



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
INSTITUTO DE GEOFÍSICA

Exploración geotérmica con SIG en Maguarichic, Chihuahua

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:
JOSÉ DANIEL ELIZALDE GUERRERO

Director de Tesis:
Dra. Rosa María Prol Ledesma
Instituto de Geofísica

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., agosto 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS.

Al Programa de Apoyo a Estudiantes” a cargo del Proyecto 00 “Formación de Recursos Humanos Geotermia” del Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CeMIEGeo) se le agradece el valioso apoyo financiero recibido para la conclusión de este trabajo en el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

El trabajo contó con el apoyo del Proyecto P01 “Mapas de Gradiente Geotérmico y de Flujo de Calor para la República Mexicana” del CeMIEGeo, se agradece la oportunidad de participar en él y el acceso a su información geocientífica.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) se agradece el apoyo financiero para estudios de maestría.

Al Posgrado en Ciencias de la Tierra de la UNAM y su comité, se le agradece por el apoyo y todas las facilidades brindadas para realizar esta tesis.

Agradezco inmensamente la labor de todos los integrantes del jurado, ya que con su valiosa participación e importantes comentarios y sugerencias ayudaron a mejorar la calidad de esta tesis.

A la Dra. Rosa Ma. Prol Ledesma agradezco su valiosa ayuda desde el comienzo de este trabajo para hacer potencial la aplicación del SIG a exploración geotérmica.

Asimismo, estoy en deuda con el grandioso equipo de trabajo de la Dra. Prol, quienes aportaron sus conocimientos para el desarrollo de esta tesis, y con Miguel Flores que hizo posible el manejo exitoso de la base de datos.

Quiero hacer una mención especial a la Mc. Alejandra Membrillo que hizo manejable la aplicación del SIG.

Agradezco el interés y constante cuestionamiento del Dr. Marco Antonio Torres Vera sobre la elaboración del Sistema de Información Geográfica.

A la UNAM se le agradece todo el apoyo brindado.

CONTENIDO.

RESUMEN.....	4
LISTA DE FIGURAS.	5
LISTA DE TABLAS.....	5
CAPÍTULO UNO. INTRODUCCIÓN.	6
1.1 Antecedentes.	6
1.2 Justificación de la investigación.	10
1.3 Definición del problema científico.....	11
1.4 Objetivo.....	11
1.5 Estructura del escrito.	12
CAPÍTULO DOS. ÁREA EN ESTUDIO.	13
2.1 Localización.	13
2.2 Contexto histórico y social.	14
2.3 Marco geológico.....	14
2.4 Modelo conceptual del sistema geotérmico.	19
CAPÍTULO TRES. MARCO TEÓRICO.....	20
3.1 Sistema de Información Geográfica.	20
CAPÍTULO CUATRO. METODOLOGÍA.	32
4.1 Modelado espacial.....	32
4.2 Modelo de exploración geotérmica en Maguarichic.	37
CAPÍTULO CINCO. RESULTADOS Y SU ANÁLISIS.....	53
CAPÍTULO SEIS. CONCLUSIONES.....	57
REFERENCIAS	58
ANEXO 1	63

RESUMEN.

Maguarichic cuenta con recursos geotérmicos probados de media y baja temperatura que actualmente no están siendo aprovechados. Por ello, se propone una estrategia de reconocimiento superficial que encuentra áreas con potencial geotérmico en las cercanías de Maguarichic, donde en futuras etapas de exploración se evaluaría nuevamente la factibilidad de desarrollar un proyecto geotérmico. El estudio utiliza datos públicos, disponibles y accesibles del lugar sin estar en él. La información que se obtiene de estos se integra en un Sistema de Información Geográfica utilizando dos métodos de evaluación multicriterio, ambos se basan en la experiencia y conocimiento de expertos para determinar los pesos de las capas-criterios. Las capas se eligen a partir de la evidencia que representan para señalar que existe alta permeabilidad y la presencia de una fuente de calor en profundidad. Finalmente, se proponen dos áreas objetivo con potencial para exploración *in situ*, una hacia el SE de la zona geotérmica Piedras de Lumbre y otra en la periferia de la caldera Tomochic.

Palabras clave: Energía geotérmica. Piedras de Lumbre. Percepción Remota. Suma Lineal Ponderada y Difusa.

ABSTRACT.

Maguarichic has proven geothermal resources of medium and low temperature that are currently not being used. For this reason, a surface reconnaissance strategy is proposed that finds areas with geothermal potential near Maguarichic, where in future exploration stages the feasibility of developing a geothermal project would be evaluated again. The study uses public, available and accessible data of the place without being in it. The information obtained from these is integrated into a Geographical Information System using two multicriteria evaluation methods, both based on the experience and science of experts to determine the weights of the criteria-layers. The layers are chosen from the evidence they represent to indicate that there is high permeability and the presence of a source of heat in depth. Finally, two target areas with potential for in situ exploration are proposed, one towards the SE of the Piedras de Lumbre geothermal zone and the other on the periphery of the Tomochic caldera.

Keywords: Geothermal energy. Piedras de Lumbre, Remote Sensing. Fuzzy and Linear Weighted Average.

LISTA DE FIGURAS.

Figura 1. Localización del área en estudio, así como la ubicación de la ZGPL (Tello, 1996).....	13
Figura 2. Geología del área.	16
Figura 3. Capa temática de litología.....	43
Figura 4. Capa temática de fracturas y fallas (izquierda y derecha, respectivamente).....	44
Figura 5. Capa temática de manifestaciones hidrotermales. Se muestra también un acercamiento a las manifestaciones cerca de Maguarichic.....	45
Figura 6. Capa temática de flujo de calor.....	45
Figura 7. Capa temática de alteración hidrotermal, grupo de los hidroxilos.....	46
Figura 8. Capa temática de anomalía de temperatura superficial.....	46
Figura 9. Capa temática de distancia a calderas.....	47
Figura 10. Capa temática de distancia a epicentros.....	47
Figura 11. a) Es el potencial geotérmico calculado a partir del método de suma lineal ponderada del área en estudio. La figura b) es el acercamiento a la ZGPL, así como c) a la caldera Tomochic y d) a la caldera Ocampo	55
Figura 12. a) Es el potencial geotérmico calculado a partir del método de suma lineal ponderada difusa del área en estudio. La figura b) es el acercamiento a la ZGPL, así como c) a la caldera Tomochic y d) a la caldera Ocampo.....	56

LISTA DE TABLAS.

Tabla 1. Operaciones espaciales en el SIG vectorial (Gómez-Delgado <i>et al.</i> , 2006).....	29
Tabla 2. Localización, concentración de sílice en p.p.m. y temperatura calculada de manantiales (T_{SiO_2}) por Prol-Ledesma y Juárez (1986) y Tello (1996), cada uno se identifica con el símbolo (*) y (**), respectivamente.....	39
Tabla 3. Sismos reportados en Chihuahua por el SSN que se encuentran dentro del área en estudio.	42
Tabla 4. Procedimientos realizados a la base de datos para ingresar la información al SIG.....	48
Tabla 5. Modelo lógico del método de suma lineal ponderada, contiene las variables numéricas y sus unidades.....	51
Tabla 6. Modelo lógico del método de suma lineal ponderada difusa, contiene las variables numéricas y sus unidades.....	51
Tabla 7. Matriz de comparaciones por pares de los ocho criterios del modelo propuesto.	52

CAPÍTULO UNO. INTRODUCCIÓN.

El petróleo asequible que impulsó la economía mundial desde la década de 1950 se está agotando. Los recursos energéticos asequibles son esenciales para el desarrollo económico y social, así como para la producción de alimentos, la disponibilidad del suministro de agua y una vida sana y sostenible. Actualmente, se realizan iniciativas para mejorar la eficiencia de las fuentes de combustible para la entrega y el uso de energía, con el fin de evitar el impacto adverso y potencialmente irreversible a largo plazo del aprovechamiento de estos recursos energéticos, pero según datos de las Naciones Unidas, para 2050, la demanda de energía podría duplicarse o incluso triplicarse a medida que la población mundial aumente y los países en desarrollo amplíen sus economías, desfavoreciendo tales esfuerzos.

El uso de combustibles fósiles de manera más eficiente no ha reducido las emisiones globales de gases de efecto invernadero; los desafíos que presenta la necesidad de controlarlos son enormes y se requieren enfoques innovadores e iniciativas de ingeniería audaces para lograr el desarrollo sostenible; en relación con esto, el Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CeMIEGeo) busca seriamente soluciones en energía alternativa, en especial con la energía geotérmica; aunque el CeMIEGeo realiza investigaciones estratégicas que coadyuven en el conocimiento, dominio y aprovechamiento de la energía geotérmica en México, se necesitan estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos más exhaustivos para tener una estimación actualizada del potencial geotérmico del país; por esta razón, el objetivo de este trabajo es generar información útil para evaluar nuevamente la factibilidad de desarrollar un proyecto geotérmico en las cercanías de la zona geotérmica Piedras de Lumbre en Maguarichic, considerando que esta zona es un sitio con recursos geotérmicos probados y hay pocos estudios que señalen más áreas y prospectos con potencial geotérmico en las cercanías.

1.1 Antecedentes.

Descripción general de un sistema geotérmico y su exploración a través de los SIG.

La Tierra es un planeta dinámico impulsado por el calor. El calor interno de la Tierra proviene principalmente de su formación. El calor adicional es generado en la corteza continental por la desintegración de los isótopos radiactivos de vida larga, especialmente uranio (U), torio (Th) y potasio (K). Otras fuentes secundarias de calor son las mareas terrestres, los choques de meteoritos y la atracción gravitacional del Sol y la Luna (Prol-Ledesma, 1988).

La geotermia utiliza el calor interno de la Tierra que fluye continuamente como un recurso energético perpetuo, renovable e inagotable; asociado a esto, la geotermia contribuye en la generación eléctrica mundial, mediante el desarrollo de los sistemas geotérmicos y el aprovechamiento de sus recursos (Barbier, 2002).

La ubicación de los sistemas geotérmicos se correlaciona con configuraciones geológicas específicas cuando se considera dentro de un contexto de tectónica de placas. Los principales elementos estructurales de la tectónica de placas son los centros de extensión, subducción o zonas de convergencia y fallas transformantes. Cada uno de estos elementos y cómo interactúan, establece el tipo de ambiente que tiene configuraciones geológicas específicas. Estas configuraciones son útiles como punto de partida para la exploración (Glassley, 2015).

Teóricamente, un sistema geotérmico se basa en el transporte de calor desde una fuente a profundidad hasta una zona de descarga que generalmente es la superficie de la Tierra. El transporte de calor usualmente se efectúa a través de un fluido geotérmico, en el caso de sistemas hidrotermales, el fluido puede estar constituido por agua originada en la superficie de la Tierra y que ha penetrado hasta profundidades donde se ha calentado por contacto con rocas a alta temperatura. En su camino desde la fuente hacia la zona de descarga, el fluido geotérmico puede ser almacenado temporalmente en un yacimiento (Watson, 2013).

A través de zonas de debilidad estructural como fracturas y fallas, el fluido escapa del yacimiento hacia la superficie, formando manifestaciones hidrotermales. Estas manifestaciones superficiales son evidencia de la presencia de zonas permeables a través de las cuales fluye el agua subterránea y posiblemente debajo existan recursos geotérmicos (Glassley, 2015).

Hay sistemas geotérmicos en entornos geológicos con presencia de manifestaciones termales que indican la presencia de calor, pero hay muchos que tienen poca o ninguna expresión en superficie. En otras palabras, encontrar un sistema geotérmico puede ser tan fácil como notar la presencia de un géiser, una fumarola o un manantial caliente, pero hay muchos recursos que tienen poca o ninguna expresión en superficie. La observación cuidadosa de las manifestaciones termales en superficie, al mapear su ubicación y registrar sus propiedades, puede proporcionar información valiosa para caracterizar un recurso. Por tanto, la exploración de recursos geotérmicos requiere el empleo de numerosas técnicas para identificarlo. Desde hace algunos años se han desarrollado técnicas geológicas, geoquímicas, geofísicas y estadísticas cada vez más sofisticadas para ayudar en el descubrimiento y la ubicación de los recursos geotérmicos (Glassley, 2015).

Un programa de exploración para localizar recursos geotérmicos, generalmente se realiza como un procedimiento paso a paso que consiste en estudios de reconocimiento, prefactibilidad y factibilidad, donde las áreas más favorables se investigan dentro de cada paso (Wright *et al.*, 1989). Por ejemplo, en los estudios de reconocimiento superficial de tipo geológico, geofísico y geoquímico, se busca obtener información útil, inicialmente, para asistir en la planeación de campañas de muestreo de localidades geotérmicas y posteriormente, para la toma de decisiones respecto a la ubicación de zonas para la perforación de pozos con el mínimo riesgo de apertura de un pozo no productor (Flóvenz *et al.*, 2012).

Los datos relevantes de los estudios de reconocimiento, tanto a nivel local o regional, se utilizan como capas de evidencia geocientífica y constituyen la información de entrada para un Sistema de Información Geográfica (SIG). Un SIG integra y analiza información estadística y temática en un contexto espacial para encontrar un resultado de acuerdo con el objetivo que se busca cumplir, por ejemplo, un SIG se aplica para evaluar el potencial de ocurrencia mineral (Bonham-Carter *et al.*, 1988) o para encontrar áreas objetivo en la exploración geotérmica (Moghaddam *et al.*, 2014) y selección de sitios de perforación (Noorollahi e Itoi, 2008).

Se hace notar que los tipos de datos y el enfoque general utilizado para evaluar el potencial de ocurrencia mineral son similares a los utilizados en varias otras aplicaciones geocientíficas, como la evaluación del potencial geotérmico y predicción de ocurrencia de recursos geotérmicos. La lógica difusa y la estadística bayesiana son métodos para combinar varios conjuntos de datos espaciales para la predicción y evaluar el potencial de ocurrencia; se utilizan para seleccionar la mejor ubicación, por ejemplo, para clasificar las áreas según el potencial mineral o geotérmico (Bonham-Carter, 1994).

En un SIG, los modelos de integración de información pueden ser utilizados de dos formas, 1) modelos relacionados con álgebra de mapas y 2) modelos que se centran en la importancia relativa y absoluta de las variables que definen los mapas (Bonham-Carter, 1994). A partir del tipo de enfoque que se utilice para saber cómo se integra la información, la segunda forma se divide en dos subtipos de modelos, uno se basa en la experiencia y conocimiento de los expertos, y el otro se basa en las soluciones existentes y los valores de los datos (Bonham-Carter, 1994).

Algunos autores han desarrollado y aplicado ambos modelos utilizando diferentes aproximaciones y distintas herramientas estadísticas, tales como pesos de evidencia, lógica booleana, superposición de índices booleanos, modelos de agregación jerárquica y procesos de jerarquía analítica, etcétera (De Araújo y Macedo, 2002); por ejemplo, Carranza *et al.* (2008) y luego Moghaddam *et al.* (2014) definen un modelo

conceptual entre las ocurrencias geotérmicas y algunas características geológicas y geofísicas con análisis de distribución y asociación espacial. Calcularon los criterios óptimos de distancia de corte y aplicaron las funciones de creencia probatoria basadas en datos para el mapeo predictivo de áreas de potencial geotérmico a escala regional.

Bonham-Carter *et al.* (1988) demuestran un método para evaluar la favorabilidad de mineralización utilizando un enfoque basado en el conocimiento. Realizaron el método de regla de Bayes para combinar los factores de importancia y determinaron los pesos de las capas con base en la distribución de ocurrencias de oro conocidas. Los mapas que generaron muestran las áreas donde se produce un conjunto único de superposición de condiciones favorables para mineralización. También, De Araújo y Macedo (2002) aplicaron este tipo de evaluación con una base de datos que incluye geología, geoquímica y geofísica, aunque utilizaron el conocimiento de expertos para asignar los pesos a las capas de información, antes de su superposición.

Prol-Ledesma (2000) definió los parámetros del modelo conceptual para la exploración geotérmica basándose en el conocimiento experto y comparó la lógica booleana, la superposición de índices multiclase y los modelos de agregación jerárquica difusa para el mapeo de prospectividad.

Noorollahi e Itoi (2008) utilizaron el modelo basado en el conocimiento para seleccionar sitios adecuados de perforación. Integraron capas de información geocientífica con base en dos modelos, uno de exploración geotérmica y otro de aptitud ambiental. Aplicaron lógica booleana y superposición de índices. Utilizaron el conocimiento de un experto para determinar los puntajes de las clases y pesos de los criterios. Finalmente, tomaron una decisión y definieron un área para situar los pozos geotérmicos con base en los resultados de la combinación de ambos modelos en el SIG.

Yousefi *et al.* (2010) y Sadeghi y Khalajmasoumi (2015) utilizaron un modelo de superposición de índices de múltiples clases para integrar capas de mapas de evidencia y proporcionaron un mapa de áreas potenciales de recursos geotérmicos en Irán.

En México, hubo un SIG que asistió en la evaluación de reservas de media a baja temperatura en localidades geotérmicas de México (Torres *et al.*, 2005), Maguarichic entre ellas. Dicho SIG, ayudó a inferir la existencia, localización y tamaño de sistemas geotérmicos individuales del país, porque utilizaba una base de datos con información de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL) sobre manantiales calientes, pozos de agua y localidades con

temperatura de superficie mayor a 28 °C (Torres *et al.*, 2005). El SIG y su base de datos fueron importantes porque estaban diseñados para facilitar la visualización y análisis de información necesaria para interpretar los datos y su relación con la geografía, geología, política e información mexicana.

Hoy en día, se desarrolla un proyecto de investigación aplicada sobre SIG para el potencial de los sistemas geotérmicos mejorados de México, a cargo del CeMIEGeo, aunque el sistema geotérmico de la zona de Maguarichic no esté clasificado como yacimiento de baja permeabilidad, la información conseguida con la presente sería de utilidad para ser integrada en dicho proyecto.

1.2 Justificación de la investigación.

Hay dos aspectos que hacen suponer que la presente investigación es necesaria y oportuna y que ha de ser efectiva, estos se describen a continuación:

Primero, hay entornos geológicos que se sabe albergan recursos geotérmicos activos, entonces se elige la zona de estudio ya que se encuentra en una provincia *Basin and Range* (Busby, 2012), donde el flujo de calor continental es anómalo y existe la presencia de manifestaciones superficiales reportadas en la zona, que muestran resultados favorables de encontrar sistemas hidrotermales activos, además de que por varios años operó en la localidad una planta geotérmica que proporcionó electricidad a la comunidad antes de que se conectara a la red nacional (Hiriart y Gutiérrez-Negrín, 2003). También, al seleccionar esta zona y con el desarrollo de un modelo cuantitativo, es posible integrar la información disponible para elaborar mapas temáticos, que sirvan de apoyo en las etapas de exploración intermedia y avanzada, y que permitan una mejor evaluación de los recursos geotérmicos en Maguarichic.

Segundo, en algunos trabajos previos donde recurren a un SIG para saber en qué sitios se cumplen o concuerdan ciertas condiciones o criterios de exploración geotérmica, utilizan el modelo basado en conocimiento y determinan los pesos de las capas porque cuentan con información de pozos o la distribución de ocurrencia del recurso. En cambio, el plan de la presente investigación es utilizar también el modelo basado en conocimiento pero determinar los pesos a partir de la experiencia y conocimiento de los expertos, porque no hay información de pozos, pero hay información pública disponible impresa y digital sobre varios parámetros del sistema geotérmico, entonces, se puede acceder a ella y utilizarla como información de entrada en nuestro sistema aplicado a la exploración geotérmica; además, se puede generar información de calidad a partir de sensores remotos; porque con la tecnología de percepción remota se obtienen imágenes en diferentes frecuencias del espectro electromagnético que, combinadas entre sí, resaltan diferentes rasgos

superficiales, como pueden ser fallas, lineamientos, además de zonas alteradas hidrotermalmente y anomalías de temperatura.

En consecuencia, el contenido y los elementos esenciales de la presente tesis difieren de los trabajos previos porque con la Percepción Remota se genera la información sin estar en el sitio, esto significa, invertir en estudios que utilicen información disponible del lugar sin estar en él y sin gastar recursos, ya que Maguarichic es una zona de difícil acceso (Sánchez-Velasco, 2005).

