



CEMIEGEO

Contribución a la sociedad y al conocimiento

JOSÉ MANUEL ROMO JONES
EN COLABORACIÓN CON
LAURA VERÓNICA VÉLEZ ANDRADE

SECRETARÍA DE ENERGÍA (SENER)
FONDO DE SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA
CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA (CONACYT)
CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR DE ENSENADA (CICESE)



Cráter del volcán El Chichón (o Chichonal), Chiapas, México. Cortesía de Zayre Ivonne González Acevedo
zgonzale@cicese.mx



Torre de perforación (al fondo) y laguna de evaporación (primer plano), en el campo geotérmico de Cerro Prieto, Baja California, México. Cortesía Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, CFE.

CeMIEGeo: Contribución a la sociedad y al conocimiento

José Manuel Romo Jones
en colaboración con
Laura Verónica Vélez Andrade



Domo San Pedro, Nayarit, México.
Cortesía de Grupo Dragón <http://gdragon.com.mx/>

ÍNDICE

PRÓLOGO	
9	
AGRADECIMIENTOS	
11	
INVESTIGADORES LÍDERES DE PROYECTO	
13	
CAPÍTULO 1	
ORIGEN DE LOS CENTROS MEXICANOS DE INNOVACIÓN EN ENERGÍA (CeMIE's)	
15	
El CeMIEGeo en el CICESE	
16	
Objetivo general planteado en el PGP 2017	
18	
Metas planteadas en el PGP 2017	
19	
Objetivos específicos planteados en el PGP 2017	
19	
CAPÍTULO 2	
ESTRUCTURA DEL CONSORCIO	
21	
Misión y visión del CeMIEGeo	
21	
CAPÍTULO 3	
TEMAS ESTRATÉGICOS Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS	
23	
CAPÍTULO 4	
APORTACIONES GENERALES	
25	
CAPÍTULO 5	
TEMAS ESTRATÉGICOS	
29	
Evaluación de los recursos geotérmicos nacionales	
29	
Desarrollo e innovación de técnicas de exploración	
33	
Desarrollos tecnológicos para explotación	
39	
Usos directos del calor geotérmico	
47	

Formación de recursos humanos especializados	51
Sistema de Laboratorios Especializados (SLE)	55
Unidades Especializadas en la Sede CICESE	56
Unidades Especializadas en la Sede INEEL	60
Unidades Especializadas en la Sede IGF-UNAM Morelia	61
Unidades Especializadas en la Sede UMSNH-ENES-UNAM	62
Unidades Especializadas en la Sede CEGEO-UNAM	63
Unidad de Manejo de Información	64

CAPÍTULO 6
IMPACTOS
67
Impacto científico
67
Impacto tecnológico
68
Impacto social
69
Impacto ambiental
70
Impacto económico
71
CAPÍTULO 7
CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS
73
REFERENCIAS
75



Unidad de generación en el campo geotérmico de Los Azufres, Michoacán, México.
Cortesía Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, CFE.

PRIMERA EDICIÓN: marzo de 2023

CeMIEGeo
Contribución a la sociedad
y al conocimiento

© D.R. CICESE
Carretera Ensenada - Tijuana No. 3918,
Zona Playitas, CP. 22860,
Ensenada, B.C. México.
<http://cicese.mx>

DISEÑO Y FORMACIÓN:
Raúl Marcó del Pont Lalli

EDICIÓN Y CORRECCIÓN DE ESTILO:
Raúl Marcó del Pont Lalli

FOTO DE PORTADA:
Manifestaciones geotermales superficiales
en el campo geotérmico de Cerro Prieto.
Cortesía: Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, CFE

Impreso y hecho en México

PRÓLOGO

El Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CeMIEGeo), cuyas aportaciones se presentan aquí, fue un proyecto financiado por el Fondo de Sustentabilidad Energética de la Secretaría de Energía (FSE) y ejecutado por varias instituciones bajo el liderazgo del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). Su objetivo principal fue promover y acelerar el desarrollo de la energía geotérmica de México. El CeMIEGeo formó parte del conjunto de centros mexicanos de innovación en energía (CeMIE) creados por el Gobierno Federal para incentivar el desarrollo científico y tecnológico en materia de fuentes renovables de energía, eficiencia energética, uso de tecnologías limpias y para la formación de recursos humanos. Esta obra hace un recuento de los alcances y logros del proyecto, así como de los retos y oportunidades que tiene nuestro país para desarrollar sus recursos geotérmicos.

En el primer capítulo se describen las consideraciones y necesidades que dieron lugar a la concepción de los CeMIE, con la participación de un amplio grupo de expertos que hicieron un análisis integral y trazaron las líneas para la elaboración de una política de innovación, con apoyo de fondos públicos, para impulsar el desarrollo de las energías renovables y las capacidades nacionales. Con esta base, el CONACyT elaboró las respectivas convocatorias que fueron atendidas por diversos centros públicos e instituciones de educación superior del país. En el caso de la geotermia, el CICESE encabezó una propuesta con la participación de un grupo de instituciones, que conjuntaron a la mayor parte de los expertos

mexicanos en el tema. Así mismo, el primer capítulo da cuenta del objetivo general, los objetivos específicos y las metas planteadas para el CeMIEGeo, entre las que se encuentran la necesidad de construir una infraestructura analítica especializada, fomentar el desarrollo de una ingeniería geotérmica mexicana que apoye el desarrollo de fuentes de calor de media y baja temperatura, y por supuesto, la formación de capital humano con diferentes competencias.

En los capítulos segundo y tercero se detalla la estructura del consorcio conformado por instituciones de educación superior, centros públicos de investigación y empresas. Se propusieron 30 proyectos específicos para abordar cuatro grandes temas de interés nacional: Evaluación de los recursos geotérmicos nacionales (4 proyectos), Desarrollo e innovación de técnicas de exploración (9 proyectos), Desarrollos tecnológicos para explotación (10 proyectos), y Usos directos del calor geotérmico (7 proyectos). Adicionalmente hubo dos proyectos transversales, uno para la Formación de recursos humanos especializados, y otro para el establecimiento de un Sistema de laboratorios especializados, distribuidos en las distintas instituciones del consorcio.

En los capítulos cuarto y quinto se encuentran las aportaciones y logros, primero en general y luego las relativas a los distintos temas del proyecto. El abanico de contribuciones va desde la generación de nuevo conocimiento científico y evaluación de recursos en diferentes áreas geotérmicas, reportado a través de revistas internacionales especializadas, hasta la aplicación de usos específicos del calor geotérmico para la deshidratación de alimentos, la climatización de espacios como escuelas,

casas o edificios en general, entre muchos otros. También se muestra la organización de las unidades especializadas en los diferentes laboratorios y sedes, que fueron equipados con tecnologías de punta la cual representó una gran inversión para la continuidad de próximos proyectos.

En el capítulo sexto se evalúa críticamente el impacto científico, tecnológico, social, ambiental y económico del proyecto en los cuatro grandes temas estratégicos abordados durante el proyecto, destacando los resultados más relevantes. En el capítulo séptimo se presentan las conclusiones y perspectivas reconociendo el gran reto que queda a futuro para utilizar de manera sostenible el extraordinario recurso geotérmico del país, así como la ruta tecnológica trazada para conseguirlo.

Podemos decir que el CeMIEGeo ha dejado la semilla sembrada, la cual debe cultivarse para que pueda producir frutos que contribuyan al mejor aprovechamiento

de la geotermia en México. Para el CICESE como para las instituciones participantes, este primer esfuerzo coordinado que abordó un tema tan relevante para el país, deja claro que este tipo de iniciativas interinstitucionales, con todas las complicaciones que implica su seguimiento técnico y administrativo, producen beneficios notables para todos los involucrados, pero sobre todo benefician a la sociedad.

Finalmente, un aprendizaje obtenido con esta experiencia, fue el cómo trabajar conjuntamente en un proyecto multidisciplinario. Esto fue fundamental entre todos los involucrados: investigadores, técnicos, estudiantes y personal administrativo de diferentes instituciones académicas, universidades y centros públicos de investigación, gubernamentales y privadas, con diferentes normativas, reglamentos y formas de trabajar distintas, tuvieron que coordinarse para lograr culminar con éxito este megaproyecto.

SILVIO GUIDO MARINONE MOSCHETTO

DIRECTOR GENERAL DEL CICESE 2015-2020

RESPONSABLE LEGAL DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

El proyecto 207032 Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica-CICESE, fue financiado por el Fondo de Sustentabilidad Energética SENER-CONACyT (FSE). Agradecemos al FSE por su meticuloso seguimiento al cumplimiento de los objetivos y metas del proyecto, y a todas las instituciones participantes en esta iniciativa, a sus directivos, a sus investigadores, a sus estudiantes y al personal técnico y de apoyo, por su compromiso y dedicación para alcanzar los objetivos planteados.

Agradecemos a los investigadores líderes de proyecto por su trabajo y por sus invaluable aportaciones para la generación de conocimiento y para el desarrollo de tecnologías innovadoras en cada uno de los temas de su especialidad. A todos y cada uno de los investigadores, estudiantes y técnicos que colaboraron en los proyectos. A las empresas participantes, por su contribución en especie y su vinculación con varios de los proyectos estratégicos. A la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de la CFE, por su participación en el Grupo Directivo y por su interés como usuario final de buena parte de la información generada.

Un especial agradecimiento a los miembros del Grupo Directivo por su compromiso, dirección y guía durante el desarrollo del proyecto.

Presidente	Dr. Federico Graef Ziehl (2014-2015)
	Dr. Silvio Guido Marinone Moschetto (2016-2019)
	Dr. Edgardo Cañón Tapia (suplente)
	Dr. Luis Alonso Gallardo Delgado (suplente) CICESE
Representante INEEL	Dr. José Luis Fernández Zayas (2014-2016)
	Dr. Diego Arjona Argüelles (2017-2019)

	Dr. José David Nieva Gómez (suplente)
	Dra. Georgina Izquierdo Montalvo (suplente)
Representante UNAM-1	Dr. Adalberto Noyola Robles (2014-2015)
	Dr. Luis Agustín Álvarez Icaza Longoria (2016- 2019)
	Instituto de Ingeniería, UNAM
	Dr. Edgar Santoyo Gutiérrez (suplente)
	Instituto de Energías Renovables, UNAM
Representante UNAM-2	Dr. Gerardo Carrasco Núñez
	Centro de Geociencias.UNAM
	Dr. Arturo Iglesias Mendoza (2014-2016) (suplente)
	Dr. Hugo Delgado Granados (2017-2019) (suplente)
	Instituto de Geofísica, UNAM
Representante UMSNH-1	Dr. Salvador Jara Guerrero (2014-2015)
	Dr. Medardo Serna González (2016-2018)
	Dr. Raúl Cárdenas Navarro (2018-2019)
	Dr. José G. Tinoco (suplente)
	Dra. Ileri Suazo Ortuño (suplente)
	M.C. Julio Vargas Medina (suplente)
Representante UMSNH-2	Dr. Victor Hugo Garduño† (2014-2018)
	Dr. Alberto Ruiz Marín (2019)
	Dr. Luis M. Villaseñor (suplente)
	Dr. Carlos Rubio Maya (suplente)

Representante Gerencia de Proyectos Geotermo-electricos CFE	M.C. Magaly Flores Armenta (2014-2016) Ing. Miguel Ángel Ramírez Montes (2017-2019) Q.F.B. Fernando Sandoval Medina (suplente)	Apoyo técnico	Jessica Jazmín Salas Ariza Ángel Daniel Peralta Castro Angélica Córdova Ruvalcaba Carlos Caloca de la Parra CICESE
Representante Cluster Geo S.A. de C.V.	Mtro. Miguel Francisco Maza y Ferrer Ing. Alonso F. Gómez Sanz (suplente)	Apoyo administrativo	Claudia Cárdenas Pérez Ayme Sosa Ramos Bárbara Uribe Martínez Adriana Mendoza Delgadillo Giselle Orchak Pérez Célica Cuevas Villavicencio Ma. Del Carmen Blake Olivares Gerardo Ortega Ponce CICESE
Representante Geoconsul S.A. de C.V.	Ing. Luis Carlos Gutiérrez Negrin Ing. Alfredo Mañón Mercado (suplente)		
Representante BajaInnova S.A.P.I. de C.V.	Ing. Eduardo Valtierra Patrón Lic. Guillermo Cruz (suplente)	Gerencia de proyectos	Arturo Harada Carlos Vera Mendoza Angelita Ibarra Rentería Noé Piedad Sánchez†
<p>Al Dr. Federico Graef Ziehl, Director General del CICESE (2005-2015) y Responsable Legal del proyecto durante su gestión, por su decidido apoyo en los primeros dos años del proyecto, su participación resultó fundamental para la estructuración y consolidación del consorcio CeMIEGeo. Al Dr. Silvio Guido Marinone Moschetto, Director General del CICESE (2015-2020) y Responsable Legal del proyecto durante su gestión, por su disposición y definitivo apoyo durante los cuatro años siguientes del proyecto. A la M. en C. Leonor Falcón Omaña, Directora Administrativa del CICESE y Responsable Administrativa del proyecto, por su profesionalismo, dedicación y compromiso para el ejercicio correcto y transparente de los recursos financieros otorgados al proyecto. A los responsables administrativos de cada institución por su ayuda para mantener una escrupulosa transparencia en el uso de los recursos otorgados al proyecto.</p> <p>A los equipos estructurados para realizar el seguimiento técnico-administrativo del proyecto:</p>		Autoridades FSE SENER-CONACyT	Néstor L. Díaz Ramírez Ernesto Gabriel Hernández Montoya Miguel Ángel Serrano Sánchez Jaime Jiménez Viacobo Evelin Ortiz Salcedo María Chávez García Alejandra Straffon Díaz Adolfo Contreras Ruiz Esparza Alejandro Castillo Montalvo
Validadoras técnicas	Laura Verónica Vélez Andrade Ma. Concepción Mendoza Díaz CICESE	Panel internacional de evaluadores	Emma Canales Huerta Allan López Saborio José Viramonte Bernardo Beate Enrique Velázquez Madrazo Sara Lilia Moya Acosta Gilles Levresse Heber Diez León
Validadores administrativos	Víctor Olvera Arellano Alma Adriana Meza Nuza Silvia Moreno Blake CICESE	Grupo ICAM (plataforma para administración y seguimiento de proyectos)	Dolores Correa Laphan Salvador Arturo Rodríguez Loera Rosa Isela Herrera Emmanuel Chávez Contreras
Revisores administrativos	Luz Guadalupe Camacho Robles Ma. Guadalupe Martínez Vázquez Nancy López Laguna Ana Sofía López Mada María Elena Romero Sandoval† Oscar Leonel Rodríguez Quiñonez CICESE	Audidores externos	Despacho Leal Tijerina y Asociados

INVESTIGADORES LÍDERES DE PROYECTO

HÉCTOR M. AVIÑA JIMÉNEZ Instituto de Ingeniería,
Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM

ARNOLDO BEDOLLA JACUINDE Universidad
Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, UMSNH

GERARDO CARRASCO NÚÑEZ Centro de Geociencias,
Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM

JULIO DE LA SANCHA Universidad Michoacana de San
Nicolás de Hidalgo, UMSNH

SERGIO R. GALVÁN GONZÁLEZ Universidad
Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, UMSNH

ALFONSO GARCÍA GUTIÉRREZ Instituto Nacional de
Electricidad y Energías Limpias, INEEL

VÍCTOR HUGO GARDUÑO MONROY Universidad
Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, UMSNH

ZAYRE IVONNE GONZÁLEZ ACEVEDO Centro de
Investigación Científica y de Educación Superior de
Ensenada, CICESE

ANTONIO GONZÁLEZ FERNÁNDEZ Centro de
Investigación Científica y de Educación Superior de
Ensenada, CICESE

HÉCTOR JAVIER GONZÁLEZ LICÓN Universidad
Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, UMSNH

EDUARDO GONZÁLEZ PARTIDA Centro de
Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de
México, UNAM

HUGO C. GUTIÉRREZ SÁNCHEZ Universidad
Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, UMSNH

ABEL FELIPE HERNÁNDEZ OCHOA Instituto Nacional
de Electricidad y Energías Limpias, INEEL

EDUARDO IGLESIAS RODRÍGUEZ Instituto Nacional de
Electricidad y Energías Limpias, INEEL

AIDA LÓPEZ HERNÁNDEZ Universidad Michoacana de
San Nicolás de Hidalgo, UMSNH

JOSÉ LUIS MACÍAS VÁZQUEZ Instituto de Geofísica,
Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM

CRISANTO MENDOZA COVARRUBIAS Universidad
Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, UMSNH

ABELARDO MERCADO HERRERA Universidad
Politécnica de Baja California, UPBC

JOSÉ DAVID NIEVA GÓMEZ Instituto Nacional de
Electricidad y Energías Limpias, INEEL

FRANCISCO JAVIER NÚÑEZ CORNÚ Centro de
Sismología y Volcanología de Occidente, Universidad
de Guadalajara, UDG

JESÚS PACHECO IBARRA Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, UMSNH

MAHENDRA PAL VERMA JAISWAL Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, INEEL

MARCO ANTONIO PÉREZ FLORES Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, CICESE

ROSA MARÍA PROL LEDESMA Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM

CARLOS RUBIO MAYA Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, UMSNH

ALBERTO RUIZ MARINES Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, UMSNH

MARTÍN SALINAS VÁZQUEZ Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM

EDGAR ROLANDO SANTOYO GUTIÉRREZ Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM

JUAN FELIPE SORIANO PEÑA Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, UMSNH

VICENTE TORRES LUNA Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, INEEL

JULIO VARGAS MEDINA Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, UMSNH

RUTH ESTHER VILLANUEVA ESTRADA Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM

ARACELI ZAMORA CAMACHO Centro de Sismología y Volcanología de Occidente, Universidad de Guadalajara, UDG

ORIGEN DE LOS CENTROS MEXICANOS DE INNOVACIÓN EN ENERGÍA (CEMIE'S)

Los Centros Mexicanos de Innovación en Energía (CeMIE's) fueron concebidos con el propósito de incentivar y promover el uso de las energías limpias y abatir las barreras y retos tecnológicos que han frenado el aprovechamiento de las energías renovables en México (<https://www.gob.mx/sener/articulos/centros-mexicanos-de-innovacion-en-energia>). Constituyen uno de los instrumentos del Fondo de Sustentabilidad Energética CONACYT-SENER (FSE), el cual fue establecido para financiar y fomentar la investigación científica aplicada, así como el desarrollo tecnológico, la innovación, y la formación de recursos humanos, en materia de fuentes renovables de energía, eficiencia energética, uso de tecnologías limpias y para la diversificación de fuentes primarias de energía.

Los recursos financieros fueron aportados por el FSE provenientes de la recaudación anual y basados en el derecho establecido en la Ley Federal de Derechos de 2007 (DOF, 7 de octubre de 2007), que establece que PEMEX Exploración y Producción aporte anualmente a la Federación el 0.65% del valor anual del petróleo crudo y del gas natural extraídos en el año, para destinarlo a la investigación científica y tecnológica en materia de energía.

La concepción de los CeMIE's se desprende de un gran número de reuniones que la SENER y el CONACYT sostuvieron con diversas instituciones académicas, empresas privadas, dependencias del gobierno y organismos técnicos, tanto nacionales como internacionales, para llevar a cabo un análisis integral, basado en experiencias previas de expertos, en las áreas de

fuentes renovables de energía, eficiencia energética, uso de tecnologías limpias y diversificación de fuentes primarias de energía.

Este análisis llevó a la elaboración de una política de innovación con apoyo de fondos públicos, que atendiera las particularidades de los recursos nacionales, fomentando la vinculación academia-industria, pero sobre todo, enfocada a desarrollar las capacidades nacionales para ofrecer soluciones prácticas y viables en materia de energías renovables.

La figura que se eligió para organizar esta iniciativa fue la de consorcios o alianzas público-privadas, encabezadas por una institución académica de educación superior, responsable de recibir y administrar los fondos públicos y coordinar redes de colaboración con entidades nacionales e internacionales, públicas o privadas, encargadas de desarrollar proyectos innovadores y formar las capacidades requeridas de investigación científica y capital humano.

Bajo este contexto, cada uno de los CeMIE se formó a partir de un plan científico tecnológico, con líneas estratégicas de investigación. Con autonomía en su operación, pero supervisados por el CONACYT y la SENER y con las metas trazadas por el FSE para alcanzar los siguientes objetivos:

- Impulsar la innovación a través de la adopción, transferencia y asimilación de tecnología novedosa.
 - Vinculación academia industria.
 - Formar recursos humanos especializados.
- Consolidar capacidades en las áreas correspondientes.

- Fortalecer la infraestructura científica y tecnológica especializada.
- Medir y dar a conocer el potencial de las energías limpias disponibles en México.
- Fomentar el conocimiento y difusión del uso y aprovechamiento de los recursos energéticos renovables.
- Contribuir a la mejora del marco legal y normativo en materia de fuentes de energía, aunado a la planeación del desarrollo y explotación de conocimiento.

Con base en los antecedentes mencionados, a inicios de 2012 se definieron los primeros Términos de Referencia y Convocatoria para la creación de los primeros CeMIE, uno en materia de energía solar y otro en geotermia. En 2013, después del cambio de la administración federal, la SENER revisó el tema y realizó un ejercicio de análisis de riesgos y un diagnóstico del esquema operativo del FSE. Este diagnóstico consistió en el análisis, desde un punto de vista organizacional y de gobierno corporativo, de diferentes iniciativas similares con éxito comprobado en otros países de alto nivel de desarrollo. En consecuencia se modificaron los Términos de Referencia y se lanzó una nueva Convocatoria, la cual fue atendida por varias instituciones. Las propuestas fueron valoradas y los fondos adjudicados a las mejor evaluadas.

En el caso de CeMIEGeo se aprobó la propuesta encabezada por el CICESE en la Convocatoria CONACYT-SENER-SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA 2013-01 como Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica/CICESE con una aportación del Fondo por \$958,573,486 pesos, para la ejecución de 32 proyectos en 8 etapas semestrales (Fondo de Sustentabilidad Energética. Informe Uno. Diciembre 2014).

EL CeMIEGeo EN EL CICESE

El Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica, CeMIEGeo, se crea con el objetivo de promover y acelerar el desarrollo de la energía geotérmica en nuestro país. Es uno de los cinco Centros de Innovación que se crearon y consolidaron entre 2014 y 2018, junto con los de energía solar, eólica, oceánica y bioenergía (<https://www.gob.mx/sener/articulos/centros-mexicanos-de-innovacion-en-energia>).

Para la elaboración de la propuesta se llevaron a cabo varias reuniones de discusión y análisis, prime-

ramente entre las instituciones académicas con grupos de conocidos expertos en distintos aspectos de la geotermia. Entre estas instituciones se encontraba el entonces llamado Instituto de Investigaciones Eléctricas (ahora Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, INEEL), los Institutos de Ingeniería, de Geofísica, de Energías Renovables y de Geología de la UNAM, la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) y el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE).

Posteriormente se sumaron algunas otras instituciones académicas, varias empresas privadas y la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de la CFE, pioneros en el desarrollo de la geotermia mexicana y operadores de los principales campos geotérmicos mexicanos.

Quienes participamos en el diseño y elaboración de la propuesta, compartimos las ideas que consideramos como ejes fundamentales que podrían llevarnos a construir un proyecto sólido y bien fundamentado. La necesidad de incrementar la capacidad de generación eléctrica del país, particularmente utilizando fuentes de energía limpia como la geotermia, era evidente para todos. Cabe mencionar que México tiene una larga experiencia en el aprovechamiento de esta fuente energética: la primera planta de generación eléctrica a partir de geotermia se inauguró en 1959, en Pathé, Hidalgo (DiPippo, 2022). En ese tiempo solo Italia, Nueva Zelanda y México producían electricidad con geotermia, la planta de Los Geysers en California, E.U. (el campo más grande del mundo), se inauguró en 1960, unos meses después de la de Pathé, Hgo. Actualmente, nuestro país tiene cinco plantas geotérmicas y se encuentra entre los primeros diez, a nivel mundial, por su capacidad instalada.

Estaba claro que el acervo de conocimiento adquirido en más de cinco décadas ofrecía una base firme para identificar deficiencias y barreras tecnológicas que permitieron definir algunas de las líneas de investigación y desarrollo. En contraste, también era evidente que el aprovechamiento del calor geotérmico de media o baja temperatura era prácticamente inexistente en el país, salvo por los usos turísticos y recreativos de manantiales calientes. En este aspecto, el aprovechamiento del calor geotérmico para diversos usos domésticos e industriales (climatización de espacios, agricultura controlada, acuicultura, deshidratación de

Fumarolas en el borde nordeste del volcán El Chichón (o Chichonal), Chiapas, México. Cortesía de Zayre Ivonne González Acevedo zgonzale@cicese.mx



productos alimenticios, etc.) constituía una línea que nos propusimos atender y difundir.

