrollo de las innovaciones sustentables (Geels, 2011).

Uno de los componentes teóricos más importantes de la transición sustentable en el marco del análisis multinivel es la *Gestión Estratégica de los Nichos* (GEN) que se refiere a la protección orientada por parte de políticas públicas, gestión empresarial y vinculación académica con el objetivo de desarrollar los nichos adecuados para la innovación sustentable. Como se ha mencionado, el nivel donde surgen las innovaciones radicales es en los nichos del sistema sociotécnico, que según el enfoque GEN, son espacios protegidos que requieren de una interrelación social incorporando el cambio tecnológico. Una de las aportaciones más importantes de Schot (2008) en esta área es que la variación de las nuevas tecnologías no es ciega, como han asumido muchos académicos de la economía evolutiva, si no que los actores tecnológicos intentan anticipar las selecciones futuras y adaptan el proceso de selección con programas de investigación y desarrollo. Por lo que empresas y gobiernos tienen un papel importante en la generación de variaciones tecnológicas.

En el aspecto particular de las innovaciones sustentables, para los académicos del enfoque GEN, los mercados de los nichos y la demanda de los usuarios no están disponibles tan fácilmente en comparación con otros tipos de innovaciones porque las innovaciones sustentables no son variaciones menores de las tecnologías prevalentes, pero difieren radicalmente de ellas (Schot & Geels, 2008). En el proceso interno de los nichos, la exposición selectiva de nuevas tecnologías sustentables al mercado a través del desarrollo del nicho puede eventualmente conducir a una sustitución de las tecnologías contaminantes que dominan el régimen, dando lugar a un nuevo régimen sociotécnico.

Para Schot & Geels (2008), las circunstancias que conducen al éxito para el surgimiento de un nicho de innovación desarrollado se debe a la articulación de las expectativas y visiones¹¹ de los actores para proveer dirección en el proceso de aprendizaje, atraer la

¹¹ Las expectativas y visiones de los actores se mencionaron durante las aportaciones retomadas de Scott (1995). Estas deben ser entendidas dentro del margen del pilar cognitivo de los individuos. Incluyen a la

atención y legitimar la protección del nicho; la construcción de redes entre los actores para facilitar las interacciones entre los grupos de interés y por último consolidar el proceso de aprendizaje en múltiples dimensiones (aspectos técnicos, preferencias de usuarios, aspectos culturales, infraestructura, producción, regulaciones y efectos ambientales). Recientemente, el enfoque del GEN ha abordado al nivel micro de los nichos con patrones coevolutivos entre el nicho y el régimen, donde la dinámica es menor sobre la sustitución y más sobre cómo los nichos pueden ramificarse, acumularse y contribuir a cambios en el comportamiento, prácticas y rutinas de los actores del régimen. Esta visión muestra que los nichos pueden desempeñar diferentes roles además de ser un espacio protector para las innovaciones radicales y convertirse en un nuevo régimen e incorporarse al régimen existente y complementarlo.

En esta investigación, es relevante el último punto sobre los diferentes roles de los nichos de innovación. En términos de la innovación sustentable y su aplicación en la biorremediación, la búsqueda de nuevas tecnologías para descontaminar los suelos puede conducir a descubrimientos que complementen a las tecnologías de remediación tradicionales, es decir, la transición del nicho al régimen no estaría conducida por una sustitución tecnológica, sino por una coevolución entre ambos tipos de tecnologías tradicionales-innovadores que cumplan con los requisitos de regulación ambiental. Este tipo de transición simbiótica es importante para las innovaciones sustentables porque no es necesario competir en ventajas y desventajas frente a las tecnologías tradicionales que se encuentran en el régimen, por lo que pueden agregarse al catálogo de metodologías que tienen las empresas de descontaminación dominantes.

El enfoque de las transiciones sustentables sobre la gestión estratégica de los nichos pone especial énfasis en el nivel de desarrollo del nicho como aspecto clave para su capacidad de aprovechar la ventana de oportunidad del régimen. De acuerdo con los elementos retomados de la literatura, el nivel de desarrollo del nicho de innovación depende de un conjunto de indicadores que permiten hacer una categorización de los diferentes estados en los que puede ser encontrado el nicho de innovación a veces en función de la presión del paisaje y la ventana de oportunidad del régimen. Para Smith (2010), existe un proceso de

confianza que tienen los usuarios y desarrolladores sobre las tecnologías, la aceptación de los actores de gobierno para regular algunas tecnologías, entre otros.

momentum (impulso) dentro de los niveles de régimen y nicho que comprende a la masa (objetos, actores e infraestructura), la velocidad de desarrollo del realineamiento de la configuración del nivel y dirección que condiciona la efectividad que tiene el régimen para la adaptación y el nicho para alcanzar su desarrollo. Utilizando el término de *momentum*, Geels (2018) describe a las características endógenas de los nichos de innovación sustentables para alcanzar la consolidación, donde el *momentum* del nicho estará dado por las visiones y expectativas de los actores que se vuelven más precisas y aceptadas, el tamaño de las redes de interacción se incrementa y el proceso de aprendizaje resulta en un diseño dominante.

La Tabla 2 representa un resumen de la información contenida en la bibliografía que nos permite construir una caracterización propia sobre el nivel de desarrollo de los nichos de innovación. El nivel que antecede a la configuración de los distintos niveles de desarrollo de los nichos lo hemos denominado como “*proto-nicho*”. En este nivel se encuentran los elementos y sus interacciones que han comenzado a responder a las presiones del régimen pero que al ser un estado inicial carecen de certidumbre e incentivos por lo que es posible que la mayoría de las innovaciones que surgen en este nivel son del tipo incremental. El nivel de desarrollo embrionario se debe entender como los primeros esfuerzos que realizan los actores y organizaciones para resolver los problemas del régimen. Al ser un estado inicial de la innovación es posible encontrar en este nivel las primeras ideas de concepción de soluciones científicas y tecnológicas. Los actores y organizaciones que forman parte del desarrollo temprano de estas soluciones se encuentran desagregados geográficamente, en diferentes disciplinas, campos científicos y tecnológicos, distintas industrias y niveles de gobierno que tienen poca interacción entre sí, lo que dificulta la generación de aprendizaje.

Al paso del tiempo y dependiendo de los aspectos exógenos del nivel micro, surge el nivel *en desarrollo* donde sucede la escalabilidad de los proyectos de innovación. Emergen normas y rutinas que agrupan y conducen las prácticas de los actores y organizaciones. Se comienzan a crear las primeras redes de interacción entre los actores, aunque su desarrollo se atomiza en pocas organizaciones educativas, de investigación, tecnológicas, sociales y privadas.

Por último, en esta categorización de los nichos, en el nivel de estado consolidado el *momentum* del nivel micro se ha estructurado a partir del crecimiento de las redes, la generación del aprendizaje y por las visiones de los actores que conducen a un modelo dominante. Alcanzar este nivel requiere de mucho tiempo e inversión que en las transiciones históricas ha sido producto de los esfuerzos del sector privado. Sin embargo, al relacionar el estado consolidado de los nichos de innovación en el aspecto sustentable es necesario recordar la limitación de las empresas por resolver los problemas ambientales. Esto tiene implicaciones en el papel que tienen los gobiernos en el tema ambiental para proteger a los nichos e impulsarlos para que puedan alcanzar el estado consolidado a través de políticas públicas.

Tabla 2. Categorización del nivel de desarrollo de los nichos de innovación.

Nivel de desarrollo del nicho de innovación	Características endógenas
Proto-nicho	• Inestabilidad e incertidumbre por la falta de un arreglo institucional adecuado • No existen suficientes elementos para generar interacciones • Predominio de innovaciones incrementales • Se ha identificado una presión externa, comienza la creación de ideas para resolverla • Comienzan las primeras actividades destinadas a generar conocimiento científico
Estado embrionario	• Concepción de las innovaciones • Dispersión de los elementos del nicho • Poca interacción entre los elementos • La curva de aprendizaje se encuentra en etapas tempranas • Proyectos locales
En proceso de desarrollo	• Los proyectos de innovación tienen convergencia • Se han formado redes de interacción entre los actores • Los nichos embrionarios comienzan su proceso de escalabilidad • La creación de normas conduce a la estructuración del nicho

Estado consolidado	• “Diseño dominante” • “<i>Momentum</i>” del nicho (impulso) • Estabilidad y certidumbre • El conocimiento científico se ha transformado en conocimiento aplicado • En los nichos sustentables, el alto grado de desarrollo se relaciona con la gestión de su dirección (políticas públicas) • Proyectos globales
--------------------	--

Fuente: Elaboración propia.

Es importante tener algunas consideraciones para entender el proceso descrito. Los nichos de innovación realizan sus actividades en función de lo que sucede en el paisaje particularmente acerca de los niveles de presión, por lo que una presión fuerte acompañada de cambio disruptivo puede afectar al régimen. Sin embargo, los cambios en el régimen y la respuesta que éste tiene también condicionan a los factores exógenos del nicho e influye en su desarrollo. Las combinaciones a las que se enfrentan los nichos son variadas, pero esto es un reflejo de la complejidad que intentan describir los sistemas sociotécnicos.

¿Cuál es la fuerza que motiva que los nichos de innovación prosperen hacia un estado avanzado? ¿Cuáles son los mecanismos de protección de las innovaciones? Para responder a estas preguntas es difícil adjudicar como elementos explicativos a las características endógenas de los nichos. Es decir, el desarrollo de los nichos depende del grado de adaptación del régimen y el nivel de presión del paisaje. Como se muestra en la Tabla 3, y para simplificar el entendimiento de la realidad pueden existir dos estados que se derivan del cambio y presión del paisaje:

1. **E1**, no existen presiones del paisaje ni cambios que inciden en la estructura el meta-nivel. La falta de perturbaciones ha conducido a la estabilidad del régimen. Si se presentan alteraciones, estas son graduales y perceptibles por el régimen que cuenta con una alta capacidad de adaptación respondiendo eficazmente a las presiones. En este estado, los nichos de innovación tienen pocas posibilidades de sustituir a la configuración del régimen, incluso cuando tienen un alto nivel de desarrollo porque

la estabilidad que ha adquirido el régimen se ha reforzado con leyes, normas y prácticas de usuario.

2. **E2**, existen presiones y cambios disruptivos desde el paisaje. El régimen ha visto comprometida su estabilidad y tiene poca capacidad para adaptarse al cambio disruptivo. En un intento por restaurar la estabilidad y reducir la incertidumbre, las leyes que forman parte de la estructura del régimen pueden verse modificadas. Se buscan alternativas para encontrar soluciones dentro del mismo régimen, pero si fracasan, el nicho puede aprovechar las ventanas de oportunidad y reconfigurar el nivel meta. Si el nicho se encuentra en un estado proto-nicho, embrionario o en desarrollo, tendrá dificultades para alcanzar el régimen. En contraste, un nicho con estado consolidado y un régimen con debilidad estructural constituyen por sí mismos una fuente de disrupción.

Tabla 3. Caracterización de los estados de cambio y presión del paisaje.

Estados del paisaje	Características endógenas y exógenas del régimen
E1: Sin cambios y sin presiones	• Presiones inexistentes del paisaje. • Las leyes dotan de estabilidad al régimen. • Alta adaptación del régimen a los cambios. • <i>Path dependence</i> y <i>lock in</i>.
E2: Cambios y presiones	• Presiones afectan la estabilidad del régimen. • Cambios disruptivos en el sistema. • Incapacidad del régimen por adaptarse. • El arreglo institucional se modifica. • Apertura de las ventanas de oportunidad.

Fuente: Elaboración propia.

Como se ha mencionado en el Capítulo 1, en nuestro país persiste un problema de contaminación de los suelos por hidrocarburos donde intervienen una gran cantidad de actores de forma directa o indirecta y en diferentes procesos como la descontaminación, la regulación de la emisión de contaminantes y la búsqueda de nuevas metodologías de

restauración ambiental. Estos actores se encuentran condicionados por el contexto institucional, así como por la estabilidad y dominancia de sus actividades tecnológicas y de innovación (*path dependence y lock in*). Para entender las relaciones entre los actores, organizaciones e instituciones es necesario un enfoque como el de los sistemas sociotécnicos que permita delimitar diferentes extracciones de la realidad en nuestro país sobre la contaminación de los suelos. El desafío más importante para estos elementos del sistema sociotécnico es el aumento de los niveles de contaminación en los últimos años lo que genera una presión que (según la teoría) favorece las ventanas de oportunidad para la emergencia de nuevas soluciones.

Si bien el enfoque de los sistemas sociotécnicos con la perspectiva multinivel tiene distintas consideraciones (por ejemplo, la diversidad de definiciones desarrolladas por diferentes autores) para su aplicación en esta investigación, es relevante mencionar que los conceptos claves utilizados están orientados a descifrar a los elementos e interacciones que conforman al régimen sociotécnico, el nicho de innovación y el paisaje sociotécnico. En el nicho de innovación, fue necesario encausar la teoría hacia un enfoque sustentable por las diferencias que existen entre las transiciones históricas y las transiciones sustentables. En el régimen sociotécnico se hizo hincapié en el arreglo institucional que explica la dominancia de las tecnologías de descontaminación ampliamente utilizadas y que también permite entender las condiciones que promuevan el surgimiento de nuevas metodologías de descontaminación. Por último, en el paisaje sociotécnico se abordó como fuerza de presión en el régimen al aumento de la contaminación de suelos.

Capítulo 3. Importancia de la biotecnología y el contexto de la contaminación de suelos afectados por hidrocarburos en México

3.1 Biotecnología aplicada en la biorremediación y enfoque sociotécnico

Para responder a la contaminación en suelos por la actividad industrial, se han utilizado tecnologías en el contexto global que para el propósito de esta investigación denominaré “tradicionales”, y que consisten en las técnicas de remediación del suelo para eliminar, sustraer o mitigar el daño que causan las moléculas contaminantes. Entre las tecnologías de remediación tradicional más utilizadas se encuentran la adsorción, oxidación química, incineración, la extracción de vapor de suelo, estabilización, el compostaje y vertederos donde dependiendo el tipo y propiedades de las moléculas contaminantes, presentarán ventajas o desventajas en el proceso de remediación. Sin embargo, el uso de las tecnologías tradicionales de remediación requiere de una alta inversión de energía, son costosas, no cuentan con metodologías amigables con el medio ambiente y en algunas ocasiones sus métodos para remover las contaminantes *in situ* son inefficientes (Lim, 2016). Como se muestra en la Tabla 4, las tecnologías que he denominado tradicionales presentan algunas ventajas en el tratamiento de los contaminantes, pero carecen de métodos sustentables.

Tabla 4. Ventajas y desventajas del uso de tecnologías remediales.

Método de remediación	Ventajas	Desventajas
Barreras reactivas	No es necesario remover la barrera.	Costosa a largo plazo; disponible solamente para algunos contaminantes.
Estabilización de suelo	No es necesario remover el suelo; rápida y económica.	No remueve los contaminantes del entorno; intensiva energéticamente.
Extracción de vapor del suelo	Efectiva en el costo-beneficio; Baja incertidumbre en el tratamiento.	Disponible para algunos contaminantes; requiere condiciones de ventilación exigentes.
Incineración	Remoción eficiente de los contaminantes.	Alta demanda energética; costosa.

Compostaje	De bajo costo, el suelo tratado puede reutilizarse; no emite otros contaminantes.	Disponibles solo para contaminantes orgánicos; es de larga duración; depende de la concentración de contaminantes.
Vertederos	Efectivo control de riesgos al encapsular el área de contaminación.	No es un tratamiento; no es posible reutilizar el suelo.

Fuente: Elaboración propia con base en OECD (2013) y Sorvari et al. (2009).

La biorremediación es definida como el proceso que utiliza organismos vivos como bacterias, hongos, plantas y sus componentes metabólicos como las enzimas para remover, degradar, mineralizar, transformar y desintoxicar a los contaminantes del medio ambiente en formas químicas inocuas o de menor impacto ambiental a través de procedimientos sustentables (Saxena et al., 2020). El uso de la biorremediación ha sido efectivo para la remediación de diversos contaminantes químicos, como los pesticidas, hidrocarburos poliaromáticos, hidrocarburos del petróleo, metales pesados, solventes y demás. En el contexto internacional, la biorremediación se ha utilizado exitosamente en una variedad de sitios contaminados por la actividad industrial a pequeña escala, por mencionar algunos:

- Una planta a escala piloto para el uso de lacasas termoestables para la biorremediación de componentes de los pesticidas en suelo en India (Chauhan, 2018).
- La limpieza de derrames petroleros en Alaska usando un reactor de lodo anaerobio/anóxico para la biorremediación del trinitrotolueno (Boopathy, 2005).
- Aplicación del *bioslurping* (técnica de remediación que combina elementos de la extracción de vapor del suelo y bioventeo) en una refinería de petróleo en Grecia (Gidarakos, 2007).

Entre los principales tipos de biorremediación, se encuentran:

- a) La bioaumentación, que se refiere a las mejoras en el rendimiento de las poblaciones de los microorganismos a través de la adición de modificaciones genéticas con actividades catabólicas específicas (Rahman, 2002).

- b) La bioestimulación que involucra el ajuste de los parámetros ambientales como la limitación de los nutrientes en los fertilizantes de liberación lenta, los biosurfactantes y biopolímeros que estimulan o retrasan el crecimiento de los microorganismos que degradan los contaminantes.
- c) La bioventilación como el proceso dirigido a la adición de oxígeno en las comunidades bacterianas que se encuentran en el suelo (Thomé et al., 2014).
- d) La fitorremediación que es el uso de plantas como método de remediación de contaminantes tóxicos, este tipo de biorremediación ha logrado resultados importantes en Colombia al degradar mercurio por la actividad de las minas de oro (Saxena, 2020).

El uso de la biotecnología tiene una gran variedad de aplicaciones actualmente, desde la medicina para la producción de insulina recombinante hasta su uso en el medio ambiente para la producción de organismos transgénicos para el tratamiento de suelos contaminados de la actividad industrial. Esto sucede porque algunos microorganismos que viven en condiciones extremófilas se han adaptado a condiciones con altas concentraciones de moléculas contaminantes que han logrado incorporarlas en su metabolismo, de tal manera que pueden ser utilizados para el tratamiento y biorremediación en suelos. El papel de la biotecnología es fundamental, porque permite mejorar las capacidades metabólicas de los microorganismos que pueden ser potencialmente utilizados para la biorremediación, incrementando la eficiencia del tratamiento. El estudio de la biotecnología y su aplicación en la biorremediación puede desarrollarse a través de la investigación básica en universidades y centros públicos de investigación, y en investigación aplicada dentro de las empresas.

La contaminación y sus efectos en el cambio climático serán las presiones acompañadas de alteraciones que se producen en el sistema sociotécnico y que generan impactos en el entorno por los efectos que produce en la salud, en la agricultura y en el equilibrio ecológico. Los grupos de interés ejercerán su poder dependiendo de la capacidad que tienen los actores de percibir y entender el cambio climático y sus consecuencias.

En el paisaje, los científicos juegan un rol muy importante porque debido a su conocimiento técnico de los problemas del entorno tienen la capacidad de advertir sobre las

consecuencias de los cambios para que los actores del régimen puedan utilizar recursos internos y enfrentar los problemas. En el caso de la contaminación, numerosos estudios han abordado los efectos que tienen las moléculas residuales desechadas en el entorno, por lo que el régimen de actores ha desarrollado métodos de remediación que han mantenido estable la repuesta al problema de la contaminación. Sin embargo, el uso de las tecnologías tradicionales muestra ineficacia en comparación con el uso de la biorremediación como tecnología apta para conformar un posible nicho de innovación.

La biorremediación y su estudio para encontrar nuevos mecanismos biológicos forma parte de la respuesta que tienen los investigadores para la presión del paisaje que se mantiene sobre los regímenes con el objetivo de atender con métodos alternativos la contaminación en suelo. Como se ha mencionado, los cambios deben ser percibidos por los agentes para que puedan responder con su catálogo de recursos internos, sin embargo, es posible que en nuestro país tanto el régimen de reglas como el de actores sean incapaces de percibir y regular los cambios que están produciéndose en el paisaje, por lo que esto presentaría una barrera para la sustitución tecnológica o complementación entre las tecnologías tradicionales y la biorremediación.

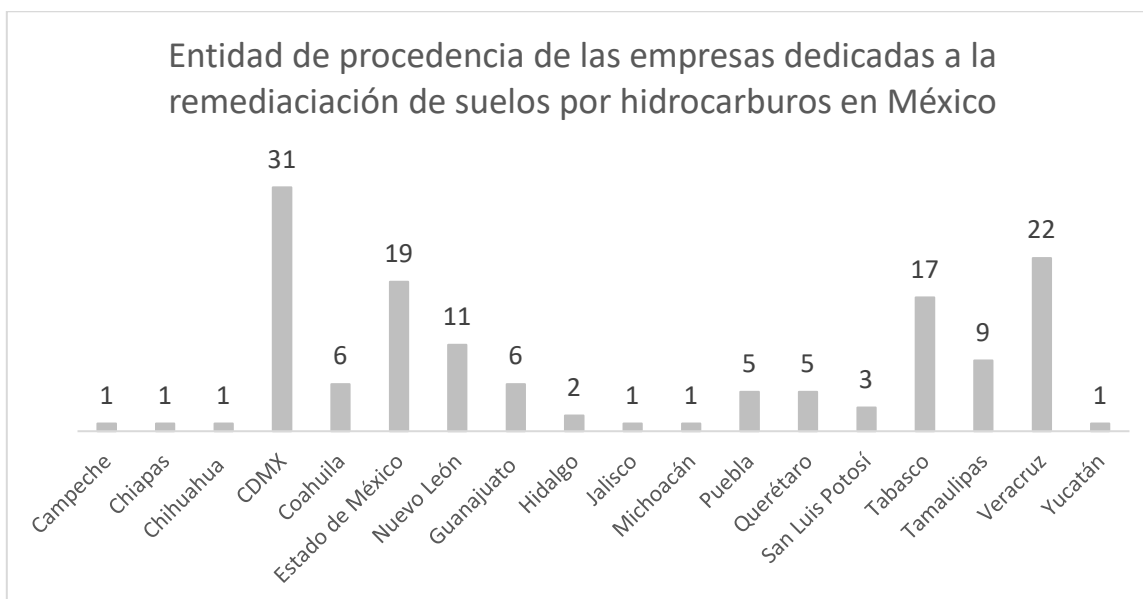
La biotecnología entonces actúa como una herramienta de mejoramiento y optimización de la biorremediación que se encuentra localizada en los nichos de innovación, de tal manera que le permita alcanzar el nivel meso cuando sucedan perturbaciones que presionen a los regímenes. Por ello, la protección de los nichos es importante para la consolidación de la biorremediación como tecnología alternativa, pero, además, algunas políticas públicas y reglamentos internacionales están promoviendo la protección y formación de nichos de innovación relacionados con la sustentabilidad, por lo que es posible observar fenómenos de agregación entre las innovaciones locales. Además, las reglas que se encuentran en los regímenes actuales pueden actuar como un factor de presión sobre los actores que promueven nuevas ventanas de oportunidad para las innovaciones radicales o, por el contrario, han generado procesos de estabilidad y *path dependence* entre las tecnologías tradicionales que bloquean la incursión de nuevas tecnologías. Un acercamiento de la literatura revisada nos permite proponer que organizaciones civiles y de científicos ejercen presión sobre el régimen y generan distorsiones entre los actores que promueven

investigaciones y mecanismos de diagnóstico sobre el estado en el que se encuentra el paisaje.

3.2 Contexto de la actividad remedial de las empresas para la descontaminación de los hidrocarburos en México

En este apartado se presentan datos relevantes sobre la distribución geográfica de las empresas dedicadas a la descontaminación de los suelos y los principales procedimientos dominantes para la restauración ambiental. Esto con el objetivo de delimitar espacialmente a algunos actores del régimen sociotécnico. La siguiente Gráfica 1 muestra a las entidades federativas que aglutinan a las empresas dedicadas a la descontaminación de suelos.

