

Incorporación de criterios de sustentabilidad en el desarrollo de proyectos geotermoeléctricos en México, caso de estudio: Campo Cerritos Colorados, Caldera de la Primavera, Jalisco

Saucedo-Velázquez, J.I.¹, Saucedo, R.^{2*}, Sánchez-Núñez, J.M.³ y Macías, J.L.⁴

Abstract

Geothermal energy, under a sustainability approach, constitutes a strategic alternative to replace the use of fossil fuels. However, its exploitation requires the application of rigorous environmental criteria to avoid generating negative ecological impacts that compromise its viability as a sustainable alternative. This study uses the Cerritos Colorados Geothermal Field (CGCC), located in the La Primavera Caldera, Jalisco, and developed in the 1980s, as a reference. The primary objective is to demonstrate the necessity of incorporating sustainability criteria at all stages of a geothermal power project's development, thereby preventing, reducing, and mitigating adverse environmental impacts and ensuring its sustainable, long-term use. To achieve this objective, a critical analysis methodology was used, analyzing and questioning the Environmental Impact Statement (EIS) used for the development of the geothermal field, while also assessing its relevance. The results of the Environmental Impact Assessment (EIA) analysis revealed significant inconsistencies in the application of national (and international) regulations, as well as the omission of numerous environmental impacts that were not reported during the field's development. The most important contribution of this work is the proposal of a sustainability framework for the CGCC (Central Geothermal Field) based on the concept and criteria of sustainable production. It is worth noting that this is a pioneering study in Mexico, aimed at promoting the sustainable use of geothermal energy in Protected Natural Areas, thereby contributing to extending the lifespan of geothermal fields within a sustainable framework.

Key words: geothermal energy, geothermoelectric field, environmental impacts, sustainability, environmental impact statement.

Resumen

La energía geotérmica, bajo un enfoque de sustentabilidad, constituye una alternativa estratégica para sustituir el uso de recursos fósiles. No obstante, su aprovechamiento requiere la aplicación de criterios ambientales rigurosos, para evitar la generación de impactos ambientales negativos que comprometan su viabilidad como una alternativa sustentable. En este trabajo se tomó como referencia el Campo geotérmico de Cerritos Colorados (CGCC) ubicado en la Caldera de La Primavera, Jalisco y desarrollado en la década de los 80's. El objetivo principal es demostrar la necesidad de incorporar criterios de sustentabilidad en todas las etapas de desarrollo de un proyecto geotermoeléctrico, con el fin de prevenir, reducir y mitigar los efectos ambientales negativos y asegurar su aprovechamiento sustentable y a largo plazo. Para lograr este objetivo, se utilizó una metodología de análisis crítico, donde se analiza y cuestiona la Manifestación de Impacto Ambiental (MIA) utilizada para el desarrollo del campo geotérmico, asumiendo su pertinencia. Los resultados del análisis de la MIA, mostraron fuertes incongruencias en la aplicación de la normatividad nacional (e internacional), además de la omisión de múltiples afectaciones al medio ambiente que no fueron reportadas durante el desarrollo del campo. El aporte más importante de este trabajo es la propuesta de un esquema de sustentabilidad para el CGCC basado en el concepto y los criterios de producción sustentable. Cabe señalar que se trata de un estudio pionero en México y que va orientado a promover el aprovechamiento geotérmico sustentable en Áreas Naturales Protegidas, contribuyendo a prolongar la vida útil de los campos geotérmicos dentro de un marco sustentable.

Palabras clave: Energía geotérmica, campo geotermoeléctrico, impactos ambientales, sustentabilidad, Manifestación de Impacto Ambiental.

Received: August 11, 2025; Accepted: December 1, 2025; Published on-line: January 1, 2026.

Editorial responsibility: Dra. Isabel Pérez-Martínez

* Corresponding author: Ricardo Saucedo-Girón, rgiron@uaslp.mx

¹ SECIHTI-Instituto de Geología, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, C.P. 78240. San Luis Potosí, México.

² Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología- Facultad de Ingeniería, C.P. 78240. San Luis Potosí, México.

³ Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo. Departamento de Territorio y Ambiente. C.P. 07340, Ciudad de México, México.

⁴ Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, Ciudad Universitaria, Coyoacán, C.P. 04510, CDMX. México.

J. I. Saucedo-Velázquez, Ricardo Saucedo-Girón, J. M. Sánchez-Núñez, José Luis Macías-Vasquez

<https://doi.org/10.22201/igeof.2954436xe.2026.65.1.1909>

1. Introducción

El crecimiento poblacional en las grandes ciudades, el aumento en los hábitos de consumo a la par de un constante deterioro ambiental, han puesto la atención a nivel global en la necesidad de un cambio de paradigma en cuanto a la búsqueda de fuentes alternas de generación y consumo de energía. Donde sin duda, el cambio climático ha sido un factor ambiental determinante, que hace necesario romper la fuerte dependencia de los combustibles fósiles, e iniciar la búsqueda de fuentes energéticas alternativas. Sin embargo, no debe perderse de vista que no basta con solo hacer uso de energías limpias o energías alternativas, sin considerar que, dichas fuentes deberán satisfacer los requerimientos de protección al medio ambiente, sociedad, economía y sustentabilidad, garantizando su aprovechamiento a largo plazo.

Bajo estas premisas, la energía geotérmica es una alternativa viable para cubrir parte de la demanda energética, siempre y cuando se privilegie la aplicación de criterios de sustentabilidad que las actuales condiciones ambientales requieren. Al respecto, la energía geotérmica se considera un recurso renovable debido a que la energía extraída se reemplaza continuamente en un tiempo similar al de su extracción, a diferencia de los combustibles fósiles, que requieren tiempos geológicos para regenerarse (Rybach & Mongillo, 2006). Esta tasa de recarga, es el parámetro crítico que determina que la renovabilidad del recurso geotérmico (Monterrosa & Montalvo López, 2010).

Además, la energía geotérmica puede ser utilizada de forma sustentable, lo que significa que el sistema puede mantener su nivel de producción a largo plazo.

Si bien un campo geotérmico se considera un recurso renovable, su grado de sustentabilidad y longevidad dependerá tanto de factores naturales como de factores antropogénicos. Entre los primeros, destacan las condiciones geológicas y la naturaleza del yacimiento, incluyendo el calor inicial del sistema, la temperatura, el contenido del fluido, la recarga de agua, los procesos de transferencia de calor, la tasa de recarga o regeneración de energía y las propiedades físico-químicas del reservorio (Cataldi, 2001; Wright, 1999).

Mientras que el factor humano desempeña un papel igualmente decisivo en la vida útil y sustentabilidad de los campos geotérmicos. Sobre este factor, Hanano *et al.* (1990), ponderan la influencia de las variables económicas y de ingeniería en la gestión del recurso, destacando factores como: duración del proyecto, las estrategias de explotación (tipo y cantidad de extracción de calor), la tecnología de inyección, la eficiencia de los sistemas, y las decisiones operativas adoptadas durante todas las etapas de desarrollo de un campo geotérmico por el responsable del campo (Monterrosa & Montalvo López, 2010). Elementos que, al ser gestionables, influyen en gran medida en la capacidad de mantener un campo viable a largo plazo. En este sentido, el factor

humano puede resultar determinante para alargar la producción sustentable de un campo geotérmico hasta por más de 100 años (Axelsson *et al.*, 2001, Axelsson *et al.*, 2004).

En contraste, cuando se plantea un proyecto geotérmico desde una perspectiva basada principalmente en una proyección de factibilidad económica y de inversión, dejando de lado el carácter de sustentabilidad, el período de tiempo de producción del campo, por lo general sólo será considerado para operar pocas décadas, a menudo del orden de 20-30 años (Stefánsson & Axelsson, 2005; Monterrosa & Montalvo López, 2010).

Sin duda, la energía geotérmica es un recurso natural estratégico, renovable y amigable con el medio ambiente, que representa una alternativa viable al uso de energías fósiles. Sin embargo, su explotación sin cumplir con estrictos criterios de sustentabilidad, puede generar severos impactos ambientales directos e indirectos. Por tanto, es necesario implementar medidas que coadyuven a mantener un balance a largo plazo, entre los impactos ambientales negativos susceptibles a provocarse y los beneficios que pueden obtenerse. Siempre privilegiando los tres pilares básicos del Desarrollo Sustentable que son: crecimiento económico, equidad social y la protección ambiental, donde la relevancia de cada uno de estos principios, dependerá de las características de la zona y del proyecto a desarrollar (Herrera, 2008).

La presente propuesta sobre el aprovechamiento geotérmico sustentable en el CGCC, puede ser considerada como un “estudio pionero” en el desarrollo de proyectos geotermoeléctricos, ya que contempla la definición y aplicación de estrategias orientadas al aprovechamiento geotérmico con una visión sustentable. Además, considera un análisis detallado del principal instrumento legal que regula y gestiona los elementos medioambientales (la Manifestación de Impacto Ambiental, MIA) en las áreas de prospección geotérmica, en particular cuando están ubicados en un Área Natural Protegida, como es el caso del CGCC, ubicado al interior del bosque de La Primavera, denominada Área de Protección de Flora y Fauna “La Primavera” (APFFLP) y como Reservas de la Biósfera en el programa “El Hombre y Biósfera (MAB)” de la UNESCO (DOF, 1980; UNESCO, 2006).

2. Localización de zona de estudio e infraestructura del campo geotérmico Cerritos Colorados

El Campo Geotérmico de Cerritos Colorados (CGCC), se ubica dentro de la Caldera La Primavera o bosque “La Primavera” (Gutiérrez-Negrín, 1988; Mahood, 1980) que se encuentra prácticamente conurbado al oeste de la ciudad de Guadalajara, en el estado de Jalisco (UTM NAD 27 2 295 000 y 2 270 000; 635 000 y 662 500; Figura 1). La caldera volcánica está situada en el centro de un conjunto de cinco valles: Tala, Tesistán, Toluquilla, Atemajac y San Isidro Mazatepec, y ocupa una superficie

de 36,229 hectáreas, de las cuales 30,500 corresponden a la zona catalogada como Área de Protección de Flora y Fauna "La Primavera". Es la reserva ecológica más grande y cercana a la ciudad de Guadalajara, por lo que es considerada el "pulmón" de esta urbe (CONANP, 2000).