Entre los temas más relevantes se consideró la complementación de información básica sobre recursos geotérmicos en el territorio nacional, tanto terrestres como marinos, así como el desarrollo y la apropiación de tecnologías de exploración modernas que pudieran contribuir a la mejor definición de la localización, profundidad, cantidad y calidad de los recursos en el subsuelo.

Uno de los aspectos más importantes que se identificó fue la necesidad de construir una infraestructura analítica especializada que permitiera atender tanto las necesidades de la investigación científica como las de la industria. Una gran cantidad de análisis especializados requeridos por la industria y por investigaciones específicas, se realizaban en el extranjero, principalmente en laboratorios universitarios de otros países. Se buscó desde el inicio que cada institución o grupo de investigación adquiriera equipo e instrumentación de última generación y que la infraestructura instalada estuviera disponible para todos los integrantes del consorcio y pudiera utilizarse de manera coordinada para atender necesidades de investigación y para ofrecer servicios analíticos especializados a la industria geotérmica. Ese fue el espíritu con el que se pensó en el Sistema de Laboratorios Especializados, incluyendo unidades en las distintas instituciones académicas del consorcio.

En relación al fomento de la innovación y del desarrollo tecnológico, la intención fue enfocarse en la tecnología asociada a los usos directos del calor geotérmico proveniente de fuentes de media o baja temperatura. Se consideró que las soluciones tecnológicas existentes para las grandes plantas de generación eléctrica; perforación de pozos profundos, turbinas, transformadores, etc., pertenecen a un sector industrial altamente especializado en el que sería más difícil incidir con desarrollos innovadores. En contraste, el aprovechamiento de fuentes de calor de media y baja temperatura requería de desarrollos tecnológicos diseñados ad-hoc (intercambiadores de calor, equipos para climatización, deshidratadores, etc.), a una escala más asequible y mucho más adecuada para fomentar una ingeniería mexicana que pudiera aportar el desarrollo innovador de dispositivos tecnológicos especializados.

Finalmente, uno de los temas transversales de la mayor relevancia para el desarrollo de la industria y

para la consolidación de la investigación científica en materia de geotermia, estaba en la formación de capital humano. En este tópico, el enfoque fue coordinar la enseñanza de temas de geotermia en las instituciones académicas que ofrecían programas de posgrado en geociencias y con ello promover la participación activa de estudiantes en los proyectos especializados propuestos en el Plan de Trabajo del CeMIE Geo, así se podría apoyar a estudiantes mexicanos para la realización de estancias cortas de investigación en el extranjero y fomentar la difusión de sus resultados en congresos nacionales e internacionales. Por otra parte se propuso ofrecer cursos cortos especializados, impartidos por expertos reconocidos a nivel internacional. También se elaboraron cursos en línea dirigidos a jóvenes interesados en temas de geotermia y se inició un programa de difusión sobre el tema en redes sociales para tener un mayor acercamiento con la sociedad.

Con estas perspectivas se elaboró el Plan General del Proyecto CeMIEGeo (PGP) y se construyó un portafolio de propuestas para proyectos específicos de investigación y desarrollo tecnológico. Las propuestas específicas se fueron afinando hasta concretar una cartera de proyectos que se integró al PGP presentado para la evaluación del Fondo SENER-CONACYT. Cabe mencionar que el Plan General fue revisado y actualizado en 2017 para la ejecución de la segunda mitad del proyecto.

OBJETIVO GENERAL PLANTEADO EN EL PGP 2017

Como todos los centros mexicanos de innovación en energía, el CeMIEGeo adopta como sus objetivos a largo plazo los definidos por el FSE, que son los siguientes:

- Ordenar, integrar, coordinar, gestionar y desarrollar la investigación científica dirigida y orientada al cambio, asimilación, paquetes tecnológicos y desarrollo tecnológico.
- Expandir y consolidar las capacidades de investigación científica y tecnológica y la promoción de su uso, de modo colaborativo.
- Formar recursos humanos.
- Innovar.
- Vincular a la academia con la industria.
- Fomentar la transferencia de tecnología.

- Estimular el desarrollo de empresas tecnológicas.
- Fortalecer las capacidades de investigación y desarrollo tecnológico en las empresas del sector geotérmico.

METAS PLANTEADAS EN EL PGP 2017

- A. Establecer un Acuerdo entre las instituciones y empresas participantes con objeto de unificar sus esfuerzos y voluntades para colaborar de manera estratégica a efecto de coordinar sus esfuerzos, infraestructuras, conocimientos, recursos y tecnologías, para la formación del Consorcio CeMIEGeo y ejecutar en forma coordinada las tareas de investigación, desarrollo tecnológico, innovación y formación de especialistas.
- B. Establecer un Sistema de Laboratorios Especializado que incremente la capacidad analítica del país en materia de geotermia y fomente el uso colaborativo de la infraestructura.
- C. Ofrecer cursos especializados y básicos dirigidos a estudiantes de licenciatura y de posgrado interesados en las disciplinas asociadas a la geotermia.
- D. Generar nuevo conocimiento científico, así como elementos innovadores en las distintas disciplinas asociadas a la exploración, y explotación de los recursos geotérmicos.
- E. Constituir una figura jurídica que integre a instituciones académicas y empresas con el objeto de vincular las necesidades del sector productivo con

los resultados de la investigación científica y el desarrollo tecnológico.

- F. Transferir desarrollo de tecnología y conocimiento al sector privado.
- G. Promover la creación de empresas de base tecnológica con objeto de fomentar el desarrollo de la ingeniería geotérmica mexicana.
- H. Contribuir con las empresas del sector geotérmico con información científica actualizada, difusión de nuevas tecnologías y capacidad analítica especializada.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS PLANTEADOS EN EL PGP 2017

Los objetivos específicos para el CeMIEGeo fueron definidos por el FSE de la siguiente manera:

- A. Fortalecer las capacidades en materia de energía geotérmica que permitan vencer las barreras tecnológicas existentes.
- B. Establecer proyectos estratégicos que coadyuven en el conocimiento, dominio y aprovechamiento de la energía geotérmica.
- C. Promover las condiciones tecnológicas adecuadas para el desarrollo de la industria de energía geotérmica mexicana.
- D. Formar recursos humanos especializados en energía geotérmica.



Muestreo geoquímico en un manantial hidrotermal en la zona geotérmica de Acoculco, Puebla, México. Cortesía de Edgar Santoyo Gutiérrez esg@ier.unam.mx

ESTRUCTURA DEL CONSORCIO

El CeMIEGeo, coordinado por el CICESE, se constituyó teniendo inicialmente como responsables a:

- Responsable Legal: Dr. Federico Graef Ziehl, director general de CICESE
- Responsable Técnico: Dr. José Manuel Romo Jones, Depto. Geofísica Aplicada
- Responsable Administrativa: M. en C. Leonor Falcon Omaña.

El consorcio incluyó a las instituciones de educación superior y centros públicos de investigación enlistados a continuación:

- Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE)
- Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL)
- Universidad de Guadalajara (UdeG)
- Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH)
- Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)
- Universidad Politécnica de Baja California (UPBC)
- Centro de Tecnología Avanzada A. C. (CIATEQ).

Adicionalmente, las siguientes empresas se sumaron a la iniciativa:

- BajaInnova, SAPI de CV
- Cluster de Energías Geotérmica y Renovables, AC

- Comisión Federal de Electricidad (Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos)
- Especialistas en Turbopartes, SA de CV
- Exploración Perforación y Estudios del Subsuelo, SA de CV
- Geoconsul, SA de CV
- Geología Minería y Consultoría, SA de CV
- Generadores de Negocios en Energía Renovable y Ambientales, SC
- Geotem Ingeniería, SA de CV
- GS Energía, SA de CV
- Prados Camelinas, SA de CV
- * Ingeniería, Energía y Sustentabilidad Mexicana S.A. de C. V.
- * Ingeniería Verde del Noroeste S.A. de C. V.

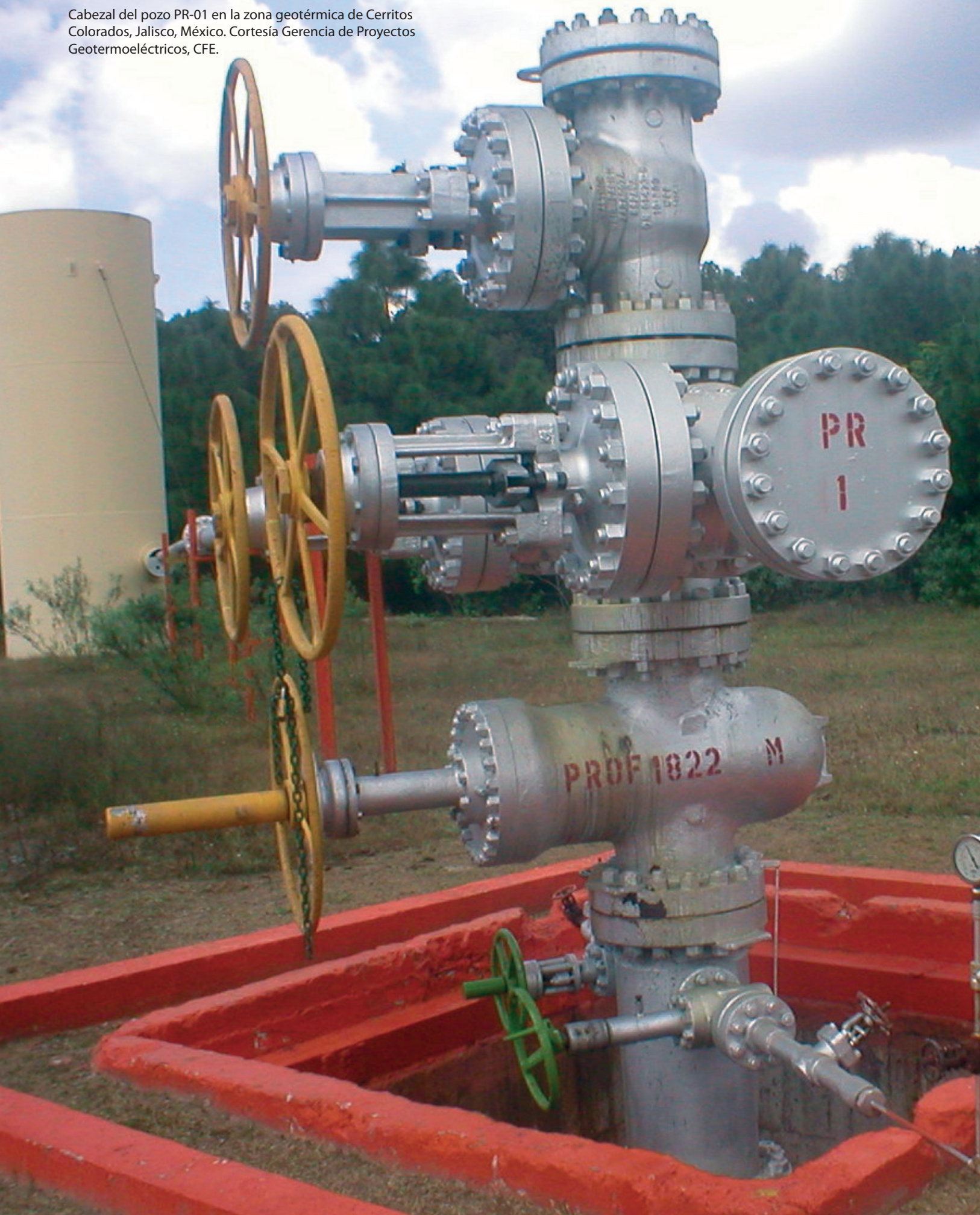
MISIÓN Y VISIÓN DEL CeMIEGeo

VISIÓN: Ser referente en el desarrollo de la tecnología y conocimiento en materia de energía geotérmica y contribuir al aprovechamiento de ésta, como una de las fuentes de energía renovable más utilizada en el país.

MISIÓN: Contar con el conocimiento unificado en materia de energía geotérmica y generar sinergias que permitan orientar las actividades de innovación, investigación y desarrollo tecnológico con el fin de contribuir al fortalecimiento de la industria geotérmica en el país.

* *Spin-off* a partir de proyectos del consorcio.

Cabezal del pozo PR-01 en la zona geotérmica de Cerritos Colorados, Jalisco, México. Cortesía Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, CFE.



TEMAS ESTRATÉGICOS Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS

El CEMIEGEO se estructuró con 30 proyectos específicos, dos proyectos transversales y un proyecto operativo, para atender los siguientes temas:

- Evaluación de los recursos geotérmicos nacionales (4 proyectos)
- Desarrollo e innovación de técnicas de exploración (9 proyectos)
- Desarrollos tecnológicos para explotación (10 proyectos)
- Usos directos del calor geotérmico (7 proyectos)
- Formación de recursos humanos especializados (1 proyecto transversal)
- Sistema de laboratorios especializados (1 proyecto transversal)
- Coordinación de difusión y vinculación (Proyecto operativo).

Para este conjunto de proyectos, se plantearon los siguientes objetivos específicos en el Plan General de Trabajo:

1. Actualizar y dar a conocer el potencial geotérmico de México.
2. Afinar la tecnología para la exploración y caracterización temprana de recursos geotérmicos.
3. Fomentar el conocimiento de la geotermia entre el público empresarial y general.
4. Aumentar la eficacia y disminuir los costos de la tecnología para la construcción de pozos geotérmicos.

5. Desarrollar tecnologías menos costosas para el control de emisiones al aire ocasionadas por la generación eléctrica con recursos geotérmicos.
6. Desarrollar mejores tecnologías para generación de electricidad con recursos geotérmicos de baja, mediana y alta entalpía.
7. Promover el aprovechamiento directo del calor proveniente de recursos de baja y mediana entalpía, así como del calor residual de fluidos ya utilizados en las plantas geotérmicas en operación.
8. Asimilar y desarrollar tecnología para la explotación de recursos geotérmicos de muy baja permeabilidad, o de roca seca caliente.
9. Contribuir a mejorar la reglamentación para la explotación de recursos geotérmicos.
10. Restablecer y fortalecer programas nacionales de capacitación en geotermia.

Con estas directrices, durante el 2015 y hasta julio del 2019, se ejecutaron los proyectos aprobados por el FSE (Fondo Sectorial de Sustentabilidad Energética SENER-CONACyT). El cronograma del plan de trabajo consistió en 8 etapas inicialmente planeadas para seis meses cada una. El FSE entregó al inicio de cada etapa los recursos programados en el plan de trabajo, previa evaluación y aprobación de cada etapa por un grupo de evaluadores externos convocados por el CONACyT y el propio FSE de la SENER. Adicionalmente, y en cumplimiento de los requerimientos del FSE, el CeMIEGeo constituyó un Grupo Directivo interno encargado de regir y orientar las acciones del consorcio, así como dar seguimiento periódico y evaluar el avance de los

proyectos a través de un Comité Interno de Evaluación y Seguimiento de Proyectos. El Grupo Directivo fue presidido por el Director General del CICESE e integrado por nueve personas más: un representante del INEEL, dos de la UNAM, dos de la UMSNH, uno de la CFE y tres de empresas privadas integrantes del consorcio, quienes llevaron a cabo dos o tres reuniones al año durante la vigencia del proyecto.

Para la ejecución de los proyectos, el CICESE recibió semestralmente los recursos aprobados por el FSE y transfirió a las instituciones académicas participantes los montos correspondientes de acuerdo con el cronograma de cada proyecto, y a través de sendos convenios de transferencia de recursos firmados con

cada una de ellas. El seguimiento administrativo se registró en una plataforma informática diseñada para tal efecto, la cual permitió una trazabilidad puntual y detallada de todos los movimientos administrativos de cada uno de los proyectos.

Los resultados que se generaron con el trabajo de todos los participantes del consorcio CeMIEGeo no tiene precedente en el país, como tampoco lo tiene el apoyo recibido del gobierno federal ni el ánimo de colaboración interinstitucional y trabajo interdisciplinario que generó ésta iniciativa.

En la siguiente sección, se da cuenta de las contribuciones específicas en cada uno de los temas estratégicos planteados en el proyecto.

APORTACIONES GENERALES

Las múltiples acciones llevadas a cabo por el consorcio CeMIEGeo y las contribuciones que se desprendieron de ellas, dejaron un impacto muy relevante en la geotermia mexicana. Se tienen resultados tangibles, en términos de equipamiento, bases de datos, publicaciones especializadas, estudiantes graduados, etc., pero también resultados intangibles, como la experiencia científica y tecnológica ganada por los participantes, la motivación sembrada en jóvenes científicos y tecnólogos, la visibilidad internacional de los grupos de expertos mexicanos, los resultados y experiencias potencialmente valiosos para futuros proyectos de investigación o desarrollo, la definición de nuevas incógnitas surgidas a partir de los resultados obtenidos, entre otros.

El impulso a la industria geotérmica implica beneficios a la economía, al medio ambiente y a la sociedad. Generalmente se reconocen los beneficios de generar electricidad a partir de fuentes de energía limpias, lo que es menos conocido es el uso directo de la energía térmica proveniente del subsuelo en diversos proyectos productivos. Tal es el caso del proyecto que se llevó a cabo por el CeMIEGeo para la deshidratación de alimentos, en Nayarit. En este sitio, la comunidad de agricultores que habita alrededor del Domo San Pedro, Nay., ha visto beneficios tangibles al tener una manera de comercializar una parte de sus productos, que antes representaban una merma, y que ahora se aprovechan como productos deshidratados con alto valor agregado. Otro ejemplo, es en la comunidad de los Humeros, en Puebla, en donde la climatización geotérmica de una es-

cuela de educación preescolar y de una clínica del IMSS beneficia de manera directa a las familias de la localidad (<https://www.gob.mx/ineel/prensa/ineel-inaugura-el-primer-sistema-demostrativo-de-bomba-de-calor-geotermica-bcg>). La climatización de invernaderos con fuentes geotérmicas o bombas de calor, representan una oportunidad para la tecnificación de la agroindustria, ya que permiten mantener la temperatura óptima para el crecimiento del cultivo, lo que produce mejores cosechas y en tiempos anticipados a las cosechas tradicionales, lo que resulta en ventajas competitivas; como lo ha confirmado el proyecto demostrativo en la Universidad Politécnica de Baja California. Otros proyectos como el de desalación de agua de mar aprovechando energía geotérmica están motivados en proporcionar beneficio social a comunidades costeras en zonas áridas, como las de la península de Baja California.

Las diversas aplicaciones de los usos directos del calor geotérmico tienen la particularidad de que se pueden planear diversas formas de aprovechamiento junto con las comunidades locales y a la medida de sus propias necesidades, por lo que los beneficios sociales pueden ser muy significativos, particularmente para aquellos sitios alejados de las redes eléctricas pero que tienen la presencia de recurso geotérmico superficial. Este tipo de proyectos favorecen la transferencia de tecnología al sector agropecuario, fomentan el desarrollo regional del campo, permiten la participación social, benefician la calidad de vida de las personas sin acceso a la electricidad, contribuyen a minimizar la dependencia de los combustibles fósiles, y repercuten en que la población reciba di-

rectamente los beneficios de utilizar una fuente de energía sostenible y respetuosa del ambiente.

En el CeMIEGeo participaron más de 420 personas, entre investigadores, técnicos, estudiantes y apoyos administrativos, quienes en coordinación con las autoridades gubernamentales e institucionales, ganaron inestimable experiencia y generaron un importante acervo de información y nuevo conocimiento para la nación.

Durante la vigencia del proyecto se registraron 2300 productos: 1407 reportes técnicos, 97 bases de datos, 88 mapas, 118 publicaciones científicas, 91 cursos, 199 ponencias en congresos y 84 conferencias de divulgación (<https://cemiegeo.cicese.mx/coleccion-digital>). Entre 2015 y 2019 se graduaron 118 estudiantes de licenciatura y posgrado, algunos de ellos se integraron al sector industrial y de servicios especializados, otros a los grupos de investigación en el sector académico y algunos graduados de licenciatura y maestría siguen su preparación académica en programas de posgrado tanto en México como en el extranjero. A partir de 2019 y hasta la fecha se han seguido graduando estudiantes en los distintos programas docentes de las instituciones del consorcio, lo que indica que la inercia académica impulsada por el proyecto continúa generando resultados que impactan positivamente a nuestra sociedad.

La inversión del FSE en el CeMIEGeo produjo nuevo conocimiento y desarrollos tecnológicos, instaló infraestructura analítica de primer nivel, contribuyó a la formación de capital humano y promovió el trabajo y aprovechamiento de capacidades instaladas entre distintos grupos e instituciones. A nuestro juicio, los activos más importantes que se generaron fueron el capital humano y la infraestructura analítica, dos elementos esenciales para el desarrollo del sector que no se hubieran logrado sin ésta iniciativa. También se obtuvieron resultados y metodologías novedosas que tienen aplicación directa en la exploración de recursos para generación eléctrica y para el uso directo de la energía térmica. En este último rubro, los proyectos demostrativos y la difusión de los usos directos del calor no tienen precedente en México. Con los proyectos desarrollados dentro del CeMIEGeo, se instalaron las primeras bombas de calor que operan en el país, actualmente se tienen 11 equipos con una capacidad instalada de 133 kW térmicos.

Por otra parte, el nuevo conocimiento generado acerca de los campos geotérmicos mexicanos en operación, trajo un beneficio directo a la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos (GPG) de la CFE y por ende al país. Las mejoras e innovaciones propuestas para varias técnicas de exploración geológica, geofísica y geoquímica representan también oportunidades para que la GPG las utilice en la prospección de sus áreas de interés exploratorio. La capacidad analítica que se logró establecer con el CeMIEGeo, cubrió prácticamente todas las necesidades de la industria geotérmica. Así mismo abrió la posibilidad de realizar análisis especializados en el país. Adicionalmente, con recursos del FSE el CeMIEGeo adquirió equipo de laboratorio para su instalación en dos de los campos geotérmicos operados por la GPG de la CFE.

Otro aspecto importante de mencionar, es la visibilidad internacional que tuvo el proyecto CeMIEGeo, la cual permitió a la oficina internacional del Conacyt negociar un convenio de colaboración con la Comunidad Europea (CE) en el tema de geotermia. Esto dió lugar al proyecto Gemex: “Cooperation in Geothermal energy research Europe-Mexico for development of Enhanced Geothermal Systems and Superhot Geothermal Systems”, con la participación de siete instituciones mexicanas y más de veinte instituciones europeas. El objetivo de este proyecto fue aprovechar las capacidades de los grupos mexicanos y europeos para avanzar en la comprensión de los recursos geotérmicos no-convencionales. El financiamiento fue por 20 millones de euros, de los cuales México aportó la mitad para apoyar la investigación de los grupos mexicanos y la CE la otra mitad para financiar a los grupos europeos. Se seleccionaron dos áreas de estudio, ambas en el Estado de Puebla, la zona de Los Humeros, un campo geotérmico en operación, y la zona de Acoculco, un prospecto de interés geotérmico. En este rubro los retos científicos y tecnológicos son enormes, los objetivos están a mediano y largo plazo, pero su potencial desarrollo puede multiplicar varias veces la capacidad geotérmica instalada actualmente. Es por tanto, un tema en el que la continuidad de las alianzas academia-industria a nivel nacional e internacional, representan un elemento clave para la colaboración en beneficio del país. Los avances y resultados del proyecto Gemex pueden consultarse en (<http://www.gemex-h2020.eu>).

Entre los beneficios con un impacto difícil de medir pero que son fundamentales tomar en cuenta, está la motivación que pudimos sembrar en jóvenes estudiantes que actualmente siguen preparándose en México y en el extranjero en temas asociados a la geotermia; la oferta de nuevos cursos, modalidades y especialidades en programas docentes; el establecimiento de nuevas líneas de investigación en las instituciones académicas del consorcio; la demostración de que el resultado del trabajo en equipo es mayor que la suma del trabajo individual, lo que se aplica tanto a nivel personal como institucional.

Otra aportación relevante es que, motivados por algunos de los proyectos ejecutados en el CeMIEGeo, se constituyeron tres empresas de base tecnológica dedicadas a llevar al medio comercial algunos resultados de proyectos de usos directos del calor geotérmico, específicamente la desalación de agua usando energía geotérmica y el uso de fluido geotérmico residual como fuente de energía para la deshidratación de alimentos (Ingeniería, Energía y Sustentabilidad Mexicana S.A. de C.V.; PI Ingenera S.A. de C.V.; Ingeniería Verde del Noroeste S.A. de C.V.).