Gráfica 1. Lugares de procedencia de las empresas que hacen remediación de suelos contaminados por hidrocarburos



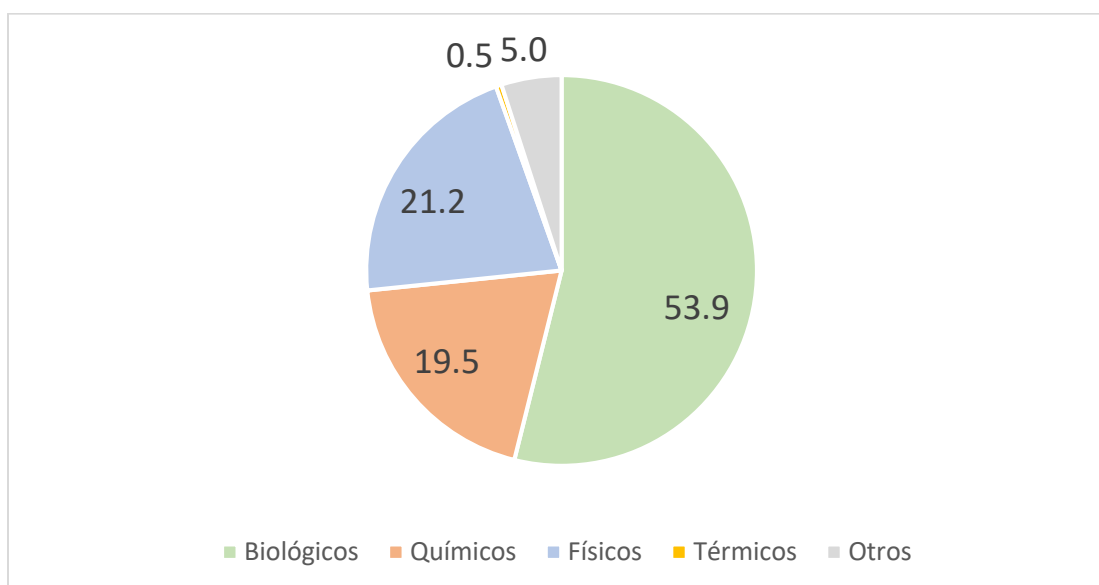
Fuente: Elaboración propia con datos de la SEMARNAT.

La SEMARNAT ha clasificado a los procesos de tratamiento de suelos que se muestran en la Tabla 1 del apartado de este documento de Anexos. Los tipos de procedimientos remediales que se encuentran en la clasificación de la SEMARNAT son biológicos, físicos, químicos, térmicos y otros. A partir de la base de datos publicada por la SEMARNAT sobre empresas autorizadas para la descontaminación de suelos se obtuvo la información del lugar de procedencia de las empresas, el porcentaje por tipo de procedimientos autorizados a las empresas y la evolución por año de los procedimientos autorizados.

En la Gráfica 1 se muestran los Estados de procedencia de las empresas que han recibido autorización para descontaminar suelos. Con mayor número se encuentran la CDMX y el Estado de México en el centro del país y con una importante cantidad los Estados de Tabasco, Tamaulipas y Veracruz que se explica por su cercanía con las refinerías y ductos que se encuentran localizados en esta región.

En la Gráfica 2 se observa el porcentaje de los procedimientos que han sido solicitados y autorizados por la SEMARNAT a las empresas para la descontaminación de los suelos. Entre 1994 y 2021 se han autorizado más de 600 procedimientos de remediación a 143 empresas del país, predominando los procesos biológicos seguidos de los procesos de remediación físicos y químicos. En los procesos biológicos, los más utilizados por las empresas son la “Biorremediación por biopilas a un lado del sitio contaminado” y “Biorremediación por *landfarming* a un lado del sitio contaminado” y “Bioventeo aerobio en el sitio de contaminado” mientras que para los procesos químicos el más utilizado por las empresas es la “Oxidación química a un lado del sitio contaminado”, por último, el proceso físico más usado para la remediación es la “Extracción de vapores en el sitio contaminado”.

Gráfica 2. Procedimientos utilizados por empresas para la remediación de suelos por porcentaje



Fuente: Elaboración propia con datos de la SEMARNAT.

La suma de los procedimientos más utilizados por las empresas para la remediación de suelos representa casi el 70% del total de las metodologías de descontaminación autorizadas por la SEMARNAT, por lo que estos datos indican su predominancia en las empresas como principales metodologías para remediar los suelos contaminados por hidrocarburos en México. La biorremediación como un proceso biológico para la descontaminación de suelos es la metodología más solicitada por las empresas a la SEMARNAT, derivado posiblemente de sus bajos costos, bajo nivel de inversión energética y sin implicaciones para el medio ambiente. Esto es un hallazgo importante en la investigación porque indica que la remediación de suelos contaminados por hidrocarburos tienen un tratamiento principalmente biológico lo que potencialmente puede ser aprovechado por nuevas metodologías de biotecnología para su aplicación, si por el contrario el porcentaje de uso de tratamiento biológico respecto a otras tecnologías tradicionales fuera menor, entonces la potencial aplicación de la biotecnología se mermaría por el poco uso de la biorremediación.

3.3 Evolución por año de los procedimientos autorizados de remediación de suelos contaminados por hidrocarburos

Para entender la evolución de las autorizaciones por año a las empresas de los procesos de remediación, se calculó en cada año la cantidad de procesos autorizados por clasificación desde 1994 a 2016 (con un periodo sin datos entre 1995 y 2000, consistente con un cambio institucional sexenal). En la Gráfica 3 se muestra una disminución de los procedimientos autorizados por la SEMARNAT para las empresas después de 2012, lo que indica que en los últimos años cada vez menos empresas reciben permisos para descontaminar suelos. Al contrastar esta información con la Gráfica “Sitios remediados en México” es posible decir que los cambios entre los aumentos o decrementos en las autorizaciones a las empresas para la remediación de suelos puede estar relacionado con la tendencia de disminución de los sitios remediados, debido a que:

- a) Las empresas que han sido autorizadas para remediar anteriormente han perdido capacidades científicas y tecnológicas por lo que se han visto rebasadas para enfrentar el número de pasivos ambientales, aunado a una falta de incentivos desde el Estado para promover la remediación.

- b) Las emergencias ambientales causadas por empresas son remediadas por las mismas empresas, por lo tanto, una disminución de las emergencias implica una disminución de la cantidad de autorizaciones y sitios remediados, dejando a los pasivos ambientales a la responsabilidad del Estado.

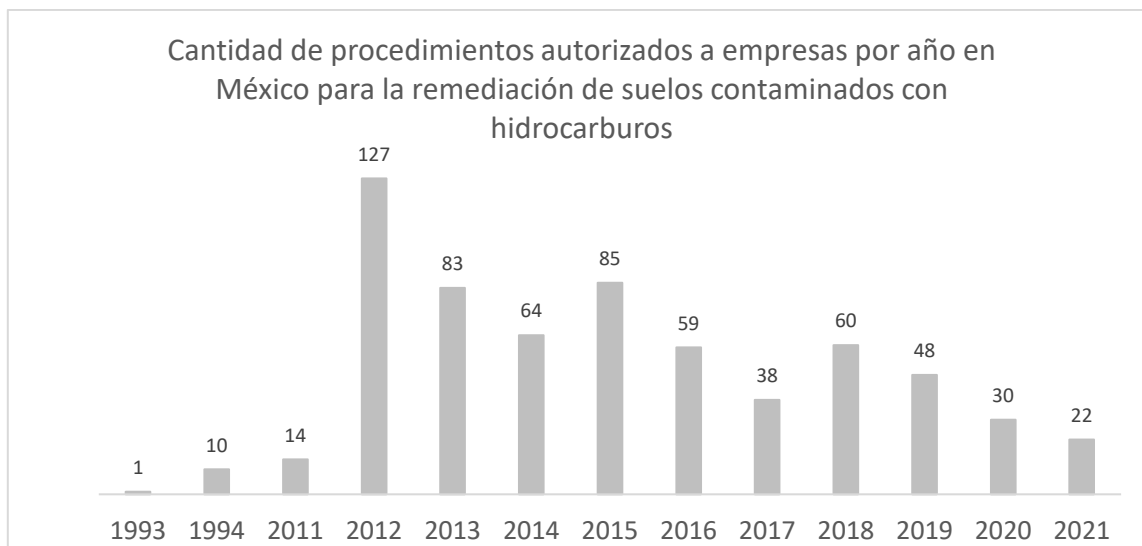
Explicar las causalidades de la Gráfica 3 es fundamental para la investigación porque si las tecnologías tradicionales de remediación son cada vez menos utilizadas en las empresas por diferentes barreras (institucionales, económicas, tecnológicas) entonces es posible que estas mismas dificulten el uso de nuevas metodologías de descontaminación. Una ruta para abordar el planteamiento es entender la siguiente pregunta:

“¿Por qué las empresas han dejado de recibir autorizaciones para la descontaminación de los suelos? A pesar de que el número de pasivos ambientales sigue en aumento.”

Debido a que la pregunta se estructura sobre la autorización de la SEMARNAT hacia los procedimientos de las empresas para realizar la metodología de descontaminación se realizó la revisión documental de las leyes y normas en materia ambiental para entender si las causas que explican el problema se originan en el nivel institucional. Esto es importante porque como se abordó en el Capítulo 2, los diferentes regímenes que componen al régimen sociotécnico están interrelacionados a través de las reglas y normas que son el cauce por el que se involucran los regímenes, unidas y organizadas en un sistema donde el cambiar una regla es inevitable alterar otras.

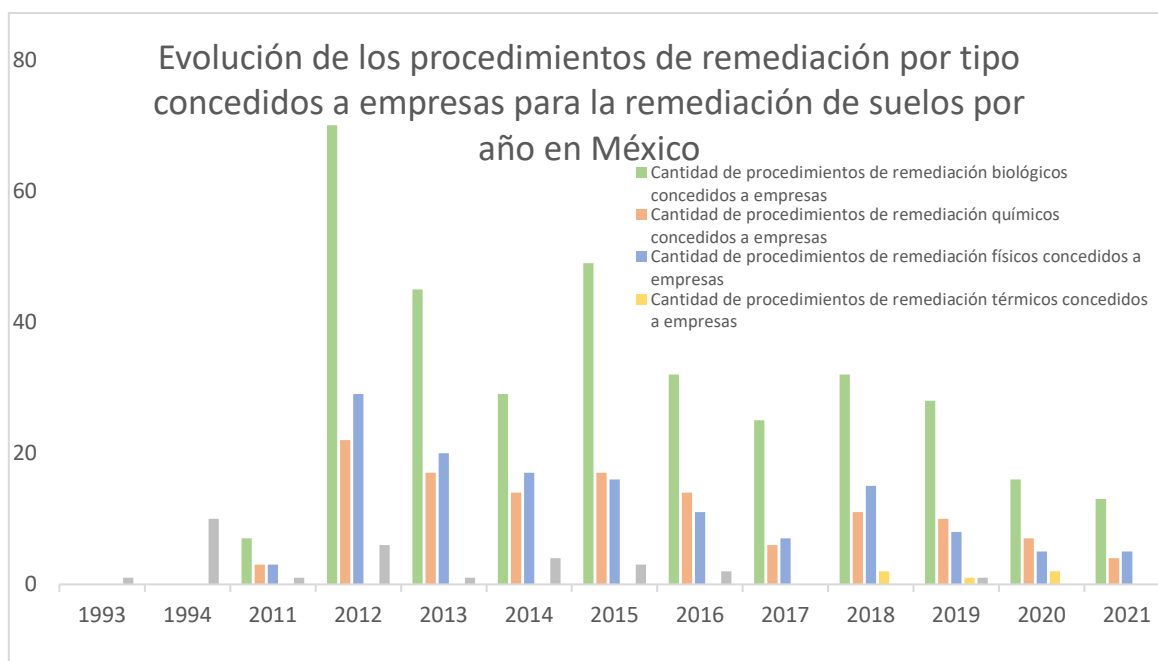
Por último, en la Gráfica 4 se observa la cantidad de autorizaciones por tipo de procedimiento por año. Al igual que en la Gráfica 3, se muestra una disminución desde el 2012 de las autorizaciones de los procedimientos de remediación. Sin embargo, es notorio que los procesos biológicos son los más utilizados, año con año, seguidos de los procesos químicos y físicos. Además, después de 2018 se ha introducido en el Gráfico el uso de los procedimientos térmicos por lo que se esperaría que esta tecnología comience a ser utilizada por las empresas para la remediación.

Gráfica 3. Cantidad de procedimientos autorizados por año a las empresas.



Fuente: Elaboración propia con datos de la SEMARNAT.

Gráfica 4. Evolución de los procedimientos autorizados por tipo y año.



Fuente: Elaboración propia con datos de la SEMARNAT.

3.4 Caracterización de las condiciones de la contaminación de suelo en México

Según datos de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), en México desde el 2009 la generación de volumen acumulado de residuos peligrosos

reportados por empresas a esta misma secretaría era de aproximadamente 1,699,635 toneladas y para el 2016 la acumulación había aumentado hasta las 2,402,812 toneladas.

Para el reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) en el Artículo 132 párrafo segundo se considera a una emergencia ambiental cuando:

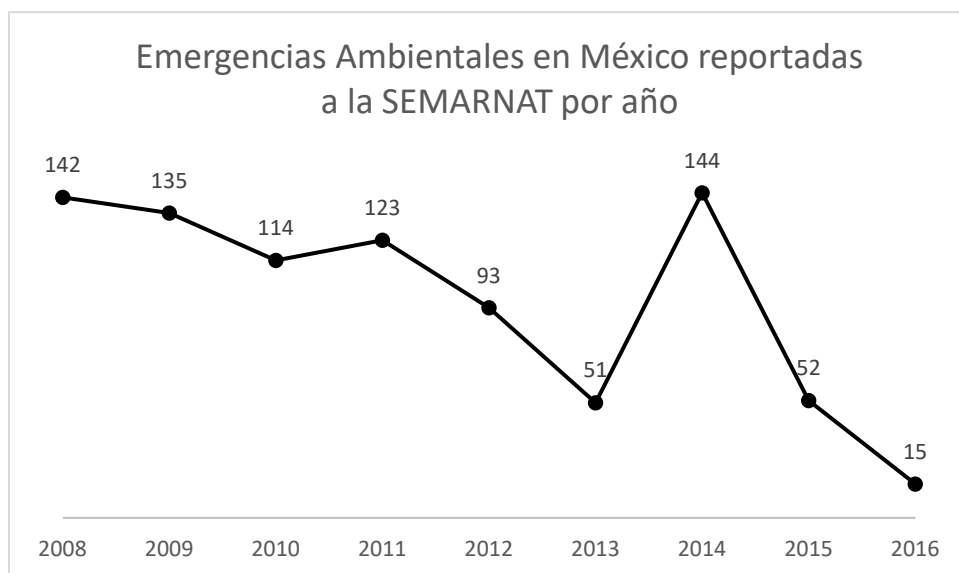
“...la contaminación del sitio derive de una circunstancia o evento, indeseado o inesperado, que ocurra repentinamente y que traiga como resultado la liberación no controlada, incendio o explosión de uno o varios materiales o residuos peligrosos que afecten a la salud humana o el medio ambiente de manera inmediata.”

En el mismo Artículo 132 de la LGPGIR párrafo tercero se define a los pasivos ambientales como:

“...aquellos sitios contaminados por la liberación de materiales o residuos peligrosos, que no fueron remediados oportunamente para impedir la dispersión de contaminantes, pero que implican una obligación de remediación”.

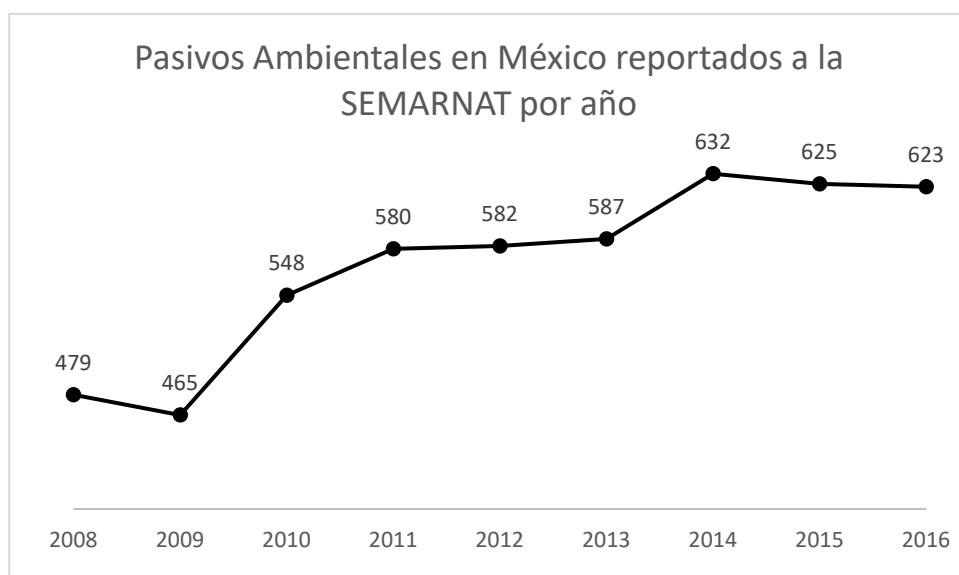
Por lo tanto, la ley establece una figura de pasivo ambiental como sitios de contaminación que se han acumulado sin ningún tratamiento remedial. En la Gráfica 5 Para 2008, el número de emergencias ambientales según datos de la SEMARNAT eran 142, el número de pasivos ambientales se incrementó en 479 y los sitios remediados alcanzaban los 76. Para el 2016, las emergencias ambientales habían disminuido a 15 eventos, mientras que los pasivos ambientales se incrementaron a 623 y los sitios remediados sólo alcanzaron los 29. En el Gráfico 6 se observa el número de pasivos ambientales acumulados por año en México reportados a la SEMARNAT. Desde 2009 hasta el 2014 los pasivos ambientales se han incrementado hasta 632 sitios contaminados que no han sido remediados oportunamente.

Gráfica 5. Emergencias ambientales en México.



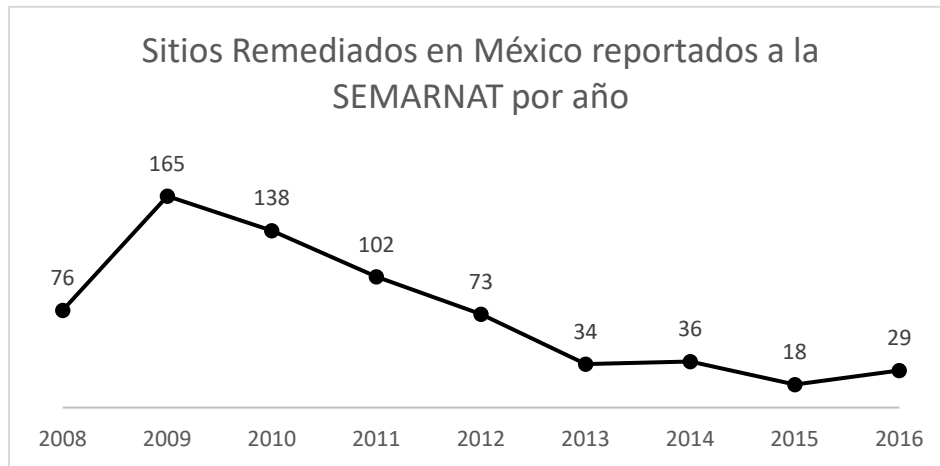
Fuente: Elaboración propia con datos de SEMARNAT.

Gráfica 6. Pasivos ambientales en México.



Fuente: Elaboración propia con datos de SEMARNAT.

En la Gráfica 7 se muestra el número de sitios remediados en México, es decir, la aplicación de una tecnología remedial a un sitio contaminado como consecuencia de una emergencia ambiental o que ha permanecido acumulado como pasivo ambiental. Desde 2009 hasta el 2016, la cantidad de sitios remediados ha disminuido hasta un mínimo de 29 sitios descontaminados por año.

Gráfica 7. Sitios remediados en México.

Fuente: Elaboración propia con datos de SEMARNAT.

Al contrastar la información entre las Gráficas 5, 6 y 7 resalta la disminución de las emergencias ambientales después del 2014 en México que se ve reflejado con un periodo sin incrementos de los pasivos ambientales. Después de 2009 se comenzó a perder la capacidad tecnológica que tienen las empresas para lograr la descontaminación de las emergencias y pasivos ambientales lo que ha provocado que no pueda disminuirse la acumulación de sitios contaminados en el país.

La contaminación de suelos ha ido en incremento como pasivos ambientales en los últimos años donde las empresas y gobierno carecen de la capacidad de descontaminación de todos los sitios. Además, si bien el número de pasivos ambientales es información relevante para entender el problema de contaminación en México, es necesario precisar que cada sitio tiene necesidades y características diferentes respecto al tipo de metodología necesaria para lograr la remediación.

Esta información es clave para la construcción del sistema sociotécnico de la investigación porque es evidencia de que existe un problema de contaminación que se encuentra presionando a la configuración del régimen existente.

Capítulo 4. Metodología

Para cumplir con los objetivos planteados en este estudio se propone realizar una investigación del tipo exploratorio-documental a través de una revisión de distintas fuentes documentales para identificar los elementos e interacciones del sistema sociotécnico que contribuyen a la descontaminación de suelos por la actividad industrial en nuestro país de tal forma que la interpretación de los documentos permita el entendimiento de los fenómenos relacionados con la sustitución tecnología de la biorremediación. García (1991) define el análisis documental como el conjunto de operaciones destinadas a representar el contenido y la forma de un documento para facilitar su consulta o recuperación, incluso para generar un producto que le sirva de sustituto. El análisis documental comprende varias fases destacando el análisis documental externo, en este se incluye a la descripción bibliográfica como la operación encargada de recoger del documento aquellos elementos que posibiliten su identificación en una colección determinada; la catalogación para permitir y concretar el punto de acceso y la forma de encabezamiento con el fin de identificar cada unidad documental y diferenciarla de las demás.

Como se ha mencionado en la hipótesis, es necesario entender las condiciones sociotécnicas que permitan el desarrollo de la biotecnología en la biorremediación y su difusión para sustituir o complementar las tecnologías tradicionales de descontaminación. Para esto, la metodología a través del análisis documental y exploratorio se ha construido de forma que permita caracterizar el nivel de desarrollo que tienen los nichos de innovación de biotecnología, los actores que componen al régimen y los nichos de innovación, las presiones ambientales que rodean a estos elementos del sistema y el contexto institucional que condicionan las actividades de los actores.

Yin (2009) menciona que existen distintas formas de investigación; como son la descriptiva, la exploratoria y la explicativa. La investigación que se utilizará en este documento como se ha mencionado es documental-exploratoria y esto se debe a que el tema de la biorremediación y la biotecnología es un fenómeno poco conocido por lo que una investigación exploratoria permitirá identificar a los actores, elementos e interacciones que participan en el sistema sociotécnico utilizando herramientas metodológicas de análisis bibliométrico.

Utilizando las aportaciones resultantes del marco teórico, se operacionalizaron los conceptos centrales de la presente investigación. El sistema sociotécnico como eje central de la metodología representa al conjunto de elementos, actores e interacciones que participan en biorremediación de suelos. Sus dimensiones, son las que propone Geels (2004) a través del análisis multinivel: el nivel micro, el nivel meso y el nivel macro. En el análisis del nivel micro, los nichos de innovación son los que conforman a esta dimensión por lo que para entender el estado de desarrollo de la biotecnología aplicada en la biorremediación se usará como indicador a los artículos de investigación en biotecnología aplicada en México por institución educativa, esto se debe que los proyectos de investigación científica también forman parte de los nichos de innovación especialmente cuando el nivel de desarrollo del nicho puede encontrarse en un estado proto-nicho con pocos proyectos locales. Estos proyectos pueden estar contenidos dentro de organizaciones públicas y privadas por lo que un análisis a través de los artículos de investigación y las patentes ha permitido entender a los nichos sustentables.