Fisiográficamente, se sitúa en la parte occidental del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM), y se trata de una caldera volcánica de ~11 km de diámetro con una edad de ~95,000 años, que presenta una serie de manifestaciones hidrotermales como fumarolas, manantiales de agua caliente, solfataras y suelos calientes que afloran en diversas partes del interior y exterior de la caldera, (Mahood, 1980; Mahood, 1981).

Debido a su potencial geotérmico, entre 1980 y 1989, la Comisión Federal de Electricidad (CFE), desarrolló obras civiles para el aprovechamiento de sus recursos geotérmicos en la zona denominada Cerritos Colorados y volcán extra-caldera Las Planillas, ubicados en la parte centro norte y sur de la caldera volcánica (Figura 1; JICA 1986 y 1989).

Las obras consistieron en la apertura de caminos de acceso, construcción de plataformas, presas de lodos, así como la perforación de 13 pozos geotérmicos (UACH, 2008) con profundidades de hasta ~3000 m., (Gutiérrez-Negrín, 1988). Sin embargo, en 1989 las autoridades ambientales suspendieron las actividades, como resultado del evidente impacto ambiental ocasionado en el área, lo que se reflejó principalmente en la pérdida de cobertura vegetal, afectación a la fauna silvestre y en erosión de suelos (UACH, 2008).

3. Metodología

La propuesta de aplicación de criterios de sustentabilidad para el desarrollo del CGCC, tiene como base el análisis de los siguientes aspectos: I. Análisis cualitativo de los principales impactos ambientales del CGCC con base en la MIA, II. La identificación, compilación y análisis documental de los aspectos

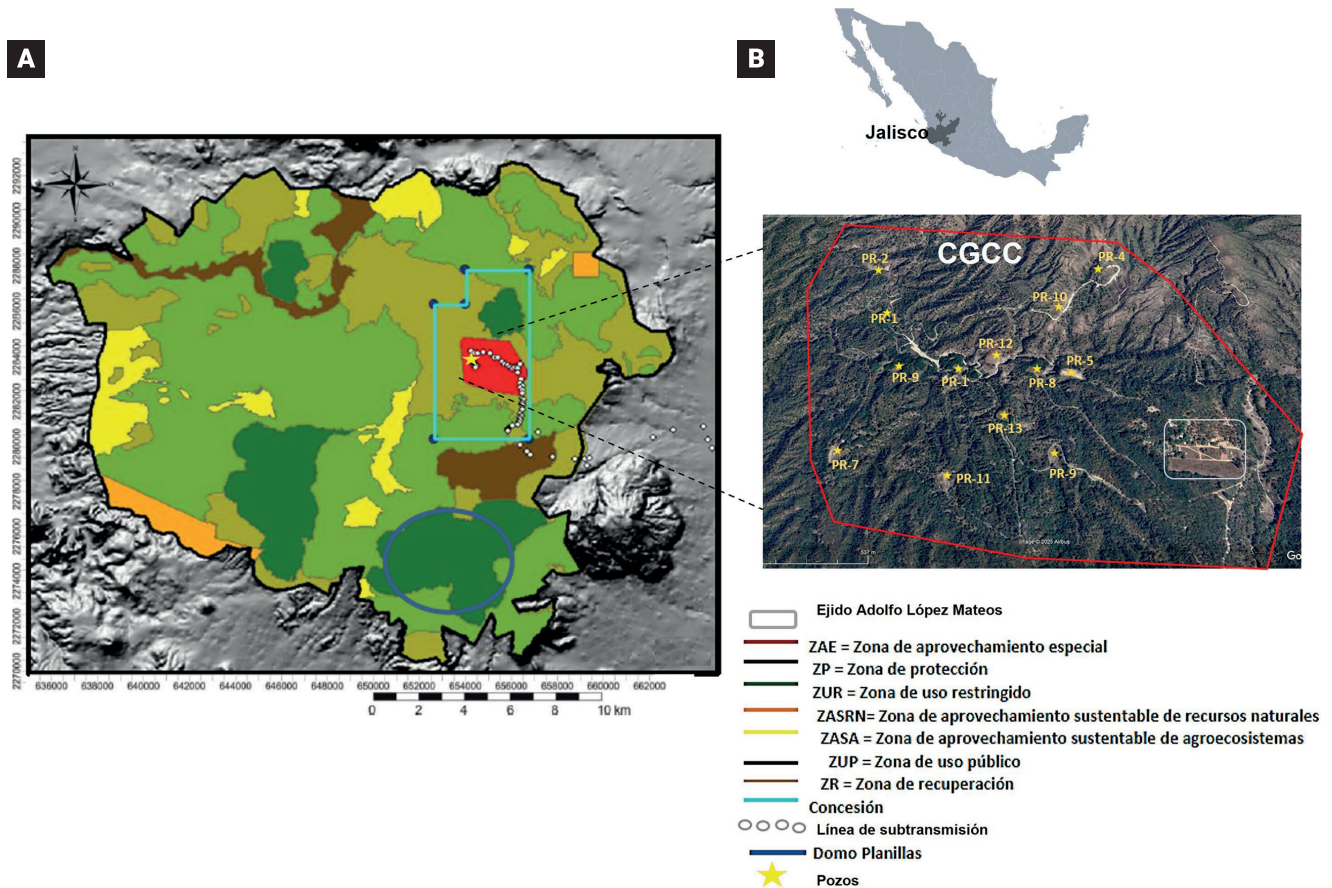


Figura 1. A) Localización del Campo Geotermoeléctrico Cerritos Colorados (CGCC) dentro de la Caldera La Primavera, Jalisco. En diferentes colores se muestra la zonificación del Área Natural Protegida (ANP), la estrella amarilla indica la zona de pozos y los puntos blancos indican el trayecto de la línea de subtransmisión (modificada de Saucedo-Velázquez, 2017). B) En vista ampliada se muestra la distribución de pozos perforados dentro del campo (polígono rojo).

e impactos ambientales identificados a nivel internacional durante el desarrollo de campos geotérmicos (Saucedo-Velázquez, 2017) y III. Un análisis de sustentabilidad del campo con base en el concepto de producción sustentable propuesta por Axelsson *et al.*, 2004 y Axelsson, 2004.

Una vez identificada la línea base de impactos, se contrastaron con los evaluados en la MIA del proyecto del Geotermoeléctrico Cerritos Colorados (25MW-Primera etapa), desarrollado por la Universidad Autónoma de Chapingo (UACH) en 2008, registrada con clave 14JA2008E0002-7 ante la Dirección General de Impacto y Riesgo Ambiental (DGIRA), de la SEMARNAT. Posteriormente, se enlistaron los impactos que no fueron considerados en la evaluación, y que, en función de su importancia y condiciones de campo, debieron incluirse, debido a su magnitud y significancia.

Por último, se presenta un análisis de sustentabilidad del CGCC con base en el concepto de producción sustentable en campos geotérmicos. Además, se incluyen recomendaciones y propuestas puntuales para lograr el carácter sustentable de este campo geotérmico, y aplicables para otros campos.

4. Resultados

4.1 Análisis de la MIA del proyecto geotermoeléctrico Cerritos Colorados

La Manifestación de Impacto Ambiental (MIA), se define como: “*el documento mediante el cual se da a conocer, con base en estudios, el impacto ambiental, significativo y potencial que generaría una obra o actividad...*” (LGEEPA, 1988). En el marco de esta definición, la MIA es el instrumento referente para definir los impactos ambientales, y dictar las acciones encaminadas a minimizarlos durante una eventual reapertura del desarrollo del proyecto geotermoeléctrico Cerritos Colorados, en la Caldera de la Primavera, Jal. (Bosque de La Primavera).

La identificación y análisis de los potenciales impactos ambientales contemplados en la matriz de impactos de la MIA del proyecto geotermoeléctrico Cerritos Colorados (Tabla I), permite mostrar que, este instrumento no consideró una serie de impactos ambientales que actualmente son reconocidos a nivel global, durante las diferentes etapas de desarrollo de un proyecto

Tabla I. Impactos ambientales considerados en la MIA para el Proyecto Geotermoeléctrico Cerritos Colorados.

Etapa del proyecto	Aspecto ambiental	Impacto ambiental
Preparación del sitio	Desmonte y despalde.	Eliminación de la cobertura vegetal.
	Cambio de uso de suelo.	Erosión.
	Cortes y rellenos, uso de maquinaria y equipo, desmontes y despaldes.	Disminución en la calidad intrínseca del paisaje y fragilidad visual.
	Uso de vehículos y maquinaria. Emisiones a la atmósfera de humos y polvos.	Afectación puntual sobre la calidad del aire, modificación de microclima.
Construcción	Uso de maquinaria y equipo. Emisiones a la atmósfera de humos y polvos.	Afectación puntual sobre la calidad del aire, modificación de microclima.
	Construcción de la unidad de 25MW y otras obras asociadas a la misma (torre de enfriamiento, subestación).	Alteración de las características del paisaje por el establecimiento de infraestructura del proyecto.
	Construcción de la línea de subtransmisión (hincado y montaje de estructuras, tendido y tensado de cables).	Alteración de las características del paisaje por el establecimiento de infraestructura del proyecto.
Perforación	Instalación del equipo de perforación.	Afectación de la calidad visual del paisaje con la instalación del equipo de perforación.
	Operación del equipo de perforación. Generación de ruido.	Ahuyentar temporalmente la fauna cercana, alteración de microambiente.
Operación y mantenimiento	Unidad de generación. Emisiones de vapor de agua, H ₂ S y CO ₂ y gases incondensables a la atmósfera.	Afectación de la calidad visual del paisaje. Afectación a la calidad del aire.
	Línea de subtransmisión.	Liberación continua de energía en forma de calor y modificación del microclima.
		Disminución en la calidad intrínseca del paisaje.

geotermoeléctrico (Saucedo-Velázquez, 2017). En consecuencia, una vez que las condiciones político-ambientales y sociales permitan reiniciar el desarrollo del proyecto geotérmico CGCC, será necesario identificar e incluir otros impactos ambientales en futuras Manifestaciones de Impacto Ambiental, para medir sus alcances y eventualmente darle el carácter de sustentabilidad al proyecto.

