



Universidad Autónoma del Estado de México

Facultad de Planeación Urbana y Regional



IDENTIFICACIÓN, CARACTERIZACIÓN Y CATEGORIZACIÓN DE LAS MANIFESTACIONES TERMALES DEL ESTADO DE MÉXICO

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADA EN CIENCIAS AMBIENTALES**

PRESENTA:

LETICIA GÓMEZ DE JESÚS

DIRECTOR DE TESIS:

ECATSIG. MARCO ANTONIO BARRANCO GARCÍA

Toluca de Lerdo, Estado de México; julio de 2015

AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer primeramente a mis padres por todo el apoyo durante mi formación profesional.

Al ECATSIG. Marco Antonio Barranco García por asumir la dirección de esta tesis, y por todo el apoyo y la paciencia durante estos años.

ÍNDICE

RESUMEN	5
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	7
JUSTIFICACIÓN.....	8
OBJETIVO GENERAL.....	9
OBJETIVOS PARTICULARES	9
CAPÍTULO I. MARCO CONCEPTUAL Y DE REFERENCIA.....	10
1.1.- ANTECEDENTES.....	10
1.2.- EL CALOR DE LA TIERRA.....	13
1.2.1.- Mecanismos de la propagación del calor en la tierra.....	15
1.2.2.- El flujo de calor terrestre	16
1.3.- ELEMENTOS BÁSICOS DE TECTÓNICA DE PLACAS.....	16
1.3.1.- Las Manifestaciones termales en la superficie de la tierra.....	21
1.4.- GEOTERMIA	25
1.4.1.- Recursos geotérmicos.....	26
1.4.2.- Yacimientos geotérmicos.....	26
1.5.- ENERGÍA GEOTÉRMICA.....	29
1.5.1.- Aplicaciones y tipos de energía geotérmica.....	29
1.5.2.- Energía geotérmica y desarrollo sostenible.....	31
1.6.- MÉXICO Y SU RIQUEZA GEOTÉRMICA.....	34
1.6.1.- Sistema Volcánico Transversal.....	35
1.6.2.- Regiones volcánicas del Estado de México	36
CAPÍTULO II. CARACTERIZACIÓN BIOFÍSICA DEL ESTADO DE MÉXICO.....	38
2.1.- ASPECTOS DEL MEDIO ABIÓTICO	38
2.1.1.- Localización geográfica	38
2.1.2.- Fisiografía.....	38
2.1.3.- Geología	39
2.1.4.- Edafología	40
2.1.5.- Clima	41

2.1.6.- Hidrología.....	42
2.2.- ASPECTOS DEL MEDIO BIÓTICO.....	43
2.2.1.- Vegetación	43
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN	45
3.1.- LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS ZONAS DE MANIFESTACIONES HIDROTERMALES EN EL ESTADO DE MÉXICO	50
3.2.- DESCRIPCIÓN FÍSICA DE LAS ZONAS HIDROTERMALES DEL ESTADO DE MÉXICO	53
3.2.1.- Descripción física del sistema hidrotermal de Temascalcingo (San José Ixtapa)	53
3.2.2.- Descripción física del sistema hidrotermal de Ixtlahuaca.....	56
3.2.3.- Descripción física del sistema hidrotermal de Donato Guerra	57
3.2.4.- Descripción física del sistema hidrotermal de Ixtapan del Oro.....	59
3.2.5.- Descripción física del sistema hidrotermal de Atizapán	62
3.2.6.- Descripción física del sistema hidrotermal de Tenango del Valle.....	63
3.2.7.- Descripción física del sistema hidrotermal de Ixtapan de la Sal	65
3.3.- CATEGORIZACIÓN DE LAS MANIFESTACIONES TERMALES UTILIZANDO LA EVALUACIÓN MULTICRITERIO (EMC)	71
RESULTADOS.....	79
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	83
BIBLIOGRAFÍA	86
ANEXOS	89

RESUMEN

La energía geotérmica ha destacado en años recientes con muchas potencialidades dentro de las energías renovables, tiene sus orígenes por la diferencia de temperatura en el interior de la tierra, por lo que no depende de las condiciones climatológicas, de la estación anual, del momento del día ni del viento. Las aguas termales son un tipo de manifestación de esta energía, y se han utilizado desde hace miles de años como balnearios destacando sus propiedades curativas. Con el avance tecnológico y la diversidad de temperaturas de los recursos geotérmicos, ha permitido un gran número de posibilidades de utilización que pueden contribuir al desarrollo local y sustentable, al ser una energía limpia, económica y continua.

Bajo este contexto se desarrolló el presente proyecto, con el objetivo de promover la conservación y aprovechamiento sustentable de los manantiales termales del Estado de México, ya que a pesar de ser utilizada desde hace años, se desconocen aún las potencialidades de esta energía, que además, ha sido afectada principalmente por la sobreexplotación de los acuíferos.

La investigación se llevó a cabo en dos etapas; la primera, consistió en recabar información de manifestaciones termales del Estado de México, a partir de esto, se detectaron 7 focos hidrotermales con temperaturas iguales o inferiores a 40 °C. Localizados en los municipios de Temascalcingo, Ixtlahuaca, Donato Guerra, Ixtapan del Oro, Tenango del Valle e Ixtapan de la Sal, aunque también los hubo en el municipio de Atizapán pero desaparecieron tras el suministro de agua potable a la Ciudad de México. En tanto que en el municipio de Temascalcingo se desarrolló el Parque Ecoturístico “El Borbollón” donde el principal atractivo son las aguas termales con fines medicinales, el uso habitual de los manantiales en Ixtapan del Oro y Donato Guerra ha sido de tipo turístico-recreativo, y finalmente, en el municipio de Ixtlahuaca los manantiales fueron afectados por la sobreexplotación del acuífero Ixtlahuaca - Atlacomulco.

En los acuíferos de Villa Victoria – Valle de Bravo y Tenancingo, la cubierta vegetal y el componente litológico constituyen los elementos de mayor importancia para garantizar las entradas naturales mediante la captación e infiltración de agua subterránea, dotando de agua a los focos hidrotermales de Donato Guerra, Ixtapan del Oro, Tenango del Valle e Ixtapan de la Sal.

Para el desarrollo de la segunda etapa del proyecto, se adoptó la técnica de Sumatoria Lineal Ponderada, la cual se encuentra inmersa dentro de los diversos Método de Evaluación Multicriterio, la utilización de esta técnica consistió en la categorización de las siete zonas con manifestación hidrotermal, con el objetivo de destacar aquellas que de acuerdo a sus características pudieran someterse a conservación y/o aprovechamiento sustentable. Para este proceso de evaluación se utilizaron variables como: geología, edafología, agua subterránea, Áreas Naturales Protegidas (ANP) y el uso actual para cada sitio de interés hidrotermal.

Cabe destacar que se realizaron dos evaluaciones, la primera bajo el supuesto de que todos los criterios utilizados tuvieran el mismo grado de importancia para la selección de sitios con categoría de conservación, y la segunda evaluación asignando un peso o grado de importancia a cada uno de los criterios, en este sentido, para la asignación de los pesos o valores se tomaron en cuenta las características que determinan la presencia de manifestaciones termales, siendo las más importantes; las disponibilidad de agua subterránea, una fuente de calor (capacidad de cesión de calor de las rocas) y una fuente que promueva la conservación de los mantos acuíferos como las Áreas Naturales Protegidas.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El territorio mexicano es caracterizado por sistemas volcánicos y sistemas hidrotermales, tanto fósiles como activos (Prol, 1996), producto de la actividad tectónica y volcánica en nuestro país. Estos fenómenos pueden traer consigo resultados catastróficos en muchos de los fenómenos que generan, como sismos y erupciones volcánicas, sin embargo, también son fuente de riqueza como los recursos minerales y recursos geotérmicos.

La presencia de manifestaciones hidrotermales se extiende por casi todo el país, siendo especialmente abundante en su parte central. No obstante, el delicado equilibrio de factores que hacen posible este tipo de fenómenos como: una fuente de calor, agua y una canal permeable que la lleve hasta la superficie, puede ser fácilmente alterado por acciones de los seres humanos sobre el medio ambiente (Prol, 1996), provocando la desaparición de este recurso energético y calorífico.

En el Estado de México algunos manantiales termales han desaparecido debido a la excesiva extracción de aguas subterránea en la cuenca de Río Lerma (INEGI, 2001) con su introducción al sistema de abastecimiento de agua a la Ciudad de México, la demanda del sector industrial y crecimiento de la población, originando un descenso en los niveles del agua subterránea, y por lo tanto, la disminución de la recarga hacia la fuente hidrotermal. La zona de explotación a la que se hace referencia comprende los Valles de Toluca e Ixtlahuaca (INEGI, 2001). Por otro lado, los manantiales termales de la zona de Donato Guerra han sido afectados por la perforación de pozos (INEGI, 2001).

Actualmente se tienen registrados seis manantiales termales dentro del territorio estatal que continúan siendo alterados por las actividades antrópicas, y de no tomar medidas bajo un enfoque de conservación y cuidado natural, se seguirá amenazando su continuidad y su posible aprovechamiento.

JUSTIFICACIÓN

Bajo la óptica de aprovechamiento sustentable los manantiales termales son áreas de oportunidad y podrían contribuir al desarrollo local y sustentable de las comunidades. Es una energía que no depende de condiciones climatológicas, de la estación anual ni del momento del día y desde hace siglos se han utilizado como balnearios, actualmente existen algunos ejemplos de calefacción de edificios, secado de madera, invernadero y cultivo de hongos. Sin embargo, antes de poder hablar de un aprovechamiento es importante garantizar la continuidad de este recurso, el cual es afectado principalmente por la sobreexplotación de los mantos acuíferos.

Para ello, la presente investigación se centrará en la recopilación de información referente a los focos hidrotermales del Estado de México para determinar su ubicación espacial y lograr su caracterización y categorización, a través de criterios como: geología, edafología, uso o situación actual, hidrología subterránea, entre otros, con el fin de sentar las bases para que este tipo de elementos sean considerados como parte de un elemento más dentro de los diversos complejos naturales que componen el paisaje del Estado de México, y se considere algún tipo de aprovechamiento directo en un futuro próximo. Además de que el presente trabajo sea un referente para autoridades en la conservación y aprovechamiento racional de este recurso.

Considerando que el proyecto es a nivel Estatal, los insumos utilizados para la elaboración de la cartografía temática comprenden información disponible de INEGI, 2010 a escala 1:250,000, así mismo para la caracterización se hace referencia a fuentes oficiales como INEGI, CONAGUA y CONANP, entre otras.

OBJETIVO GENERAL

Categorizar las manifestaciones termales del Estado de México a partir de sus elementos físicos, como sustento técnico que permitan su conservación.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Identificar y representar espacialmente las manifestaciones hidrotermales del Estado de México.
- Caracterizar los sistemas hidrotermales a partir de sus variables.
- Utilizar el método de Evaluación Multicriterio para categorizar las manifestaciones hidrotermales.

CAPÍTULO I. MARCO CONCEPTUAL Y DE REFERENCIA

1.1.- ANTECEDENTES

Las regiones volcánicas han sido siempre polos de atracción para los seres humanos, por el hecho de existencia de fumarolas y de fuentes termales que podían utilizar para calentarse, cocer alimentos o simplemente bañarse.

Las primeras civilizaciones apreciaban la práctica de los baños termales y la utilización de barros termominerales. Posteriormente, los griegos y romanos difundieron la aplicación de la energía geotérmica en la calefacción urbana y en las tradicionales termas y baños públicos, que se convirtieron en gigantescos centros de ocio, salud y negocio. Extendiéndose con el paso del tiempo a Japón, América y Europa (Llopis y Rodrigo, 2008).

La extracción de azufre, travertinos, caolines, limonitas, óxidos de hierro, ácido sulfúrico y alumbre también están ligada tradicionalmente a las fuentes termales. También comenzó a utilizarse el agua caliente de estas fuentes para el lavado de pieles y lana.

A partir del siglo XIX, los avances técnicos y el mejor conocimiento del subsuelo permitieron buscar cada vez a mayor profundidad y explorar cada vez mejor el calor de la Tierra. La primera explotación industrial que se hizo de esta energía fue en Larderello (Italia) tras el descubrimiento de sales de boro en 1818. En 1827 el fundador de esta industria, el francés Francois Larderel, desarrolló un sistema para utilizar el calor de los fluidos en el proceso de evaporación, sustituyéndolo por la quema de madera (Llopis y Rodrigo, 2008).

El 1904 se construyó la primera central geotérmica para generación de electricidad, entrando en funcionamiento en 1913 con una capacidad de 250 kW (Tonda, 1998). Entre 1910 y 1940, el vapor de baja presión fue utilizado para

calefacción de invernaderos, de edificios industriales y residenciales (Llopis y Rodrigo, 2008).

En 1921, en Estados Unidos, en la zona de The Geysers, en California se instaló una pequeña máquina de vapor que producía electricidad para un pequeño establecimiento termal (Llopis y Rodrigo, 2008).

En México, en 1959 empezó a operar la primera unidad geotermoeléctrica en el país, con 3.5 MW de capacidad, en el campo geotérmico de Pathé, Hidalgo, actualmente fuera de operación (Le Bert, 2011).

A partir de la década de los setenta se inició en diversas partes de mundo, una intensa actividad de exploración e investigación de recursos geotérmicos al objeto de utilizarlos para producción de energía eléctrica, calefacción y agua caliente.

Actualmente, México ocupa el cuarto lugar en el mundo en el aprovechamiento de este recurso para producir energía eléctrica, sólo detrás de Estados Unidos, Filipinas e Indonesia (Secretaría de Energía). Con sus campos geotérmicos; Cerro Prieto en Mexicali, Baja California del Norte, es la planta geotérmica más grande de México y una de las más grandes en el mundo; los Azufres en Michoacán, localizado en la parte central del cinturón volcánico, comenzó operaciones en 1982; los Humeros en Puebla, situado en el lado este del cinturón volcánico, inicio operaciones en 1990 y el campo geotérmico Tres Vírgenes en B.C.S. Destacan también las aplicaciones directas en estos campos geotérmicos como: la extracción secundaria de minerales en lagunas de evaporación; calefacción de oficinas e invernaderos; secado de frutas y verduras; germinado de bulbos; la producción acelerada de flores y hongos comestibles; y el secado de madera (AMC, 2010).

Aunque el interés de los recursos geotérmicos se ha centrado en la explotación con fines energéticos, en años recientes se ha descubierto que estos sitios de temperatura anómala pueden sostener vida animal, tal es el caso que se presentó en el área del manantial del “Pandeño de los Pando” que se encuentra ubicado en

la parte sur de la localidad de Julimes, Chihuahua. Este manantial que oscila entre los 39 y 47 °C alimenta al estaque-ciénaga donde habita una especie endémica: el pez “*Cyprinodon julimes*” o “cachorrito” de Julimes. Por esta razón desde 2008 comenzaron los estudios con la sociedad de productores San José de Pandos, con el apoyo del municipio de Julimes, WWF y la asociación Amigos del Pandeño A.C, para la protección de cuatro hectáreas en la zona del manantial para la propuesta de declaratoria como Área Natural Protegida.

Fuente:http://www.wwf.org.mx/que_hacemos/desierto_chihuahuense/cachorrito_de_julimes/

Por otro lado, recientemente se aprobó una iniciativa referente a la energía geotérmica, e incluye una nueva ley, llamada Ley de Energía Geotérmica (LEG), así como la modificación de dos artículos y la adición de uno de la actual Ley de Aguas Nacionales (LAN). La LEG se compone de 67 artículos y 13 transitorios, y divide el proceso de desarrollo geotérmico en tres etapas sucesivas: reconocimiento, exploración y explotación, para cuya ejecución habrá que obtener primero un registro, permiso o concesión, respectivamente, por parte de la Secretaría de Energía (SENER) (Gutiérrez, 2014).

Además se han aprobado diferentes mecanismos de financiamientos a través del Fondo para la Transición Energética, el cual destinó a la Comisión Federal de Electricidad (CFE) una inversión para fortalecer la investigación en campos con potencial geotérmico en los estados de Michoacán, Baja California, Guanajuato, Puebla, Nayarit y Chiapas, a fin de incrementar las reservas probadas para esta tecnología. También se apoyó la integración del Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CEMIE-Geo), bajo el liderazgo del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) en Baja California (Secretaría de Energía). El mismo consorcio realizó su primera reunión en 2014 en el que se aprobaron 30 proyectos de innovación tecnológica que habrá de llevar a cabo el CEMIE-Geo en los próximos cuatro años.

Fuente: (<http://www.geotermia.org.mx/geotermia/?cat=1>)

1.2.- EL CALOR DE LA TIERRA

Los volcanes, manantiales termales y otras manifestaciones superficiales del calor encerrado dentro de la Tierra han sido las evidencias de que la temperatura en su interior debe ser mucho más alta que la que se tiene en la superficie (Prol, 1996).

Antes de que se contara con la tecnología de perforación de pozos, el hombre ya se había dado cuenta que al internarse en minas y en grutas la temperatura aumenta en razón a la profundidad, aproximadamente 1 °C cada 30 m, y en determinadas regiones del planeta con erupciones periódicas pueden alcanzar temperaturas superiores a los 1.000 °C (Llopis y Rodrigo, 2008).

Desde el centro hasta la superficie, el globo terrestre está constituido por tres capas sucesivas de temperatura decreciente:

- **El núcleo**, sólido en su parte interna y líquido en su parte exterior. Su temperatura puede alcanzar los 4.200 °C.
- **El manto** que lo envuelve, con temperaturas que va desde los 3.000 °C a 1.000 °C. De textura plástica hacia el centro, se vuelve sólido hacia la superficie.
- **La corteza**, que corresponde a la envoltura superficial. Su temperatura varía desde los 1.000 °C en su contacto con el manto, hasta los 15 - 20 °C en la superficie terrestre. Con la parte sólida del manto constituye la litosfera, fragmentada en varias placas litosféricas que se desplazan lentamente, unas con relación a otras, pudiendo dar lugar a importantes anomalías térmicas en sus bordes (Llopis y Rodrigo, 2008).