Claramente, se identificaron áreas de oportunidad y problemas pendientes de atender en varios temas. La mayor parte de ellos se han descrito en los Mapas de Ruta Tecnológica (MRT) para la Geotermia y para los Usos Directos del Calor (https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/416191/MRT_UDCG_Final.pdf). En ellos se hace un diagnóstico de las capacidades y de los retos que tiene México para desarrollar sus recursos geotérmicos, se establecen metas, acciones y estrategias necesarias para lograrlas, así como los principales actores que deben intervenir para conseguirlas. Será importante que

estos documentos se revisen y actualicen a la luz de las prioridades nacionales actuales.

Debe mencionarse que los MRT dejan claro el papel que debe jugar la investigación científica en el desarrollo del sector. La vinculación efectiva academia-industria es necesaria para acelerar el desarrollo de la industria geotérmica nacional de tal forma que los recursos geotérmicos se puedan aprovechar de manera integral y sostenible.

La creación del CeMIEGeo permitió la asociación de instituciones, grupos de investigación y empresas, para la ejecución de proyectos específicos. Esto fomentó la coordinación inter-institucional para la adquisición de infraestructura y para la utilización colaborativa de la misma. La cohesión inter-institucional depende, en gran medida, de la posibilidad de continuar trabajando en proyectos conjuntos, particularmente en temas estratégicos para el país.

Un área de oportunidad que se identifica claramente es el impulso que requieren los proyectos de usos directos del calor geotérmico, particularmente aquellos orientados al desarrollo social y económico de comunidades rurales. La utilización de fuentes de energía térmica para la climatización de invernaderos, acuicultura, deshidratación de alimentos, entre otros, son alternativas productivas con una relación costo/beneficio atractiva y con un impacto directo en el desarrollo socioeconómico para el país.

Será necesario fomentar una mayor inversión pública y privada en proyectos que permitan el aprovechamiento integral de los recursos geotérmicos del país, para generar energía eléctrica limpia, pero también para el uso directo de la energía térmica en proyectos productivos que potencien el desarrollo social y económico de las comunidades.



Subestación eléctrica (primer plano) y unidad de generación de 5 MW (al fondo),
campo geotérmico de Los Humeros, Puebla, México.
Cortesía Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, CFE.

TEMAS ESTRATÉGICOS

A continuación damos cuenta de las aportaciones del CeMIEGeo en cada una de las líneas estratégicas que se plantearon. La Figura 1 muestra los sitios de estudio que se cubrieron dentro de la República Mexicana, los cuales incluyen las zonas más importantes con actividad geotérmica identificadas en el país.

EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS
GEOTÉRMICOS NACIONALES

La información básica acerca de las temperaturas, el flujo de calor y gradiente geotérmico que se encontraba disponible era relativamente escasa e incompleta, lo que motivó la realización de campañas de adquisición de datos, definición de provincias geotérmicas y un mejor censo de manifestaciones termales y acuíferos,



Figura 1. Sitios de estudio que abarcó el proyecto CeMIEGeo (2015-2018).

para tener una estimación actualizada del potencial del país, inicialmente asociado a sistemas hidrotermales y más adelante para recursos no-convencionales como roca seca caliente y otros tipos de recursos geotérmicos, incluyendo recursos submarinos.

Como resultado de esta línea estratégica se generaron nuevos y mejores mapas con información geológica, geofísica y geoquímica, los cuales aportan información fundamental, tanto para el sector público como para el privado, y proporcionan información geográfica sobre los recursos geotérmicos con que cuenta el país, así como el potencial de desarrollo futuro.

En esta línea se ejecutaron 4 proyectos que generaron 181 reportes técnicos, 19 publicaciones arbitradas, que se pueden consultar en el sitio <http://cemiegeo.cicese.mx/coleccion-digital>. Así mismo, se generaron 28 bases de datos, 53 mapas y 20 tesis, se ofrecieron 8

cursos y se realizaron 20 participaciones en congresos y 4 conferencias de divulgación.

Uno de los resultados relevantes es el mapa de la Figura 2 que muestra la distribución espacial del gradiente geotérmico en el territorio nacional. Similarmente se generaron mapas del flujo de calor y otros con información adicional.

La Tabla 1 detalla las observaciones que se tenían antes del proyecto en comparación con las que se lograron obtener durante la realización del CeMIEGeo, para construir estos mapas.

La Figura 3 muestra el resultado de integrar información geológica, geofísica y geoquímica en un mapa de provincias geotérmicas de la república mexicana. Mientras que en la Figura 4 se muestran las temperaturas estimadas con información geoquímica (geotermómetros de sílice).

Tabla 1. Comparación de parámetros estimados antes y después del CeMIEGeo.

PARÁMETROS ESTIMADOS	ANTES	DESPUÉS DEL CeMIEGeo
Mediciones de gradiente y BHT	87	1720
Geotermómetros de sílice	214	928
Estimaciones de temperaturas de Curie	292	2040

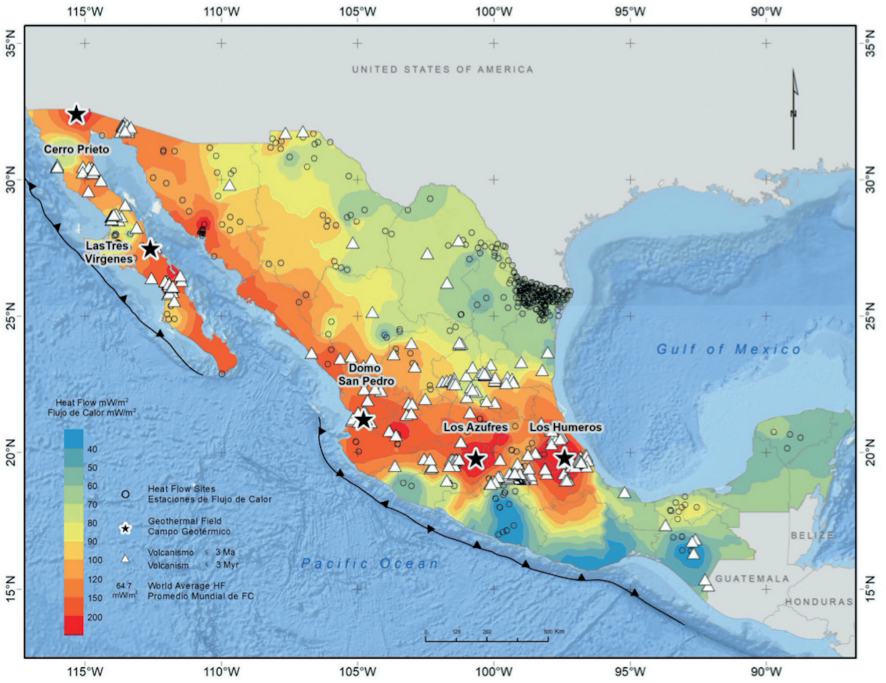


Figura 2. Mapa de gradiente geotérmico (Prol Ledesma, 2019).

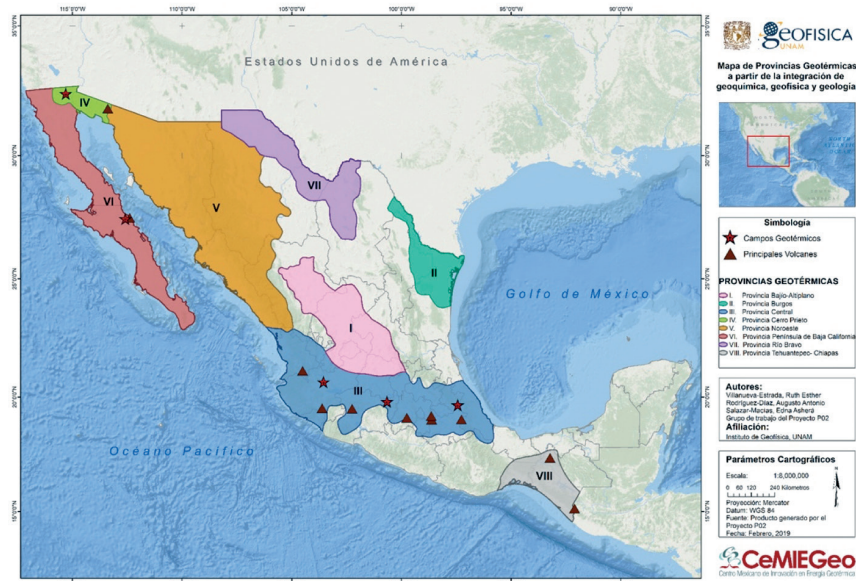


Figura 3. Mapa de provincias geotérmicas (Villanueva R., UNAM).

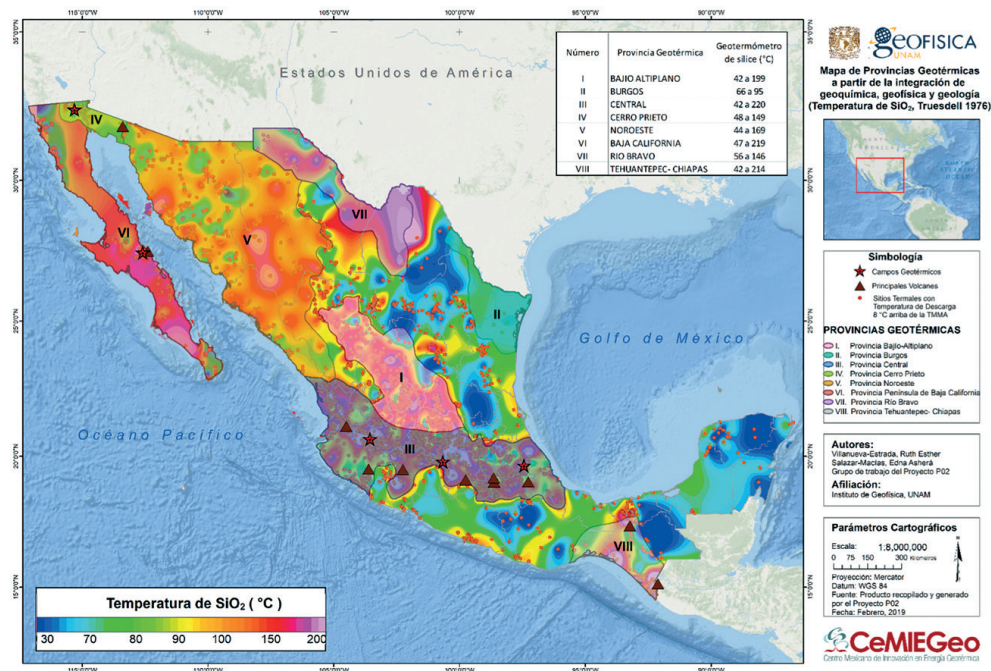


Figura 4. Temperaturas estimadas con el geotermómetro de SiO_2 (Villanueva R., UNAM).

Otro de los resultados relevantes en esta línea fue la estimación del potencial nacional de recursos geotérmicos de tipo EGS (Enhance Geothermal Systems), es decir recursos no-convencionales, en donde existe alta temperatura pero baja permeabilidad (Figura 5). Estos recursos son atractivos por

su gran potencial pero no pueden explotarse con las técnicas que se usan convencionalmente para los sistemas geotérmicos hidrotermales. La estimación del potencial EGS en México fue realizada por el grupo del INEEL, quienes estimaron un potencial de 47,350 MW, considerando profundidades entre 3 y 7 km y

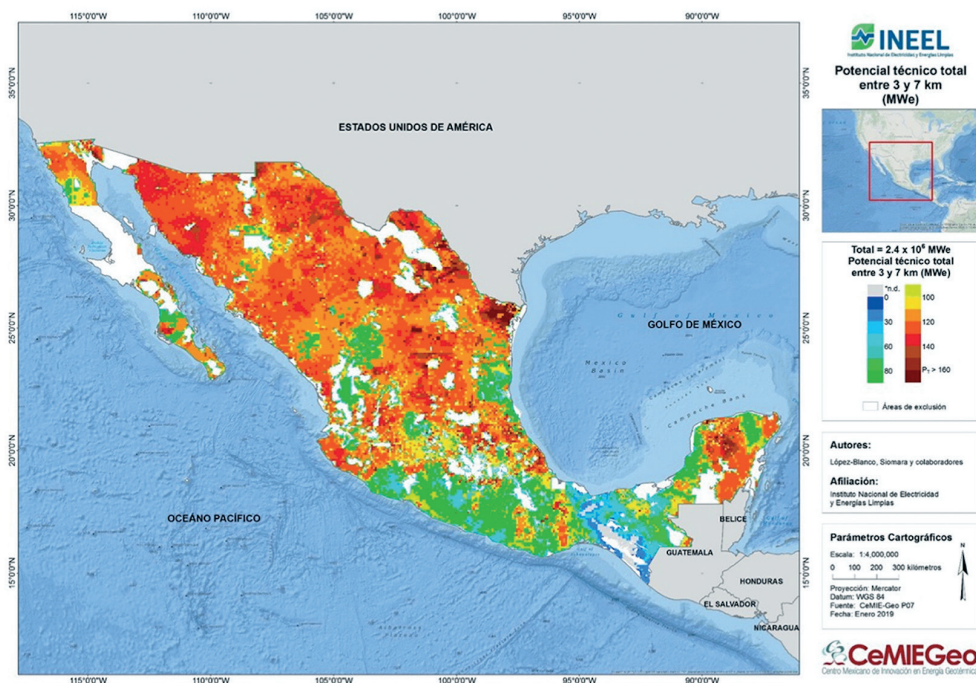


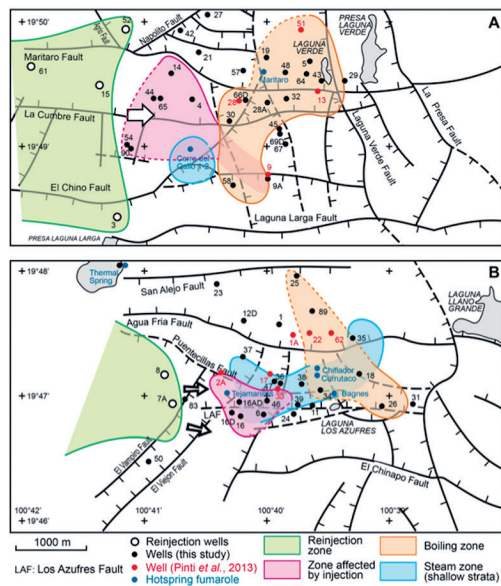
Figura 5. Potencial técnico de generación eléctrica de Sistemas Geotérmicos Mejorados (EGS) en México, entre 3 y 7 km (MWe) Hernández Ochoa, INEEL

Tabla 2. Potencial EGS en México (GW).

INTERVALO DE PROFUNDIDAD (KM)	$T_r > 150\text{ }^{\circ}\text{C}$	$150 \leq T < 200\text{ }^{\circ}\text{C}$	$200 \leq T < 250\text{ }^{\circ}\text{C}$	$250 \leq T < 300\text{ }^{\circ}\text{C}$	$300 \leq T < 350\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T > 350\text{ }^{\circ}\text{C}$	TOTAL
3-4	345.6	94.4	0.3	0	0	0	440.3
4-5	203.1	327.6	48.6	0.3	0	0	579.6
5-6	94.9	294.1	231.5	28	0.3	0	648.8
6-7	38.1	197.5	288.6	157.6	16.6	0.3	698.7
Total	681.7	913.6	569	185.9	16.9	0.3	2367.4
2%	13.63	18.27	11.38	3.72	0.34	0.01	47.35

un factor de recuperación del 2%, es decir, el equivalente a 47 veces la capacidad instalada actual (véase Tabla 2). Si se consideran sólo temperaturas mayores a $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, y profundidades máximas de 6 km, la estimación es de 20,500 MW, unas 20 veces la capacidad instalada actual. Esto establece un punto de partida para el futuro desarrollo de este tipo de recursos en el país, y hace patente la necesidad de contar con una base tecnológica mexicana y con el conocimiento especializado necesario para aprovechar esta nueva fuente de energía. El proyecto Gemex, mencionado antes, se enfoca en esta tarea.

Para que la explotación de un campo geotérmico sea sostenible en el tiempo es necesario estimar el volumen del recurso disponible en el subsuelo y la recarga natural del sistema, para mantener un balance entre ellos y no sobreexplotar el reservorio. No es una tarea fácil averiguar la cantidad de recursos disponibles en el subsuelo y saber si un sistema se está sobreexplotando o no. Uno de los proyectos ejecutados por la UMSNH desarrolló y aplicó una técnica que permite diagnosticar el grado de explotación de un sistema mediante el análisis de la geoquímica de los fluidos que se están explotando, particularmente



Resumen de resultados: Los Azufres, Michoacán.
(Wen et al., 2018 submitted)

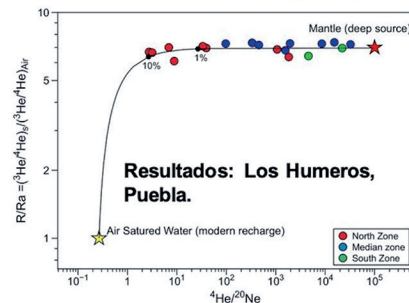


Figura 6. Resultados de isótopos de gases nobles en los campos de Los Azufres y Los Humeros. (A. López, UMSNH).

analizando los isótopos de gases nobles presentes en el fluido geotérmico. Usando esta metodología se analizaron los campos geotérmicos de Los Azufres, Los Humeros, Cerro Prieto y Las Tres Virgenes.

Los resultados han sido de gran interés para la CFE, porque les permite tomar acciones preventivas o correctivas que abonen a la sostenibilidad de los recursos disponibles en cada uno de estos campos geotérmicos (Figura 6).

DESARROLLO E INNOVACIÓN DE TÉCNICAS DE EXPLORACIÓN

El costo más importante en la etapa de exploración geotérmica es la perforación de pozos profundos. Por esta razón uno de los temas estratégicos del CeMIEGeo fue desarrollar nuevas y mejores tecnologías de exploración que permitan reducir la incertidumbre en la localización de sitios promisorios y contribuyan en la estimación de la profundidad y extensión de los recursos, así como determinar la temperatura y características químicas de los fluidos presentes. En esta línea de trabajo, se desarrollaron y experimentaron técnicas geológicas, geofísicas y geoquímicas para explorar recursos geotérmicos en prospectos de interés. A continuación se presentan los resultados más relevantes en estos temas.

En este rubro se ejecutaron nueve proyectos que generaron 78 tesis, 526 reportes técnicos, 23 cursos, 27 conferencias de divulgación, 50 publicaciones arbitradas, 97 ponencias en congresos, 67 bases de datos y 35 mapas.

Geología

Se lograron resultados innovadores en temas geológicos, tal es el caso del modelo conceptual del geotérmico de Los Humeros, Puebla (Figura 7) realizado por el Centro de Geociencias de la UNAM (CEGEO). Uno de los hallazgos de este proyecto es que ahora se sabe que la evolución volcánica de este campo es mucho más joven de lo que se pensaba, lo que implica que el proceso de enfriamiento de las fuentes de calor se encuentra en etapas más tempranas y se tienen condiciones geotérmicas más favorables. También se encontró que la permeabilidad del yacimiento no solamente se puede deber a fallas, sino también a fracturas y micro porosidad primaria no reportada con anterioridad. El modelo pone al día las condiciones geológicas del campo y aporta nuevo conocimiento que establece nuevas bases para su desarrollo futuro. Para la construcción del modelo se realizaron estudios geológicos, geofísicos y

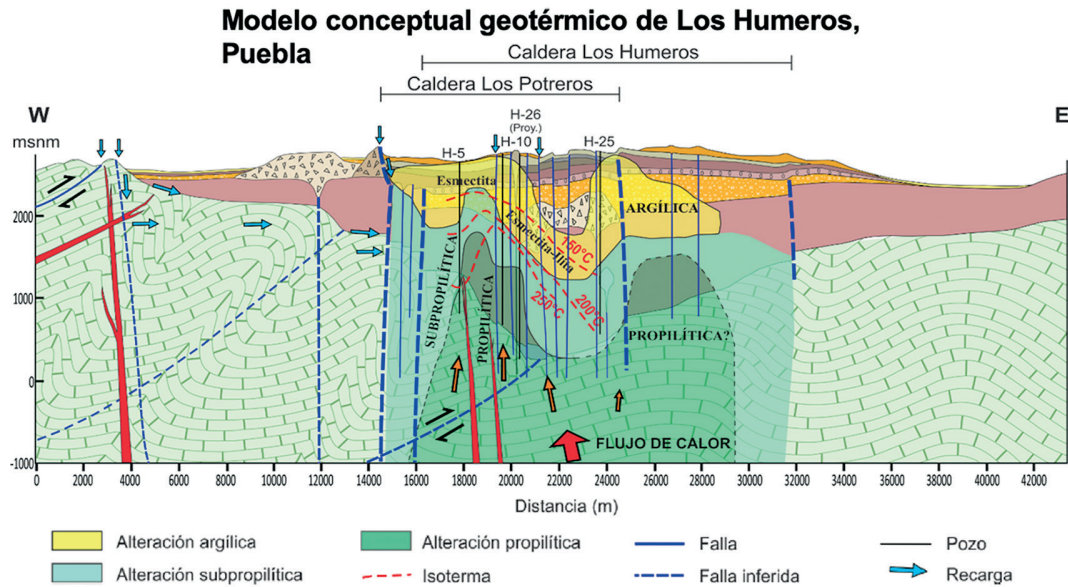


Figura 7. Modelo conceptual geotérmico de Los Humeros, Puebla. Carrasco Nuñez (UNAM).

geoquímicos utilizando tecnologías novedosas como la medición del campo magnético utilizando drones, o la microtomografía utilizando un nano tomógrafo montado en el CEGEO como parte del Sistema de Laboratorios Especializados del CeMIEGeo.

Otra de las tareas relevantes en el tema de exploración de zonas volcánicas de interés geotérmico

fue la realizada por el Instituto de Geofísica de la UNAM en su campus de Morelia, Mich. Como resultado de este proyecto se analizó la evolución volcánica de cuatro de las principales calderas volcánicas con interés geotérmico: La Primavera, en Jalisco, La Reforma y El Aguajito, en Baja California Sur, y Acoculco, en Puebla.

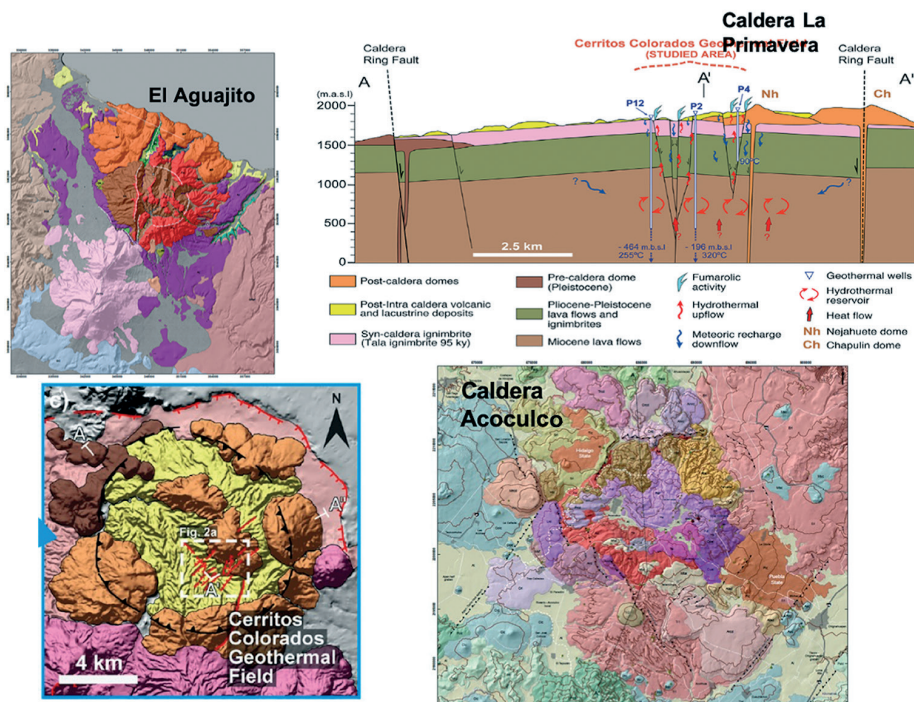


Figura 8. Mapas geológicos calderas de La Primavera y El Aguajito, Macías Vázquez, UNAM.