En la Tabla I, se presenta un resumen de los aspectos e impactos ambientales presentados en la MIA (UACH, 2008) del Proyecto Geotermoeléctrico Cerritos Colorados para cada etapa de desarrollo.

En este contexto, a continuación, se enlistan los impactos ambientales relevantes, que no fueron considerados en la MIA y cuya aplicación, desde la perspectiva de la presente propuesta, son determinantes para que el desarrollo geotérmico pueda ser considerado sustentable, condición que debe tener más significancia o relevancia al tratarse de una Área Natural Protegida (ANP):

1. La subsidencia del terreno.
2. Sobreexplotación de acuíferos.
3. Riesgos geológicos por procesos de remoción en masa (deslizamientos de tierra, caída de rocas y desprendimientos de taludes).
4. Contaminación del agua y suelos por F, B, Hg y As.
5. Cambios en las condiciones de la escorrentía superficial (la modificación parcial del cauce del arroyo el caracol).
6. Contaminación de acuíferos, cuerpos superficiales de agua y suelos por lodos de perforación y por tuberías perforadas.
7. Reducción de la tasa de infiltración de agua por impermeabilización de superficies recubiertas.
8. Sismicidad (micro sismicidad) inducida por la reinyección.
9. Interconexión de acuíferos poco profundos por perforaciones.
10. Aumento del nivel ambiental de radiación electromagnética.
11. Afectación de las fuentes de aguas termales.
12. Erupciones hidrotermales.
13. Erupciones volcánicas.
14. Acumulación de metales pesados por deposición, principalmente en pozos, sistema de equipos superficiales de la planta geotérmica, y suelos aledaños.
15. Pérdida o destrucción de suelos.
16. Pérdida o modificación de ambientes de fauna terrestre.
17. Generación de barreras al desplazamiento de fauna.
18. Colisión y electrocución de aves.
19. Redistribución espacial de población activa.
20. Estrategias de conservación y restauración del ecosistema.
21. Mecanismos de contención hacia la población en caso de fugas.

Aunado a la identificación y evaluación de los impactos ambientales, se hace una serie de observaciones puntuales en el contenido técnico y normativo de la MIA del CGCC, que desde la perspectiva de esta investigación son pertinentes para minimizar su impacto al bosque, y lograr una aceptación social:

- a) En relación con el tratamiento de aguas residuales, la MIA muestra contradicciones al indicar dos argumentos distintos: “*instalar una planta de tratamiento a fin de tratar el agua residual doméstica previo a su inyección conjuntamente con el agua geotérmica.*” Pero para este mismo punto se añade que: “*para el manejo de las aguas residuales de tipo doméstico en la etapa de operación, se instalará una planta paquete de tratamiento biológico de aireación extendida y el efluente será utilizado para riego de áreas verdes dentro de la misma central.*” **Observaciones:** Por lo anterior, resulta indispensable definir claramente los aspectos técnicos del manejo de aguas residuales domésticas, ya que el destino de estas aguas y la magnitud de los impactos al medio (superficial o subterráneo) y la sociedad aledaña, estará determinado por el grado de tratamiento que recibirán.

- b) Otro aspecto referente a la generación, manejo y descarga de residuos líquidos, lodos y aguas residuales, en la MIA se menciona que: “*las aguas residuales industriales del proyecto Cerritos Colorados, constituidas por el agua geotérmica, los excedentes de las torres de enfriamiento de la unidad y los drenes de la turbina (condensados de vapor), regresarán al yacimiento por medio del sistema de tubería de conducción hasta los pozos inyectoras, con un doble propósito: recargarlo y evitar daños al ambiente, ya que el agua contiene sales disueltas en concentraciones que podrían ocasionar problemas de salinidad y toxicidad en los suelos y vegetación si se descargara superficialmente.*” Adicionalmente se indica que; “*las presas de lodos contendrán agua a alta temperatura y con elementos tóxicos a elevadas concentraciones (Boro y Arsénico).*”

Observaciones: Considerando estas acciones, es de suma importancia el correcto manejo de cada uno de los efluentes durante todas las etapas del proyecto. Además, es imperativo, evaluar el impacto potencial a los cuerpos de agua subterránea, superficiales, suelo y vegetación, lo cual no está contemplado en la matriz de impactos de la MIA. Lo que en particular es considerado de alta prioridad debido a que los estudios geohidrológicos, muestran la presencia de un acuífero somero local de baja temperatura, contenido en los depósitos de la ignimbrita Tala, la cual presenta depósitos piroclásticos, considerados de alta permeabilidad

(Gutiérrez-Negrín, 1991; Salinas-Ocampo, 2019). Durante el reconocimiento en campo, se observaron diversas infraestructuras (tubería) utilizada en las actividades de barrenación en los años 80's para la conducción y descarga de fluidos hacia cauces y barrancas (Figura 2). Es importante resaltar que es conocida la presencia de metaloides en zonas en explotación geotérmica y sus efectos nocivos a la salud. Al respecto, los resultados de nuestros análisis químicos en los sedimentos

de lodos recolectados durante el recorrido en campo en uno de los estanques (Figura 2), confirman una alta concentración de As (59 ppm= $\text{mg/kg}=\text{mg/l}$). En México, el límite máximo permisible de arsénico en suelo con base en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 es de 22 mg/kg con pH menor a 6.5, mientras que para suelos con pH mayor o igual a 6.5, el límite aumenta a 40 mg/kg (SEMARNAT, 2007). Para el caso del agua, la norma NOM-001-SEMARNAT-2021

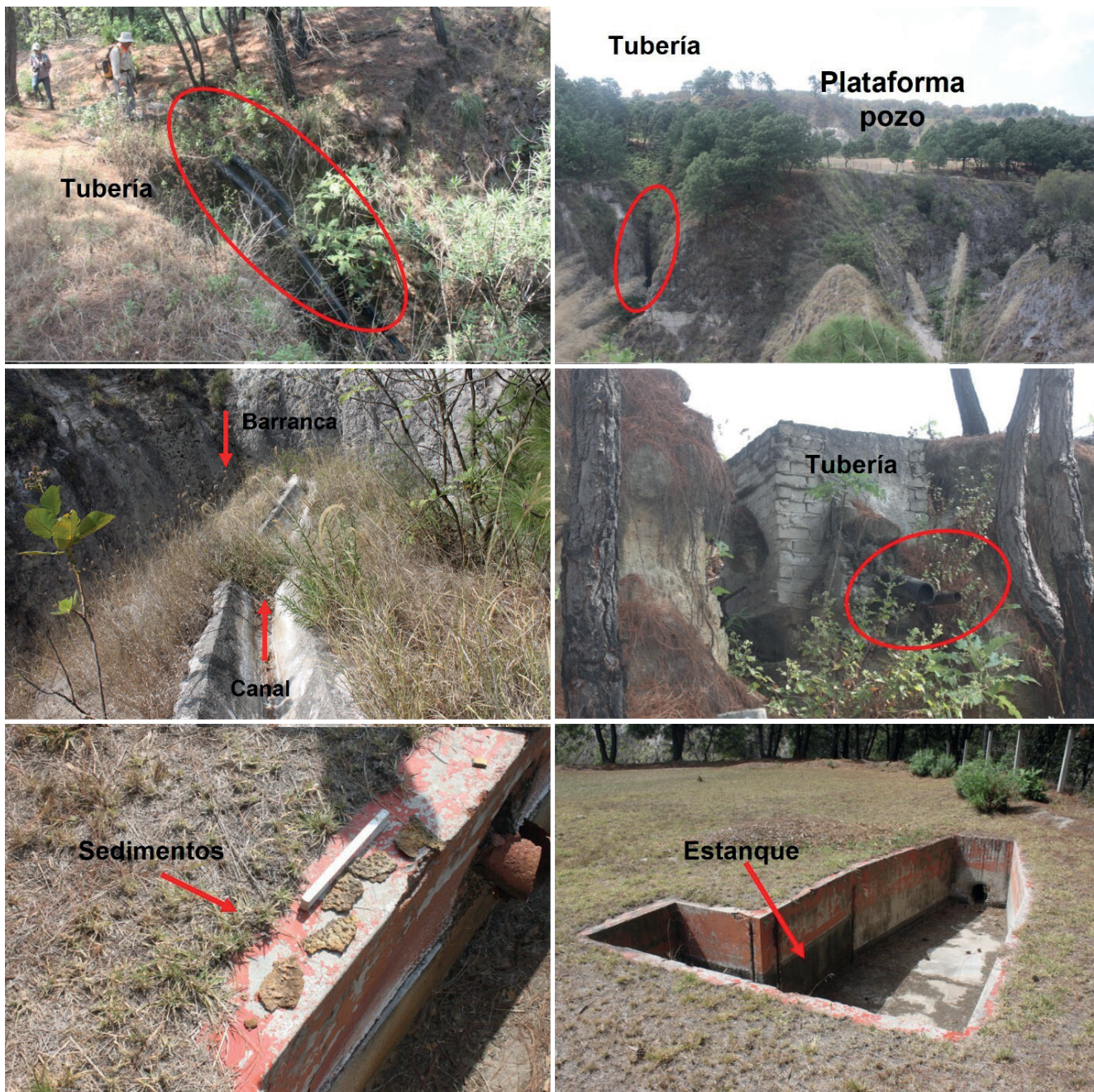


Figura 2. Tuberías y canales de descarga hacia las barrancas aledañas a los pozos, dentro del campo Cerritos Colorados.

establece un límite máximo permisible de 0.20 mg/L de arsénico para riego de áreas verdes y 0.10 mg/L de arsénico en aguas residuales destinadas a infiltración y otros riegos (SEMARNAT, 2022), mientras que para agua potable es de 0.010 mg/L (10 µg/L), con base en la norma NOM-127-SSA1-2021 y la Organización Mundial de la Salud (SSA, 2021; WHO, 2017). Debido a lo delicado de este punto, es necesario el manejo adecuado de residuos líquidos; aguas geotérmicas, residuales y fluviales, con base en la normativa aplicable. Además, de una evaluación integral del impacto potencial que pueden generarse en los diferentes sustratos, así como considerar acciones para su adecuado manejo.