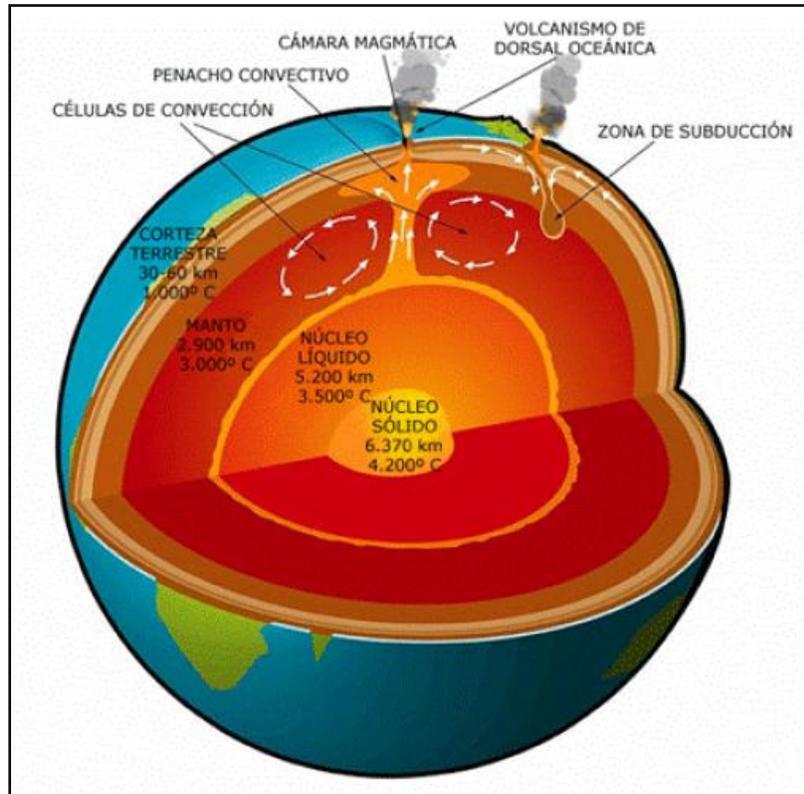


Ilustración 1: Estructura interna de la Tierra (Site Geothermie-Perspectives de l'ADEME et du BRGM en Llopis y Rodrigo, 2008).

Todos los procesos geodinámicos que suceden en la tierra son controlados por la transferencia y generación de calor en su interior. Desde los procesos más superficiales, hasta los volcanes, intrusiones, terremotos, formación de cordilleras y metamorfismo (Pous y Jutglar, 2004).

El calor es el motor de la tectónica de placas, que involucra a la litosfera y la astenósfera, y otros procesos a mayor profundidad, como los movimientos de convección del manto y en el núcleo externo (Pous y Jutglar, 2004).

Los orígenes del calor interno de la Tierra se encuentran en los siguientes hechos:

- **Desintegración de isótopos radioactivos** presentes en la corteza y en el manto, principalmente, uranio 235, uranio 238, torio 232 y potasio 40.

- **Calor inicial** que se liberó durante la formación del planeta hace 4.500 millones de años, y que todavía está llegando a la superficie.
- **Movimientos diferenciales** entre las diferentes capas que constituyen la Tierra, principalmente entre el manto y el núcleo.
- **Cristalización del núcleo.** El núcleo externo (líquido) está cristalizando continuamente, y en la zona de transición con el núcleo interno (sólido) se libera calor.

1.2.1.- Mecanismos de la propagación del calor en la tierra

Los mecanismos por los que se propaga el calor en cualquier medio son: conducción, convección y radiación.

- Conducción es la transferencia de calor de un cuerpo más caliente a uno más frío con el cual se encuentra en contacto.
- Convección es el modo en que se transfiere la energía térmica entre una superficie sólida y un flujo adyacente (líquido o gas).
- Radiación es la emisión de energía en forma de ondas electromagnéticas, como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas.

En este sentido, para el estudio de las deformaciones de los materiales terrestres, la corteza y la parte rígida del manto se agrupan bajo el nombre de **litosfera**, que tiene un espesor de 75 - 100 km, en ella la transferencia de calor se produce por **conducción** térmica. La litosfera descansa sobre la **astenósfera**, que es la parte deformable del manto. Es una capa plástica en la que la temperatura y la presión alcanzan valores que permiten que se fundan las rocas en algunos puntos, es por eso que el calor se evacua por **convección** térmica. A continuación se encuentra la **mesosfera**, que equivale al resto del manto en la que en mecanismo de propagación de calor también es por **convección** y, por debajo, se encuentra la

endosfera, que comprende el núcleo externo y el núcleo interno (Llopis y Rodrigo, 2008).

Parte de la energía generada en el interior de la tierra se consume en los procesos que allí suceden. El resto, añadido a la energía procedente de la desintegración de los isótopos radiactivos en el manto y la corteza, llega a la superficie y, finalmente, es irradiada hacia la atmósfera (Pous y Jutglar, 2004).

1.2.2.- El flujo de calor terrestre

Al penetrar en la corteza de la Tierra se observa un cambio en la temperatura, en general ésta aumenta; a esa variación de la temperatura se le conoce como **gradiente geotérmico** (Prol, 1996), expresado en °C/km y tiene un valor medio para todo el planeta de 3.3 °C cada 100 m. (Llopis y Rodrigo, 2008).

El **flujo de calor en la superficie** de la Tierra se calcula como el producto del gradiente geotérmico por la conductividad térmica de las rocas, siendo estos dos parámetros determinados directamente (Prol, 1996).

La **conductividad térmica** es una propiedad característica de cada material que indica su capacidad para conducir el calor. Se expresa en $W/m^{\circ}C$ (Llopis y Rodrigo, 2008). La determinación de la conductividad térmica se lleva a cabo en el laboratorio, en muestras de las rocas en las que se midió el gradiente geotérmico. Estas muestras se someten a un flujo de calor conocido, el cual va a generar una diferencia de temperatura a lo largo de la muestra, de tal forma que entre mayor sea esta diferencia de temperatura, menor será la conductividad térmica de la muestra (Prol, 1996).

1.3.- ELEMENTOS BÁSICOS DE TECTÓNICA DE PLACAS

La teoría de placas puede definirse como una teoría compuesta por una gran variedad de ideas que explican el movimiento observado de la capa externa de la

tierra por medio de los mecanismos de subducción y de expansión del fondo oceánico, que, a su vez generan los principales rasgos geológicos de la Tierra, entre ellos los continentes, las montañas y las cuencas oceánicas (Tarbuck y Lutgens, 2009). De acuerdo a esta teoría, el motor generador de todos los acontecimientos geológicos es la convección del material del manto, que se comporta como un fluido de alta viscosidad. Dicha viscosidad se puede definir como la resistencia interna al flujo, en los líquidos se debe a fuerzas de cohesión de corto alcance (Wilson y Buffa, 2003), su unidad de medida es el poise. En el caso del material del manto, su viscosidad es muy grande (del orden de 10^{20} poises; como comparación, la viscosidad del agua es de 0.01 poises y la del mercurio es 0.02 poises), esto hace que para esfuerzos aplicados en tiempos cortos (ondas sísmicas y esfuerzos por la atracción de la Luna) la Tierra se comporte como un sólido elástico; sin embargo, para esfuerzos con periodos de millones de años, como los provocados por la convección en el manto, éste se va a comportar como un fluido (Prol, 1996).

Según el modelo de la tectónica de placas, el manto superior, junto con la corteza suprayacente, se comportan como una capa fuerte y rígida, conocida como **litosfera**, que está rota en fragmentos denominados **placas**. Las capas de la litosfera son más delgadas en los océanos donde su grosor puede variar entre unos pocos kilómetros en las dorsales oceánicas y 100 kilómetros en las cuencas oceánicas profundas. Por el contrario, la litosfera continental, tiene un grosor de entre 100 a 150 kilómetros, pero puede superar los 250 kilómetros debajo de las porciones más antiguas de las masas continentales. La litosfera se encuentra por encima de una región más dúctil del manto, conocida como **astenósfera** (Tarbuck y Lutgens, 2009).

Las placas litosféricas se mueven en relación con las demás a una velocidad muy lenta pero continua. Este movimiento es impulsado en último extremo por la distribución desigual del calor en el interior de la tierra. El material caliente que se encuentra en las profundidades del manto se mueve despacio hacia arriba y sirve como una parte del sistema de convección interna de nuestro planeta.

Simultáneamente, láminas más frías y densas de la litosfera oceánica descienden al manto, poniendo en movimiento la capa externa rígida del manto. Por último, los titánicos roces entre las placas litosféricas de la tierra generan terremotos, crean volcanes y deforman grandes masas de rocas en las montañas (Tarbuck y Lutgens, 2009).

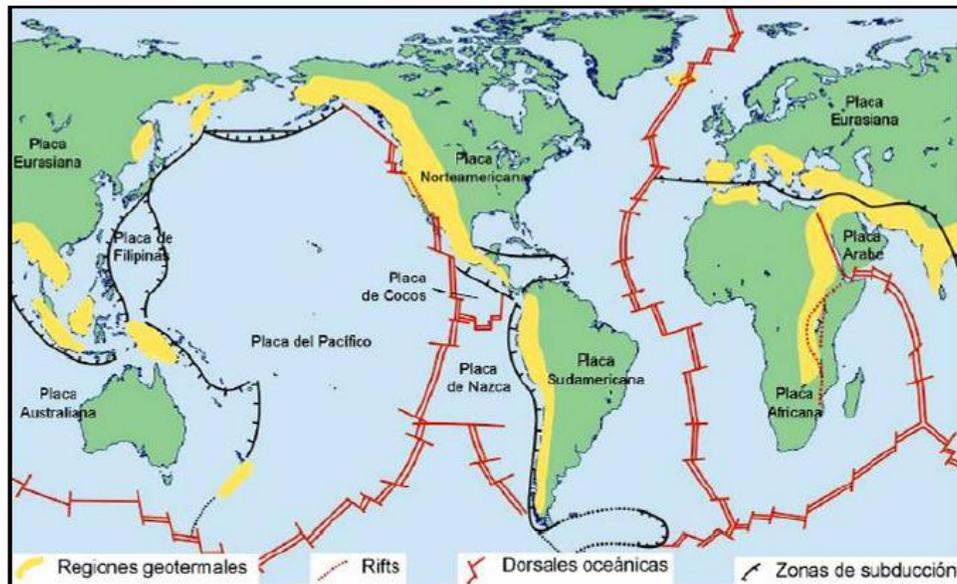


Ilustración 2: Distribución en la superficie de la Tierra de las fronteras entre placas: // —centro de creación de nueva litosfera (zona de dispersión); (dibujo)—frontera destructiva entre placas (zona de subducción) (Prol, 1996).

Aunque al interior de las placas se puede experimentar alguna deformación, las principales interacciones entre las placas individuales se produce a lo largo de sus bordes o límites (Tarbuck y Lutgens, 2009). Estos desplazamientos han sido observados en la superficie después de sismos que ocurren en las fronteras entre placas, en algunos casos estos desplazamientos llegan a alcanzar varios metros de magnitud (Prol, 1996).

Los contactos entre las placas se denominan límites y pueden ser de tres tipos diferentes, según el movimiento relativo entre ellas;

Límites divergentes (*bordes constructivos*): donde dos placas se separan, lo que produce el ascenso de material desde el manto para crear nuevo suelo oceánico.

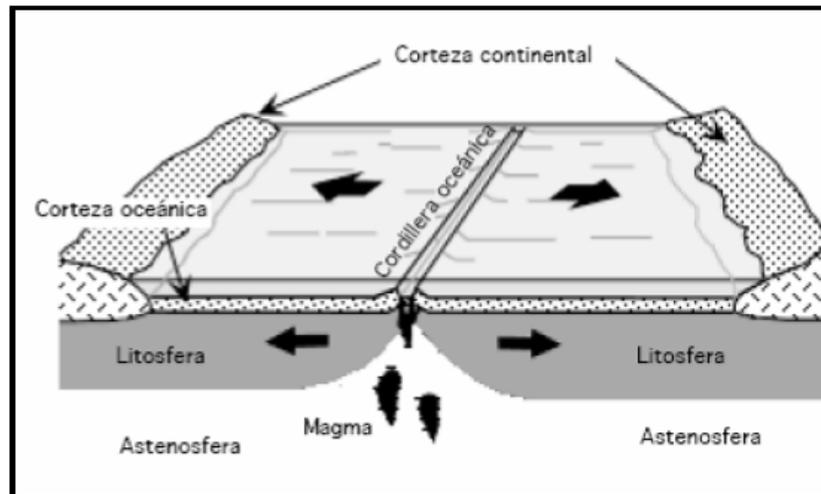


Ilustración 3: Frontera de placas divergentes (*dorsales oceánicas*)
(Huesca, 2008)

Límites convergentes (*bordes destructivos*): Las características de los bordes convergentes dependen del tipo de litosfera de las placas que chocan:

- a) Cuando una placa oceánica (más densa) choca contra una continental (menos densa) la placa oceánica es empujada hacia abajo, formando una zona de subducción. En la superficie, se crean fosas oceánicas, en el caso de que sea en el agua, o grupos de montañas, si es en tierra.
- b) Cuando dos placas continentales chocan, se forman extensas cordilleras formando un borde de obducción.
- c) Cuando dos placas oceánicas chocan, el resultado es un arco de islas.

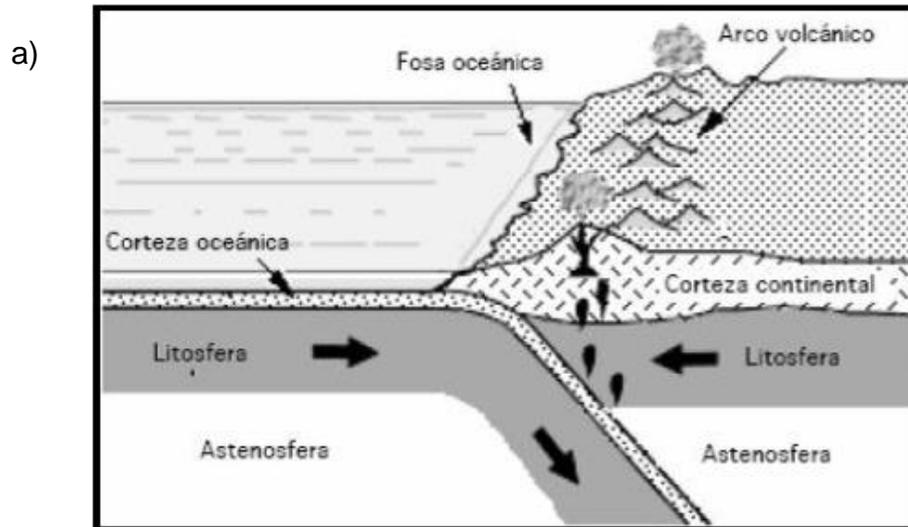


Ilustración 4: Convergencia continente-oceano (Huesca, 2008)

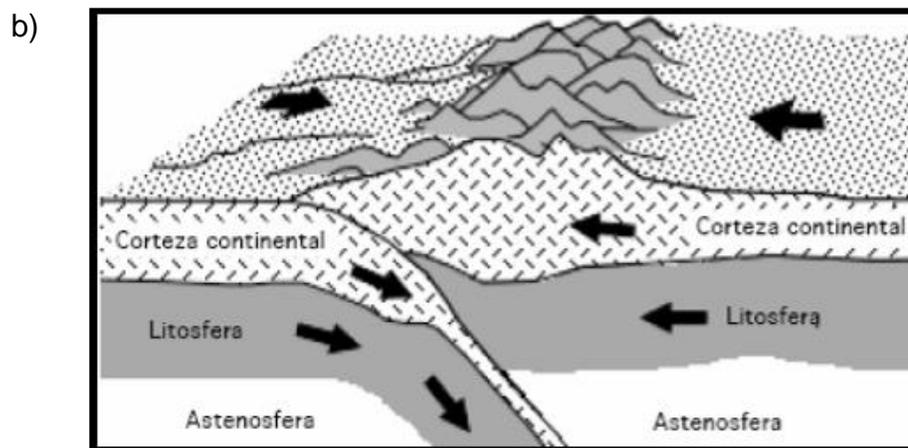


Ilustración 5: Convergencia continente-continente (Huesca, 2008)

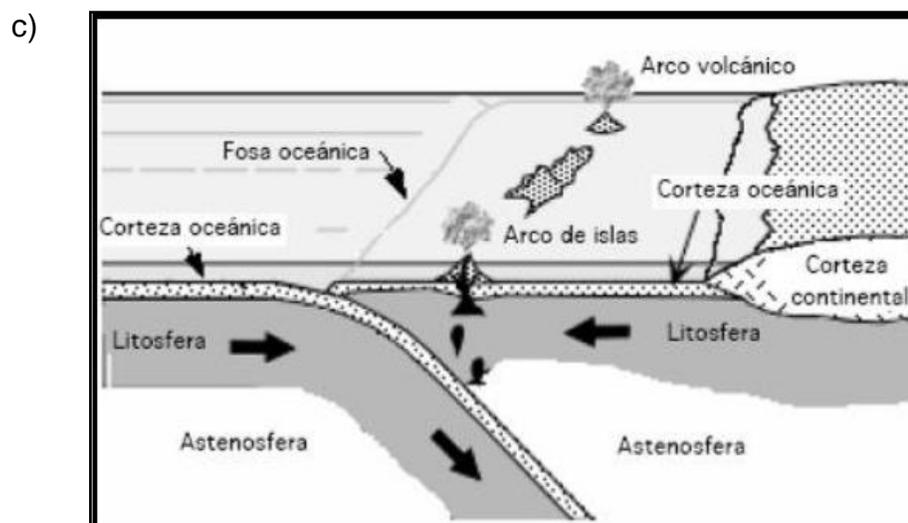


Ilustración 6: Convergencia oceano-oceano (Huesca, 2008)

Límites conservatorios (*bordes pasivos*): dos placas o trozos de una misma placa "resbalan" horizontalmente entre sí, en este caso ni se crea ni se destruye litósfera y esto es lo que se llama una falla transformada (Prol, 1996).

Las zonas de dispersión y subducción son las que más importancia tienen en el transporte de calor del interior a la superficie de la Tierra. Es en estas zonas, además de los puntos calientes, en donde se van a localizar la mayoría de las manifestaciones superficiales del calor interno de la Tierra.

1.3.1.- Las Manifestaciones termales en la superficie de la tierra

Las principales zonas donde el calor del interior se manifiesta en la superficie están circunscritas a las fronteras entre placas que pueden ser constructivas o destructivas (Prol, 1996).

Si las condiciones tectónicas son favorables, los magmas, por su movilidad, pueden ejercer un empuje hacia arriba y romper la costra superficial de la Tierra, formando volcanes por los que se desparraman lavas, cenizas y gases. Debajo se forman cámaras magmáticas que calientan las rocas circundantes y si estas rocas son permeables o están fracturadas, y existe circulación de agua subterránea, esta última capta el calor de las rocas, pudiendo ascender hasta la superficie a través de grietas o fallas, dando lugar a la formación de **aguas termales, géysers, fumarolas y volcanes de fango** (Llopis y Rodrigo, 2008). Los procesos hidrotermales ocasionan una transferencia de calor y de materia disuelta en un medio acuoso o gaseoso (Puente, 1988).

- **Manantiales termales**

Los manantiales termales son las manifestaciones superficiales más difundidas en todo el mundo y puede entenderse como aquel manantial del que brota agua más caliente que la temperatura del cuerpo humano (Prol, 1996). Son comunes en áreas de reciente vulcanismo, aunque de ninguna manera están confinadas a tales regiones. La mayoría de los manantiales termales están en regiones de

rocas pre-holocénicas que han sido sometidas a fuertes deformaciones (Waring *et al.* 1965 citado en Puente, 1988); ellos son especialmente numerosas en las cuencas de fosas tectónicas donde abundante agua subterránea circula a través de gruesas acumulaciones de sedimentos permeables y de rocas fracturadas (Puente, 1988).