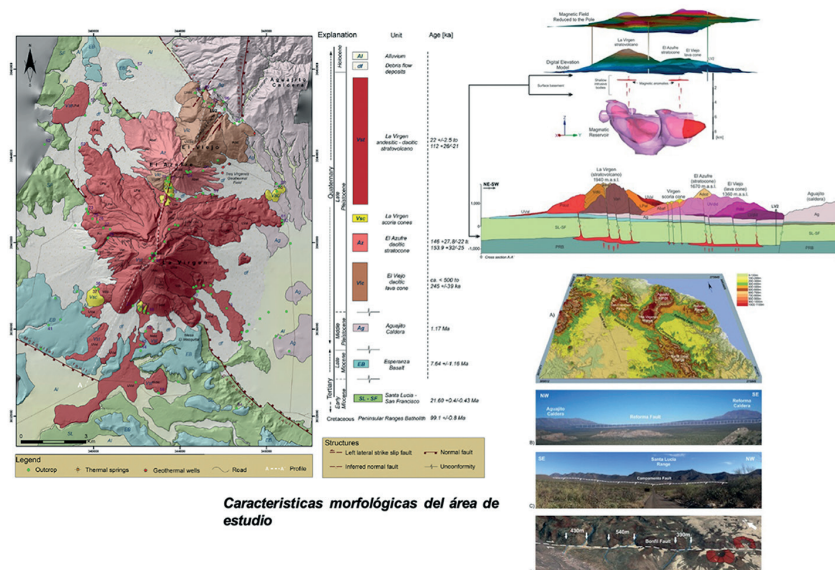


Figura 9. Mapas geológicos, campo volcánico Las Tres Virgenes, Macías Vázquez, UNAM.

En cada una de las zonas mencionadas se realizó trabajo de campo y se elaboró una cartografía volcánica (escala 1:25,000) con un detalle y precisión nunca antes visto. Esto permitió construir modelos vulcanológicos específicos, así como conocer la edad y reconstruir la evolución geológica de cada sitio, con precisión sin precedente. En las Figuras 8 y 9 se aprecian los nuevos mapas geológicos de varias de estas calderas, junto con su columna litológica y su historia eruptiva.

La nueva cartografía geológica permitió reconocer los centros eruptivos más jóvenes y su ubicación espacial con respecto a las fallas y zonas de producción actuales. Toda la información geológica, geofísica y geoquímica de las zonas de estudio se organizó en bases de datos. Esta información se reinterpretó junto con nuestros nuevos datos y se presentó en publicaciones en revistas internacionales (<http://cemiegeo.cicese.mx/coleccion-digital>).

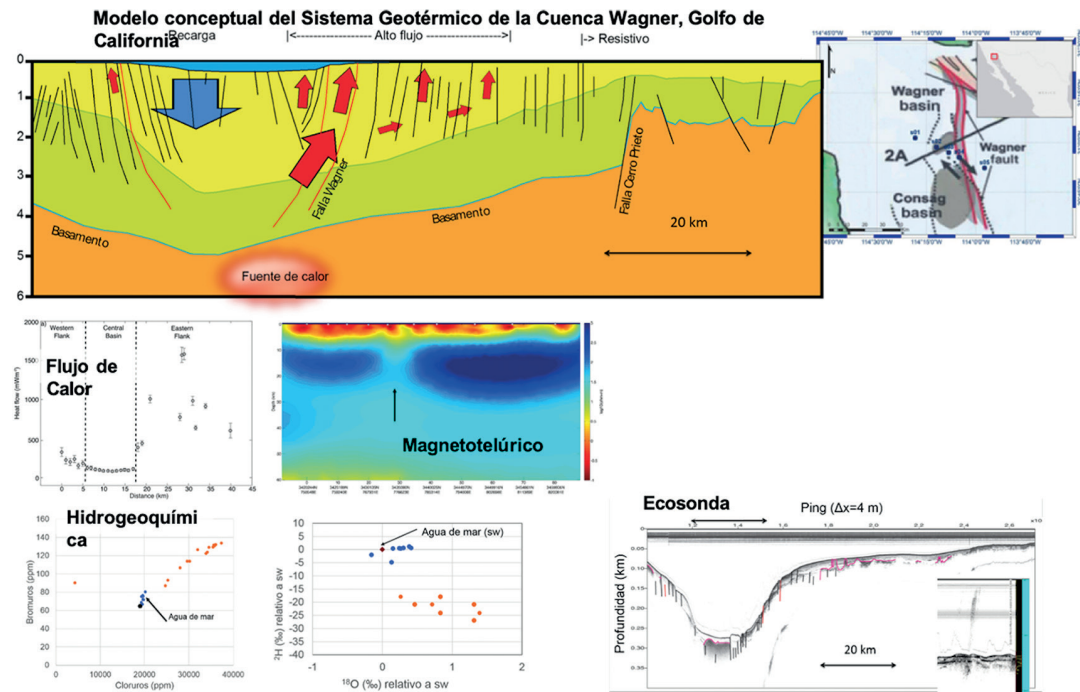
Geofísica

En cuanto a metodologías geofísicas, los proyectos ejecutados aplicaron las técnicas más avanzadas para explorar zonas de interés, pero también desarrollaron y mejoraron técnicas para el procesamiento e interpretación de datos, y desarrollaron nueva ins-

trumentación para el monitoreo geofísico en campos geotérmicos.

Por primera vez en México se utilizaron métodos electromagnéticos marinos para explorar anomalías térmicas en el Golfo de California. Este proyecto ejecutado en el CICESE, exploró la cuenca de Wagner en el Norte del Golfo de California y la zona de extensión cercana a la isla Tortuga (Ridge Tortuga) en la parte central del Golfo de California. En la cuenca de Wagner se realizaron mediciones del flujo de calor en el fondo marino a bordo del buque oceanográfico Alpha Helix del CICESE y con una sonda de flujo de calor adquirida como parte del instrumental del Sistema de Laboratorios Especializados CeMIEGeo. Adicionalmente, en colaboración con Scripps Institution of Oceanography, se llevaron a cabo campañas de medición de datos electromagnéticos (magnetotérmico marino) tanto en la cuenca de Wagner como en el Ridge Tortuga (Figura 10).

En la cuenca de Wagner se encontraron valores muy elevados del flujo de calor, así como zonas con alta conductividad eléctrica en el subsuelo marino, reveladas por los datos electromagnéticos. Ambos hallazgos están asociados con el delgado espesor de la corteza que caracteriza a esta zona de extensión tectónica, y probablemente se conecta hacia el



Modelo conceptual del Sistema Geotérmico del Ridge Tortuga, Golfo de California

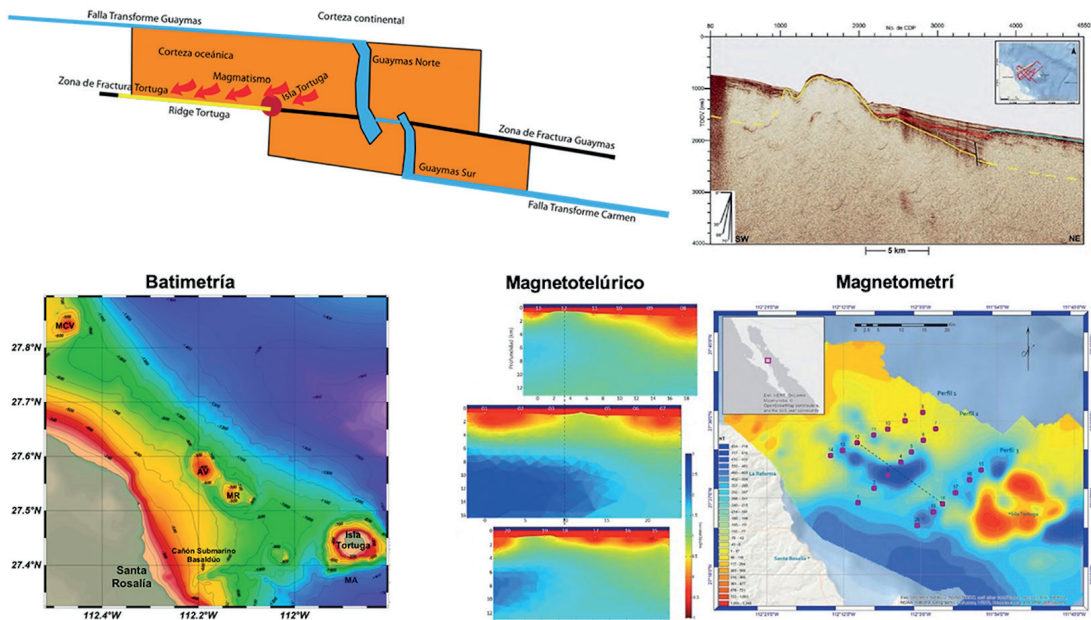


Figura 10. Modelo conceptual del Sistema Geotérmico de la Cuenca Wagner, Golfo de California y Modelo conceptual del Sistema Geotérmico del Ridge Tortuga, Golfo de California. González Fernández, CICESE.

Norte con el Rift de Cerro Prieto, en donde se ubica actualmente el campo geotérmico más grande del país. En contraste, en la parte central del Golfo de California los resultados de la exploración demuestran una ausencia de actividad volcánica reciente y condiciones poco favorables para la ocurrencia de recursos geotérmicos interesantes. En este caso las condiciones marinas no parecen ser similares a las del cercano campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, ubicado en la costa de Baja California Sur.

Vale la pena precisar que a la fecha, la exploración geotérmica se limita a prospectos en tierra, de manera que este trabajo en México, junto con alguna otra iniciativa conjunta entre Islandia y Noruega son pioneros en el tema (<https://www.thinkgeoenergy.com/offshore-geothermal/>).

El Golfo de California es una de las zonas con mayor flujo de calor en México, por lo que la relevancia en el conocimiento de los recursos geotérmicos marinos que alberga es importante para futuras decisiones sobre su aprovechamiento, cuando se tenga accesible la tecnología que permita una explotación sostenible y respetuosa del ambiente marino.

Otro de los trabajos realizados por personal científico del CICESE en el tema de exploración geotérmica,

consistió en el desarrollo de instrumentación para el monitoreo continuo del campo electromagnético natural. La medición de este parámetro físico proporciona información sobre la conductividad eléctrica de las rocas del subsuelo y está asociada a la presencia de fluidos a profundidad, por lo que es una de las herramientas más usadas en la exploración geotérmica. Comúnmente se realizan campañas de campo midiendo en distintos sitios por tiempo limitado, con esta información se puede obtener una imagen o modelo de la distribución de conductividad eléctrica en el subsuelo. La idea innovadora en este proyecto fue realizar un monitoreo continuo para tratar de deducir cambios temporales en las condiciones físicas del subsuelo. La instrumentación necesaria para ello se diseñó y construyó en el CICESE. A lo largo del proyecto, se implementaron 15 estaciones de monitoreo en el valle de Mexicali, en los alrededores del campo geotérmico de Cerro Prieto. La Figura 11 muestra la ubicación de las estaciones en el valle de Mexicali y algunas escenas de la instalación de los mismos.

Adicionalmente se realizaron varias campañas de mediciones convencionales para contar con información independiente, para validar el funciona-



Figura 11. Ubicación de estaciones de monitoreo en el valle de Mexicali y escenas de su instalación. Pérez Flores, CICESE.

miento de los nuevos instrumentos. Esto permitió identificar sobre la marcha algunos problemas en el equipo y al mismo tiempo compilar una base de datos de monitoreo para su análisis e interpretación posterior. Cabe señalar que los instrumentos van a requerir algunos ajustes adicionales que tendrán que hacerse en el futuro.

Los resultados de la red de monitoreo y de las campañas convencionales dieron origen a tres tesis posgrado en las que se procesó la información y se construyeron modelos de la conductividad del subsuelo (Figura 12). Un producto lateral, fue la elaboración de un software para la inversión en 3D de datos de gravedad y magnetismo, el cual fue registrado ante el INDAUTOR.

La Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) también llevó a cabo un par de proyectos en el rubro de exploración geofísica y geológica, con objetivos geotérmicos, en los alrededores del lago de Cuitzeo (Araró, San Agustín del Maíz, San Agustín del Pulque), Mich., y en Rancho Nuevo Gto., y Las Derrumbadas, Pue. Así mismo se realizó un estudio del fracturamiento y fallamiento en el Volcán Tacaná, en Chiapas, también asociado a la caracterización de este sitio como objetivo de interés geotérmico. La Figura 13 muestra algunos de los resultados en Cuitzeo, Mich.

La UMSNH también trabajó, en asociación con una empresa de Nueva Zelanda, en el diseño y prueba de una sonda para medición del flujo de calor sonero en zonas geotérmicas. La idea es tener un instrumento portátil (“aguja térmica”) que permita calcular el flujo de calor a partir de mediciones someras (~ 2 m), en vez de los tradicionales pozos de gradiente de más de 100 m de profundidad. Los instrumentos se probaron en dos campos geotérmicos mexicanos y se recomendaron modificaciones y mejoras al prototipo.

Geoquímica

También se desarrollaron e innovaron técnicas geoquímicas no-convencionales para la exploración y caracterización temprana de recursos geotérmicos, tanto para sistemas hidrotermales convencionales, como para sistemas geotérmicos “ocultos” (roca seca caliente o EGS).

En esta línea, el Instituto de Energías Renovables de la UNAM utilizó la información de 21 geotermómetros de gases para desarrollar el Sistema de Información SyS_GasChem v1.0 para procesamiento automatizado de bases de datos de composición química de fluidos geotérmicos (fase vapor) y aplicarlo a la determinación de temperaturas de

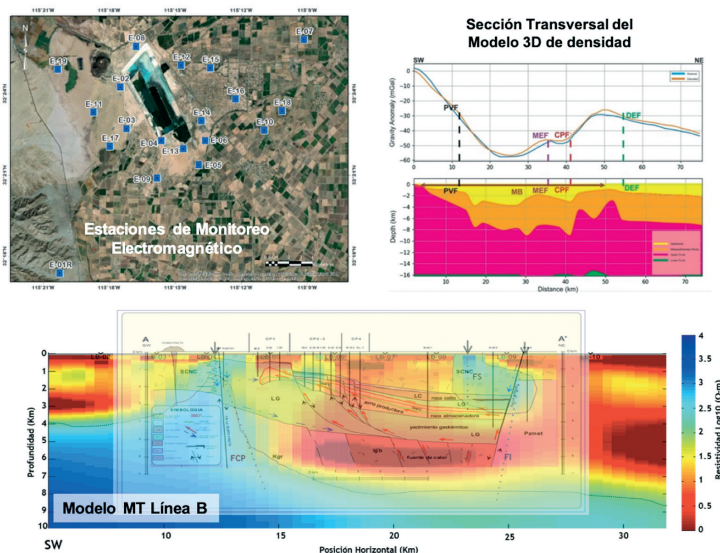


Figura 12. Topografía tridimensional de la interfase sedimentos-corteza granítica en el valle de Mexicali y modelos de densidad y de resistividad eléctrica. Pérez Flores, CICESE.

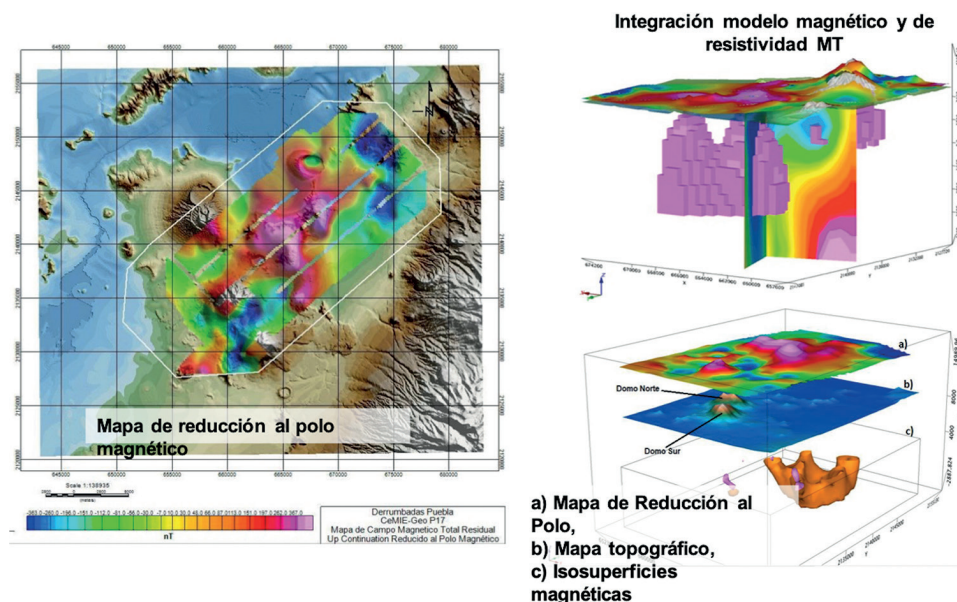


Figura 13. Anomalías magnéticas y modelos integrados en Cuitzeo, Mich. Garduño Monroy, UMSNH.

fondo de pozos geotérmicos. Este sistema estima de manera confiable, a partir de la composición química de los fluidos, la temperatura promedio en los pozos así como su incertidumbre. Similarmente se desarrolló el programa de cómputo GaS_GeoT v1.0 para la predicción más realista y confiable de temperaturas de fondo de sistemas geotérmicos a través de 8 nuevos geotermómetros de gases, desarrollados como parte del mismo proyecto. Con ello, se sentaron las bases teóricas y el diseño de experimentos para buscar la patente de un dispositivo geotermométrico que es útil para la estimación confiable de la temperatura de sistemas geotérmicos a partir de la geoquímica de sus fluidos. La Figura 14 muestra los sitios y parámetros de muestreo en la zona de Aocolco, Pue.

En este mismo tema, el Centro de Geociencias de la UNAM desarrolló el Simulador Cinético de Precipitación y Disolución de Minerales, para modelar los procesos físico-químicos que ocurren en el sistema agua-roca dentro de un yacimiento geotérmico de alta temperatura. Con ayuda de esta herramienta se puede simular el proceso de incrustación de sales minerales que ocurre en la tuberías de explotación, un problema frecuente que impide la explotación eficiente del campo geotérmico. La modelación termodinámica se validó con datos reales obtenidos en

el campo geotérmico de Los Humeros. En este mismo campo se analizaron los procesos de alteración hidrotermal dentro del yacimiento, lo que permitió añadir información valiosa al modelo conceptual de este campo geotérmico (Figura 15).

DESARROLLOS TECNOLÓGICOS PARA EXPLOTACIÓN

La tecnología asociada a los ciclos termodinámicos y a la construcción de equipos para generación de energía eléctrica está muy desarrollada y deja poco margen para la generación de nuevo conocimiento e innovación. Los proyectos de esta línea buscaron promover una ingeniería geotérmica mexicana, fomentando la creación de empresas de base tecnológica, así como el desarrollo de herramientas computacionales y simuladores numéricos de procesos industriales.

Los 12 proyectos involucrados en este tema estratégico generaron 32 tesis, 16 cursos, 289 reportes técnicos, 15 publicaciones arbitradas, 41 participaciones en congresos, 12 conferencias de divulgación, 2 bases de datos y 3 desarrollos tecnológicos.

El Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL) desarrolló una herramienta computacional para el cálculo de propiedades termodinámicas de mezclas de H_2O y CO_2 en intervalos amplios de



Figura 14 Sitios de muestreo y parámetros muestreados en Acapulco, Pue. Santoyo Gutiérrez, IER, UNAM.

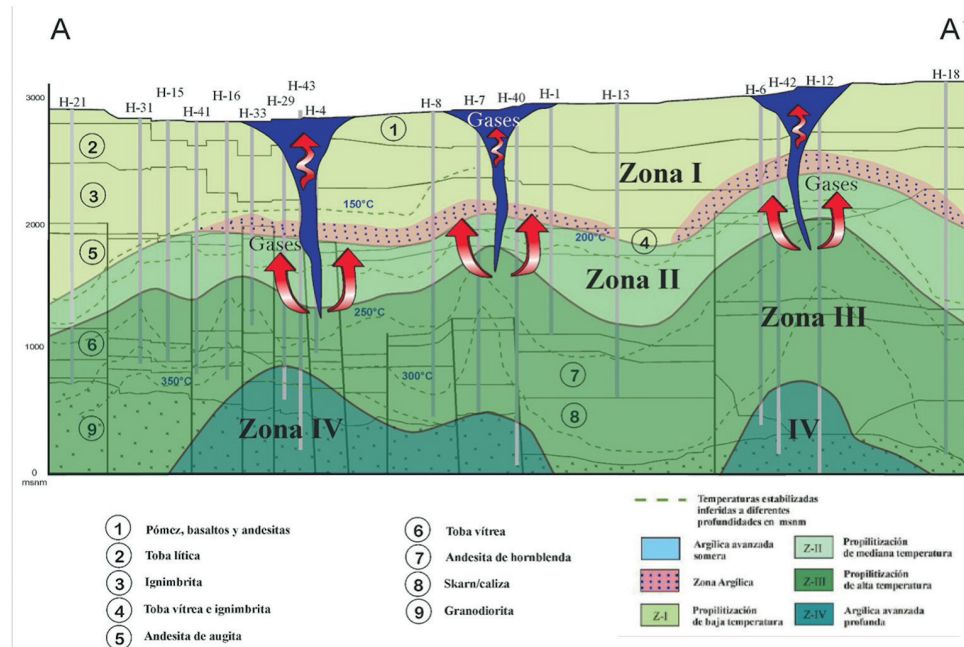


Figura 15. Paragénesis de alteración en Los Humeros, Pue. González-Partida, CEGEO, UNAM.

presión, temperatura y composición. El simulador tiene aplicación no solo en la ingeniería geotérmica sino en otros ámbitos, como el almacenamiento de CO_2 y en aplicaciones petroleras. Así mismo, puede usarse para simular las condiciones de un sistema de roca seca caliente (EGS) en donde se emplee CO_2 como el

fluido para extraer el calor de la roca. La Figura 16 muestra la validación del simulador comparando sus resultados con datos experimentales disponibles en la literatura internacional.

Otro desarrollo del INEEL fue el software GeoSteam.Net que consiste en un simulador de trans-

porte de vapor en una red de vaporductos en una planta de geotermoelectrica. El simulador es útil para optimizar la producción de energía eléctrica en un campo geotérmico, así como para apoyar la toma de decisiones en la operación y diseño de nuevas plantas geotérmicas. Como parte de este proyecto fue posible también desarrollar instrumentación experimental de laboratorio para medir las propiedades termodinámicas del agua. Se diseñó un Calorímetro Diferencial de Barrido y se montó un experimento para la medición de presión, volumen y temperatura (PVT) y calor específico del agua. Se realizaron mediciones preliminares hasta 700 K y 50 MPa. La información experimental obtenida con este dispositivo permitió proponer una nueva definición del calor específico del agua (líquido) a lo largo de la curva de saturación y calcular sus propiedades termodinámicas (tablas de vapor) de acuerdo con esta definición de calor específico. La Figura 17 muestra un diagrama de diseño del instrumento y las pruebas de validación.

En la UMSNH se ejecutaron varios proyectos con aportaciones importantes tanto para la geotermia como para otras áreas industriales. Uno de ellos fue el montaje de un laboratorio experimental de pruebas no destructivas, en el que se cuenta con instrumentación que permite caracterizar materiales y monitorear la integridad estructural de tuberías utilizando técnicas no destructivas, como la atenuación ultrasónica de ondas acústicas y la tomografía con ondas electromagnéticas guiadas (Figura 18). En el laboratorio también se pueden realizar pruebas mecánicas para caracterizar la resistencia de materiales metálicos.

En este mismo rubro se montó también el laboratorio de fundición para la fabricación de aleaciones especiales. Particularmente superaleaciones base Níquel y Titanio, las cuales requieren condiciones especiales de temperatura y ambiente al vacío (Figura 19). Este tipo de aleaciones se utilizan en piezas que se usarán bajo condiciones termodinámicas o mecánicas muy demandantes, como los álabes de la turbina de una planta geotermoelectrica o de una aeronave. En el laboratorio también se pueden simular procesos de solidificación en el diseño de piezas y aleaciones con propiedades térmicas y mecánicas especiales.

Otros casos de éxito en este tema estratégico y con un fuerte impacto y beneficio social, fueron los desarrollos tecnológicos que se llevaron a cabo en el

Instituto de Ingeniería (IINGEN) de la UNAM. Se trabajaron tres prototipos que llegaron a nivel TRL 6 y fueron probados en condiciones reales.

Se diseñó y se construyó un sistema de desalación de agua marina que aprovecha fuentes geotérmicas de baja entalpía para suministrar calor a un sistema de evaporación del agua de mar. El prototipo inicial tenía la capacidad de desalar 3 m³/día (Figura 20). Se elaboraron los planos de ingeniería para escalar el sistema para llevarlo a una capacidad de 40 m³/día.