- c) En la rehabilitación de los pozos existentes, la MIA menciona que: “*Los pozos actualmente perforados han estado cerrados por más de 15 años, y no se tiene conocimiento de su estado actual (2008), considerando varios aspectos; estado mecánico e incrustaciones en la zona permeable del yacimiento y a través de la tubería de ademe y revestimiento*”.

Observaciones: El documento no hace referencia a las posibles acciones o alternativas de intervención para la rehabilitación de los pozos que resulten afectados en su estructura, así como el manejo de los posibles residuos tóxico que se generen durante su rehabilitación. Contenidos que fueron confirmados con nuestros resultados de las muestras de sedimento analizadas y mostrados en el inciso (b). Por tanto, los datos de la composición de la salmuera son indispensables, debido a que algunos de los precipitados que se forman en los pozos, pueden ser catalogados como residuos peligrosos, en cantidades superiores a las permitidas por las normas vigentes, por lo que requieren un manejo adecuado para evitar la contaminación del suelo y cuerpos de agua (Soltani *et al.*, 2021).

- d) En el apartado de materiales que se usarán durante la perforación de nuevos pozos geotérmicos, se mencionan: *aditivos, polímeros, emulsificantes*, entre los principales materiales que se utilizarían en la barrenación. **Observaciones:** No se hace referencia a la composición química, propiedades, u hojas de datos de seguridad, así como a las condiciones de manejo de dichos productos químicos. Esta información técnica está ausente en la MIA y debería presentarse con detalle, así como definir su adecuado manejo, ya que este tipo de sustancias químicas serán vertidas e introducidas al subsuelo.
- e) Respecto a la generación, manejo y control de emisiones a la atmósfera, la MIA señala que: “*la cantidad de gases incondensables que se descargan a la atmósfera,*

mezclada con el vapor de agua y arrastrada por el aire de la torre de enfriamiento, depende de los pozos que alimentan de vapor a la unidad de generación y principalmente de la zona del campo geotérmico donde se encuentran ubicados. La cantidad de gases incondensables que se extrajo (durante el periodo de evaluación de los pozos), junto con el vapor geotérmico a través de los pozos productores, tiene variaciones considerables en el contenido de gas en por ciento en masa entre los pozos PR 1, 8, 9 y 12, cuyo contenido es de 5.13% (en promedio) en cambio en el pozo PR-13, el contenido se eleva al 15%. Así, la composición química de mezcla de gases de cada uno de los nuevos pozos que en el futuro se perforen sobre dichas plataformas se espera que tengan un contenido promedio muy similar”.

Observaciones: No se especifican, los tipos de gases que se emitirán a la atmósfera, y dado que se ha reportado que las plantas geotérmicas se asocian con altas emisiones de gases no condensables y de efecto invernadero, donde destacan; metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), sulfuro de hidrógeno (H₂S) y amoníaco (NH₃); Kristmannsdóttir & Ármannsson, 2003; D’Alessandro *et al.*, 2013; Manzella *et al.*, 2018). Gases, que sin duda influyen directamente en el aumento de emisiones de efecto invernadero, a nivel local y regional, además de afectar a la vegetación arbórea y arbustiva en las inmediaciones del campo, entre otras afectaciones.

- f) En cuanto a la emisión de sulfuro de hidrógeno (H₂S), se menciona que: “*se obtuvieron valores de concentración del H₂S entre los 75.3 y 226 µg/m³, en un radio no mayor a 3 km., tomado como centro la ubicación de las centrales de generación del proyecto geotérmico. Tanto en la periferia de los 3 km de radio como dentro del mismo, no existen asentamientos humanos que puedan verse afectados por las emisiones del H₂S provenientes de la central geotérmica*”.

Observaciones: Durante el reconocimiento de campo, se observó que, dentro del radio de 3 km del predio en concesión, se encuentra el ejido Adolfo López Mateos (~30 habitantes), el cual cuenta con actividades agrícolas y turísticas. Además, no se menciona el nivel de afectación del personal que trabajará en el campo geotérmico, ni el proceso acumulativo en los ecosistemas aledaños (D’Alessandro *et al.*, 2013). La concentración máxima permisible de sulfuro de hidrógeno (H₂S) en México varía según el tipo de exposición. Para ambientes laborales, la NOM-010-STPS-2014 establece un límite de exposición media ponderada de 8 horas de 10 ppm (14 mg/m³) y un límite de exposición

de corto plazo (15 minutos) de 15 ppm (21 mg/m³). Esta norma aplica en entornos industriales, donde el personal puede estar expuesto a vapores de H₂S, como refinerías, plantas químicas o campos geotérmicos (STPS, 2014). Aunque no existe una norma mexicana específica para la exposición ambiental general, la Organización Mundial de la Salud (OMS) indica que, concentraciones superiores a 7 µg/m³ (≈0.005 ppm) pueden generar molestias olfativas y efectos adversos leves en personas sensibles (WHO, 2000), que por las mediciones con las que se cuenta, se aplicaría para los casos de trabajadores y habitantes del ejido Adolfo López Mateos.

- g) Sobre el nivel de contaminación auditiva, la MIA argumenta que: “*Con base en la experiencia de otros campos geotérmicos en el país, los valores de nivel de ruido emitidos por el silenciador de mezcla o por el mismo pozo dependerán principalmente de la producción del flujo geotérmico. Por ejemplo, si un pozo se abre totalmente a su máxima producción, el nivel de ruido máximo permisible es de 68 dB (A), indicado en la norma NOM-081-SEMARNAT-1994, el cual se registrará a una distancia de 80 metros de la fuente emisora*”, asimismo se menciona que “*para una descarga de 37 t/h de vapor, el nivel de ruido de 68 dB (A) se registrará a una distancia de 20 metros*”.

Observaciones: Considerando que la capacidad de producción estimada para ocho pozos productores es de 40 t/h, con base en la información presentada en la MIA, es factible que se rebase el límite máximo permisible para la emisión de ruido de las fuentes fijas, especificado en 68 dB (A), según la norma NOM-081-ECOL-1994 (SEMARNAT, 1994), por tanto, será indispensable que los trabajadores cuenten con el equipo de seguridad apropiado. Un aspecto importante a destacar es que la MIA, no contempla la afectación por ruido al ecosistema, lo cual es de importancia por su impacto dentro el bosque.

- h) Contaminación por vibraciones y radiactividad, la MIA menciona que: “*no se prevé la existencia de fuentes de vibración permanente ni radiactividad térmica o luminosa*”.

Observaciones: La consideración no es precisa, pues los análisis de identificación de impactos en campos geotérmicos realizado a nivel global, indican que, existe un aumento del nivel de radiación electromagnética en el ambiente, y un aumento en la temperatura del aire local por irradiación de calor durante la etapa de producción de energía geotérmica (SEA, 2022), efectos que sin duda son impactos que deben ser identificados y evaluados.

- i) En la propuesta de la MIA sobre la ubicación de la unidad de generación, se indica que *se asentará sobre parte del cauce del arroyo El Caracol*.

Observaciones: En la descripción de los impactos no se detalla la longitud del tramo que se modificará, ni se indican las afectaciones que tendrán estas modificaciones al cauce del arroyo El Caracol. Además, este impacto en específico, no se considera en la matriz de evaluación e interacciones de impactos de la MIA. Asimismo, no se hace mención del permiso para construcción o modificación de obras en cauces, mismo que debe ser expedido de forma oficial por la Comisión Nacional del Agua (CNA).

- j) En relación con la gestión y manejo de los residuos peligrosos y de manejo especial.

Observación: Falta incorporar el plan de manejo para residuos peligrosos y manejo especial (como cartón, metal, madera, plásticos). Esto de acuerdo con lo que señalan las normas NOM-160-SEMARNAT-2011 y NOM-161-SEMARNAT-2011.

- k) En el programa de conservación y protección a la fauna silvestre, se menciona que: “*no se propone llevar a cabo un programa de rescate de especies faunísticas, solo se reubicarán o ahuyentarán a los animales que habiten en guaridas que serán afectadas por las obras*”.

Observaciones: Esta acción requiere ser evaluada por expertos en la materia, debido a que la migración de cualquier fauna puede alterar otras comunidades, y hasta repercutir en los niveles tróficos del ecosistema local. Sobre este punto, la MIA no menciona medidas específicas o estrategias que permitan saber que los puntos anteriores han sido tomados en cuenta.

- l) En la descripción de los impactos que generaron las obras en los años 80's, la MIA señala lo siguiente: “*las actividades de exploración en la zona geotérmica, ocurridas en 1980-1989, se reflejaron principalmente en la vegetación, la fauna silvestre y el suelo. En términos generales, estos impactos se tipificaron en dos tipos de afectaciones: una física, provocada por el cambio de uso de suelo para la construcción de caminos, plataformas y presas de lodos, con una superficie de 24 has., y otra química durante la apertura de los pozos geotérmicos para determinar su capacidad de producción de vapor, y debido a la baja eficiencia de los silenciadores empleados en ese entonces para la separación de la mezcla agua-vapor (fluido geotérmico), la vegetación circundante a las plataformas se vio afectada en diferentes grados, abarcando un área de 28 has.*”

Observaciones: En esta descripción no se hace mención del destino que tuvieron los fluidos geotérmicos gene-

rados en esta etapa. Durante la etapa de reconocimiento en campo, se pudieron observar diversas tuberías de conducción, encauzadas a las barrancas circundantes, en todo el campo Cerritos Colorados (Figura 2).

- m) Los datos de las coordenadas sobre la ubicación de las obras del proyecto Cerritos Colorados, que incluye la línea de transmisión, muestran que cruzará zonas de uso restringido (ZUR), contempladas en el Plan de Manejo Bosque La Primavera.

Observaciones: En la MIA no se menciona que el desarrollo del proyecto geotermoeléctrico cruzará la zona de uso restringido (ZUR). Lo que es importante, pues de acuerdo con el Plan de Manejo Bosque La Primavera, en esta zona “no se permite la remoción de vegetación forestal” (CONANP, 2000), por tanto, existe un notorio conflicto entre lo que prohíbe el Plan de Manejo del Bosque de la Primavera y lo que se propone en la MIA (2008) del CGCC.