La mayoría de las aguas termales caen dentro en uno de los tres tipos más comunes:

- 1) Aquellas que contienen grandes cantidades de carbonato de calcio en solución: Las aguas ricas en carbonato están confinadas esencialmente a áreas bajo las que hay calizas o dolomías. Los manantiales se elevan a través de gruesas capas de calizas y depositan hermosas terrazas de travertino rico en carbonato cuando las aguas alcanzan la superficie y exudan CO₂. La pérdida de CO₂ y gases ácidos elevan el pH del agua y por eso reducen la solubilidad de los carbonatos hasta que ellos comienzan a precipitar como anillos alrededor de los márgenes del manantial (Puente, 1988).
- 2) Aguas ácidas, usualmente ricas en sulfatos: Los tipos de manantiales sulfato-ácidos y cloruro-alcálico difieren en sus relaciones hidrológicas con el nivel freático. Los manantiales ácidos tienden a tener pequeñas descargas, cavernosos orificios de vapor, albercas turbias poco profundas y marmitas de lodo hirvientes y ellos son más comunes sobre las laderas que en las cuencas. Su bajo pH resulta primariamente de la oxidación del H₂SO₄ en una fase de vapor separada, aunque en algunos manantiales y fumarolas que están estrechamente asociadas con directas emanaciones volcánicas, el HCl puede ser importante. Las aguas son ricas en componente volátiles, como el B, CO₂, H₂S y NH₃, y contiene diferentes cantidades de Mg, Fe, Ca, Na y Si dependiendo del grado que estos elementos hayan sido lixiviados de las rocas circundantes. Los metales volátiles, como el Hg, Pb, Bi, Sn y As, no son muy comunes (Puente, 1988).

3) Aguas alcalinas, las cuales tienen a tener altos contenidos de cloruros: Los tipos cloruro-alcalino tiene un bajo contenido de componentes volátiles aunque son ricos en constituyentes como el Na, K, Cl, SO₄, HCO₃ y CO₃ que tienen altas solubilidades en agua líquida. El Fe es normalmente bajo, ya que él es precipitado desde el agua alcalina; el Ca y el Mg pueden precipitarse como carbonatos y sulfatos. La sílice coloidal puede estar presente, pero sus concentraciones dependen fuertemente de la temperatura a la cual el agua se equilibra con las rocas en profundidad (Puente, 1988).

- **Géysers**

Los géysers son de las manifestaciones superficiales más espectaculares, son una mezcla de agua líquida con vapor de agua, a una temperatura entre 70 y 100 °C, con gran cantidad de sales disueltas y en suspensión (Llopis y Rodrigo, 2008). Casi todos ocurren en regiones de vulcanismo reciente (Puente, 1988). Para que existan se deben conjuntar diversos factores: un lugar donde el agua se caliente mientras alcanza la temperatura necesaria para provocar la inestabilidad; una abertura del tamaño óptimo, a través de la cual se lance el agua, y canales subterráneos para traer agua de recarga después de cada erupción. Esencialmente, un géiser es un manantial termal que periódicamente se vuelve inestable hidrodinámica y termodinamicamente (Prol, 1996).

- **Fumarola**

Cuando la descarga de agua, vapor y gases es constante y no intermitente, lo que se tiene es una fumarola y en ocasiones puede alcanzar 500 °C. Se las denomina, en función de su composición química, carbónica, sulfurosa, clorhídrica, etc. (Llopis y Rodrigo, 2008). Las fumarolas son más comunes en las regiones volcánicas, aunque se pueden encontrar en cualquier lugar.

Los manantiales calientes algunas veces cambian a fumarolas y regresan otra vez a manantiales conforme el nivel de agua subterránea se eleva y baja con las lluvias estacionales (Puente, 1988).

No hay una abrupta demarcación entre los orificios de vapor en cráteres con una actividad intermitente y solfataras sobre los flancos o alrededor de las laderas de un volcán. Las tasas de descarga de vapor y de agua caliente en ambos sitios son fuertemente influenciadas por la disponibilidad de agua subterránea poco profunda. Donde las laderas del volcán son altamente permeables, como lo son en la mayoría de los grandes conos y volcanes escudo, las áreas hidrotermales están confinadas casi exclusivamente a las partes bajas alrededor de la base donde el nivel freático es somero (Puente, 1988).

a) Solfataras

Tipo de fumarola que emite vapor de agua y ácido sulfhídrico que, en contacto con el aire, se oxida y se transforma en azufre nativo. La temperatura de esos gases oscila entre los 90 y 100 °C. Las solfataras suelen aparecer al final del ciclo volcánico y son síntomas de cese de su actividad (Puente, 1988).

b) Mofetas

Tipo de fumarola cuya emisión son relativamente frías (unos 90 °C). Los gases que desprende son especialmente ricos en dióxido de carbono (Puente, 1988).

- **Volcanes**

Otro tipo de manifestación termal son los volcanes, y en general se puede definir a los volcanes como aquel sitio donde sale material magmático o sus derivados; formando una acumulación que por lo general toma una forma aproximadamente cónica alrededor del punto de salida (CENAPRED, 2004). Aunque se podría pensar que un volcán es una montaña que arroja lava, éste no es más que un tipo particular de volcán, el más conocido; sin embargo, hay volcanes que no son más que una grieta o bien, una depresión en la superficie de la Tierra. Existen

diferentes maneras de clasificarlas y pueden ser de acuerdo a: su forma, tipo de erupción y tipo de material que arrojan (Prol, 1996).

Los volcanes activos no se encuentran dispersos arbitrariamente sobre la superficie de la tierra, sino que se distribuyen por diferentes regiones definidas por los procesos tectónicos de escala global, como las interacciones de placas tectónicas que conforman la corteza y las corrientes convectivas del manto terrestre que las mueven (CENAPRED, 2004). En particular, México es una de las regiones tectónicamente activas y los volcanes son parte característica del paisaje de muchas regiones del país, particularmente en una franja central que se extiende desde Nayarit hasta Veracruz (CENAPRED, 2004).

- **Pozas de lodo**

Las pozas de lodo son otro tipo de manifestación termal, básicamente manantiales termales pero con muy poca agua. En general se forman por descargas de vapor de agua caliente que se encuentra a profundidad. Este vapor es rico en ácido sulfhídrico, que va a disolver las rocas circundantes transformándolas principalmente en arcillas, ópalo y cuarzo (Prol, 1996).

1.4.- GEOTERMIA

Puente en 1988, define a la Geotermia como aquella “rama de la Geofísica que estudia el régimen térmico interno de la tierra, la distribución de las temperaturas en la misma, el flujo del calor que las determina y el probable origen del calor terrestre.” En general, la palabra geotermia se refiere a la energía térmica natural existente en el interior de la Tierra. En la práctica se le denomina así al estudio y utilización de la energía térmica que, transportada a través de la roca y de fluidos, se desplaza desde el interior de la corteza terrestre hacia niveles superficiales de la misma, dando origen a los sistemas geotérmicos (Ilustración 7).

1.4.1.- Recursos geotérmicos

Recurso geotérmico es una concentración de calor que existe en la corteza terrestre en forma y cantidades tales que su extracción económica es actual o potencialmente posible (Llopis y Rodrigo, 2008).

El concepto de recurso geotérmico es tan amplio que engloba desde el calor que se puede encontrar en los horizontes más superficiales del suelo, hasta el calor almacenado en rocas situadas a las profundidades (Llopis y Rodrigo, 2008). En este sentido, se define como recurso geotérmico, aquella parte de la energía geotérmica que puede ser utilizada por el hombre. Para ello, el calor almacenado en el subsuelo se transporta a la superficie, mediante agua u otro medio, y se aplica a la producción de energía útil, en generar calor o electricidad (Jutglar *et al.* 2011).

Por lo que respecta a los tipos de recursos geotérmicos, se adopta la clasificación basada en el nivel de temperatura.

- Recursos de muy baja temperatura: menos de 30 °C.
- Recursos de baja temperatura: entre 30 y 90 °C.
- Recursos de mediana temperatura: entre 90 y 150 °C.
- Recursos de alta temperatura: más de 150 °C.

1.4.2.- Yacimientos geotérmicos

Cuando en un área geográfica concreta se dan determinadas condiciones geológicas y geotérmicas favorables para que se puedan explotar de forma económica los recursos geotérmicos del subsuelo, se dice que allí hay un yacimiento geotérmico. Se les puede clasificar conforme a diferentes criterios: contexto geológico, el nivel de temperatura, el modo de explotación y el tipo de utilización.

La clasificación más común es la de nivel de temperatura, y es la que se ha tenido en cuenta, con los mismos intervalos de temperatura anteriores.

- Yacimientos de muy baja temperatura: menos de 30 °C.
- Yacimientos de baja temperatura: entre 30 y 90 °C.
- Yacimientos de mediana temperatura: entre 90 y 150 °C.
- Yacimientos de alta temperatura: más de 150 °C.

Los yacimientos de alta temperatura con fluidos geotermales, o con rocas calientes, a más de 150 °C de temperatura, se encuentran en zonas geográficas con gradiente geotérmico extraordinariamente elevado, hasta 30 °C. cada 100 m. (Llopis y Rodrigo, 2008).

Esas zonas suelen coincidir con la existencia de fenómenos geológicos notables, como actividad sísmica elevada, formación de cordilleras en épocas geológicas recientes, actividad volcánica muy reciente y, principalmente, regiones volcánicas situadas en los bordes de las placas litosféricas. Se suelen explotar a profundidades comprendidas entre 1.500 y 3.000 m. (Llopis y Rodrigo, 2008).

Al introducir el término “explotación” de la energía geotérmica, las posibilidades de aprovechamiento quedan reducidas a zonas muy anómalas de la corteza en las que se dan una serie de factores concernientes a la temperatura, presión, permeabilidad, profundidad, etc., que de manera simplista pueden reducirse al siguiente sistema (Araña y Ortiz, 1984):

- **Fuente de calor:** un magma, que puede estar a 700 - 1.000 °C, situado a 5 -10 km de la superficie. En determinadas zonas con fuerte actividad tectónica como los graben (bloques hundidos y limitados por fallas normales), el magma se encuentra más cerca de la superficie y además puede ascender por fallas.

- **Acuífero:** una capa de rocas calientes permeables de las que el agua en circulación pueda extraer calor y que esté conectada a un área de recarga superficial, a través de la cual el agua meteórica pueda reemplazar a la que se escapa por las fuentes termales, o a la que es extraída mediante los pozos de explotación y que confiera al yacimiento geotérmico el carácter de “recurso renovable” (Araña y Ortiz, 1984).
- **Capa impermeable:** situada sobre el acuífero para que mantenga el agua atrapada y la presión del mismo.
- **Reservorio con alta permeabilidad:** El techo del reservorio debe ser accesible por sondeos mecánicos. La subida de los fluidos hasta la superficie puede ser espontánea, cuando domina el vapor o se produce la vaporización en el fondo del pozo; en otro caso habrá que activar el pozo por cualquiera de las técnicas convencionales, como la inyección de aire, o el bombeo (Araña y Ortiz, 1984).

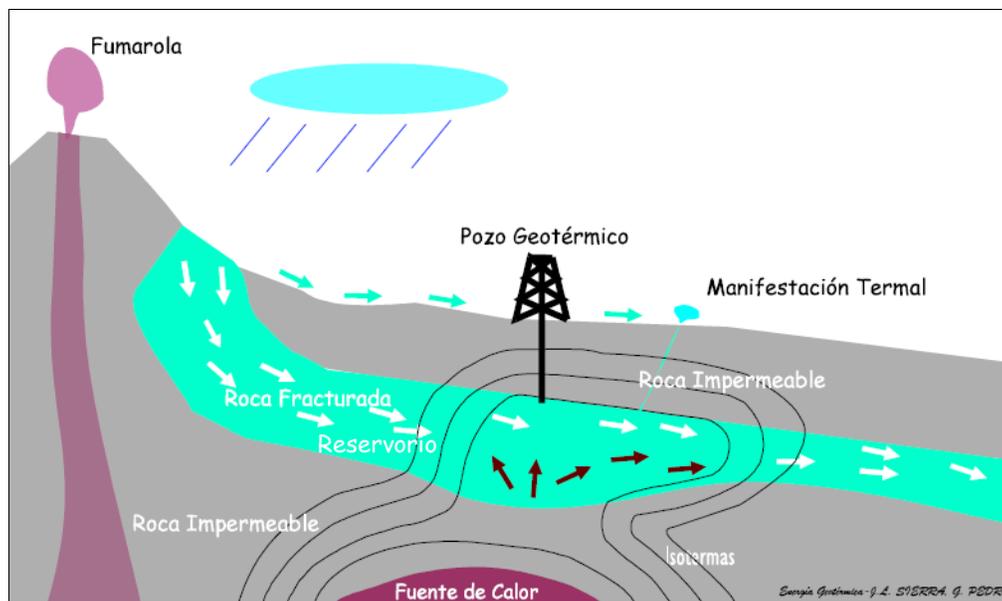


Ilustración 7: Sistema geotérmico (Sierra y Pedro, 1998).

1.5.- ENERGÍA GEOTÉRMICA

Energía geotérmica es la energía almacenada en forma de calor por debajo de la superficie sólida de la Tierra. Engloba el calor almacenado en rocas, suelos y aguas subterráneas, cualquiera que sea su temperatura, profundidad y procedencia, quedando excluidas las masas de aguas superficiales tanto continentales o marinas (Llopis y Rodrigo, 2008).

El calor contenido en rocas y suelos es demasiado difuso para ser extraído directamente de forma económica, siendo necesario disponer de un fluido, generalmente agua, para transportar el calor hacia la superficie de forma concentrada, mediante sondeos, sondas geotérmicas, colectores horizontales, o mediante intercambiadores de calor tierra-aire enterrados a poca profundidad en el subsuelo (Llopis y Rodrigo, 2008).

1.5.1.- Aplicaciones y tipos de energía geotérmica

Las aplicaciones que se pueden dar a un fluido geotermal dependen de su contenido en calor, o lo que es lo mismo, de su entalpía (Llopis y Rodrigo, 2008).

Entalpía es la cantidad de energía térmica que un fluido, o un objeto, puede intercambiar con su entorno. Se expresa en kJ/kg o en kcal/kg.

En la siguiente ilustración se muestran las aplicaciones más importantes de la energía geotérmica con los rangos de temperatura de utilización.

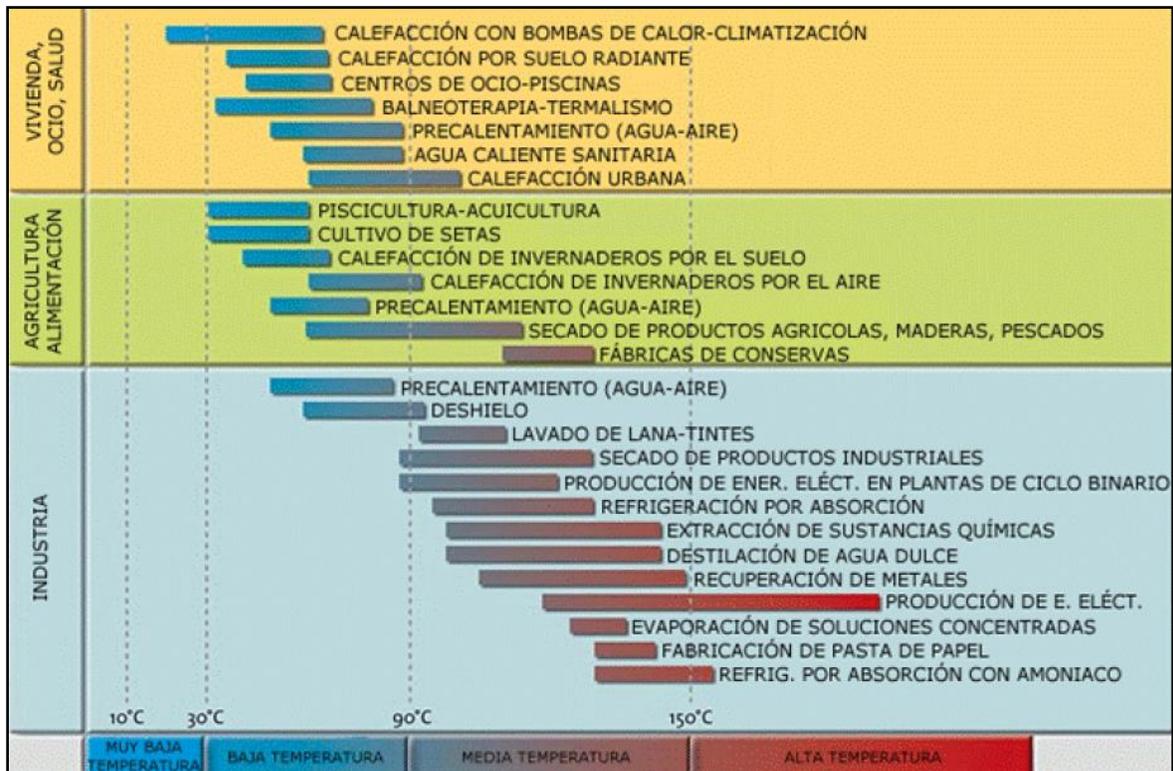


Ilustración 8: Principales usos de la energía geotérmica en función de la temperatura (Llopis y Rodrigo, 2008).

La división que aparece en la tabla es la que establece el “Código minero” en Francia, y se puede aplicar tanto a la energía geotérmica, como a las explotaciones, los yacimientos y los recursos geotérmicos (Llopis y Rodrigo, 2008).

Así pues, se establecen las cuatro categorías siguientes para la energía Geotérmica:

- **Alta temperatura: más de 150 °C.**

Una temperatura superior a 150 °C permite usar directamente el vapor del subsuelo como fluido de trabajo, si la presión del mismo lo permite.

- **Media temperatura: entre 90 y 150 °C.**

Permite producir energía eléctrica utilizando un fluido de intercambio, que es el que alimenta a las centrales.

- **Baja temperatura: entre 30 y 90 °C.**

Su contenido en calor es insuficiente para producir energía eléctrica. El fluido es agua en estado líquido que puede utilizarse para calefacción, procesos industriales y agrícolas o fines terapéuticos (balnearios) (Jutglar *et al.* 2011).

- **Muy baja temperatura: menos de 30 °C.**

El fluido puede ser agua y su utilización se limita a procesos de calefacción a bajo nivel térmico, como por ejemplo piscifactorías o calefacción por suelo radiante o calefacción con apoyo de bombas de calor. También se aplica a fines terapéuticos y lúdicos (Jutglar *et al.* 2011).

1.5.2.- Energía geotérmica y desarrollo sostenible

El calor terrestre es una fuente de energía duradera para la producción de calor y de electricidad, que no depende de las condiciones climatológicas, de la estación anual, del momento del día ni del viento. La diversidad de temperaturas de los recursos geotérmicos permite un gran número de posibilidades de utilización (Llopis y Rodrigo, 2008).