1.3 Definición del problema científico.

La exploración de los recursos energéticos puede ser económica en localidades con alto flujo de calor y fluidos cerca de la superficie coincidentes con fracturas (Moghaddam *et al.*, 2014). No obstante, en muchos casos, la evidencia en superficie de que un recurso de alta temperatura está presente a profundidad puede no ser obvia, lo que hace que el recurso sea difícil de encontrar. Estos recursos ocultos a menudo son detectables a través de manifestaciones en superficie, por ejemplo, concentraciones químicas anómalas en aguas superficiales o alteración hidrotermal, manantiales termales, fumarolas, etcétera. Por tanto, identificar estas evidencias, así como las de estructuras principales que favorezcan una alta permeabilidad de las rocas en el yacimiento, son evidencia clave en superficie para determinar la existencia de recursos geotérmicos en profundidad. Por tanto, esta investigación se aplica como una estrategia que pretende establecer un protocolo de reconocimiento remoto para determinar la presencia de zonas con potencial geotérmico donde su identificación dependerá de la caracterización de alteración hidrotermal, así como, la interpretación de la relación entre las estructuras y los fluidos hidrotermales. Entonces, se intentará descubrir recursos geotérmicos con base en las evidencias superficiales con las técnicas de Percepción Remota y SIG.

Por todo lo anterior, el objetivo que se persigue en este trabajo y las metas por cumplir en cada etapa son:

1.4 Objetivo.

Realizar un SIG para exploración de recursos geotérmicos sujeto a criterios ponderados elegidos con base en la experiencia de un experto; utilizar tanto el método de superposición de índices con múltiples clases como el método de suma lineal ponderada difusa con la combinación de operadores para integrar capas de evidencia geocientífica; donde la finalidad es encontrar zonas con potencial geotérmico en las cercanías de Maguarichic.

Metas.

Definir el modelo conceptual de exploración geotérmica en Maguarichic.

Obtener y/o generar la información para el SIG.

Establecer los criterios y puntajes pertinentes para la evaluación.

Plantear el modelo de integración de capas temáticas del área en estudio con factores de probabilidad.

Implementar la integración lógica de la información en el modelo de análisis matemático y de lógica difusa.

Interpretar e indicar cuáles zonas tiene potencial geotérmico, proponer aquellas zonas en la que se requieran realizar más estudios para evaluar su potencial.

1.5 Estructura del escrito.

La secuencia y contenido de los capítulos incluidos en la presente investigación se describen a continuación. El capítulo primero presenta una introducción sobre los sistemas geotérmicos e incluye la descripción de trabajos realizados sobre la exploración geotérmica con SIG. También, contiene el planteamiento del problema que se busca resolver, así como los objetivos y metas. El capítulo segundo trata sobre el área en estudio. Tiene cuatro aspectos importantes, primero, su localización geográfica; segundo, el contexto social y económico; tercero, el contexto geológico y tectónico, finalmente, el modelo conceptual del sistema geotérmico. El capítulo tercero incluye el marco teórico en el cual se fundamenta la presente investigación y los métodos usados en ella. El capítulo cuarto comprende la metodología para determinar las condiciones indicadoras de una alta favorabilidad para la explotación de energía geotérmica. Además, se describe el tipo de material colectado, el procedimiento seguido y el equipo utilizado. El capítulo quinto presenta los resultados conseguidos y su descripción. Finalmente, el capítulo sexto reúne las conclusiones obtenidas a partir del análisis de los resultados.

CAPÍTULO DOS. ÁREA EN ESTUDIO.

2.1 Localización.

El área en estudio se localiza al norte de México, al suroeste del estado de Chihuahua, entre las coordenadas geográficas 27°15' y 28°55' de latitud norte y 106°54' y 108°27' de longitud oeste, con una superficie de 28,105.85 km² (183.1 x 153.5 km; véase Fig. 1).

El área en estudio incluye en su totalidad la Zona Geotérmica de Maguarichic (en adelante ZGM). La ZGM se localiza en el municipio y localidad de Maguarichic; seis kilómetros al NE de esta localidad se encuentra la Zona Geotérmica de Piedras de Lumbre (en adelante ZGPL; véase Fig. 1).

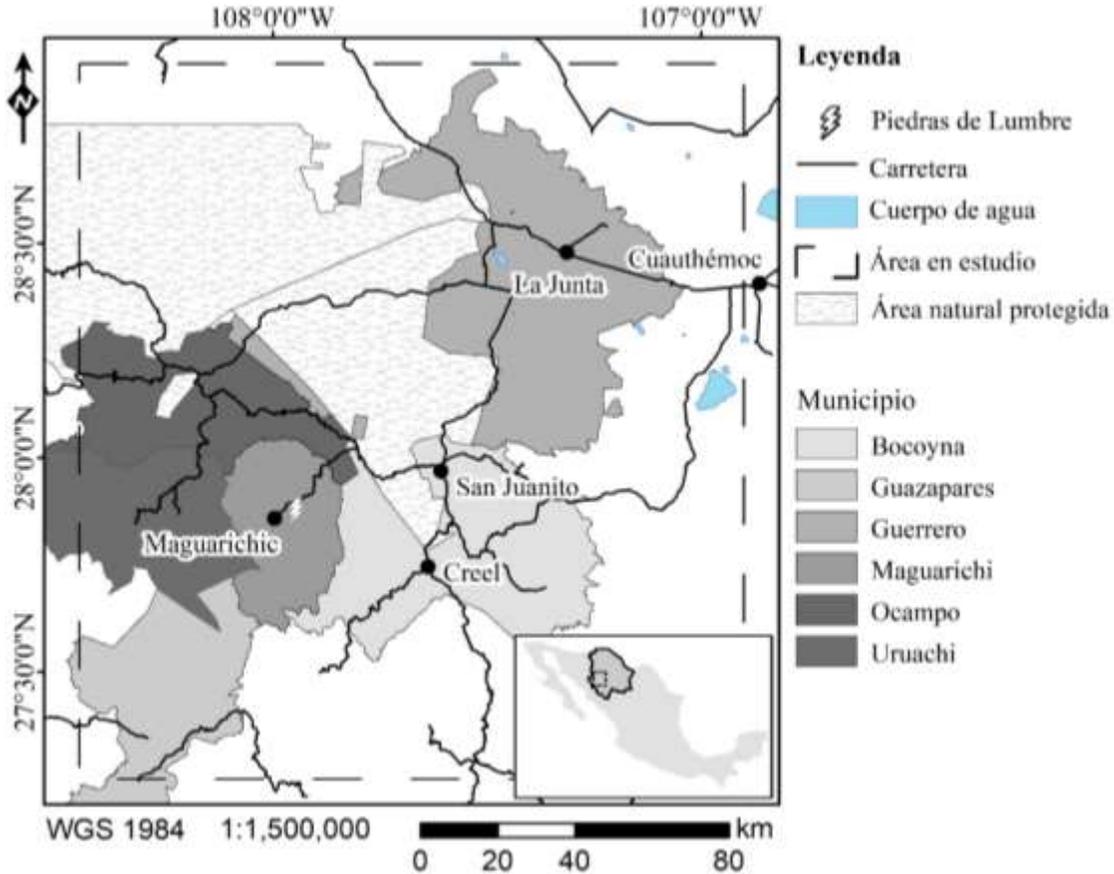


Figura 1. Localización del área en estudio, así como la ubicación de la ZGPL (Tello, 1996).

2.2 Contexto histórico y social.

La Comisión Federal de Electricidad (CFE) exploró la ZGM y la ZGPL desde 1984 (Tello, 1985). En diez años, la CFE caracterizó la ZGPL a partir de estudios de geología, geoquímica y geofísica (Tello, 1996). Con base en los estudios realizados, la CFE perforó un primer pozo exploratorio hacia el reservorio geotérmico. El pozo Piedras de Lumbre 1 (PL-1) tuvo una profundidad de 49 m con un diámetro de 3.5” y produjo agua a 120°C (Sánchez-Velasco, 2005). Con los datos de producción e información conseguida de registros de temperatura y presión del PL-1, la CFE perforó un segundo pozo de 9 5/8” con revestimiento ranurado a 300 m. El objetivo del pozo Piedras de Lumbre 2 (PL-2) era ganar más temperatura y más producción, pero el pozo PL-2 no ofreció una temperatura más alta que la medida en el pozo PL-1, aunque produjo 35 toneladas por hora de agua caliente (Sánchez-Velasco, 2005).

Finalmente, con la información de los pozos PL-1 y PL-2, la CFE comprobó que la ZGPL es un sitio con recursos geotérmicos de media a baja temperatura. Entonces, en 2001, la CFE instaló una planta de ciclo binario de 300 kilowatt (Kw) para desarrollar la ZGPL para uso directo de la geotermia y suministró energía eléctrica a las comunidades aisladas circundantes a la ZGPL (Arrubarrena y Pelayo, 2012). Aunque el proyecto geotérmico de la ZGPL ayudó a mejorar la situación de las comunidades, por ejemplo, con el aumento de empleos y oportunidades de desarrollo desde su inicio en 2001, la planta cerró en 2007 debido a que la energía generada no fue suficiente para cumplir con la carga, por tanto, la CFE comenzó a suministrar la electricidad necesaria.

2.3 Marco geológico.

Marco geológico local.

Las rocas más antiguas están en el límite oeste del área en estudio; ahí existen dos afloramientos, uno de rocas metamórficas del Paleozoico y otro del Precámbrico, este último con un contacto entre rocas metamórficas y sedimentarias (Guzmán-Espinoza *et al.*, 2000; Ochoa-Landín *et al.*, 2002; véase Fig. 2).

Hay rocas del Mesozoico distribuidas mayormente hacia la parte WSW del área en estudio. Son rocas sedimentarias del Jurásico y Cretácico que corresponden a la Formación Alisitos y Las Cumaras, respectivamente (Ochoa-Landín *et al.*, 2002). En la parte NE del área, está el único depósito de caliza-dolomita del Albiano que corresponde a la Formación Aurora (Padilla-Palma *et al.*, 1997; véase Fig. 2).

Entre el Mesozoico y el Cenozoico se originaron algunas rocas intrusivas (Granito-Granodiorita) de la Formación El Jaralito. En menor cantidad ocurrieron depósitos de sedimentos de la Formación Conglomerado Gasogachi. En la parte SW existen afloramientos de andesita-toba andesítica del Paleoceno-Eoceno de la Formación Nacozari (Ochoa-Landín *et al.*, 2002; véase Fig. 2).

En la mayor parte del área hay un extenso depósito de ignimbrita-toba riolítica de la Formación Carpintero del Oligoceno. También, en esta misma época, pero en menor cantidad, hay andesitas de la Unidad Ojo Blanco y basaltos hacia el NE. No obstante, en la parte NW, hay basaltos andesíticos del Oligoceno-Mioceno de la Formación Baucarit (Guzmán-Espinoza *et al.*, 2000; Ochoa-Landín *et al.*, 2002; Padilla-Palma *et al.*, 1997; Maldonado-Lee *et al.*, 2000; véase Fig. 2).

También de la Formación Baucarit, hay depósitos aluviales y conglomerados poligénicos del Cuaternario, específicamente en la parte NNE del área en estudio están con orientación NW-SE (Guzmán-Espinoza *et al.*, 2000; Padilla-Palma *et al.*, 1997; véase Fig. 2).

El ZGM forma parte de la provincia geotérmica Sierra Madre Occidental (Torres-Rodríguez, 2000), que, a su vez, pertenece a la provincia *Basin and Range* de los Estados Unidos, generada por un sistema de fallas normales (Busby, 2012). Los movimientos a lo largo de estas fallas han producido bloques de falla elevados alternos que se conocen como *horst* y forman cordilleras elevadas, y bloques hundidos llamados *graben* que generan cuencas. Esto ocurre donde la corteza se ha estirado por esfuerzos tensionales y se ha roto para crear estas alineaciones montañosas de sierras y cuencas.

En el ZGM existen manifestaciones hidrotermales relacionadas tanto con fallas normales y *graben* (Torres-Rodríguez, 2000), como con la provincia *Basin and Range* (Sánchez-Velasco, 2005). En la ZGPL hay manantiales calientes y fumarolas, estas manifestaciones termales están asociadas principalmente a fracturas y fallas regionales con orientación NW-SE y NE-SW (Tello, 1996). Tello (1996) indica que la recarga de agua meteórica ocurre en los afloramientos de andesitas cuya edad estimada va del Oligoceno superior al Mioceno inferior. Cabe resaltar que la zona de estudio contiene ignimbritas depositadas durante varios episodios de actividad volcánica de la Sierra Madre Occidental.

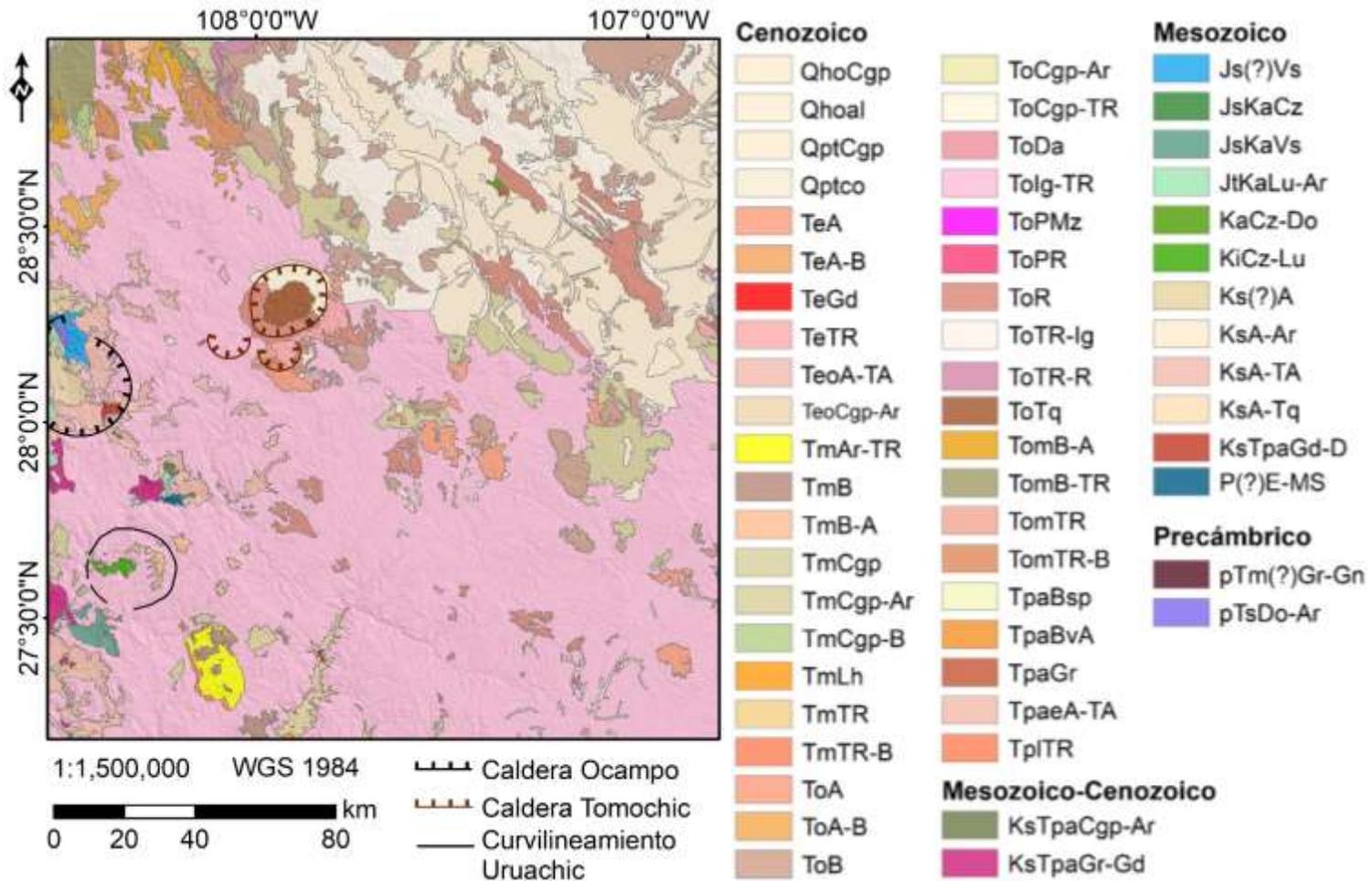


Figura 2. Geología del área.

Marco geológico regional.

La geología regional del área en estudio está representada por la Sierra Madre Occidental (SMOc en adelante). La SMOc es uno de los campos volcánicos más grandes del mundo, abarca más de 2,000 km de longitud y un promedio de 200 km de ancho. La vegetación en la SMOc varía con la temperatura y la humedad; predomina un clima templado; la vegetación de las tierras altas consiste fundamentalmente en bosques de pinos y robles (INEGI, 1991).

Probablemente, la SMOc exhibe la extensión de ignimbrita continua más grande del mundo, producto de un gran complejo de calderas, por ejemplo, en la parte centro oeste del área en estudio, están las calderas Ocampo y Tomochic (Guzmán-Espinosa *et al.*, 2000; Padilla-Palma *et al.*, 1997; véase Fig. 2). Fuera del área, hacia el NE, está la Caldera San Marcos.

Ferriz (1981) reporta que la Caldera San Marcos no es de interés geotérmico, pero contiene mineralizaciones de Uranio. La Caldera de San Marcos es un sistema volcánico silícico de edad eocénica y forma parte del complejo caldérico en la porción nororiental de la SMOc.

La estratigrafía volcánica de la SMOc ésta dividida en dos grupos, Complejo Volcánico Inferior (Terciario inferior-Cretácico superior) y Complejo Volcánico Superior (Terciario superior), así como por un periodo de ausencia de magmatismo de 10 m.a. entre ambos grupos (Ferriz, 1981). La cronología de ambos grupos se remonta a los patrones de esparcimiento del piso oceánico.

En el oeste de México estos dos grupos ígneos de composición química calco-alcalina, ocupan áreas similares y casi se superponen en la mayor parte de la SMOc (McDowell y Clabaugh, 1979). El Complejo Volcánico Inferior (CVI) representa la continuación hacia el sur del Batolito del oeste de los Estados Unidos (EU) que se emplazó durante el Cretácico inferior y Terciario, convergiendo a lo largo del margen oeste de la placa de Norteamérica. El CVI se caracteriza por abundantes batolitos, así como, por rocas volcánicas (andesitas) y es predominantemente de composición intermedia (McDowell y Keizer, 1977). Las rocas del CVI presentan un alto grado de alteración por la deformación ocasionada por fallas y pliegues; de hecho, contiene una gran fracción de los yacimientos minerales de México, y al menos, un rastro de sulfuros se puede encontrar en casi todos los grandes afloramientos. El CVI es probablemente continuo desde el sur de Sinaloa a lo largo del margen continental, y se conecta con los batolitos de Baja California, el sur de California y la Sierra Nevada para formar un arco plutónico-volcánico continuo (McDowell y Clabaugh, 1979).

El cese o declive abrupto de la actividad magmática en la SMOc se estima que duró aproximadamente 10 m.a. (45 a 34 m.a.). Hay dos causas razonables para este cese de actividad, primero, una pausa o disminución en la velocidad de convergencia de la placa o un cambio en la inmersión de la placa subducida; segundo, la subducción de litósfera oceánica joven que flanquea una cresta oceánica puede resultar en la disminución de magmatismo (McDowell y Clabaugh, 1979).

El Complejo Volcánico Superior (CVS) representa una extensa secuencia de ignimbritas riodacíticas a riolíticas moderadamente soldadas de un gran complejo calderico, generalmente acompañadas con flujos de riolita y pequeños derrames de lava máfica, domos y sedimentos tufáceos (McDowell y Clabaugh, 1979). El volcanismo del CVS corresponde al Oligoceno hace 34 a 27 m.a., aunque algo de actividad persistió hasta hace 23 m.a. El CVS es comparable a las tobas de flujo de ceniza y rocas asociadas de edad similar que mantienen amplias áreas del oeste de los Estados Unidos de América (McDowell y Keizer, 1977). El CVI y el CVS afloran en sierras limitadas por fallas, alineadas en dirección N-S, que forman las estribaciones nororientales de la SMOc (Ferriz, 1981).