- n) La MIA, señala un monitoreo a cuerpos de agua en relación con: “*parámetros fisicoquímicos del monitoreo de manantiales, norias y pozos alrededor del campo geotérmico*”,

Observaciones: En este monitoreo, no se mencionan elementos contaminantes como el Arsénico y Boro, no obstante que se ha manifestado en la MIA que, “*las presas de lodos contendrán aguas a altas temperaturas y elementos tóxicos a elevadas concentraciones como los son: Boro y Arsénico*”. Por lo que es necesario realizar y programar dentro de la MIA un monitoreo más completo

de los cuerpos de agua y suelos que al menos incluyan; Boro, Arsénico y Mercurio.

4.2 Análisis de producción sustentable del Campo Geotérmico Cerritos Colorados

Para lograr la sustentabilidad en la producción geotérmica, Axelsson, (2010) propone varios métodos de producción, que se esquematizan en la Figura 3A. Donde el modelo “1”, representa el nivel de una producción constante, es decir, por debajo del límite sustentable durante muchos años, lo cual es poco práctico debido a que la capacidad de producción sustentable de los sistemas geotérmicos, es generalmente desconocida al iniciar la producción. El modelo “2” sugiere aplicar un aumento gradual en la producción hasta que se evalúe el potencial sustentable. El modelo “3” muestra una estrategia que consiste en la producción excesiva intermitente, con ciclos de producción alta, seguidos de periodos de descanso para permitir la recuperación del sistema. Finalmente, el modelo “4”, propone reducir la producción, después de un periodo de explotación excesiva, para después mantener una producción en equilibrio durante los siguientes 150-170 años. En resumen, las diferentes estrategias de producción propuesta por el autor para aumentar la longevidad de un yacimiento, demuestran que, el potencial de producción sustentable depende directamente, tanto de la estrategia de producción como de los avances tecnológicos. En la Figura 3B se observa que la producción de energía puede incrementarse gradualmente hasta alcanzar un equilibrio sustentable, lo que es determinado por factores como: evolución

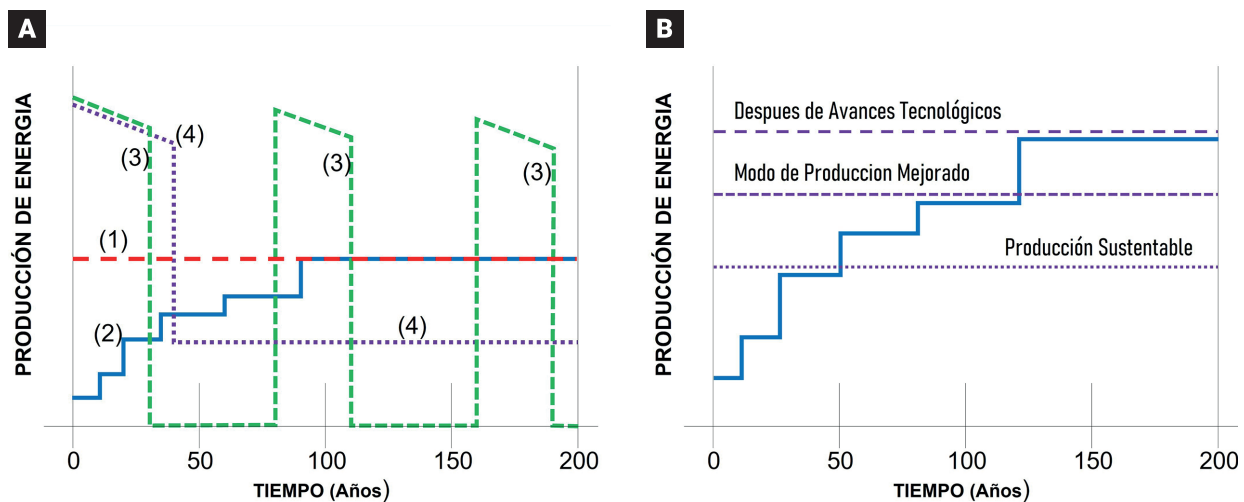


Figura 3. A) Representación esquemática de 4 diferentes métodos de producción sustentable en un sistema geotérmico; 1 constante (líneas rojas), 2 aumento gradual (líneas azules), 3 excesiva intermitente (líneas verdes) y 4 en equilibrio (líneas moradas). B) Potencial de producción sustentable de un sistema geotérmico línea azul: representa aumento de producción a lo largo del tiempo, las líneas moradas representan la producción sustentable (modificado de Axelsson, 2010).

temporal del sistema, la incorporación de nuevos conocimientos y mejoras tecnológicas.

Con base en la propuesta de Axelsson *et al.*, (2001), se presenta un análisis teórico sobre la factibilidad de la sustentabilidad del CGCC, donde según los autores, la gestión sustentable de un yacimiento geotérmico, estará en función directa de la utilización del recurso a una tasa de producción adecuada, que permita mantener esta condición durante un período de tiempo prolongado, del orden de 100 a 300 años.

En la Tabla II, se presentan una serie de estimaciones del potencial geotérmico (MW) y la vida útil en años, que varios autores e instituciones proyectaron para el CGCC. Están basadas en diferentes relaciones entre el potencial de producción y vida útil en años de operación. Sin considerar los criterios de producción sustentable propuestos por Axelsson *et al.* (2001).

Las proyecciones con las tasas de potencial de producción consideradas en la Tabla II. Indican que el CGCC no presentaría las condiciones para ser clasificado como un sistema geotérmico sustentable, pues las proyecciones solo contemplan un tiempo de operación de entre 20 y 30 años, esto debido a que son producto de estimaciones que tienen como premisa la factibilidad económica en el corto y mediano plazo (20 a 30 años). Estas estimaciones,

claramente no consideran los criterios de producción sustentable del recurso geotérmico, por tanto, limitan la posibilidad de prolongar su vida útil (Axelsson *et al.*, 2001; Axelsson, 2010).

Sí se considera el factor toneladas/hora (t/h) de vapor, como otra variable para estimar la proyección de tiempo de operación del CGCC, la información contenida en la Tabla III, parece inconsistente, pues según los datos considerados en la MIA (UACH, 2008), para la primera etapa de desarrollo del campo geotérmico, se proyectaría generar 25 MW con una estimación de producción de 430 t/h de vapor. Sin embargo, de acuerdo con datos históricos de otros campos geotérmicos “cada unidad de potencia de 25 MW requiere 220 t/h de vapor para operar” (Sánchez, 2003). Por tanto, sí una planta de condensación requiere de 7 t/h de vapor para producir 1 MW; aplicando una regla de proporcionalidad, nos indicará que se necesitarían 175 t/h de vapor para producir 25 MW. Lo que demuestra que para producir 25 MW, solo se requeriría aproximadamente la mitad de la capacidad de producción de vapor programado para el campo. Lo que refleja una aparente falta de rigor en el cálculo de la proyección del tiempo de vida útil del campo, o bien, en la información publicada del cálculo, no se considera la incidencia de otros factores que afectarían la eficiencia de los equipos considerados en la estimación del poten-

Tabla II. Estimación preliminar de potencial geotérmico de Cerritos Colorados.

Referencia	Potencial geotérmico (MW)	Vida útil (años)
Gutiérrez Negrín (1988)	100 o 55	19 35
Japan International Cooperation Agency (JICA, 1989)	75	20
Maciel-Flores & Rosas-Elguera, 1992	100	17
CFE -volumétrico (Sánchez-Velasco, 2003)	248	20
CFE-Numérica (Sánchez Velasco, 2003)	125	20
West Japan Engineering Consultants (West JEC, 2005)	75	30
Manifestación de Impacto Ambiental (UACH, 2008)	25 75	37

Tabla III. Relación agua vapor en los campos geotérmicos de México (Datos de producción tomados de Cárdenas, 2010).

Campo	Producción de vapor (t/h)	Producción de agua (t/h)	Relación vapor/ agua (aproximada)
La Primavera (estimado con datos de la MIA)	430	860	1:2
Cerro Prieto, BC	5075	7400	1: 1.5
Los Humeros, Pue.	526	54	10: 1
Tres Vírgenes, BCS	61	200	1: 3
Los Azufres, Mich.	1622	540	3: 1

cial de producción. Por tanto, a los niveles de extracción de vapor que originalmente se plantearon en el proyecto, es cuestionable el carácter de sustentabilidad de la producción.

Finalmente, la estimación de vida útil del CGCC basada en la estrategia de producción (Tabla III), y considerando que cada pozo produce una *mezcla de agua-vapor, en proporciones de 2 t/h de agua por 1 t/h de vapor* (MIA), se traduce en una baja eficiencia en la producción de vapor por pozo, en comparación con la mayoría de los otros campos geotérmicos en producción del país (Tabla III). Lo que indica que es indispensable reevaluar la tasa de declinación de producción de vapor del yacimiento. Además, que, al ser menos eficiente en términos energéticos, requiere mayor infraestructura para el manejo de agua geotérmica residual y por tanto representa mayores riesgos de contaminación térmica o química si no se implementa un sistema de reinyección o tratamiento adecuado.

Un factor más que refuerza la idea de reevaluar la producción del campo geotérmico, se desprende del análisis del programa de desarrollo del mismo CGCC. Donde se proyecta la perforación de nueve pozos productores, más cinco pozos inyectoros, y la intervención y/o rehabilitación de cuatro pozos existentes (tres para producción y uno para inyección). En total se contemplan 18 pozos para generar 25 MW de electricidad, que a partir de los datos que muestran las tablas II y III, la estimación es cuestionable, pues inexplicablemente está basada en una baja eficiencia de producción de vapor por pozo, que se traducirá en un menor potencial de generación, en comparación con los parámetros de producción de otros campos geotérmicos en operación de México. En la Tabla IV se muestra la capacidad instalada en MW y número de pozos productores e inyectoros en los campos geotérmicos en explotación en México.

Considerando la información anterior, es pertinente un análisis

integral que permita ponderar el peso de cada uno de los factores considerados para estimar el verdadero potencial de los pozos del CGCC, reevaluar su tiempo de vida, y contar con los elementos para replantear las estrategias de producción. (Tablas II, III y IV).