La energía geotérmica representa una respuesta local, ecológica y eficiente para reducir costes energéticos.

Energía Renovable

A la escala del planeta, la energía geotérmica es el recurso energético más grande que existe. Aunque la Tierra se enfría, pues evacua más calor que el que produce, el ritmo de ese enfriamiento es de unos 130 °C cada mil millones de años. A causa de la lentitud del mecanismo de difusión térmica, la Tierra está perdiendo hoy en superficie el calor que ella misma produjo en el pasado (Llopis y Rodrigo, 2008).

El calor de la Tierra es ilimitado a la escala humana y estará disponible muchos años en sus yacimientos para las generaciones futuras, siempre que la explotación de los recursos geotérmicos se haga de forma racional. Todo lo contrario que las energías fósiles que se agotan a medida que se extraen (Llopis y Rodrigo, 2008).

Energía limpia

Ninguna instalación que emplee energía geotérmica precisa quemar combustibles, por consiguiente, no contribuye a la emisión de gases de efecto invernadero (Llopis y Rodrigo, 2008).

De forma general, se puede decir que las centrales emiten a la atmósfera pequeñas cantidades de CO^2 , muy pequeñas cantidades de SO^2 , y no emiten óxidos de nitrógeno (Llopis y Rodrigo, 2008).

Las sales y los minerales disueltos son reinyectados, con el agua sobrante del proceso, en sus acuíferos. Las arenas y sólidos en suspensión son filtrados, secados y depositados como lodos en lugares apropiados. Algunos de esos sólidos, como por ejemplo zinc, sílice y azufre, pueden recuperarse como subproductos y comercializarse (Llopis y Rodrigo, 2008).

Energía económica

El acceso a un recurso geotérmico de baja, media o alta temperatura necesita de una inversión inicial elevada. Particularmente caras resultan las fases de exploración en terrenos desconocidos, y la realización de uno o varios sondeos de investigación. La inversión disminuye a medida que se reduce el área a investigar y se lleva a cabo el desarrollo del yacimiento (Llopis y Rodrigo, 2008).

Siendo la inversión inicial elevada, el coste de explotación es bajo y cada vez será más competitivo con la explotación de las energías fósiles, donde los precios irán creciendo con el agotamiento de los recursos y las restricciones ambientales (Llopis y Rodrigo, 2008).

Energía continua

Contrariamente a la energía solar o a la eólica, la energía geotérmica no depende del clima, de la radiación solar ni del viento. Está disponible 24 horas al día, 365 días al año (Llopis y Rodrigo, 2008).

La energía geotérmica depende de las características intrínsecas del subsuelo (gradiente geotérmico, permeabilidad de las rocas, etc.), constantes para cada caso concreto, lo cual asegura una gran regularidad en su utilización (Llopis y Rodrigo, 2008).

Energía para todo el mundo

A diferencia de las energías fósiles, las más utilizadas hoy en día, los recursos geotérmicos no están localizados en lugares concretos, frecuentemente desérticos o en el fondo de los mares. El calor del subsuelo está presente en todos los continentes a disposición de la Humanidad (Llopis y Rodrigo, 2008).

Dependiendo de las formaciones geológicas o de la composición de las rocas, y del gradiente geotérmico, la energía geotérmica será de mayor o menor temperatura, y más o menos fácil de extraer, pero las técnicas existentes hoy en día permiten un desarrollo planetario de la energía geotérmica (Llopis y Rodrigo, 2008).

Energía local

Por su propia naturaleza, la energía geotérmica es una energía local, para consumir sobre el propio terreno. Reduce la dependencia de importaciones energéticas y asegura la regularidad en el abastecimiento. Disminuye las pérdidas energéticas derivadas del transporte de electricidad y la contaminación que provoca el transporte de combustibles por carretera (Llopis y Rodrigo, 2008).

La energía geotérmica ofrece oportunidades económicas para la implantación de nuevas industrias y favorece el desarrollo local (Llopis y Rodrigo, 2008).

1.6.- MÉXICO Y SU RIQUEZA GEOTÉRMICA

La mayor parte del territorio mexicano está caracterizado por una gran actividad tectónica y volcánica que ha tenido lugar desde hace varias decenas de millones de años hasta el presente. Esta actividad invariablemente ha dejado huella a lo largo de todo el país en forma de sistemas volcánicos y sistemas hidrotermales, tanto fósiles como activos (Prol, 1996). Hasta el año 2005 El Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) había estimado un total de 2,332 manifestaciones termales distribuidas en 27 de los 32 Estados Mexicanos (Torres *et al.* 2005 citado en Mulás, 2005).

La presencia de estos recursos se extiende por todo el país, siendo especialmente abundante en su parte central, coincidiendo con la Faja Volcánica Transmexicana (Ilustración 9) la cual contiene la mayoría de los volcanes mexicanos que han presentado actividad reciente:

Ceboruco, Popocatépetl, Volcán de Colima, Pico de Orizaba, Parícutín, Jorullo, Xitle, etc.; además de otros volcanes que quedan fuera de esta zona, como son: Bárcena, Tres Vírgenes, El Chichón y El Tacaná (Prol, 1996).



Ilustración 9: Distribución geográfica de las manifestaciones termales Mexicanas (IIE en Mulás, 2005).

Además de la gran cantidad de manantiales asociados con estos centros volcánicos, se cuenta también con manantiales termales relacionados con zonas de volcanismo más antiguo (mayor de 30 millones de años), por ejemplo la Sierra Madre Occidental, que sin embargo aún contiene suficiente calor como para provocar este tipo de manifestaciones (Prol, 1996).

Uno de los principales factores que determina la aparición de manantiales, aparte de la fuente de calor, es la existencia de agua suficiente para mantener la actividad hidrotermal.

1.6.1.- Sistema Volcánico Transversal

El Sistema Transversal se extiende desde el Volcán de Colima hasta el Cofre de Perote y Pico de Orizaba (Yarza, 1992), atravesando casi en su totalidad al Estado de México.

Los principales elementos de este elevado sistema montañoso son: el Pico de Orizaba, el más alto de la República; el Cofre de Perote; los Cerros de las Derrumbadas, situados al oeste del Citlaltépetl, y donde el subsuelo está tan caliente que se aprovecha para los baños de vapores azufrosos o temascales; los cerros del Piñal y del Tintero, poco elevados, en el Valle de Puebla; la Malitzin, con sus extendidas faldas; las Sierras de Taxco, Acopinalco y Singuilucan; la conocida Sierra Nevada, con la Iztaccíhuatl, el Popocatépetl, el Telapón, Tláloc y el Papayo; la Sierra del Ajusco, con sus numerosos cráteres; los cerros de Jalatlaco, Ocuila, que forman con sus manantiales la cuenca donde nace el río Lerma; el Nevado de Toluca; las serranías de La Gavia, Valle de Bravo, Tlalpujahuá y Angangueo; las sierras de Maravatío, Ozumatlán, Santa Clara y Pátzcuaro; las sierras de Apatzingán, Jiquilpan y el Tigre, Sierra de Tapalpa, Sierra de la mascota, cerca de la costa del Pacífico (Yarza, 1992).

Todas estas unidades montañosas y volcanes donde existen diversas formas de manifestaciones volcánicas (Yarza, 1992).

Algunos aparatos o edificios volcánicos de la Sierra Volcánica son de rocas de tipo ácido y están contruidos por andesitas y traquitas, principalmente, con escasas corrientes de lava; pero en los flancos norte y sur de la misma, existen numerosos volcanes que han arrojado grandes corrientes basálticas modernas, de tipo básico (Yarza, 1992).

1.6.2.- Regiones volcánicas del Estado de México

El Eje Volcánico Transversal atraviesa el Estado de oriente a poniente, dividiéndolo en dos partes: el norte que corresponde a la Mesa de Anáhuac de bastante elevación, y el sur, una zona menos alta que forma la cuenca del Río Balsas.

El Valle de Toluca está separado del Valle de México por las sierras de Monte Bajo (Atzacapozaltongo), Monte Alto (Jilotzingo) y la Sierra de las Cruces de 3, 217 m.s.n.m. esta es la arista entre las cuencas del Río Pánuco que corre hacia el oriente y el Lerma que se dirige al poniente. La sierra está formada por grandes depósitos de andesitas y traquitas del cenozoico (Yarza, 1992).

En el lado oriental del Estado de México se encuentra la Sierra Nevada con los altos volcanes Popocatepetl, Iztaccíhuatl, Papayo, Telapón, Tláloc y Tacamac. El Popocatepetl de 5, 452 m.s.n.m. y el Iztaccíhuatl de 5, 286 m.s.n.m. son los dos elementos más importantes y tienen una dirección media de norte a sur. En la Sierra Nevada hay rocas de dacitas, andesitas y basaltos (Yarza, 1992).

Los arroyos que se originan en la Sierra Nevada corren en dirección transversal a ella, solamente en los extremos norte y sur son radiales. El caudal de las corrientes superficiales no está en relación con la media pluviométrica que es fuerte por la altura, la vegetación y la fusión de las nieves; esto se debe a la gran permeabilidad del material volcánico en gruesas capas que permite la rápida infiltración y el agua va a formar lechos subterráneos a profundidades no muy grandes (Yarza, 1992).

El Xinantécatl o Nevado de Toluca de 4, 558 m.s.n.m. está ubicado en el centro del vasto sistema de montes y lomeríos que limitan el Valle de Toluca y a la Cuenca del río Lerma. Sus rocas son de traquita roja y andesita.

Al noroeste del Estado están situados las Sierras de San Andrés, San Felipe, el Cerro Xocotitlán de 3, 928 m.s.n.m. Jilotepec y El Peñón de Ñadó de 3, 563 m.s.n.m. En esta región se forma el Arroyo Zarco y el Río Ñadó que van hacia el norte.

Al pie de la Sierras Volcánicas, ya en las partes llanas, los manantiales son abundantes en las zonas de contacto entre el material volcánico y el sedimentario.

Los manantiales termales están relacionados con zonas volcánicas, las hay en Agua Amarga a 37 °C (con propiedades medicinales); Atotonilco en Atizapán; Atotonilco en San Pedro de los Baños a 50 °C (con propiedades medicinales), están ya afectados por la perforación de pozos; Donato Guerra en Valle de Bravo; Ixtapan de la Sal, hervideros y manantiales a 95 °C (con propiedades medicinales); Ixtlahuaca en Toluca; Tenango del Valle en Tenancingo; Toxhí en Temascalcingo, que tiene propiedades medicinales; Atizapán es un pozo artesiano a 22 °C (Yarza, 1992).

CAPÍTULO II. CARACTERIZACIÓN BIOFÍSICA DEL ESTADO DE MÉXICO

2.1.- ASPECTOS DEL MEDIO ABIÓTICO

2.1.1.- Localización geográfica

El Estado de México se ubica en la parte sur de la altiplanicie meridional, en una de las regiones más elevadas del país (Herrera, 1993) y está comprendido entre los meridianos 98° 35' y 100° 36' de longitud oeste del meridiano de Greenwich y los paralelos 18° 21' y 20° 17' de latitud norte, con 2, 249, 995 hectáreas (POETEM, 1999).

Colinda al norte con Michoacán de Ocampo, Querétaro de Arteaga e Hidalgo; al este con Hidalgo, Tlaxcala, Puebla, Morelos y el Distrito Federal; al sur con Morelos y Guerrero, y al oeste con Guerrero y Michoacán de Ocampo.

2.1.2.- Fisiografía

El Estado de México se localiza en la parte más alta de la Mesa Central, dentro de la Altiplanicie Mexicana, lo que origina gran diversidad de topoformas, con zonas abruptas y escarpadas en regiones montañosas, y zonas con escasa pendiente, característica de los valles, lomeríos y llanuras. Si se considera el aspecto fisiográfico, su configuración está comprendida, en parte, por dos grandes provincias: la del Eje Neovolcánico y la Sierra Madre del sur (Herrera, 1993).

Provincia del Eje Neovolcánico: Abarca 75.65 % de la superficie del Estado de México. La integran grandes sierras volcánicas, coladas lávicas, conos dispersos, amplios escudos volcanes de basaltos, depósitos de arenas y cenizas, etcétera, dispersos entre extensas llanuras.

Provincia Sierra Madre del Sur: Esta provincia fisiográfica ocupa el 24.35 % del territorio de Estado de México, presenta una orientación de noroeste – sureste.

Esta región es considerada las más compleja y menos conocida, sus rasgos particulares se deben mucho a su relación con la placa de cocos. Está representada por sistemas de topoformas como; sierra alta compleja con cañadas y sierra de cumbres tendidas.

2.1.3.- Geología

Por lo que respecta a la litología, el territorio estatal está constituido por rocas de origen volcánico reciente (rocas ígneas), principalmente del cuaternario y en menor medida del mesozoico; sedimentarias (formadas a partir de la acumulación de sedimentos) representadas por rocas carbonatadas marinas del mesozoico y depósitos fluviales y lacustres del cuaternario; y metamórficas (ígneas y/o sedimentarias que han sufrido alteraciones por presión y temperatura) predominantemente de la era mesozoica (POETEM, 1999).

De acuerdo con su edad, las rocas más antiguas, del mesozoico, representan el 12% del territorio, las rocas del terciario medio cubren el 18% y las recientes, del cuaternario, ocupan el 70% aproximadamente (POETEM, 1999).

Las rocas más jóvenes en el estado, afloran desde la parte oriental, nororiental y central del estado hasta el límite norte con el Estado de Hidalgo; consisten en rocas volcánicas extrusivas, como depósitos sedimentarios fluviales y lacustres simultáneamente generados con el vulcanismo, y consecuencia directa de éste es el bloqueo del drenaje. Estas rocas recientes son parte de la franja volcánica transmexicana (POETEM, 1999).

Desde el punto de vista estructural, destacan entre los elementos más importantes los sistemas de falla normal que, a juzgar por las rocas que afectan, se desarrollaron desde el terciario hasta el reciente. De estos elementos, destacan: el sistema de fallas cuaternarias de Ixtlahuaca-Perales, en el valle de Toluca, y el fallamiento que conforma el graben de Acambay, que también es de edad cuaternaria. Estos fallamientos afectan rocas volcánicas y sedimentos lacustres;

es notoria la presencia de elementos estructurales en la región de sierras templadas (POETEM, 1999).

2.1.4.- Edafología

Las condiciones geológicas, topográficas y climáticas propician una gran diversidad de suelos (Herrera, 1993). En el territorio mexiquense se presentan 34 de las 153 unidades de suelo establecidas en el ámbito mundial (POETEM, 1999), entre las principales destacan:

El suelo de tipo feozem predomina en la entidad, localizándose principalmente en las partes nororiente y centro, en condiciones normales mantiene casi cualquier tipo de vegetación. Los andosoles ocupan la porción centro y suroriente del estado.

Los Regosoles se localiza en la porción sur y suroriente de la entidad, por sus características de profundidad y pedregosidad los hacen poco atractivos para el desarrollo de la agricultura. Los vertisoles se localizan principalmente en climas templados y cálidos, por lo que la vegetación asociada es muy variada, en la entidad se les localiza hacia el nororiente y centro. El cambisol se encuentra en las porciones sur y oriente de la entidad. En pequeñas porciones podemos encontrar luvisoles, específicamente en los municipios de Jiquipilco, Temoaya, Morelos, Lerma y Ocoyoacac. Los leptosoles ocupan principalmente áreas montañosas.

Los suelos de tipo planosol cubren porciones menores en la entidad, se pueden encontrar en la porción norte. El acrisol cubre principalmente zonas montañosas de origen volcánico. Los suelos de tipo Solonchack, Fluvisol, Gleysol e Histosol, se presentan en menores porciones del territorio estatal.

La clase textural dominante es media en la mayoría de los tipos de suelo y la textura fina se restringe a las áreas ocupadas por vertisoles, solonchaks y acrisoles; mientras que la textura gruesa se encuentra en pequeñas áreas aisladas dominadas por regosoles y litosoles.

2.1.5.- Clima

Debido a las variaciones del relieve el Estado de México presenta diversidad de climas. Existen los templados en los valles elevados; semifríos y fríos en las montañas; semisecos en las zonas del noreste, semicálidos y cálidos en las regiones del sur y suroeste.

Prevalecen temperaturas moderadas en 67% de la superficie estatal, con valores medios anuales entre 12 y 18 °C, y bajas en cerca de 12%, con cifras medias de 5 a 12 °C. Conforme decrece la altitud hacia el suroeste y sur, la temperatura medio anual asciende al rango de 18 a 22 °C en poco menos del 11% de la superficie estatal y a más de 22 °C en el 10%. Al incrementarse la altitud disminuye la temperatura hasta llegar a valores medios al año entre 2 y 5 °C en las cimas de Nevado de Toluca, del Popocatepetl y del Iztaccíhuatl (INEGI, 2001).

En cuanto a la pluviometría, la región más seca se localiza, a manera de franja, en el noreste, donde la precipitación anual varía entre 500 y 600 mm. A partir de aquí, la precipitación anual incrementa gradualmente hacia el sureste, oeste y suroeste hasta llegar a 2,000 mm en los terrenos próximos al volcán Ajusco, los situados al suroeste del Nevado de Toluca y los aledaños a las poblaciones de Tejupilco y Amatepec (INEGI, 2001).

Esas condiciones de temperatura y precipitación han dado lugar al predominio de climas templados en poco más de la mitad del territorio estatal, distribuyéndose en el oeste, centro, norte y este. En menor proporción se encuentran los climas semifríos, localizados en los cerros y serranías por arriba de los 3,000 m de altitud; los semicálidos, bordeando por el suroeste y sur a los climas templados; los cálidos principalmente en el extremo suroeste; los semisecos, en el noreste; y por último el clima frío, en las cimas de los volcanes Nevado de Toluca, Popocatepetl y del Iztaccíhuatl (INEGI, 2001).

2.1.6.- Hidrología

La ubicación del Estado de México lo define como cabecera de las cuencas principales de los ríos Lerma, Balsas y Pánuco.

Cuenca del río Pánuco

La cuenca hidrográfica del Pánuco se localiza hacia la parte norte y oriente del estado, abarca 9, 026, 280, 000 m². Entre los cuerpos de agua que destacan se encuentran los lagos de Texcoco, Chalco de Zumpango (Herrera, 1993).

Aquí existen diversas corrientes perennes e intermitentes. Entre las principales están el Río Cuautitlán, localizado al norte del Distrito Federal; el Salado, al norte de la presa Zumpango, el Órgano, situado en los municipios de Tepetlaoxtoc y Otumba, y el Ñadó, situado en el noroeste del Estado (Herrera, 1993).

Cuenca del Alto Lerma

La cuenca Lerma-Chapala-Santiago cubre la porción centro-occidente del estado, abarca una superficie de 5, 395, 450, 000 m². El Río Lerma nace en el municipio de Almoloya del Río, y recorre 177.87 kilómetros en dirección hacia el noroeste hasta el municipio de Temascalcingo (Herrera, 1993).