Así mismo se diseñó y construyó un deshidratador de alimentos, primeramente un prototipo funcional con capacidad limitada, y finalmente un sistema con capacidad comercial que se instaló en la planta geotérmica del Grupo Dragón, en el Domo San Pedro, Nayarit. Este desarrollo utiliza el fluido residual de la planta geotermoelectrica para suministrar la energía térmica necesaria en el proceso de deshidratación de alimentos. Esta planta deshidratadora demuestra el potencial del aprovechamiento en cascada de la energía geotérmica, es decir el fluido con alta entalpía que viene del subsuelo se usa en primera instancia para generar electricidad y el fluido residual, ya con menor temperatura se aprovecha en este caso para la deshidratación de fruta y verdura. Adicionalmente, el proyecto tuvo un impacto social y comercial importante, al utilizar los productos que los ejidatarios del lugar no podían colocar en el mercado antes de su caducidad, pero que la deshidratación les permitió preservar sin perder las propiedades alimenticias.

La sinergia lograda entre los propietarios de la planta geotérmica, los agricultores locales y el grupo desarrollador del sistema de deshidratación propiciaron la creación de la empresa mexicana Geofood que comercializa la fruta y verdura deshidratada (Figura 21) (<https://www.piensageotermia.com/geofood-una-nueva-linea-de-productos-de-frutas-geotermicamente-deshidratadas-de-mexico/>).

El tercer prototipo desarrollado dentro de este proyecto fue un generador eléctrico con ciclo binario. El prototipo inicial con una potencia de 1 kWe sirvió de base para el escalamiento a una planta de 10 kWe que se instaló, junto con la planta deshidratadora en las instalaciones del Grupo Dragón, el Domo San Pedro, Nay. (Figura 22). El equipo utiliza energía geotérmica de baja entalpía para producir electricidad mediante un Ciclo Binario de Evaporación Instantánea (CBEI).

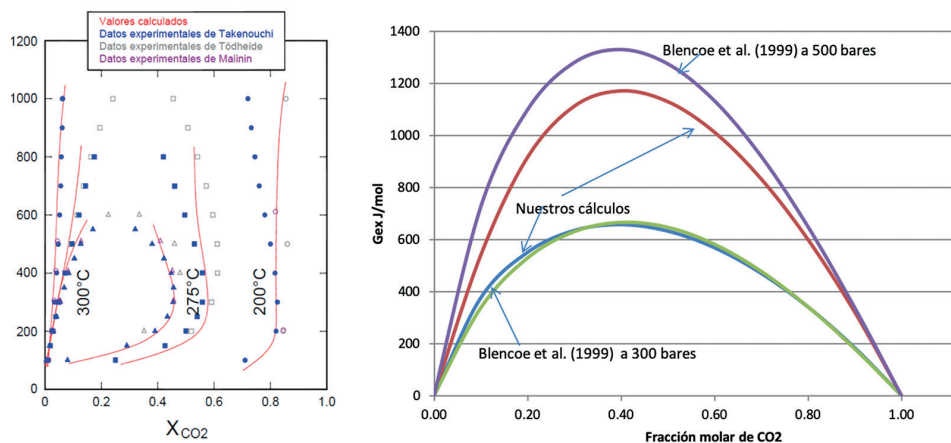


Figura 16. Propiedades termodinámicas de mezclas de H_2O y CO_2 para intervalos amplios de presión, temperatura y composición: uso de CO_2 como fluido de trabajo. Hernández Ochoa, INEEL.

Diseño y prueba Calorímetro Diferencial de Barrido

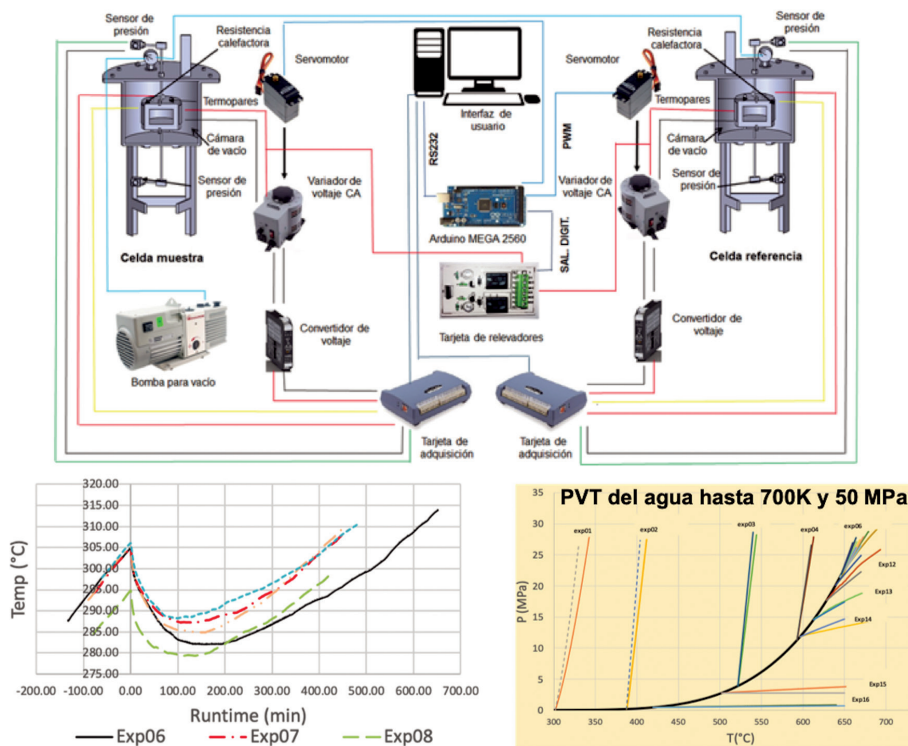


Figura 17. Diseño y prueba calorímetro diferencial de barrido. (PVT del agua hasta 700K y 50 MPa) Mahendra Pal, INEEL.

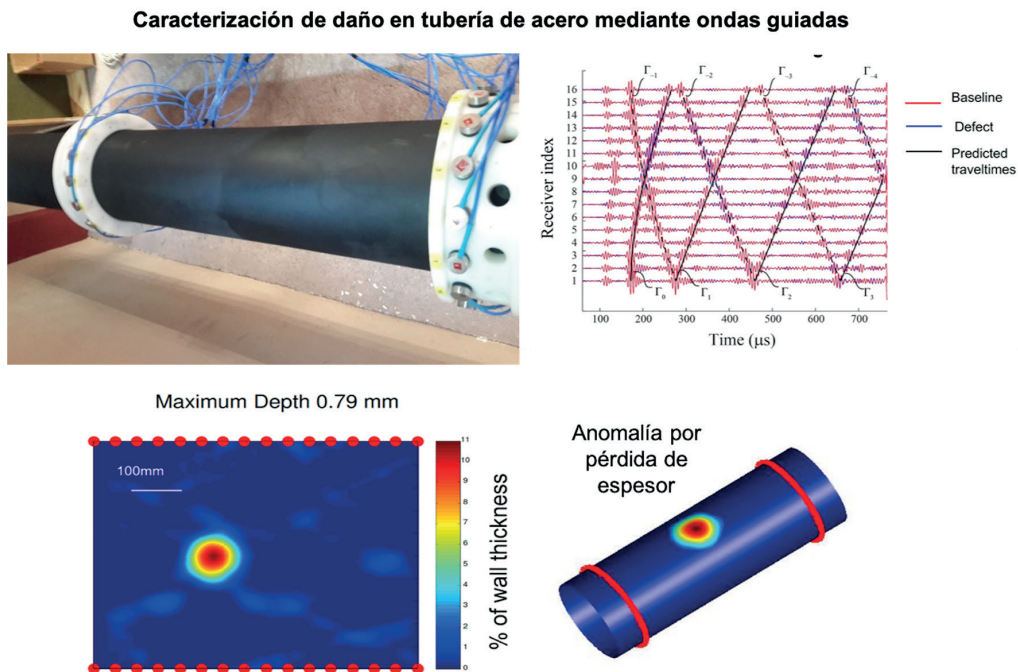
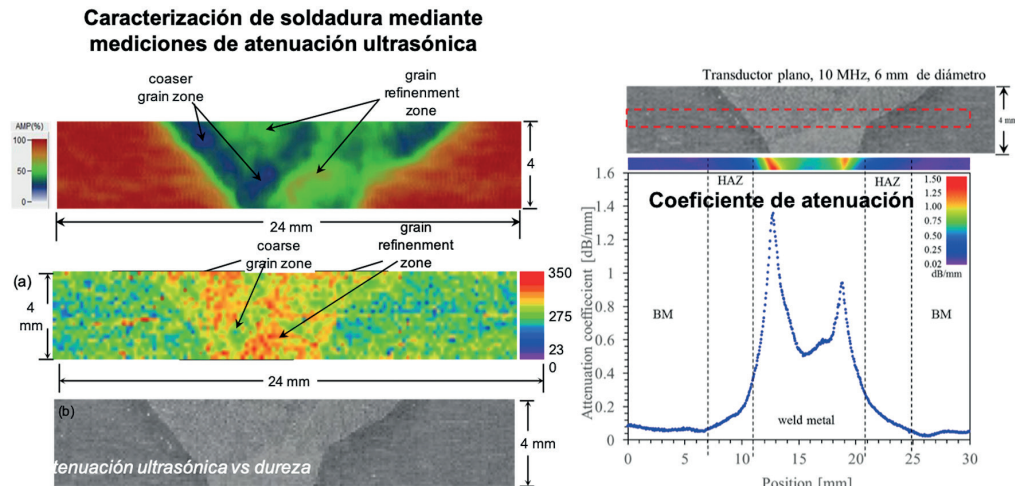


Figura 18. Caracterización de daño en tubería de acero mediante ondas guiadas.
Ruiz Marines, UMSNH.

A diferencia de un ciclo binario convencional el ciclo CBEI utiliza un innovador sistema de generación de vapor que incrementa la eficiencia del sistema y requiere una menor demanda de energía.

Entre los proyectos desarrollados en la UMSNH en este tema estratégico, vale la pena mencionar la construcción de un prototipo para mostrar el con-

cepto del uso en cascada de la energía geotérmica, así como la factibilidad de integrar distintas tecnologías para aprovechar energía térmica de media y baja entalpía. El prototipo se montó en Ixtlán de Los Hervores, Mich. y consiste en una planta de generación eléctrica con ciclo binario tipo Rankine con una potencia de 40 kWe operando con fluido

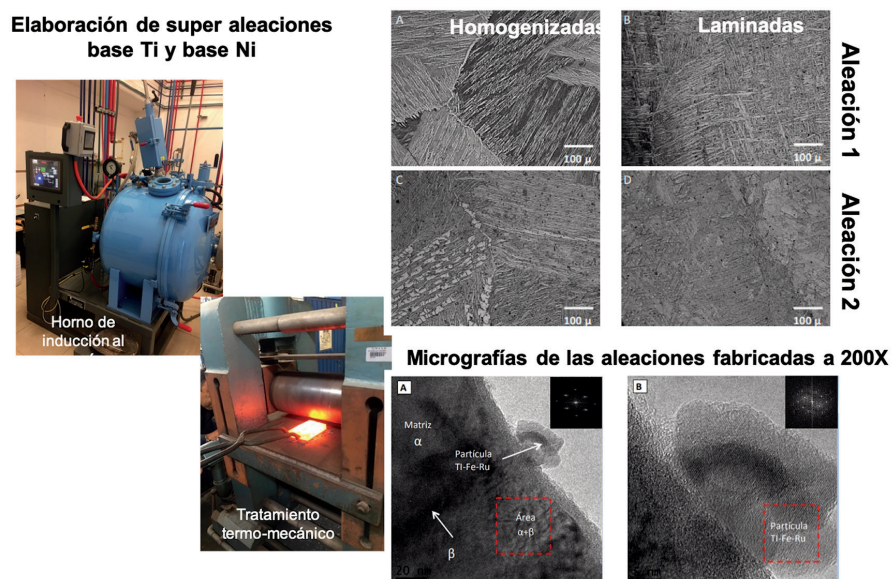


Figura 19. Imágenes de la infraestructura del laboratorio de fundición y ejemplos de algunas aleaciones obtenidas. Bedolla Jacuinde, UMSNH.



Figura 20. Prototipo de la planta desaladora de 3 m³/día. Aviña et al., IINGEN, UNAM.

geotérmico a 110 °C y un refrigerador por absorción para producción de 50 ton de hielo y 2.16 m³/hr de agua fría a 5°C. Adicionalmente se puede integrar un deshidratador de alimentos (Figura 23).

En la UMSNH también se diseñó y se construyó un turbogenerador con una capacidad de 300 kW para instalarlo en una planta de generación geotermoeléctrica de media entalpía, la cual salió de operación del campo geotérmico de los Azufres y fue donada por la CFE a la UMSNH. Se trata de una planta de ciclo binario que actualmente está ubicada en la localidad de Simirao, Mich., en donde existe un pozo con fluidos de media entalpía que se planea conectar y aprovecharlo para suministrar calor al fluido de trabajo, que en este

trica de media entalpía, la cual salió de operación del campo geotérmico de los Azufres y fue donada por la CFE a la UMSNH. Se trata de una planta de ciclo binario que actualmente está ubicada en la localidad de Simirao, Mich., en donde existe un pozo con fluidos de media entalpía que se planea conectar y aprovecharlo para suministrar calor al fluido de trabajo, que en este

caso es isopentano. Algunas otras partes de la planta se van a rehabilitar, en particular sistemas electrónicos de monitoreo y control para adecuarlos a las condiciones actuales (Figura 24).

Otro aspecto que se abordó dentro de este tema estratégico por el grupo de investigación de la UMSNH, fue la prueba de diferentes tecnologías para la extracción del fluido y energía térmica de un pozo geotérmico ubicado en Araró, Mich. Tres de las cuatro tecnologías probadas mostraron tener capacidades para operar con la planta binaria de 300 kW. En la Figura 25 se detallan las ventajas y desventajas encontradas para las tecnologías probadas, así como los valores de temperatura, presión y flujo obtenidos con cada una de ellas.

Como parte de los desarrollos computacionales, la UMSNH elaboró una herramienta para auxiliar el monitoreo de variables técnicas y costos del proceso de perforación de un pozo geotérmico. El software PetroCost utiliza la información de variables mecánicas durante la perforación, así como las propiedades

del fluido de perforación, en un sistema informático que ofrece al perforista un panorama integral del proceso para su monitoreo y control. El sistema se probó durante la perforación de un pozo somero en terrenos de la UMSNH (Figura 26).

La UMSNH también desarrolló una plataforma informática para estimar la factibilidad técnica y financiera de proyectos geotérmicos en México. Se trata de una herramienta informática en línea que puede ser utilizada para la consulta de la evaluación técnica y financiera de prospectos geotérmicos, la cual incluye modelos matemáticos simples que permiten la evaluación de costos, cálculo de potenciales, vida útil y tendencias temporales (Figura 27).

Uno de los proyectos de enfoque y componente social más importante, fue el desarrollado por personal del CICESE para la determinación de la línea base ambiental en tres sitios con potencial geotérmico: El Chichonal en Chiapas, Acoculco en Puebla y Los Negritos en Michoacán (Figura 28). En ninguno de estos tres sitios existe explotación de los



Figura 21. Planta de deshidratación de alimentos y empresa comercializadora. Aviña *et al.*, IINGEN, UNAM.



Figura 22. Planta generadora de 10 kWe con ciclo binario instalada en el Domo San Pedro, Nayarit, Aviña *et al.*, IINGEN, UNAM.



Figura 23. Planta piloto experimental de uso en cascada de energía geotérmica. El prototipo consiste de una planta de generación eléctrica con ciclo binario y una máquina para fabricación de hielo. Rubio Maya, UMSNH.

recursos geotérmicos potenciales, por lo que era de sumo interés saber el estado (o línea base) del medio ambiente local en términos de contaminación por actividades humanas, agrícolas o industriales. Durante el proyecto se definieron indicadores ambientales, se elaboraron Planes de Desarrollo Social y una Guía de Buenas Prácticas para establecer líneas base ambientales, sociales y económicas que orienten el desarrollo de futuros aprovechamientos geotérmicos.

Este proyecto tuvo la participación de un grupo interdisciplinario de expertos tanto en ciencias ambientales como en desarrollo social y económico (Figura 29). Uno de los temas de interés fue investigar la aceptación social de proyectos energéticos en las distintas comunidades, así como conocer las causas y proporcionar a las comunidades información sobre los beneficios y posibles inconvenientes de este tipo de desarrollos. El estudio proporcionó información sobre

los intereses y principales necesidades de las distintas comunidades, lo cual resulta muy valioso para poder diseñar un proyecto geotérmico que ayude a satisfacer las necesidades detectadas y tenga un beneficio directo, social y económico, para la población local. Este tipo de información también resulta útil para saber cómo solucionar problemas sociales que actualmente existen en otros lugares con explotación geotérmica.

La Guía de Buenas Prácticas propone estrategias para la 'apropiación' social de proyectos geotérmicos, especialmente de usos directo de la energía térmica, que permitan la integración económica de las comunidades en los futuros desarrollos (Figura 30).

USOS DIRECTOS DEL CALOR GEOTÉRMICO

El acondicionamiento térmico de espacios y las diversas aplicaciones agroindustriales del calor geotérmico, se han utilizado durante décadas en otros países. Sin

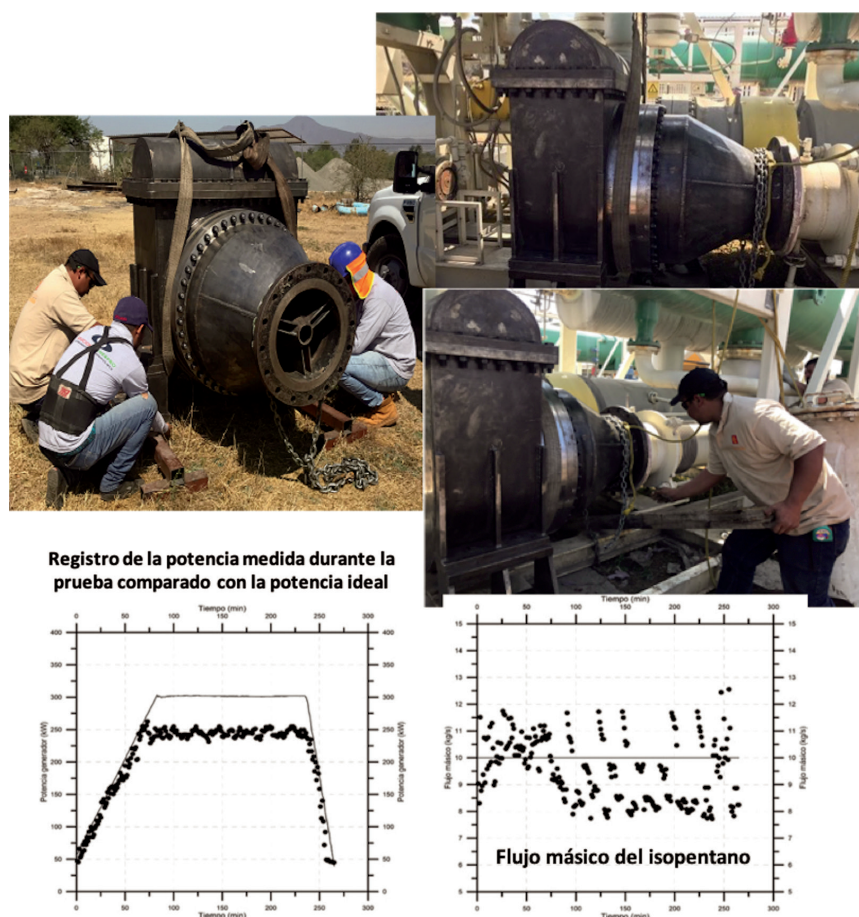


Figura 24. Instalación y prueba del turbogenerador en una planta de ciclo binario de 300 kW. Soriano Peña, UMSNH.

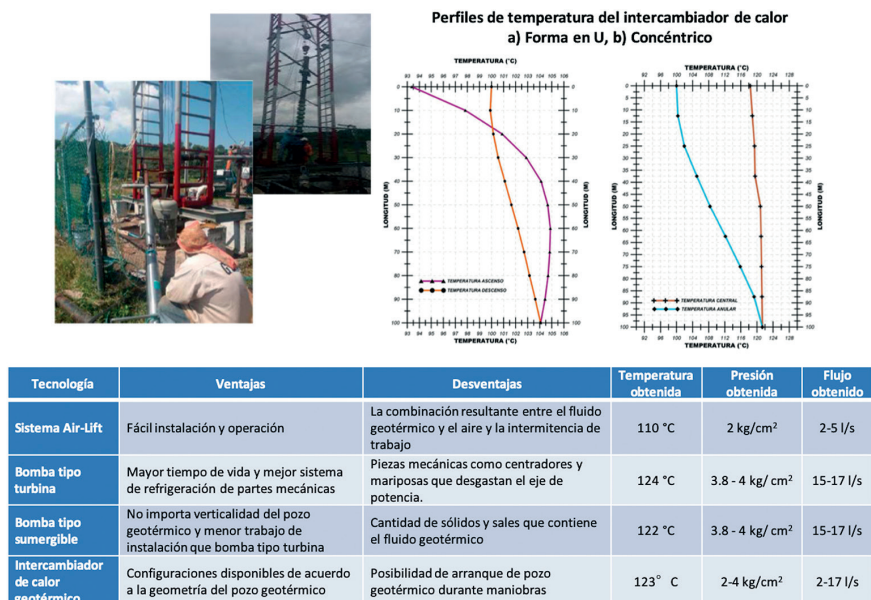


Figura 25. Prueba de metodologías para extracción del calor geotérmico en el pozo de Araró, Mich. Jesús Pacheco, UMSNH.

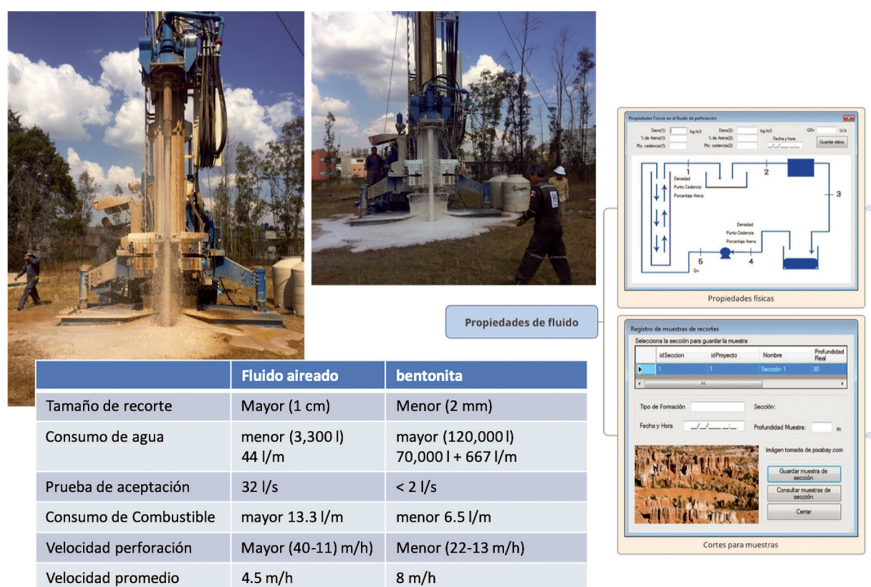


Figura 26. Prueba de sistema de monitoreo en la perforación de pozos someros. Hugo Gutiérrez, UMSNH.

embargo en México, excepto por el aprovechamiento de aguas termales para balneología y uso terapéutico, las numerosas aplicaciones de fuentes termales de baja entalpía son prácticamente desconocidas tanto por el público en general como por los empresarios mexicanos. Por esta razón se buscó dar a conocer a través de

proyectos demostrativos funcionales, la viabilidad de algunas de sus aplicaciones.

Una de las motivaciones principales para dar a conocer y promover el aprovechamiento de este tipo de recursos, es su extensa distribución geográfica en el territorio nacional. A diferencia de los recursos



Figura 27. Vista inicial de la plataforma desarrollada para evaluación de factibilidad en prospectos geotérmicos. Galván González, UMSNH.



Figura 28. Localidades de estudio y enfoques que se abordaron. González Acevedo, CICESE.

geotérmicos de alta entalpía, los cuales se encuentran localizados en sitios con características geológicas particulares (calderas volcánicas o zonas de extensión cortical), las aguas termales ocurren en muy diversos lugares, muchas veces en forma de manan-

tiales calientes o como aguas subterráneas cercanas a la superficie (Figura 31).

Por otra parte, el aprovechamiento de este tipo de fuentes termales mediante pequeños proyectos productivos en los que se podría involucrar a las comu-

nidades locales, tendría un impacto y beneficio social muy importante, ya que generalmente están alejadas de los centros de desarrollo socio-económico. Por estas razones se consideró de suma importancia la asimilación de las tecnologías para los usos directos del calor geotérmico y su promoción a través de proyectos demostrativos.