4.3 Recomendaciones para el desarrollo de un futuro Campo Geotermoeléctrico en Cerritos Colorados

Las recomendaciones de la Tabla V, son producto del análisis de tres elementos básicos: I. El análisis general de la MIA, que incluye los factores identificados que no fueron considerados en su evaluación (2008), II. Las proyecciones en cuanto a la longevidad del campo geotérmico y III. La información obtenida durante el reconocimiento en campo. Estas recomendaciones son de carácter propositivo y no limitativo, y enfocadas en lo particular a ser aplicadas en una eventual reactivación del CGCC y en general para el desarrollo de futuros campos geotérmicos en el país. Siempre privilegiando el enfoque de sustentabilidad, en sus tres vertientes; conservación del medio ambiente, beneficio social, y desarrollo económico.

En cada recomendación, se presenta su fundamento, su aplicación a nivel local (CGCC) o general y se indica la etapa en que deberán aplicarse las acciones (construcción, operación y cierre), incluyendo dos etapas complementarias “evaluación y ampliación”.

Las recomendaciones anteriores emergen como áreas de oportunidad y sugieren estrategias para minimizar impactos negativos, tanto en el desarrollo del CGCC, como para el futuro desarrollo de otros campos geotérmicos en el país, utilizando nuevas prácticas de evaluación y la aplicación de tecnologías que reduzcan emisiones de contaminantes y por tanto reduzcan el impacto al medio ambiente.

Tabla IV. Capacidad instalada y número de pozos productores e inyectoros en los campos geotérmicos en explotación en México (CFE, 2015).

Campo	Capacidad Instalada (MW)	Pozos productores	Pozos inyectoros
<i>Cerro Prieto, BC.</i>	570	154	18
<i>Los Humeros, Pue.</i>	68.8	22	3
<i>Tres Vírgenes, BCS.</i>	10	4	1
<i>Los Azufres, Mich.</i>	191.6	40	5
<i>Cerritos Colorados, Jal. (dato de la MIA).</i>	25	12	6

Tabla V. Recomendaciones por etapa para el desarrollo del CGCC y para futuros campos geotérmicos en México.

	Recomendación, y/o fundamento	Aplicación	Etapa
1	Es fundamental revisar los instrumentos de normatividad ambiental vigentes en nuestro país, ya que el caso de La Primavera es un ejemplo claro, donde se muestra una franca contradicción e incongruencias entre las disposiciones que marcan la Manifestación de Impacto Ambiental, y el Programa de Manejo del Área Natural Protegida.	Aplicable para todos los campos geotérmicos de México.	Evaluación, operación y ampliación.
2	El desarrollo del campo Cerritos Colorados debe priorizar la preservación del valor ecológico del bosque, respetar las zonas de protección y de uso restringido, consideradas como corredor biológico, ya que en éstas se encuentra la mayor biodiversidad del bosque.	Solo para el Campo Cerritos Colorados	Evaluación.
3	Para lograr la sustentabilidad de un yacimiento geotérmico, es indispensable el desarrollo e implementación de estrategias de producción a largo plazo, mediante la aplicación de modelos numéricos de simulación, que permitan proyectar la evolución del sistema y mantener la productividad más allá de los 30 años de operación. Estos modelos deben considerar las posibles pérdidas de presión, variaciones térmicas y procesos de recarga del reservorio, a fin de optimizar el aprovechamiento energético. Sin perder de vista que, la efectividad de la aplicación de estos, estará en función de su periódica actualización, pues esto permitirá reevaluar el comportamiento del yacimiento en el tiempo. (Faust & Mercer, 1979; Ingebritsen et al., 2010). En el caso específico del Campo Geotérmico Cerritos Colorados (CGCC) (Tabla II), la aplicación de este tipo de modelos resulta fundamental para reevaluar el comportamiento del yacimiento y prolongar su vida útil.	Campo Cerritos Colorados y en todos los campos geotérmicos de México.	Evaluación.
4	En el caso del proyecto CGCC, es preciso evaluar los cambios en las condiciones de la escorrentía superficial, que puede provocar la modificación parcial del cauce del arroyo el Caracol.	Campo Cerritos Colorados	Evaluación.
5	Como parte de la evaluación integral de impactos ambientales, es necesario contar con estudios de riesgos geológicos-geofísicos con el propósito de evaluar posibles procesos de remoción en masa (subsistencia, deslizamientos de terreno, caída de rocas, inestabilidad de taludes), en los que debe incluirse; análisis de alteración hidrotermal y sismicidad inducida, previniendo escenarios de deslizamiento de terrenos, como los que se han reportado en otros campos geotérmicos (SEA, 2022). Pues además de afectar el desarrollo sustentable del campo, se traducen en pérdidas económicas, al afectar instalaciones como la planta de energía, tuberías y caminos, entre otros.	Campo Cerritos Colorados y en todos los campos geotérmicos de México.	Evaluación, operación y ampliación.
6	No obstante que las actividades de un desarrollo geotérmico no son consideradas como altamente riesgosas, y no están obligados a presentar un estudio de riesgo ambiental, es recomendable realizar programas de prevención de escenarios de riesgo que incluyan: caídas de líneas, fugas y derrames, incendios, entre otros.	Aplicable a todos los campos geotérmicos de México.	Evaluación, operación y ampliación.
7	Desarrollar estrategias para planificar y llevar a cabo el modelado de desarrollo regional, considerando los efectos de interferencia de presión y temperatura entre campos geotérmicos adyacentes (Axelsson, 2010) como puede darse en caso de que se desarrollen los campos geotérmicos aledaños, por ejemplo del volcán Las Planillas.	Esta aplicaría en el supuesto de entrada en operación de los campos de Cerritos Colorados y volcán Las Planillas.	Evaluación y operación.
8	Desarrollar una guía para la Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos geotermoeléctricos, en la cual se determinen de manera específica los impactos a evaluar (matriz de evaluación de impactos), las situaciones de riesgo, así como los requerimientos normativos definidos y regulados sobre gestión ambiental integral para desarrollos geotermoeléctricos. Esta recomendación tiene el propósito de cubrir algunos impactos que es necesario evaluar en este tipo de proyectos, y que en la MIA del proyecto Cerritos Colorados, no fueron considerados.	Se recomienda su desarrollo para todos los campos geotérmicos de México.	Evaluación, operación y ampliación.
9	Cambiar los fluidos de perforación de base bentonítica y diésel por un fluido base aire y gas, con polímeros biodegradables para atenuar el impacto al subsuelo y mantos acuíferos, fomentando que el desecho de lodo sea mínimo (Ahmed & Kalkan, 2019).	Se recomienda para todos los campos geotérmicos de México.	Construcción (perforación), operación y ampliación.
10	Realizar programas que equilibren la inyección y que se inyecte la misma cantidad de fluido que se extrae, lo cual ayudará a mantener estables las presiones del yacimiento, así como incrementar el potencial de producción sustentable (Hiriart, 2011).	Se recomienda para todos los campos geotérmicos de México.	Operación y ampliación.

11	Se recomienda el uso del sistema cerrado de inyección de salmuera (inyección en caliente) (Hiriart, 2011). En lugar de un sistema abierto, como el que se pretende implementar en el CGCC (MIA, 2008). El sistema cerrado de inyección de salmuera, favorece que el fluido mantenga su presión y temperatura desde los separadores, hasta la zona de inyección. Lo anterior, mantiene la salmuera presurizada en toda su trayectoria, desde su extracción hasta su disposición final en los pozos inyectoros, garantizando que en ningún momento estará en contacto con el medio ambiente, evitando cualquier posibilidad de contaminación durante la operación normal del sistema. Otra ventaja importante es que la salmuera se regresa al yacimiento a alta temperatura, propiciando el uso más eficiente de la energía extraída del yacimiento. Este sistema cerrado, garantiza que las sales se regresen al yacimiento, evitando su precipitación en las instalaciones superficiales o en el pozo inyector, lo cual reduce costos de mantenimiento del campo.	Campo Cerritos Colorados.	Operación.
12	Utilizar inhibidores de corrosión y taponamiento de tuberías y pozos (Hiriart, 2011).	Se recomienda para todos los campos geotérmicos de México.	Operación y ampliación.
13	Es recomendable incluir métodos de estimulación de pozos, en especial para los pozos perforados e inoperantes desde los años 80's. (Flores Armenta et al., 2012).	Campo Cerritos Colorados.	Operación
14	Se recomiendan monitoreos continuos de contaminantes como: F, B, Hg y As, de las aguas geotérmicas residuales y drenajes. En caso de rebasar los límites permisibles, utilizar tecnologías de remoción de contaminantes, antes de la descarga o reinyección (Mercado-Borrayo et al., 2018).	Se recomienda para todos los campos geotérmicos de México.	Operación y ampliación.
15	Para disminuir las emisiones al ambiente de Hg y de H ₂ S, así como el olor del H ₂ S se deben implementar las tecnologías de punta para enfrentar este impacto (Aguilar-Dodier et al., 2020; D'Alessandro et al., 2013).	Se recomienda para todos los campos geotérmicos de México.	Operación, ampliación.
16	Aprovechamiento integral de la energía térmica en la infraestructura del campo: calefacción de oficinas, invernaderos e instalaciones piloto de enseñanza (Santoyo Gutierrez et al., 2010; Hiriart, 2011)	Recomendable para todos los campos geotérmicos de México.	Operación ampliación.
17	Se recomienda actualización de equipos con tecnologías amigables con el ambiente, y más eficientes que las utilizadas en los 80, por ejemplo: en silenciadores, separadores de fluido geotérmico, entre otros (UACH, 2008).	Solo para el Campo Cerritos Colorados, para no repetir errores en campañas pasadas.	Operación

5. Discusión

El concepto de sustentabilidad es fundamental en el desarrollo y evaluación de proyectos energéticos, ya que busca minimizar los impactos ambientales negativos, al tiempo que se generan beneficios sociales y económicos. Este principio resulta especialmente relevante en el caso del aprovechamiento geotérmico, como lo demuestra el caso del proyecto Cerritos Colorados que se ubica dentro de un Área Natural Protegida (ANP).