En el estado de Chihuahua, en la porción nororiental de la SMOc, el CVS descansa sobre unidades volcánicas félsicas, intermedias o máficas del Cretácico Superior al Oligoceno inferior, o sobre rocas sedimentarias Mesozoicas. La continuidad de las rocas volcánicas es interrumpida por fallas normales mayores y por la erosión de los ríos que drenan hacia el Océano Pacífico (McDowell y Clabaugh, 1979).

Marco tectónico regional.

El área en estudio se encuentra dentro del terreno tectonoestratigráfico Sierra Madre Occidental (Campa y Coney, 1983). Fisiográficamente pertenece a la subprovincia de Gran Meseta y Cañones Chihuahuenses de la provincia Sierra Madre Occidental, y limita al NE con la provincia de Sierras y Llanuras del Norte (INEGI, 1991).

El área en estudio forma parte de uno de los principales centros volcánicos del Arco Continental Transtensional (ACT). El ACT corresponde a un cambio de movimiento más hacia el oeste al movimiento más al norte de la placa del Pacífico en relación con la meseta del Colorado. En las derivaciones de fallas transtensionales del ACT cada pulso produjo una discordancia divergente, seguida de un pulso magmático (Busby, 2012).

La historia ígnea del occidente de México concuerda con los patrones tectónicos globales que surgen de los estudios de extensión del fondo marino (McDowell y Clabaugh, 1979). Las montañas con bloque de falla y los *graben* llenos de sedimentos de estilo *Basin and Range* son especialmente prominentes en Sonora en el lado occidental de la Sierra y en Chihuahua en el lado oriental (McDowell y Clabaugh, 1979). En el área, hacia el SW está el curvilineamiento Uruachic (véase Fig. 2) y fuera del área está el lineamiento Mocuzari (Ochoa-Landín *et al.*, 2002).

2.4 Modelo conceptual del sistema geotérmico.

A partir del marco geológico del área, se sugiere clasificar el modelo conceptual del sistema geotérmico como de tipo continental *rift* transtensional con estructuras *Basin and Range* generadas por un sistema de fallas normales (Busby, 2012).

Los elementos principales de este tipo de sistema hidrotermal que permiten la circulación continua de calor y fluidos son (Cumming, 2009): una fuente de calor que libera su energía hacia un yacimiento, el cual, está restringido por un conjunto de capas impermeables, evitando que los fluidos alcancen fácilmente la superficie y sólo escapen por fallas y fracturas, formando manifestaciones hidrotermales.

Cabe resaltar que la fuente de calor en este tipo de sistema ocurre de varias formas, una se debe a la presencia de una cámara magmática enfriándose todavía en un estado fluido o en estado de solidificación; otra corresponde a la presencia de rocas volcánicas e intrusivas que muestren flujo de calor alto debido a la liberación de calor por elementos radiactivos (Glassley, 2015).

CAPÍTULO TRES. MARCO TEÓRICO.

3.1 Sistema de Información Geográfica.

Definición.

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) es una herramienta analítica en el estudio del comportamiento espacial de los fenómenos naturales y socioeconómicos. Funciona como una combinación de cinco elementos: información estadística y temática, métodos analíticos, personal especializado, hardware y software. Todos organizados dentro de un sistema que incluye la captura, el almacenamiento, la manipulación, la gestión, el análisis, el procesamiento, la generación, el modelado y el despliegue de datos que están asociados a una localización en la superficie de la Tierra (Gómez-Delgado *et al.*, 2006).

Descripción histórica del SIG.

Desde un punto de vista comercial y de usuarios, existen cuatro periodos fundamentales sobre el desarrollo histórico del SIG (Coppock y Rhind, 1991).

El primer periodo comienza en la década de los sesenta hasta aproximadamente el año 1975. Este periodo se caracterizó por la producción cartográfica y por la digitalización de la técnica de superposición manual de mapas, considerada la base del actual modelado espacial en los SIG (Coppock y Rhind, 1991). En 1966 el Sistema de Información Geográfica Canadiense (CGIS por sus siglas en inglés) fue el primer SIG considerado como herramienta para la gestión y análisis de información geográfica (Tomlinson, 1984; 1988).

El segundo periodo inicia en el año 1973 hasta principios de los ochenta. Este periodo marca una fase de regularización, experimentación y práctica, alentada por agencias nacionales (Coppock y Rhind, 1991). Además, en esos años se lograron importantes avances en cuanto a la configuración de los sistemas, diseñándose las primeras estructuras topológicas de datos para representar los datos espaciales (Bosque, 1997).

El tercer período empieza en el año de 1982 hasta finales de los ochenta. En este periodo surgen importantes empresas dedicadas a la generación de SIG; asimismo, algunos laboratorios pertenecientes a universidades

desarrollan sus propios paquetes. Además, durante ese tiempo se inician aplicaciones en SIG relacionadas con modelado geográfico (Nappi, 1990).

El cuarto periodo inicia aproximadamente en el año 1991. En ese año se desarrollaron los análisis de decisión en el SIG (Nappi, 1990); así como, un importante número de publicaciones relacionadas con la integración de técnicas como las de evaluación multicriterio con los SIG (Gómez-Delgado *et al.*, 2006).

En el presente siglo, el desarrollo exponencial de aplicaciones SIG en internet, hacen de este periodo una etapa caracterizada por la difusión y bajos costos de la información geográfica. Por otra parte, el análisis de información geográfica es hoy un instrumento indispensable para la toma de decisiones en diferentes ámbitos, como la gestión de recursos naturales (Gómez-Delgado *et al.*, 2006).

La información geográfica es lo más importante del SIG, por tanto, en el siguiente apartado se hará una descripción de sus elementos principales.

Elementos de la información geográfica.

Datos e información.

Los datos son observaciones y/o descripciones de un hecho, fenómeno, lugar, etcétera. La información son los datos útiles o necesarios que se pueden utilizar para responder a preguntas propuestas y llegar al objetivo que se está planteando. Los datos espaciales tienen una referencia geográfica, la cual, permite conocer, identificar y localizar elementos de manera espacial. Se representan como objetos espaciales en una capa y contienen información acerca de sus rasgos como: posición; relaciones topológicas y características temáticas.

La posición indica cual es la localización absoluta (X, Y) en el espacio de los objetos. Implícitamente, indica también su dimensión y su forma. De este modo cada tipo de objeto tiene en función de su número de dimensiones, una serie de propiedades espaciales de tamaño y forma, directamente extraíbles de su codificación espacial, esta codificación actúa como un identificador. La topología es la manera en la cual los objetos espaciales están vinculados a través de sus propiedades espaciales (Burrough y McDonnell, 1998). Dicho vínculo, establece una serie de relaciones topológicas entre los objetos espaciales de una capa. Las relaciones topológicas son conceptos que surgen de la interacción entre el espacio y los eventos que en él ocurren, en otras palabras, son la forma en que se hace interactuar la información. A partir del tipo de

concepto en el que se base, existen nueve tipos de relaciones: proximidad (se basa en el concepto de distancia), orientación (dirección), exposición (barrera u obstáculo), adyacencia (contacto), inclusión (inserción), coincidencia (coexistencia), conectividad (conexión y flujo), agregación (dependencia) y asociación (independencia). Estas relaciones se organizan con base en la mayor o menor dominancia de las propiedades del espacio o de los eventos. Las propiedades del espacio se refieren a la forma o estructura, en cambio, las propiedades de los eventos aluden a la organización o comportamiento.

Los atributos son las características temáticas de los datos espaciales. Los atributos son información descriptiva de datos no geográficos, es decir, cualquier variable no geográfica que esté asociada, por ejemplo, fecha de medición de las variables, tamaño, forma, propiedades físicas y químicas, variable cuantitativa que identifica cada objeto dentro de un conjunto de objetos del mismo tipo, etcétera. Entonces, la información geográfica se obtiene de datos espaciales y atributos significativos y pertinentes para la realización del SIG.

Los datos espaciales contenidos en un SIG pueden concebirse como un conjunto de mapas de una porción específica de la superficie, cada uno de los cuales representa una variable temática, la cual adopta un valor en cada punto del terreno como una función, por ejemplo, tipo de suelo, red vial, precipitación, elevación, etcétera. La variable temática está compuesta principalmente por su localización, descripción y comportamiento. El comportamiento se refiere a cómo están medidas las variables y cómo se relacionan con las otras variables. El comportamiento es diferente para una misma variable, por tanto, se busca una manera de que las capas sean compatibles. Determinar la condición en la que se encuentra la información geográfica permite conocer dónde sucede un evento o algún fenómeno en particular, y qué sucede en él, porque se analizan los elementos del área en estudio y se identifican aquellos con características definidas. Una vez que la variable temática ha sido introducida en el SIG, recibe el nombre de capa temática (Gómez-Delgado *et al.*, 2006). Las capas temáticas son una colección de niveles temáticos que pueden relacionarse por geografía, es decir, son conformes y se pueden operar entre ellas. Cada grupo definido es operado por una función que recibe y/o transmite información. Esta función está asociada al comportamiento de la información.

La información geográfica es una representación abstracta de la realidad. Esta abstracción significa seleccionar elementos del mundo real para hacer una representación selectiva de lo que nos interesa y transmitirlo a una computadora. En relación con la representación de los hechos del mundo real en los SIG, la escala desempeña un rol fundamental en la selección de los objetos espaciales, ya que elementos espaciales de la realidad que en una escala pueden representarse por áreas o líneas, en una escala menos

detallada, pueden representarse por un punto (Gómez-Delgado *et al.*, 2006). La escala es la relación entre el tamaño del objeto que está representado y el tamaño que existe en la realidad. Indica cual es el tamaño mínimo del objeto que se puede distinguir en la realidad, por ejemplo, una escala 1 a 250000, significa que, en un mapa lo que mide un metro, en la realidad mide 250000 veces el metro.

La información geográfica tiene un sistema de referencia. Un sistema de referencia representa la información que se tiene en la superficie de la Tierra en una superficie plana. Esta representación se hace a través de una proyección. Una proyección es la transformación de coordenadas esféricas a coordenadas planas. Para esta transformación, la forma de la Tierra se representa como una esfera o círculo achatada por los polos (elipsoide) y un conjunto de puntos de referencia en la superficie terrestre (datum). El datum incluye el tamaño, alargamiento e inclinación del elipsoide que se utilizó para la proyección. La información debe tener el mismo sistema de referencia, ya que, de lo contrario, trabajar en diferentes sistemas ocasionaría errores con respecto a la posición de los objetos, porque depende de cómo se fije el elipsoide con respecto a la Tierra.

Al concebir la estructura de los SIG como una representación de la realidad, surge el concepto de modelo, en este caso circunscrito al modelo de datos espaciales (Gómez-Delgado *et al.*, 2006). A través de él, la información del mundo real puede ser representada en un SIG, en la cual cada capa constituye un tema específico, representado por ciertos objetos espaciales que lo definen, tales como, puntos, líneas, áreas y celdas (píxeles).

Modelo de datos espaciales para representar la información geográfica.

A partir de la concepción que se tenga de la información, existen dos formas o modelos para representar digitalmente en un SIG el componente espacial de los datos espaciales, ráster y vectorial.

Modelo ráster.

En el modelo ráster el espacio está representado por un conjunto de unidades espaciales llamadas celdas o píxeles. Las celdas son unidades adyacentes y homogéneas de información espacial. Cada celda tiene un valor o código asignado con base al tipo de información temática que representa.

Por todo esto, el modelo ráster se basa en el concepto de número y trabaja la componente temática con operaciones del álgebra de mapas, es decir, relaciones lógicas booleanas y aritméticas, proporcionando

posibilidades de clasificación multivariante, generación de histogramas, operaciones estadísticas univariantes y multivariantes como correlaciones o bien medidas de autocorrelación, operaciones de vecindad inmediata e interpolaciones (Gómez-Delgado *et al.*, 2006).

Las celdas establecen su localización por un sistema de referenciación en filas y columnas, este arreglo forma una rejilla o retícula de píxeles que, en el caso de una capa de información, tiene una rejilla que es del mismo tamaño para la misma área. De esta manera, en una capa en modelo ráster un elemento puntual, como un pozo se representa por una celda, uno lineal, como una carretera, se representa por una secuencia de celdas alineadas, un elemento poligonal, como una unidad litológica, se representa por una agrupación de celdas adyacentes.

Una desventaja de este modelo, en función de la utilidad que se le pretenda dar en el SIG, es que la idea de un espacio representado por un conjunto de celdas adyacentes sin relaciones establecidas genera que este espacio sea incompatible con la presencia de puntos o líneas *per se* (Cebrián, 1994), lo que puede dificultar ciertas operaciones con estos objetos espaciales (Gómez-Delgado *et al.*, 2006).

Otra desventaja es respecto al tamaño de los archivos, porque aumenta progresivamente el número de celdas a medida que aumenta la resolución espacial de la capa. Existe información para cada una de las celdas, por tanto, el tamaño de los archivos es mucho más grande que en el modelo vectorial.

Modelo vectorial.

En el modelo vectorial la información del mundo real es representada por los puntos y líneas que definen sus límites o fronteras. Se establece un sistema de coordenadas para localizar cada objeto espacial, donde, dichas líneas se representan por un conjunto de coordenadas correspondientes a sus vértices, mientras que los puntos se representan por una coordenada (X, Y). Por tanto, los datos espaciales los expresa como un vector con localización y forma, manteniendo las características geométricas de las figuras.

Este modelo se centra en la precisión de la localización de los elementos geográficos sobre el espacio y donde los fenómenos a representar son de límites definidos. El SIG vectorial funciona en algunos casos con dos sistemas de bases de datos diferentes, una que almacena la información espacial en un sistema de ficheros que contienen la representación topológica de los objetos espaciales; otra relacional para la parte temática, la cual estructura la información geográfica como una matriz, en la que cada columna representa

los atributos asociados a cada objeto espacial y cada elemento de la fila corresponde a un objeto espacial referido por un identificador (Gómez-Delgado *et al.*, 2006).

Estos dos sistemas de bases de datos son integrados en uno solo a través del modelo de datos híbrido o georrelacional, este modelo establece una serie de relaciones entre cada objeto espacial y sus atributos temáticos por medio de un identificador común en ambas partes de la base de datos. De esta manera, cada una de las geometrías en el modelo vectorial está vinculada a una fila en una base de datos que describe sus atributos. Entonces, la representación espacial de la información está asociada a otra base de datos que contiene la información temática, lo que permite asignar una serie de atributos temáticos a los objetos espaciales, dando pie a posteriores operaciones y análisis en cada uno de los componentes de los datos (espacial o temático), o lo que es más importante, en ambos dentro de un mismo análisis.

Una ventaja de este modelo en función de la utilidad que se le pretenda dar en el SIG, es que concibe el espacio de modo continuo, cumpliendo los postulados de la geometría euclídea (Cebrián, 1994), de tal manera que, la representación de los hechos espaciales del mundo se realiza de manera más realista que en el modelo ráster, debido a que los objetos espaciales se representan de manera explícita (Gómez-Delgado *et al.*, 2006). Otra ventaja es respecto al tamaño de los archivos, éste es mucho más pequeño que en el modelo ráster, porque en el modelo vectorial el espacio está representado como pares de coordenadas o números que aparecen uno tras otro. Una desventaja es que el nivel de precisión está limitado por el número de *bits* usados para representar un valor simple dentro del ordenador, siendo la resolución espacial en este modelo, mucho más fina en comparación al tamaño de celda generalmente utilizado en el modelo ráster (Aronoff, 1989). Tanto en el modelo vectorial como en el modelo ráster existen varias formas de representar digitalmente los objetos espaciales, dichas formas de organización reciben el nombre de estructuras de datos espaciales.

Estructura del modelo de datos espaciales.

Estas estructuras mantienen ciertas similitudes que se relacionan con los aspectos generales del modelo de datos al que pertenecen, ciertas características hacen que unas sean más versátiles, o bien, más económicas en el volumen de información que organizan.

Las principales estructuras de datos que se utilizan en el modelo ráster son: enumeración exhaustiva, codificación por grupos de longitud variable y estructura de árboles cuaternarios. La primera estructura presenta una organización específica de los objetos espaciales; la segunda, supone una reducción importante

en el almacenamiento de los datos respecto a la primera, porque compila cada fila al valor temático que existe y las columnas entre las cuales se produce; por último, en la estructura de árboles cuaternarios se almacena el dato para cada celda o pixel (Gómez-Delgado *et al.*, 2006).

La estructura arco/nodo es la principal estructura de datos espaciales utilizada en el modelo vectorial (Gómez-Delgado *et al.*, 2006). Ésta presenta una organización específica de los objetos espaciales y su topología, ya que, la representación de varios objetos en la figura permite una visión sintética de la topología de los tres tipos de objetos (puntos, líneas, polígonos).

El SIG utiliza el modelo ráster o vectorial o ambos de acuerdo con su funcionalidad para llevar a cabo el ingreso, gestión, análisis y salida de información geográfica.

Funciones del SIG.

Los componentes del SIG cumplen funciones concretas que caracterizan el aspecto funcional de los mismos. Las funciones del SIG se pueden agrupar en cuatro conjuntos: a) ingreso de información, b) administración de la información, c) aplicación de operaciones y métodos analíticos y d) salida de información. Estas funciones se realizan por personal especializado que tiene la capacidad de operar un SIG en dos nociones; primero, conocimiento del campo de estudio particular que utilice los SIG como herramienta; segundo, conocimiento sobre el manejo de los SIG; es decir, saber diseñar, manipular e implementar diferentes capas de información para producir resultados, soluciones, y análisis de la información relevante para la solución del problema a resolver. Este segundo conocimiento sobre el manejo de los SIG involucra el software y hardware. El hardware representa la parte física del SIG. Se utiliza para desarrollar la potencia operativa de los SIG. Llega a ser desde un ordenador personal hasta potentes estaciones de trabajo. El software es el encargado de realizar las operaciones y la manipulación de los datos espaciales.

a) Entrada de información.

El ingreso de información es una etapa fundamental para disponer de una base de datos potente, operativa y versátil, lo que permite posteriormente un adecuado funcionamiento del SIG. Los datos espaciales y sus características temáticas asociadas provienen por lo general de diversas fuentes y en distintos formatos, lo que implica que esta información debe ser homogeneizada y corregida para que pueda ser introducida en el sistema.

La fuente de información es de naturaleza primaria o secundaria. Es primaria cuando uno adquiere datos que aún no han sido recolectados o procesados por nadie más o que se sabe cómo se procesaron. Es información secundaria cuando es previamente generada por otra persona con objetivos diferentes a los que se están buscando; por ejemplo, mapas digitalizados.

Los datos de imágenes de satélite son un ejemplo de fuente primaria, porque, aunque están adquiridos y procesados por otros, uno puede procesarlos y saber cómo se hizo el procedimiento para la obtención de la información. La adquisición de imágenes de satélite se hace a través de técnicas de percepción remota que utiliza la radiación electromagnética que se refleja en la superficie de la Tierra y luego es registrada en los sensores de los satélites como una matriz de datos que puede ser desplegada como una imagen. Las imágenes pueden ser multiespectrales, pancromáticas o híperespectrales y proporcionan información que puede ser cotejada con la respuesta espectral de los materiales de la superficie terrestre, generando mapas que pueden formar parte de un SIG.

Antes de que los datos espaciales puedan ingresarse y luego analizarse en un SIG, deben ser convertidos al formato digital que se requiere. Esta conversión se puede hacer de cinco formas: digitalización, escaneo, conversión de otras fuentes digitales, generación de la información, rasterización y vectorización.

La digitalización es el proceso de convertir datos de mapas analógicos impresos a archivos de computación. Con este proceso se obtiene información digital que, en el caso del escaneo de estos mapas, genera información en formato ráster. Ambos tipos de conversión utilizan el proceso de proyección para relacionar la información del mapa con lo que existe en la realidad.

El proceso de generación de información a partir de otras fuentes digitales significa hacer un proceso para derivar información a partir de fuentes digitales tales como, percepción remota, geografía, un modelo digital de elevaciones o bien mapas con datos geológicos, geofísicos y/o geoquímicos. Finalmente, si la información no está en el formato que se necesita, se hace un proceso de vectorización o rasterización.