Además, para conocer el estado del nicho de innovación en el sector industrial también se analizó el número de empresas en México que cuentan con permisos de la SEMARNAT para el tratamiento de suelos, por lo que se espera obtener la cantidad de empresas que utilizan la biorremediación como principal metodología para la descontaminación. Y, por último, para analizar el nivel micro se utilizarán como indicador a las patentes. El objetivo de esto es identificar a las empresas que tienen incorporada a la biotecnología en los procesos de biorremediación, es decir, del total de empresas que cuentan con permisos de la SEMARNAT.

En la última dimensión del concepto, el nivel macro, se espera utilizar como categorías analíticas al contexto institucional y los organismos internacionales. El contexto institucional está determinado por el conjunto de leyes y normas que modulan el comportamiento de los actores que participan en el sistema sociotécnico, por ejemplo, existen normas ambientales que inciden en la emisión de contaminantes por la actividad industrial provocando que las empresas realicen modificaciones en sus procesos para disminuir sus contaminantes emitidos. En la Tabla 5 se muestra la operacionalización de los conceptos de la presente investigación.

Tabla 5. Dimensión, categoría analítica e indicadores del sistema sociotécnico de la biorremediación de suelos en México utilizando biotecnología.

Concepto central	Dimensión	Categoría analítica	Indicador
Sistema sociotécnico de la biorremediación de suelos en México utilizando biotecnología	Nivel Micro	Estado de desarrollo del nicho de innovación de biotecnología ambiental aplicada a la biorremediación.	• Artículos de investigación en biotecnología aplicada a la biorremediación en México por año. • Artículos de investigación en biotecnología aplicada a la biorremediación en México por institución educativa. • Número de empresas con registro en SEMARNAT para descontaminar suelos que utilizan biotecnología en la biorremediación. • Número de empresas con registro en SEMARNAT para descontaminar suelos. • Número de empresas con registro en SEMARNAT para descontaminar suelos que utilizan biorremediación. • Patentes
			• Posgrados • Institutos de Investigación • Centros Públicos de Investigación • Universidades
	Nivel meso	Actores que conforman el régimen de capacidades científicas en biotecnología ambiental en México.	• Cantidad de emergencias ambientales por hidrocarburos en México por año. • Cantidad de pasivos ambientales por hidrocarburos en México por año. • Cantidad de sitios remediados en México por año. • Cantidad de sitios biorremediados en México por año.
		Niveles de contaminación de suelos por hidrocarburos.	
	Nivel Macro	Contexto Institucional	• Leyes • Normas
		Organismos Internacionales	• Acuerdos internacionales (ODS). • Grupos ambientales extranjeros.

Fuente: Elaboración propia.

Para entender la conformación e identificación de los actores de los nichos de innovación de la biotecnología ambiental aplicada a la biorremediación en México fue necesario caracterizar a los principales institutos de investigación, universidades públicas y privadas a nivel estatal y federal que cuentan con capacidades científicas y tecnológicas para la biotecnología ambiental, por este motivo, se realizó un análisis de redes de cooperación entre las universidades e instituciones de educación superior (IES) en México que cuentan con publicaciones en artículos de investigación en revistas indexadas nacionales e internacionales para entender la dinámica y las tendencias de los institutos con mayor capacidad científica y tecnológica.

Se realizó una búsqueda en la base de datos de *Web of Science* utilizando la *Fórmula 1* a continuación, *TS = ((soil*) AND (biodegradation OR (biological degradation) OR biodegradation OR bioremediation OR bio-remediation OR (biological remediation) OR*

(microbial remediation) OR (microbial degradation)) AND (oil OR petroleum OR hydrocarbon OR diesel OR fuel OR benzine) AND ((biotechnology) OR (genes) OR (gen) OR (DNA) OR (transgenic)))* retomada y modificada a partir de Song (2021).

La fórmula original en el trabajo de Song (2021) se realizó para encontrar las tendencias hacia las que se conduce la biorremediación a nivel mundial, encontrando relevante información sobre los países que se encuentran a la vanguardia (China y EUA). La fórmula propuesta en su investigación contiene dos partes importantes: los elementos que componen a los hidrocarburos y a la biorremediación. Para incorporar a los elementos de la biotecnología fue necesario agregar los tópicos que se muestran en la *Fórmula 1*. De esta manera, se permite obtener tres componentes necesarios que pueden ser entendidos como parte de conjuntos en el lenguaje de las matemáticas. Es decir, los resultados obtenidos con la fórmula representan el conjunto de artículos de investigación que componen a los relacionados con la biorremediación de suelos, que a su vez incluyen el conjunto de los artículos de investigación de biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos y pertenecen al conjunto de los artículos de investigación que utilizan biotecnología ambiental, por este motivo el número de artículos se va reduciendo a medida que se establecen conjuntos dentro de la fórmula.

Los resultados obtenidos fueron descargados en archivo Excel para obtener la lista de los investigadores que participaron en la publicación de los artículos, la institución de procedencia y el año de publicación. Una vez que se identificaron estas características de los artículos de investigación se construyeron matrices para establecer la relación que tienen los investigadores con otras instituciones. Los resultados obtenidos en la matriz se pueden observar en el Anexo de esta investigación y se utilizaron para construir la red de interacción entre instituciones educativas y de investigación a través de la herramienta de software de UNICET (Borgatti et. al. 2002). Para la construcción de la matriz, el número **0** significa ninguna interacción y el número **1** indica la relación entre institución-institución. Esta herramienta analítica sirvió para establecer las relaciones que tienen los investigadores cuando realizan una publicación en una revista indexada internacional con otros colegas y permitió determinar el lugar e institución de procedencia de los autores. Una vez construidas las matrices de relación en Excel y su posterior tratamiento en UNICET se

cargaron en el software de NETDRAW (Borgatti, 2002) para la construcción de las redes. El tratamiento de las redes consistió en posicionar a las instituciones más relevantes en función del número de interacciones para que sea más fácil visualmente el análisis.

Para entender los principales tópicos de los artículos de investigación en biorremediación para la descontaminación de suelos en nuestro país, se utilizó la base de datos conocida como *Web of Science* utilizando como *Fórmula 2* (Song, 2021) para la búsqueda los siguientes términos: *TS = ((soil*) AND (biodegradation OR (biological degradation) OR bio-degradation OR bioremediation OR bio-remediation OR (biological remediation) OR (microbial remediation) OR (microbial degradation)) AND (oil OR petroleum OR hydrocarbon* OR diesel OR fuel OR benzine))* refinando la búsqueda solamente a México. Se obtuvieron 351 artículos de investigación que incluyen los publicados en revistas nacionales e internacionales. Utilizando el software de VOSviewer (Waltman, 2020), se realizó el análisis de los tópicos más utilizados por los artículos de investigación lo que es un indicativo de hacia dónde se dirige la producción científica de biorremediación en suelos por hidrocarburos en México. Al eliminar de la *Fórmula 1* la parte de “((biotechnology) OR (genes) OR (gen) OR (DNA) OR (transgenic))” es posible obtener todo tipo de investigaciones que se han dedicado a generar conocimiento sobre la biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos, lo que incluye líneas de investigación generales que no se limitan solamente a la biotecnología ambiental.

El software de VOSviewer tiene ventajas frente a NETDRAW por ejemplo para la creación de redes e interacciones con una mayor cantidad de datos es más rápida, aunque entre sus desventajas se encuentran que tiene menos opciones de personalización de los resultados. Por tanto, es útil para hacer un análisis de las palabras clave de los artículos de investigación. Esto es importante porque como se ha revisado en el Capítulo 2, en el régimen sociotécnico existen respuestas a la presión de la contaminación de suelos por lo que si los artículos de investigación se encuentran orientados a la optimización de la biorremediación en lugar de investigaciones basadas en la biotecnología entonces el régimen se encontraría en un proceso de reconfiguración y adaptación.

Con el objetivo de entender la aplicación de la biotecnología en la biorremediación en las empresas, se analizó la información encontrada en la plataforma del Instituto Mexicano de

Propiedad Industrial, haciendo énfasis en las búsquedas relacionada con la “biorremediación” “biotecnología” e “hidrocarburos”, utilizando como datos el “año”, “nombre o nombres de los inventores” “nacionalidad” y “solicitante”. De esta manera se pudo identificar a las empresas nacionales y extranjeras que participan con sus invenciones en la descontaminación de suelos por hidrocarburos con la *Fórmula 3: "biorremediación" OR "bioremediation" OR "remediación biológica" OR "fitorremediación"*

Para entender el contexto institucional en el que se desarrollan las empresas en México, es necesario hacer un análisis de las normas, leyes y sanciones que instrumenta el Estado a las organizaciones que producen bienes y servicios con efectos directos en el medio ambiente. En nuestro país, la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, la Ley de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente y la Ley Federal de Responsabilidad Ambiental son los principales ordenamientos jurídicos que abordan el impacto de la actividad industrial al entorno, sin embargo, es necesario estudiar el grado al que contribuyen para que las empresas utilicen métodos de producción sustentables o, por el contrario, no castigan actividades de alto impacto ambiental. El desarrollo de la biorremediación en el mundo se encuentra en un punto alto en la investigación científica y adopción de las industrias por la presión de la demanda del consumidor al comprar productos de origen sustentable y la creación de marcos normativos estrictos que obligan o incentivan a las empresas a utilizar esta tecnología. Además, acuerdos internacionales como los Objetivos de Desarrollo Sostenible propuestos por la ONU están relacionados con el uso de la bioeconomía y la biorremediación para cumplir las metas planteadas para el 2030, por lo que los países firmantes pueden encontrar motivaciones para crear marcos normativos sólidos que promuevan el uso de la biorremediación.

Capítulo 5. El sistema sociotécnico de la biorremediación de suelos y la transición hacia un sistema basado en la biotecnología sustentable

Utilizando el enfoque sociotécnico con el análisis multinivel se ha encontrado evidencia que sugiere que existe un nicho de innovación potencial de biotecnología aplicada a la biorremediación, pero con un nivel de desarrollo de “proto-nicho” que se encuentra localizado dentro de organizaciones como universidades, centros públicos de investigación.

El sistema sociotécnico sobre la biotecnología y biorremediación en México se ha caracterizado de acuerdo con la estructura retomada del análisis multinivel que se explica como sigue. En el nivel micro que componen a los nichos de innovación se encuentran los avances científicos y tecnológicos que conducen a las innovaciones radicales dentro del sistema sociotécnico, es decir, las metodologías de descontaminación que utilizan la biorremediación con biotecnología para lograr procesos más eficientes y con menor impacto ambiental en comparación con las tecnologías de descontaminación tradicional (físicas, químicas, térmicas y biológicas). Esta nueva metodología de descontaminación que compone la biorremediación y biotecnología en nuestro país está desarrollada a partir de la investigación científica en universidades y centros públicos de investigación que tienen departamentos o divisiones dedicadas a la investigación en biotecnología ambiental. En México, la biotecnología ambiental cuenta con amplias líneas de interés en la investigación científica que tienen como objetivo la prevención, reducción o eliminación del efecto contaminante de industrias como la petroquímica, textil, agrícola, de fertilizantes y farmacéutica con metodologías de descontaminación diferentes en cada caso particular. Por ejemplo, en la industria minera los agentes contaminantes principales son el mercurio, el cadmio y el arsénico que requieren de procesos descontaminantes específicos en cada componente a tratar.

En el caso de esta investigación, se ha decidido enfocar los esfuerzos a caracterizar los mecanismos de descontaminación relacionados con los hidrocarburos y sus derivados por su importancia en el sector económico, social y ambiental en México, sin embargo, la exploración empírica no permitió definir la capacidad general existente en nuestro país en el sector de biotecnología ambiental porque algunas metodologías biotecnológicas que se han desarrollado para el conjunto de las industrias contaminantes nunca podrán ser

utilizadas como parte de la biorremediación en los hidrocarburos. Una de las características que tiene la biotecnología en la biorremediación es la alta orientación y precisión a la que debe estar dirigida la metodología sobre el contaminante, lo que la convierte en una opción altamente efectiva pero poco o nualmente aplicable con otros contaminantes diferentes a los que inicialmente fue diseñada.

Esto supone un reto adicional para el desarrollo de la biotecnología en la biorremediación como una metodología que pueda sustituir a las tecnologías tradicionales por su selectividad en el diseño contra el contaminante a eliminar. Además, el reto no solamente es a nivel de diseño científico, sino que también tiene impactos y presiones sobre las leyes y normas que regulan la actividad de la biotecnología ambiental. Como se abordará más adelante, en nuestro país existen instituciones encargadas de vigilar los niveles de contaminación como consecuencia de accidentes en instalaciones petroleras y la perforación de ductos de manera intencionada. En efecto, existen leyes y reglamentos constituidos con el objetivo de sancionar a los sujetos que provocan la contaminación y normas que establecen los valores máximos de concentración de las moléculas contaminantes para considerar un sitio como contaminado y delimitar la manera en que deben ser utilizadas las metodologías dependiendo de la caracterización del sitio. Por ello una nueva forma de remediación requiere nuevos arreglos institucionales específicos. Un nuevo método o tecnología de descontaminación no puede difundirse ni aplicarse masivamente mientras las normas y reglas vigentes no tomen en cuenta sus ventajas y atributos frente a las tecnologías tradicionales. En este sentido, el nicho de innovación no puede desarrollarse ni aprovechar las ventanas de oportunidad que se abren desde el régimen sociotécnico.

Por la naturaleza de la complejidad de la realidad que intenta describir el enfoque sociotécnico se presentan dificultades para delimitar su campo de acción. La identificación de los actores es una muestra de lo anterior, debido a que los actores que conforman el régimen no son los mismos que participan en el nicho. En el nivel meso es posible encontrar a las empresas que han contaminado los suelos, las empresas que tienen la responsabilidad de descontaminar los suelos, las empresas, universidades, instituciones de investigación o centro públicos de investigación que realizan la optimización y

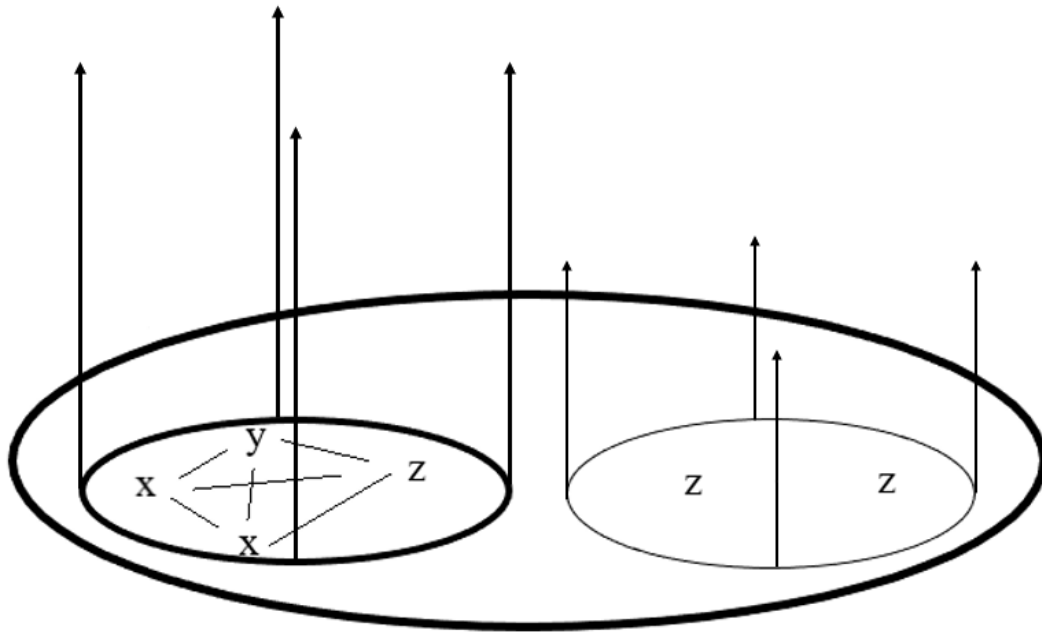
mejoramiento de la biorremediación a través de innovaciones incrementales, los investigadores que forman parte de estas organizaciones, los creadores de políticas públicas para reducir los pasivos ambientales y los legisladores que a través de la actividad legislativa están continuamente monitoreando la pertinencia de las leyes y normas. Para delimitar el nicho, al principio de la investigación surgieron problemas para encontrar a los actores que estuvieran relacionados directamente con el desarrollo de la biotecnología ambiental para la descontaminación de suelos afectados por hidrocarburos. El hallazgo encontrado a través de la realización de solicitudes de información de transparencia a las dependencias y en la búsqueda de base de datos del gobierno de México es que no existen actores que hayan logrado al momento un proyecto consolidado de biotecnología y biorremediación. La información que se muestra a continuación es que los pocos proyectos de biotecnología ambiental se encuentran concentrados dentro de universidades, instituciones de investigación y centros públicos de investigación localizados principalmente en el centro del país.

5.1 Nicho de innovación sustentable de biotecnología ambiental para la remediación de suelos contaminados por hidrocarburos

Tomando en cuenta el enfoque de las transiciones sostenibles que forman parte de la metodología de los sistemas sociotécnicos, se retoman las tres características que debe tener el nicho para que alcance un nivel de desarrollo adecuado: las expectativas y visiones de los actores hacia las innovaciones dominantes del nicho, las redes e interacciones entre los actores y organizaciones que se encuentran en el nivel micro y la generación de conocimiento y aprendizajes. En esta investigación, el énfasis de estas tres características recae en el análisis de las redes e interacciones entre los actores y la generación de aprendizaje y conocimiento que surge entre estos actores. Como se ha mencionado, en el nivel micro pueden existir múltiples nichos de innovación que trabajan para resolver un problema, en este caso es el de la contaminación de suelos por hidrocarburos. En cada nicho existen actores como los investigadores, organizaciones como las universidades, instituciones de educación superior y centros públicos de investigación y metodologías para abordar el problema de la contaminación, sin embargo, para que tengan éxito estas contribuciones es necesario que se conglomeren en proyectos específicos donde converjan

los esfuerzos de todos los actores y organizaciones que forman parte de los múltiples nichos.

Figura 3. Interacción entre los actores y organizaciones del nicho de innovación.

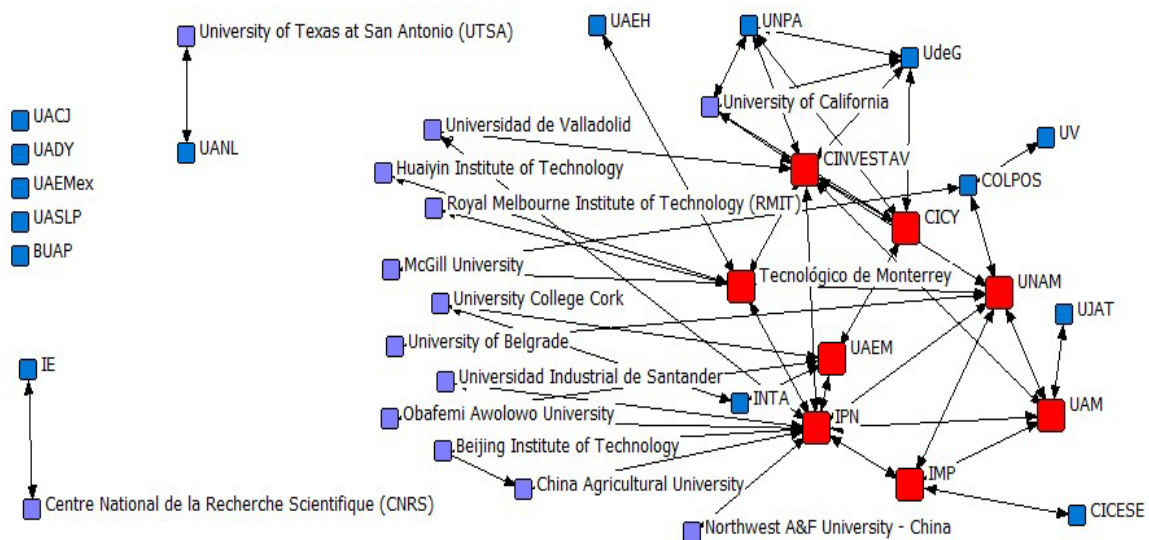


Fuente: Elaboración propia con base en Geels (2004).

Como se muestra en la Figura 3, existe un nivel micro dentro del sistema sociotécnico que engloba a todos los actores y organizaciones que se encuentran desarrollando innovaciones radicales que potencialmente pueden transitar al régimen sociotécnico para resolver el problema de la contaminación, es decir, modificar o complementar la manera en que se descontaminan los suelos en México. Como se puede observar en el lado izquierdo de la Figura 4, dentro del nivel micro, los nichos que cuentan con mayor interacción y cooperación entre los actores y organizaciones tienen mayor posibilidad de aprovechar las ventanas de oportunidad que se abren desde el régimen sociotécnico, por el otro lado, cuando existen actores y organizaciones que carecen de lazos de interacción con otros actores no podrán alcanzar un nivel de desarrollo adecuado para transitar al régimen sociotécnico. Es importante entonces que para que los nichos de innovación se encuentren desarrollados cuenten con interacción y cooperación con varios actores con funciones multidisciplinarias que se encuentran en el nivel micro.

Para entender la manera en que se relacionan los actores del nivel micro sobre la biotecnología en la biorremediación en México es necesario identificar las interacciones y su cooperación en la generación de conocimiento y aprendizaje y como se conglomeran en nichos de innovación. La generación de conocimiento puede ser analizada a través de la publicación de artículos de investigación sobre biotecnología ambiental. En los datos recabados en función de la *Fórmula 1*, se obtuvieron 49 artículos de investigación sobre biotecnología ambiental en la biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos que se han publicado en revistas indexadas internacionales. Al conjunto de investigadores e instituciones que participan en la producción científica de los 49 artículos encontrados representan a los proyectos locales del del nicho de innovación. Es importante hacer un paréntesis en los artículos de investigación obtenidos, debido a que si bien es un indicador sobre la capacidad científica de biotecnología ambiental que tiene México, la base de datos de donde se obtuvo la información no contiene la publicación en revistas nacionales, ni tesis o libros escritos en español lo que supone la pérdida de algunos elementos importantes para el análisis. Los resultados obtenidos por la red de interacción entre los investigadores son los siguientes que se muestran en la Figura 4.

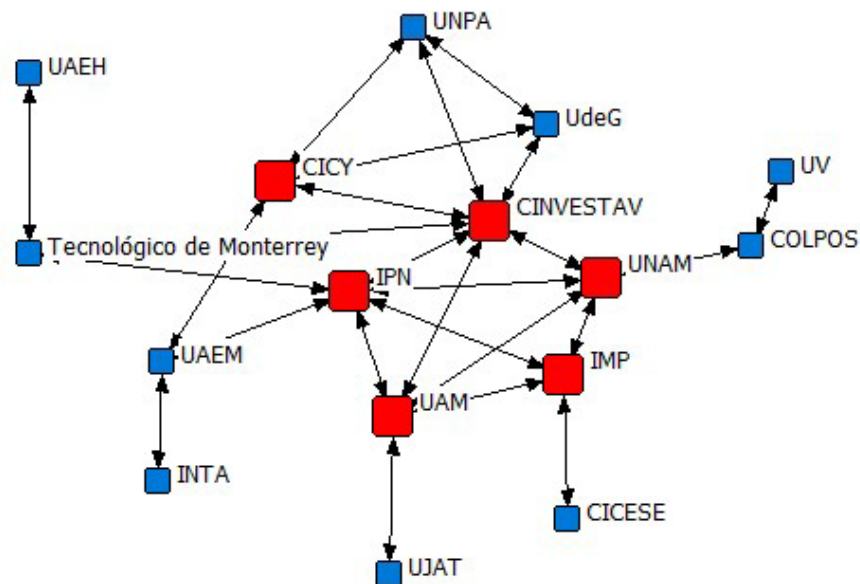
Figura 4. Red de instituciones sobre biotecnología aplicada a la biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos en México.