Este proyecto, cuya etapa de exploración inició en la década de los 80's (JICA, 1989), representa un ejemplo clave para evidenciar las omisiones cometidas en una época en la que no se aplicaban instrumentos regulatorios ambientales adecuados en México. El análisis realizado, muestra que, en ausencia de tales instrumentos, los impactos sobre el bosque fueron significativos, reflejados en la pérdida de cobertura vegetal, afectación a la fauna silvestre y erosión del suelo (UACH, 2008), factores que

llevaron a la clausura del proyecto por parte de las autoridades ambientales.

Este estudio también permitió revisar la Manifestación de Impacto Ambiental (MIA) elaborada en 2008 como parte de la perspectiva para una eventual reactivación del proyecto. El análisis evidencia un rezago considerable en México respecto a los aspectos técnicos, sociales y normativos que deben contemplarse para un aprovechamiento sustentable de los recursos geotérmicos. Los hallazgos plantean serias dudas sobre la viabilidad ambiental del proyecto Cerritos Colorados, lo que ha contribuido a la postergación de su reapertura durante más de dos décadas.

Es pertinente aclarar que los resultados relacionados con la detección de omisiones ambientales en la MIA (2008), no buscan descalificar el trabajo realizado, sino fortalecerlo. El objetivo es contribuir a la actualización y mejora de los instrumentos de evaluación ambiental, particularmente en

proyectos que se desarrollen en ANP, donde debe prevalecer una regulación estricta.

Los elementos identificados en este análisis pueden agruparse en tres grandes temáticas: normativos, técnicos y de sustentabilidad.

5.1 Elementos normativos

La MIA, como principal instrumento normativo para evaluar proyectos geotérmicos, presenta debilidades en su implementación, seguimiento y en la inclusión de participación ciudadana e institucional. Además, carece de normas técnicas específicas que orienten adecuadamente el desarrollo de estos proyectos.

En el caso de Cerritos Colorados, se detectó un conflicto legal entre los lineamientos del Plan de Manejo del ANP Bosque La Primavera y la ubicación proyectada de infraestructura del campo geotérmico. Específicamente, se identificó que la línea de transmisión cruza zonas de uso restringido, donde está prohibida la remoción de vegetación, lo cual representa una violación al marco legal. Ante ello, resulta imprescindible replantear la ruta de la línea o, en su caso, actualizar el Plan de Manejo con base en las condiciones actuales del bosque. Este conflicto ilustra la urgente necesidad de armonizar los marcos normativos, ya que las inconsistencias legales entre la MIA y el Plan de Manejo ponen en riesgo la legalidad del proyecto y su aceptación social.

Pese a este contexto, los impactos podrían reducirse si se respeta la zonificación establecida, evitando cualquier intervención en zonas de protección o uso restringido, con énfasis en la conservación del valor ecológico del bosque.

5.2 Elementos técnicos

El análisis de la MIA (2008) revela omisiones importantes en la matriz de evaluación de impactos, al no incluir diversos aspectos críticos respecto a criterios que hoy son considerados estándar en la evaluación de proyectos geotérmicos a nivel internacional. Entre ellos destacan: subsidencia del terreno, sobreexplotación de acuíferos, micro sismicidad inducida, contaminación por metales pesados, las afectaciones a fuentes termales, drenajes naturales y fauna silvestre. Estas omisiones contradicen las buenas prácticas internacionales y debilitan la validez del documento como instrumento de gestión ambiental.

En este contexto, la implementación de guías o matrices de evaluación para cada tipo de proyecto (geotérmico, petrolero, industrial, etc.), son de la mayor importancia para que todos los aspectos e impactos ambientales sean correctamente evaluados. En el caso de México, es necesario el desarrollo de una matriz de evaluación de impactos ambientales específica para proyectos

geotermoeléctricos que integre todos los impactos inidentificados a nivel internacional.

En los análisis realizados para el caso del CGCC, se identificaron contradicciones significativas, como la ambigüedad sobre el manejo de aguas residuales domésticas e industriales, lo cual podría comprometer cuerpos de agua superficiales y subterráneos, especialmente en un entorno de alto valor ecológico. También se evidenció la falta de información técnica sobre los productos químicos utilizados en perforación, el manejo de residuos peligrosos y la mitigación de emisiones atmosféricas. Además, de la presencia de altas concentraciones de arsénico en los sedimentos analizados y la proyección de emisiones de gases como H₂S, sin planes de mitigación robustos, evidenciando un manejo ambiental deficiente.

Las recomendaciones y deficiencias detectadas en este caso (CGCC), hacen necesario que la MIA incluya estrategias claras para la gestión ambiental de aguas geotérmicas, lodos de perforación y gases residuales. Todo sustentado en tecnologías de punta, que minimicen la presencia de elementos contaminantes como As, Hg, Br, F y H₂S. Además, de incorporar medidas preventivas para anticipar contingencias ambientales, riesgos geológicos y emisiones de gases contaminantes, protegiendo así ecosistemas, comunidades aledañas y al personal operativo.

Asimismo, la MIA presenta discrepancias en los parámetros utilizados para estimar la producción y la cantidad de pozos proyectados, lo cual sugiere un diseño ineficiente. Frente a ello, se recomienda propuestas técnicas como modelos numéricos de simulación, estrategias de producción e inyección balanceada, sistemas cerrados de manejo de salmuera, uso de fluidos de perforación biodegradables y tecnologías avanzadas para mitigar impactos y optimizar la eficiencia del yacimiento.

Finalmente, si el proyecto llegara a reactivarse, será indispensable actualizar la infraestructura con tecnologías más limpias y eficientes, en contraste con los equipos utilizados en los años 80's, cuya obsolescencia contribuyó a generar impactos significativos en el ecosistema.

5.3 Elementos de sustentabilidad

La incorporación de criterios de sustentabilidad en los instrumentos de evaluación ambiental, es impostergable. Aplicar prácticas y tecnologías sustentables a lo largo de todo el ciclo de vida del proyecto (exploración, construcción, operación, mantenimiento y cierre), no solo minimiza impactos negativos, sino que también incrementa la vida útil de los campos geotérmicos.

En cuanto a las consideraciones del cálculo de la proyección del modelo de producción para el CGCC. Los datos analizados revelan inconsistencias técnicas en la relación agua-vapor y la

eficiencia energética (ver Tablas III y IV), comprometiendo la sustentabilidad del modelo de producción. El análisis indica que el diseño del proyecto prioriza la rentabilidad económica a corto y mediano plazo (20–30 años), sin asegurar su viabilidad a largo plazo (100–300 años), lo cual contradice los principios básicos de sustentabilidad.

Desde la dimensión social, resulta esencial que la MIA contemple los impactos sociales sobre comunidades locales y promueva mecanismos de redistribución de beneficios, así como programas de monitoreo participativo e inclusión de actores sociales en la toma de decisiones, incluido el manejo sustentable y las acciones de remediación en caso necesario. Estas acciones fortalecerían la gobernanza del proyecto y su legitimidad social.

6. Conclusiones

El análisis integral de la Manifestación de Impacto Ambiental (MIA), la eficiencia en la producción geotérmica y las condiciones del entorno del proyecto Cerritos Colorados, revela una serie de deficiencias técnicas, normativas y de sustentabilidad que comprometen su viabilidad ambiental a largo plazo. La omisión de impactos ambientales relevantes, las contradicciones internas en el manejo de fluidos y emisiones contaminantes a la atmósfera, así como la falta de estrategias de producción sustentable, evidencian que el proyecto fue concebido bajo una lógica de rentabilidad económica a corto plazo, sin considerar los principios de conservación ecológica ni la normativa vigente para Áreas Naturales Protegidas.

A pesar de los desafíos identificados, las recomendaciones propuestas delinean una ruta clara para reconfigurar el proyecto con un enfoque de desarrollo sustentable. Bajo un estricto cumplimiento del marco legal ambiental, y con acciones que no solo permitirían minimizar los impactos negativos, sino también optimizar la eficiencia energética del yacimiento y asegurar la conservación de los ecosistemas del Bosque La Primavera. Además, estas estrategias fortalecen la planeación ambiental del proyecto y son aplicables a otros desarrollos geotermoeléctricos en el país, contribuyendo así a la consolidación de una política nacional de aprovechamiento geotermoeléctrico con enfoque sustentable. Además, al incorporar criterios de sustentabilidad y por ende aumentar la vida útil de los campos geotérmicos, se logrará detonar el desarrollo energético con un bajo impacto ambiental y socialmente aceptable.

En este contexto, es indispensable que cualquier intento futuro de reactivar el proyecto Cerritos Colorados, esté precedido por una actualización rigurosa de la MIA, en específico, en la evaluación de los impactos ambientales, la implementación de

estudios técnicos complementarios y la participación activa de la sociedad civil, comunidades locales y académicos desde una perspectiva multidisciplinaria. Solo así podrá consolidarse un modelo de aprovechamiento geotérmico verdaderamente sustentable, que armonice los objetivos energéticos del país con la preservación de su patrimonio natural.

El análisis realizado permitió establecer una línea base de los impactos ambientales asociados a cada etapa del desarrollo de proyectos geotermoeléctricos. Esta línea base, junto con las recomendaciones presentadas, busca servir como marco de referencia para futuras evaluaciones de impacto ambiental en México. Asimismo, proporciona elementos clave para el diseño de estrategias orientadas a minimizar dichos impactos en futuros proyectos, con especial énfasis en el caso de una eventual reapertura del campo Cerritos Colorados, en el estado de Jalisco.

7. Agradecimientos

Los autores agradecen a la SECIHTI (Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación) por su apoyo. Esta investigación fue financiada con fondos del proyecto P15: "Exploración geotérmica del complejo volcánico de Cerritos Colorados, Jal.: Estudios de vulcanología, estratigrafía, geoquímica y petrología experimental (CEMIE-GEO)."