En la etapa de ingreso de información se incluyen también los procedimientos de corrección de errores. Los errores que se presentan en los datos son resultado de la variación natural de los objetos originales o son originados durante los procesos, que son generalmente numéricos y pueden realizarse después de la conversión de información. En esta etapa se genera la topología de los datos espaciales y su caracterización o identificación temática, es decir, la introducción de los atributos.

b) Gestión de información.

Esta etapa abarca las operaciones de almacenamiento y recuperación de la información, es decir, los aspectos concernientes a la forma en que se organizan los datos espaciales y temáticos en la base de datos.

La base de datos es una colección de uno o más ficheros de datos o tablas almacenadas de manera estructurada, tal que, las interrelaciones que existan entre diferentes campos o conjuntos de datos puedan ser utilizadas por el Sistema Gestor de Base de Datos (SGBD) para su manipulación y recuperación (Gómez-Delgado *et al.*, 2006).

El SGBD es un conjunto de programas que gestionan los datos en una base de datos. Actúa como el control central de todas las interacciones entre la base de datos y los programas de aplicación, los cuales a su vez interactúan con el usuario (Aronoff, 1989). El SGBD indica dónde y cómo se almacena la información, también, cómo se va a preparar y transformar de acuerdo con las necesidades que se requieran para un proyecto particular de SIG, por ejemplo, cambiar la escala, resolución, proyección, unidades, etcétera., finalmente, cómo se accede, recupera y representan los datos.

La base de datos debe diseñarse de forma lógica y física antes de la introducción de los datos. El aspecto físico concierne a la localización de las diferentes partes de la base de datos en el interior del sistema de ficheros del ordenador. El diseño lógico representa una visión del usuario de las interrelaciones entre los conjuntos de datos almacenados, éste implica el uso de modelos de representación teórica de las relaciones entre los conjuntos de datos, entre ellos el modelo de entidad-relación (Gómez-Delgado *et al.*, 2006).

El modelo de entidad-relación se basa en una serie de conceptos fundamentales que incluyen objetos, atributos y relaciones. Permite describir la información que se va a introducir en la base de datos en términos de colecciones de objetos relacionados entre sí y con unas propiedades determinadas (Gómez-Delgado *et al.*, 2006).

c) Aplicación de operaciones de análisis espacial.

Las operaciones de análisis espacial que se pueden llevar a cabo en un SIG son diversas, pudiéndose realizar independientemente sobre la componente temática o espacial, o bien en procesos que involucren ambas componentes (Goodchild, 1987).

1. Operaciones sobre el aspecto temático.

Las operaciones que requieren acceso únicamente a los atributos de una clase de objetos espaciales son: edición de atributos, cuyo fin es recuperar determinados atributos de un registro para su actualización; corrección y análisis; interrogación de atributos; recuperación por especificación simbólica; recuperación por especificación numérica o lógica, ésta se puede establecer ejecutando secuencias de operaciones encadenadas lógicamente, lo que provee un aumento considerable de la potencia de este conjunto de operaciones; análisis estadístico de atributos; finalmente, filtrado de datos.

2. Operaciones sobre el aspecto espacial.

Las operaciones que se realizan sobre el aspecto espacial de los datos tienen que ver con la manera en que se tiene que trabajar la información, aquí el usuario define la información y cómo la utilizará, es decir, el análisis a realizar depende del tipo de modelo de información que se tenga, vectorial o ráster.

En la Tabla 1 se muestran las operaciones espaciales en el SIG vectorial (Gómez-Delgado *et al.*, 2006). Para capas en modelo ráster, por lo general, se desarrollan la mayor parte de las operaciones del modelo vectorial, aunque en ocasiones se debe seguir una secuencia de comandos u órdenes.

Tabla 1. Operaciones espaciales en el SIG vectorial (Gómez-Delgado *et al.*, 2006).

Operaciones sobre el aspecto espacial de las capas	Para capas de puntos	Medidas de centralidad y dispersión de puntos en un área.
		Análisis del vecino más próximo.
		Interpolación espacial.
		Análisis de patrones espaciales.
		Análisis de autocorrelación espacial.
	Modelos de autoregresión espacial.	
	Para capas de líneas	Descripción de líneas
		Medidas de cohesión de una red
		Determinación de distancias y recorridos en una red.
Medidas de accesibilidad topológica.		
Para capas de polígonos	Análisis de proximidad y accesibilidad.	
	Medidas de la forma de un polígono.	
	Análisis de contigüidad.	
		Análisis de autocorrelación espacial.
		Comparación de capas.

3. Operaciones sobre ambos componentes.

Este tipo de operaciones integra las componentes espacial y temática de los datos en un mismo proceso. Las operaciones principales que realizan los SIG en este conjunto son: recuperación de objetos espaciales y sus atributos, identificación y clasificación de elementos, mediciones espaciales, vecindad, conectividad y superposición (esta última puede incluir operaciones algebraicas y lógicas).

La primera operación se aplica para manipular y modificar la información temática de cada objeto espacial. La recuperación se realiza bajo algún tipo de búsqueda selectiva temática o espacial indiferentemente, por ejemplo, recuperación mediante especificación simbólica o nominal y recuperación mediante condición aritmética y/o lógica (Gómez-Delgado *et al.*, 2006). En ambos ejemplos, es posible realizar búsquedas de objetos espaciales a través de los valores que tengan asignados en determinadas columnas, bien especificando el atributo, bien estableciendo relaciones de lógica booleana, es decir, se pueden plantear las siguientes relaciones de búsqueda: mayor que, menor que, igual que, etcétera., o bien integradas con los operadores lógicos “Y” y “O”.

La identificación y clasificación de elementos consiste en la asignación de los objetos espaciales a una categoría preestablecida, pudiéndose generar así un nuevo atributo o capa que defina los nuevos objetos espaciales en una clase específica.

Para la tercera operación, se tiene que las funciones de mediciones espaciales que proveen un SIG se pueden resumir en las siguientes categorías (Aronoff, 1989), para el modelo vectorial son: distancia entre puntos, longitud de líneas, perímetros y áreas de polígonos. Para el modelo ráster las operaciones son: distancias euclidianas, análisis de proximidad, mediciones espaciales como áreas, perímetros y formas.

Las operaciones de vecindad consisten en evaluar las características de los objetos de uno o varios vecinos. Esto se realiza especificando un tipo de objeto espacial con un atributo conocido, entonces, se determinan cuántos y qué objetos de esa (o de otra) capa se encuentran en su interior o colindan (caso de polígonos), se interceptan (líneas) o coinciden (puntos). También, es posible realizar búsquedas definiendo distancias alrededor de los objetos definidos, por ejemplo, determinar las zonas de alteración mineral (polígonos) localizados a menos de 200 m de fallas geológicas (líneas) (Gómez-Delgado *et al.*, 2006).

Las funciones de conectividad consisten en la distinción de fenómenos por operaciones de conectividad y basan sus procedimientos acumulando valores referentes a los objetos de la capa en que se ejecutan. Las

funciones de conectividad se dividen en ocho categorías (Gómez-Delgado *et al.*, 2006): medidas de contigüidad, proximidad, redes, propagación, búsqueda, inter-visibilidad, iluminación y perspectiva de visión.

En la función de superposición de polígonos se distinguen dos aspectos (Bosque, 1997): superposición espacial de los objetos y resultado temático producto de la intersección. En el caso de superposición de dos o más capas de polígonos, el resultado será una nueva capa de polígonos con sus atributos relacionados procedentes de los originales, estos atributos pueden ser también el resultado de operaciones aritméticas entre los atributos originales, tales como suma, multiplicación o bien ser el resultado de una reclasificación previa.

De esta serie de posibles operaciones, las de superposición son de fundamental importancia desde el punto de vista del modelado espacial, ya que, aunadas a las posibilidades de la superposición topológica de los objetos espaciales, se pueden realizar en el mismo proceso operaciones sobre los atributos temáticos de los objetos espaciales. Es en este tipo de procesos donde se pueden generar nuevos datos a partir de los originales, siendo estos susceptibles de ser integrados en procesos más largos o que incluyan varios conjuntos de operaciones sobre las capas, da inicio al análisis y modelado espacial (Gómez-Delgado *et al.*, 2006), de ambos se hablará más adelante.

d) Salida de información.

En un SIG existen diversas formas de hacer una representación cartográfica de la información como salidas del sistema, éstas dependen de los requerimientos del usuario, las más frecuentes son: mapas analógicos, tablas de valores, gráficos, etcétera. Con estas salidas es posible representar la información contenida en la base de datos, o bien mostrar el resultado de determinadas aplicaciones. La presentación puede obtenerse en formato analógico o presentar los resultados de un proyecto SIG en formato digital (Gómez-Delgado *et al.*, 2006). Los mapas analógicos son eficientes para almacenar y comunicar información geográfica, no obstante, la salida no necesariamente es un mapa. El SIG puede entregar sus resultados en un programa de internet que está interactuando con otras interfases, por ejemplo, mostrar los resultados como tablas, representaciones gráficas, mapas o una combinación de una o varias de ellas.

CAPÍTULO CUATRO. METODOLOGÍA.

4.1 Modelado espacial.

Cada una de las formas en que se utiliza el SIG es especial, pero el análisis de la información es la parte más importante, porque aquí radica todo su potencial operativo.

El análisis espacial es un conjunto de técnicas que requiere el acceso a los componentes del dato espacial, localización y atributos de los objetos, porque los resultados de este análisis son dependientes de la localización de los objetos o eventos analizados (Goodchild, 1987). Su objetivo es proporcionar conocimiento sobre las partes de un problema para luego integrar una solución al mismo. Que el análisis espacial sea simple o complejo depende del modelo de análisis que se elija.

El modelo de análisis es la parte central del SIG. Indica qué análisis realizar y cómo hacerlo. A partir del tipo de análisis que se realiza con la información geográfica, el modelo de análisis se clasifica en tres tipos: estadístico-probabilístico, lógico y matemático.

El modelo matemático se divide en dos tipos, discreto y continuo. El primero utiliza operaciones aritméticas multicriterio para obtener un resultado en particular, por ejemplo, la aptitud del terreno; por otra parte, el modelo continuo se realiza por medio de una interpolación.

A partir de los operadores lógicos que se apliquen para cumplir cierta condición, el modelo lógico puede ser booleano o difuso. El modelo booleano emplea el operador “Y” y “O”, en cambio, el modelo de lógica difusa además de “Y” y “O”, existe la variabilidad de porcentajes.

Finalmente, a partir del conocimiento de una región con estadística se puede hacer una probabilidad de ocurrencia (Bonham-Carter, 1994). Las características analíticas del aspecto temático del SIG resaltan cuando se realiza modelado espacial, en el cual se establece una importante necesidad de análisis de las variables temáticas.

El modelado espacial hace referencia a generar nuevos datos por medio de un proceso establecido a partir de tres partes; primero, datos espaciales existentes en la base de datos; segundo, modelos que describan en cierta forma el proceder del mundo real bajo determinadas condiciones; tercero, operaciones de los SIG. De este proceso se obtienen resultados o soluciones acerca de problemas espaciales complejos (Gómez-Delgado

et al., 2006). El modelado espacial se aplica para obtener nueva información a partir del análisis de la información original. Su objetivo es buscar soluciones a determinados problemas de carácter espacial, por ello, emplea un modelo de integración de información espacial junto con la serie de funciones que puede desarrollar un SIG. En un SIG los modelos de integración de información pueden ser utilizados de dos formas, 1) modelos relacionados con álgebra de mapas y 2) modelos que se centran en la importancia relativa y absoluta de las variables que definen los mapas (Bonham-Carter, 1994). A partir del tipo de enfoque que se utilice para saber cómo se integra la información, la segunda forma se divide en dos subtipos de modelos, uno se basa en la experiencia y conocimiento de los expertos, y el otro se basa en las soluciones existentes y los pesos que tienen los valores de los datos en el resultado de la integración de estos (Bonham-Carter, 1994). El modelo basado en datos utiliza como evidencia las asociaciones entre parámetros y las ocurrencias conocidas. Se aplica cuando hay suficientes datos disponibles o se ha hecho la exploración suficiente para estimar la importancia relativa de la evidencia por medios estadísticos (Bonham-Carter *et al.*, 1988). Las operaciones están controladas por reglas de decisión desarrolladas con base en el análisis empírico de los datos. Los mapas de entrada se combinan para tomar una decisión a partir de modelos tales como, regresión logística, pesos de evidencia o análisis de redes neuronales (Bonham-Carter, 1994; Prol-Ledesma, 2000). El modelo basado en conocimiento recurre a la experiencia de un experto para saber cómo se integra la evidencia, es decir, plantea la regla de decisión (Bonham-Carter, 1994). Utiliza el conocimiento descrito en modelos de exploración de recursos naturales para la cuantificación de la favorabilidad de estos, sean recursos minerales (Harris, 1984; Cox y Singer, 1986) o geotérmicos (Prol-Ledesma, 2000; Sadeghi y Khalajmasoumi, 2015). El proceso emplea la modelación de criterios y el método de evaluación multicriterio para tomar una decisión.

Métodos de evaluación multicriterio.

Los métodos de evaluación multicriterio (MEMC) incluyen procedimientos que permiten integrar de manera simultánea y coherente la evidencia sobre la cual se basa una decisión (Eastman *et al.*, 1995). Su objetivo es ayudar al centro que toma las decisiones a ordenar sus ideas, expresando juicios consistentes y eligiendo racionalmente con base en conceptos y aproximaciones (Gómez-Delgado *et al.*, 2006).

Los MEMC en un entorno SIG se implementan metodológicamente a partir de la construcción de un modelo de solución en tres etapas (Gómez-Delgado *et al.*, 2006); primero, modelo conceptual para plantear el problema; segundo, modelo lógico para generar soluciones al problema; tercero, modelo físico para evaluar las soluciones. Estas etapas, normalmente deben ser ejecutadas de forma cíclica o iterativa, hasta alcanzar la solución del problema.

Los MEMC fundamentan su funcionamiento en la evaluación de una serie de alternativas sobre la base de una serie de criterios. Las alternativas son objetos o unidades espaciales (polígonos, líneas o celdas) susceptibles de ser evaluadas, jerarquizadas u ordenadas. Cada alternativa está definida por los distintos criterios que intervienen y se hayan considerado pertinentes para dicha evaluación. Los criterios se componen de factores y condiciones. Las condiciones son las características que la solución final puede poseer. Los factores determinan qué tan importante es el criterio con base en las alternativas que intervienen en la evaluación y le asigna un peso de acuerdo con su nivel de importancia. El método de comparación por pares de Saaty se encuentra dentro del conjunto de métodos de asignación de pesos basados en el cálculo del *eigenvector* de una matriz de comparaciones binarias de los factores (Saaty, 1977).

Los factores son aspectos que fortalecen o debilitan los criterios a través del manejo de sus atributos dentro de determinadas reglas de decisión y valoración. La regla de decisión es el procedimiento a través del cual se obtiene una evaluación particular. Permite integrar los criterios establecidos en un índice de simple composición, así mismo, puede proporcionar la manera de comparar las alternativas utilizando dicho índice (Eastman *et al.*, 1995). La regla de decisión se estructura a partir de los objetivos propuestos en función de la evaluación que se pretende realizar. Es responsabilidad del centro tomador de decisiones la asignación correcta de valores cuantitativos o ponderación a las categorías correspondientes a cada criterio según una serie de referencias previas, por lo que esta etapa marca indudablemente el resultado del proceso de evaluación (Gómez-Delgado *et al.*, 2006). A partir del nivel del proceso de demanda cognitiva que requiere del centro tomador de decisiones, así como del método de asignación de puntuaciones de criterios y prioridades establecidas, los métodos de evaluación multicriterio se clasifican en: compensatorios, no compensatorios y difusos (Jankowski, 1995).

Los métodos compensatorios requieren que el centro tomador de decisiones especifique los pesos de los criterios de manera numérica en escala de razón o como funciones de prioridad. Se subdividen en técnicas basadas en la aproximación al punto ideal y técnicas compensatorias aditivas. En los procedimientos aditivos el valor obtenido por cada alternativa es el producto del peso del criterio y las puntuaciones de las clases de cada criterio, siendo la alternativa que obtenga el valor más alto la más adecuada o la mejor para la actividad evaluada. El método de suma lineal ponderada se encuentra en este grupo. Este método consiste en la obtención del nivel de adecuación de cada alternativa, se consigue sumando el resultado de multiplicar el valor de cada criterio por su peso, luego se normaliza dividiendo por la suma de los pesos (véase Ec.1).

$$r_i = \left[\frac{\sum_j^n w_j v_{ij}}{\sum_j^n w_j} \right] \dots \text{Ec., 1}$$

donde r_i representa el nivel de adecuación de la alternativa i , v_{ij} significa el puntaje asignado a la alternativa i en el criterio j , w_j representa el peso del criterio j (Bonham-Carter, 1994).

La suma lineal ponderada es un método sencillo, intuitivo y fácil de implementar. Estas características no se encuentran fácilmente en los métodos de evaluación multicriterio basados en álgebra difusa (por ejemplo, suma lineal ponderada difusa u ordenada), principalmente porque en estos métodos la información es incierta, imprecisa o hay conocimiento incompleto de la realidad (Bonham-Carter, 1994).

Los métodos de evaluación multicriterio difusos se basan en el concepto de conjunto difuso. Éste se refiere a una clase de elementos u objetos sin límites bien definidos entre los objetos que pertenecen a esa clase y los que no. Cada conjunto difuso está especificado mediante una función de pertenencia para cada uno de los valores (Bonham-Carter, 1994). La forma de la función no necesita ser lineal y puede expresarse tanto en forma analítica como en listas o tablas de números y gráficas. El nivel de medición de la variable asignada en la función puede estar representado en escala nominal, ordinal o intervalo (por ejemplo, alto, medio y bajo).

El grado de pertenencia de cualquier elemento a un determinado conjunto se expresa en una escala continua de 1 (altamente favorable de pertenencia) o 0 (no pertenencia completa), entre estos extremos existe un rango de posibles valores de pertenencia difusa (Bonham-Carter, 1994; Gómez-Delgado *et al.*, 2006).

No hay restricciones prácticas en la elección de estos posibles valores, se eligen simplemente para reflejar el grado de pertenencia a un conjunto según un juicio subjetivo sobre la importancia relativa de cada clase, por ejemplo, en un entorno SIG bajo una misma hipótesis, con uno o varios mapas diferentes, cuyas clases están asociadas a uno o varios conjuntos de valores de pertenencia difusa en una tabla de atributos (almacenados en varios campos), los posibles valores no necesitan aumentar o disminuir monótonamente con el número de clases (Bonham-Carter, 1994). Por ello, no solo un mapa puede tener más de una función de pertenencia difusa, sino que varios mapas diferentes pueden tener valores de pertenencia para la misma hipótesis, por ejemplo, si los objetos espaciales (polígonos, píxeles) en un mapa se evalúan de acuerdo con la hipótesis “ubicación favorable para la exploración de recursos geotérmicos”, se pueden asignar funciones de pertenencia difusa a cualquiera de los mapas que se utilicen como evidencia en apoyo de esta hipótesis y los valores de pertenencia se eligen arbitrariamente en función del juicio subjetivo sobre la importancia

relativa de los mapas y sus diversos contenidos, así mismo se pueden emplear operadores difusos como “Y”, “O”, suma y producto algebraico, así como el operador gamma para combinar los valores de pertenencia.

Los operadores difusos “Y” y “O” son equivalentes a la intersección y unión de lógica booleana, respectivamente. La función de pertenencia difusa de cada operador se define por las siguientes ecuaciones como:

$$\mu_{combinación} = MIN(\mu_A, \mu_B, \mu_C, \dots) \dots Ec., 2$$

$$\mu_{combinación} = MAX(\mu_A, \mu_B, \mu_C, \dots) \dots Ec., 3$$

donde μ_A es el valor de pertenencia para el mapa A en una ubicación particular, μ_B es el valor para el mapa B , y así sucesivamente. La estimación que se obtiene de utilizar la primera función es conservadora y con tendencia a producir valores pequeños porque el mapa de salida está controlado por el menor valor de pertenencia difusa que se produce en cada ubicación, entonces, el operador difuso “Y” es apropiado cuando dos o más pruebas para una hipótesis deben estar juntas para que la hipótesis sea verdadera (Bonham-Carter, 1994). En cambio, con la función del operador difuso “O” los valores de pertenencia de salida están controlados por los valores máximos de cualquiera de los mapas de entrada para cualquier ubicación particular, entonces al usar este operador, el valor de pertenencia combinado en una ubicación está limitado sólo por los mapas de evidencia más adecuados (Bonham-Carter, 1994). Finalmente, con estos operadores se asume el mínimo o el máximo riesgo en la toma de decisiones, no permitiendo en ningún caso compensación alguna.