Un excelente ejemplo de este esfuerzo fue el que se llevó a cabo en la Universidad Politécnica de Baja California (UPBC) donde por primera vez en México, se mostró un sistema de bombas de calor geotérmico (BCG) para aplicaciones agroindustriales, siguiendo normas internacionales (ASHRAE, IGSHPA). El proyecto consistió en montar un prototipo demostrativo y funcional de un invernadero, en condiciones de operación reales, para una de las regiones del país con temperaturas más extremas, como lo es Mexicali, B.C. (Figura 32).

Las bombas de calor geotérmicas son dispositivos que pueden tomar el calor de un recinto y transportarlo al subsuelo, o viceversa, tomar el calor del subsuelo y transportarlo a un recinto. En este proyecto las BCG mostraron su eficiencia para climatizar el invernadero, manteniéndolo a la temperatura ideal tanto en invierno (calentándose) como en verano (enfriándose). Además, al mantener la temperatura ideal para el desarrollo de un cultivo, independientemente del clima y en un ambiente

controlado, permite aumentar la productividad a los largo del año y obtener cosechas adelantadas (sin importar la estación del año), lo que incrementa notablemente su competitividad y la oportunidad de colocar el producto en el mercado.

En este invernadero se han producido tomates, pepinos y otros productos de alta calidad. Además de mostrar la tecnología a los agricultores y empresarios interesados, este prototipo sirvió como laboratorio experimental y académico para la formación de los jóvenes universitarios.

Otro ejemplo con un alto impacto y beneficio social para la comunidad de estudio, fue el que se realizó por parte del grupo del INEEL, quienes llevaron a cabo la instalación de dos sistemas con BCG en el poblado de Los Humeros, Pue. Uno de ellos se instaló en una pequeña clínica del IMSS con el objetivo de proporcionar calefacción; el otro en un aula de educación preescolar, con la misma finalidad de proporcionar calor, sobre todo en la estación invernal en la que la temperatura suele descender cerca de 0 °C (Figura 33).

Este mismo grupo del INEEL, en colaboración con los colegas de la Universidad Politécnica de Baja California (UPBC), en Mexicali, B.C. instalaron un sistema de climatización (principalmente refrigeración) de un laboratorio dentro del campus universitario, en la ciudad de Mexicali, B.C. Para tal efecto, fue necesaria

Línea Base Ambiental

Guía de LBA en hidrocarburos
(SEMARNAT y ASEA, 2017)



Línea Base Social

Disposiciones administrativas EIS
(SENER, 2016)

Figura 29. Aspectos considerados dentro del proyecto.

González Acevedo, CICESE.

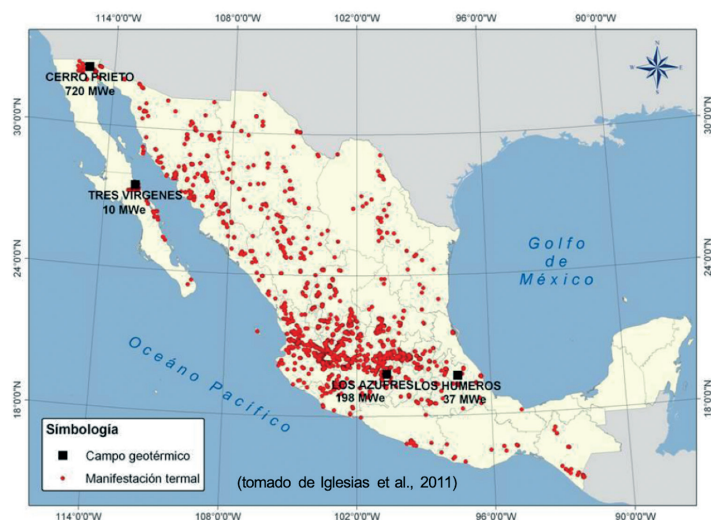


Figura 30. Propuesta para Guía de Buenas Prácticas.
González Acevedo, CICESE.

la instalación de intercambiadores de calor tanto en forma horizontal (en trincheras), como verticales, que requirieron perforaciones del terreno que se llevaron a cabo en colaboración con el equipo de perforación del Sistema de Laboratorios Especializados del CICESE (Figura 34).

Adicionalmente el INEEL realizó un estudio de factibilidad técnica-económica para el uso de las BCG en México (Torres-Luna, 2018) y creó un Centro de Capacitación para entrenamiento técnico de especialistas en el diseño e instalación de sistemas térmicos con BCG.

Por su parte, en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo se llevó a cabo la climatización del Herbario de la Facultad de Biología, el cual es un recinto para conservar especímenes diversos, que debe mantener una temperatura constante de 18°C. En este sitio se colocó un sistema de clima controlado con BCG en el que los intercambiadores de calor se instalaron tanto en trincheras horizontales como en pozos verticales (Figura 35).

Otro de los proyectos ejecutados por la UMSNH consistió en el diseño, construcción y prueba de un sistema modular para la deshidratación de alimentos. El sistema fue diseñado para ser fácilmente transportado y armado, puede utilizar una fuente de calor geotérmica (superficial o subterránea) o cualquier otra fuente de energía renovable como solar o eólica. El proyecto incluyó un estudio minucioso para

determinar las temperaturas óptimas y los procesos necesarios para la deshidratación de diez productos de alto valor comercial, sin que éstos pierdan ninguna de sus propiedades nutritivas (Figura 36). Este proyecto, al igual que otros que se han mencionado, buscó que el producto final tuviera un impacto social significativo. En este caso el sistema modular es de fácil apropiación para pequeños productores en cualquier comunidad rural del país.

FORMACIÓN DE RECURSOS HUMANOS ESPECIALIZADOS

Uno de los temas transversales de mayor interés para el CeMIEGeo se enfocó en la formación de capital humano, tanto en el ámbito académico como para su integración a la industria. Con el objeto de incentivar de la mejor manera posible la limitada oferta educativa en materia de geotermia y aprovechando que la mayoría de los expertos en el área formaban parte de las instituciones adscritas al consorcio CeMIEGeo, se planeó abordar este tema desde varios frentes.

En cuanto a la educación formal, sobre todo a nivel posgrado, se promovió la inclusión de nuevos cursos especializados en los programas de posgrado de las instituciones del consorcio (División de Ciencias de la Tierra del CICESE, Instituto de Geofísica, UNAM, Instituto de Energías Renovables, UNAM, Instituto de Ingeniería, UNAM, Instituto de Investigaciones en

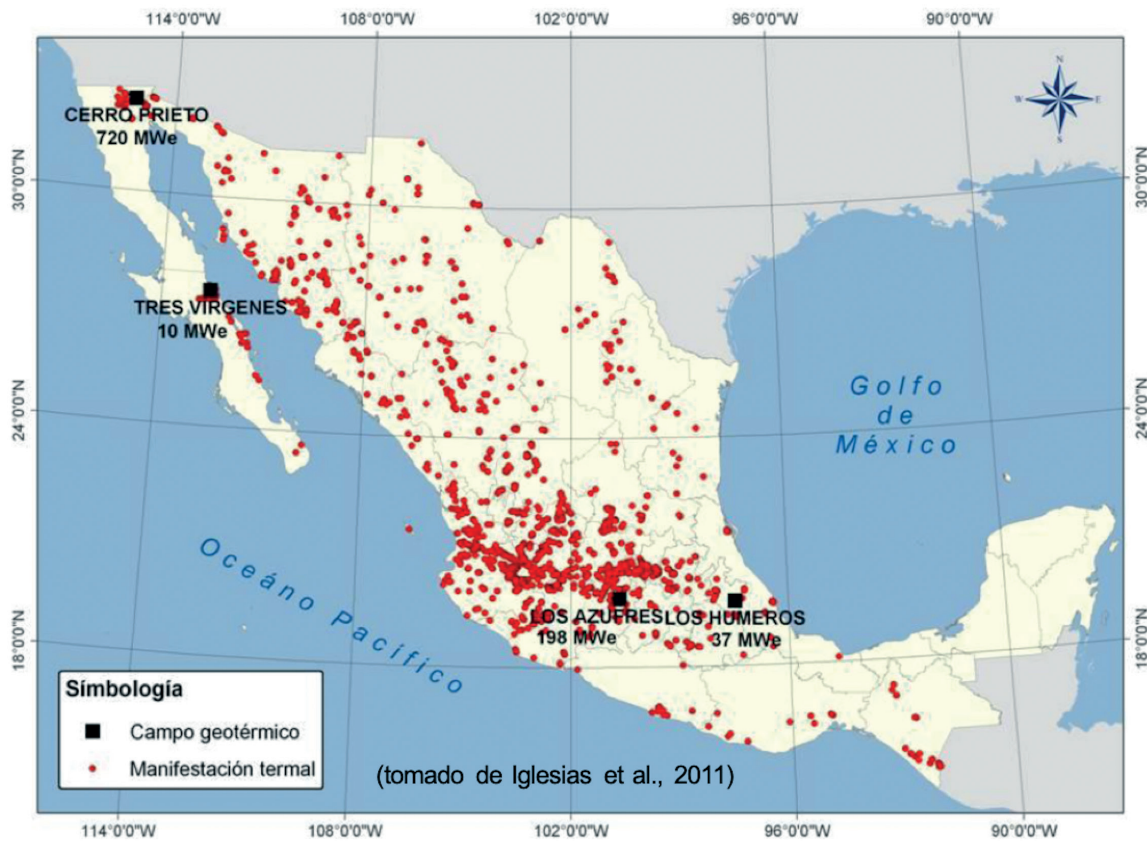


Figura 31. Fuentes termales con temperaturas medias y bajas (<100°C puntos rojos). Los símbolos cuadrados negros marcan la localización de los campos geotérmicos mexicanos de alta entalpía (Iglesias *et al.*, 2011).



Figura 32. Climatización de un invernadero con uso de bombas de calor geotérmico. Vistas del invernadero, los cultivos y del equipo de BCG. Mercado Herrera, UPBC.



Figura 33. Preparación del terreno para instalar los intercambiadores de calor y ceremonia de inauguración de los sistemas de climatización con BCG: Aula preescolar y Clínica del IMSS, Los Humeros, Puebla. Torres Luna, INEEL.



Figura 34. Preparación del terreno para la instalación de los intercambiadores de calor en trincheras horizontales y en pozos verticales. Vistas de las trincheras, de la perforadora del SLE-CICESE y del laboratorio climatizado en la UPBC, Mexicali. Torres Luna, INEEL.

Ciencias de la Tierra, UMSNH, Centro de Sismología y Volcanología, U. de G). Adicionalmente, se abrieron líneas de investigación ofreciendo temas de tesis asociados a los proyectos estratégicos. Como resultado de estas acciones, para junio de 2019 se habían graduado 114 estudiantes de licenciatura y posgrado. Actualmente, en las instituciones del consorcio se siguen escribiendo tesis y ofreciendo cursos motivados por este impulso inicial.

Por otra parte, se organizó un programa de cursos de especialización dirigidos tanto a profesionales trabajando en la industria geotérmica como a estudiantes de licenciatura y posgrado. El programa consistió en 12 cursos especializados con 40 horas efectivas de clase, impartidos por expertos internacionales (Figura 37). Estos cursos que se ofrecieron a lo largo de la vigencia del proyecto, cubrieron diversos temas de interés para la industria y la academia. Asistieron presencialmente 30 estudiantes por curso y se realizó la transmisión simultánea a todas las instituciones del consorcio. Estimamos haber beneficiado a alrededor de 500 personas interesadas.

Adicionalmente se promovió la creación de un programa de actualización o educación continua, que finalmente se concretó en el establecimiento de una

“Especialización en Exploración y Aprovechamiento de Recursos Geotérmicos” en la Facultad de Ingeniería de la UNAM (Figura 38).

Para lograr una mayor difusión entre jóvenes de educación media superior y universitarios, y aprovechando la ventaja de los cursos en línea con alcance masivo, se elaboró el curso denominado “Introducción a la Geotermia”, que se ofreció en la plataforma internacional Coursera (<https://www.coursera.org/learn/geotermia>). Hacia el final del proyecto este curso había tenido del orden de 10,000 participantes, al día de hoy se han registrado más de 20,000 inscritos y se han graduado cerca de 1700 personas, no solo en México sino en todo el mundo.

El alcance internacional y la facilidad para el acceso a distancia, han hecho de este curso un medio de difusión inmejorable y una fuente de motivación para jóvenes interesados en la geotermia y en general en las energías limpias.

Adicionalmente, se promovió la movilidad y el intercambio de estudiantes entre las instituciones del consorcio y hacia instituciones del extranjero, se apoyaron estancias de investigación internacionales y se contó con la participación activa de tesis en los proyectos estratégicos, así como de estudiantes en servicio social

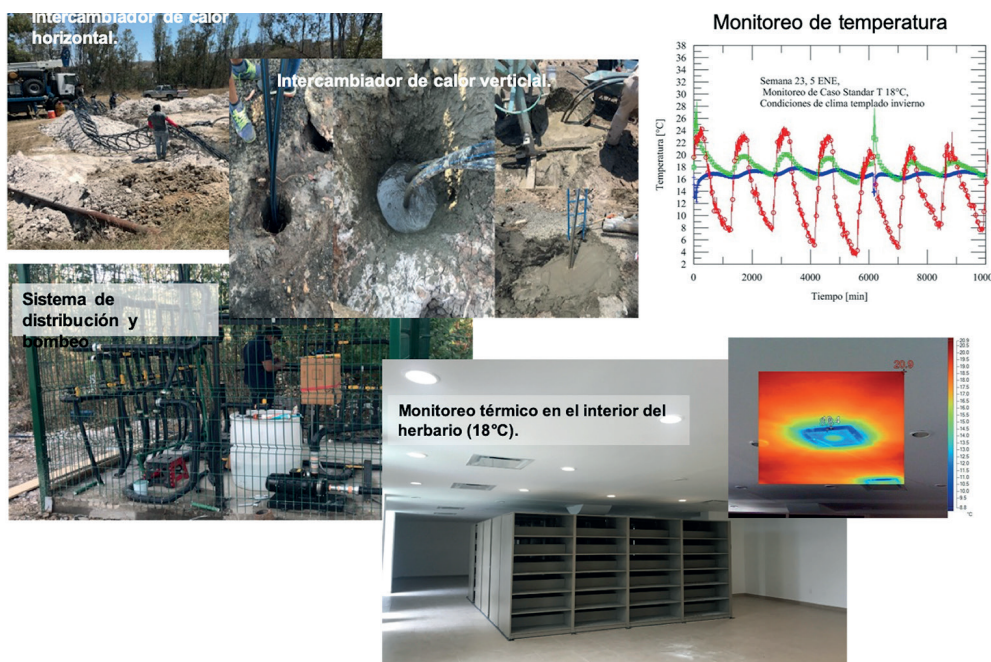


Figura 35. Instalación de intercambiadores de calor en trincheras horizontales y en pozos verticales. Vistas de las trincheras, uno de los pozos, el equipo de BCG, el recinto climatizado y pruebas de monitoreo. Mendoza-Covarrubias, UMSNH.

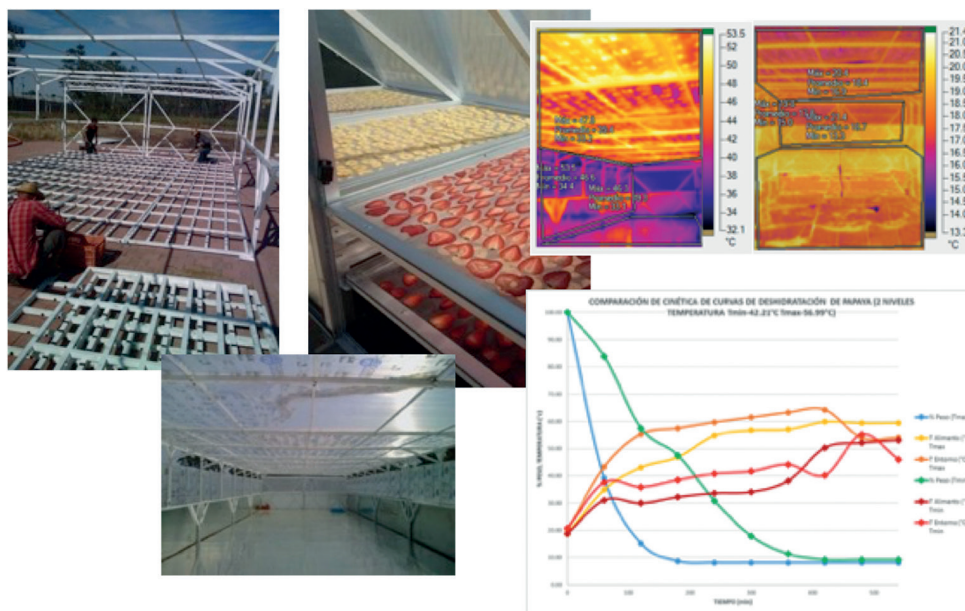


Figura 36. Sistema modular para deshidratación de alimentos. Vista de la estructura modular, algunos de los productos y pruebas de calibración del sistema. Vargas-Medina, UMSNH.

y prácticas profesionales. Muchos de ellos compartieron sus resultados en 165 presentaciones técnicas en congresos y conferencias a nivel nacional e internacional.

Para la difusión sobre temas de geotermia accesibles al público en general, se organizaron múltiples eventos, talleres y seminarios que tuvieron lugar en distintas localidades y coordinados por diferentes instituciones del consorcio (Figuras 39 y 40).

Así mismo, se abrieron cuentas en las redes sociales para ofrecer canales de comunicación accesibles, ágiles y de muy amplio espectro (Figura 41).

La visibilidad del proyecto atrajo estudiantes e investigadores jóvenes mexicanos y extranjeros. Varios de ellos se incorporaron como posdoctorantes en los proyectos estratégicos y eventualmente algunos se integraron a los cuerpos académicos de las instituciones, abriendo líneas de investigación y propiciando proyectos con colaboración internacional, como el proyecto Gemex: “Cooperation in Geothermal energy research Europe-Mexico for development of Enhanced Geothermal Systems and Superhot Geothermal Systems”.

SISTEMA DE LABORATORIOS ESPECIALIZADOS (SLE)

Otro de los temas transversales del mayor interés para el CeMIEGeo fue reforzar la infraestructura

de laboratorios existente en las instituciones del consorcio. Lo anterior con la intención de ampliar la capacidad analítica nacional para realizar análisis de rocas, fluidos y gases, con fines de investigación científica y para ofrecer servicios especializados a la industria geotérmica. El Sistema de Laboratorios Especializados (SLE) se diseñó a partir de los laboratorios existentes en cuatro instituciones académicas: CICESE, INNEL, UNAM y UMSNH, con Unidades Especializadas en Ensenada, Cuernavaca, Querétaro, Morelia y Ciudad de México (Figura 42). Adicionalmente, en 2018 durante el curso del proyecto, el Grupo Directivo y el Fondo de Sustentabilidad Energética, acordaron proporcionar un par de instrumentos requeridos por parte de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de CFE, para reforzar sus instalaciones de laboratorio en los campos geotérmicos de Los Azufres y Los Hornos.

En las Unidades Especializadas se instaló equipo con tecnología de punta para los análisis químicos y físicos de materia sólida, líquida y gases principalmente, además de lo necesario para el análisis especializado de fluidos y rocas de interés geotérmico.

Cabe señalar que las capacidades de los equipos tienen aplicaciones en una amplia gama de sectores tanto industriales como académicos.



Figura 37. Cursos especializados impartidos por expertos internacionales.

Facultad de Ingeniería

PUEI

Programa Único de Especializaciones de Ingeniería

Inicio
Sobre el PUEI
Normatividad
Estudia en el PUEI
Convocatorias
Alumnos PUEI
Exalumnos PUEI
Servicios PUEI

Especialización en Exploración y Aprovechamiento de Recursos Geotérmicos

La Especialización en Exploración y Aprovechamiento de Recursos Geotérmicos tiene como objetivo la formación de especialistas de alto nivel con un sólido sentido de responsabilidad social que posean los conocimientos avanzados en el área de Exploración Geotérmica, que les permita incorporarse al sector productivo e interactuar con especialistas de otros ámbitos de la ingeniería y otras disciplinas, con la finalidad de atender las necesidades del país y contribuir al análisis y solución de problemas. Este plan podrá también servir de base para la formación de especialistas que podrán continuar su preparación a nivel de maestría y doctorado.

Objetivos

- a) Formar especialistas en el ámbito teórico-práctico, que apliquen los conocimientos, metodologías y técnicas relacionados a la exploración geotérmica, que integren técnicas de exploración geológica, geoquímica y geofísica, así como de modelación de yacimientos geotérmicos.
- b) Formar especialistas de alto nivel que trabajen en equipos multidisciplinarios y que establezcan un vínculo entre la parte académica y la práctica profesional.

Figura 38. Especialización en Exploración y Aprovechamiento de Recursos Geotérmicos (<https://www.ingenieria.unam.mx/puei/spenexployaprovdrecursogetermicos.html>)

UNIDADES ESPECIALIZADAS EN LA SEDE CICESE

La Sede CICESE del SLE conjunta Unidades Especializadas en geoquímica de fluidos, microanálisis de rocas, mecánica de rocas y simulación numérica. El equipamiento para análisis geoquímicos consiste en varios instrumentos de cromatografía y espectrometría que permiten realizar análisis de diversos compuestos, elementos químicos e isótopos de hidrógeno, oxígeno y carbono, en

matrices semi sólidas, fluidos y en gases (Figuras 43 y 44).

En la Unidad de microanálisis de rocas es posible analizar muestras sólidas, perlas fundidas, pastillas prensadas o polvos para determinación de metales pesados y otros elementos utilizando microfluorescencia, espectrometría de rayos X y difracción. También se cuenta con un nano-tomógrafo computarizado que permite llevar a cabo estudios de porosidad, permeabilidad y microestructura interna, con los que se recons-



Figura 39. Seminarios, talleres y eventos diversos para la difusión en temas de geotermia de interés general.



Figura 40. Feria de Divulgación de la Ciencia, en Chignahuapan, Puebla.

truyen modelos digitales de las muestras en 2D y 3D (Figura 45).

En la Unidad Experimental de Yacimientos Geotérmicos se pueden realizar pruebas mecánicas en especímenes de roca, determinación de sus propiedades térmicas y elásticas, así como estudiar procesos de micro fracturamiento hidráulico. Cuenta con una máquina de compresión triaxial computarizada, una prensa simple tipo Hoeck, diseñada y construida en el propio laboratorio, y un instrumento para medir propiedades térmicas (Figura 46).

Respecto a la Unidad de Simulación de Procesos

Geotérmicos, cuenta con un equipo de cómputo de alto rendimiento con 33 nodos en paralelo y alta capacidad de procesamiento. Este cluster permite realizar modelación numérica y procesos de optimización de datos geofísicos de distintos tipos a diferentes escalas (Figura 47). Con este sistema de supercómputo se realizan simulaciones en dos y tres dimensiones de la propagación de ondas elásticas y electromagnéticas, así como el cálculo de fuentes de campos potenciales (gravedad y magnetismo), con objeto de producir modelos numéricos de las propiedades físicas en el subsuelo. También se usa para simular el flujo en medios porosos, así como



Figura 41. Divulgación en redes sociales.

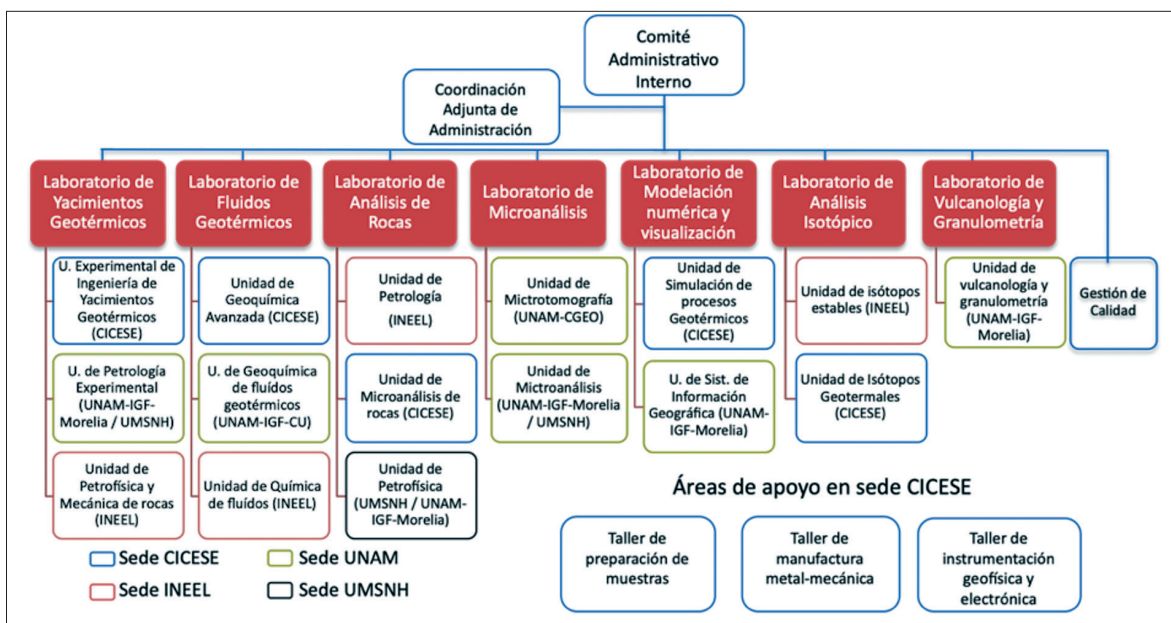


Figura 42. Estructura del Sistema de Laboratorios Especializados.

para modelación climática, oleaje y corrientes marinas. Este equipo desde su puesta en operación, ha sido un soporte fundamental para el desarrollo de diversos proyectos de investigación y numerosas tesis de posgrado. A la fecha (2015 - 2022), se pueden contabilizar más de 30 tesis de posgrado y alrededor de 15 publicaciones que han usado el cluster Lamb para su desarrollo. Se tienen también dos programas de cómputo con registro de derechos de autor en trámite.