Fuente: Elaboración propia con datos de *Web of Science*.

Como se puede observar en un primer acercamiento, existen instituciones de educación superior que no tienen interacción con la red principal formada del análisis de los artículos de investigación, lo que sugiere que estos investigadores realizan sus actividades de forma interna y aislada entre sus propios departamentos de biotecnología ambiental. Además, estas universidades y centros públicos de investigación aislados de la red (UACJ, UADY, UAEMex, UASLP, BUAP) se encuentran fuera del centro del país, lo que es un dato importante porque es posible que la mayor parte de los recursos e incentivos económicos para la investigación en biotecnología ambiental se encuentran concentrados y centralizados en las universidades federales. También se resalta el papel dentro de la red de interacción la cooperación académica con instituciones y universidades de otros países, especialmente el caso de China que según información obtenida en la base de datos de *Web of Science*, es el país que cuenta con mayor cantidad de artículos de investigación en biotecnología ambiental para la biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos en el mundo.

Figura 5. Red de instituciones principales que participan en la producción científica de biotecnología ambiental en la biorremediación de suelos.



Fuente: Elaboración propia con datos del *Web of Science*.

Para poder identificar a la red de interacción de los investigadores y las instituciones de procedencia más importantes en la biotecnología ambiental aplicada a la biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos se eliminaron a las instituciones educativas y centros públicos de investigación que realizan sus investigaciones de forma aislada y a las universidades extranjeras. De esta manera se obtiene a la red de interacción en su forma sintética en la Figura 5 con las instituciones de procedencia que tienen más cooperación entre ellas formando una red. Como se había mencionado, las instituciones con mayor grado de cooperación académica son las que cuentan en sus publicaciones con autores con instituciones de distinta procedencia. En la red de interacción, las principales instituciones en nuestro país que realizan investigación en biotecnología ambiental en la biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos son:

- Universidad Autónoma Metropolitana (UAM)
- Instituto Politécnico Nacional (IPN)
- Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN (CINVESTAV)
- Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)
- Instituto Mexicano del Petróleo (IMP)
- Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY)

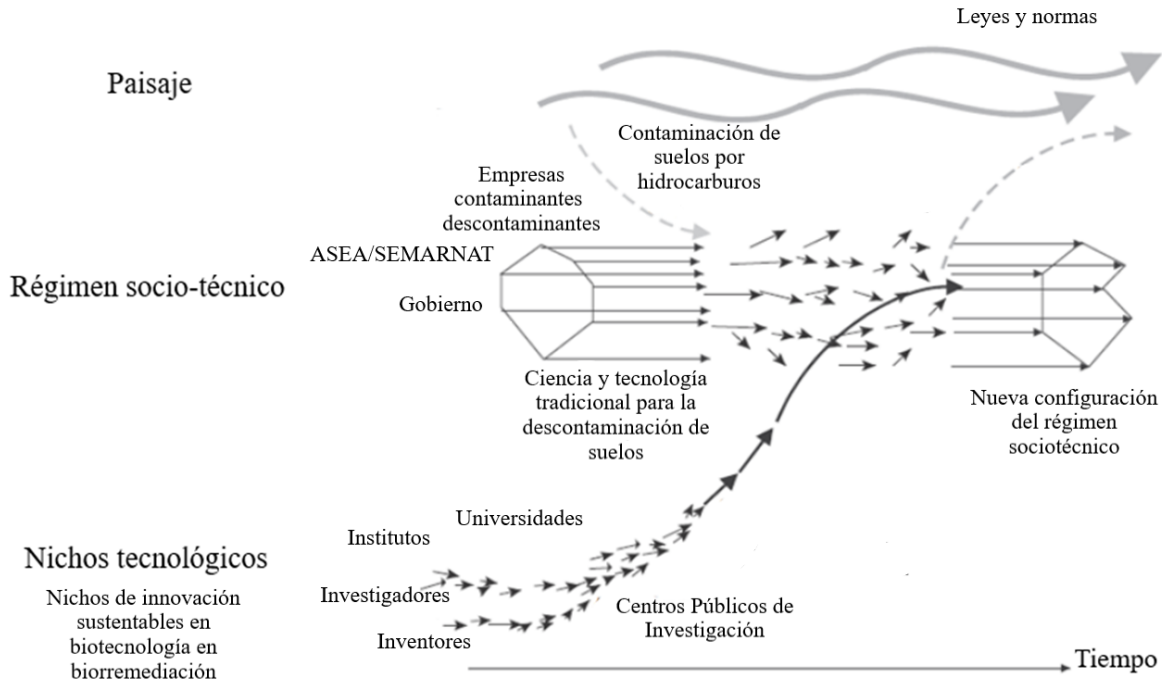
Si bien esta información es relevante para caracterizar el nicho de innovación y a los actores que componen el nivel micro del sistema sociotécnico, una de las posibles razones por las que estas instituciones educativas tengan importancia en la biotecnología ambiental es por la inercia adquieren al ser las instituciones, universidades y centros públicos de investigación que reciben mayor proporción del presupuesto federal en ciencia y tecnología.

Las universidades federales y el CINVESTAV se han consolidado como las instituciones de educación y de investigación que perciben más recursos públicos. Esto les permite dirigir investigaciones hacia problemas ambientales con mayor flexibilidad en comparación con las universidades estatales que tienen serios problemas de financiamiento. Por esta razón y según demuestra la literatura, el papel del Estado es fundamental para el surgimiento y protección de nichos de innovación en biotecnología ambiental.

En la literatura y según se ha citado en el marco teórico, los nichos de innovación deben protegerse de las fuerzas del mercado porque la innovación radical que se ha desarrollado no puede competir directamente con la dominancia de las tecnologías del régimen sociotécnico (Smith et al., 2010). En el caso de las innovaciones sustentables, el reto es aún mayor porque el beneficio que se persigue en el desarrollo de las innovaciones es la reducción del impacto ambiental para que todos los individuos de la sociedad tengan derecho a disfrutar de un entorno limpio y saludable, por lo que las empresas privadas tendrán recursos limitados para perseguir este objetivo colectivo. Esta es la razón fundamental por la que el Estado debe garantizar el surgimiento, protección y desarrollo de los nichos de innovación sustentables para que puedan transitar al régimen sociotécnico y sustituir o complementar a las tecnologías tradicionales que permita beneficiar colectivamente a todos los individuos de la sociedad. Sin embargo, como se ha observado hasta ahora, existe una falta de incentivos dentro las leyes y normas que permita la protección de los nichos de innovación sustentables porque su principal función se orienta a regular las metodologías de descontaminación utilizadas por las empresas, determinar los niveles de contaminantes máximos en los sitios expuestos y sancionar a los responsables de generar la contaminación.

El sistema sociotécnico caracterizado sobre el uso de la biotecnología en la biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos se presenta de forma preliminar en la Figura 6. En el nivel micro, existen distintos nichos de innovación sustentable de biotecnología ambiental en nuestro país que se encuentran concentrados entre la cooperación académica de universidades estatales y federales, centros públicos de investigación dependientes del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología e instituciones de Investigación. A través del análisis de redes de interacción, se encontraron a los principales investigadores que forman parte de la producción científica en biotecnología ambiental del país, por lo que se realizó la búsqueda de los nombres en la base de datos de patentes del Instituto Mexicano de la Propiedad Intelectual para encontrar similitudes con la lista generada en el *Web of Science*.

Figura 6. Sistema sociotécnico de biotecnología ambiental para la biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos en México.



Fuente: Elaboración propia con base en Geels (2004).

El escenario planteado en esta figura es el ideal para que el nicho sustentable de biotecnología ambiental aproveche las oportunidades que surgen desde el régimen sociotécnico. Sin embargo, la realidad demuestra que el nicho de innovación sustentable tiene dificultades para aglutinarse en proyectos de gran escala y aplicabilidad industrial donde el arreglo institucional ha condicionado su desarrollo y es producto de la adecuación de los elementos hallados en la evidencia y la información recabada en el marco teórico.

Se utilizó en el buscador del SIGA la *Fórmula 3* para encontrar las patentes relacionadas con la biorremediación de suelos en el país. Se obtuvieron 37 resultados de patentes, que constituyen el universo de solicitudes y concesiones de patentes sobre la biorremediación en México. Sin embargo, en estos 37 resultados se encuentra información sobre la metodología de la biorremediación como tecnología tradicional, la remediación biológica de suelos contaminados por la actividad de otras industrias, y la aplicación de la biotecnología en la biorremediación de otros compuestos distintos a los hidrocarburos por lo que fue necesario hacer un revisión de cada patente para delimitar a las patentes sobre la biotecnología aplicada a la biorremediación de suelos contaminados por los hidrocarburos.

Tabla 6. Patentes relacionadas con la biotecnología y biorremediación de suelos por hidrocarburos.

Solicitante(s)	Inventor(es)	Fecha	Título	Tipo de documento
CENTRO DE INVESTIGACION Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL I.P.N.	REFUGIO RODRÍGUEZ VÁZQUEZ; GLADYS ADRIANA ROLDAN MARTIN; CINTHYA PAMELA DEL RIO GALVAN	2011	PROCESO DE BIORREMEDIACIÓN EN CULTIVO SÓLIDO CON LA ADICION DE GRANOS DE CAFE.	Patente
PRODUCTORA INTERNACIONAL PARA PROTEGER EL MEDIO AMBIENTE, S.C. DE R.L. DE C.V. [MX]; GUADALAJARA, Jalisco, 44910, MX	LUIS JESUS MADRIGAL GOMEZ [MX]; IGNACIO MORALES CRUZ [MX]; HECTOR DAVID HERRERA MEZA [MX]; GUADALAJARA, Jalisco, 44910, MX	2014	COMPUESTO PARA LA BIORREMEDIACIÓN EN AGUAS RESIDUALES Y DE SUELOS AGRICOLAS	Solicitud de patente
OMYA INTERNATIONAL AG [CH]; Oftringen, CH-4665, CH	MICHAEL SKOVBY [DK]; NICOLA DI MAIUTA [IT]; PATRICK SCHWARZENTRUBER [CH]; Meilen, CH-8706, CH	2018	CARBONATO DE CALCIO CON TRATAMIENTO DE SUPERFICIE PARA LA UNION Y BIORREMEDIACION DE COMPOSICIONES QUE CONTIENEN HIDROCARBUROS.	Patente
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO [MX]	José Luis RODRÍGUEZ MEJÍA [MX]; Liliana PARDO LÓPEZ [MX]; Selma Julieta RODRIGUEZ SALAZAR [MX]	2019	NUEVA DIOXIGENASA DE PSEUDOMONAS STUTZERI, Y METODOS DE USO.	Solicitudes de patente
BIO-ON S.P.A. [IT]	Lucrezia GENOVESE [IT]; Simone BEGOTTI [IT]; Simone CAPPELLO [IT]	2019	METODO PARA LA BIORREMEDIACION DE AGUAS CONTAMINADAS CON HIDROCARBUROS.	Solicitudes de Patente conforme al Tratado de Cooperación en Materia de Patentes

Carlos Ricardo LOPEZ SORIANO [MX]; Pedro Gilberto MARTINEZ DE VALLE [MX]	Carlos Ricardo LOPEZ SORIANO [MX]; Pedro Gilberto MARTINEZ DE VALLE [MX]	2020	PROCESO AJUSTABLE A DIFERENTES MEDIOS Y SUPERFICIES CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS PARA APLICARLES BIORREMEDIACION.	Solicitudes de patente
--	--	------	---	------------------------

Revisando el contenido y la información anexada de cada solicitud y patente de los 37 resultados encontrados en la base de datos de IMPI, se redujo la lista a 6 inventos relacionados con la biotecnología y la biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos como se puede observar en la Tabla 6. Como se ha mencionado, existe una línea muy difusa para establecer las comparaciones entre la ciencia y tecnología que se encuentra desarrollándose en el régimen sociotécnico, y la ciencia y tecnología que se hace dentro de los nichos sustentables. En este caso, la optimización y eficiencia del proceso de la biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos utilizando nuevos organismos biológicos, o nuevas combinaciones de metodologías de descontaminación utilizando biorremediación constituyen el pilar de la orientación que tiene la ciencia y tecnología que se realiza en el régimen sociotécnico. Esto se debe a que la presión de la contaminación sobre la configuración del régimen que obliga a los actores y organizaciones a desarrollar nuevas metodologías para la descontaminación de los suelos, incluso con la evidencia empírica mostrada es posible que en el impulso a este tipo de innovaciones sustentables (ya sea que hayan sido concebidas en el régimen sociotécnico o el nicho de innovación) la investigación científica ambiental con recursos públicos juega un papel importante.

Para entender la manera en que ha transitado la investigación científica en los últimos años, es decir, hacia donde se ha orientado la optimización y eficiencia de la biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos se analizó el conjunto de palabras clave de los artículos de investigación. En la *Fórmula 2* para encontrar las redes sobre biotecnología ambiental, es necesario generalizarla para encontrar cualquier tipo de orientación que tenga la investigación ambiental. De esta manera es posible determinar cuáles son los principales temas de interés para los investigadores que trabajan con la biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos a lo largo de los años y la manera en que se ha ido

modificando de acuerdo con las necesidades que se deben cumplir desde el régimen sociotécnico.

Al construirse la red de palabras clave, se encontrarán los artículos de investigación de biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos que incluyen cualquier tipo de optimización en el proceso. La importancia de analizar los artículos de investigación sobre biotecnología ambiental en México se debe a que son un indicador sobre el tipo de conocimiento que se produce en las instituciones de investigación. En el caso de la biotecnología ambiental y en general de las ciencias biológicas y naturales, el conocimiento científico tiene su comienzo en la caracterización de los componentes moleculares de los organismos biológicos, es decir, la recolección de información clave sobre el comportamiento de las moléculas, sus características fisicoquímicas y su interacción con otras moléculas.

La caracterización consolida las bases de las aplicaciones potenciales que tendrán innovaciones tecnológicas por lo que es un proceso importante en la generación de conocimiento. Sin embargo, si la mayor parte de la producción científica se encuentra concentrada en los estudios sobre caracterización, es decir, a la caracterización genética de las comunidades microbianas, entonces es posible determinar que la investigación científica del área está en un estado inicial de exploración de los fenómenos estudiados. Si, por el contrario, la caracterización se encuentra presente y se consolida con investigación dirigida a la innovación tecnológica, es decir, a la aplicación de nuevas metodologías de descontaminación de suelos por hidrocarburos usando biotecnología entonces aparecerán nuevos proyectos que de forma gradual comiencen a resolver los problemas de contaminación.

Para entender la manera en que ha evolucionado el tipo de conocimiento científico por año fueron analizados los resultados obtenidos para encontrar las palabras centrales de los artículos de investigación, de tal manera que se posible determinar cuáles han sido las necesidades, motivaciones y nuevos enfoques de la biotecnología ambiental para los suelos contaminados por hidrocarburos.

Figura 7. Palabras principales de los artículos de investigación en biotecnología ambiental.

Fuente: Elaboración propia con datos de *Web of Science*.

Como se puede observar en la Figura 7, se muestran las principales palabras clave de los 351 artículos de investigación de biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos. El número de resultados se debe a que engloba a todas las investigaciones de biotecnología ambiental en biorremediación de suelos por hidrocarburos en México, es decir, en estos resultados se encuentran los estudios dedicados a la caracterización de suelos, de comunidades microbianas, mejoras en los procesos de optimización de la biorremediación, aplicación de la biotecnología, mejoramiento genéticos de plantas para la fitorremediación, optimización de las metodologías de biorremediación existentes y entre otras, por lo que se muestran los resultados generales de la biotecnología ambiental en nicho de innovación y en el régimen sociotécnico. La imagen tiene una escala de colores que permite identificar los temas y palabras clave de estos artículos desde el 2010, donde se puede observar que el foco de atención de los investigadores estaba dirigido al comienzo del periodo a la “eficiencia”, “oxidación”, “mejoramiento de la biodegradación” así como

la identificación de los principales agentes contaminantes en el suelo como “diésel”, “combustible”, “bencenos”, “hidrocarburos” y “compuestos aromáticos”.

Al paso de los años, otros temas se han vuelto relevantes para los investigadores de biotecnología ambiental y biorremediación de suelos, como se puede observar en la imagen y de líneas color amarillo las palabras “nom-138”, “lacasas” (enzimas degradadoras estudiadas ampliamente por la biotecnología) y “tolerancia” son más frecuentes. Esto indica que la investigación ambiental recientemente ha tenido un desarrollo motivado para las nuevas metodologías de descontaminación orientadas a la biotecnología y al arreglo institucional que puedan ayudar a respetar los límites de contaminación máximos que deben cumplir las empresas a través de la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012. Además, los estudios sobre las lacasas forman parte de la caracterización y aplicación biotecnológica debido a que esta enzima es conocida como parte de los mecanismos metabólicos de las bacterias que las provee de la capacidad de la degradación de los PAHs y HACs, por lo que la investigación científica sigue en la búsqueda de mejoras y optimizaciones de los procesos de biorremediación basadas en la biotecnología.

5.2 Contexto institucional en el que se involucran los nichos de innovación de biotecnología ambiental

Desde la literatura se han retomado aspectos importantes que han sido mencionados en el capítulo sobre las transiciones sustentables, como el cambio en los procesos fundamentales de los sistemas sociotécnicos hacia modos de producción más sostenibles con el medio ambiente. Estas transiciones sustentables son a largo plazo y están dirigidas a cumplir objetivos específicos, como por ejemplo reducir los niveles de contaminación de suelo por los hidrocarburos y sus derivados. Las transiciones sustentables surgen como una respuesta a las presiones que ejercen los problemas causados por la contaminación en todos los actores, organizaciones e instituciones que forman parte del régimen sociotécnico.

La contaminación tiene efectos generales en todos los elementos del régimen, desde individuos que forman parte de la sociedad donde se ve mermada su salud y su nivel económico y hasta las grandes empresas que deben cumplir con criterios de emisión de contaminantes para evitar ser sancionados, por lo que existen esfuerzos desde el régimen

sociotécnico para resolver el problema de la contaminación a través de los medios disponibles.

En el sistema sociotécnico que se ha caracterizado en esta investigación, se ha enfocado entre los actores, elementos e interacciones que participan en la respuesta a la contaminación en suelos de los hidrocarburos y sus derivados. En un primer intervalo de tiempo donde no existían leyes ni normas que regularan la actividad industrial (antes de su publicación en el Diario Oficial de la Federación), las empresas privadas y aquellas productivas dependientes del Estado como PEMEX no contaban con parámetros para regular el desecho de los contaminantes lo que provocó un aumento de los sitios contaminados y pasivos ambientales. Tampoco se aplicaban tecnologías de descontaminación tradicionales porque no había sanciones ni castigos para las empresas contaminantes que motivara su uso. En un segundo intervalo de tiempo, cuando la contaminación comenzó a ser un problema para los individuos de la sociedad después de la década de 1980 el gobierno implementó nuevas reglas y normas como la ley de responsabilidad ambiental para regular los altos niveles de contaminación causados por la actividad de las empresas. Esto se ve reflejado en la creación de la Ley de Equilibrio Ecológico, la Ley de la Gestión Integral de los Residuos Sólidos y la Ley de la Agencia Nacional de Seguridad Industrial y de Protección al Medio Ambiente del Sector Hidrocarburos como una respuesta al aumento de los pasivos ambientales. A continuación, se enlistan las leyes que forman parte del contexto institucional de la biotecnología en la biorremediación y se ofrece una aproximación a un análisis que permita entender como han incidido en la configuración del régimen sociotécnico.

Ley Federal de Responsabilidad Ambiental¹²

Entró en vigor en el 2013 y se creó para articular los esfuerzos de las instituciones encargadas de la seguridad y protección ambiental a cargo de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Ambientales para establecer sanciones económicas y penales para los sujetos contaminantes. En el Artículo 10 de la ley se menciona que toda persona moral y física que ocasione daño al ambiente será responsable y estará obligada a la reparación de los daños. En el Artículo 13 se establece que la reparación del daño consiste en restituir al

¹² Véase: shorturl.at/einU0

estado base del hábitat natural, además de sus condiciones químicas, físicas o biológicas que se dan en estos ecosistemas. A partir de estas dos últimas observaciones, es posible entender que las empresas que incurran en la emisión o en verter contaminantes en los suelos por causa de los hidrocarburos deberán por sus propios medios remediar los sitios contaminados por observancia de la ley de responsabilidad ambiental y evitar sanciones económicas o penales.

Ley General de Equilibrio Ecológico¹³

Es una ley vigente que fue publicada en 1988 para referirse a la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como a la protección al ambiente en México. Se rige bajo los principios del Artículo 1 sobre garantizar el derecho de toda persona a vivir en un medio ambiente sano; definir los principios de la política ambiental; el aprovechamiento sustentable y la prevención y el control de la contaminación de aire, suelo y agua. En el Capítulo III sobre Política Ambiental, Artículo 15 se menciona que para la conducción de la política ambiental se deberá conducir el Estado bajo los principios que los ecosistemas son patrimonio común de la sociedad y de su equilibrio depende la vida y las posibilidades productivas del país; la prevención como método más eficaz para evitar los desequilibrios ecológicos; el efectivo aprovechamiento de los recursos naturales entre otras. Además, en la Sección VI se delimitan los mecanismos para la creación de Normas Oficiales Mexicanas en Materia ambiental que tendrán entre sus funciones establecer los requisitos, especificaciones, condiciones, metas, parámetros y límites permisibles que deberán observarse en regiones, ecosistemas para el desarrollo de las actividades económicas, la producción, uso y destino de bienes e insumos.

Un aspecto importante en la creación de normas oficiales como se indica en el Artículo 37, para el cumplimiento de las previsiones de las normas se realizará de conformidad con las características de cada proceso o actividad sujeta a regulación sin obligar a los individuos u organizaciones el uso obligatorio de tecnologías específicas. En los casos donde se requiera una tecnología específica establecidas por las normas oficiales para la previsión entonces los destinatarios podrán proponer a la Secretaría para su aprobación los equipos, procesos o tecnologías alternativos para ajustarse a las previsiones correspondientes.

¹³ Véase: shorturl.at/NSVW3

En la Sección VIII sobre la Investigación y Educación Ecológica es debatible el papel que tiene el Estado para promover la investigación y desarrollo dentro de la ley porque solo se limita a fomentar la ciencia, el desarrollo tecnológico e innovación a través de la celebración de convenios con instituciones de educación superior, centros de investigación e instituciones del sector social y privado, pero sin garantizar el incentivo económico que podría estar delineado en fondos institucionales. Si bien, existen partidas presupuestales contempladas en el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología que tienen como objetivo atender las necesidades de investigación ambiental, es importante que exista una convergencia entre las leyes establecidas para brindar certeza en los incentivos a los científicos y tecnólogos para el desarrollo de sus actividades.

Ley de la Agencia Nacional de Seguridad Industrial y de Protección al Medio Ambiente del Sector Hidrocarburos¹⁴

Establecida en el 2014, es una nueva ley que busca la creación de la Agencia Nacional de Seguridad Industrial y de Protección al Medio Ambiente del Sector Hidrocarburos como un órgano administrativo de la SEMARNAT para la protección de las personas, el medio ambiente y las instalaciones del sector de hidrocarburos a través de la regulación y supervisión de residuos y emisiones contaminantes. En términos concretos, esta ley tiene como propósito fundar los objetivos y aspectos de la Agencia Nacional en materia de Seguridad Industrial, Seguridad Operativa y en materia de Protección al Medio Ambiente donde esta es de nuestro interés por estar relacionada con los objetivos de la investigación. En materia ambiental, la Agencia comprende las condiciones de protección de los suelos expuestos a las actividades de exploración, extracción, transporte de los hidrocarburos para evitar o minimizar las alteraciones ambientales; caracterización y clasificación de los residuos generados para elaborar los planes de manejo integral de los residuos; las condiciones ambientales para prevenir la contaminación por residuos; las especificaciones y los requisitos del control de emisiones de contaminantes; *la información técnica específica de los organismos genéticamente modificados que se utilizarán en la biorremediación de sitios contaminados por hidrocarburos* (Artículo 6, Inciso II, párrafo i) y las cantidades mínimas necesarias para considerar como adversos o dañosos el deterioro ambiental.