A diferencia de estos dos operadores, el operador suma y producto algebraico, así como el operador gamma, combinan los efectos de dos o más evidencias en un resultado integrado, de modo que cada fuente de datos tenga algún efecto en la salida (Bonham-Carter, 1994).

La función de pertenencia del operador difuso producto algebraico se define por la Ecuación 4 como:

$$\mu_{combination} = \prod_{i=1}^n \mu_i \dots Ec., 4$$

donde μ_i es la función de pertenencia para el i -ésimo mapa, $i = 1, 2, \dots, n$ mapas que se deben combinar. Los valores combinados de pertenencia difusa tienden a ser muy pequeños con este operador, debido al

efecto de multiplicar varios números menores que uno. La salida siempre es menor o igual que el valor más pequeño de pertenencia contribuyente y, por lo tanto, es decreciente (Bonham-Carter, 1994).

El operador difuso suma algebraica es complementario al operador producto algebraico. Su función de pertenencia se define por la Ecuación 5 como:

$$\mu_{combination} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i) \dots \text{Ec.},5$$

El resultado es siempre mayor a (o igual) el valor de pertenencia difusa más grande que contribuye. El efecto es por lo tanto creciente. De este modo, dos pruebas de evidencia que apoyan una hipótesis se refuerzan mutuamente y la evidencia combinada es más favorable que cualquiera de las evidencias tomadas individualmente (Bonham-Carter, 1994).

El operador difuso gamma se define en términos del producto y suma algebraica difusa por la siguiente ecuación:

$$\mu_{combination} = (\text{suma algebraica difusa})^\gamma * (\text{producto algebraico difuso})^{1-\gamma} \dots \text{Ec.},6$$

donde γ es un parámetro elegido en el rango (0,1) (Zimmermann, 1996). La elección juiciosa de γ produce valores de salida que aseguran un compromiso flexible entre las tendencias de “incremento” de la suma algebraica difusa y los efectos “decrecientes” del producto algebraico difuso (Bonham-Carter, 1994).

4.2 Modelo de exploración geotérmica en Maguarichic.

El modelo propuesto busca encontrar áreas en las que exista potencial geotérmico; se basa en la integración lógica de datos espaciales en un modelo de análisis matemático y de lógica difusa; la integración se lleva a cabo con las funciones de un SIG. La Tabla 4 muestra el procedimiento de manipulación de estos datos para generar la información que se ingresa al SIG.

Base de datos.

Los datos espaciales necesarios de estudios (disponibles y de acceso factible a la escala que se está trabajando) geológicos, geoquímicos y geofísicos para generar las capas temáticas del SIG son: a) litología; b) fallas y fracturas; c) manifestaciones hidrotermales; d) flujo de calor, e) depósitos de alteración mineral;

f) temperatura superficial; g) estructuras volcánicas; h) actividad sísmica natural. Las capas se eligen a partir de la evidencia que representan para señalar que existe alta permeabilidad y la presencia de una fuente de calor en profundidad, esto con base en el modelo conceptual del sistema geotérmico considerado. A continuación, se describe cada una de las capas.

a) Litología.

Una capa temática que señale la presencia de riolitas es evidencia importante de que estas rocas actúan como fuente de calor, porque el entorno geológico del área indica que hay grandes depósitos de ignimbrita enterrando riolitas, granitos y pegmatitas con altas concentraciones de uranio (U) y torio (Th) (Ostrooumov, 2012). Estos depósitos aislados durante largos periodos de tiempo estarían liberando calor por el decaimiento radiactivo de isótopos de vida larga (Tarbuck *et al.*, 2005), tal como ocurre en el Sureste de Australia (Hopf, 1991), donde existe un cuerpo granítico enterrado por mucho tiempo con altas abundancias de potasio (K) y otros elementos radiactivos (Glassley, 2015).

El Servicio Geológico Mexicano (SGM) hizo públicos los datos de geología del país a escala 1 a 250000; a partir de su portal en internet se accede a ellos; entonces, se utilizan los datos de litología del SGM para generar esta capa (véase Fig. 3).

b) Fallas y fracturas.

Una capa temática con la distribución de fallas y fracturas es una evidencia importante de que existe alta permeabilidad, porque las fallas y fracturas son rupturas en la corteza a lo largo de las cuales se ha producido un desplazamiento (en el caso de una falla) y, en consecuencia, un espacio por donde pueden circular fluidos geotérmicos (si hay una fuente de calor), así mismo, la circulación profunda de fluidos geotérmicos se ve favorecida por zonas de falla o a lo largo de frentes de rumbo.

Los datos de fallas y fracturas para construir esta capa (véase Fig. 4) se toman del trabajo de Padilla-Sánchez *et al.* (2013); quienes crearon un mapa tectónico de México e hicieron de acceso público su base de datos.

El fluido geotérmico que asciende a lo largo de una falla y/o fractura hacia la superficie probablemente precipitará un polimorfo de sílice, disminuyendo así la permeabilidad y eventualmente sellando la trayectoria del flujo de fluido (Glassley, 2015). Cuando eso sucede, la presión que impulsa el flujo de fluido dará como resultado la formación de un nuevo camino de flujo, con la aparición en la superficie de una

nueva manifestación hidrotermal. Si el sistema de flujo está controlado por ambas estructuras, es probable que la nueva manifestación se desarrolle dentro de una proximidad relativamente cercana al rastro de una falla u otra zona de alta permeabilidad en la superficie del terreno (Glassley, 2015). Estudios hidrológicos en zonas de alta permeabilidad de sistemas fracturados estiman que la distancia más favorable en que exista una alta permeabilidad son los primeros 100 m, después de esta distancia baja considerablemente la posibilidad de encontrar alta permeabilidad (Gustaffson, 1993). Por ello, se considera que la distancia máxima que puede estar afectada por la permeabilidad de la falla son 100 m a cada lado de ésta.

c) Manifestaciones hidrotermales.

En superficie las fallas y fracturas pueden ser visibles o no. Un modo indirecto de encontrar tales estructuras es a partir de las manifestaciones hidrotermales (por ejemplo, manantiales calientes, fumarolas, suelos vaporizantes, etcétera.), porque éstas son evidencia en superficie que sugiere la existencia de un recurso geotérmico extenso en profundidad, por ello, una capa temática con la distribución de manifestaciones es una evidencia importante de que existe permeabilidad ya que las manifestaciones son las salidas principales del sistema (véase Fig. 5); los datos para generar esta capa se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Localización, concentración de sílice en p.p.m. y temperatura calculada de manantiales (T_{SiO_2}) por Proledesma y Juárez (1986) y Tello (1996), cada uno se identifica con el símbolo (*) y (**), respectivamente.

Manantial	Lat. N.	Long. W.	SiO₂	T_{SiO₂}
Piedras de Lumbre*	28° 0'	-108° 10'	170	168.9
Ecurichic*	28° 02'	-108° 07'	146	159.3
Jesús del Monte*	28° 14'	-108° 19'	73.7	120.9
Tututaca*	28° 30'	-108° 10'	78.3	124
Cocomorachic*	28° 43'	-107° 55'	64.4	114.1
Recubichi**	27° 54'	-107° 57'	121	120
Recubichi**	27° 52'	-107° 57'	123	121
Recubichi**	27° 52'	-107° 56'	125	122
Recubichi**	27° 54'	-107° 57'	127	123
Piedras de Lumbre**	27° 53'	-107° 57'	123	121
Piedras de Lumbre**	27° 52'	-107° 57'	123	121
Piedras de Lumbre**	27° 52'	-107° 57'	110	114
Piedras de Lumbre**	27° 54'	-107° 57'	112	116

En el sistema hidrotermal la circulación del agua puede extenderse por muchos kilómetros, permitiendo que el agua caliente interactúe químicamente con las rocas a lo largo del camino del flujo (Glassley, 2015). Cuando estos fluidos emergen en la superficie, forman manantiales de temperaturas variables, dependiendo tanto de la temperatura de la fuente de calor con la que hayan interactuado, como de la distancia desde la fuente de calor y la trayectoria de circulación. El análisis químico de estos manantiales es una parte crítica de un programa de exploración porque proporcionan información valiosa para caracterizar un recurso geotérmico (Glassley, 2015). Por ejemplo, a partir del análisis químico del agua se obtiene la concentración de sílice (SiO_2), ésta se ocupa para estimar la temperatura del reservorio a partir de un geotermómetro (T_{SiO_2}) (Fournier, 1977). Así mismo, conociendo dicha temperatura (T_{SiO_2}) se estima el flujo de calor (Swanberg y Morgan, 1978), por ejemplo, Prol-Ledesma y Juárez (1986) obtuvieron una estimación del flujo de calor con base en la temperatura de sílice (T_{SiO_2}) de 326 manantiales calientes del territorio mexicano.

d) Flujo de calor.

Una capa temática con la distribución de anomalías de flujo de calor posiblemente señale la presencia de una fuente de calor en profundidad, porque valores altos de flujo son indicadores razonables de que se pueden alcanzar temperaturas elevadas a profundidades moderadas, por ejemplo, en regiones de la corteza que exhiban un elevado flujo de calor por concentraciones superiores a la media de materiales radiactivos (Tarbuck *et al.*, 2005).

La interpretación de los valores de flujo de calor y los gradientes geotérmicos requiere el conocimiento del flujo de calor promedio para identificar razonablemente las anomalías térmicas de nivel superficial. En esta ocasión, para la zona en estudio, los datos de Prol-Ledesma y Juárez (1986) están disponibles en una cobertura suficiente que permite la elaboración de mapas detallados de anomalía (véase Fig. 6).

e) Depósitos de alteración mineral.

Una capa temática que indique la presencia de depósitos de alteración mineral asociados a manifestaciones hidrotermales es una evidencia importante de que hay permeabilidad porque los fluidos calientes tienden a disolver los minerales a lo largo de la trayectoria del flujo, aumentando así la permeabilidad. No obstante, a medida que el fluido migra lejos de la fuente de calor y llega a la superficie, el enfriamiento es rápido y la carga disuelta a menudo se precipita, formando depósitos minerales alrededor de las distintas manifestaciones.

El uso de la mineralogía de superficie como medio para emprender esfuerzos de exploración de reconocimiento es una forma rentable de identificar los objetivos de recursos geotérmicos (Glassley, 2015). En relación con esto, la percepción remota tiene la capacidad de inspeccionar grandes áreas con relativa rapidez y detectar a distancia la composición mineralógica de los suelos y las rocas, porque utiliza la interacción de la radiación electromagnética con la composición mineral y su estructura química.

Depósitos de alteración mineral del grupo de los hidroxilos se identificaron a partir del procesamiento digital de una imagen espectral Landsat 8 y se utilizaron para formar esta capa (véase Fig. 7).

f) Temperatura superficial.

Actualmente, existen trabajos de percepción remota que estiman la temperatura superficial a partir de valores de brillo de sensores remotos (Jiménez-Muñoz *et al.*, 2014; Rajeshwari y Mani, 2014), por ejemplo, los datos Landsat 8 adquiridos tanto por el sensor *Operational Land Imager* (OLI) como por el *Thermal Infrared Sensor* (TIRS) se convierten primero a radiancia de la parte superior de la atmósfera (TOA por sus siglas en inglés), luego se convierten tanto a fracción de vegetación como a temperatura de brillo del sensor, respectivamente, y se utilizan en algoritmos de recuperación de temperatura superficial (conocidos en inglés como *Split-Window*) basados en la ecuación de transferencia radiativa (Roy *et al.*, 2014).

Una capa temática con la distribución de anomalías de temperatura superficial asociada con la actividad geotérmica en el área en estudio posiblemente resalte las contribuciones subsuperficiales del calor geotérmico (véase Fig. 8), quizá por una fuente de calor en profundidad. No obstante, se deberá distinguir de falsas anomalías geotérmicas causadas tanto por efectos topográficos como por fuentes de calor generadas por el hombre (industria, quema de vegetación, etcétera.).

La anomalía de temperatura son aquellos valores por encima de la temperatura promedio del sitio. En esta cuestión, cabe mencionar que el área es de clima extremo con temperaturas en un rango desde 5°C hasta 40°C. En el caso de un dominio de temperaturas entre 15°C y 25°C, valores por encima de 35°C serían anómalos.

g) Estructuras volcánicas.

Una capa temática con la distribución de estructuras volcánicas como calderas son una evidencia importante de que existe alta permeabilidad secundaria, porque las calderas son grandes depresiones de colapso por la

pérdida de soporte; el colapso genera fracturas, en consecuencia, permeabilidad secundaria (Prol-Ledesma, 2000).

Una alta densidad de fracturas superficiales sugiere la presencia de permeabilidad secundaria (Gustaffson, 1993), por tanto, generar una región a partir de una distancia de 100 m desde de las fracturas, así como de estructuras volcánicas tales como calderas y domos, es útil en la determinación de permeabilidad secundaria (Prol-Ledesma, 2000). Los datos para generar esta capa también se toman del trabajo de Padilla-Sánchez *et al.* (2013; véase Fig. 9).

h) Actividad sísmica natural.

Una capa temática con la distribución espacial de la ocurrencia de eventos sísmicos es una evidencia importante de permeabilidad porque la fuente natural de tales eventos se deba al movimiento de rocas ocasionado por una falla activa o inducidos por fracturamiento a partir del paso de fluidos geotérmicos (Lúdvík, 2009).

El Servicio Sismológico Nacional (SSN) hace públicos los datos del movimiento del terreno que ocurre en México; a partir de su portal en internet se accede a la localización y magnitud de los sismos (véase Tabla 3); entonces, se utilizan estos datos para generar la capa de actividad sísmica natural (véase Fig. 10).

Tabla 3. Sismos reportados en Chihuahua por el SSN que se encuentran dentro del área en estudio.

Lat. N.	Long. W.	Prof. [km]	Magnitud	Fecha	Localización
28° 29'	107° 40'	10	4.4	22/09/2016	80 km al oeste de Cuahtemoc, Chih.
28° 27'	107° 29'	5	4.1	11/09/2016	61 km al oeste de Cuahtemoc, Chih.
27° 43'	108° 2'	3	3.4	12/06/2015	138 km al suroeste de Cuahtemoc, Chih.
27° 47'	107° 21'	3	3.9	05/06/2015	83 km al suroeste de Cuahtemoc, Chih.
28° 26'	107° 13'	16	3.8	13/11/2014	35 km oeste de Cuahtemoc, Chih.
27° 43'	107° 52'	39	4.1	27/02/2012	124 km al suroeste de Cuahtemoc, Chih.
28° 49'	108° 18'	20	4.3	24/04/2010	45 km al suroeste de Madera, Chih.

Una vez elegidas las capas temáticas de los datos espaciales pertinentes para la realización del SIG, la ecuación que representa el modelo conceptual que indica las zonas con potencial geotérmico debido a la salida de fluidos hidrotermales hacia la superficie a través de zonas de descarga es:

Potencial geotérmico = litología + distancia a fallas y facturas + distancia a manifestaciones + anomalía de flujo de calor + distancia a depósitos minerales + anomalía de temperatura superficial + distancia a estructuras volcánicas + distancia a fuente sísmica natural...Ec.5.

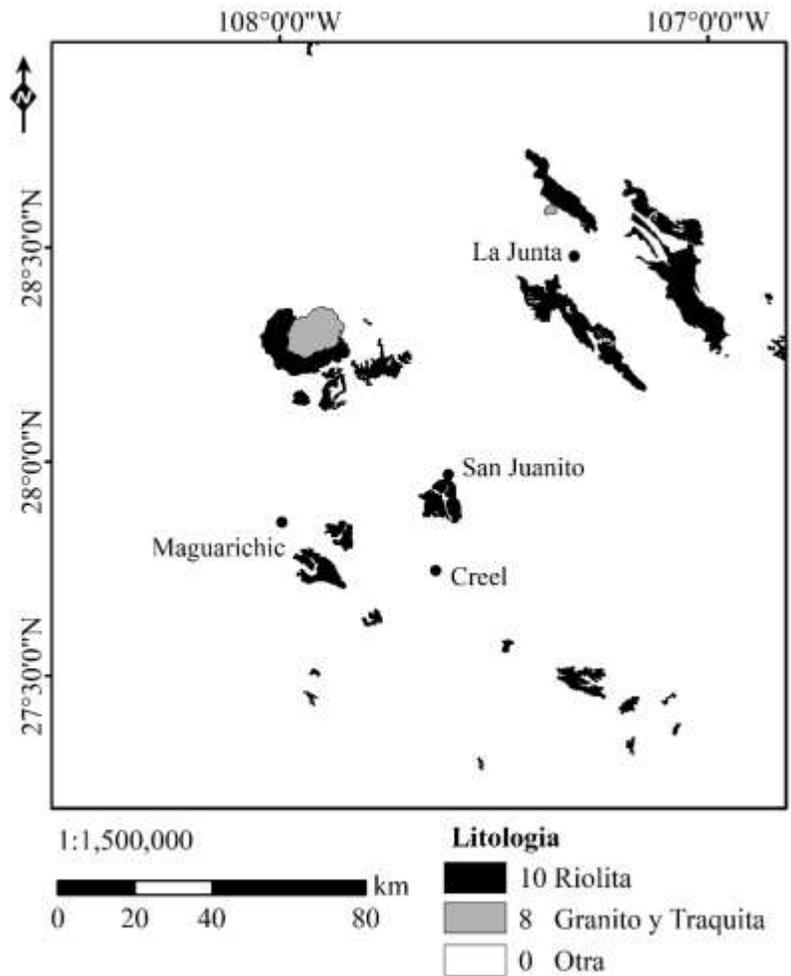


Figura 3. Capa temática de litología.

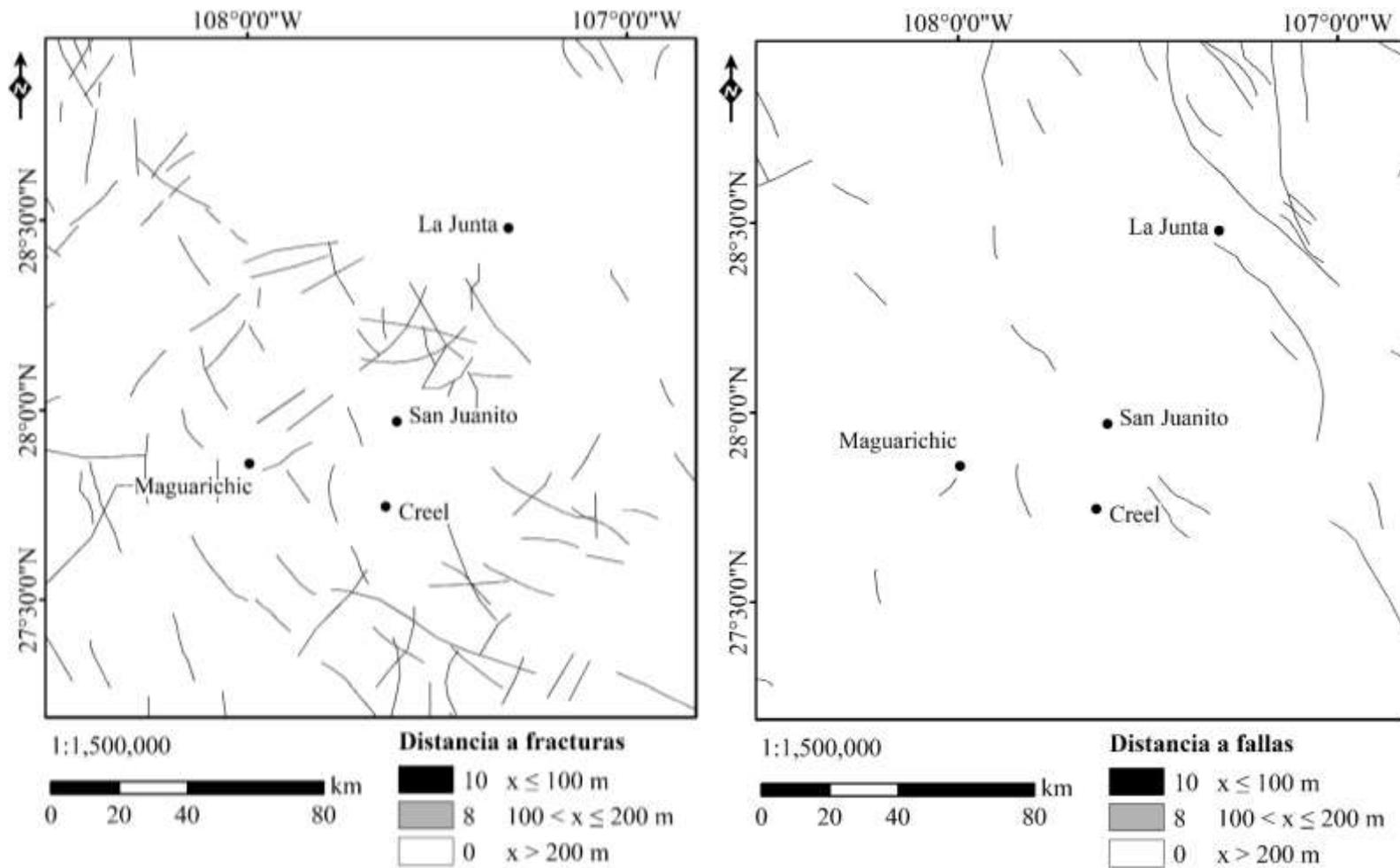


Figura 4. Capa temática de fracturas y fallas (izquierda y derecha, respectivamente).