La mayoría de las corrientes es de tipo intermitente, ya que en período de lluvias actúan como colectores; algunos otros se convierten en vertederos como Río Verdiguél, donde se desaguan desechos domésticos e industriales. El cauce del Río Lerma se interrumpe por la Presa José Antonio Alzate, que marca el límite entre el curso Alto y Medio de la Cuenca (Herrera, 1993).

Cuenca del río Balsas

Se localiza en la parte sur del territorio estatal, y ocupa una superficie de 9, 571, 540, 000 m², sobre las áreas de Tejupilco, Valle de Bravo y Coatepec Harinas, y en pequeños sectores al oriente del Estado, se distingue porque se sitúa sobre terrenos montañosos estrechos y pequeños valles (Herrera, 1993).

Los escurrimientos están integrados por numerosos ríos de importantes caudales, como los de Temascaltepec y Sultepec. Otras corrientes relevantes son los ríos Topilar, San Pedro, Amacuzac, Cutzamala, San Felipe-El Naranjo, Meyuca, San Martín y Chalma (Herrera, 1993).

2.2.- ASPECTOS DEL MEDIO BIÓTICO

2.2.1.- Vegetación

El territorio estatal se localiza dentro de la zona biogeográfica Neotropical, y está dividida en dos regiones: la Xerofítica mexicana, ubicada en la parte semiárida del norte y noreste. La región Caribeña comprende las áreas cálidas y semicálidas, localizadas al interior de la provincia fisiográfica denominada depresión del Balsas (Herrera, 1993).

El Estado de México cuenta con 609, 000 hectáreas arboladas; 560, 000 hectáreas de bosque de clima templado y frío, y 49, 000 hectáreas de matorral, chaparral y selva baja caducifolia (Herrera, 1993).

Bosques

La vegetación arbórea prospera principalmente en las regiones templadas y semifrías, propias de los sistemas montañosos del estado. En cuanto a su composición y estructura existen variantes que van desde masas de encino, pasando por los bosques mixtos donde se mezclan con encinos, hasta los bosques puros de coníferas. Los bosques en la entidad se localizan principalmente en: Sierra de Monte Alto, Sierra de Monte Bajo, de las Cruces, del Ajusco, Sierra de Río Frío, Sierra Nevada, y de San Andrés, Mesa de los Pinos, Sierra Tepotzotlán, Sierra Tlalpujahuá, y de Guadalupe, Sierra de Patlachico, Sierra de Valle de Bravo, Sierra Morelos, Sierra de Nanchititla y de Temascaltepec, Sierra del Hospital, Sierra de Goleta, Sierra San Vicente y Sierra de Zacualpan (INEGI, 2001).

Selva baja caducifolia

Esta vegetación se caracteriza porque los árboles pierden sus hojas pequeñas en la época seca del año. Se observa en las laderas de los cerros cuyas altitudes son menores a los 1, 700 m.s.n.m. en los ambientes cálidos de la región fisiográfica del Balsas, al sur suroeste del Estado en los municipios de Tejupilco, Amatepec y Tlatlaya. En este tipo de vegetación predominan los copales (*Bursera spp*), tepehuajes (*Lysiloma spp*), pinzanes o huamuchiles (*Pithecellobium dulce*), amates (*Ficus spp*), cactus columnares como *Neobuxbaumia*, y en zonas alteradas son comunes las anacardiáceas irritantes de los géneros *Pseudosmodium* y *Comocladia*, también conocidas como cuajote rojo tetlatia, (Herrera, 1993).

Matorral xerófilo

En la zona semiárida del norte se encuentra vegetación arbustiva no mayor de 5 metros de altura, con algunos elementos arbóreos esparcidos, hojas muy pequeñas o inclusive reducidas a espinas y tallos, adaptados para el almacenamiento de agua.

Pastizal

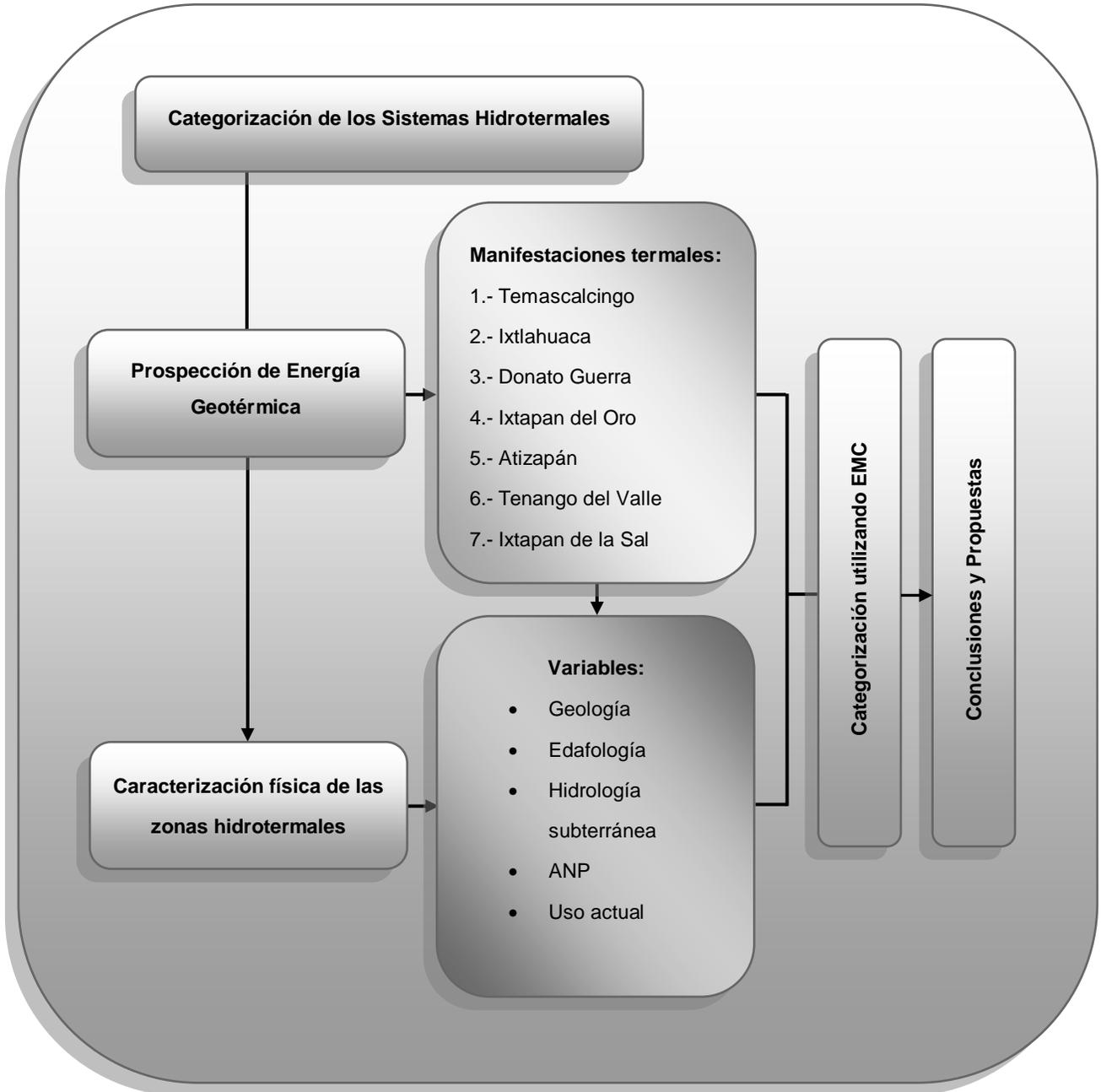
Son comunidades vegetales donde abundan los pastos o gramíneas herbáceas; ocupan planicies o laderas de pendiente ligera.

Vegetación acuática

Está formada por especies arraigadas, sumergidas o emergidas, por las flotantes y plantas ribereñas. Estas comunidades crecen en los cuerpos de agua estancados o en ríos.

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

Esquema 1: Diseño Metodológico



La Metodología se desarrolla en dos partes; en la primera se realizó un estudio preliminar para la prospección de energía geotérmica, únicamente con el fin de ubicar sitios con manifestación hidrotermal en el Estado de México y conocer sus características físicas, a partir de las cuales se categorizaron para conformar el segundo apartado.

PROSPECCIÓN DE ENERGÍA GEOTÉRMICA

Actualmente se utilizan diversas técnicas para la prospección de la energía geotérmica, estos suelen ser sofisticados, detallados, precisos pero también costosos a medida del avance del estudio y el fin para el cual se desee emplear la energía. Un estudio preliminar consiste en recopilar y evaluar la información existente sobre la región prospectada. Se buscan y analizan estudios anteriores de geología regional, mapas geológicos y topográficos, datos geofísicos, meteorológicos, hidrológicos, así como información sobre manifestaciones termales. Por sus costos relativamente bajos, corresponde al punto de partida de cualquier proyecto de prospección del recurso geotérmico.

La fase de prospección consistió en la identificación y localización de las fuentes termales del Estado de México. Se partió de la información arrojada por el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), dicha institución ha desarrollado numerosos estudios para detectar sitios de interés geotérmico en nuestro país. Yarza (1992), también menciona algunas zonas con manifestaciones hidrotermales en el territorio mexiquense. De estas dos fuentes se seleccionaron siete zonas de estudio ubicados en los municipios de Temascalcingo, Ixtlahuaca, Donato Guerra, Ixtapan del Oro, Atizapán, Tenango del Valle e Ixtapan de la Sal.

Cabe destacar que una vez realizado todo el proceso evaluación y debido a la escases de recursos para visitar cada uno de los puntos de interés hidrotermal, sólo se hizo una visita de campo a los sitios que obtuvieron mayores puntuaciones, es decir, a los manantiales termales de Donato Guerra e Ixtapan del Oro, esta visita se realizó el día 11 de Octubre de 2014, con ello se pudo corroborar la

localización geográfica y la existencia del manantial termal así como el tipo de aprovechamiento actual.

DESCRIPCIÓN Y CATEGORIZACIÓN DE LAS MANIFESTACIONES TERMALES

- **Descripción de las manifestaciones termales**

Se realizó la revisión documental y obtención de los insumos respectivos a las zonas de estudio en sus características: geológica, edafológica, hidrología subterránea, uso actual y Áreas Naturales Protegidas. Esta fase comprendió la consulta de información de instituciones gubernamentales, entre las que se citan: Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), entre otras, además de la revisión de Planes municipales de desarrollo urbano y algunas tesis desarrolladas para estas zonas, consulta de páginas web de H. Ayuntamiento de los municipios correspondientes.

Para la generación de cartografía se utilizaron datos vectoriales escala 1:250,000 de INEGI, 2010 dada la disponibilidad de la información y la escala de trabajo, considerando que el proyecto se realizó a nivel Estatal.

- **Categorización de las manifestaciones termales utilizando el Método de Evaluación Multicriterio (EMC)**

El proceso de categorización se desarrolló adoptando el enfoque de la Evaluación Multicriterio (EMC). De acuerdo a Gómez y Barredo (2005) la EMC se puede definir como un “conjunto de técnicas orientadas a asistir en el proceso de toma de decisiones.” Basa su funcionamiento en la evaluación de una serie de alternativas sobre la base de una serie de criterios. Este proceso incluye las siguientes fases:

Componentes de la EMC

- a) **Objetivos y alternativas:** De acuerdo a Eastman *et al.*, (1993 citado en Gómez y Barredo) en el mundo de la EMC un objetivo se puede entender como una función a desarrollar, aquí el objetivo indica la estructuración de la regla de decisión. Estos objetivos y decisiones se planean sobre un elemento determinado, es decir, sobre una serie de alternativas. Desde el punto de vista de las manifestaciones termales, se tratará de cada una de las partes del territorio susceptible de ser evaluadas y sobre las que se realizará la selección final. Cada alternativa está caracterizada o definida por los distintos criterios o factores que intervienen en la evaluación.
- b) **Selección de criterios:** el término criterio es entendido como “una evidencia sobre la cual se basa una decisión, la cual puede ser medida y evaluada” (Eastman *et al.* 1993 citado en Gómez y Barredo 2005). Por otro lado, Voogd (1983 citado en Gómez y Barredo 2005) lo define como “un aspecto medible de un juicio, por el cual una dimensión de las alternativas bajo consideración puede ser caracterizada”. Es decir, el criterio es el punto de referencia para una decisión a ser tomada (Gómez y Barredo 2005). En este sentido, los criterios seleccionados que permitieron la evaluación de las manifestaciones termales tiene que ver con aquellas características que hacen posible la continuidad del recurso geotérmico como es criterio geológico, edafológico, agua subterránea, ANP y su uso o aprovechamiento actual.
- c) **Regla de decisión:** se trata de la selección entre alternativas (o posibilidades de elección) las cuales pueden representar diferentes cursos de acción, hipótesis, localizaciones u otros conjuntos de elementos. Por extensión, la regla de decisión es el procedimiento a través del cual se obtiene una evaluación particular (Gómez y Barredo, 2005).
- d) **La evaluación:** para el proceso de evaluación, los criterios se estructuran como capa-criterio, para posteriormente ser evaluados por la regla de

decisión (Gómez y Barredo, 2005). En este caso se utilizó la técnica de Sumatoria Lineal ponderada. De acuerdo a la clasificación de técnicas de EMC Gómez y Barredo (2005 modificado de Jankowski, 1995). Este procedimiento está enmarcado en el grupo de los compensatorios aditivos. En dicho procedimiento, el valor obtenido por cada alternativa es el producto del peso del criterio. Siendo la alternativa que tenga el valor más alto la más adecuada o la mejor para la actividad evaluada.

- e) **Organización de la EMC:** la EMC se puede representar en una matriz que refleje la relación de criterios y alternativas. En esta matriz los Criterios (j) pueden ocupar la fila principal y las alternativas (i) la columna principal. Los valores internos de la matriz son llamados puntuaciones de criterios, éstos representan el valor o nivel de adecuación que ha obtenido cada alternativa en función de cada criterio (Gómez y Barredo, 2005). Es aquí donde los distintos tipos de EMC basan su funcionamiento intrínseco, para lograr la evaluación de las alternativas.

3.1.- LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS ZONAS DE MANIFESTACIONES HIDROTERMALES EN EL ESTADO DE MÉXICO

La mayor parte del territorio mexiquense se ubica dentro del Sistema Volcánico Transversal, la cual presenta condiciones geológico-estructurales favorables para la formación de zonas con temperaturas anómalas (IIE, 1767) así, dentro del Estado de México se han detectado ocho zonas con manifestaciones hidrotermales, siete de éstas se localizan dentro Sistema Volcánico Transversal.

Teóricamente las fuentes termales están relacionadas con actividades sísmicas, volcanes y fallas, que son procesos geodinámicas controlados por la transferencia y generación de calor en el interior de la tierra. En el caso del Estado de México, la mayoría de las manifestaciones termales están relacionadas con fallas geológicas.

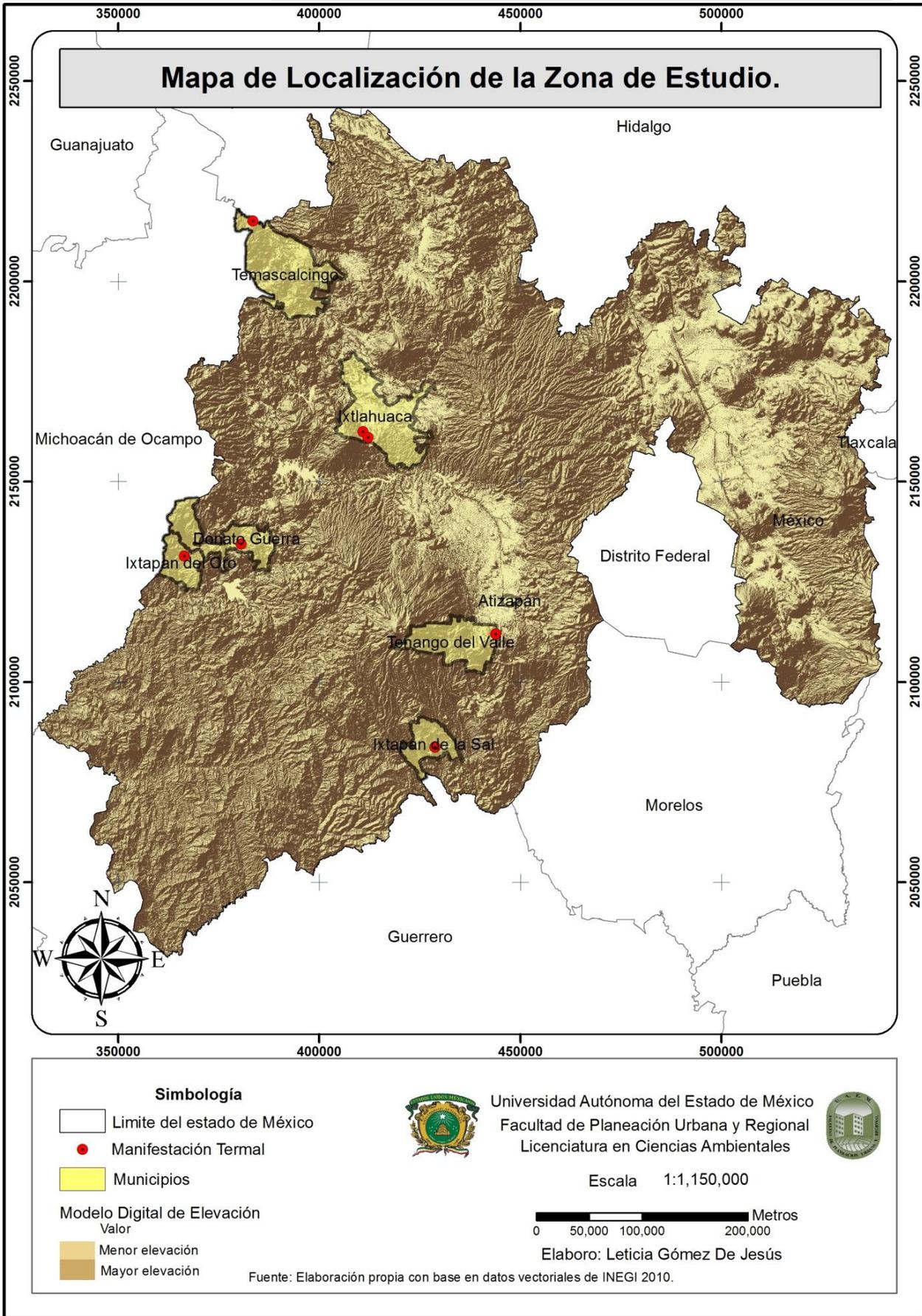
Las fuentes hidrotermales que en adelante se analizan corresponden a los municipios de Temascalcingo, Ixtlahuaca, Donato Guerra, Ixtapan del Oro, Atizapán, Tenango del Valle e Ixtapan de la Sal. A estos sitios de interés hidrotermal se realiza una descripción de las siguientes variables: geología, edafología, hidrología subterránea, su posible ubicación dentro de un Área Natural Protegida (ANP) y su situación actual, específicamente, si algunas de estas zonas ha tenido algún tipo de uso o aprovechamiento.