¹⁴ Véase: shorturl.at/dgkPU

Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos¹⁵

Establecida en el 2003, tiene por objetivo garantizar a toda persona al medio ambiente sano y propiciar el desarrollo sustentable a través de la gestión integral de los residuos peligrosos, de los residuos urbanos y de manejo especial, además de prevenir la contaminación de sitios con los residuos y llevar a cabo su remediación.

La conducción de la política ambiental para la prevención, valorización y gestión integral de los residuos debe seguir ciertos principios para su ejecución, todas las personas tienen el derecho a vivir en un medio ambiente adecuado para su desarrollo; las actividades de la gestión integral de los residuos son dictadas por el interés público; corresponde a quien genere los residuos la asunción de los costos derivados del manejo y la reparación del daño; la responsabilidad compartida de los productores, importadores, exportadores, comercializadores, consumidores, empresas de manejo de residuos y gobierno es fundamental para lograr que el manejo de los residuos sea integral, ambientalmente eficiente, tecnológicamente viable y económicamente factible; promover el acceso público a la información de la gestión integral; disposición final de los residuos que no tengan alternativa de remediación, ni viabilidad tecnológica o económica; y la realización inmediata de los sitios contaminados para prevenir los riesgos inminentes a la salud y al medio ambiente.

Según el Artículo 7 de la ley, son facultades de la federación la elaboración del Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, el Programa Nacional de Remediación de Sitios Contaminados y coordinar su instrumentación entre las entidades federativas y los municipios, además de la expedición de los reglamentos, normas oficiales mexicanas y demás disposiciones para regular el manejo integral de los residuos, es decir, su clasificación, prevenir la contaminación de sitios o llevar a cabo su remediación cuando sea necesario.

En el Capítulo IV de la ley, sobre el manejo integral de los residuos peligrosos, según el Artículo 58, 59 y 61, quienes realicen procesos de tratamiento físicos, químicos o biológicos de residuos deberán presentar a la Secretaría los procedimientos, métodos o técnicas mediante las cuales se realizarán, y en caso de que el tratamiento de los residuos

¹⁵ Véase: shorturl.at/eouZ1

por alguna razón conduzca a la liberación de alguna sustancia tóxica deberán prevenir o eliminar dicha liberación. En este sentido es importante porque la ley contempla que durante el tratamiento mismo de los residuos puedan liberarse otros derivados contaminantes. Sin embargo, en la gran mayoría de las ocasiones también puede existir un impacto por el tipo de energía utilizada por los tratamientos y su duración para lograr la descontaminación por lo que en este punto es posible que exista una mejora de la ley al incluir los compuestos derivados del tratamiento y buscar el tratamiento más eficiente energéticamente a fin de que el impacto de la remediación sea mínimo.

Por último, el Capítulo V referente a la Responsabilidad acerca de la Contaminación y Remediación de Suelos señala que quienes resulten responsables de la contaminación de un sitio están obligados a reparar el daño causado. En caso del abandono de los sitios contaminados con residuos que se desconozca el propietario o poseedor del inmueble es la Secretaría en coordinación con las entidades federativas y municipios los responsables de ejecutar los programas de remediación del sitio. Dentro de la ley están señalados algunos procesos de tratamiento de sitios contaminados como la incineración, metodologías térmicas y co-procesamiento pero no están incluidos explícitamente los relacionados con procesos biológicos como la biorremediación, por lo que indica una falta de interés en el ordenamiento jurídico de este tipo de tecnologías a pesar de que es una de las más utilizadas por las empresas para descontaminar suelos.

Ley de Bioseguridad de Organismos Genéticamente Modificados (LBOGM)¹⁶

Creada en el año de 2005, tiene por objetivo regular las actividades de utilización confinada, liberación experimental, liberación en programa piloto, liberación comercial, comercialización, importación, y exportación de organismos genéticamente modificados con el fin de prevenir, evitar o reducir los posibles riesgos que estas actividades pudieran ocasionar a la salud humana o medio ambiente y a la diversidad biológica o a la sanidad animal, vegetal y acuícola. En el Título Primero, Capítulo II, *Principios en Materia de Bioseguridad*, Artículo 9, Fracción 12, se menciona:

¹⁶ Véase: shorturl.at/dEKQS

“Es necesario apoyar el desarrollo tecnológico y la investigación científica sobre organismos genéticamente modificados que puedan contribuir a satisfacer las necesidades de la Nación”.

En el Título Primero, Capítulo VI, *Del fomento a la investigación científica y tecnológica en bioseguridad y biotecnología*, el Artículo 28, fortalece los aspectos de la investigación en biotecnología al mencionar:

“El Ejecutivo Federal fomentará, apoyará y fortalecerá la investigación científica y tecnológica en materia de bioseguridad y de biotecnología a través de las políticas y los instrumentos establecidos en esta Ley y en la Ley de Ciencia y Tecnología. En materia de biotecnología, estos apoyos se orientarán a impulsar proyectos de investigación y desarrollo de innovación, formación de recursos humanos especializados y fortalecimiento de grupos e infraestructura de las universidades, instituciones de educación superior y centros publicación, que se lleven a cabo para resolver necesidades productivas específicas del país y que beneficien directamente a los productores nacionales”.

Es importante reconocer que, si bien en la Ley de Bioseguridad de Organismos Genéticamente Modificados existen mecanismos institucionales para incentivar la investigación científica, no se mencionan ni existen herramientas para dar continuidad a los proyectos de biotecnología hasta la escala industrial. En efecto, al analizar la LBOGM es posible identificar que la prioridad de su creación es dar legitimidad al uso de los transgénicos utilizados principalmente en el sector agrícola y la investigación sólo se incentiva de tal manera que puedan encontrarse mejores metodologías para asegurar su inocuidad al medio ambiente y a la salud de las personas. La aplicación biotecnológica en el medio ambiente es contemplada en la LBOGM como un efecto secundario negativo con impactos en el entorno, por lo tanto, se han delineado instrumentos burocráticos y se han dotado de capacidades a algunas instituciones para evitar los efectos de los transgénicos en la diversidad genética de los ecosistemas naturales. Sin embargo, la biotecnología ambiental, como se ha descrito con amplitud en este documento tiene varias aplicaciones sobre el medio ambiente que no pueden ser consideradas como efectos negativos puesto que están diseñadas para restaurar el entorno, por lo que el enfoque que tiene la LBOGM debe contemplar que cualquier injerencia humana en la dinámica ambiental tiene consecuencias

pero en ciertas situaciones de emergencia como una contaminación, es necesaria la tecnología a través de los transgénicos tomando en cuenta las evaluaciones de seguridad y de riesgos correspondientes.

Programa Nacional de Remediación de Sitios Contaminados (PNRSC) 2021-2024¹⁷

En el artículo 7 de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos se señala que es competencia de la federación elaborar el PNRSC con la SEMARNAT como la institución responsable de la publicación, ejecución y seguimiento del programa. En la actual administración federal, el programa ha surgido como una necesidad por alinear el Plan Nacional de Desarrollo (2019- 2024) y cumplir con los acuerdos de los convenios internacionales firmados por el Estado.

El PNRSC (2021-2024) se creó con los objetivos prioritarios de: *Fortalecer el Inventario Nacional de Sitios Contaminados (INSC), promover acciones de remediación en sitios contaminados para contribuir al bienestar de la población y fortalecer el marco normativo para la remediación de sitios contaminados*. El Programa a través de la SEMARNAT reconoce que existen en nuestro país barreras y dificultades para el acceso a la información ambiental, lo que obstaculiza las acciones que permiten resolver los problemas ambientales y de salud por la contaminación de suelos. Por tanto, para el Estado representa una necesidad de primer nivel la unificación de las bases de datos que se nutren en distintas instituciones ambientales sobre sitios contaminados de tal manera que sea posible conocer con mayor exactitud la cantidad de pasivos ambientales. Además, la difusión de la información contenida en el INSC fortalecido permitirá a la población, según el PNRSC, crear conciencia en la población sobre el impacto ambiental de distintas industrias contaminantes.

El segundo objetivo prioritario del PNRSC es promover acciones de remediación en sitios contaminados para contribuir al bienestar de la población, se plantea que no se ha logrado establecer el daño a la salud y ambiental como consecuencia de las moléculas contaminantes en los sitios por lo que el impacto sobre la población y el entorno puede alcanzar niveles alarmantes, especialmente en los sectores vulnerables. La SEMARNAT ha

¹⁷ Véase: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5634656&fecha=05/11/2021#gsc.tab=0

logrado la identificación de 232 sitios contaminados con diferentes químicos (pesticidas, metales tóxicos, hidrocarburos y colorantes) que no tienen un programa de remediación aprobado para el periodo 2008 y 2018, es decir, los sitios a los que se ha caracterizado la molécula contaminante pero el responsable de esta no ha realizado el procedimiento para obtener una resolución favorable y poder remediar el sitio. La mayoría de estos sitios sin programa de remediación pertenecen a los sitios afectados por las actividades industriales, de exploración, explotación y producción de hidrocarburos, volcaduras, tomas clandestinas, fugas, derrames e incendios. Datos del PNRSC indican que estos sitios representan una pérdida de valor ambiental económico de 10.7 millones de metros cúbicos, donde el territorio rural tienen mayor frecuencia de sitios contaminados que los territorios urbanos, sin contar la existencia de suelos contaminados en comunidades indígenas que no se ha logrado su caracterización y cuantificación. La estrategia elaborada por el Programa para el cumplimiento del objetivo prioritario número dos es promover acciones de remediación en sitios contaminados a través del mejoramiento de las evaluaciones de los inspectores de la SEMARNAT para lograr el cumplimiento de las Normas Oficiales Mexicanas y apoyar en la gestión y seguimiento de acciones de remediación de sitios contaminados en propiedad de entidades federativas y municipios. La SEMARNAT participará en la remediación de suelos cuando: *exista una declaratoria de un sitio contaminado abandonado; haya sido expropiado por causa de utilidad pública; se haya expedido una declaratoria de remediación por el Ejecutivo Federal; el sitio sea propiedad de alguna entidad federativa o municipio o haya sido ordenada la remediación por un laudo arbitral internacional* (Diario Oficial de la Federación, 2021).

Inventario Nacional de Sitios Contaminados (INSC)

El reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos establece que la elaboración del INSC es competencia de la SEMARNAT y de las autoridades locales que serán responsables de identificar, inventariar, registrar y categorizar los sitios contaminados con residuos peligrosos con el objetivo de determinar si es procedente su remediación. El Inventario Nacional de Sitios Contaminados se nutre con la información que proveen los responsables de la contaminación al incluir propuestas de remediación de las emergencias ambientales, pasivos ambientales, así como la conclusión

de los programas de remediación y autorizaciones. Recientemente ha surgido una necesidad de actualizar el INSC y unificar las bases de datos de diferentes instituciones de tal manera que la información de la situación contaminante en las entidades federativas y los municipios sea precisa. El proceso de actualización del INSC se resume a partir de las siguientes consideraciones; la revisión de las bases de datos que anteceden al Inventario Nacional para depurar la información duplicada; integrar los sitios contaminados de los que SEMARNAT tenga registro en otras bases de datos; integrar información de otras dependencias del Estado en materia ambiental e integrar información sobre sitios contaminados obtenidas de organismos de participación social, organismos internacionales e instituciones académicas.

Programas Nacionales Estratégicos de CONACYT: Agentes tóxicos y procesos contaminantes

Los Programas Nacionales Estratégicos del CONACYT, organizan los esfuerzos de investigación en torno a problemáticas nacionales concretas que requieren de una atención urgente y de una solución integral, profunda y amplia. Identifican un planteamiento, reúnen a los actores del sector público y privado para articular los esfuerzos de las capacidades científicas y tecnológicas que conduzcan a la solución del problema. Su objetivo central es sobre la caracterización de las causas de los problemas y encontrar las posibles soluciones (Conacyt, 2021).

El objetivo del PRONACES en agentes tóxicos es articular los esfuerzos del Estado para prevenir y revertir los impactos adversos de las actividades antropogénicas sobre los ecosistemas y la salud humana para desarrollar las capacidades de autogestión de las comunidades, fortalecer las capacidades educativas, tecnológicas y científicas en el ámbito de la toxicología como instrumento clave para incidir en la solución de problemas ambientales. Los temas centrales de los PRONACES agentes tóxicos y procesos contaminantes giran sobre el análisis de la relación entre la exposición a contaminantes y las enfermedades de alta prevalencia; el fortalecimiento de las capacidades cognitivas, organizativas, comunicativas, de cohesión y de negociación de las comunidades afectadas; definición de políticas públicas para garantizar la protección del medio ambiente; el diagnóstico de la capacidad de infraestructura analítica del país para realizar estudios

toxicológicos amplios, integrados y con metodologías sistematizadas; biomonitorio y salud ambiental; diseño de políticas públicas que permitan la regulación de procesos contaminantes y agentes tóxicos; manejo responsable de residuos sólidos y sitios de disposición final; y diagnósticos de riesgo socioambiental ocasionadas por industrias poco reguladas en México (Álvarez Buylla-Roces, 2019).

El arreglo institucional en nuestro país que incluye las reglas, normas, reglamentos, leyes y políticas ambientales se encuentran alineados para que las industrias no superen los niveles máximos de contaminación derivados de sus procesos, y sancionar en caso de que no cumplan con lo estipulado en las leyes, sin embargo, quedan problemas por resolver en la configuración institucional del régimen sociotécnico porque no se ha logrado mitigar ni generar incentivos para que a través de la tecnología e innovación puedan ser resueltos los problemas de contaminación, principalmente la remediación de los pasivos ambientales.

Como se ha mencionado, el número de sitios contaminados contabilizados como pasivos ambientales, es decir, los lugares que no se han logrado descontaminar y se han acumulado a lo largo del tiempo siguen en aumento, mientras que los sitios exitosamente remediados han disminuido, lo que sugiere que la capacidad de descontaminación de las empresas se ha detenido selectivamente o que existe una deficiencia institucional sobre quien debe adjudicarse la descontaminación de los pasivos ambientales cuando no existe claridad sobre la propiedad del sitio. La respuesta a esta interrogante fue resuelta al analizar el Programa Nacional de Remediación de Sitios contaminados donde se reconoce que una barrera para la aplicación de las metodologías descontaminantes por parte de las empresas ocurre durante la aprobación del proceso burocrático en la SEMARNAT. Esto crea una barrera institucional porque las empresas cada vez menos solicitan permisos para descontaminar.

El arreglo institucional que prevalece en nuestro país según la evidencia encontrada ha sido desarrollado con mayor consistencia durante la década del 2000 al 2010. Esto se debe a que la mayoría de las leyes sobre la protección, cuidado y preservación ambiental tuvieron su auge de creación durante esta época. Como se menciona en el anexo durante la entrevista realizada a la Dra. Refugio, una de las normas más importantes para regular los niveles de contaminación de suelos y que establece el procedimiento de descontaminación ideal según el tipo de suelos es la “NORMA Oficial Mexicana **NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012**,

Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación”. Esta norma es la única en su tipo que ha sido diseñada para el tratamiento de un contaminante como lo son los hidrocarburos que representa una medida establecida por el gobierno a través de la Procuraduría Federal del Medio Ambiente para la descontaminación de suelos.

El conjunto de leyes y normas que han sido desarrollados para regular la contaminación y remediar los suelos han obligado a las empresas privadas contaminantes y empresas productivas dependientes del estado a buscar soluciones de descontaminación para evitar sanciones impuestas por el gobierno. En el caso mexicano sobre la regulación en la contaminación de suelos, es posible entender la función del contexto institucional de dos maneras. La primera surge como una necesidad del gobierno por establecer los límites máximos que las industrias no deben rebasar al contaminar el suelo; si es superior al límite entonces estarán obligadas a resarcir el daño y dejar al suelo en el mismo estado inicial en el que se encontraba. La otra función que considero se ha desarrollado de forma indirecta es que el contexto institucional ha obligado a las empresas contaminantes a buscar tecnologías de descontaminación en otras empresas o en Centros Públicos de Investigación como el CINVESTAV para remediar los suelos. Sin embargo, la falta de políticas públicas orientadas a la búsqueda de nuevas tecnologías de descontaminación y particularmente su protección para que pueda alcanzar la aplicación en grandes cantidades de hectáreas contaminadas ha causado que los pocos proyectos que se han desarrollado dentro de los Centros Públicos de Investigación tengan un corto periodo de vida sin una aplicación industrial.

¿Cuál es el grado de relación que tiene el contexto institucional en el desarrollo del nicho de innovación sustentable de biotecnología ambiental? Es una pregunta que ha surgido a medida que he recolectado evidencia empírica y que parece estar relacionada con el nicho de innovación de esta investigación. Como se abordará más adelante con mayor profundidad, en algunos artículos de investigación sobre biotecnología ambiental en la biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos publicados por investigadores mexicanos, es frecuente el uso de la **NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012** como parte de la justificación para la búsqueda de soluciones científicas para la descontaminación de suelo.

Esto es un dato interesante porque hasta el momento no se han encontrado artículos de investigación financiados por empresas de forma aislada ni en colaboración, sino por Universidades y Centros Públicos de Investigación, lo que sugiere que el impulso de la producción científica en biotecnología ambiental se debe a que los investigadores han identificado a los pasivos ambientales como un problema grave.

El arreglo institucional tiene diferentes características en función de las alteraciones sociales, económicos y políticos que motivan cambios profundos o superficiales dentro de su estructura. En el caso del arreglo institucional sobre la biotecnología ambiental aplicada para la remediación de suelos contaminados por hidrocarburos se han descritos distintas leyes y normas que rigen las actividades de los actores u organizaciones contaminantes y la manera en que se deben llevar a cabo los procedimientos de la descontaminación. Sin embargo, la existencia de un arreglo institucional no asegura que se hayan logrado disminuir el número de pasivos ambiental ni se han incentivado nuevas tecnologías para la descontaminación de estos sitios.

Las presiones que se ejercen sobre el arreglo institucional pueden ser de distintas fuentes, por ejemplo, en el caso de las leyes de tránsito de la Ciudad de México y su aplicación en los conductores, el arreglo institucional para el tránsito vehicular de la CDMX ha recorrido hasta la fecha distintos procesos de cambios motivados por presiones sociales y de daños a la salud. Fue el caso del aumento de los accidentes automovilísticos y los decesos ocasionados por estos y la presión de distintos grupos de la sociedad lo que provocó que el gobierno impulsara reformas y modificaciones en el arreglo institucional para aumentar las sanciones a los infractores y que le permitiera al gobierno acceder a las facultades necesarias para el cumplimiento de las leyes y normas. De estas presiones y cambios en el arreglo institucional del tránsito vehicular en la CDMX en coordinación con políticas públicas integrales y específicas se logró disminuir los accidentes causados por el uso del celular y el abuso del alcohol.

El ejemplo anterior es útil para entender que existen presiones externas e internas que afectan al arreglo institucional de la misma manera que sucede en el régimen sociotécnico y que desencadenan cambios complejos o sencillos en las leyes y normas. Además, para que los nuevos cambios puedan resolver los problemas que ocasionan las presiones externas e

internas en el arreglo institucional deben instrumentarse otros mecanismos que forman parte del Estado. En los problemas ambientales, como se ha mencionado, el Estado debe tener un papel central para resolverlos porque las consecuencias de los problemas ambientales afectan a toda la población con impactos más profundos en los sectores económicos y sociales bajos. El Estado entonces debe tener la capacidad de contar con herramientas para lograr la aplicación de las leyes y normas y conducir un conjunto de políticas públicas ambientales integrales con el objetivo de evitar la contaminación de suelos, castigar y sancionar a las organizaciones contaminantes y disminuir el número de pasivos ambientales. La presión que ejerce la contaminación del suelo tuvo su auge en el sector académico hace algunos años, pero ha perdido fuerza al dejar de ser el centro de interés del gobierno y empresas para descontaminar los suelos; esto puede comprobarse al observar la “Gráfica 4, *Evolución de los procedimientos autorizados por tipo y año*” donde se ha encontrado que el número de procedimientos y metodologías de descontaminación solicitadas por las empresas se han reducido en los últimos años y que ha encontrado existen barreras burocráticas dentro de las instituciones ambientales que limitan la búsqueda de nuevas metodologías.

5.3 Convenios internacionales en materia ambiental

El Estado Mexicano ha firmado 72 tratados internacionales vinculados en materia del medio ambiente entre los principales son:

- Convención marco de las Naciones Unidad sobre el Cambio Climático.
- Protocolo de Kyoto a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.
- Acuerdo de París.

Respecto a la contaminación de suelos por diferentes químicos, nuestro país ha firmado y ratificado para la contaminación de los derivados de los pesticidas (Contaminantes Orgánicos Persistentes), el Convenio de Estocolmo en el 2004 y para proteger la salud humana y el medio ambiente de las emisiones y liberaciones antropogénicas del mercurio el Convenio de Minamata en el 2015. Para el caso de la contaminación por hidrocarburos, México ratificó:

- Convenio Internacional relativo a la intervención en alta mar en casos de accidentes que causen una contaminación por hidrocarburos, en el cual las partes firmantes podrán tomar las medidas necesarias para prevenir, mitigar o eliminar todo peligro grave contra su litoral o intereses debido a la contaminación o amenaza de contaminación de hidrocarburos resultado de un accidente marítimo.
- Convenio Internacional sobre cooperación, preparación y lucha contra la contaminación por hidrocarburos de la Organización Marítima Internacional que tiene cuatro objetivos, el compromiso de los Estados para actuar con prontitud y eficacia a fin de reducir al mínimo los daños que puedan derivarse de un suceso de contaminación por hidrocarburos, promover la cooperación internacional en cuestiones de intercambio de información con respecto a la capacidad de los Estados para luchar contra los sucesos de contaminación por hidrocarburos, mantener la investigación y desarrollo en relación con los medios de lucha contra la contaminación por hidrocarburos en el medio marino y facilitar la cooperación internacional en la asistencia mutua a escala mundial y servir también para reforzar los acuerdos regionales existentes (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 1990).

Derivado de los últimos sucesos de lento crecimiento económico en el mundo, el aumento de las desigualdades sociales y el impacto ambiental de origen antropogénico en 2015 fue aprobada la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible por la Asamblea General de las Naciones Unidas, como una guía de referencia para los 193 Estados Miembros para lograr avances en la esta década hacia la sostenibilidad económica, social y ambiental. Para lograr el cumplimiento de la Agenda 2030, se desarrollaron 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) para ayudar a los países miembro a analizar, formular y alcanzar la nueva visión de desarrollo sostenible.

Una de las principales características que tiene la Agenda 2030 es que plantea una visión ambiciosa de desarrollo sostenible que integra no solamente a los gobiernos de los Estados Miembros, sino incluye a un gran número de actores de la sociedad civil, investigadores, académicos y del sector privado para lograr un cambio en el estilo de desarrollo actual.

Para cumplir con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, el gobierno de México ha implementado diversos instrumentos que permiten el fortalecimiento de la Agenda 2030. Por mencionar los más importantes, por mandato presidencial se creó el Consejo Nacional de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, que coordina las acciones necesarias para el cumplimiento de los ODS, a este consejo pertenecen actores de la Oficina de la Agenda 2030 de la Secretaría de Economía, Secretarías de Estado, Gobiernos Subnacionales, Sociedad Civil, Sector Privado, Sector Académico y Organizaciones Internacionales como la Cepal.