Otros equipos destacables con los que cuenta la sede del CICESE en el SLE son la sonda para medición de flujo de calor en el piso oceánico (Figura 48), es un instrumento que ha motivado el desarrollo de una línea de investigación sobre tectonofísica y flujo de calor en el Departamento de Geología del Centro y ha hecho posible que el grupo de académicos involucrados, par-

ticipa en proyectos con colaboración internacional haciendo investigación en el Golfo de California y recientemente en la Antártida, colaborando con el Real Instituto y Observatorio de la Armada (ROA) española, en el proyecto de investigación 'Estructura litosférica y geodinámica de Powell-Drake Bransfield Rift' (<https://www.defensa.gob.es/comun/slider/2022/01/220111-roa-armada-antartida.html>).

Por otra parte, se tiene también una máquina para perforación somera (~ 50 m) la cual ha sido útil para hacer las perforaciones necesarias para la instalación de intercambiadores de calor (Figura 48).

Es necesario mencionar que actualmente una parte del equipo instalado en la sede CICESE no está en operación, debido a la falta de personal técnico y de investigación que pueda aprovechar estos

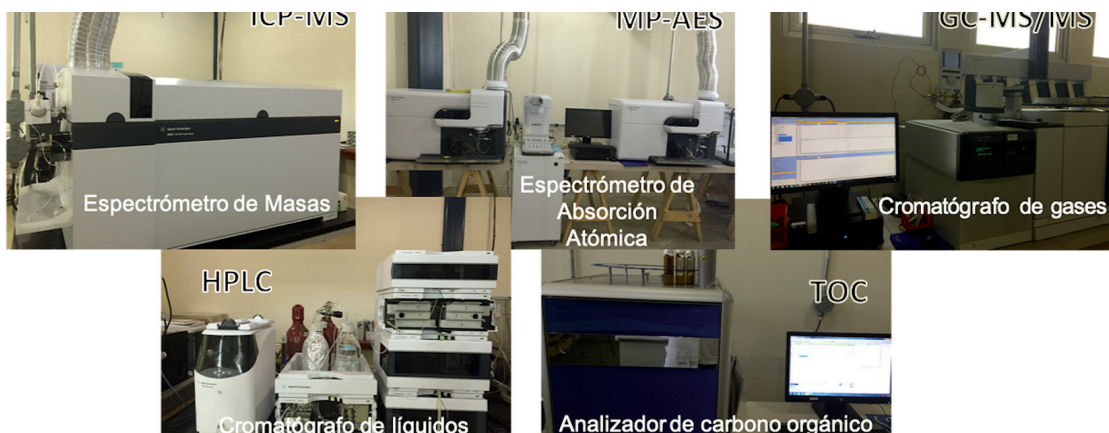


Figura 43. Equipo de espectrometría y cromatografía (SLE-CICESE.)



Figura 44. Equipo de isotopía para fluidos y gases (SLE-CICESE).



Figura 45. Equipo de microanálisis de rocas (SLE-CICESE).



Máquina de Compresión Triaxial



Máquina de Hoek

Figura 46. Compresor triaxial y prensa de Hoek (SLE-CICESE).

instrumentos, ya sea para abrir líneas de investigación o para ofrecer servicios a la industria. Cabe mencionar que entre los riesgos potenciales que se advirtieron desde las primeras etapas del proyecto, el más importante era la posibilidad de garantizar la permanencia del CeMIEGeo una vez concluido el apoyo del Fondo de Sustentabilidad Energética (véase Informe Técnico Etapa 2, 2015). En particular, el tema se veía complicado para instituciones como el CICESE, en donde es prácticamente imposible la creación de nuevas plazas para investigadores y técnicos que pudieran asignarse al SLE.

UNIDADES ESPECIALIZADAS EN LA SEDE INEEL

En el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL), el SLE reforzó la infraestructura e incrementó la capacidad analítica de varios laboratorios. Desde 1994 los laboratorios del INEEL han sido el soporte para el análisis de los fluidos geotérmicos extraídos de los campos geotérmicos operados por la CFE. Con la relevancia de que es ahí donde se determinan las condiciones químicas del fluido descargado por los pozos productores, así como del vapor que se suministra a las plantas de generación eléctrica.

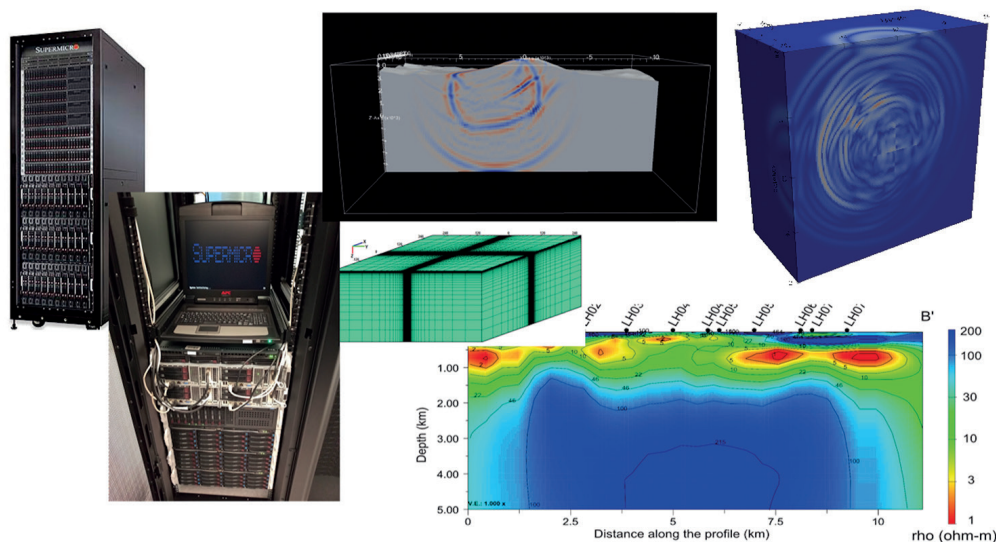


Figura 47. Cluster Lamb. Modelos numéricos de propagación de ondas elásticas, modelo de la resistividad eléctrica del subsuelo en el campo geotérmico de Los Humeros, Pue. (SLE- CICESE).

También se pueden identificar los procesos fisicoquímicos que ocurren en los pozos, así como determinar la conexión entre pozos inyectoros y pozos productores en los campos donde se inyecta agua para recargar los yacimientos (Figura 49).

En las unidades del SLE sede INEEL se realizan también análisis petrológicos mediante petrografía, difracción de rayos-X, microscopía electrónica de barrido y petrofísica básica (Figura 50). Esto permite caracterizar de forma sistemática los recortes y núcleos de perforación. Recientemente se ha realizado este tipo de análisis para el proyecto Gemex, estudiando cerca de 20 pozos en el campo geotérmico de Los Humeros, Pue. con objeto

de aportar información para el mejor conocimiento del yacimiento.

UNIDADES ESPECIALIZADAS EN LA SEDE IGF-UNAM MORELIA

Las unidades especializadas en esta sede, se encuentran en el campus Morelia del Instituto de Geofísica de la UNAM. Ahí se tiene el Laboratorio de Microanálisis (LM) y un laboratorio de geoquímica de fluidos geotérmicos (UGFG). El LM está formado por un espectroscopio Raman, un espectroscopio de infrarrojo (FT-IR), una microsonda electrónica (EPMA),

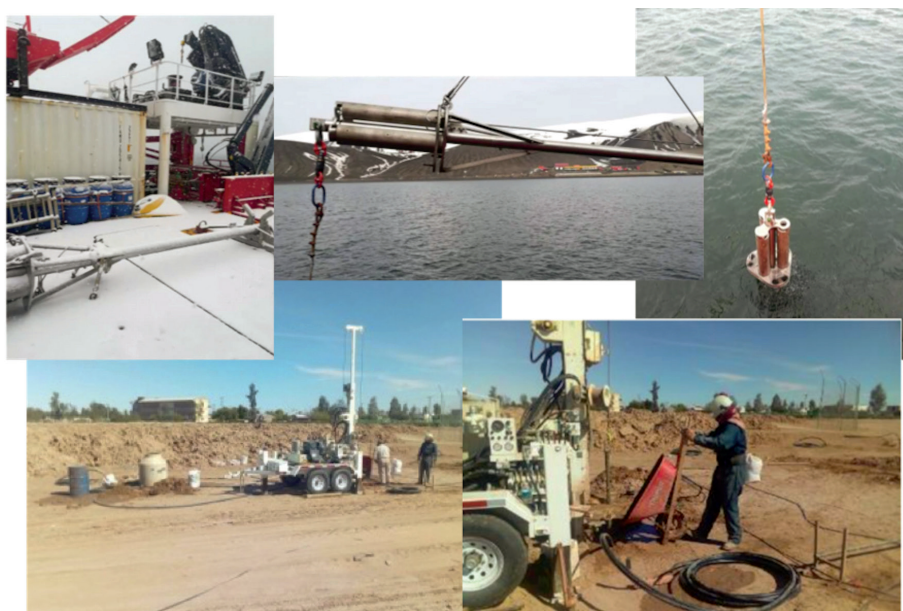


Figura 48. Sonda de flujo de calor y máquina perforadora (SLE-CICESE).

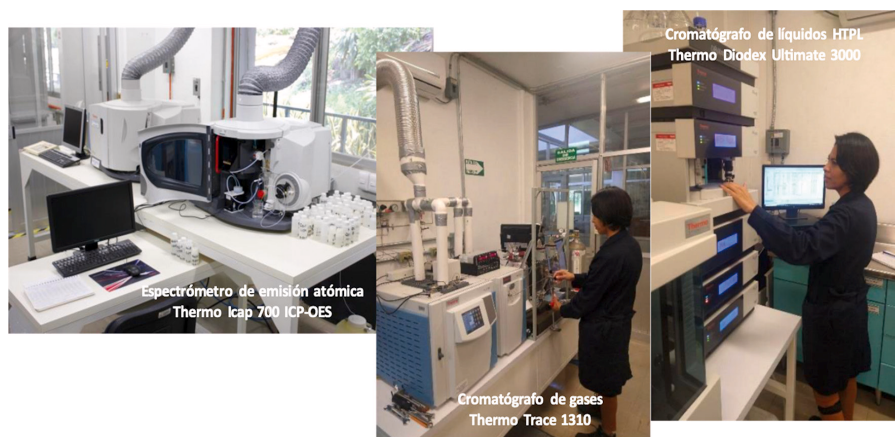


Figura 49. Espectrómetro de emisión atómica y cromatógrafos (SLE- CICESE).

un difractómetro de rayos X y un microscopio electrónico de barrido (Figura 51). Durante el periodo en que el CeMIEGeo estuvo activo, este laboratorio dio servicio para proyectos de exploración geológica e investigaciones petrológicas aplicadas a la geotermia. Sus estudios más relevantes fueron: estudios de química mineral para estudiar procesos magmáticos, estudio de vidrios volcánicos para investigar la evolución magmática; análisis de difracción de rayos X y espectroscopía Raman para investigar minerales de alteración hidrotermal; determinación de agua y CO_2 en vidrios volcánicos para determinar la profundidad de las fuentes de calor en un sistema geotérmico; determinación de minerales de alteración hidrotermal mediante FT-IR. Actualmente el LM continúa haciendo estudios similares y ha diversificado sus métodos analíticos para dar servicio a otros usuarios por ejemplo: 1) determinación de concentraciones de elementos traza en minerales mediante EPMA. Los análisis se han realizado para investigaciones petrológicas y para la industria minera; 2) análisis de autenticidad de joyas y gemas mediante espectroscopía Raman y EPMA; 3) análisis de espectroscopía (Raman y FT-IR) y DRX para investigaciones en materiales; 4) determinación de ensambles minerales de alteración en pozos geotérmicos mediante espectroscopía Raman; 5) análisis de muestras de jales mineros mediante DRX.

Por su parte, el laboratorio de geoquímica de fluidos geotérmicos consiste de equipo de cromatografía,

espectrometría e isotopía para determinar la composición química e isotópica de muestras de agua (Figura 52). Los análisis realizados por este laboratorio apoyan no solo a la industria geotérmica, sino también se aplican para la determinación de la calidad del agua, problemas de contaminación natural o antropogénica, caracterización geoquímica de acuíferos, etc. Adicionalmente, funciona como un soporte a proyectos de investigación y en la formación de especialistas en los programas de investigación y docencia de distintos institutos de la UNAM y de la UMSNH.

UNIDADES ESPECIALIZADAS EN LA SEDE UMSNH-ENES-UNAM

La Unidad de Petrofísica ha sido diseñada, construida e implementada con base en la estrecha relación entre tres instituciones: 1) El Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra de la UMSNH, 2) La Escuela Nacional de Estudios Superiores – Unidad Morelia y 3) el Instituto de Geofísica unidad Michoacán ambos de la UNAM. El propósito de la Unidad consiste en la caracterización petrológica, física, hídrica y mecánica de unidades de roca. Los objetivos particulares más importantes son: a) Analizar las características físicas y evolución mecánica e identificar su relación con la alteración hidrotermal; b) Estudiar el sistema poroso e identificar su relación con la permeabilidad del medio; c) Analizar la relación de diferentes propiedades físi-



Figura 50. Espectrómetro de masas y difractómetro.

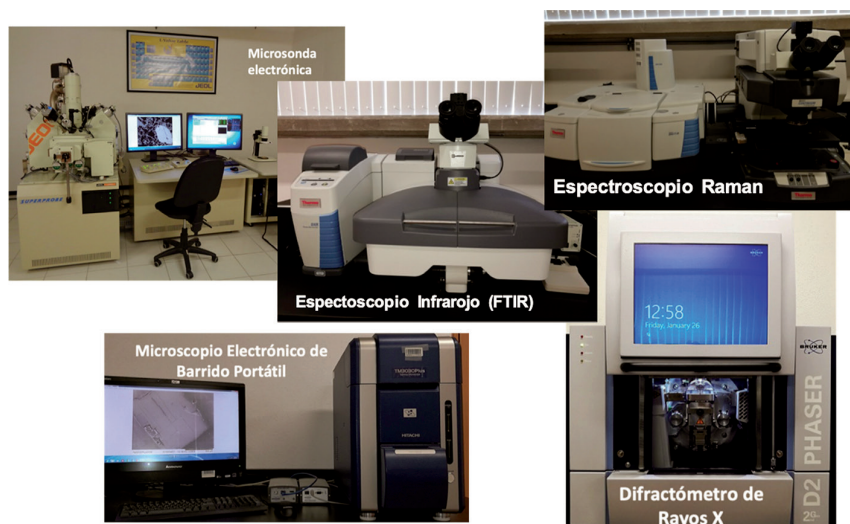


Figura 51. Microsonda electrónica (EPMA), Espectroscopios (FTiR y Raman), Microscopio electrónico de barrido (SEM) y Difractómetro de rayos X (DXR) (SLE-IGF-UNAM-Morelia).

cas como la porosidad con la permeabilidad y los parámetros mecánicos; d) Estudiar la relación del sistema poroso y micro fracturamiento con la resistencia de la roca. El laboratorio consiste de una prensa de carga, una celda triaxial (Figura 53), un permeámetro de gas, un porosímetro de mercurio (Figura 54), así como equipos para corte y extracción de testigos.

UNIDADES ESPECIALIZADAS EN LA SEDE CEGEO-UNAM

En el Centro de Geociencias de la UNAM, en Juriquilla, Qro., se ubica la unidad de microtomografía, como parte del Laboratorio Universitario de Microtomografía de Rayos X (LUMIR) (<https://tellus.geociencias.unam.mx/index.php/microtomografia-de-rayos-x/>). El prin-



Figura 52. Analizador de isótopos estables, analizador de carbono, horno de microondas y cromatógrafo iónico (Unidad de geoquímica de fluidos geotérmicos IGF-UNAM Morelia).

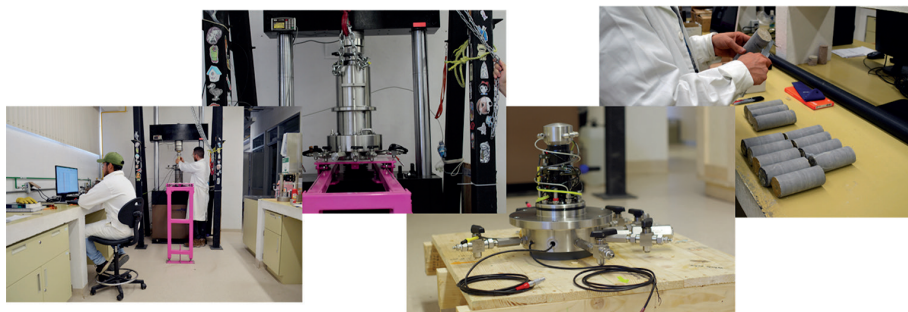


Figura 53. Marco de compresión y celda triaxial (SLE-UMSNH-ENES).

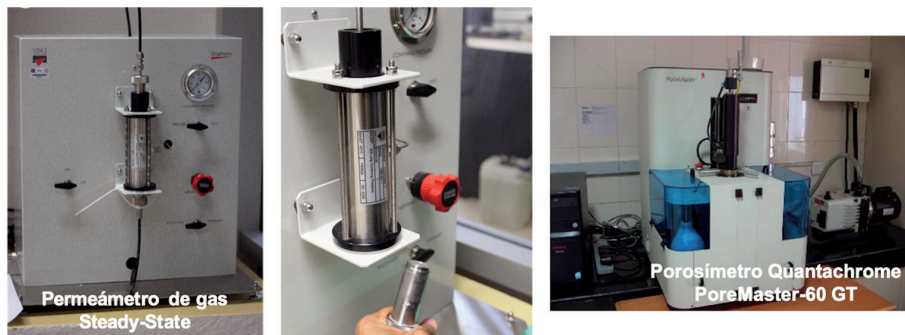


Figura 54. Permeámetro de gas y Porosímetro de mercurio (SLE-UMSNH-ENES).

El principal objetivo de este laboratorio es la investigación, visualización y caracterización, tanto cualitativa como cuantitativa, de medios porosos. Para ello se cuenta con un Microtomógrafo computarizado de rayos X (Figura 55) que puede obtener imágenes del interior de una muestra sólida sin destruirla, el cual permite elaborar reconstrucciones tridimensionales con una resolución de hasta 0.7 micras. Se tiene la capacidad de estudiar materiales rocosos para determinar propiedades como la porosidad y la permeabilidad, fundamentales para los yacimientos geotérmicos y petroleros. Adicionalmente, se puede usar en diversas áreas de investigación para caracterizar la estructura interna de diferentes materiales: biomédicos, biológicos, polímeros, fósiles de diferentes especies, etc. Se cuenta también con un microscopio óptico, una impresora 3D y un centro de proceso para el análisis de las imágenes.

En el LUMIR se han realizado servicios de microtomografía para diferentes entidades académicas nacionales e internacionales, tales como la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, la Universidad Autónoma de Querétaro-UAQ, la Universidad de Guadalajara, el Instituto Nacional de Rehabilitación, la

Universidad de Jaen (España), y para varios institutos de la UNAM: Instituto de Biología, Instituto de Geología, Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada-CFATA, Centro de Geociencias-CGEO, Facultad de Odontología, y Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación-UMDI. Así mismo, ha sido soporte para varios proyectos: CeMieGeo, Gemex, “Litoteca Nacional de la industria de hidrocarburos” (SENER-CONACyT Hidrocarburos 293056), y varios proyectos del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM. Igualmente apoya la formación de especialistas ofreciendo sus instalaciones para el desarrollo de tesis de licenciatura y posgrado.

UNIDAD DE MANEJO DE INFORMACIÓN

Con el objeto de preservar, proteger y difundir la información generada por el consorcio se creó la Unidad de Manejo de Información, encargada de documentar, estructurar, clasificar, describir y estandarizar los metadatos asociados a los productos principales, con estándares establecidos para ser compatibles in-



Figura 55. Micro Tomógrafo computarizado, microscopio óptico, impresora 3D y centro de proceso (SLE-UMSNH-ENES).



Figura 56. Colección Digital CeMIEGeo.

ternacionalmente. En esta unidad se establecieron lineamientos para la entrega de información, se realizó el trabajo de curación de la información documental con la que se generó la Colección Digital CeMIEGeo, usando como plataforma el Repositorio DSpace, usado comúnmente por las instituciones académicas en todo el mundo. La Colección Digital CeMIEGeo contiene actualmente 281 registros sobre publicaciones y tesis generados por los proyectos del consorcio. Así mismo, incluye una colección de más de 1700 artículos publi-

cados sobre los campos geotérmicos mexicanos, desde 1958 (<https://cemiegeo.cicese.mx/coleccion-digital>).

La información es de acceso libre, excepto los textos completos que están sujetos a derechos editoriales. En este último caso, el acceso se redirige al sitio web de la editorial pertinente, en donde se puede acceder al material si se cuenta con la suscripción correspondiente. En el caso de las tesis el acceso es a los repositorios institucionales, en donde generalmente se puede tener acceso al texto completo.

Planta geotérmica Los Humeros, Puebla. Cortesía de CFE.



CAPÍTULO 6

IMPACTOS

IMPACTO CIENTÍFICO

Los impactos científicos del proyecto quedan evidenciados en los resultados publicados en revistas científicas de prestigio internacional. Cabe mencionar que después de tres años de concluidos los proyectos estratégicos, se siguen publicando trabajos derivados de los mismos. Estas comunicaciones dan cuenta de resultados originales que aportan nuevo conocimiento en los distintos temas estratégicos desarrollados en el proyecto. La Figura 57 muestra la evolución en el número de trabajos sobre geotermia en México, en publicaciones internacionales, desde 1970 hasta la fecha. Se puede observar el impacto en el número de trabajos generados por proyectos CeMIEGeo a partir de 2018, así como la participación de las instituciones del consorcio.

En el tema de Evaluación de Recursos Nacionales se produjo información básica actualizada acerca de temperaturas, flujo de calor, gradiente geotérmico y provincias geotérmicas en la República Mexicana. La información recopilada y organizada en sistemas de información geográfica no tiene precedente en México y constituye una valiosa fuente de información para el aprovechamiento de las energías limpias. Como resultado de este trabajo se cuenta por primera vez en México, con una estimación del potencial de generación eléctrica de “sistemas geotérmicos mejorados” (EGS) lo cual permitirá planear el

desarrollo a mediano o largo plazo de los sistemas geotérmicos no convencionales.