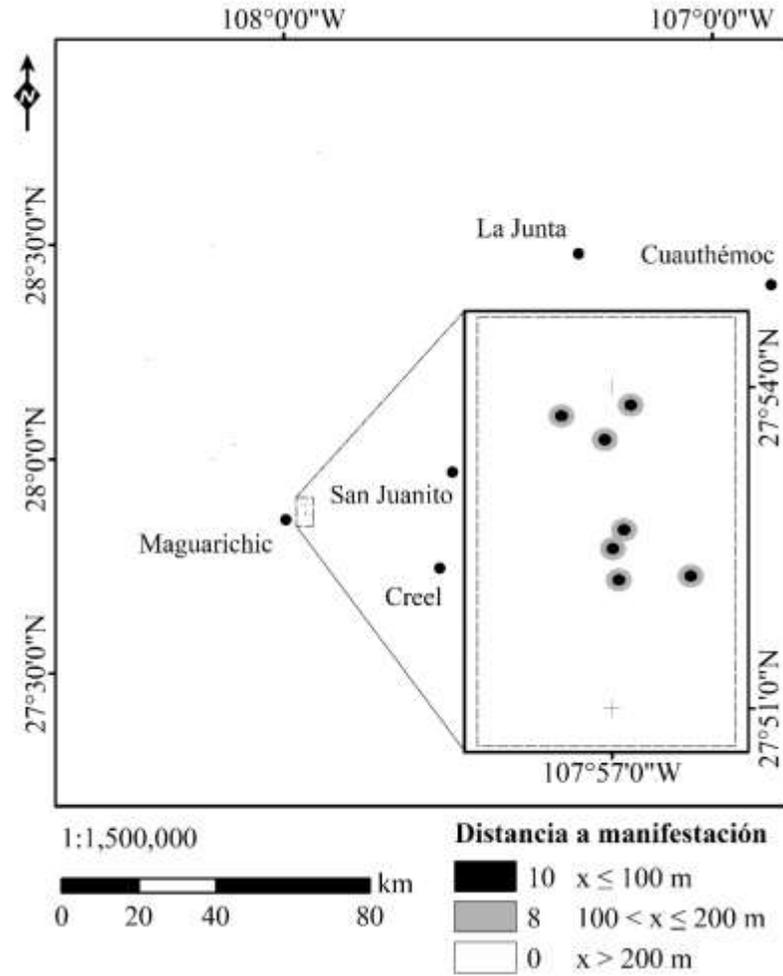


Figura 5. Capa temática de manifestaciones hidrotermales. Se muestra también un acercamiento a las manifestaciones cerca de Maguarichic.

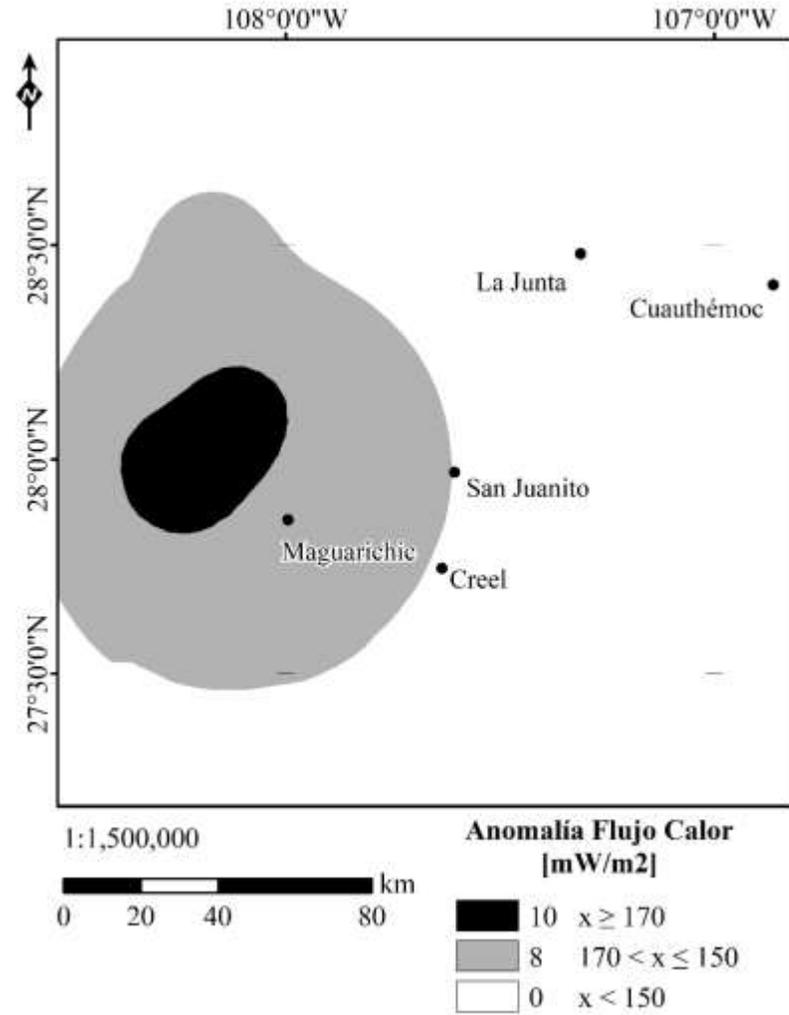


Figura 6. Capa temática de flujo de calor.

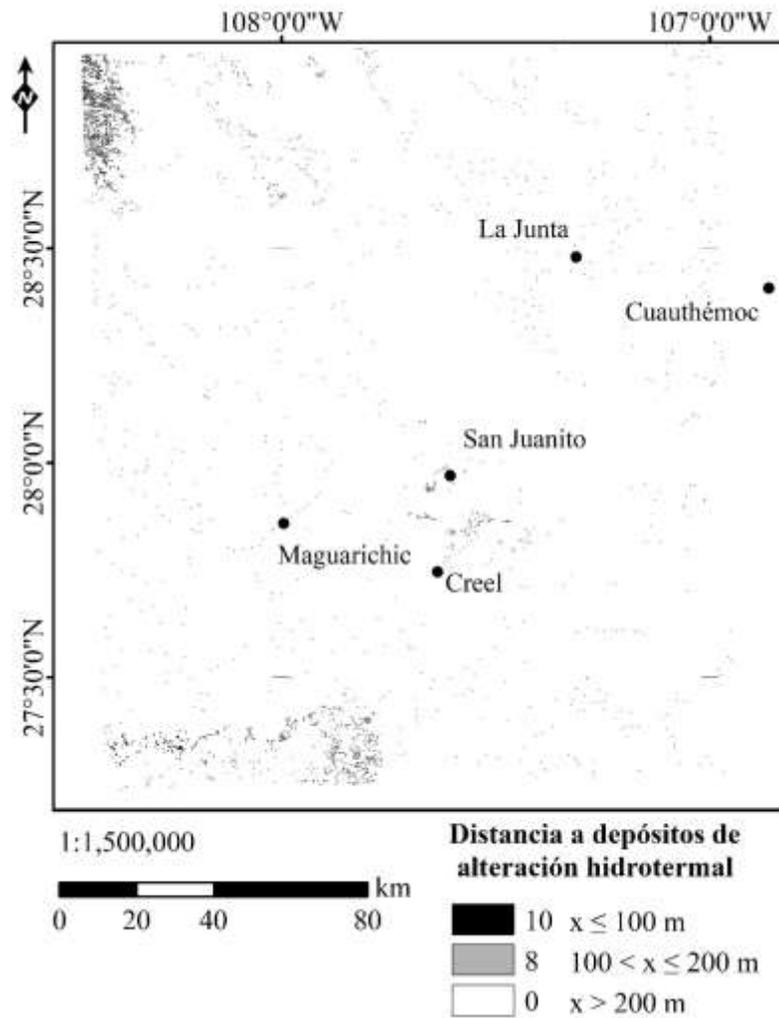


Figura 7. Capa temática de alteración hidrotermal, grupo de los hidroxilos.

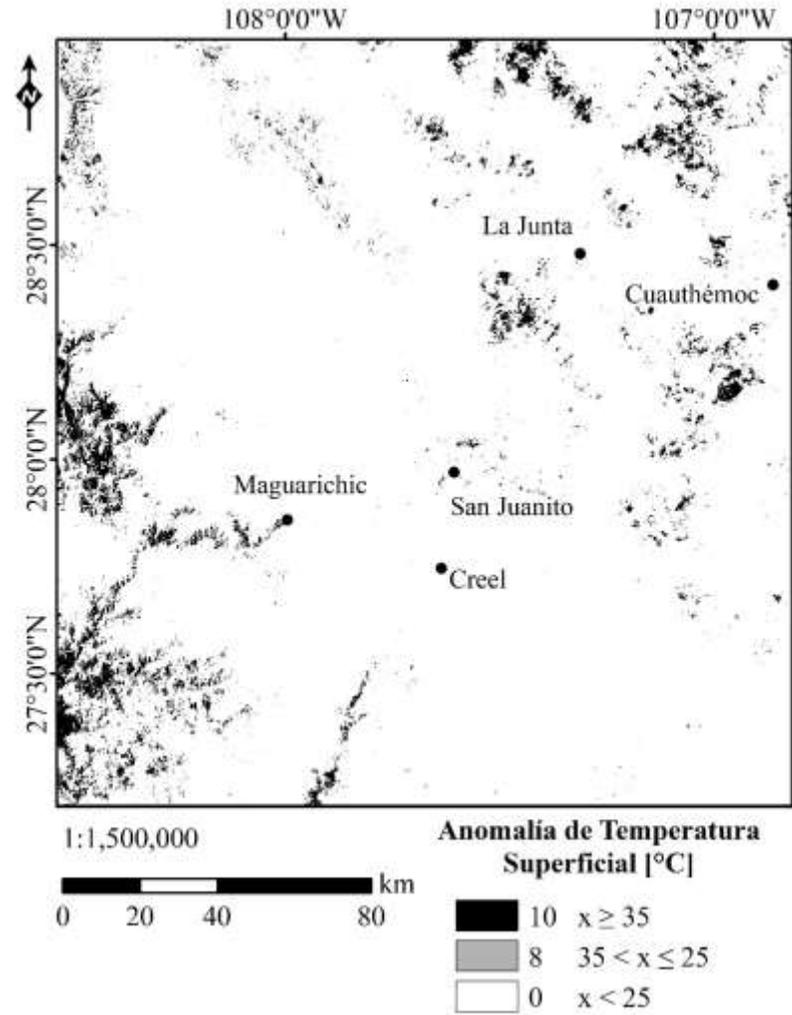


Figura 8. Capa temática de anomalía de temperatura superficial.

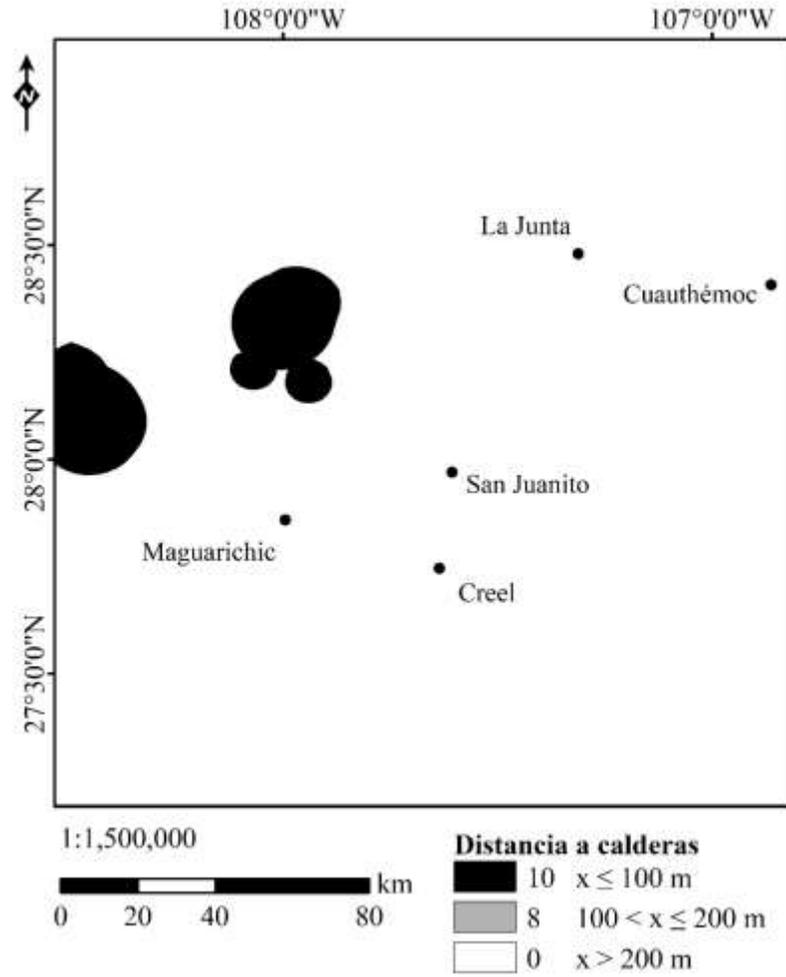


Figura 9. Capa temática de distancia a calderas.

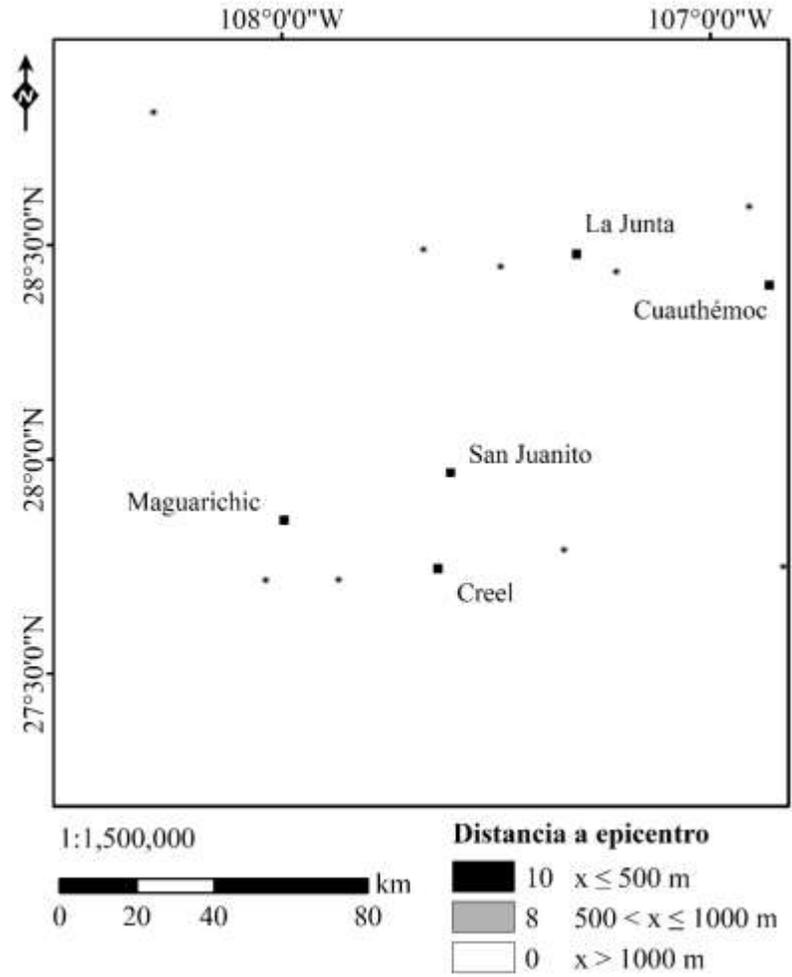


Figura 10. Capa temática de distancia a epicentros.

Tabla 4. Procedimientos realizados a la base de datos para ingresar la información al SIG.

Datos y fuente	Formato y geometría	Método de ingreso	de	Proceso y análisis espacial	Formato, geometría y unidades	Capa de información	de	Formato y unidades
Litología (SGM).	Vectorial y polígonos con atributos clasificados por tipo de roca.	Convertir a partir de fuentes digitales.	a	1-Selección del atributo riolita, traquita y granito. 2-Creación de una capa a partir de la selección anterior. 3-Asignación de puntajes.	Pasos 1 a 3 como vectorial, polígono y entero.	Capa de litología del tipo granito y riolita.	de	Vectorial y entero.
Fallas y fracturas (Padilla-Sánchez et al., 2013).	Vectorial y líneas.	Convertir a partir de otras fuentes digitales.	a	4-Cálculo del área de influencia o buffer a diferentes distancias. 5-Asignación de puntajes al buffer.	Pasos 4 y 5 como vectorial, polígono y entero.	Capa de distancias a partir de fallas y fracturas geológicas.	de	Vectorial y entero.
Manifestaciones hidrotermales (Proledesma y Juárez, 1986; Tello, 1996).	Impreso.	Digitalización y vectorización como puntos con atributos clasificados.		6-Cálculo del buffer a tres diferentes distancias. 7-Asignación de puntajes al buffer.	Pasos 6 y 7 como vectorial, polígono y entero.	Capa de distancias a partir de manifestaciones termales.	de	Vectorial y entero.
Flujo de calor (Proledesma y Juárez, 1986).	Impreso.	Digitalización y vectorización como puntos con atributos clasificados.		8-Interpolación. 9-Reclasificación. 10-Vectorización. 11-Asignación de puntajes.	Pasos 8 y 9 como ráster, Pasos 10 y 11 como vectorial, polígono.	Capa temática de anomalías de flujo de calor.		Vectorial y entero.

Continuación de la Tabla 4. Procedimientos realizados a la base de datos para ingresar la información al SIG.