En la tabla siguiente se enlistan las ocho zonas con manifestación hidrotermal en el territorio mexiquense, el primer listado basado en Yarza (1992) y el segundo corresponde a investigaciones realizadas por el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE). De esta lista se seleccionaron las siete zonas anteriormente mencionadas porque ambas fuentes coinciden en la localización.

Tabla 1: Zonas con Manifestación Termal en el Estado de México

		Por: Yarza (1992)	Por: IIE(1767)
Zonas con Manifestación Termal en el Estado de México	1	Agua amarga 37° C.	San Pedro de los Baños
	2	Atotonilco en Atizapán	Ixtapan de la Sal
	3	Atotonilco en San Pedro de los Baños 50° C.	Ixtapan del Oro
	4	Afectados por perforación en Donato Guerra en Valle de Bravo	Donato Guerra
	5	Ixtapan de la Sal (hervideros y manantiales a 95° C.)	Ixtlahuaca
	6	Ixtlahuaca	Atotonilco
	7	Tenango del Valle en Tenancingo	Tenango del Valle
	8	Toxhí en Temascalcingo	Xochi

(Fuente: Basado en Yarza, 1992; IIE, 1767)



3.2.- DESCRIPCIÓN FÍSICA DE LAS ZONAS HIDROTERMALES DEL ESTADO DE MÉXICO

3.2.1.- Descripción física del sistema hidrotermal de Temascalcingo (San José Ixtapa)

- **Geología**

La zona se encuentra en una franja de intensos dislocamientos estructurales con dirección preferencial noroeste-sureste y este-oeste, entre los que destacan la falla de Acambay y la falla de Toxhi. Estas estructuras están cubiertas por unidades volcánicas del Mioceno Medio-Plioceno, y están afectadas a su vez, por un sistema de fallas y fracturas de orientación noreste-suroeste, este-oeste y norte-sur (INEGI, 2001).

Presenta rocas sedimentarias y volcanosedimentarias especialmente arenisca y conglomerados (Ver anexo: Mapa geológico). Por el tamaño grueso y medio de las partículas que las conforman funciona como zona de recarga.

- **Edafología**

De acuerdo a la clasificación edafológica en la zona donde se localiza la fuente termal se presenta el tipo de suelo feozem de textura mediana (Ver anexo: Mapa edafológico). Sus características principales consisten en tener una capa superficial obscura y suave, rica en materia orgánica y en nutrientes; este suelo es abundante en el municipio, además de estar cubierto con pastizales, matorrales, y sobre todo con bosque de encino y caducifolias. También se presentan en el municipio otros tipos de suelo como: planosol, andosol, vertisol y litosol.

- **Hidrología subterránea**

La zona de aguas termales “El Borbollón” en Temascalcingo brota a través de derrubios de rocas volcánicas que cubren a formaciones andesíticas y tobas

plumicíticas, registra una temperatura de 40 °C. y un gasto de 10 litros por segundo (lps) (INEGI, 2001). Se localiza dentro del acuífero (1502) Ixtlahuaca - Atlacomulco, aquí se pueden encontrar materiales consolidados con posibilidad de permeabilidad media.

A nivel acuífero y de acuerdo a la CONAGUA (2009) no existe volumen disponible para nuevas concesiones.

- **Relieve**

La manifestación hidrotermal “El Borbollón” está ubicada en la llanura de origen lacustre, en la localidad Ixtapa, al norte del municipio de Temascalcingo. Por sus características geológicas, topográficas y climatológicas pertenece a la Subprovincia de Mil cumbres enclavado en la provincia que cubre la mayor parte del estado, provincia del Eje Neovolcánico.

Los terrenos que ocupa el municipio se sitúan principalmente en el extenso valle de Solís, interrumpido por un relieve volcánico con laderas moderadas y disección fluvial moderada, el primer macizo volcánico se le denomina genéricamente como el volcán de Temascalcingo, pero en sí dicha estructura cuenta con la presencia de cinco cráteres volcánicos, dicho edificio volcánico tiene en su base una altura de 2, 550 m.s.n.m. y en su cumbre más alta alcanza los 3, 070 m.s.n.m. Forma hacia el sur por las estribaciones del Valle de Atlacomulco y Cambay (Lina, 2010).

- **Uso actual**

El manantial termal de San José Ixtapa se ubica en la región donde habita pueblo mazahua al noroeste del Estado. Actualmente tiene aprovechamiento como Parque Ecoturístico El Borbollón Pese-Ndeje S. P. R. de R. L., esta empresa turística se conforma por 39 socios de la comunidad de Santa María Solís (Lina, 2010).

El sitio ecoturístico está rodeado de paisajes naturales, su principal atractivo es el borbollón de aguas termales, además cuenta con un invernadero de plantas

medicinales. Su fauna silvestre se caracteriza por las siguientes especies: el gato montés, conejo, coyote, hurón, rata de campo, zorrillo, tlacuache, armadillo, ardilla, cacomiztle, murciélago, tuza y zorro (Lina, 2010).

Las especies más comunes de flora en la región son el pino, ocote, encino, cedro, roble, jacaranda y casuarina. Entre las especies de hierbas silvestres encontramos; el cardo, capulín, cedrón, carretilla, chayote. Entre las flores de ornato destacan las rosas, clavel, dalia, heliotropo, alcatraz, azalea, hortensia, flor de nube, bola de nieve, margarita, pensamiento, violeta. Y de plantas medicinales se pueden mencionar, el muiltle, el tabaquillo, toronjil, poleo, ruda, hinojo, epazote de perro, manrubio, árnica, epazote de zorrillo, ajeno y borraja (Lina, 2010).

La región mazahua está situada en la parte noroeste del Estado de México, y su cercanía con la ciudad de Toluca y el Distrito Federal ha impactado fuertemente a este pueblo indígena, sobre todo por la expectativa que generan las posibilidades de conseguir empleo. Sin embargo la familia sigue siendo el núcleo organizacional más fuerte de los mazahuas. Entre las manifestaciones culturales más importantes podemos destacar el tradicional baño de temascal, que se realiza con fines terapéuticos y curativos, las artesanías y la confección de textiles típicos de la región tales como cobijas, fajas, tapetes, cojines, manteles, morrales y quexquémitl de lana (Lina, 2010).



Ilustración 10: Parque Ecoturístico "El Borbollón", Temascalcingo (Imagen digital obtenida de Google maps)



Ilustración 11: Aguas termales el Borbollón (<http://vivetemascalcingo.blogspot.mx/2013/04/el-borbollon.html>)

3.2.2.- Descripción física del sistema hidrotermal de Ixtlahuaca

- **Geología**

El termalismo en esta zona se relaciona con fallamientos normales de orientación noroeste-sureste y este-norte-suroeste del Plioceno Tardío-Holoceno. La cuenca está cubierta en una parte por 700 m. de depósitos aluviales, lacustres y piroclásticos retrabajados, y la parte basal está constituida por rocas andesíticas y basálticas de edad Plioceno Tardío (INEGI, 2001) (Ver anexo: Mapa geológico).

- **Edafología**

La zona en la que se ubican las manifestaciones termales corresponden a un tipo de suelo planosol, así como en la mayor parte del municipio (Ver anexo: Mapa edafológico). Este suelo presenta las siguientes características generales: son suelos que debido a la continua agregación de sales y minerales provoca la existencia de capas duras de color claro, conocido comúnmente como tepetate. Esta unidad edafológica es de textura mediana en la zona de interés. Además sustentan pastizales, lo que los hace fácilmente erosionables. En la ganadería y la agricultura presentan rendimientos moderados.

También se identifican en el municipio otros suelos como: andosol y rendzina.

- **Hidrología subterránea**

La zona en la que se ubicaba la fuente hidrotermal de Ixtlahuaca de acuerdo a la carta estatal de hidrología subterránea de INEGI presenta materiales no consolidados con permeabilidad media alta, perteneciente también al acuífero Ixtlahuaca – Atlacomulco (1502). Este acuífero según la CONAGUA (2009) no posee volumen disponible para nuevas concesiones.

En la localidad de San Pedro de los Baños el termalismo consistía en un pozo profundo en la zona industrial de Pastejé, con 320 m. de profundidad, a 37 °C (INEGI, 2001). De acuerdo a los datos vectoriales más recientes del INEGI (2009)

indican la posible existencia de manifestaciones termales cerca de la localidad El Rincón de los Perales.

- **Relieve**

El municipio, está representada por dos grandes unidades fisiográficas; la primera de ellas que abarca la región plana del Valle Ixtlahuaca Atlacomulco corresponde precisamente a un extenso valle y la segunda, localizada al poniente, forma parte de una unidad compuesta por volcanes escudo aislados o en conjunto a esta se le conoce como la Sierra de Santa Ana Nichi, con altitudes que oscilan entre los 2, 540 y 3, 255 metros sobre el nivel del mar (Programa Municipal de Ordenamiento Ecológico Local de Ixtlahuaca, Estado de México, 2008). Al norte destaca el cerro de Jocotitlán.

- **Uso actual**

En San Pedro de los Baños el manantial desapareció debido a la excesiva extracción de aguas subterránea en la cuenca río Lerma (INEGI, 2001).

En el Rincón de los Perales el recurso hídrico es de uso tipo doméstico y público urbano.

3.2.3.- Descripción física del sistema hidrotermal de Donato Guerra

- **Geología**

Las rocas presentes en área de la manifestación termal de Donato Guerra corresponden a rocas ígnea extrusiva, esencialmente andesitas y basaltos, del periodo Terciario superior (Ver anexo: Mapa geológico).

- **Edafología**

Presenta el tipo de suelo andosol de textura mediana, aunque también en el municipio se identifican los suelos acrisol y vertisol (Ver anexo: Mapa edafológico). Por la naturaleza volcánica los andosoles son fértiles para la producción agrícola.

- **Hidrología subterránea**

La zona hidrotermal de Donato Guerra se localiza en el acuífero (1505) Villa Victoria – Valle de Bravo, presenta materiales consolidados con permeabilidad de media alta a media, la cual es originada principalmente por fracturamiento. La mayor parte de estas unidades están conformadas por rocas ígneas extrusivas de composición intermedia; en las zonas en donde afloran constituyen zonas de recarga y en el subsuelo conforman acuíferos de potencialidad media (CONAGUA, 2008). De acuerdo a la CONAGUA (2008) existe un volumen de 1'306,011 m³ anuales disponibles para otorgar nuevas concesiones.

- **Relieve**

La manifestación termal de Donato Guerra se localiza en la Subprovincia de Mil cumbres, dentro de la provincia del Eje Neovolcánico Transversal. La mayor parte del territorio del municipio pertenece al sistema del topofomas de lomeríos, destacan el Cerro Pelón a 3, 040 metros sobre el nivel del mar y donde anida la Mariposa monarca, el Cerro del Coyote con una elevación de 2, 530 m.s.n.m., el Cerro Chiquito con una altura de 2, 460 m.s.n.m. y la Peña de los Muñecos con 2, 400 m.s.n.m. (Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Donato Guerra, 2003).

- **Área Natural Protegida**

El municipio de Donato Guerra, se sitúa casi en su totalidad en el Área de Protección de los Recursos Naturales (APRN) Valle de Bravo, Malacatepec, Tilostoc y Temascaltepec (Ver anexo: Mapa de ANP). Área que había comprendido ocho municipios del Estado de México (Temascaltepec, Donato Guerra, Amanalco, Ixtapan del Oro, Santo Tomás de los Plátanos, Valle de Bravo, Villa de Allende y Villa Victoria), decretada por primera vez como zona protectora forestal en 1941 y, posteriormente regida por un decreto de recategorización publicado en 2005. No obstante, la superficie definitiva del APRN aún se encuentra en revisión debido al solapamiento con dos ANPs (la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca y con el Parque Nacional Nevado de Toluca) y a

ajustes en la delimitación del APRN que ha pasado a ocupar más municipios del Estado de México, e incluso, parte de Zitácuaro en el estado de Michoacán (Programa de Conservación y Manejo del APRN, 2007 citado en Hernández, 2008)

- **Uso actual**

El manantial termal de aguas sulfurosas “El molinito” actualmente es un atractivo turístico junto con la cascada “La Asunción ” y "La Peña ", lugar en la elevación del mismo nombre.

Fuente:(http://www.elclima.com.mx/poblaciones_cercanas_a_valle_de_bravo.htm).



Ilustración 12: El molinito (Trabajo de campo)

3.2.4.- Descripción física del sistema hidrotermal de Ixtapan del Oro

- **Geología**

El agua emana a través de una unidad de andesitas porfídica, basalto y toba lítica del Mioceno-Plioceno; presenta depósitos de travertino en el área de descarga del manantial (Ver anexo: Mapa geológico). La zona se localiza en un graben o fosa

tectónica, limitada por fallas normales de orientación norte-este y noreste. Las estructuras son de edad Plio-Cuaternario (INEGI, 2001).

- **Edafología**

En el municipio prevalecen tres tipos principales de suelo; el acrisol, litosol y andosol, este último se hace presente en nuestra zona de estudio (Ver anexo: mapa edafológico). Aquí se utiliza para la ganadería y la agricultura con rendimientos bajos. La clase textural del suelo es medio.

- **Hidrología subterránea**

Se ubica de igual manera en el acuífero (1505) Villa Victoria – Valle de Bravo. En esta zona se hallan dos grupos de materiales (consolidados y no consolidados). Comprenden rocas que presentan permeabilidad media a alta, la cual es originada principalmente por fracturamiento. La mayor parte de estas unidades están conformadas por rocas ígneas extrusivas de composición intermedia; en las zonas en donde afloran constituyen zonas de recarga y en el subsuelo conforman acuíferos de potencialidad media (CONAGUA, 2008).

En base a la CONAGUA (2008) este acuífero tiene un volumen disponible de 1'306,011 m³ anuales para otorgar nuevas concesiones.

El manantial tiene una temperatura de 31 °C. con un gasto aproximado de 8 litros por segundo (INEGI, 2001).

- **Relieve**

El municipio de Ixtapan del Oro pertenece a la subprovincia de la depresión del Balsas, esta subprovincia limita al norte con la de Mil Cumbres, con la de Los Lagos y Volcán de Anáhuac y con la de Los Llanos. La mayor parte del territorio del municipio se sitúa en una extensa sierra alta compleja con cañadas.

Gran parte de los cerros y lomeríos que se observan dentro del perímetro de este municipio, están constituidas por rocas efusivas de la época terciaria y

posterciaria, que tuvieron su origen, en las dos últimas etapas de actividad volcánica en la región (Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Ixtapan del Oro, 2003).

- **Área Natural Protegida**

El municipio Ixtapan del Oro, se sitúa también en el Área de Protección de los Recursos Naturales (APRN) Valle de Bravo, Malacatepec, Tilostoc y Temascaltepec (Ver anexo: Mapa de ANP).

- **Uso actual**

Ixtapan del Oro, es un municipio donde se practica el ecoturismo o turismo social, cuenta con diversos escenarios naturales y culturales entre los que sobresale el paraje denominado Las Salinas, este centro recreativo se localiza en las afueras del poblado; el lugar es conocido como Las Salinas porque cuenta con manantiales de aguas termales, que son aprovechados en albercas y chapoteaderos (Secretaria de Turismo s/f).



Ilustración 13: Al fondo el Chapoteadero alimentada con aguas termales (Trabajo de campo)



Ilustración 14: Alberca las Salinas (Trabajo de campo)

3.2.5.- Descripción física del sistema hidrotermal de Atizapán

- **Geología**

En el área donde se ubica el sistema hidrotermal de Atizapán, es considerada como una zona de inundación con suelos aluvial y lacustre que corresponde al periodo cuaternario (Ver anexo: Mapa geológico).

- **Edafología**

En el municipio sobresalen tres tipos de suelo; el feozem que posee una textura mediana cubre la mayor parte del municipio (Ver anexo: Mapa edafológico). El suelo de tipo histosol y vertisol cubren otra parte del mismo.

- **Hidrología subterránea**

Se ubica dentro del acuífero (1501) Valle de Toluca, presenta una permeabilidad media con material no consolidado. De acuerdo a la CONAGUA (2009) no existe volumen disponible para nuevas concesiones.

Antes de la desecación de la Laguna de Chignahuapan, existían en el municipio más de 20 manantiales, que abastecían de agua a la población; pero con su introducción al sistema de abastecimiento de agua a la Ciudad de México, este importante caudal fue entubado, quedando el abasto de agua del Municipio de Santa Cruz Atizapán dependiente de los pozos perforados y de tanques de almacenamiento (Plan municipal de desarrollo urbano de Atizapán, 2005).

Actualmente el Municipio tiene como principal fuente de abastecimiento de agua potable, los pozos que dotan al acueducto Lerma, que a su vez es la fuente principal de abasto para la Ciudad de México (Plan municipal de desarrollo urbano de Atizapán, 2005).

- **Relieve**

El relieve característico corresponde a llanura, a excepción de dos pequeñas elevaciones que no sobrepasan los treinta metros de altura, denominadas el Tepiolol o Tepiololco y La Loma; la cabecera se encuentra ubicada a una altitud de 2, 590 m.s.n.m. La altura máxima del cerro de Tepiolol o de La Campana es de 2, 640 m.s.n.m., ubicado al poniente de la cabecera municipal.

- **Uso actual**

En el jagüey también hubo aguas termales (la temperatura del agua era de 27 °C), pero ahora están contaminadas y sólo son aprovechadas como ornato de la moderna unidad deportiva.

Fuente:(<http://www.edomexico.gob.mx/atizapansantacruz/municipio-atizapan.html>).

3.2.6.- Descripción física del sistema hidrotermal de Tenango del Valle

- **Geología**

La litología en esta zona está representada por rocas ígneas extrusivas, esencialmente andesitas del cenozoico. También brecha sedimentaria y roca sedimentaria volcanoclástica (Plan municipal de desarrollo urbano de Tenango del Valle, 2011) (Ver anexo: Mapa geológico).

En el municipio se localizan seis fracturas del territorio. Dos de ellas están sobre el cerro del Tetépetl al poniente de la cabecera municipal. Una más, la de mayor tamaño se ubica en la zona central del municipio. Las tres restantes son fracturas que se localizan al sur de la localidad de San Pedro Tlanixco y se continúan en el municipio de Villa Guerrero (Plan municipal de desarrollo urbano de Tenango del Valle, 2011).

- **Edafología**

Específicamente en la zona de interés termal se presenta el tipo de suelo feozem (Ver anexo: Mapa edafológico), aunque el municipio se cubre mayormente de otros como andosol, cambisol, litosol, regosol y vertisol.

El suelo de tipo feozem, son suelos con igual o mayor fertilidad que los vertisoles, ricos en materia orgánica, textura media, buen drenaje y ventilación, son suelos fértiles y soportan una gran variedad de cultivos de secano y regadío así como pastizales. Sus principales limitaciones son las inundaciones y la erosión.