Los proyectos asociados a las Técnicas de Exploración Geotérmica produjeron nuevo conocimiento en varios temas. Gracias a sus aportes en el ámbito geológico, conocemos mejor la evolución de los sistemas volcánicos que albergan los campos geotérmicos mexicanos en explotación; entendemos mejor su funcionamiento; y se han construido mejores modelos conceptuales, con un

Documents by year

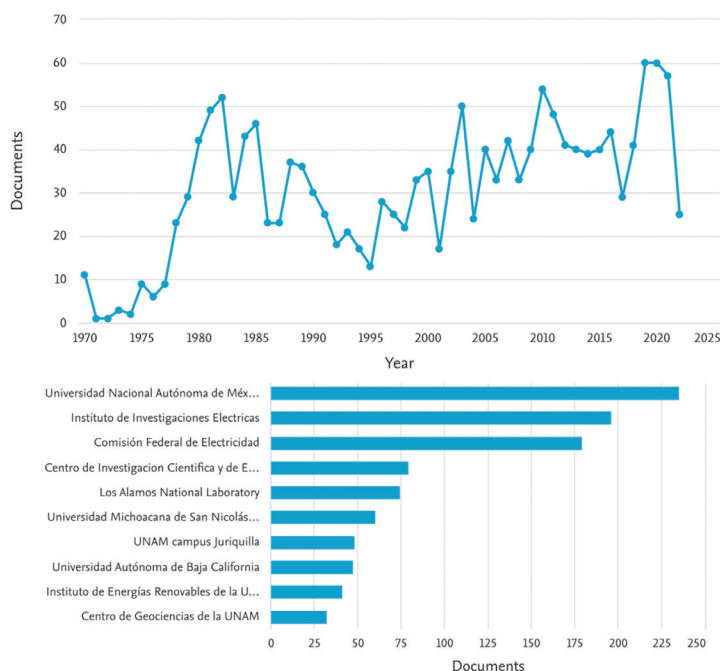


Figura 57. Estadística de publicaciones internacionales sobre geotermia en México (Scopus).

mayor conocimiento de la estructura interna del sistema magmático-geotérmico. En el tema geoquímico, se tienen mejores herramientas para la simulación de fenómenos físico-químicos por la interacción agua/roca en yacimientos geotérmicos; por primera vez podemos evaluar la eficiencia en la predicción de temperaturas de equilibrio, aplicando geotermómetros de gases y solutos en sistemas geotérmicos hidrotermales; se ha probado el uso de conceptos de inteligencia artificial para la solución de problemas de correlación entre la composición química de la fase vapor de fluidos y las temperaturas de equilibrio en sistemas geotérmicos; se demostró que la presencia de gases nobles en los fluidos extraídos de los campos geotérmicos constituyen un valioso indicador para identificar el origen de los fluidos y con esto prevenir la sobreexplotación del recurso. En cuanto a la geofísica, se han propuesto metodologías originales para la interpretación conjunta de datos geofísicos y nuevas formas para la representación de las propiedades físicas del subsuelo; se desarrolló instrumentación y metodología para el monitoreo de variaciones temporales de la conductividad eléctrica asociados a cambios en permeabilidad y/o contenido de fluidos; se cuenta con metodología para la determinación del campo de esfuerzos y su influencia en las condiciones estructurales y en el desarrollo de permeabilidad secundaria en los yacimientos geotérmicos.

La campaña de exploración marina en el Golfo de California no tiene precedente en México. La explotación de recursos geotérmicos marinos es un tema que empieza a considerarse cada vez más factible a nivel mundial, dados los avances tecnológicos y las condiciones de las actuales fuentes energéticas disponibles. El Golfo de California, en México, es una de las regiones con mayor potencial de energía térmica en el mundo. La exploración y el reconocimiento de esta fuente potencial de recursos energéticos es un tema estratégico para el país. El proyecto de exploración marina desarrollado en el Golfo de California por CeMIEGeo es pionero en su tipo. Por primera vez en México se usaron métodos electromagnéticos marinos para explorar por geotermia. Se exploró el sistema hidrotermal en la cuenca Wagner, la cual constituye la probable continuación al sur de la zona de extensión que da origen al campo geotérmico de Cerro Prieto; también fue evaluada la zona del Ridge Tortuga, frente

a Santa Rosalía, B.C.S., como la posible extensión mar adentro del complejo volcánico de las Tres Vírgenes.

IMPACTO TECNOLÓGICO

Por su naturaleza, los proyectos relacionados con Desarrollo Tecnológico tienen mayor impacto en ese ámbito, sin embargo, algunos de ellos también originaron nuevo conocimiento que se reporta en 14 publicaciones en revistas arbitradas. Se registraron aportaciones en termodinámica experimental, estimación de temperatura con geotermómetros isotópicos, nueva formulación para el cálculo de propiedades termodinámicas del agua. También se contribuyó al nuevo conocimiento en temas como: fragilización térmica de aceros, caracterización de propiedades mecánicas de aleaciones de Titanio, y caracterización ultrasónica de soldaduras de acero. Se tiene mayor conocimiento del efecto que la adición de circonio y boro producen en la disminución de porosidades durante la solidificación de aleaciones base níquel, la mejora que la adición de rutenio produce en la resistencia a la corrosión en las aleaciones base níquel, la mejora en la resistencia al creep que produce la adición de elementos de las tierras raras como cerio y lantano en una aleación base níquel, o bien el efecto de variar contenidos de vanadio, molibdeno y rutenio en aleaciones base titanio.

Los impactos tecnológicos de los proyectos CeMIEGeo quedan de manifiesto en los reportes técnicos, bases de datos y mapas temáticos generados por los proyectos específicos. Los mapas regionales de temperaturas y de otras propiedades físicas del subsuelo constituyen una herramienta fundamental para el desarrollo tecnológico en materia de geotermia, no solamente para los futuros proyectos de generación eléctrica, sino también para el aprovechamiento de los vastos recursos de media y baja entalpía como un detonador de bienestar económico y social de pequeñas comunidades a lo ancho y largo del país. En el rubro de alta entalpía, la estimación del potencial de recursos en sistemas geotérmicos mejorados (EGS) obtenida por uno de los proyectos CeMIEGeo proporciona la base técnica para el desarrollo futuro de este tipo de recursos no convencionales. Así mismo, la simulación de las propiedades termodinámicas de mezclas de H_2O y CO_2 para intervalos amplios de presión y temperatura es una herramienta de investigación útil para la

futura explotación de recursos no convencionales, como los de roca seca caliente, donde se pueda emplear el CO₂ como fluido de trabajo para extraer el calor de la roca.

Uno de los impactos tecnológicos más importantes del CeMIEGeo se encuentra en la infraestructura de laboratorio montada en las instituciones del consorcio (CICESE, INEEL, UNAM, UMSNH y CFE). La aplicación de tecnologías de microtomografía computarizada, microscopía electrónica, espectrometría, difracción, isotopía, entre otras técnicas, potencia la capacidad tecnológica para realizar análisis altamente especializados en el país.

Otro importante impacto tecnológico se tiene en el desarrollo de la ingeniería de diseño y la construcción de prototipos, entre los que destacan un sistema de desalación de agua de mar con energía geotérmica, una planta de generación eléctrica con ciclo binario; una planta deshidratadora de alimentos, un turbogenerador de 300 kW.

En cuanto a las aplicaciones con bombas de calor geotérmicas (BCG), se puede afirmar que las BCG que operan actualmente en México fueron instaladas por proyectos apoyados en el CeMIEGeo. A pesar de ser una tecnología madura, utilizada en varios países, en México no se tenía una sola BCG instalada. En este rubro, se establecieron las bases y se generó el conocimiento necesario para la introducir en el país esta tecnología en aplicaciones como acondicionamiento de espacios e invernaderos; se tienen las herramientas necesarias para conocer el comportamiento térmico bajo distintas condiciones de operación y para diseñar y poner en operación cualquier proyecto de climatización con BCG. Se tiene también un estudio comparativo de las BCG contra otras tecnologías y un análisis de necesidades regionales en cuanto a calefacción o enfriamiento, así como del mercado potencial para su uso. Específicamente se realizó un estudio de factibilidad técnico-económica para uso de las BCG en la Región Norte y Centro del país, como una solución sostenible de bajo costo para climatizar espacios residenciales y comerciales. Adicionalmente, con la ayuda del Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), se llevaron a cabo los primeros pasos para desarrollar un Estándar de Competencia Laboral dirigido a técni-



Figura 58. Estándar de competencia en el Uso Directo de la Energía Geotérmica (IMP).

cos diseñadores e instaladores de BGC, con lo que se establecen las bases para conseguir una certificación técnica con reconocimiento nacional e internacional (Figura 58).

IMPACTO SOCIAL

En el ámbito social la infraestructura física instalada y el capital humano formado en los proyectos CeMIEGeo contribuyen de manera significativa al impulso de la industria geotérmica en el país. Es claro que uno de los beneficios de utilizar energía proveniente de fuentes limpias contiene en sí mismo un impacto social importante. El desarrollo económico y social de comunidades tanto urbanas como rurales dependen del suministro de energía y para que este desarrollo sea equilibrado y sostenible las fuentes de energía deben serlo igualmente. México tiene una gran cantidad de recursos geotérmicos de media y baja entalpía, muchos de ellos en zonas rurales, por lo que el diseño de proyectos productivos aprovechando estos recursos impactarán en la creación de empleos y en bienestar social. Los proyectos de usos directos del calor geotérmico, como el que se llevó a cabo en el CeMIEGeo para la deshidratación de alimentos, ya han tenido impactos notables. La comunidad de agricultores que habita alrededor del Domo San Pedro,

en Nayarit, ha visto beneficios tangibles al tener una manera de comercializar una parte de sus productos, que antes representaban una merma, ahora se aprovechan como productos deshidratados con un mayor valor agregado. Otro ejemplo, es en la comunidad de los Humeros, en Puebla, en donde la climatización geotérmica de una escuela de educación preescolar y de una clínica del IMSS beneficia de manera directa a las familias de la localidad (<https://www.gob.mx/ineel/prensa/ineel-inaugura-el-primer-sistema-demostrativo-de-bomba-de-calor-geotermica-bcg/>).

La climatización de invernaderos con fuentes geotérmicas o bombas de calor, representan una oportunidad para la tecnificación de la agroindustria, ya que permiten mantener la temperatura óptima para el crecimiento del cultivo, lo que produce mejores cosechas y en tiempos anticipados a la cosechas tradicionales, esto resulta en ventajas competitivas y de mercado; como lo ha confirmado el proyecto demostrativo en la Universidad Politécnica de Baja California.

Otros proyectos como el de desalación de agua de mar aprovechando energía geotérmica están motivados en proporcionar beneficio social a comunidades costeras en zonas áridas, como las de la península de Baja California. Las diversas aplicaciones de los usos directos del calor geotérmico tienen la particularidad de que se pueden planear diversas formas de aprovechamiento junto con las comunidades locales y a la medida de sus propias necesidades, por lo que los beneficios sociales pueden ser muy significativos, particularmente para aquellos sitios alejados de las redes eléctricas pero que tienen la presencia de recurso geotérmico superficial. Este tipo de proyectos favorecen la transferencia de tecnología al sector agropecuario, fomentan el desarrollo regional del campo, permiten la participación social, benefician la calidad de vida de las personas sin acceso a la electricidad, contribuyen a minimizar la dependencia de los combustibles fósiles, y repercuten en que la población reciba directamente los beneficios de utilizar una fuente de energía sostenible y respetuosa del ambiente.

Los proyectos demostrativos relativos al aprovechamiento en cascada de la energía geotérmica, contienen también un impacto social importante, en la medida de que muestran cómo extraer toda la energía térmica utilizable de los fluidos geotérmicos, en una amplia

gama de aplicaciones, desde generación eléctrica hasta uso recreativo o terapéutico en balnearios termale, pasando por proyectos productivos con generación de empleos y desarrollo socioeconómico local.

Algunos resultados de los proyectos CeMIEGeo tendrán un impacto social tangible en el mediano plazo. Por ejemplo aquellos relacionados con la explotación y explotación de recursos no convencionales, como los de roca seca caliente o los recursos geotérmicos marinos. En ambos casos, la aportación principal actual es la generación de conocimiento sobre la distribución de estas fuentes potenciales de energía en el territorio nacional, así como la experimentación y modelación de procesos de extracción novedosos, como la utilización de CO₂ supercrítico como fluido de trabajo, lo que constituye una plataforma de partida para su aprovechamiento futuro, una vez que se desarrolle la tecnología para su desarrollo sostenible.

IMPACTO AMBIENTAL

En cuanto al tema ambiental, es evidente que gran parte de los resultados de los proyectos tienen un impacto positivo solo por el hecho de contribuir de diversas maneras al desarrollo de una fuente de energía limpia y con menor huella ecológica, como la geotermia. Las mejores técnicas de exploración desarrolladas dentro de los proyectos, no solamente impactan en la relación costo/beneficio en las etapas tempranas de los proyectos geotérmicos, sino que además permiten operaciones exploratorias más eficientes y con mínima afectación del entorno y del medio ambiente. Estas herramientas también permiten un mejor monitoreo de las propiedades físicas del subsuelo y de su comportamiento durante las etapas de producción, contribuyendo a la sostenibilidad del recurso.

Por su parte, los proyectos de usos directos desplazan el uso de energéticos convencionales como el gas L.P., gas natural, gasolina, combustóleo, carbón, leña, etc., lo que evita emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Se estima que las reducciones anuales de GEI en una planta de deshidratación de alimentos que opera con energía geotérmica son de 174 Toneladas de CO₂ eq/año por módulo, si se compara con una planta similar operando con gas L.P. durante 4 meses al año. La utilización de recursos en cascada también minimizan los impactos negativos al ambiente, al utilizar de manera productiva los fluidos residuales de una

planta de generación, evitando que se conviertan en un problema ambiental. La utilización de CO₂ como fluido de trabajo en sistemas de roca seca caliente tiene beneficios significativos en el tema ambiental, ya que minimiza la necesidad de utilizar grandes volúmenes de agua para transferir el calor del subsuelo hacia la superficie. Los desarrollos realizados para simular este tipo de sistemas con el empleo de CO₂ como fluido de trabajo, representan un adelanto importante al proporcionar información base que será útil en cuanto se impulse el aprovechamiento de este tipo de recursos en México. La metodología desarrollada para determinación de la emisión natural de CO₂, al igual que los estudios de ciclo de vida en sistemas geotérmicos potencialmente promisorios, aportan datos para analizar la sostenibilidad ambiental de futuros desarrollos geotérmicos comerciales. El trabajo de investigación para la determinación de línea base ambiental en sitios con potencial geotérmico, da luz sobre los posibles efectos positivos o negativos que un desarrollo geotérmico futuro pudiera tener. Por otra parte, algunos trabajos de campo proporcionaron información sobre el estado ambiental actual de los sitios. En algunos casos reportando niveles de contaminación causada por fuentes antropogénicas o naturales. Por ejemplo, se detectaron concentraciones anómalas de gas radón en la Caldera de Acoculco (de hasta 135 kBq/m³), lo que hace pertinente establecer un programa de monitoreo continuo para vigilar la radiactividad ambiental producida por la emisión natural de este gas, usando para ello, las metodologías geoquímicas desarrolladas en este tipo de proyectos.

IMPACTO ECONÓMICO

La energía geotérmica es una de las fuentes de energía renovable con mayor factor de planta y con menor costo nivelado (*leveled cost*) de producción, por lo que cualquier esfuerzo que aporte conocimiento y tecnología para el desarrollo de nuevos proyectos de generación contribuye a disminuir el costo de producción de energía eléctrica en el país. Por su parte, la disseminación de los usos directos del calor en proyectos productivos tienen un impacto económico relevante para regiones y comunidades actualmente marginadas o poco desarrolladas. La información generada en relación a la distribución geográfica de variables signi-

ficativas, como temperatura, flujo de calor, gradiente geotérmico, hidrología, etc., producida por los proyectos en el rubro de Evaluación de Recursos Nacionales, proporciona elementos básicos para definir zonas de mayor interés exploratorio, con el consecuente ahorro de tiempo y recursos económicos en las primeras etapas de exploración. Los proyectos que aportan nuevas técnicas de exploración contribuyen a dar una mayor certeza en la definición de las dimensiones, profundidad, calidad y cantidad de los recursos en el subsuelo, lo que claramente contribuye a reducir el costo en la exploración y a incrementar la probabilidad de éxito en la perforación de pozos productores, lo cual representa actualmente el mayor costo en la etapa exploratoria.

Las metodologías desarrolladas en geología, geoquímica y geofísica impactan económicamente en la medida en que representan herramientas útiles para el mejor conocimiento del recurso actual, de su evolución en el tiempo y como auxiliares en la administración sostenible y económicamente rentable de los recursos. Derivado de los estudios de evolución magmática de los complejos volcánicos en actual explotación, se ha encontrado que las fuentes de calor parecen ser más jóvenes de lo que se creía, lo que implica una mayor longevidad de los campos geotérmicos asociados, siempre y cuando se mantenga un balance entre la extracción y la recarga de los sistemas hidrotermales. Esto tiene un impacto económico muy importante para el desarrollador y para la planeación de la extracción de los recursos que están explotando.

La medición del contenido de isótopos de gases nobles en los fluidos que se extraen de los campos geotérmicos es una de estas herramientas que funciona como indicador del origen de los fluidos y sirven para prevenir la sobre-explotación y el agotamiento prematuro del recurso.

El impulso, sin precedente, a la demostración y disseminación de los beneficios de los usos directos del calor geotérmico y de las aplicaciones de las bombas de calor geotérmicas, incentivan y contribuyen a la creación de cadenas de valor relacionadas con las diferentes aplicaciones que pueden utilizar estos recursos tan vastos y tan poco aprovechados en México. Por ejemplo en la deshidratación de alimentos se involucran los agricultores, procesadores, transportadores, comercializadores y exportadores, entre otros. Los invernaderos climatizados con geotermia incremen-

tan la producción y agregan valor a los productos, tanto en calidad como en la oferta del producto en época de mayor demanda, con mejores precios de mercado. Similarmente, se impulsan otras cadenas de valor como por ejemplo las industrias manufactureras nacionales que fabrican o ensamblan componentes utilizados en el desarrollo de este tipo de proyectos, como los intercambiadores de calor, tuberías, sistemas de control, etc.

Como consecuencia de varios proyectos demostrativos, y gracias al desarrollo de habilidades emprendedoras fomentado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, se constituyeron tres empresas de base tecnológica que se integran al sector económico para el desarrollo de proyectos productivos relacionados con el uso directo del calor geotérmico. Estas son: Ingeniería, Energía y Sustentabilidad Mexicana S.A. de C. V., Ingeniería Verde del Noroeste S.A. de C.V.,

y P.I. INGENERA S.A. de C.V. (<http://proyectos2.iingen.unam.mx/IIDEA/>).

Uno de los compromisos adquiridos por el consorcio fue la creación de una asociación civil no lucrativa de carácter privado, para funcionar como un agente de vinculación academia/industria. Con este objeto se constituyó en 2017 CeMIEGeo A.C., con la participación del CICESE, la UMSNH, la UPBC, la CFE, y varias empresas vinculadas a la industria geotérmica en México. En su oportunidad, esta entidad gestionó un proyecto de exploración que fué ejecutado por una de las empresas del consorcio. Después de esto la actividad del sector disminuyó sensiblemente con el cambio de prioridades en la política energética del estado mexicano. Actualmente, CeMIEGeo A.C. no reporta ninguna actividad comercial, aunque está en posibilidad de reanudar su actividad en cuanto se presente alguna oportunidad favorable.

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

México tiene un potencial geotérmico como muy pocos países en el mundo. Tiene además, la capacidad técnica y el conocimiento científico necesario y suficiente para desarrollar sus recursos geotérmicos convencionales (sistemas hidrotermales). Por otra parte, para aprovechar los recursos no convencionales (sistemas de roca seca caliente, sistemas super calientes, recursos marinos), que también son extraordinarios en el país, hay que enfrentar desafíos muy importantes. Los beneficios pueden ser enormes, multiplicando varias veces la cantidad de energía disponible a partir de fuentes limpias. La tarea es a largo plazo y requiere promover la formación de jóvenes especialistas mexicanos, preparados para asimilar y contribuir al conocimiento internacional en materia de geotermia. En este tema, los grupos que integraron el CeMIEGeo cuentan con el conocimiento y la infraestructura necesarios para colaborar en forma simétrica con pares internacionales y abordar los retos que nos permitan aprovechar integralmente los recursos geotérmicos nacionales.

Por iniciativa del Fondo de Sustentabilidad Energética y con la ayuda del Instituto Mexicano del Petróleo, se convocaron a los principales actores en el sector geotérmico mexicano para compartir experiencias, puntos de vista, discutir y trazar un mapa de ruta tecnológica para el desarrollo futuro de la industria. Como resultado de ello, se generaron los Mapas



Figura 59. Mapas de Ruta Tecnológica 2017-2030, Geotermia y Usos Directos del Calor (IMP).

de Ruta Tecnológica en Geotermia y para los Usos Directos del Calor Geotérmico (MRT). En ellos se hace un diagnóstico de las capacidades y de los retos que tiene México para desarrollar sus recursos y se traza una ruta con las metas, acciones, y estrategias necesarias para lograrlo (Figura 59). Valdría la pena que los documentos emanados de ese esfuerzo conjunto previamente realizado, se revisen y actualicen a la luz de las actuales prioridades para el desarrollo nacional (<https://www.gob.mx/sener/documentos/mapas-de-ruta-tecnologica-de-energias-renovables>).

Para impulsar el aprovechamiento integral de los recursos geotérmicos disponibles en el país se

requiere una mayor inversión pública y privada. No solamente para los grandes proyectos de generación geotermoeléctrica, sino también y muy especialmente, para incentivar el uso directo de la energía térmica en proyectos productivos que impacten en el desarrollo social y económico de comunidades marginadas.

Se cuenta ya con un diagnóstico de las capacidades y de los retos que tiene México para desarrollar sus recursos geotérmicos y se tiene también una ruta trazada con las metas y las acciones necesarias para lograrlo. Su implementación requiere una mayor disponibilidad de recursos financieros, liderazgo y visión a futuro.



Torre de perforación en el campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, Baja California Sur, México. Cortesía Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, CFE.

REFERENCIAS

- Academia de Ingeniería México. (2017). Documentos de enfoque: Los Centros Mexicanos en Innovación en Energía: Orígenes y desarrollo. <http://www.ai.org.mx>
- DiPippo, R. (2022). Pathé geothermal power plant, Hidalgo, Mexico: A comprehensive retrospective assessment of the first plant of its kind in the Americas. *Geothermics*, 98, doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102285
- Gutiérrez-Negrín, L. C., Canchola Félix, I., Romo-Jones, J. M. y Quijano-León, J. L. (2020). Geothermal energy in Mexico: update and perspectives. In *Proceedings World Geothermal Congress*.
- Iglesias, E. R., Torres, R. J., Martínez-Estrella, J. I., Reyes-Picasso, N. (2011). Resumen de la evaluación 2010 de los recursos geotérmicos mexicanos de temperatura intermedia a baja. *Geotermia: Revista Mexicana de Geoenergía*, 24(2), 39-48.
- Romo Jones, J. M. (2016). The Mexican Center for Innovation in Geothermal Energy (CeMIE-Geo). In *Proceedings World Geothermal Congress 2015 Melbourne, Australia*, 19-25 de abril.
- Romo Jones, J. M., Kretzschmar, T. G. y Group CeMIEGeo (2017). The Mexican Center of Innovation in Geothermal Energy, CeMIE-Geo: Challenges and Opportunities. *Procedia Earth and Planetary Science*, 17, 905-908.
- Romo Jones, J. M. (2019). Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica. Informe de resultados Octava Etapa.
- Romo Jones, J. M. (2019). Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica Informe de Resultados. Presentación.
- Romo Jones, J. M. (2019). Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica. Informe Final Resultados de Proyectos Estratégicos.
- Romo Jones, J. M. (2019). La Energía Geotérmica en México. *IC Ingeniería Civil*, Colegio de Ingenieros Civiles de México, A.C., 597, 4-8, mayo, 2019. https://issuu.com/cicm_oficial/docs/ic597-final/
- SENER. (2017). Mapa de Ruta Tecnológica en Geotermia, 2017. Secretaría de Energía.
- SENER (2017). Mapa de Ruta Tecnológica Usos Directos del Calor Geotérmico, 2018. Secretaría de Energía.



*CeMIEGeo. Contribución a la
sociedad y al conocimiento*
se terminó de imprimir en los
talleres gráficos de Grupo Fogra S.A.
de C.V. el mes de febrero de 2023
en la Ciudad de México

El CeMIEGeo formó parte del conjunto de centros mexicanos de innovación en energía (CeMIE) creados por el Gobierno Federal para incentivar el desarrollo científico y tecnológico en materia de fuentes renovables de energía, eficiencia energética, uso de tecnologías limpias y para la formación de recursos humanos especializados. Esta obra hace un recuento de los alcances y logros del proyecto, así como de los retos y oportunidades que tiene nuestro país para desarrollar sus recursos geotérmicos.

El CeMIEGeo ha dejado la semilla sembrada, la cual debe cultivarse para que pueda producir frutos que contribuyan al mejor aprovechamiento de la geotermia en México. Para el CICESE como para las instituciones participantes, este primer esfuerzo coordinado, que abordó un tema tan relevante para el país, deja claro que este tipo de iniciativas interinstitucionales, con todas las complicaciones que implica su seguimiento técnico y administrativo, producen beneficios notables para todos los involucrados, pero sobre todo benefician a la sociedad.

La experiencia ganada con el trabajo conjunto de todos los involucrados: investigadores, técnicos, estudiantes y personal administrativo de las instituciones académicas participantes, con normativas, reglamentos y formas de trabajar diferentes, ha sido inestimable.