Datos y fuente	Formato y geometría	Método de ingreso	de	Proceso y análisis espacial	Formato, geometría y unidades	Capa de información	de	Formato y unidades
Depósitos de alteración mineral.	Ráster y píxel.	Convertir a partir de otras fuentes digitales.	a	12-Cálculo del buffer según el modelo lógico. 13-Reclasificación. 14-Vectorización.	Pasos 12 y 13 como ráster, píxel, metros. 14-Vectorial, polígono y entero.	Capa de distancias a partir de alteración mineral	de	Vectorial y entero.
Percepción remota.						grupo de los hidroxilos.		
Temperatura superficial	Ráster y píxel	Convertir a partir de otras fuentes digitales.	a	15-Reclasificación. 16-Vectorización. 17-Asignación de puntajes.	15-Ráster, píxel, entero Pasos 16 y 17 como vectorial, polígono y entero.	Capa temática de anomalías de temperatura superficial.	de	Vectorial y entero.
Percepción remota.								
Estructuras volcánicas (Padilla-Sánchez et al., 2013).	Vectorial y polígonos con atributos clasificados por tipo de estructura.	Convertir a partir de otras fuentes digitales.	a	18-Selección del atributo caldera. 19-Creación de una capa a partir de la selección anterior. 20-Cálculo del buffer. 21-Asignación de puntajes.	Pasos 18 a 21 como vectorial, polígono y entero.	Capa de distancias a partir de calderas volcánicas.	de	Vectorial y entero.
Actividad sísmica natural (SSN).	Impreso.	Digitalización y vectorización como puntos con atributos clasificados.		22-Cálculo del área de influencia según el modelo lógico. 23-Asignación de puntajes al buffer.	Pasos 22 y 23 como vectorial, polígono y entero.	Capa de distancias a partir de ocurrencias de eventos sísmicos.	de	Vectorial y entero.

Aplicación de métodos.

En la presente se utilizan dos métodos de evaluación de criterios ponderados con base en la experiencia y conocimiento de un experto; primero, el método de superposición de índices con múltiples clases se ocupa porque obtiene el nivel de adecuación de cada alternativa y presenta la alternativa más adecuada para la actividad evaluada; segundo, el método suma lineal ponderada difusa se elige porque permite controlar el riesgo y la incertidumbre asociada a cualquier toma de decisiones (Jiang y Eastman, 2000); además, se aprovecha la utilidad de los operadores difusos para combinar conjuntos de datos de exploración (An *et al.*, 1991); en este aspecto, se utiliza el operador difuso gamma porque controla el aumento del operador difuso suma algebraica y el efecto decreciente del operador difuso producto algebraico. Se toma un valor de $\gamma = 0.975$ para combinar los conjuntos de datos geológicos, geoquímicos y geofísicos porque los efectos de los grandes valores de γ parecen reflejar mejor la toma de decisiones subjetiva de geólogos de exploración (Jiang y Eastman, 2000).

El método de suma lineal ponderada se aplica de acuerdo con la Ecuación 1 siguiendo un esquema lógico. Éste incluye tres elementos importantes: a) valores de ponderación asignados a cada capa temática con base en su importancia relativa para determinar la presencia de un reservorio geotérmico, b) criterios sobre la distancia más favorable de que exista permeabilidad, c) puntajes para cada criterio, donde un experto evalúa la importancia relativa de los datos de acuerdo a la relación entre la evidencia y características tales como la permeabilidad, presencia de fluidos geotérmicos y la localización de la fuente de calor, además define los puntajes asignados para las diferentes clases. El esquema lógico de aplicación de este modelo se muestra en la Tabla 5.

El método de suma lineal ponderada difusa se aplica de acuerdo con la Ecuación 6; utiliza la función de pertenencia del operador difuso gamma con valores de pertenencia arbitrarios en cada clase de las capas temáticas (véase Tabla 6). La asignación de pesos se basó en el cálculo del *eigenvector* de una matriz de comparaciones binarias de los factores (Saaty, 1977; véase Tabla 7); donde se compara la importancia de uno sobre cada uno de los demás con base en trabajos previos, análisis de los acontecimientos anteriores en el área de estudio y entrevistas con expertos.

Tabla 5. Modelo lógico del método de suma lineal ponderada, contiene las variables numéricas y sus unidades.

Peso	Capa temática	Criterios			Puntajes		
5	Litología	x = Riolita	x = Granito	x = Otra	10	8	0
7	Fallas	$x \leq 100$ m	$100 < x \leq 200$ m	$x > 200$ m	10	8	0
5	Fracturas	$x \leq 100$ m	$100 < x \leq 200$ m	$x > 200$ m	10	8	0
5	Manifestaciones	$x \leq 100$ m	$100 < x \leq 200$ m	$x > 200$ m	10	8	0
9	Flujo de calor	$x \geq 170$ mW/m ²	$170 < x \leq 150$ mW/m ²	$x < 150$ mW/m ²	10	8	0
3	Depósito mineral	$x \leq 100$ m	$100 < x \leq 200$ m	$x > 200$ m	10	8	0
3	Temperatura superficial	$x \geq 35$ °C	$35 < x \leq 30$ °C	$x < 30$ °C	10	8	0
3	Estructuras volcánicas	$x \leq 100$ m	$100 < x \leq 200$ m	$x > 200$ m	10	8	0
3	Actividad sísmica	$x \leq 500$ m	$500 < x \leq 1000$ m	$x > 1000$ m	10	8	0

Tabla 6. Modelo lógico del método de suma lineal ponderada difusa, contiene las variables numéricas y sus unidades.

Peso	Capa temática	Criterios			Puntajes		
0.08	a. Litología	x = Riolita	x = Granito	x = Otra	0.99	0.71	0.02
0.17	b. Fallas	$x \leq 100$ m	$100 < x \leq 200$ m	$x > 200$ m	0.99	0.71	0.02
0.12	c. Fracturas	$x \leq 100$ m	$100 < x \leq 200$ m	$x > 200$ m	0.99	0.71	0.02
0.13	d. Manifestaciones	$x \leq 100$ m	$100 < x \leq 200$ m	$x > 200$ m	0.99	0.71	0.02
0.29	e. Flujo de calor	$x \geq 170$ mW/m ²	$170 < x \leq 150$ mW/m ²	$x < 150$ mW/m ²	0.99	0.71	0.02
0.08	f. Depósito mineral	$x \leq 100$ m	$100 < x \leq 200$ m	$x > 200$ m	0.99	0.71	0.02
0.04	g. Temperatura superficial	$x \geq 35$ °C	$35 < x \leq 30$ °C	$x < 30$ °C	0.99	0.71	0.02
0.06	h. Estructuras volcánicas	$x \leq 100$ m	$100 < x \leq 200$ m	$x > 200$ m	0.99	0.71	0.02
0.03	i. Actividad sísmica	$x \leq 500$ m	$500 < x \leq 1000$ m	$x > 1000$ m	0.99	0.71	0.02

Se utilizó el software TerrSet para el procesamiento de la imagen multi-espectral Landsat OLI L1T 04/11/2016, 33-40 y 33-41 y generar la información de alteración hidrotermal a partir de percepción remota. Se utilizó TerrSet ya que permite manipular, hacer operaciones y desplegar la matriz de datos de percepción remota eficazmente. Para el análisis espacial, que incluyó la superposición de las capas de información y su visualización en mapas, se utilizó el software ArcMap 10.3 de ArcGIS porque soporta el número de alternativas y criterios utilizados en este modelo.

Tabla 7. Matriz de comparaciones por pares de los ocho criterios del modelo propuesto.

Capas-Criterios										
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	Peso
a	1	1/2	1	1/4	1/2	1/3	3	1/2	3	0.08
b		1	2	2	1/2	3	5	3	3	0.17
c			1	1	1/3	2	4	3	3	0.12
d				1	1/4	2	2	3	4	0.13
e					1	5	4	6	6	0.29
f						1	2	2	3	0.08
g							1	1	2	0.04
h								1	2	0.06
i									1	0.03

CAPÍTULO CINCO. RESULTADOS Y SU ANÁLISIS.

A partir del modelo conceptual de exploración geotérmica en Maguarichic descrito por la Ec. 5 y la superposición de capas temáticas-criterios con valores de ponderación en un SIG (véase Fig. 3 a 10), se obtuvieron dos mapas que señalan las zonas con alta, media y baja favorabilidad de potencial geotérmico en Maguarichic (véase Fig. 11 y Fig. 12).

La Figura 11.a muestra el potencial geotérmico que resultó de aplicar el método suma lineal ponderada. Se observa que el potencial geotérmico es de media y baja favorabilidad, principalmente valores de 1 a 5; estos resultados se obtuvieron porque no se cumplieron los criterios con las clases más altas. De este mapa se realizó un acercamiento a tres áreas para hacer su descripción con mayor detalle, las áreas son las siguientes: Piedras de Lumbre (véase Fig. 11.b), caldera Tomochic (véase Fig. 11.c) y caldera Ocampo (véase Fig. 11.d).

En la Figura 11.b se encuentra una zona con favorabilidad media (valor de 4.8), se localiza a 10 km hacia el SE de la ZGPL, esta zona es interesante por su cercanía a un recurso probado; se podría hacer un estudio a detalle para evaluar su factibilidad para desarrollar un proyecto geotérmico; también, con esta misma favorabilidad pero hacia el norte y oeste de la ZGPL (véase Fig. 11.c y Fig. 11.d, respectivamente), hay una serie de zonas alineadas con orientación NW-SE y NE-SW, estas zonas son interesantes porque las estructuras principales que funcionan como salida del sistema tienen esta misma orientación; además, están en la periferia tanto de la caldera Tomochic como de la caldera Ocampo, lo que sugiere porosidad secundaria, estos resultados son favorables de encontrar sistemas hidrotermales activos.

La Figura 12.a muestra el potencial geotérmico que resultó de aplicar el método suma lineal ponderada difusa. De igual manera, se realizó un acercamiento a las tres áreas antes mencionadas. En la Figura 12.c se observa únicamente una zona con potencial medio y alto y orientación NE-SW, es alto principalmente en la parte final de las fracturas, posiblemente esta zona esté actuando como salida del sistema, tal como se observa en la Figura 11.c; valdría la pena hacer reconocimiento de los sitios con mayor potencial, ya que se encuentran cerca de una carretera lo que facilitaría su acceso, no obstante, éstas están en el límite oeste y dentro del área natural protegida.

Por otra parte, la zona de potencial geotérmico medio al SE de la ZGPL (véase Fig. 12.b) está influenciada por una falla N-S sobre un depósito de riolitas del Terciario y separando los municipios de Maguarichic y Bocoyna; habría que investigar primero en la literatura y luego en campo si las fracturas cercanas que tienen

la misma orientación también presentan evidencias hidrotermales; esto se observa igualmente en la Figura 12.d, donde existe una zona pequeña con alto potencial geotérmico sobre una estructura cerca de la caldera Ocampo.

Nótese que se encontraron áreas similares en ambos modelos (véase Fig. 11 y Fig. 12), esto confirma la precisión de la evaluación propuesta, significa que en ambos métodos concuerdan ciertos criterios de exploración geotérmica.

El modelo que utiliza lógica difusa (véase Fig. 12) muestra resultados más favorables porque combina los efectos de dos o más evidencias en un resultado integrado, de modo que cada fuente de datos tiene algún efecto en la salida. Por otra parte, el modelo de análisis matemático (véase Fig. 11) muestra resultados menos favorables porque siendo la alternativa que obtenga el valor más alto la más adecuada para la actividad evaluada, se asume un riesgo mínimo en la toma de decisiones con base en los resultados del método de suma lineal ponderada, en contraste se asume el máximo riesgo en la toma de decisiones con base en los resultados del método de suma lineal ponderada difusa.

Los dos mapas obtenidos sirven como guía para la exploración del área (véase Fig. 11 y 12). El costo para realizar la exploración geológica en toda el área es alto (véase Anexo 1). Entonces, como una primera etapa, valdría la pena invertir solamente en la exploración de las tres áreas, porque muestran las zonas con mayor favorabilidad de encontrar recursos geotérmicos, y no en toda su extensión, donde hay sitios con poco potencial; de este modo se simplifica el área y en consecuencia el costo de exploración (véase Anexo 1).

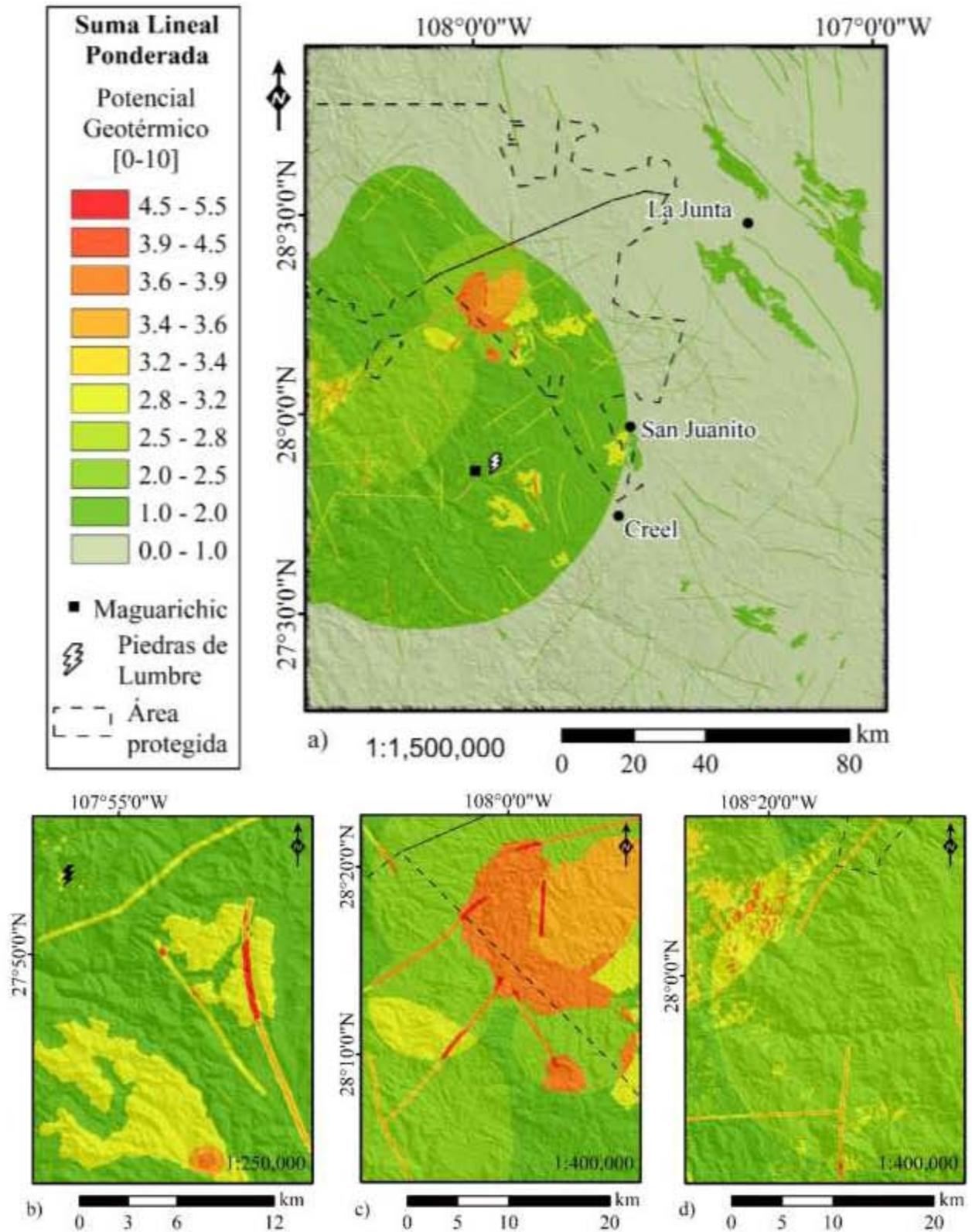


Figura 11. a) Es el potencial geotérmico calculado a partir del método de suma lineal ponderada del área en estudio. La figura b) es el acercamiento a la ZGPL, así como c) a la caldera Tomochic y d) a la caldera Ocampo

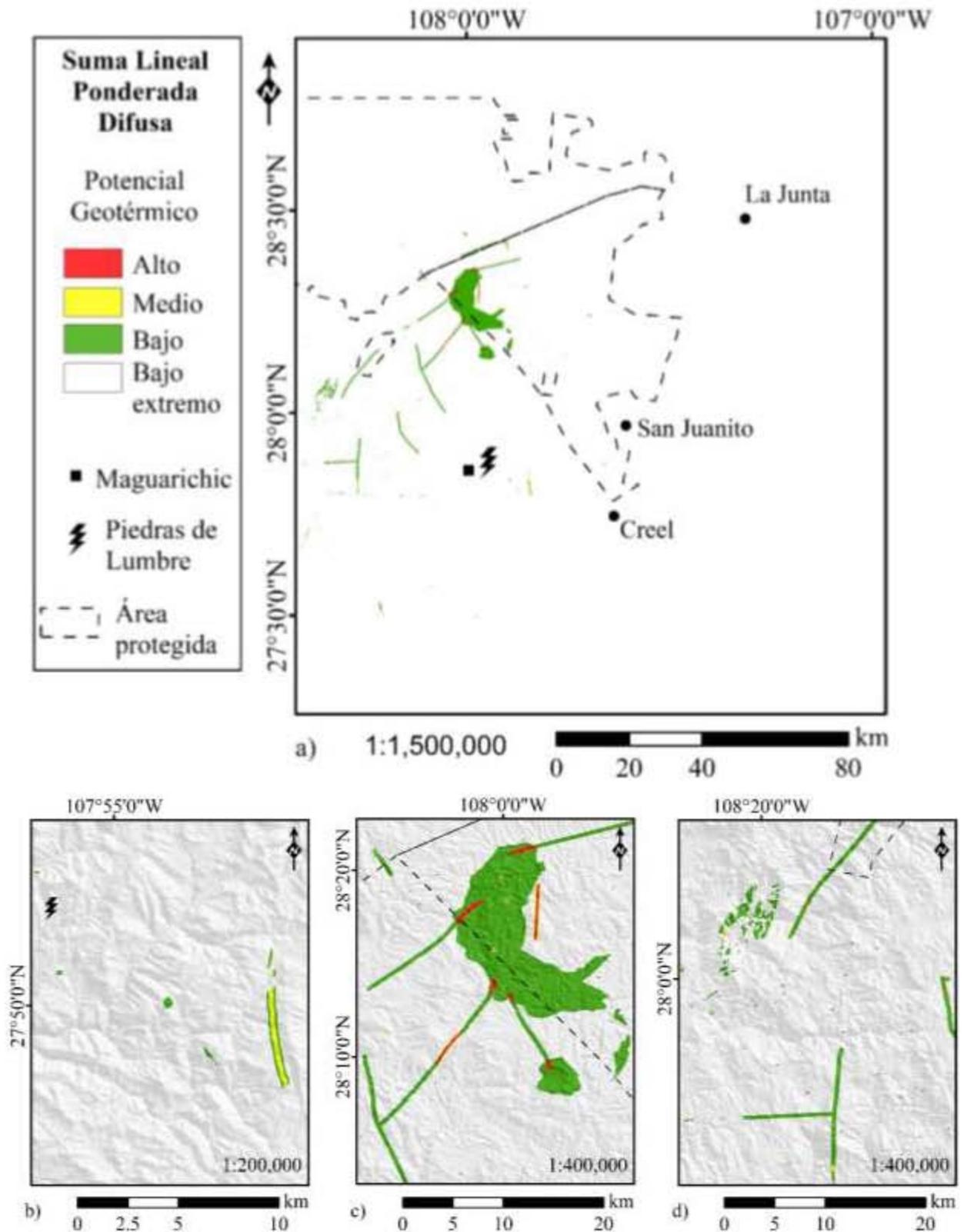


Figura 12. a) Es el potencial geotérmico calculado a partir del método de suma lineal ponderada difusa del área en estudio. La figura b) es el acercamiento a la ZGPL, así como c) a la caldera Tomochic y d) a la caldera Ocampo.

CAPÍTULO SEIS. CONCLUSIONES.

Con base en un modelo de exploración geotérmica, se propone una estrategia de reconocimiento remoto a partir de un SIG que encuentra zonas con potencial geotérmico en las cercanías de Maguarichic; es práctica y económica porque utiliza datos públicos, disponibles y accesibles del lugar sin estar en él, la información que se obtiene de estos datos se integra espacialmente utilizando dos métodos de evaluación multicriterio, ambos se basan en la experiencia y conocimiento de expertos para determinar los pesos de las capas-criterios.

Las capas de información que se generaron para el SIG son: litología, distancia a fallas y fracturas, distancia a manifestaciones, anomalía de flujo de calor, distancia a depósitos minerales, anomalía de temperatura superficial, distancia a estructuras volcánicas y distancia a fuente sísmica natural. Estas capas se eligieron a partir de la evidencia que representan para señalar que existe alta permeabilidad y la presencia de una fuente de calor en profundidad, esto con base en el modelo conceptual del sistema geotérmico considerado.