- **Hidrología subterránea**

El sitio de interés termal se localiza en el acuífero Tenancingo (1504). El acuífero está constituido principalmente por unidades hidrogeológicas de andesitas y basaltos con capacidad para almacenar y transmitir importantes volúmenes de agua subterránea. Las calizas del cretácico funcionan como zona de transmisión de agua a otros materiales (lateralmente en contacto).

De acuerdo a la CONAGUA (2011) en este acuífero existe un volumen disponible de 27'252,509 m³ anuales para otorgar nuevas concesiones.

Datos más recientes del Plan municipal de desarrollo urbano del Municipio (2011) indican que aún se cuenta con ocho manantiales que abastecen de agua potable a la población aunque estos no son termales.

- **Relieve**

El sistema hidrotermal pertenece a la Subprovincia de Lagos y Volcanes de Anáhuac dentro de la provincia del Eje Neovolcánico. El municipio del Tenango del Valle se sitúa en diversos sistemas de topofomas, los que más destacan son: sierras, llanuras y lomeríos.

La zona central del municipio es donde se localizan las llanuras y donde se asienta la cabecera municipal. Adyacente a esta zona se ubican los lomeríos que

darán origen a las sierras del municipio. La porción de sierras se ubica al oeste y suroeste, en las faldas del Nevado de Toluca. Algunos cerros centrales y la porción oriente está sentada sobre sierras con mesetas (Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Tenango del Valle, 2011).

- **Área Natural Protegida**

El Área Natural Protegida Nahuatlaca - Matlazinca se localiza en la parte sureste del Estado de México, comprende los municipios de Tenango del Valle (Ver anexo: Mapa de ANP), Joquicingo, Texcalyac, Malinalco, Ocuilan y Santiago Tianguistenco. Fue decretado como Área Natural Protegida con categoría de Parque Estatal el 20 de septiembre de 1977 y cuenta con una superficie de 27, 878 hectáreas. El objetivo general del Parque Estatal Nahuatlaca – Matlazinca (PENM) es el de mantener la biodiversidad y los servicios ambientales mediante el establecimiento de políticas de protección, conservación, restauración y aprovechamiento (Programa de Conservación y Manejo de PENM, 2011).

3.2.7.- Descripción física del sistema hidrotermal de Ixtapan de la Sal

- **Geología**

La zona correspondiente a Ixtapan de la Sal presenta rocas del periodo entre Jurásico superior y el Cretácico inferior esencialmente rocas metamórficas metasedimentarias y metavolcánicas (Ver anexo: Mapa geológico).

Estas manifestaciones termales pueden estar relacionadas con los magmas aún en proceso de enfriamiento, que dieron origen a las rocas volcánicas vecinas como las de la sierra de Chichinautzin al norte y al noreste, y a los macizos montañosos que conforman la Riolita Tilzapotla del Oligoceno Tardío, hacia el suroeste, oeste y noreste (INEGI, 2001). Las manifestaciones termales están localizadas en una línea noroeste-sureste sobre el bloque de fallamiento. La composición química del agua es característica de un sistema geotérmico de tipo clorurado sódico y bicarbonato, aunque bajo contenido de sílice (INEGI, 2001).

- **Edafología**

En el municipio se presentan varios tipos de suelo como el vertisol, feozem, rendzina, litosol, luvisol y regosol.

En la zona de interés termal el tipo de suelo más próximo es el vertisol con una textura fina (Ver anexo: Mapa edafológico).

- **Hidrología subterránea**

En esta zona los manantiales termales brotan a través de grandes depósitos de travertino (caliza), formando amplias terrazas entre tres manantiales (en el balneario Ixtapa, en el Bañito y el balneario Tonatico) (INEGI, 2001).

Se localiza en el acuífero Tenancingo (1504) y de acuerdo a la CONAGUA (2011) existe un volumen disponible de 27'252,509 m³ anuales para otorgar nuevas concesiones.

- **Relieve**

Se localiza dentro de un sistemas de topoformas de lomeríos y cerros entre los que destacan al norte El Mirador y Los Tunales; al oriente El Picacho y Tlacoachaca con una altura de 2, 100 m.s.n.m.; al poniente, desde la localidad de Ahuacatlán hasta la de El Refugio se presenta una serranía con altura promedio de 2, 100 m.s.n.m., extendiéndose hacia el sur hasta entrar al territorio de Tonatico. Entre las serranías se localizan barrancas profundas de las cuales las de mayor importancia son las de Calderón, Nenezingo y Malinaltenango. Complementarias a estas elevaciones, se tienen tres largas planicies que se extiende de norte a sur, aproximadamente. La ubicada al oriente contiene al Llano de la Unión; la del centro, escalonada que se extiende desde el balneario privado de Ixtapan de la Sal hasta la Villa de Tonatico y la tercera, de Malinaltenango hasta Coatepec Harinas al poniente (Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Ixtapan de la Sal, 2003).

- **Uso actual**

El uso actual de estos manantiales termales se dirige a un moderno centro recreativo localizado en el centro del municipio de Ixtapan de la Sal. Estas aguas brotan a una temperatura de 37 °C. Algunos lo consideran por su contenido en minerales con un alto potencial medicinal (Secretaría de Turismo s/f).

Tabla 2: Matriz de caracterización

Sistemas hidrotermal (Municipio)	Geología	Edafología	Agua Subterránea	Relieve predominante	ANP	Uso actual
Temascalcingo	Arenisca y conglomerado, Por el tamaño grueso y medio de las partículas que las conforman son importantes para la recarga de acuíferos.	Tipo de suelo feozem lúvico de textura mediana que está cubierto con pastizales, matorrales, y sobre todo con bosque de encino y caducifolias.	Acuífero Ixtlahuaca-Atlacomulco. Por su composición geológica su permeabilidad resulta ser media.	Ubicada en la llanura de origen lacustre interrumpido por un relieve volcánico con laderas moderadas.	N/A	Parque Ecoturístico "El Borbollón Pese-Ndeje S. P. R. de R. L"
Ixtlahuaca	La parte basal está constituida por rocas andesíticas y basálticas, cubiertas por depósitos aluviales, lacustres y piroclásticos retrabajados.	Tipo de suelo planosol de textura media, sustentan pastizales.	Pertenece al acuífero Ixtlahuaca – Atlacomulco Por los materiales no consolidados su permeabilidad es media alta.	El relieve está representado por Valle y llanura y volcanes escudos aislados.	N/A	Actualmente el manantial ha desaparecido o debido a la excesiva extracción de aguas subterránea en la cuenca río Lerma.
Donato Guerra	Andesitas y basaltos	Andosol de textura media.	Acuífero Villa Victoria – Valle de Bravo, constituyen zonas de recarga y acuífero con potencialidad media.	Situado en un sistema de Lomeríos, que propicia la diversidad de ambientes naturales.	Cuenca de los ríos Valle de Bravo, Malacatepec, Tilostoc y Temascalt epec	Por la riqueza natural actualmente se concibe como un Atractivo turístico "El Molinito".

Sistemas hidrotermal (Municipio)	Geología	Edafología	Agua Subterránea	Relieve predominante	ANP	Uso actual
Ixtapan del Oro	Andesitas porfídica, basalto y toba lítica. Travertino en el área de descarga del manantial.	Andosoles de textura media usados en la ganadería y agricultura.	Acuífero Villa Victoria – Valle de Bravo. Constituye zonas de barrera y de recarga formando acuífero con potencialidad media.	Cerros y lomeríos favorables para la diversidad florística y faunística.	Cuenca de los ríos Valle de Bravo, Malacatepec, Tilostoc y Temascaltepec	Actualmente la fuente de aguas termales funciona como un Balneario de nombre “Las salinas”.
Atizapán	Por su relieve y su localización en zonas de inundación ha propiciado la formación de suelos aluvial y lacustre.	Sobresale suelo de tipo feozem (textura medio).	Acuífero Valle de Toluca. Permeabilidad media.	Se ubica en una Llanura zona propensa a inundaciones.	N/A	Actualmente este manantial se encuentra contaminado
Tenango del Valle	Andesitas y basaltos con capacidad para almacenar y transmitir importantes volúmenes de agua subterránea.	Suelo feozem ricos en materia orgánica, textura media, buen drenaje y ventilación.	Acuífero Tenancingo, capacidad para almacenar y transmitir agua subterránea.	Sistemas de topoformas; sierras, llanuras y lomeríos.	Parte de municipio pertenece al ANP Nahuatlaca - Matlazinca	Sin información
Ixtapan de la Sal	Depósitos de travertino (caliza).	Tipo de suelo vertisol con una textura fina.	Acuífero Tenancingo. Capacidad para almacenar y transmitir agua subterránea.	Se pueden encontrar diversos sistemas de topoformas como Lomeríos, cerros y planicies.	N/A	El uso actual de los manantiales termales en esta zona consiste en un moderno centro recreativo.

La continuidad de los manantiales, sean termales o no, dependen de las características y condiciones ambientales de las zonas de estudio y del entorno inmediato. La cubierta vegetal, haciendo referencia a vegetación herbácea, arbustiva y arbórea de los ANP y el componente litológico, constituyen los elementos de mayor importancia para garantizar las entradas naturales de agua a los acuíferos, y por tanto, la dotación a los focos hidrotermales:

La cubierta vegetal del municipio de Temascalcingo caracterizado por pastizales, matorrales, y sobre todo con bosque de encino y caducifolias, favorece la retención e infiltración del agua; el tamaño grueso y mediano del elemento litológico conformado por material tobáceo, depositada en la parte baja del valle, funciona como acuífero de potencial reducido. El material basáltico forma sitios de permeabilidad que van de media a alta y funcionan como zonas de recarga para el acuífero (1502) Ixtlahuaca – Atlacomulco, a su vez, recibe los aportes de agua subterránea por parte de la región.

Para la recarga del acuífero (1505) Villa Victoria – Valle de Bravo es de gran relevancia el Área de Protección de Recursos Naturales Zona Protectora Forestal “Cuencas de los ríos Valle de Bravo, Malacatepec, Tilostóc y Temascaltepec” el cual comprende vegetación arbórea y acuática, importantes para la captación de agua. En los municipios de Donato Guerra e Ixtapan del Oro, afloran materiales de permeabilidad media como rocas volcánicas fracturadas y material aluvial que constituyen zonas importantes de recarga.

Por otro lado, El Parque Estatal Nahuatlaca - Matlazinca ("PENM") compuestas por bosque mixto de pino y encino y especies arbustivas son los elementos importantes para la captación e infiltración del agua hacia el acuífero Tenancingo (1504), el cual recarga los manantiales de Tenango del Valle e Ixtapan de la Sal. En el acuífero se presentan sedimentos clásticos de origen sedimentario o vulcanosedimentario y por sus características litológicas crean en superficie zonas de recarga y en el subsuelo acuíferos de variado potencial de explotación.

3.3.- CATEGORIZACIÓN DE LAS MANIFESTACIONES TERMALES UTILIZANDO LA EVALUACIÓN MULTICRITERIO (EMC)

Tomando en consideración los componentes de EMC antes descritos, se llevó a cabo la categorización de las manifestaciones termales del Estado de México, este proceso incluyó: a) identificación de alternativas; b) selección de criterios; c) generación de matriz de decisión y; d) valoración de las manifestaciones termales mediante la sumatoria lineal ponderada. A continuación se describen cada una de estas fases.

A) Identificación de alternativas

El objetivo de este proyecto es la categorización de las manifestaciones termales, destacando aquellas que de acuerdo a sus características físicas son susceptibles a considerarse como zonas de conservación y aquellas que pudieran recibir algún tipo de aprovechamiento. Para la identificación y localización geográfica de las manifestaciones termales en el Estado de México se realizó la revisión bibliográfica basándonos en fuentes como Yarza (1992) e Instituto de Investigaciones Eléctricas (1767). De acuerdo a esto, se pudieron identificar 7 zonas con manifestación hidrotermal ubicados en los municipios de Temascalcingo, Ixtlahuaca, Donato Guerra, Ixtapan del Oro, Atizapán, Tenango del Valle e Ixtapan de la Sal que como parte del proceso de EMC corresponde a nuestras alternativas a evaluar.

B) Selección de criterios

Para el presente estudio se establecieron cinco criterios que nos sirvieron para evaluar cada uno de los manantiales termales: criterio geológico, edafológico, agua subterránea, ANP y uso actual, organizadas en una matriz donde se relacionan con las siete zonas de manifestación hidrotermal. Es importante aclarar que en esta ocasión no se consideran las características bióticas como un aspecto determinante debido a que la naturaleza de la energía geotérmica es meramente geológica.

Los criterios se seleccionaron de acuerdo a las características que garantizan la continuidad de los manantiales termales y se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 3: Criterios cuantitativos para la categorización

CRITERIO	ATRIBUTO	TIPOLOGÍAS
Geológico	Litología	Gravas y arenas con gran circulación de agua
		Rocas metamórficas, gravas y arenas saturadas de agua
		Granitos y rocas básicas (basaltos)
		Calizas, dolomías y areniscas
		Gravas y arenas secas, arcillas y margas húmedas
Edafológico	Textura	Orgánico
		Fina
		Media
		Gruesa
		Pedregoso
Agua subterránea	Disponibilidad	Sin disponibilidad
		Con disponibilidad
ANP	Ubicación dentro de ANP	Si
		No
Turístico/Usos actuales	Uso turístico/recreativo	No
		Si

Fuente: Elaboración propia

Una vez definidos los criterios y atributos de los mismos, y a partir de la previa caracterización de las zonas de estudio (alternativas) se realizó la matriz resumen de la caracterización.

Tabla 4: Matriz resumen de las características de las manifestaciones termales

SISTEMA HIDROTHERMAL	CRITERIOS				
	Geología	Edafología	Agua subterránea	ANP	Turístico/Usos actuales
	ATRIBUTO				
	Litología	Textura	Disponibilidad	Ubicación dentro de ANP	Uso turístico
	TIPOLOGÍAS				
Temascalcingo	Arenisca	Mediana	Sin disponibilidad	No	Si
Ixtlahuaca	Basálticas	Mediana	Sin disponibilidad	No	Desapareció
Donato Guerra	Basaltos	Mediana	Con disponibilidad	Si	Si
Ixtapan del Oro	Basalto	Mediana	Con disponibilidad	Si	Si
Atizapán	Aluvial y lacustre	Mediana	Sin disponibilidad	No	Contaminadas
Tenango del Valle	Basaltos	Mediana	Con disponibilidad	Si	Sin información
Ixtapan de la Sal	Metavolcánicas	Fina	Con disponibilidad	No	Si

Fuente: Elaboración propia

C) Generación de la matriz de decisión

Para llevar a cabo el proceso de categorización se ponderaron con valores que van de 1 a 5 a cada una de las tipologías de los criterios de cada zona de estudio, el valor se determinó en función a las condiciones que hacen posible la permanencia de la fuente termal y las características de su entorno. El valor más alto se asignó aquella condición que garantiza la continuidad del recurso hidrotermal y por lo tanto es aquella característica que se desea conservar, por otro lado el valor más pequeño se asignó aquella condición que no favorece su subsistencia.

Criterio Geológico: La ponderación de los valores para las tipologías de este criterio se basó en la potencia térmica o cesión de calor de las unidades litológicas.

Cabe mencionar que debido a que no existe en el contexto nacional y continental normas e información referentes a las propiedades térmicas de las rocas que nos puedan servir para estimar el potencial térmico de las zonas de estudio, para la realización de este trabajo se utilizaron los valores agrupados por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía de España, en su estudio técnico de Evaluación del Potencial de Energía Geotérmica de 2011-2020, mismos que extraen de valores estandarizados de la norma VD14640 Parte 2- Uso térmico del suelo (Norma Alemana de 2001).

Los valores agrupados que se utilizan en dicho estudio de acuerdo a la capacidad de extracción de calor de las rocas y que se tomaron como base para la ponderación de valores de las tipologías del criterio geológico se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 5: Capacidad de extracción de calor de las rocas (Modificado de la Norma VD14640)

TIPO DE ROCA (LITOLOGÍAS)	CAPACIDAD DE EXTRACCIÓN DE CALOR (W/M)
Gravas y arenas secas	<25
Arcillas y margas húmedas	35-50
Calizas y dolomías masivas	55-70
Arenisca	65-80
Granitos	68-85
Rocas básicas (basaltos)	40-65
Rocas metamórficas (gneis)	70-85
Gravas y arenas saturadas de agua	65-80
Gravas y arenas con gran circulación de agua	80-100

Fuente: IDAE, 2011.

De acuerdo a lo anterior, se definieron 5 rangos de valor, por lo que, granitos, rocas básicas (basaltos), rocas metamórficas, gravas y arenas saturadas de agua y las gravas y arenas con gran circulación de agua se categorizan como zonas sujetas a conservación, mientras que, gravas y arenas secas, arcillas y margas húmedas, calizas, dolomías y areniscas entran en el grupo áreas libres.

Tabla 6: Valores para las tipologías del criterio geológico

TIPO DE ROCA	VALOR	CATEGORÍA
Gravas y arenas con gran circulación de agua	5	Conservación
Rocas metamórficas, gravas y arenas saturadas de agua	4	
Granitos y rocas básicas (basaltos)	3	
Calizas, dolomías y areniscas	2	Libres
Gravas y arenas secas, arcillas y margas húmedas	1	

Fuente: Elaboración propia con base en Tabla de Capacidad de extracción de calor de las rocas, IDAE, 2011.

Criterio Edafológico: Para la definición de este criterio se basó en la textura de los suelos, considerando las condiciones de mantener la vegetación nativa y menor posibilidad de erosión, de tal manera que los suelos orgánicos, arcillosos y limo-arcillosos caen dentro de condiciones de conservación, mientras que la ausencia de suelo o de granulometría gruesa con material rocoso, caerían dentro de áreas libres. La información corresponde a la de INEGI.

Tabla 7: Valores para las tipologías del criterio edafológico

TEXTURA	VALOR	CATEGORÍA
Suelo orgánico	5	Conservación
Suelo de textura fina	4	
Suelo de textura media	3	
Suelo de textura gruesa	2	Libres
Suelo con abundantes fragmentos rocosos, ausencia de suelo o suelo pedregoso.	1	

Fuente: Elaboración propia

Criterio Agua subterránea: Para ese criterio se asignaron dos únicos valores en función de la disponibilidad de agua subterránea de un acuífero, del que tendrán derecho de explotar, usar o aprovechar los usuarios, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro a los ecosistemas. El valor más alto se asigna a los acuíferos sujetos a protección y/o conservación, mientras que las de menor valor corresponden a los acuíferos con posibilidades de uso o aprovechamiento. Los datos de volumen de disponibilidad de agua subterránea corresponden a la información de CONAGUA.