8. Referencias

- Aguilar-Dodier, L. C., Castillo, J. E., Quintana, P. J. E., Montoya, L. D., Molina, L. T., Zavala, M., Almanza-Veloz, V., & Rodríguez-Ventura, J. G. (2020). Spatial and temporal evaluation of H₂S, SO₂ and NH₃ concentrations near Cerro Prieto geothermal power plant in Mexico. *Atmospheric Pollution Research*, 11(1), 94–104. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2019.09.019>
- Ahmed, A. W., & Kalkan, E. (2019). Drilling fluids: Types, formation choice and environmental impact. *International Journal of Latest Technology in Engineering*, VIII. www.ijltemas.in
- Axelsson, G. (2010). Sustainable geothermal utilization – Case histories; definitions; research issues and modelling. *Geothermics*, 39(4), 283–291. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2010.08.001>
- Axelsson, G., Gudmundsson, Á., Steingrímsson, B., Pálmason, G., Ármannsson, H., Tulinus, H., Flóvenz, Ó. G., Björnsson, S., & Stefánsson, V. (2001). Sustainable production of geothermal energy: Suggested definition. *IGA News*, 43, 1–2.
- Axelsson, G., Stefánsson, V., & Björnsson, G. (2004). Sustainable utilization of geothermal resources for 100–300 years. In *Proceedings of the Twenty-Ninth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford University.

- Cárdenas, T. R. (2010). *Cómo hacer proyectos geotérmicos*. Foro de Regulación de Energías Renovables, (CRE), México.
- Cataldi, R. (2001). Sustainability and renewability of geothermal energy. In Proceedings of the International Scientific Conference on Geothermal Energy in Underground Mines (pp. 1–4), Ustron, Poland, 21–23 November 2001
- Comisión Federal de Electricidad (CFE). (2015). *Perspectivas de la geotermia en México: La generación de energía eléctrica y el impulso de las energías renovables*. Subdirección de Generación y Coordinación de Proyectos Geotermoelectrónicos, Comisión Federal de Electricidad, México.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). (2000). *Programa de manejo: Área de Protección de Flora y Fauna La Primavera*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- D'Alessandro, W., Aiuppa, A., Bellomo, S., Brusca, L., Calabrese, S., Kyriakopoulos, K., Liotta, M., & Longo, M. (2013). Sulphur-gas concentrations in volcanic and geothermal areas in Italy and Greece: Characterising potential human exposures and risks. *Journal of Geochemical Exploration*, 131, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.08.015>
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (1980). *Decreto por el que por causa de utilidad pública se establece zona de protección forestal y refugio de la fauna silvestre en la región conocida como "La Primavera"*. <https://www.jalisco.gob.mx/sites/default/files/Decreto%2520Zona%2520de%2520Proteccion%2520Forestal.pdf>
- Faust, C. R., & Mercer, J. W. (1979). Geothermal reservoir simulation: 1. Mathematical models for liquid- and vapor-dominated hydrothermal systems. *Water Resources Research*, 15(1), 23–30. <https://doi.org/10.1029/WR015i001p00023>
- Flores Armenta, M. del C., Medina Barajas, E. N., Ramírez Montes, M., & Morales Alcalá, L. (2012). Estimulación ácida del pozo Az-68D en el campo geotérmico de Los Azufres, México. *Geotermia*, 25(1).
- Gutiérrez-Negrín, L. C. (1988). The La Primavera, Jalisco, México, geothermal field. *Geothermal Resources Council Transactions*, 2, 35–38.
- Gutiérrez-Negrín, L. (1991). Recursos geotérmicos en La Primavera, Jalisco. *Ciencia y Desarrollo*, XVI, 57–69.
- Hanano, M., Takahashi, M., Hirako, Y., Nakamura, H., Fuwa, S., Nose, J., & Itoi, R. (1990). Longevity evaluation for optimum development in a liquid dominated geothermal field: effects of interaction of reservoir pressure and fluid temperature on steam production at operating conditions. *Geothermics*, 19(2), 199–211. [https://doi.org/10.1016/0375-6505\(90\)90016-5](https://doi.org/10.1016/0375-6505(90)90016-5)
- Herrera, H. J. (2008). *La Protección Medioambiental en Minería y el Desarrollo Minero Sostenible*. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía. <https://doi.org/10.20868/UPM.book.10674>
- Hiriart Le Bert, G. (2011). *Tecnologías de punta y costos asociados para generación distribuida, autoabastecimiento y cogeneración con recursos geotérmicos en México*. Comisión Federal de Electricidad (CFE) & Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE).
- Ingebritsen, S. E., Geiger, S., Hurwitz, S., & Driesner, T. (2010). Numerical simulation of magmatic hydrothermal systems. *Reviews of Geophysics*, 48(1), RG1002. <https://doi.org/10.1029/2009RG000287>
- Japan International Cooperation Agency (JICA). (1989). *Japan International Cooperation Agency. La Primavera Geothermal Development Project in United Mexican States (interim report)*, 140 pp.
- Kristmannsdóttir, H., & Ármannsson, H. (2003). Environmental aspects of geothermal energy utilization. *Geothermics*, 32(4–6), 451–461. [https://doi.org/10.1016/S0375-6505\(03\)00052-X](https://doi.org/10.1016/S0375-6505(03)00052-X)
- Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA). (1988). *Diario Oficial de la Federación*. Diario Oficial de la Federación (DOF), Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), México.
- Maciel-Flores, R., & Rosas-Elguera, J. (1992). Modelo geológico y evaluación del campo geotérmico La Primavera, Jal., México. *Geofísica Internacional*, 31(4), 359–370. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.1992.31.4.1352>
- Mahood, G. A. (1980). Geological evolution of a Pleistocene rhyolitic center: Sierra La Primavera, Jalisco, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 8(2–4), 199–230. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(80\)90105-5](https://doi.org/10.1016/0377-0273(80)90105-5)
- Mahood, G. A. (1981). A summary of the geology and petrology of the Sierra La Primavera, Jalisco, Mexico.** *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 86(B11), 10137–10152. <https://doi.org/10.1029/JB086B11p10137>
- Manzella, A., Bonciani, R., Allansdottir, A., Botteghi, S., Donato, A., Giamberini, S., Lenzi, A., Paci, M., Pellizzone, A., & Scrocca, D. (2018). Environmental and social aspects of geothermal energy in Italy. *Geothermics*, 72, 232–248. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2017.11.015>
- Mercado-Borrayo, B. M., Solís-López, M., Schouwenaars, R., & Ramírez-Zamora, R. M. (2018). Application of metallurgical slag to treat geothermal wastewater with high concentrations of arsenic and boron. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(5), 2373–2384. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-1952-z>
- Monterrosa, M., & Montalvo López, F. E. (2010). Sustainability analysis of the Ahuachapán geothermal field: Management and modeling. *Geothermics*, 39(4), 370–381. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2010.09.008>
- Rybach, L., & Mongillo, M. (2006). Geothermal sustainability: A review with identified research needs. *GRC Transactions*, Vol. 30.
- Salinas Ocampo, U. (2019). *Estratigrafía de la ignimbrita Tala en la caldera de La Primavera, Jalisco, México*, Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Facultad de Ingeniería.
- Sánchez, R. A. (2003). Update of the Cerritos Colorados Geothermal Project, Mexico. *Geothermal Resources Council Transactions*, 27.
- Santoyo Gutiérrez, E. R., Torres Alvarado, I., & Salvador, I. (2010). Escenario futuro de explotación de la energía geotérmica: Hacia un desarrollo sustentable. *Revista Digital Universitaria (UNAM)*, 11. <https://repositorio.unam.mx/contenidos/5041792>

- Saucedo-Velázquez, J. I. (2017). *Propuesta para el desarrollo de un proyecto geotérmico sustentable en el Bosque de la Primavera, Jalisco*. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería, Centro de Investigación y Estudios de Posgrado.
- Secretaría de Evaluación Ambiental (SEA). (2022). *Guía para la descripción de centrales geotérmicas de generación de energía eléctrica en el SEIA*. Servicio de Evaluación Ambiental, Ministerio del Medio Ambiente, Gobierno de Chile.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (1994). *NOM-081-ECOL-1994. Límites máximos permisibles de emisión de ruido de las fuentes fijas y su método de medición*. Diario Oficial de la Federación (DOF), México.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2007). *NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. Criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por metales pesados y metaloides*. Diario Oficial de la Federación (DOF), México.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2022). *NOM-001-SEMARNAT-2021. Límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores nacionales*. Diario Oficial de la Federación (DOF), México.
- Secretaría de Salud (SSA). (2021). *NOM-127-SSA1-2021. Agua para uso y consumo humano*. Diario Oficial de la Federación (DOF), México.
- Secretaría del Trabajo y Previsión Social (STPS). (2014). *NOM-010-STPS-2014. Agentes químicos contaminantes del ambiente laboral – Reconocimiento, evaluación y control*. Diario Oficial de la Federación (DOF), México.
- Soltani, M., Moradi Kashkooli, F., Souri, M., Rafiei, B., Jabarifar, M., Gharali, K., & Nathwani, J. S. (2021). Environmental, economic, and social impacts of geothermal energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 140, 110750. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110750>
- Stefánsson, V., & Axelsson, G. (2005). Sustainable utilization of geothermal resources through stepwise development. In *Proceedings of the World Geothermal Congress*. Antalya, Turkey.
- Universidad Autónoma de Chapingo (UACH). (2008). *Manifestación de impacto ambiental, modalidad regional: Proyecto geotermoeléctrico Cerritos Colorados (25 MW – primera etapa)* [Informe técnico]. Universidad Autónoma de Chapingo, elaborada para la Gerencia de proyectos Geotermoeléctricos de la CFE, México.
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). (2006). *La Primavera Biosphere Reserve* [Ficha descriptiva del Programa sobre el Hombre y la Biósfera (MAB)]. UNESCO, París, Francia. Disponible en: <https://en.unesco.org/biosphere/lac/primavera>
- West Japan Engineering Consultants, Inc. (2005). *Feasibility study of the Cerritos Colorados geothermal field, Jalisco State, Mexico*.
- World Health Organization (WHO). (2000). *Air quality guidelines for Europe* (2nd ed.). WHO Regional Office for Europe.
- World Health Organization (WHO). (2017). *Guidelines for drinking-water quality* (4th ed., incorporating the 1st addendum). WHO Press.
- Wright, P. M. (1999). The sustainability of production from geothermal resources. In *United Nations University Geothermal Training Programme*. Reykjavík.