El mecanismo de gobernanza del Consejo Nacional de la Agenda 2030 reconoce la participación de distintos actores cuyas actividades conducentes están plasmadas en la publicación en el 2019 de la Estrategia Nacional de la Agenda 2030 para la planeación y desarrollo de las acciones necesarias para cumplir con la Agenda 2030. Derivado de la Estrategia Nacional, fue reconocida la necesidad de actualizar y modificar los ordenamientos jurídicos para impulsar la implementación y difusión de los ODS. Por esta razón, la Cámara de Diputados creó el Grupo de Trabajo para la Agenda 2030 que tiene como función presentar propuestas para fortalecer el arreglo institucional hacia el desarrollo sostenible. A través del análisis del contexto económico, social y ambiental el Grupo de Trabajo elaboró una metodología con ayuda de diferentes actores de la sociedad civil, de cooperación internacional y de la academia para generar información e insumos que permita legislar con un enfoque dirigido a los ODS. De esta manera, se publicó la Estrategia Legislativa para la Agenda 2030 de la Cámara de Diputados donde se presentan algunos hallazgos encontrados por la metodología del Grupo de Trabajo, como la urgencia por legislar desde una perspectiva amplia e integral, bajo los principios del desarrollo sostenible, la indivisibilidad, la transversalidad y la universalidad (Cámara de Diputados, 2020).

Respecto a la contaminación de suelos por hidrocarburos, no se ha encontrado de manera específica algún convenio o protocolo que se haya ratificado por nuestro país. Los compromisos que ha adquirido México en los temas ambientales son de carácter general y en pocos casos de forma específica, lo que abona que el abordaje para la solución de estos problemas en México se siga careciendo de vinculación institucional internacional. En el

caso de los ODS sucede una situación similar, las metas y los alcances de la Agenda 2030 es muy amplia y su relación con la descontaminación de suelos dañados por los hidrocarburos es superficial. La meta 15.3 de los ODS, establece que “*De aquí a 2030, luchar contra la desertificación, rehabilitar las tierras y los suelos degradados, incluidas las tierras afectadas por la desertificación, la sequía y las inundaciones y procurar lograr un mundo con efecto neutro en la degradación de las tierras*”. Según la Estrategia Legislativa para la Agenda 2030 de la C. de Diputados, el cumplimiento de los objetivos debe orientarse a recuperar la productividad de los ecosistemas y de las actividades económicas primarias, sin embargo, recientes modificaciones al arreglo institucional han tenido poco impacto por lo que se debe fortalecerlas anteponiendo la vinculación internacional. Existen múltiples factores que pueden incidir en el equilibrio químico, biológico y ambiental de los suelos, desde alteraciones propias de las dinámicas de la naturaleza, hasta las que son de origen antropogénico, por lo que dependiendo de la causa deben crearse mecanismos específicos de recuperación de los suelos, principalmente destinados a las actividades forestales y agropecuarias. Es decir, la remediación puede entrar dentro del catálogo de metodologías para la recuperación de los suelos, pero solamente que hayan sido contaminados por alguna actividad o accidente industrial.

Sobre el ODS número 9 *Industria, Innovación e Infraestructuras*, la ONU reconoce que es necesario un cambio en el actual modelo de industrialización de los países en vías de desarrollo hacia una industrialización inclusiva y sostenible. Para lograr este nuevo modelo, es necesario la introducción de nuevas tecnologías, facilitar el comercio internacional y permitir el uso eficiente de los recursos. En este sentido, la innovación y el progreso económico son claves para la solución de los problemas y resolver los desafíos económicos y medioambientales. En México, el desarrollo de innovaciones sustentables debe, además, de estar dirigida a mitigar los daños ambientales por la contaminación de los desechos de los agentes químicos y aplicarse en cada paso de los procesos productivos de la actividad industrial. Sin embargo, el origen de las distintas fuentes de contaminación es multicausal, por lo que la aplicación de la ciencia y tecnología debe contemplar en cada caso las mejores formas de hacer más eficientes los procesos productivos o incidir en la creación de herramientas de descontaminación.

5.4 Nivel de desarrollo del nicho de innovación sustentable de biotecnología ambiental

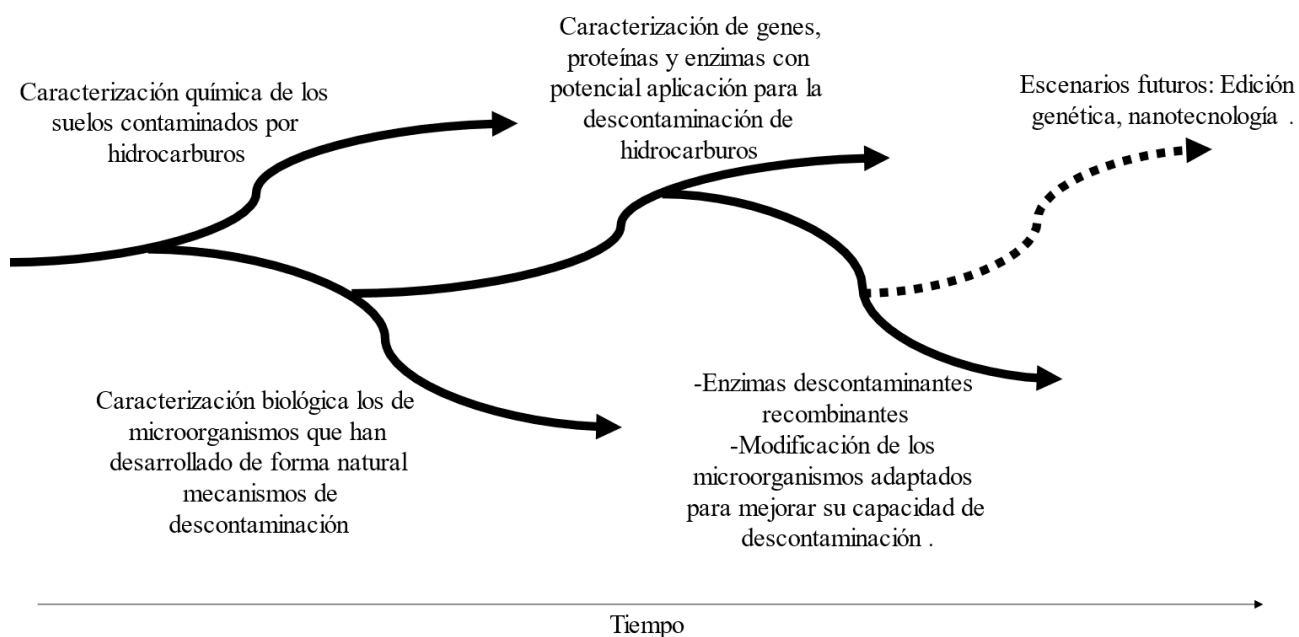
Para que el nivel de desarrollo del nicho de innovación sustentable sea adecuado es necesario que cumpla con ciertos criterios que indican si el nicho puede transitar al régimen sociotécnico cuando se abren ventanas de oportunidad. Como se ha descrito, existen universidades como la UNAM, UAM e IPN; Instituciones de Investigación como el Instituto de Biotecnología, el Instituto Mexicano del Petróleo y Centros Públicos de Investigación como el CINVESTAV que concentran la producción académica sobre la biotecnología ambiental para la remediación de suelos contaminados por hidrocarburos y son categorizados como los actores del nicho en esta investigación. Esto se debe a que los investigadores dentro de estas instituciones constituyen un grupo que a través de su investigación y monitoreo del entorno han identificado como un problema grave la contaminación de suelos contaminados por los hidrocarburos.

El uso de la biotecnología como solución para la descontaminación tiene algunas implicaciones. Su desarrollo necesita ser altamente específico, es decir, debe desarrollarse a un *blanco* molecular por lo que una metodología de remediación dirigida a una molécula contaminante de hidrocarburos no puede ser utilizada en otra molécula. En esta investigación no se analiza al “universo” de producción científica sobre biotecnología ambiental porque excede los alcances de los objetivos planteados, sin embargo, en el escenario del contexto nacional la evidencia demuestra que, si bien las metodologías y procedimientos de remediación biotecnológicos son diferentes entre sí, los investigadores pueden transitar y cambiar fácilmente entre cada tipo de investigación biotecnológica.

La biotecnología ambiental como un conjunto de conocimientos que forman parte de la ciencia básica y de las ciencias aplicadas contiene un conjunto de herramientas metodológicas que le permiten modificar a los organismos vivos para obtener insumos industriales, por ejemplo, para obtener la insulina hace tiempo era necesario utilizar a los caballos alimentados con grandes cantidades de azúcar para después extraerles el suero de la sangre y purificar la insulina para ser utilizada en pacientes diabéticos. Este procedimiento era muy costoso y poco eficiente, inaccesible para la mayor parte de personas dependientes de la insulina hasta que fue sustituido por un mejor proceso de obtención de la insulina con herramientas biotecnológicas. En la biotecnología ambiental el

proceso es similar; a través de estudios en ciencia básica que incluyen a la biología molecular y bioinformática se analizan a las enzimas que tienen la capacidad de biodegradar a las moléculas contaminantes en derivados inocuos como el CO₂. Dichas enzimas que forman parte de bacterias y hongos pueden ser “fabricadas” en los laboratorios una vez que se conocen a los genes encargados de producirlas. Estos genes asociados con potencial industrial son introducidos en las bacterias en entornos controlados para que puedan aprovechar su maquinaria biológica y produzcan las enzimas que tendrán función de degradación descontaminante. Este proceso de obtención de enzimas es conocido como la expresión de proteínas recombinantes y es una herramienta muy importante dentro de la biotecnología por su aplicación. Existen otras herramientas metodológicas que forman parte del catálogo de la biotecnología como la caracterización de las estructuras moleculares de las enzimas, genes y el entorno fisicoquímico contaminante. Además, se han hecho importantes avances para la caracterización de las bacterias y hongos que se han reportado que proliferan en los sitios contaminados con hidrocarburos por lo que se han elaborado estudios para modificar la expresión genética y mejorar la eficiencia de la maquinaria metabólica de estos microorganismos.

El conjunto de herramientas biotecnológicas que están a disposición de los investigadores para crear conocimiento sobre nuevos métodos de descontaminación forma parte de un proceso evolutivo y un escalamiento hasta la innovación para poderlos aplicar a nivel industrial. Como se muestra en la Figura 8, los diferentes avances científicos y su aplicación biotecnológica tienen -según la evidencia empírica- características evolutivas, donde algunos proyectos de investigación se detienen y terminan en alguna de las fases, mientras que muy pocas investigaciones logran avanzar hasta la aplicación. Además, en cada una de las fases hasta el desarrollo consolidado del nicho existen barreras institucionales y económicas que los investigadores e instituciones deben superar para poder llegar a la aplicación biotecnológica. Por ejemplo, una gran cantidad de artículos de investigación en México sobre biotecnología ambiental se han enfocado a la caracterización química de los suelos, biológica de los microorganismos y molecular de genes, proteínas y enzimas. Si bien estas investigaciones de caracterización son importantes porque forman parte de la base del conocimiento aplicado, es necesario que el impulso de estas investigaciones sea constante hacia la aplicación industrial.

Figura 8. Desarrollo evolutivo de las herramientas biotecnológicas ambientales en México.

Fuente: Elaboración propia.

En México, el panorama de la producción académica de la biotecnología ambiental ha tenido importantes avances para la descontaminación de diferentes agentes contaminantes, por mencionar algunos casos, la Dra. Carolina Peña Montes del Tecnológico Nacional de México desarrolló una metodología para la expresión en bacterias *Escherichia coli*, de los genes asociados con las cutinasas que son enzimas degradadoras de diferentes poliésteres sintéticos derivados de los plásticos.

Otro caso, es el de la Dra. Refugio Rodríguez Vázquez investigadora del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN en el Departamento de Biotecnología y Bioingeniería que ha centrado sus líneas de investigación en la generación de conocimiento sobre la caracterización química de los entornos contaminados y molecular de los genes y enzimas con potencial aplicación en la biorremediación como se muestra en la entrevista en la sección de los Anexos de esta investigación. Unos de sus proyectos que ha alcanzado la aplicación industrial es la biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos por cultivo sólido con la adición de residuos cítricos con la aplicación de grano de café, que fue patentado en el 2011. A través de esta metodología, la Dra. Refugio en colaboración con el CINVESTAV logró la recuperación de 35 mil toneladas de suelo excavado en la exrefinería

18 de marzo y obtuvo el Premio al Mérito Ecológico otorgado por la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales en el 2018.

Ambos ejemplos demuestran que los proyectos locales sobre biotecnología contenidos en el nicho han sido desarrollados principalmente por investigadores con presupuesto público y que las empresas tienen poca o nula participación en el desarrollo de estos proyectos.

Como se ha mencionado en el capítulo del marco teórico, para que el desarrollo del nicho de innovación sustentable pueda aprovechar las ventanas de oportunidad que se presentan debe contar con características particulares de estado consolidado. En los nichos de biotecnología ambiental para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos y de acuerdo con la evidencia estas son:

1. Las **redes e interacciones** entre actores y organizaciones con roles multidisciplinarios que permiten la estimulación y convergencia de ideas en la búsqueda de nuevas metodologías de descontaminación. Los principales actores que se han identificado son los investigadores que pertenecen a los departamentos de biotecnología y bioingeniería. La interacción que han desarrollado los actores ha sido principalmente de forma cerrada entre investigador-investigador, de universidades públicas y CPI. La información obtenida en los artículos de investigación ha permitido observar que las empresas tienen una participación baja en la generación de conocimiento de biotecnología ambiental que se utiliza en la producción económica, esto se contrasta con la evidencia encontrada con la disminución de la cantidad de solicitudes presentadas ante SEMARNAT para la biorremediación de suelos, lo que indica que las empresas han visto reducido su papel en la descontaminación de suelos, incluso como elementos centrales en el régimen sociotécnico. Las redes establecidas entre los nichos de innovación sustentables tienen importancia porque el desarrollo de la biotecnología ambiental es permeable en la solución de la descontaminación de diferentes moléculas, esto permite que los investigadores puedan transitar entre diferentes metodologías biotecnológicas. La transición entre metodologías biotecnológicas se debe a que la experiencia (*expertise*) de los investigadores los ha dotado con capacidades para

abordar los problemas de diferentes moléculas contaminantes utilizando el mismo conocimiento que han adquirido.

Esta transición de los investigadores entre las metodologías de remediación en diferentes contaminantes a lo largo del tiempo tiene consecuencias en el desarrollo del nicho. Según se ha encontrado en la evidencia empírica, los investigadores han desarrollado, concentrado, aglutinado y centralizado amplio conocimiento sobre biotecnología ambiental en México durante los últimos veinte años.

2. Las **expectativas y visiones** de los usuarios, investigadores y grupos de interés sobre la biotecnología ambiental para la remediación de suelos contaminados por hidrocarburos. Es decir, el nivel de confianza que tienen en la biotecnología y su capacidad para convertirse en una nueva metodología de descontaminación de suelos. La biotecnología ambiental ha comenzado a desarrollarse como nicho de innovación sustentable en universidades y centros públicos de investigación por sus cualidades como una alternativa económica y de bajo impacto ambiental una vez que ha alcanzado la escala de aplicación industrial. Además, el desarrollo de la biotecnología ha tenido en los últimos años a nivel mundial un crecimiento sostenido por su amplio espectro de aplicación en diversas industrias, lo que la hace un campo de investigación atractivo para investigadores y empresas. Sin embargo, es conocida la reputación de la biotecnología en el sector agroalimentario donde el debate político y social sobre su uso sigue siendo controvertido. Por esta razón, la Ley de Bioseguridad de Organismos Genéticamente Modificados se encuentra orientada a regular el uso de los transgénicos y evitar su impacto negativo en el ambiente y la salud de las personas, lo que agrega barreras burocráticas e institucionales a su aplicación en distintos sectores porque debe garantizarse su inocuidad. El uso de los transgénicos como una herramienta de la biotecnología ambiental no se encuentra exento del debate, por lo que es posible que su aplicación por parte de empresas interesadas en utilizar la biotecnología en la remediación de suelos pueda verse mermada.

Una de las razones por las cuales se ha desarrollado la investigación biotecnológica sobre los transgénicos es por las pocas o nulas barreras institucionales que existen, al ser considerados como parte de las aplicaciones confinadas, pero al alcanzar la

escala comercial es necesario cumplir con los criterios delimitados en la LBOGM al considerarse una liberación al medio ambiente.

3. La generación de **conocimientos y aprendizaje sobre biotecnología ambiental** donde se ha logrado identificar a partir del análisis de los artículos de investigación y en las patentes del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial. Si bien tiene similitudes con la primera característica del nivel de desarrollo que tiene el nicho de innovación sustentable, las redes formadas por investigadores son las únicas que se han encontrado sobre biotecnología ambiental. Esto señala el papel que tienen los investigadores e instituciones de investigación para la creación de interacciones y, además, en la formación de conocimiento y aprendizaje sobre la biotecnología ambiental.
4. Una característica adicional que define el nivel de desarrollo del nicho de innovación que proponemos en la teoría es la **participación y la capacidad que tiene el Estado** para crear incentivos para el uso de tecnologías verdes por las industrias. Como se ha observado, las empresas tienen intereses limitados para disminuir el impacto ambiental por sus actividades, lo que ha causado un surgimiento de leyes y normas para evitar el aumento de los niveles de contaminación. Sin embargo, los cambios en el arreglo institucional han sido deficientes en el caso estudiado, al no observarse resultados en la disminución de la cantidad de los pasivos ambientales. Además, la implementación de estos cambios no ha venido acompañada de incentivos económicos para que las empresas busquen nuevas metodologías de descontaminación, lo que ha provocado escasez en la variedad de opciones utilizadas en la remediación de suelos.

Utilizando como referencia la Tabla 2 del Capítulo 2 para identificar el nivel de desarrollo del nicho de innovación basado en la biotecnología, es posible explicar a través de la evidencia que éste se encuentra en un nivel proto-nicho y existe un proceso de presión desde el paisaje acompañado con cambios disruptivos por el aumento de la contaminación de los suelos.

El análisis de los artículos de investigación permitió establecer una aproximación de los elementos que conforman a los actores que son pioneros en desarrollar proyectos que

incorporan a la biotecnología en la biorremediación a través de la investigación científica, pero su colaboración e interacciones con otros actores como las empresas e instituciones de gobierno son nulas, por lo tanto la red que se ha encontrado es pequeña y poco sólida que de mantenerse en esas mismas condiciones puede ser proclive al desmantelamiento por la falta de inversiones privadas y públicas. Esta información se comprobó al analizar las patentes realizadas en el IMPI sobre proyectos que han logrado incorporar a la biotecnología en la biorremediación donde se demuestra la poca participación de las empresas.

En la Tabla 7 se muestran las características endógenas y exógenas del nicho de innovación de biotecnología que hemos encontrado durante la investigación. Como se ha mencionado, por la categorización propuesta en la Tabla 2, concluimos que el nicho se encuentra en una etapa embrionaria porque cuenta con redes pequeñas que no les ha permitido alcanzar los diseños dominantes. Según el enfoque de la Gestión Estratégica de los Nichos de Innovación, para garantizar que el nivel de los nichos pueda seguir escalando hasta un estado consolidado es necesario la creación de estrategias tanto de las empresas y del gobierno con el objetivo de proteger al nicho. Sin embargo, como se ha encontrado en la investigación no existen condiciones institucionales o económicas que favorezcan la protección del nicho, sino al contrario existen barreras que impiden su consolidación y la difusión de nuevas tecnologías en el régimen sociotécnico.

El arreglo institucional, el conjunto de instituciones de gobierno y sus actividades burocráticas han recibido especial atención durante esta investigación porque son los elementos constitutivos y herramientas que dotan de responsabilidad del Estado para asegurar un medio ambiente limpio para todos los individuos de la sociedad. Por esta razón la aplicación del enfoque de los sistemas sociotécnicos tiene diferencias respecto a las investigaciones anteriores realizadas en las transiciones históricas donde las capacidades tecnológicas, humanas y financieras de las empresas son los pilares que condicionan el desarrollo de las innovaciones. En las transiciones sustentables, las empresas tienen un interés limitado para el desarrollo y difusión de las innovaciones sustentables que se traduce en un régimen con tecnologías dominantes y características no sustentables que pondrán resistencia a la entrada en su mercado de tecnologías sustentables.

Lo anterior supone diferentes desafíos para la sociedad y gobierno que debe ser entendido al margen de las condiciones propias de los países en vías de desarrollo. Por mencionar algunas preguntas que abonan a la reflexión del tema:

1. ¿El Estado debe ser el encargado de desarrollar y gestionar a los nichos de innovación para que alcancen un nivel de desarrollo consolidado?
2. Si existen características no sustentables entre la configuración del régimen ¿Será deber del Estado desincentivar las tecnologías y prácticas no sustentables?
3. ¿Las innovaciones incrementales solamente surgen dentro del régimen sociotécnico?

Las primeras dos preguntas son importantes para la discusión y pueden ser contestadas a través del enfoque de la gestión de los nichos y se han confirmado con la evidencia donde la ausencia del papel regulador y desarrollador del gobierno ha causado que el nicho se mantenga en un estado de proto-nicho. Si bien el proceso por el que tienen que escalar los nichos desde su etapa embrionaria hasta el estado consolidado requiere de una gran cantidad de inversión económica y de tiempo, debería de esperarse algún indicio de impulso (*momentum*) como ha sucedido en otros países.

Sobre la tercera cuestión que surgió como parte de la evidencia encontrada, es necesario entrar a la discusión acerca de las condiciones, capacidades económicas, científicas y tecnológicas y arreglos institucionales que conforman de los países desarrollados y han funcionado como incubadoras del desarrollo de los distintos conceptos de los sistemas sociotécnicos y las transiciones sustentables. En primera instancia, la información disponible para realizar análisis entre los países desarrollados es abundante y confiable, mientras que en México el número de empresas que utilizan biotecnología ambiental para la biorremediación es desconocida incluso por las instituciones de gobierno¹⁸. Esta falta de certidumbre y profundidad de los datos en materia ambiental representan dificultades para establecer con seguridad el nivel de desarrollo de todo tipo de innovación.

¹⁸Con el objetivo de encontrar información adicional a la encontrada en las bases de datos de la SEMARNAT, se realizó una consulta vía transparencia en el portal del INAI para identificar a las empresas que cuentan con permisos para utilizar la biotecnología ambiental. Los resultados obtenidos fueron poco útiles y redundantes para la investigación.

Además, la falta de vinculación entre las empresas, universidades y gobierno en nuestro país es un fenómeno constante que condiciona y obstaculiza la emergencia de innovaciones. Sobre esto, Casalet (2012) menciona que los esfuerzos encaminados a desarrollar las capacidades de innovación en nuestro país han surgido desde hace décadas, aunque de forma discontinua, en una relación que se caracteriza por la descoordinación de las acciones y los pocos incentivos que existen acentúan la dispersión de los recursos, más que la efectividad y los impactos en las colaboraciones. Esto es relevante porque sugiere que en nuestro país no existen los factores que propicien el escalamiento del tipo de innovación radical, proliferando en mayor medida las innovaciones incrementales. En los países desarrollados es posible delimitar la frontera de los diferentes tipos de innovación entre los diferentes niveles del sistema sociotécnico. Sin embargo, en países en vías de desarrollo como nuestro país, el proceso para delimitar el lugar en donde emergen las innovaciones radicales e incrementales representa un reto.