Se obtuvieron dos mapas de favorabilidad geotérmica con los resultados del método de suma lineal ponderada y difusa, a partir de estos, se proponen tres áreas objetivo con potencial para exploración, una hacia el SE de la ZGPL, otra en la periferia de la caldera Tomochic y una más en la caldera Ocampo; estos resultados son evidencia en superficie que determina la existencia de recursos geotérmicos en profundidad, por tanto, los mapas serían útiles en futuras etapas de exploración para evaluar nuevamente los recursos geotérmicos en Maguarichic.

Considerando que Maguarichic es una zona de difícil acceso, los resultados obtenidos de los métodos de integración pueden simplificar el área de exploración y, por tanto, disminuir sus costos de exploración hasta en un 50%. Además, cuando existan más datos del área y se aplique nuevamente el SIG propuesto, los resultados pueden mejorar. Finalmente, esta estrategia de reconocimiento puede ser desarrollada en otras zonas geotérmicas del país que muestren poca o ninguna evidencia en superficie de un sistema geotérmico. La alta precisión de estas evaluaciones depende de estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos más detallados.

REFERENCIAS

- An, P., Moon, W.M., y Rencz, A. (1991).** Application of fuzzy set theory to integrated mineral exploration. *Canadian Journal of Exploration Geophysics*, 27, 1, 1-11.
- Aronoff, S. (1989).** Geographical information systems: a management perspective.
- Arrubarrena, M., y Pelayo, L. (2012).** Potential Development zones for Geothermal Direct Uses in Mexico with a Specific Site Recommendation. *Geo-Heat Center, Oregon Institute of Technology, Quarterly Bulletin*, 31, 2, 5-8.
- Barbier, E. (2002).** Geothermal energy technology and current status: an overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6, 1, 3-65.
- Bonham-Carter, G. F., Agterberg, F. P., y Wright, D. F. (1988).** Integration of geological datasets for gold exploration in Nova Scotia: *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54, 11, 1585-1592.
- Bonham-Carter, G. F. (1994).** Geographic information systems for geoscientists-modeling with GIS. *Computer methods in the geoscientists*, 13, 398.
- Bosque, J. (1997).** *Sistemas de información geográfica*, corregida. Ediciones Rialp, Madrid.
- Burrough, P. A., y McDonnell, R. (1998).** Principles of geographical information systems. *Economic Geography*, 75, 4, 422.
- Busby, C. J. (2012).** Extensional and transtensional continental arc basins: Case studies from the southwestern United States. First edition. *Tectonics of Sedimentary Basins: Recent Advances*, 382-404.
- Campa, M. F., y Coney, P. J. (1983).** Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distributions in Mexico. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 20, 6, 1040-1051.
- Carranza, E. J. M., Wibowo, H., Barrit, S. D., y Sumintadireja, P. (2008).** Spatial data analysis and integration for regional-scale geothermal potential mapping, West Java, Indonesia. *Geothermics*, 37, 267-299.
- Cebrián, J. (1994).** *GIS Concepts*. Cáceres, INFOCARTO/Departamento de Geografía y O. T., UEX/Grupo de Métodos cuantitativos, A.G.E./FUNDICOT, 265.
- Coppock, J. T., y Rhind, D. W. (1991).** The history of GIS. *Geographical information systems: Principles and applications*, 1, 1, 21-43.
- Cox, D. P., y Singer, D. A. (1986).** Mineral deposit models: *U. S. Geol. Survey Bull*, 1693, 319 p.
- Cumming, W. (2009).** Geothermal resource conceptual models using surface exploration data. In *Proceedings*.
- De Araújo, C. C., y Macedo, A. B. (2002).** Multicriteria Geologic Data Analysis for Mineral Favorability Mapping: Application to a Metal Sulphide Mineralized Area, Ribeira Valley Metallogenic Province, Brazil. *Natural Resources Research*, 11, 1, 29-43.
- Eastman, J. R., Jin, W., Kyem, A. K., y Toledano, J. (1995).** Raster procedures for multi-criteria/multi objective decisions. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 61, 5, 539-547.

- Ferriz, H. (1981).** Geología de la Caldera de San Marcos, Chihuahua. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, 5, 1, 65-79.
- Flóvenz, Ó. G., Hersir, G. P., Saemundsson, K., Ármannsson, H., y Friðriksson, Þ. (2012).** Geothermal energy exploration techniques. Oxford: Elsevier. In: Sayigh A, (ed.) Comprehensive Renewable Energy, 7, 51-9.
- Fournier, R. O. (1977).** Chemical geothermometers and mixing models for geothermalsystems. Geothermics, 5, 41-50.
- Glassley, W. E. (2015).** Geothermal energy. Renewable energy and the environment. 2do edit. CRC Press.
- Gómez-Delgado, M., Cano, B., y Ignaciocoaut, J. (2006).** Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio.
- Goodchild, M. F. (1987).** Towards an enumeration and classification of GIS functions. In Proc. Int. GIS Symposium, November 67-77.
- Gustaffson, P. (1993).** High-resolution satellite imagery and GIS as a dynamic tool in groundwater exploration in a semi-arid area. Hydro-GIS 93. Application of Geographical Information Systems in hydrology for water resources. International Association of Hydrological Sciences, 211, 93-100.
- Guzmán-Espinoza, J. B., García-Cortez, J. A., Mancillas Gutiérrez, A. A., García-Duarte, R., y Siqueiros-López, C. (2000).** Carta Geológico-Minera Tecoripa H12-12, Sonora y Chihuahua, Esc. 1: 250,000. Servicio Geológico Mexicano.
- Harris, D. P. (1984).** Mineral resources appraisal: mineral endowment, resources, and potential supply: concepts, methods and cases (No. 1). Oxford University Press, USA.
- Hiriart, G., y Gutiérrez-Negrín, L. C. A. (2003).** Main aspects of geothermal energy in Mexico. Geothermics, 32, 389-396.
- Hopf, G. (1991).** A comparison of REE trends in geothermal/epithermal systems. Modern and ancient. Proc 13th New Zealand Geothermal Workshop 1991. 75-80.
- INEGI. (1991).** Datos Básicos de la Geografía de México. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática.
- Jankowski, P. (1995).** Integrating geographical information systems and multiple criteria decision-making methods. International Journal of Geographical Information Systems, 9, 3, 251-273.
- Jiang, H. y Eastman, R. (2000).** Application of fuzzy measures in multi-criteria evaluation in GIS. International Journal of Geographical Information Science, 14, 2, 173-184.
- Jiménez-Muñoz, J. C., Sobrino, J. A., Skoković, D., Mattar, C., y Cristóbal, J. (2014).** Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 11, 10, 1840-1843.
- Lúdvík, S. G. (2009).** Geophysical Methods used in Geothermal Exploration.

- Maldonado-Lee, J. M.,** Palacios-García, R., Larrañaga-Obregón, G., Sánchez-Bermeo, G., Carrizales-Aguilar, A., y Pierre-Prian, J. (2000). Carta Geológico-Minera San Juanito G13-1, Chihuahua. Esc. 1:250,000. Servicio Geológico Mexicano.
- McDowell, F. W.,** y Clabaugh, S. E. (1979). Ignimbrites of the Sierra Madre Occidental and their relation to the tectonic history of western Mexico. Geological Society of America Special Paper, 180, 113-124.
- McDowell, F. W.,** y Keizer, R. P. (1977). Timing of mid-Tertiary volcanism in the Sierra Madre Occidental between Durango City and Mazatlán, Mexico: Geological Society of America Bulletin, 88, 1479-1487.
- Moghaddam, M. K.,** Samadzadegan, F., Noorollahi, Y., Sharifi, M. A., y Itoi, R. (2014). Spatial analysis and multi-criteria decision making for regional-scale geothermal favorability map. Geothermics, 50, 189-201.
- Nappi, M. F. (1990).** Growth of geographical information system applications in developing countries. In Geographical Information Systems for Urban and Regional Planning (pp. 23-30). Springer, Dordrecht.
- Noorollahi, Y.,** y Itoi, R. (2008). GM-GRE: An integration method for Geothermal Potential site selection. Geothermal Training Programme. 30th Anniversary Workshop, 1-12.
- Ochoa-Landín, L. H.,** Grijalva-Noriega, F. J., Minjárez-Sosa, I., Montañó-Jiménez, T. R., Ochoa-Granillo, J. A., Herrera-Urbina, S., Guzmán-Espinosa, J. B., y Mancilla-Gutiérrez, A. A. (2002). Carta Geológico-Minera Ciudad Obregón G12-3, Sonora, Chihuahua y Sinaloa. Esc. 1:250,000. Servicio Geológico Mexicano.
- Ostrooumov, M. (2012).** Algunas consideraciones mineralógicas y geoquímicas sobre la amazonita del estado de Chihuahua, México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 29, 1, 221-231.
- Padilla-Palma, M. L.,** Herrera-Galván, D., Hernández-Velázquez, M., Pérez-De la Cruz, J., y García-Guzmán, J. (1997). Carta Geológico-Minera Chihuahua H13-10, Chihuahua, Esc. 1: 250,000. Servicio Geológico Mexicano.
- Padilla-Sánchez, R. J.,** Domínguez-Trejo, I., López-Azcárraga, A. G., Mota-Nieto, J., Fuentes-Menes, A. O., Rosique-Naranjo, F., Germán-Castelán, E. A., y Campos-Arriola, S. E. (2013). Tectonic Map of Mexico 2013. División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Boletín UNAMDGCS-336.
- Prol-Ledesma, R. M. (1988).** El calor de la Tierra. Fondo de Cultura Económica. 1ª ed. México.
- Prol-Ledesma, R. M. (2000).** Evaluation of the reconnaissance results in geothermal exploration using GIS. Geothermics, 29, 83-103.
- Prol-Ledesma, R. M. y** Juárez, M. G. (1986). Geothermal map of Mexico. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 28, 351-362.
- Rajeshwari, A.,** y Mani, N. D. (2014). Estimation of land surface temperature of Dindigul district using Landsat 8 data. International Journal of Research in Engineering and Technology, 3, 5, 122-126.

- Roy, D. P., Wulder, M. A., Loveland, T. R., Woodcock, C. E., Allen, R. G., Anderson, M. C., Helder, D., Irons, J. R., Johnson, D. M., Kenney, R., Scambos, T. A., Schaaf, C. B., Schott, J. R., Sheng, Y., Vermote, E. F., Belward, A. S., Bindschadler, R., Cohen, W. B., Gao, F., Hipple, J. D., Hostert, P., Huntington, J., Justice, C. O., Kilic, A., Kovalskyy, V., Lee, Z. P., Lymburner, L., Masek, J. G., McCorkel, J., Shuai, Y., Trezza, R., Vogelmann, J., Wynne, R. H. y Zhu, Z. (2014).** Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote sensing of Environment*, 145, 154-172.
- Saaty, T. L. (1977).** A scaling method for priorities in hierarchical structures. *J. Math. Psychology*, 15, 234-281.
- Sadeghi, B., y Khalajmasoumi, M. (2015).** A futuristic review for evaluation of geothermal potentials using fuzzy logic and binary index overlay in GIS environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 818-831.
- Sánchez-Velasco, R. (2005).** Rural Electrification in Mexico from Low Entalpy Geothermal Resources: Maguarichic Off-Grid Power Plant, Mexican Experience. In *Proceedings World Geothermal Congress*, 24-29.
- Servicio Geológico Mexicano.** Geoinfomex. Recuperado de: <https://www.sgm.gob.mx/GeoInfoMexGobMx/>
- Servicio Sismológico Nacional.** Catálogo de sismos. Recuperado de <http://www2.ssn.unam.mx:8080/catalogo/>
- Swanberg, C. A. y Morgan, P. (1978).** The linear relation between temperatures based on the silica content of groundwater and regional heat flow: a new heat flow map of the United States. *Pure and Applied Geophysics*, 117, 1-2, 227-241.
- Tarback, E., y Lutgens, F. K., Tasa, D., y Científicas, A. T. (2005).** *Ciencias de la Tierra*. Pearson Educación.
- Tello, H. E. (1985).** Reconocimiento y Evaluación Geoquímica de las Zonas Termales de Piedras de Lumbre y Recubichi, Chih. Departamento de Exploración. CFE. Informe 24-85, 1-12.
- Tello, H. E. (1996).** Geoquímica de los Manantiales Termales de la Zona de Piedras de Lumbre, Chih., México. *Geotermia* 12, 1, 33-41.
- Torres, R. J., Martínez-Estrella, I., y Iglesias, E. (2005).** Database of Mexican Medium-to Low-Temperature Geothermal Resources. *Proceedings World Geothermal Congress 2005*.
- Torres-Rodríguez, V. (2000).** Geothermal chart of Mexico scale 1:2,000,000. In *Proceedings World Geothermal Congress*, 1867-1870.
- Tomlinson, R. F. (1984).** Geographic Information Systems-a new frontier. *The Operational Geographer*, 5, 1, 31-35.
- Tomlinson, R. F. (1988).** The impact of the transition from analogue to digital cartographic representation. *The American Cartographer*, 15, 3, 249-261.

- Watson, A. (2013).** Geothermal Engineering: Fundamentals and Applications. Springer Science and Business Media.
- Wright, P. M., Nielson, D. L., Ross, H. P., Moore, J. N., Adams, M. C., y Ward, S. H. (1989).** Regional exploration for convective-hydrothermal resources. *Geothermal Science and Technology*, 2, 69-124.
- Yousefi, H., Noorollahi, Y., Ehara, S., Itoi, R., Yousefi, A., Fujimitsu, Y., Nishijima, J., y Sasaki, K. (2010).** Developing the geothermal resources map of Iran. *Geothermics*, 39, 140-151.
- Zimmermann, H. J. (1996).** Fuzzy Set Theory and Applications, 3rd ed. Kluwer Academic, Boston, 435 p.

ANEXO 1

Se solicitó una cotización para exploración geológica tanto del área en estudio como de un área menor, para resaltar la ventaja de utilizar un SIG en etapas de reconocimiento y exploración, al reducir el área de exploración y, por tanto, su costo.



Ciudad de México a 21 de Junio de 2018

**A QUIEN CORRESPONDA
PRESENTE**

AT'N: ING. DANIEL ELIZALDE

Estimado Ing. Daniel Elizalde:

En atención a su amable invitación, envío a su consideración nuestra propuesta técnica-económica **CEG18-011** para efectuar trabajos de reconocimiento geológico y exploración en campo mediante caminamientos y fotointerpretación para la evaluación de recursos naturales (mineralógica, geotérmica). El área en estudio se localiza en Maguarichic, al norte de la República Mexicana, al suroeste del estado de Chihuahua.

Para la elaboración de la propuesta se contó con la información proporcionada hasta el momento de la realización de esta cotización que incluye un área de prospección de 160 x 160 kilómetros y un área de 20 x 20 kilómetros.

1. ALCANCES

1.1. Recopilación y análisis de información existente

Se procederá a recopilar y revisar detalladamente información bibliográfica geológica y geotécnica existente del sitio, incluyendo información de estudios previos realizados por nuestra empresa en el área.

1.2. Reconocimiento geológico de verificación en superficie

Para el levantamiento de la ladera derecha en su porción aguas abajo de la presa, se contará con un geólogo con experiencia geotécnica que hará el levantamiento en superficie, considerando recorrer el área a prospectar mediante las dos propuestas definidas en ésta cotización definiendo los tipos de suelos y materiales existentes de cobertura y obteniendo de los afloramientos de rocas datos litológicos y de las principales discontinuidades (contactos, estratificación, fallas, fracturas, etc.) incluyendo sus características de continuidad, apertura, frecuencia, existencia de rellenos, rugosidad, alteración, etc., basados en los métodos sugeridos por la ISRM (International Society of Rock Mechanics), estas últimas se agruparan en diagramas espaciales estereográficos para definir los sistemas o familias principales de fracturamiento en las distintas litologías.

1.3. Informe Descriptivo

Se hará un informe descriptivo de los trabajos efectuados y los resultados obtenidos. El informe se entregará en original impreso, así como los archivos electrónicos de texto, figuras, planos, fotografías y anexos incluyendo, la fotointerpretación mediante técnicas de procesamiento de imágenes.

1 de 3

ANEXO 1, continuación.



2. PRESUPUESTO

El importe por los trabajos mencionados se divide en dos tablas, una para la exploración total de 160x160 km y la segunda tabla para una exploración de 20x20 km. Las tablas adjuntas al final de esta propuesta muestran el desglose del importe para cada concepto.

3. CONSIDERACIONES GENERALES

- El presente importe no incluye IVA.
- La ubicación de los sitios estudiados para el reconocimiento geológico se hará con GPS manual.
- Los días de estancia de las brigadas de campo son estimados, ajustándose el importe de acuerdo con los días reales de trabajo realizados en campo.
- EL CLIENTE proporcionará los permisos necesarios para acceder y trabajar en el sitio.
- En el caso de que se requiera permanecer por más tiempo del programado por causas ajenas a nosotros (falta de permisos de acceso, paros por problemas sociales o con los propietarios de predios, etcétera), el costo extra por hora de la brigada de geología será de \$ 650.00 MXN.
- Para iniciar los trabajos se requiere contar con un contrato de servicios con la firma del representante legal, en el que se indique la aprobación del presente presupuesto. Se requiere también el pago de un anticipo por el 30% del importe incluyendo IVA, 30% al término de los trabajos de campo y entrega de un reporte parcial con resultados de campo y el resto (40%), a la entrega del informe final.

4. TIEMPO DE EJECUCIÓN

Se estima que los trabajos de campo se efectuarán en el lapso de veinte días para el estudio de la tabla 1 y diez días para el estudio de la tabla 2. Finalmente, cuatro semanas para la elaboración del informe.

El inicio de los trabajos se programará tomando en cuenta los compromisos adquiridos por CEG Construcción y Exploración al momento de la aprobación de esta propuesta.

Agradezco su amable invitación y confianza y quedo atento a sus observaciones para cualquier aclaración.

Reciba un cordial saludo

ATENTAMENTE
CEG CONSTRUCCIÓN Y
EXPLORACIÓN.

M.I. JUAN ARTURO JIMÉNEZ REQUENA

CEG18411 Megaridre, Chihua.RG.FG.doc PRES-2018

2 de 3

Av. México No. 321, Col. Xero, Delegación Coyacacán, Ciudad de México, México.
E-mail: contacto@ceg-exploracion.com

ANEXO 1, continuación.



PRESUPUESTO CEG18-011

PROYECTO MAGUARICHIC, CHIHUAHUA.

TRABAJOS DE RECONOCIMIENTO GEOLÓGICO Y FOTO-INTERPRETACIÓN POR IMÁGENES SATELITALES.

21 junio 2018

TABLA 1				
ÁREA 160X160 Km				
CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	IMPORTE (\$)
1. Traslados aéreos de la brigada de geología y equipos a los sitios de estudio	Lote	1	25,000.00	\$ 25,000.00
2. Viáticos de brigada en campo y renta de vehículo	día	20	7,500.00	\$ 150,000.00
3. Recopilación bibliográfica y foto-interpretación geológica de la zona de estudio	Lote	1	30,000.00	\$ 30,000.00
5. Visitas de puntos de control geológico, interpretación y elaboración	Lote	1	50,000.00	\$ 50,000.00
Subtotal:				\$ 255,000.00
IVA:				\$ 40,800.00
TOTAL:				\$ 295,800.00

TABLA 2				
ÁREA DE 20X20 Km				
CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	IMPORTE (\$)
1. Traslados aéreos de la brigada de geología y equipos a los sitios de estudio	Lote	1	25,000.00	\$ 25,000.00
2. Viáticos de brigada en campo y renta de vehículo	día	10	7,500.00	\$ 75,000.00
3. Recopilación bibliográfica y foto-interpretación geológica de la zona de estudio	Lote	1	25,000.00	\$ 25,000.00
5. Visitas de puntos de control geológico, interpretación y elaboración de informe técnico.	Lote	1	20,000.00	\$ 20,000.00
Subtotal:				\$ 145,000.00
IVA:				\$ 23,200.00
TOTAL:				\$ 168,200.00

• El importe total no incluye IVA