Como se ha mencionado, existe una cantidad menor de artículos de investigación que han comenzado a explorar el tema de la biotecnología en el campo de la caracterización de las estructuras biológicas de los organismos vivos y la composición química de los suelos. También se encontró un conjunto mayor de artículos de investigación cuyas palabras clave están orientadas a la motivación que tienen los investigadores por las normas oficiales mexicanas y nuevas formas de optimizar los procesos de biorremediación, es decir, en los últimos años la orientación de la actividad científica parece estar girando hacia la biotecnología. Al primer conjunto de artículos se alineó con los nichos de innovación por su relación directa con la biotecnología, mientras que el segundo conjunto corresponde al régimen sociotécnico por estar propiciando la eficiencia de una metodología de biorremediación ya existente.

Es posible que por la falta de incentivos y de condiciones económicas e institucionales los elementos del nicho nunca alcancen a converger en innovaciones radicales, proliferando en el sistema sociotécnico las innovaciones incrementales. A pesar de que es necesaria más información para demostrar el punto anterior, podemos aproximarnos a la antesala de la realidad observando los resultados de la entrevista a la Dra. Refugio. En este caso en particular, el artículo y patente desarrollados por investigadores del CINVESTAV han

logrado alcanzar un grado de escalabilidad temporal a través de proyectos de colaboración con empresas e instituciones de gobierno, pero el uso de la biotecnología no es del todo extendido¹⁹, es decir, las aportaciones de los investigadores están dirigidas a la optimización de la biorremediación.

La problemática anterior se resuelve al entender los artículos de investigación no necesariamente conducen al aumento de número de patentes, e incluso no todas las patentes pueden ser utilizadas en forma de innovaciones en el mercado. Y que, con los datos encontrados, ninguno de los artículos de investigación puede ser catalogado como precursor de las innovaciones radicales (puesto que no existen hasta el momento) por lo que su asignación dentro del régimen o nicho de innovación en esta investigación más bien obedece a su cercanía con el desarrollo de la biotecnología.

Los datos que se han obtenido de la actividad científica y de propiedad intelectual son el resultado de una propuesta única (ante la falta de información actualizada y precisa sobre la biotecnología ambiental) para categorizar el nivel de desarrollo del nicho de innovación de la investigación. Además, ante la falta de innovaciones radicales en el sistema sociotécnico de biotecnología es posible que podamos encontrar innovaciones incrementales en el nicho de innovación como los proyectos de optimización de la biorremediación desarrollados por el CINVESTAV. Esta postura sobre las innovaciones incrementales en el nicho de innovación debe ser discutida al margen de las condiciones endógenas que tiene cada país, por lo tanto, en el enfoque sociotécnico y su aplicación como metodología para describir las transiciones históricas funciona la delimitación de las fronteras de los tipos de innovación entre los diferentes niveles, mientras que en países como el nuestro es posible que el surgimiento de las innovaciones incrementales sea multinivel (régimen o nicho).

Tabla 7. Nivel de desarrollo del nicho de innovación relacionado con la biotecnología.

¹⁹ Según la *Fórmula 1* utilizada en la metodología, entre los resultados obtenidos se encuentra la publicación de la Dra. Refugio dentro los artículos de investigación que desarrollan biotecnología, es decir, forma parte del nicho de innovación.

Nivel del Nicho	Características endógenas	Características exógenas
Estado proto-nicho/E2: Cambios y presiones	• Concepción de las innovaciones. Se ha identificado entre los investigadores a la biotecnología como una innovación potencial para mejorar la eficacia de la biorremediación. • Creación de ideas. Los proyectos de investigación y patentes de biotecnología ambiental han adquirido interés entre algunas organizaciones como lo demuestra la red de palabras clave. • Dispersión geográfica de los elementos del nicho. Los sitios contaminados en las entidades tienen similitudes con el uso de tecnologías tradicionales con las empresas (régimen) pero no con el nicho. • Poca interacción entre los elementos. Las redes de interacción identificadas están centralizadas e incluyen a universidades, instituciones de investigación y centros públicos de investigación, pero no incluyen empresas y entidades gubernamentales. • Expectativas y visiones débiles. La confianza de los actores en el uso de la biotecnología es débil por su incertidumbre dentro del arreglo institucional. Esto incide en que los desarrolladores de la innovación tengan dificultades para encausar sus actividades hacia diseños dominantes.	• Presiones afectan la estabilidad del régimen. El aumento de los pasivos ambientales de los sitios contaminados por hidrocarburos a causa de accidentes en las refinerías o la perforación de los ductos. • Cambios y presiones en el sistema. Las presiones del ambiente y de algunas organizaciones internacionales han motivado reconfiguraciones como los cambios en las leyes. • Incapacidad del régimen por adaptarse. Las empresas y los procedimientos institucionales han sido incapaces de reducir el número de pasivos ambientales. El intento de adaptación más notorio son las innovaciones incrementales encontradas en la entrevista con la Dra. Refugio. • El arreglo institucional se modifica. A medida que se encontraron cambios en el entorno derivado de la actividad industrial se modificaron y crearon leyes para regular la emisión de contaminantes por parte de las empresas. Sin embargo, se encontraron ambigüedades en el arreglo institucional lo que sugiere un mal funcionamiento. • Apertura de las ventanas de oportunidad. La inestabilidad del régimen y su falta de adaptación al cambio ha abierto oportunidades para el nicho.

5.5 Barreras institucionales para el desarrollo del nicho de innovación sustentable

El desarrollo y aplicación de un nicho de innovación sustentable de biotecnología ambiental para la remediación de suelos contaminados por hidrocarburos en una nueva metodología de descontaminación deberá superar no solamente las barreras económicas y de incentivos del nivel micro del enfoque sociotécnico, sino las barreras institucionales levantadas por el paisaje sociotécnico. Se han descrito hasta el momento los problemas que persisten en el arreglo institucional de leyes y normas ambientales al carecer de certidumbre cuando un sitio contaminado no se ha logrado identificar al responsable de la contaminación y la incapacidad operativa, científica y tecnológica que tienen las entidades federativas y municipios por remediar estos sitios. La razón de la disminución de solicitudes presentadas ante la SEMARNAT por parte de las empresas para la descontaminación de suelos puede encontrarse en las barreras burocráticas durante el proceso y la falta de políticas ambientales que consideren a la ciencia y tecnología como parte fundamental para la solución a los problemas de la contaminación.

El arreglo institucional nacional e internacional antepone el derecho a un medio ambiente limpio para todas las personas, por lo tanto, el Estado tiene una función central para lograrlo. Esto es porque las empresas no tienen ningún incentivo para participar en la restauración ambiental debido que su objetivo será la búsqueda de la maximización de sus ingresos. Cuando el arreglo institucional, obliga a las empresas a cumplir con una normatividad de límites máximos de emisión o desechos de los contaminantes, estas buscarán la manera de evitar las sanciones económicas. Con este propósito, los procesos de producción, transporte, almacenaje deben adecuarse para reducir al máximo su impacto ambiental.

En la mayoría de las industrias contaminantes, los desechos químicos que se generan durante los procesos productivos pueden disminuirse al implementar mejoras a través de las innovaciones. Sin embargo, en el caso de nuestro país, la contaminación por hidrocarburos y sus derivados en los suelos no solamente derivan de los desechos por la actividad industrial, también se ha encontrado que el aumento de los pasivos ambientales está ocasionado por los accidentes de tránsito de las pipas cisterna de combustible y la perforación intencional o accidental de los ductos de gasolina. Por lo tanto, las causas que

provocan la contaminación de hidrocarburos son de origen multifactorial, lo que debería condicionar la respuesta que tiene el Estado respecto a su prevención, mitigación y remediación.

La participación del Estado, según la evidencia encontrada se centra en hacer cumplir a las empresas los límites máximos permisibles con sanciones a través de inspectores de la SEMARNAT y de la ASEA; identificar a las empresas que han sobrepasado los límites de contaminación, crear bases de datos sobre las emergencias y pasivos ambientales y la generación y el mantenimiento del capital humano altamente especializado como lo son los investigadores en biotecnología ambiental. Sin embargo, es posible señalar que existe una ausencia del Estado en el fortalecimiento de las leyes ambientales, hacer eficientes los procesos burocráticos; la falta de creación de políticas ambientales que contemplen el uso de la ciencia y tecnología como solución a los problemas de la contaminación y en establecer vínculos entre el sector académico-industrial.

La ausencia del Estado acompañada de una intervención ineficaz genera barreras institucionales que impiden o dificultan la aplicación de la biotecnología ambiental para la descontaminación de suelos. A manera de analogía se puede entender a estas barreras como obstáculos en una “prueba deportiva donde corren” diferentes innovaciones sustentables como la biotecnología ambiental que dependiendo de la altura y complejidad del obstáculo institucional, las innovaciones podrán ir avanzando hasta alcanzar la meta de la aplicación industrial. El Estado entonces, establece la medida y tamaño de los obstáculos que son generados como resultado de su papel regulador sobre las actividades que puedan tener un efecto negativo en la salud de las personas o en el medio ambiente, por ejemplo, la creación de mecanismos que garanticen la inocuidad de los transgénicos cuando son utilizados en el entorno o la identificación del tipo de tecnologías y los procedimientos desarrollados para su aplicación en la remediación de suelos, sin embargo, estos obstáculos creados por el arreglo institucional pueden tener el efecto contrario al objetivo que están diseñados.

Tabla 8. Barreras y obstáculos institucionales que inciden en el desarrollo de nicho de innovación sustentable de biotecnología ambiental.

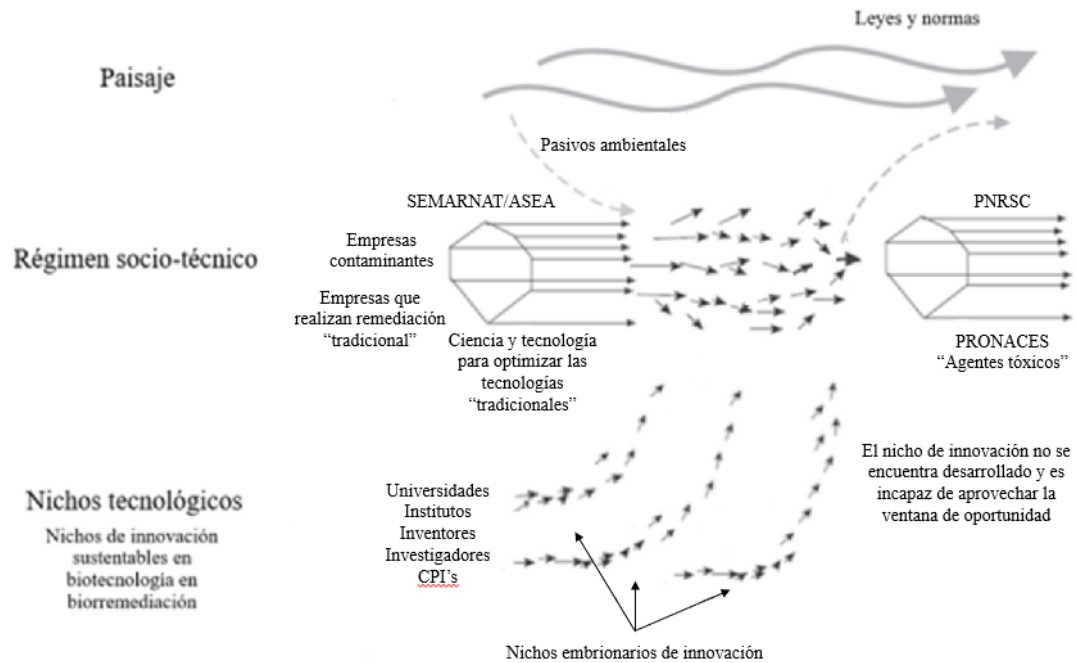
Barrera institucional identificada para la biotecnología ambiental por la evidencia	Documento de referencia
Alto grado de burocracia en las solicitudes de las empresas de remediación de suelos para su aprobación por la SEMARNAT y la ASEA ha tenido un impacto en la disminución en su aplicación.	• Programa Nacional de Remediación de Sitios Contaminados (2021-2024). • Ley de la Agencia Nacional de Seguridad Industrial y de Protección al Medio Ambiente del Sector Hidrocarburos.
Algunos productos de la biotecnología ambiental como los transgénicos requieren la aprobación de permisos adicionales y evaluaciones de riesgo para garantizar su inocuidad en la salud de las personas y mínimo impacto ambiental.	• Ley de Bioseguridad de Organismos Genéticamente Modificados (LBOGM).
Los incentivos para la investigación en biotecnología ambiental son escasos y su impacto en la resolución de los problemas de contaminación son nulos.	• Ley de Bioseguridad de Organismos Genéticamente Modificados. • PRONACES Agentes Tóxicos.
Bases de datos ambientales desarticuladas y desactualizadas.	• Programa Nacional de Remediación de Sitios Contaminados (2021-2024). • Inventario Nacional de Sitios Contaminados.
Las políticas públicas ambientales que se han creado para el problema de los pasivos ambientales no consideran a la ciencia y tecnología como un elemento central para solucionar la contaminación de suelos.	• Programa Nacional de Remediación de Sitios Contaminados (2021-2024).

Fuente: Elaboración propia como resultado del análisis institucional.

Como se muestra en la Tabla 8, derivado del análisis al arreglo institucional y políticas ambientales sobre la contaminación de suelos por hidrocarburos, identificamos las barreras institucionales que obstruyen el desarrollo del nicho de innovación sustentable. Además de las barreras institucionales, existen las barreras económicas como la falta de incentivos y apoyos financieros a proyectos de investigación de gran escala con el potencial de alcanzar la aplicación industrial a universidades, institutos de investigación y centros públicos de investigación y barreras sociales como la reputación que tiene la biotecnología en la aplicación de diferentes sectores.

La Figura 9 muestra la existencia de nichos de innovación sustentables concentrados en diferentes proyectos de investigación que se encuentran en una etapa de desarrollo “proto-nicho”, es decir, han surgido de la necesidad de resolver el problema de la contaminación de suelos, pero han encontrado dificultades para aglutinar el conocimiento y aprendizaje con actores y organizaciones del sector privado y tienen que enfrentarse a las barreras y obstáculos institucionales y económicos. En la figura se señala que por la incapacidad del régimen por aliviar la presión de los pasivos ambientales se ha mantenido la misma configuración de los elementos con pequeños esfuerzos recientes como la creación de políticas públicas ambientales. Lo que se observa en la figura es que los nichos de innovación sustentables en biotecnología ambiental especializados en la producción de conocimiento se encuentran desagregados entre diferentes actores e instituciones con la presencia de algunas interacciones débiles y centralizadas entre investigadores que no tienen la capacidad de alcanzar el régimen sociotécnico para resolver el problema del incremento de los pasivos ambientales. Este desaprovechamiento de las ventanas de oportunidad obliga al régimen sociotécnico a mantener la configuración de los demás regímenes.

Figura 9. Reconstrucción de la Figura 9; el Sistema sociotécnico de biotecnología ambiental para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos caracterizado y adecuado según la evidencia.



Fuente: Elaboración propia con base en Geels (2004).

Capítulo 6. Conclusiones

La metodología del enfoque sociotécnico con el análisis multinivel fue utilizada en esta investigación para entender los elementos que constituyen el contexto institucional y caracterizar el nivel de desarrollo del nicho de innovación sustentable en biotecnología ambiental para la descontaminación de suelos afectados por hidrocarburos. Este enfoque considera tres niveles de análisis, el nivel de paisaje sociotécnico, el nivel de régimen sociotécnico y el nivel de nicho de innovación sustentable.

En el paisaje sociotécnico según los alcances de esta investigación, se han identificado las leyes y normas que establecen los límites máximos permisibles para los individuos y empresas contaminantes, imponiéndoles penas pecuniarias si son rebasados. Sin embargo, se ha encontrado que son pocos los instrumentos institucionales creados para remediar los suelos contaminados por los hidrocarburos, aunado a que el enfoque actual del Estado no ha impulsado el desarrollo de la biotecnología ambiental como solución a los problemas ambientales.

Lo anterior puede tener implicaciones en los nichos de innovación sustentables. Basándonos en el enfoque sociotécnico, el nicho necesita aglutinar redes e interacciones entre actores y organizaciones multidisciplinarias que agreguen conocimiento y aprendizaje para que los proyectos de biotecnología ambiental puedan desarrollarse y aprovechen las ventanas de oportunidad que conduzcan al reemplazo de las tecnologías tradicionales. Sin embargo, lo que se observa es que los proyectos de investigación de biotecnología ambiental no han logrado alcanzar la aplicación industrial.

Las ventanas de oportunidad que se abren en el régimen surgen por las presiones del paisaje sociotécnico. En efecto, de acuerdo con nuestra investigación, existe una presión persistente en el sistema sociotécnico: la contaminación de suelos. Para aliviar la fuerza que ejerce la presión del paisaje, el régimen pone en marcha sus “válvulas de alivio” que consisten en mecanismos tecnológicos e institucionales de respuesta para reducir la contaminación de suelos. Esto puede observarse con la creación de leyes, normas e instituciones ambientales, y un aumento de las solicitudes para la descontaminación de suelos por las empresas que utilizan las tecnologías tradicionales de remediación. Sin embargo, la respuesta del régimen ha sido ineficiente porque el número de pasivos ambientales no se ha logrado reducir desde

la implementación de estas medidas. La ineficacia del régimen sociotécnico por aliviar la presión ha propiciado la apertura de ventanas de oportunidad que los investigadores en biotecnología ambiental han identificado y los ha motivado a buscar soluciones a través de nuevas metodologías de remediación de suelos.

Existe un impulso desde las universidades públicas federales, universidades, institutos de investigación y centros públicos de investigación que en los últimos años han comenzado a explorar, nuevas metodologías de remediación de suelos contaminados por hidrocarburos a través de la investigación científica. Estas instituciones, según el análisis de redes que realizamos, son centrales para la producción biotecnológica ambiental en el país, con proyectos que han alcanzado temporalmente la aplicación industrial a gran escala. Sin embargo, el impulso que han alcanzado estos proyectos que componen el nicho de innovación sustentable no han podido mantener de forma concreta y sostenida el régimen sociotécnico, es decir, las tecnologías tradicionales no han sido desplazadas ni complementadas por las apariciones espontáneas de los nichos de innovación sustentable.

El análisis que realizamos sobre los artículos de investigación a través del ejercicio de bibliometría no solamente identificó a los principales autores e instituciones que participan en la producción académica de biotecnología ambiental, además, nos permitió concluir que existen capacidades científicas en nuestro país pero que han tenido dificultades para difundirse en el régimen sociotécnico, es decir, los nichos de innovación no han logrado cambiar la configuración del régimen sociotécnico. Sin embargo, es posible que estas capacidades tengan oportunidades de crecimiento con la protección e incentivos desde el Estado y la vinculación con los sectores industriales.

El desarrollo del nicho de innovación sustentable en biotecnología depende de cuatro condicionantes que son: las redes e interacciones, las expectativas, la generación de conocimiento y la participación del Estado. Nuestra investigación arrojó resultados sobre el nivel de desarrollo del nicho, donde la generación de conocimientos y aprendizajes es importante dentro de las universidades, instituciones de investigación y centros públicos de investigación, pero la creación de redes e interacciones ha sido deficiente al no incorporar al sector privado en la producción de conocimiento ni en el escalamiento industrial. Además, el uso de la biotecnología en diferentes sectores sigue siendo motivo de debate,

por lo que las expectativas de los usuarios son débiles. Lo anterior nos indica la existencia de nichos de innovación en biotecnología ambiental desagregados en diferentes instituciones, es decir, se encuentran concentrados de forma local con capacidades científicas, pero se han conducido con dificultad por el bajo nivel de expectativas en la biotecnología, las pocas interacciones entre instituciones y actores con el sector privado y la falta de incentivos económicos para su utilización en la remediación de suelos. En suma, el nicho de innovación de biotecnología ambiental se encuentra en un estado de proto-nicho con dificultades para su desarrollo que al mismo tiempo necesita sortear barreras institucionales y económicas para alcanzar un estado consolidado.

La categorización del nicho de innovación propuesta en esta investigación indica que a medida que la producción de conocimiento científico de biotecnología ambiental no alcance la aplicación en la restauración ambiental entonces éste se podrá clasificar dentro de un estado de proto-nicho. Lo anterior tiene implicaciones en países en vías de desarrollo como el nuestro, porque debido a la escasez de capacidades científicas y tecnológicas endógenas, la producción de innovaciones radicales será limitada, lo que se traduce en que los procesos de cambio tecnológico o sustentable se rigen por la generación y apropiación del aprendizaje e innovaciones incrementales.

En el caso de la biotecnología ambiental en México se encontró que existe una respuesta a la presión de la contaminación en forma de artículos de investigación. Sin embargo, pocos han sido los proyectos que se han utilizado en mayor escala, tomando en cuenta también su temporalidad de aprovechamiento potencial. Esto indica que nuestro país se ha enfocado en producir innovaciones incrementales para la restauración de suelos, es decir, sobre las metodologías tradicionales dominantes como la biorremediación se les ha intentado dotar una eficiencia a través del mejoramiento de sus componentes ya existentes, pero sin propuestas consolidadas de innovaciones radicales como nuevas metodologías de descontaminación alternativas.

Uno de los mayores retos a los que se enfrentan los nichos de innovación son las barreras y obstáculos institucionales. En el caso que nos ocupa, el arreglo institucional ambiental se creó para regular y sancionar las actividades contaminantes, pero en este enfoque algunas tecnologías tienen que atravesar adicionalmente distintos pasos burocráticos hasta su

aplicación. Como se vio en el subcapítulo de *Barreras institucionales*, existen diferentes obstáculos que tienen que superar las nuevas tecnologías de remediación basadas en la biotecnología hasta su aplicación en la industria lo que impide su difusión, además, se identificaron barreras económicas y sociales en el desarrollo de los nichos de innovación lo que nos permite concluir que no existen incentivos adecuados para la biotecnología ambiental.

En la narrativa del enfoque sociotécnico, el fenómeno que se ha encontrado se trata de un patrón de vías de transición del tipo transformación donde existen presiones desde el paisaje sociotécnico que abren ventanas de oportunidad para los nichos de innovación sustentable, sin embargo, estos nichos no se encuentran desarrollados adecuadamente porque se encuentran en un estado de proto-nicho. Como consecuencia, el régimen sociotécnico, incapaz de aliviar la presión de la contaminación de los suelos por las condiciones actuales no permiten generar cambios, es decir, no es posible construir distintas trayectorias en la aplicación de nuevas metodologías de descontaminación de suelos a pesar de que se ha encontrado conocimiento científico acumulado. Los esfuerzos del régimen por disminuir la presión del paisaje pueden observarse en el actual gobierno por construir políticas ambientales como el Programa Nacional de Remediación de Sitios Remediados (2021-2024) y el instrumento de política pública el Programa Nacional Estratégico de CONACYT “Agentes tóxicos”.

El Estado entonces, debe participar en la protección del nicho de innovación sustentable en el mercado, asegurar la inercia del impulso de los proyectos de investigación de biotecnología ambiental y modificar el arreglo institucional para permitir la entrada de nuevas tecnologías al régimen al disminuir las barreras institucionales. Como se ha mencionado en la literatura, la falta de presiones conducen a periodos de alta estabilidad entre el régimen sociotécnico derivando en fenómenos del *path dependence* y *lock in*, sin embargo, lo que se ha observado en el tema de la sustentabilidad es que a pesar de que existen problemas de contaminación que ejercen presión como una fuente de cambio en el régimen, la falta de intervención del Estado o una deficiente aplicación del arreglo institucional suma al impedimento para que el sistema sociotécnico transite hacia modelos dinámicos que den respuesta a los problemas ambientales.

Algunos aspectos de la investigación son aportados al enfoque de los sistemas sociotécnicos: La formación de redes multidisciplinarias como parte del proceso de escalabilidad de los nichos; la categorización de los nichos de innovación tomando en cuenta las características endógenas y exógenas y la reflexión acerca de las innovaciones incrementales dentro de los nichos de innovación. Estas reflexiones complementan al reciente estudio de los sistemas sociotécnicos en los países en vías de desarrollo como México, donde será necesario tomar en cuentas las características propias que tiene cada nación y región, como el arreglo institucional, las capacidades científicas y tecnológicas, la geolocalización de los elementos del sistema y la economía nacional.

Esta investigación se enfocó en analizar de forma exploratoria el sistema sociotécnico de la biotecnología ambiental para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos, pero es necesario realizar investigaciones de carácter general sobre el universo de capacidades científicas y tecnológicas de biotecnología ambiental para los agentes contaminantes. Además, es necesario en el futuro las investigaciones sobre evaluaciones de impacto y de resultados de las políticas ambientales implementadas hasta el momento y determinar el grado de especificidad al que están dirigidas para lograr la disminución de los pasivos ambientales.

Por último, el papel que tiene el Estado para resolver el problema de la contaminación de suelos debe cambiar el enfoque al pasar de un Estado-regulador a un Estado-solucionador, de esta manera podrá coordinar los esfuerzos que se han impulsado desde la investigación científica y con el acompañamiento del sector privado así como la creación de incentivos para propiciar cambios en el arreglo institucional para que los agentes contaminantes utilicen métodos más eficaces para remediar los suelos.

Bibliografía

- Álvarez Buylla-Roces, M. (2019). Programas Nacionales Estratégicos para el fortalecimiento de la ciencia con incidencia. En: Viviendo en un mundo químico: hacia una política nacional. México; CONACYT.
- Azubuike, C., Chikere, C., & Okpokwasili, G. (2016). Bioremediation techniques—classification based on site of application: principles, advantages, limitations and prospects. *World Journal Of Microbiology And Biotechnology*, 32(11).
- Boopathy, R., Manning, J., Kulpa, C.F., (1998). A laboratory study of the bioremediation of 2, 4, 6-trinitrotoluene-contaminated soil using aerobic/anoxic soil slurry reactor. *Water Environ. Res.* 70 (1), 8086.
- Borgatti, S.P., Everett, M.G. and Freeman, L.C. (2002). *Ucinet 6 for Windows: Software for Social Network Analysis*. Harvard, MA: Analytic Technologies.
- Borgatti, S. P. (2002). *Netdraw Network Visualization Analytic Technologies*, Harvard.
- Cebrian, M.E., Albores, A., Aguilar, M., Blakely, E., (1983). Chronic arsenic poisoning in the North of Mexico. *Hum. Toxicol.* 2, 121-133.
- Cámara de Diputados. (2020). Estrategia Legislativa para la Agenda 2030 [Ebook]. Recuperado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/573730/Estrategia_Legislativa_para_la_Agenda_2030_VF_comp.pdf.
- Casalet, M. (2012). Las relaciones de colaboración entre la universidad y los sectores productivos. En J. Carrillo, A. Hualde & D. Villavicencio, *Dilemas de la Innovación en México: Dinámicas sectoriales, territoriales e institucionales*. (1st ed., pp. 109-142).
- Chauhan, P.S., Jha, B., (2018). Pilot scale production of extracellular thermo-alkalstable laccase from *Pseudomonas* sp. S2 using agro waste and its application in organo-phosphorus pesticides degradation. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 93 (4), 10221030.
- Cimoli, M. (Ed.). (2000). *Developing innovation systems: Mexico in a global context*. London: Continuum.
- Cortazar (2012). *Biotechnology applied to the degradation of textile industry dyes*. Universidad y Ciencia. Vol, 28. México.
- Conacyt. (2021). Lineamientos para la operación de los Programas Nacionales Estratégicos. [Documento electrónico]. Recuperado el 10 junio 2022, de <http://shorturl.at/beqV7>.
- Diario Oficial de la Federación. (2021). Programa Nacional de Remediación de Sitios Contaminados. México.
- Elzen, B., Geels, F., Green, K. (2004): *System Innovation and the Transition to Sustainability: Theory, Evidence and Policy*. Edward Elgar; 2004.

- García, C. (1993). Análisis documental: el análisis formal. *Revista general de información y documentación*, Vol. 3, 11-19.
- Geels, F. (2004) From sectoral systems of innovation to socio-technical systems. Insights about dynamics and change from sociology and institutional theory, *Research Policy*, 897-920.
- Geels, F., & Schot, J. (2007) Typology of sociotechnical transition pathways, *Research Policy*. 399-417.
- Geels, F. (2011). The multi-level perspective on sustainability transitions: Responses to seven criticisms. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 1(1), 24-40.
- Geels, F., Schwanen, T., Sorrell, S., Jenkins, K., & Sovacool, B. (2018). Reducing energy demand through low carbon innovation: A sociotechnical transitions perspective and thirteen research debates. *Energy Research & Social Science*, 40, 23-35.
- Geels, F. (2019). Socio-technical transitions to sustainability: a review of criticisms and elaborations of the Multi-Level Perspective. *Environmental Sustainability*.
- Geels, F.W., and R.P.J.M. Raven. (2006). Non-linearity and expectations in niche-development trajectories: ups and downs in Dutch biogas development (1973–2003). *Technology Analysis & Strategic Management* 18, no. 3/4: 375–92.
- Gidarakos, E., Aivalioti, M., (2007). Large scale and long term application of bioslurping: the case of a Greek petroleum refinery site. *J. Hazard. Mater.* 149, 574581.
- Hughes, Thomas P. (1987), 'The evolution of large technological systems', in Wiebe E. Bijker, Thomas P. Hughes and Trevor Pinch (eds), *The Social Construction of Technological Systems: New Directions in the Sociology and History of Technology*, Cambridge, MA: MIT Press, pp. 51–82.
- Lim, M. W et al. (2016) A comprehensive guide of remediation technologies for contaminated soil. Present Works and futures directions. *Marine Pollution Bulletin*.
- Liu, L., Bilal, M., Duan, X., & Iqbal, H. (2019). Mitigation of environmental pollution by genetically engineered bacteria — Current challenges and future perspectives. *Science Of The Total Environment*, 667, 444-454.
- López, D., Luyando, J. (2014). The effects of oil pollution in the development of Ejidal Communities: the case of the San Juan River basin (Nuevo León, México). *Investigación y Desarrollo*, vol.26, núm1, pp 92-124.
- Markard, J., Raven, R., & Truffer, B. (2012). Sustainability transitions: An emerging field of research and its prospects. *Research Policy*, 41(6), 955-967.
- Megharaj, M., Ramakrishnan, B., Venkateswarlu, K., Sethunathan, N., Naidu, R., (2011). Bioremediation approaches for organic pollutants: a critical perspective. *Environ. Int.* 37 (8), 1362-1375.
- Metcalfe, S., & Ramlogan, R. (2008). Innovation systems and the competitive process in developing economies. *The Quarterly Review Of Economics And Finance*, 48(2), 433-446.

- Nelson, R., Winter, G., (1982). *An Evolutionary Theory of Economic Change*. Belknap Press, Cambridge, MA.
- Rahman et al., (2002). Towards efficient crude oil degradation by a mixed bacterial consortium. *Bioresource technology*, 257-261.
- Rip, A., Kemp, R., (1998). Technological change. In: Rayner, S., Malone, E.L. (Eds.), *Human Choice and Climate Change*. Battelle Press, Columbus, OH, pp. 327–399.
- Savaget, P., Geissdoerfer, M., Kharrazi, A., & Evans, S. (2019). The theoretical foundations of sociotechnical systems change for sustainability: A systematic literature review. *Journal Of Cleaner Production*, 206, 878-892.
- Saxena, G., Kumar V., Shah, M. (2020). *Bioremediation for Environmental Sustainability. Toxicity, Mechanisms of Contaminants Degradation, Detoxification, and Challenges*. Elsevier. India.
- Schot, J., Geels, F. (2008) Strategic niche management and sustainable innovation journeys: theory, findings, research agenda, and policy, *Technology Analysis & Strategic Management*, 20:5, 537-554.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes, (1990). *Convenio internacional sobre cooperación, preparación y lucha contra la contaminación por hidrocarburos, 1990 (OPRC/90)* (pp. 1-7). México.
- SEMARNAT. (2019). *Cantidad de Sitios Contaminados por tipo de contaminante y región. Datos Abiertos del Gobierno de México*. Recuperado en julio de 2022, de la liga: <https://www.datos.gob.mx/busca/dataset/cantidad-de-sitios-contaminados-por-tipo-de-contaminante>.
- Smith, A., Stirling, A., Berkhout, F. (2005). The governance of Sustainable Socio-Technical Transitions. *Research Policy*, 34(10), 1491–1510.
- Smith, A., Voß, J., & Grin, J. (2010). Innovation studies and sustainability transitions: The allure of the multi-level perspective and its challenges. *Research Policy*, 39(4), 435-448.
- Song, Y.; Li, R.; Chen, G.; Yan, B.; Zhong, L.; Wang, Y.; Li, Y.; Li, J.; Zhang, Y. Bibliometric Analysis of Current Status on Bioremediation of Petroleum Contaminated Soils during 2000–2019. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2021, 18, 8859.
- Sorvari et al. (2009), Eco-efficiency in contaminated land management in Finland – barriers and development needs, *Journal of Environmental Management*, 90, 1715–1727.
- Suarez, F.F., Oliva, R., (2005). Environmental change and organizational transformation. *Industrial and Corporate Change* 14 (6), 1017–1041.
- Thomé et al. (2014). Bioventing in a residual clayey soil contaminated with a blend of biodiesel and diesel oil. *Journal Enviroment. RU*.
- OECD, (2013). *Biotechnology for the Enviroment in the Future: Science, Technology and Policy*. OECD Science, Technology and Industry Policy Papers, No. 3. OECD Publishing, Paris.
- OECD. (2006). *The Bioeconomy to 2030: Designing a Policy Agenda*. Paris: Organisation for Economic Cooperation and Development.
- OECD. (2009). *The Bioeconomy to 2030: Designing a Policy Agenda*. Paris, Francia: OECD.

- Van Driel, H., Schot, J. (2005). Radical innovation as a multi-level process: introducing floating grain elevators in the port of Rotterdam. *Technology and Culture* 46 (1), 51–76.
- Van Eck, N.J.; Waltman, L. (2010) Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84, 523–538.
- Viotti, E. (2002). National Learning Systems. *Technological Forecasting And Social Change*, 69(7), 653-680.
- Yang, Y., Zhang, Z., Liu, R., Ju, H., Bian, X., & Zhang, W. et al. (2021). Research progress in bioremediation of petroleum pollution. *Environmental Science And Pollution Research*, 28(34), 46877-46893.
- Yin, R. (2009). *Case Study Research. Design and Methods*. Fourth Ed. SAGE.
- Zhao, Q., Yue, S., Bilal, M., Hu, H., Wang, W., & Zhang, X. (2017). Comparative genomic analysis of 26 *Sphingomonas* and *Sphingobium* strains: Dissemination of bioremediation capabilities, biodegradation potential and horizontal gene transfer. *Science Of The Total Environment*, 609, 1238-1247. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.07.249

Anexos

Anexo 1. Claves y procesos clasificados por la SEMARNAT para la remediación de suelos.

CLAVE	PROCESO	TIPO
PILA-S	Biorremediación por biopilas en el sitio contaminado	BIOLÓGICOS
LAND-S	Biorremediación por <i>landfarming</i> en el sitio contaminado	
PILA-LS	Biorremediación por biopilas a un lado del sitio contaminado	
LAND-LS	Biorremediación por <i>landfarming</i> a un lado del sitio contaminado	
PILA-FS	Biorremediación por biopilas fuera del sitio contaminado	
LAND-FS	Biorremediación por <i>landfarming</i> fuera del sitio contaminado	
FITO-S	Fitorremediación en el sitio contaminado	
FITO-LS	Fitorremediación a un lado del sitio contaminado	
BVAE-S	Bioventeo aerobio en el sitio contaminado	
BANA-S	Bioventeo anaerobio en el sitio contaminado	
OXIQ-LS	Oxidación química a un lado del sitio contaminado	QUÍMICOS
NEUQ-LS	Neutralización química a un lado del sitio contaminado	
OXIQ-FS	Oxidación química fuera del sitio contaminado	
NQUI-FS	Neutralización química fuera del sitio contaminado	
EXSO-LS	Extracción con solventes a un lado del sitio contaminado	
EXSO-FS	Extracción con solventes fuera del sitio contaminado	
LAVS-LS	Lavado de suelos a un lado del sitio contaminado	FÍSICOS
LAVS-FS	Lavado de suelos fuera del sitio contaminado	
SOLI-LS	Estabilización-solidificación a un lado del sitio contaminado	
SOLI-FS	Estabilización-solidificación fuera del sitio contaminado	
EXVA-S	Extracción de vapores en el sitio contaminado	
DESO-LS	Desorción térmica a un lado del sitio contaminado	TÉRMICOS

DESO-FS	Desorción térmica fuera del sitio contaminado	
VITR-S	Vitrificación en el sitio contaminado	
Otro	Otros	OTROS

Anexo 2. Cantidad de emergencias y pasivos ambientales y sitios remediados en México por año.

AÑO	TIPO DE SITIO	CANTIDAD
2008	Emergencias Ambientales	142
2008	Pasivos Ambientales	479
2008	Sitios Remediados	76
2009	Emergencias Ambientales	135
2009	Pasivos Ambientales	465
2009	Sitios Remediados	165
2010	Emergencias Ambientales	114
2010	Pasivos Ambientales	548
2010	Sitios Remediados	138
2011	Emergencias Ambientales	123
2011	Pasivos Ambientales	580
2011	Sitios Remediados	102
2012	Emergencias Ambientales	93
2012	Pasivos Ambientales	582
2012	Sitios Remediados	73
2013	Emergencias Ambientales	51
2013	Pasivos Ambientales	587
2013	Sitios Remediados	34
2014	Emergencias Ambientales	144
2014	Pasivos Ambientales	632
2014	Sitios Remediados	36
2015	Emergencias Ambientales	52
2015	Pasivos Ambientales	625
2015	Sitios Remediados	18
2016	Emergencias Ambientales	15
2016	Pasivos Ambientales	623
2016	Sitios Remediados	29

Anexo 3. Entrevista a la Dra. Refugio Rodríguez Vázquez, investigadora del CINVESTAV.

Estoy desarrollando mi tesis sobre la aplicación de la biotecnología en la biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos utilizando un enfoque denominado sociotécnico que tiene la función de identificar la dinámica de los principales actores, leyes, normas, identificar los pros y contras de las tecnologías tradicionales para la descontaminación de suelos y entender la manera en que surgen y se desarrollan nichos de innovación de biotecnología para hacer frente al problema de la contaminación de suelos. La hipótesis planteada es que nuestro país tiene capacidades científicas y tecnológicas para ofrecer en el mercado nuevas metodologías basadas en la biotecnología para lograr optimizar el proceso de descontaminación de la biorremediación. Por lo tanto, se han diseñado las siguientes preguntas para entender desde la perspectiva del investigador la situación en la que se encuentra nuestro país en el desarrollo de la biotecnología ambiental para la descontaminación de suelos. Por lo que las siguientes preguntas abordaran algunos elementos que considero relevantes para complementar la información empírica que he recolectado.

1. Me puede contar sobre sus temas de interés y áreas de investigación que realiza sobre biotecnología ambiental.

Dra. Refugio: Se me ha reconocido como líder en el campo de biorremediación de suelos y agua por diversos contaminantes. Maneja otra línea de investigación relacionada con la aplicación de la nanotecnología para la descontaminación de los cuerpos hídricos, específicamente para los contaminantes emergentes que no pueden eliminarse con cualquiera tecnología como los plásticos, hormonas y colorantes. La nanotecnología es un proceso principalmente foto-físico. En el caso de la biorremediación se ha utilizado en combinación la nanotecnología para la descontaminación de agua.

2. ¿Cómo fue el proceso para solicitar la patente sobre biorremediación de suelos? ¿Existen muchas barreras burocráticas? ¿Ha encontrado dificultad en el acompañamiento por parte de universidad para culminar el proceso?

Dra. Refugio: La patente se me otorgó en el 2011 con número 291975. Es la única patente a nivel nacional y nivel mundial que utiliza residuos del grano verde del café para la descontaminación de suelos por hidrocarburos y plaguicidas. El tiempo entre la solicitud y la concesión fue prolongado y se presentaron durante el proceso problemas entre particulares por el uso que se le estaba dando a la patente esto fue por los beneficios obtenidos por la patente.

3. ¿Ha habido algún acercamiento por parte del gobierno o de alguna empresa para utilizar los resultados o conclusiones de su investigación para realizar la biorremediación de suelos?

Dra. Refugio: Hubo un acercamiento de 15 empresas, pero ninguna me convenció para la aplicación de la biotecnología. A final de cuentas querían que yo la aplicara. Entonces bueno yo dije no, no entiendo de que se trata porque si uno licencia la tecnología uno tiene ya se hace el licenciamiento y bueno algunas empresas no tienen el perfil. Empresas grandes participaron en las solicitudes, una de ella fue De Olea es una empresa francesa. Sobre todo, comenzaron a solicitar durante la época “muy de moda” donde los pasivos ambientales aumentaban y se remediaban muy pocos suelos. Por ahí tengo un libro que me dio el Dr. Ulises que trabajó para le GEIZ que es una agencia alemana que otorga lo que son algunos fondos para la parte de atención ambiental para la descontaminación, entonces esta agencia pues ha rehabilitado varios sitios pero no usando sitios de remediación, lo que han hecho es que únicamente cambian el suelo sucio por el suelo limpio, lo han hecho en Salamanca en un pasivo ambiental de los más contaminados a nivel mundial, en el cual se estuvo trabajando lo que son la disposición de 85 mil toneladas de suelo contaminado con plaguicidas y este suelo se llevó a disposición en Nuevo León, por la parte Norte del país donde usualmente se tiene la confinación de suelos contaminados. Entonces la cuestión es que en la época de los 2007-2008-2009, vino una gran cantidad de solicitudes para aplicar la biotecnología patentada, pero ninguna me convenció, no se hizo trato por una cuestión personal con ninguno de ellos, sin embargo, si la aplique directamente para la restauración de la Ex Refinería 18 de marzo. El Canal 11 hizo un video sobre la aplicación de la patente en las instalaciones, se nos dieron 35 mil toneladas de suelo excavado contaminado con

hidrocarburos y así participaron otras siete instituciones, sin embargo, el CINVESTAV fue el único que aplicó su propia tecnología durante el 2008 con el proyecto “GPA2001-2008 PEMEX Refinación” y en mes y medio pudimos descontaminar estas 35 mil toneladas a diferencia de las otras instituciones que habían contratado otras empresas que no aplicaron directamente y tardaron según los documentos de la PROFEPA más de un año en eliminar el mismo tipo de contaminantes del mismo sitio y esto porque tenemos secuencias de cuando se está limpiando un sitio de los trabajos revisados, pues ahí pude comparar la tecnología con respecto a otras tecnologías también biológicas que se están empleando pero las otras no están patentadas, son improvisadas. Existe una normatividad que tienen que seguir las instituciones encargadas de la descontaminación de suelos, que es la Norma 138, establece los criterios de descontaminación para los hidrocarburos. No hay normas para plaguicidas ni otros contaminantes, únicamente es para hidrocarburos es la única que se tiene a nivel nacional. Siguiendo la normatividad de la Norma 138 también se establecieron criterios de la evaluación de riesgo. Esta evaluación la realizaron los investigadores que trabajan en esta línea, se establece el riesgo con la normatividad. Nosotros cumplimos con el contrato en 3 meses, lo cual fue algo sorprendente porque eran cerca de 78 montículos o biopilas. El proceso de descontaminación fue realizado a través de un conjunto de metodologías a escala, es decir, se comenzaron por gramos y se llegaron a toneladas. En términos de tiempo, el equipo del CINVESTAV obtuvo el menor para lograr la descontaminación del suelo, no solamente a nivel laboratorio sino visualmente podía observarse los avances. Posteriormente al 2008, se aceptaron otros 5 contratos con Ferrocarriles Mexicanos para tratar el suelo en estaciones de servicio de locomotoras de esta compañía. 2 contratos en Mexicali, uno en Zacatecas en el municipio de Felipe pescador, otro en Saltillo, Coahuila y el último en Oaxaca donde se aplicó la tecnología en suelos, pero también hubo algunos usos en aguas subterráneas contaminadas por hidrocarburos. La aplicación fue a gran escala, alrededor de 35 mil toneladas en el parque Bicentenario y otras aplicaciones de nivel comercial logradas por el Cinvestav.

4. ¿Actualmente se sigue utilizando esta tecnología? ¿Aún existen convenios con instituciones?

Dra. Refugio: México no tiene esa forma de trabajar academia-industria, esa relación no la tenemos bien establecida como la tienen otros países muy diferentes, Canadá, Estados Unidos entre otros, donde hay una forma de trabajo industria-academia. En México desafortunadamente no es tan fácil trabajar con la industria entonces por la forma de trabajar que es diferente a las expectativas de los académicos, quizás hay algunas instituciones que, si puedan trabajar con las industrias aplicando los diversos desarrollos tecnológicos, pero en mi caso que se requieren grandes cantidades de dinero para financiar los proyectos de descontaminación de suelos es difícil la colaboración. Por ejemplo, en algunos contratos el uso de la tecnología es barata, pero era requisito para los documentos que el costo de la tecnología fue mayor por lo que generó problemas. Por esta razón yo decidí no seguir trabajando con la industria. Lo que realicé más adelante fue atender las problemáticas en el campo, donde existe una gran cantidad de pasivos ambientales.

Seguimos trabajando e innovando en otro tipo de remediación con otros agentes contaminantes. Se hizo una solicitud con una ONG en Xochimilco donde ahorita estamos trabajando. También se pidió descontaminar suelos agrícolas contaminados con plaguicidas, sin embargo, encontramos que la mayor problemática de los suelos agrícolas son los suelos gastados que tienen altas concentraciones de sal por la adición de estiércol, sobre explotación del suelo los nutrientes se terminan y se adicionan de forma artificial por lo que la salinidad de estos suelos en casi todos los sitios que se tienen este tipo de actividades es muy alta. Ahí es donde hicimos una modificación de esta patente, en lugar de usar grano verde café usamos cáscaras de naranja. Se observó actividad microbiana muy particular que permite en “N” mecanismos que se han estudiado y publicado se tiene una gran cantidad de artículos publicados en revistas internacionales y muy pocas en revistas nacionales sobre cómo funcionan y se debe adecuar las tecnologías. Para cada sitio se hacen pruebas para determinar cuáles son las mejores condiciones para poder restaurar el sitio, donde cada uno necesita una formulación propia, un traje a la medida. En el suelo chinampero el mayor problema donde hay mayor salinidad es Tulteyalco

En Xochimilco se inició en el 2014 por una petición de una ONG y se extendió el proyecto para tratar suelo y agua. Entonces el Gobierno de la CDMX volteó a ver estas tecnologías porque se están aplicando con la SAGARPA en el 2015 y los capacitábamos para que ellos

les enseñaran a los productores a los chinamperos para mejorar la calidad del suelo y entonces producir mejores hortalizas porque no crecen por la salinidad. Entonces las personas creen que se necesitan agregar agroquímicos cuando el problema es la salinidad. Se abrió un proyecto con el Gobierno de la CDMX para trabajar y realizar talleres de capacitación que continuamos con un proyecto pequeño donde mayormente el fondo lo manejó la Comisión de Recursos Naturales de la SEDEMA de la CDMX. Se trataron 135 chinampas entre 400 a 660 metros cuadrados de área y también se colocaron cerca de 60 biofiltros para tratar el agua que es usada para el riego y se utilizaron 9 módulos de tratamiento de compostaje del abono de caballo que es usado para los suelos agrícolas.

Anexo 4. Matriz de interacciones de instituciones, universidades y CPI de biotecnología ambiental para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos.

Consultar en la siguiente liga:

https://docs.google.com/spreadsheets/d/1XDfr4TkLqsB55COmNISsi4r_1zeI1ladFsMjOw0Tt1I/edit?usp=sharing