Tabla 8: Valores para las tipologías del criterio Agua subterránea

DIPONIBILIDAD DE AGUA	VALOR	CATEGORÍA
Sin disponibilidad	5	Conservación
Con disponibilidad	1	Libres

Fuente: Elaboración propia

Criterio ANP: Se refiere a los decretos registrados y aprobados. Se asignan dos únicos valores:

Tabla 9: Valores para las tipologías del criterio ANP

UBICACIÓN DENTRO DE ANP	VALOR	CATEGORÍA
Manantial termal ubicada dentro de una categoría de Área Natural Protegida (ANP).	5	Conservación
Manantial termal que se encuentre excluida de un ANP.	1	Libres

Fuente: Elaboración propia

Criterio turístico o uso actual: en la mayoría de los casos se encuentra ya establecido algún tipo de atractivo turístico o recreativo, para dichos casos el valor asignado es de 1, mientras que los sitios que aún no tengan uso podrán ser considerados como zonas a interés de conservación asignándole el valor de 5.

Tabla 10: Valores para las tipologías del criterio turístico/uso actual

USO TURÍSTICO	VALOR	CATEGORÍA
Zona sin atractivo turístico o recreativo	5	Conservación
Zona con algún atractivo turístico/recreativo o público urbano	1	Libres

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11: Matriz de valores para las tipologías de los criterios

CRITERIO	ATRIBUTO	TIPOLOGÍAS	VALOR	CATEGORÍA
Geológico	Tipo	Gravas y arenas con gran circulación de agua	5	Conservación
		Rocas metamórficas, gravas y arenas saturadas de agua	4	
		Granitos y rocas básicas (basaltos)	3	
		Calizas, dolomías y areniscas	2	Libres
		Gravas y arenas secas, arcillas y margas húmedas	1	
Edafológico	Textura	Orgánico	5	Conservación
		Fina	4	
		Media	3	
		Gruesa	2	Libres
		Pedregoso	1	
Agua subterránea	Disponibilidad	Sin disponibilidad	5	Conservación
		Con disponibilidad	1	Libres
ANP	Ubicación dentro de ANP	Si	5	Conservación
		No	1	Libres
Turístico/Recreativo	Uso turístico/recreativo	No	5	Conservación
		Si	1	Libres

Fuente: Elaboración propia

D) Valoración de las alternativas

Una vez obtenida la matriz de valores se prosiguió al cálculo del nivel de adecuación de cada una de las zonas de interés hidrotermal en función a los criterios establecidos. Para ello se realizaron dos matrices de evaluación; la primera matriz se hizo bajo el supuesto de que todos los criterios utilizados tienen el mismo grado de importancia para la selección de sitios de conservación, mientras que para la segunda matriz de evaluación se definieron valores de ponderación de los criterios de acuerdo al grado de importancia que tienen en la presencia de los manantiales termales, en este sentido, el criterio geológico y de agua subterránea representan el 30 % para cada una, el criterio ANP el 20 % y el criterio de uso de suelo y edafológico representan un 10 % para cada una. Posteriormente se asignó un valor o puntuación a la tipología de cada uno de los criterios presentes en las zonas de estudio, de tal manera que los valores más altos son las zonas con mayor interés de someterse a conservación, y aquellos que poseen los valores más pequeños, corresponden a las zonas de uso libre. El proceso de evaluación se puede observar en la siguiente matriz utilizando la técnica de Sumatoria Lineal de los criterios.

Tabla 12: Jerarquía de los criterios

CRITERIOS	VALOR DE PONDERACIÓN DE LOS CRITERIOS
Geológico	30 %
Agua Subterránea	30 %
ANP	20 %
Edafológico	10 %
Turístico/Recreativo	10 %
Total	100 %

RESULTADOS

Tabla 13: Matriz de Evaluación de alternativas sin ponderación de criterios

Manifestación termal (Alternativas)	Geología		Edafología		Agua subterránea		Área Natural Protegida		Uso Actual		Suma lineal de valores
	Tipo	Valor	Textura	Valor	Disponibilidad	Valor	Ubicación dentro de ANP	Valor	Uso turístico	Valor	
Temascalcingo	Arenisca	2	Mediana	3	No	5	No	1	Si	1	12
Ixtlahuaca	Basálticas	1	Mediana	3	No	5	No	1	N/A	1	11
Donato Guerra	Basalto	3	Media	3	Si	1	Si	5	Si	1	13
Ixtapan del Oro	Basalto	3	Media	3	Si	1	Si	5	Si	1	13
Atizapán	Aluvial y lacustre	1	Media	3	No	5	No	1	N/A	-	10
Tenango del Valle	Basaltos	3	Mediana	3	Si	1	Si	5	S/inf.	-	12
Ixtapan de la Sal	Metavolcánicas	4	Fina	4	Si	1	No	1	Si	1	11

Tabla 14: Resultado 1

MANANTIALES TERMALES	VALOR DE ACUERDO A SUMA DE CRITERIOS	CATEGORÍA ASIGNADA
Donato Guerra	13	Conservación
Ixtapan del Oro	13	Conservación
Temascalcingo	12	Libre
Tenango del Valle	12	Libre
Ixtlahuaca	11	Libre
Ixtapan de la Sal	11	Libre
Atizapán	10	Libre

Tabla 15: Matriz de Evaluación de alternativas con ponderación de criterios

Manifestación termal (Alternativas)	Geología (.3 %)		Edafología (.1 %)		Agua subterránea (.3 %)		Área Natural Protegida (.2 %)		Uso Actual (.1 %)		Suma lineal de valores
	Tipo	Valor	Textura	Valor	Disponibilidad	Valor	Ubicación dentro de ANP	Valor	Uso turístico	Valor	
Temascalcingo	Arenisca	0.6	Mediana	0.3	No	1.5	No	0.2	Si	0.1	2.7
Ixtlahuaca	Basálticas	0.3	Mediana	0.3	No	1.5	No	0.2	N/A	0.1	2.4
Donato Guerra	Basalto	0.9	Media	0.3	Si	0.3	Si	1.0	Si	0.1	2.6
Ixtapan del Oro	Basalto	0.9	Media	0.3	Si	0.3	Si	1.0	Si	0.1	2.6
Atizapán	Aluvial y lacustre	0.3	Media	0.3	No	1.5	No	0.2	N/A	0	2.3
Tenango del Valle	Basaltos	0.9	Mediana	0.3	Si	0.3	Si	1.0	S/inf.	0	2.5
Ixtapan de la Sal	Metavocánicas	1.2	Fina	0.4	Si	0.3	No	0.2	Si	0.1	2.2

Para el cálculo de los valores de esta matriz de evaluación, el puntaje asignado de acuerdo a la matriz de valores se multiplicó por el porcentaje asignado a los criterios.

Tabla 16: Resultado 2

MANANTIALES TERMALES	VALOR DE ACUERDO A CRITERIOS	CATEGORÍA ASIGNADA
Temascalcingo	2.7	Conservación
Donato Guerra	2.6	Conservación
Ixtapan del Oro	2.6	Conservación
Tenango del Valle	2.5	Libre
Ixtlahuaca	2.4	Libre
Atizapán	2.3	Libre
Ixtapan de la Sal	2.2	Libre

A partir de la evaluación sin ponderación de los criterios, las fuentes termales con mayores puntuaciones resultaron ser las que se localizan en los municipios de Donato Guerra e Ixtapan del Oro, considerando que todos los criterios utilizados tienen el mismo valor de importancia respecto a la selección de sitios de conservación. Sin embargo, a estas dos zonas las características que favorecen para la selección como sitios con dicha categoría fueron el criterio geológico, edafológico y de ANP. De acuerdo con la litología presente en estas zonas, principalmente basaltos, hace posible la cesión de calor al área circundante, al mismo tiempo, favorece la permeabilidad y la recarga del acuífero Villa Victoria-Valle de Bravo (1505), que según la CONAGUA (2008), es uno de los que aún posee volumen disponible para otorgar nuevas concesiones. Además, la disponibilidad del recurso hídrico de este acuífero puede estar asociada a la presencia del Área de Protección de los Recursos Naturales (APRN) Valle de Bravo, Malacatepec, Tilostoc y Temascaltepec y a que el uso del foco hidrotermal se limita a abastecer el balneario, el cual no requiere necesariamente de su extracción.

Para el criterio de agua subterránea, fue importante fijar la disponibilidad como una condición para no comprometer el balance hídrico. De acuerdo a los últimos datos de disponibilidad de agua subterránea de la CONAGUA (2011), otro de los acuíferos con volumen disponible es el de Tenancingo (1504), aquí se localizan los manantiales termales de Tenango del Valle e Ixtapan de la Sal, y en relación a esta variable no se pone en riesgo con el aprovechamiento actual. Mientras que en las zonas más pobladas como el acuífero Valle de Toluca (1501) y el acuífero Ixtlahuaca-Atlacomulco (1502) la disponibilidad del recurso agua se ve restringida debido a la sobreexplotación.

Respecto al criterio de ANP, se consideró que el foco hidrotermal se ubicara dentro de un área sujeta a protección, ya que puede reforzar la posibilidad de aprovechamiento sustentable y/o conservación del recurso hídrico, además, la vegetación favorece la captación e infiltración de agua subterránea. La zona

termal de Tenango del Valle es otro que se favorece con este criterio al localizarse dentro del ANP Nahuatlaca-Matlazinca.

En cuanto al criterio edafológico, se optó por la clase textural orgánico, fina y media como aquellas zonas que debieran ser conservadas debido a su característica de suelos bien desarrollados y con mayor aptitud para sostener vegetación. La mayoría de las zonas de estudio poseen suelos de textura mediana y sustentan actividades primarias como la agricultura y ganadería. El suelo de tipo feozem en Temascalcingo mantiene bosque de encino y caducifolias así como pastizales al igual que en Ixtlahuaca.

En lo que respecta al uso actual de las manifestaciones termales, en la mayoría de los casos el uso es de tipo turístico-recreativo. Sólo en el caso de Ixtlahuaca es de uso público urbano.

Por otro lado, los resultados obtenidos a partir de la jerarquización de los criterios muestran altos valores para las zonas hidrotermales de Temascalcingo, Donato Guerra e Ixtapan del Oro. En este proceso de jerarquización se tomó en cuenta los criterios que influyen y determinan la existencia de manantiales, ya sean termales o no, los cuales fueron: la disponibilidad de agua subterránea, la capacidad de cesión de calor de las rocas así como la presencia de un ANP cerca y a los alrededores del manantial, el cual pueda garantizar la recarga del acuífero a través de captaciones y escurrimientos superficiales. En este sentido, la no disponibilidad de agua subterránea en el caso del municipio de Temascalcingo y la sobre-explotación que ha sufrido este acuífero (1502-Ixtlahuaca-Atlacomulco) remarca la importancia para que esta zona sea sometida a categoría de conservación puesto que en los demás criterios se estableció en rangos medios. Respecto a la característica que sobre sale en los sitios de Donato Guerra e Ixtapan del Oro se encuentra el tipo de roca basalto.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Existen muy pocas referencias bibliográficas que traten aspectos específicos como la localización y las características físicas, químicas y geológicas de las fuentes hidrotermales. Sin embargo, con las referencias citadas se pudieron detectar siete focos termales dentro del territorio Estatal, al mismo tiempo se concretó que estas zonas están ligadas principalmente a regiones volcánicas y a eventos geológicos como fallas. Aunque en general la región volcánica del Estado de México puede considerarse como fósil, hoy en día aún tiene suficiente energía para ser transmitida hasta la superficie en forma de manantiales termales con temperaturas iguales o inferiores a los 40 °C. y dadas las temperaturas que registran ha propiciado a que sean utilizadas desde hace años como atractivo turísticos (balnearios) con algunas propiedades medicinales. En el caso de Ixtlahuaca, la zona de manantiales puede que estar asociada a la región volcánica de Jocotitlán la cual puede considerarse como activa, pero debido a la sobre-explotación de los mantos acuíferos los manantiales han desaparecido.

Cabe destacar que desde el año 2011 cuando se comenzó a recabar información referente a la energía geotérmica, y hasta la fecha, a nivel nacional se ha contribuido al desarrollo de la energía geotérmica por medio de la adecuación del marco regulatorio con fines de uso y aprovechamiento para generación de electricidad y usos directos, sin embargo, aún se le resta mucha importancia a zonas que no cumplen con las temperaturas y características para su explotación. Es así que uno de los principales retos a los que nos enfrentamos durante la realización de este trabajo, se precisa en la recopilación de información tanto en referentes bibliográficos actuales como en información geoespacial, razón por la cual el alcance del proyecto se fue acortando cada vez más.

Por otro lado, para el proceso de selección o de categorización se retomaron los componentes del Método de Evaluación Multicriterio y bajo la técnica de Sumatoria Lineal se realizaron dos tipos de evaluaciones, la primera partiendo de

que los criterios utilizados tienen el mismo grado de importancia en el análisis y el segundo jerarquizando a estas con base en las características que determinan la presencia de manantiales termales en la superficie de la tierra. Los resultados obtenidos pueden variar debido al grado de importancia que los tomadores de decisiones eligen para los diferentes elementos utilizados en el análisis. Aunque en este trabajo sólo se consideraron criterios físicos (geología, edafología, agua subterránea, ANP y uso actual), debido a que la naturaleza del recurso geotérmico es meramente geológica, para futuros proyectos de este tipo se pudiesen integrar aspectos socioeconómicos, vías de comunicación, de flora y fauna, entre otros.

A partir del trabajo realizado podemos mencionar algunas recomendaciones:

- Los sistemas hidrotermales deberán considerarse como un componente más en la valoración y determinación de zonas de conservación, no sólo por su importancia energética y térmica, también por su importancia biológica.
- Se debe impulsar la investigación hacia este tipo de recursos, generar nueva información para el sustento técnico-científico de nuevos proyectos.
- De los criterios utilizados, los de más relevancia o que influyen en mayor medida en la continuidad de los manantiales termales son el componente litológico y la vegetación, no solo de los municipios en cuestión, también dependen de las características y condiciones ambientales a nivel regional.
- Es importante que las acciones de conservación y mantenimiento de las ANP (Área de Protección de Recursos Naturales Zona Protectora Forestal “Cuencas de los ríos Valle de Bravo, Malacatepec, Tilostóc y Temascaltepec” y El Parque Estatal Nahuatlaca - Matlazinca) se lleven de manera continua para garantizar la captación y recarga de agua subterránea.

- Se deberá controlar la extracción de agua subterránea y las nuevas concesiones serán en función a la disponibilidad de los acuíferos para minimizar su abatimiento.

BIBLIOGRAFÍA

- Araña-Saavedra, V. y R. Ortiz (1984) *Vulcanología*. Madrid: Rueda. P. 310 y 311.
- AMC, Academia Mexicana de Ciencia (2010) *Energías Alternas: Propuesta de investigación y desarrollo tecnológico para México*. México. P. 68.
- CENAPRED, Centro Nacional de Prevención de Desastres (2004) “*Volcanes peligro y riesgo volcánico en México*” Serie Fascículos. México. P. 3-5.
- CONANP, Comisión de Áreas Naturales Protegidas (2012) En: [http://www.conanp.gob.mx/que_hacemos/] y [http://www.conanp.gob.mx/que_hacemos/sinap.php] consultado 30/12/2012 23:00hrs.
- CONAGUA, Comisión Nacional del Agua (2008) *Determinación de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero (1505) Villa Victoria – Valle de Bravo, Estado de México*. México. D.F.
- CONAGUA, Comisión Nacional del Agua (2009) *Actualización de la Disponibilidad Media Anual de Agua Subterránea Acuífero (1501) Valle de Toluca, Estado de México*. México
- CONAGUA, Comisión Nacional del Agua (2009) *Actualización de la Disponibilidad Media Anual de Agua Subterránea Acuífero (1502) Ixtlahuaca – Atlacomulco, Estado de México*. México.
- CONAGUA, Comisión Nacional del Agua (2011) *Determinación de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Tenancingo (1504), Estado de México*. México, D.F.
- Gaceta de Gobierno del Estado de México, 2011 Programa de conservación y manejo del Parque Estatal Nahuatlaca – Matlazinca.
- Gobierno del Estado de México y Secretaría de Ecología. (1999). Fase descriptiva. En: *Programa de Ordenamiento Ecológico del Territorio del Estado de México (POETEM)*.
- Gómez-Delgado, M. y J. Barredo (2005) *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la ordenación del Territorio*. México: Alfaomega. P. 43 y 52.
- Gutiérrez-Negrín, L. (2014) *Aspectos relevantes de la Iniciativa de Ley de Energía Geotérmica*. En [<http://www.geotermia.org.mx/geotermia/?cat=1>] consultado: 29/04/2015 15:00hrs.
- Herrera-Reyes, A. (1993). El espacio Geográfico. En: *Atlas general del Estado de México*. Vázquez-Gutiérrez, J.E. Instituto de Investigación e Información Geográfica, Estadística y Catastral. Volumen II. México. P. 17- 51.
- Huesca-Jiménez, A. (2008) “*Plataforma E-Learning para el estudio de la Energía Geotérmica*”. Madrid. Proyecto profesional. Universidad Pontificia Comillas.

- Jutglar, L., A. L. Miranda, y M. Villarubia (2011) *Manual de Calefacción*. Barcelona: Marcombo. P. 519.
- Mulás-Del Pozo, P. (2005) *Estimación del recurso y prospección tecnológica de la geotermia en México*. Cuernavaca, Morelos. México. IIE.
- Hernández-Martínez, E. C., (2008) *“La problemática forestal en Temascaltepec y Donato Guerra, Estado de México”*, Chapingo, Texcoco, Edo. de México. Tesis. Ingeniero Forestal, Universidad Autónoma Chapingo.
- H. Ayuntamiento de Ixtlahuaca, 2008 Programa Municipal de Ordenamiento Ecológico Local de Ixtlahuaca, Estado de México, Gob, del Estado de México.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística geografía e Informática, (2001) *“Síntesis de Información Geográfica del Estado de México”*, México
- IDAE, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, (2011) *“Evaluación del Potencial de la Energía Geotérmica. Estudio Técnico Per 2011-2020”* Madrid.
- Le Bert-Hiriart G., (2011) *Evaluación de la Energía Geotérmica en México, Informe para el Banco Interamericano de Desarrollo y la Comisión Reguladora de Energía*. México.P.1, 2 y 112.
- Lina-Peña, M. J., (2010) *El ecoturismo como desarrollo sustentable. El Parque el Borbollón, Temascalcingo, Estado de México*. Tesis, Maestro en Ciencias Económicas. México D.F. Instituto Politécnico Nacional.
- Llopis-Trillo G., y V. Rodrigo, (2008): *Guía de la energía geotérmica*, Universidad Politécnica de Madrid.
- Pous, J. y L. Jutglar (2004) *Energía Geotérmica*. Barcelona (España): Aleph. P. 33-36.
- Puente-Muñiz, C. F., (1988) *Geotermia*. México: S.E.P. U.A.S.L.P. P. 35-44.
- Plan municipal de Desarrollo Urbano de Donato Guerra, 2003.
- Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Ixtapan del Oro, 2003.
- Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Tenango del Valle, 2011.
- Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Ixtapan de la Sal, 2003.
- Price, Michael, (2003) *“Agua subterránea”*. México: Limusa
- Prol-Ledesma, R. M., (1996) *El calor de la Tierra*. México. Fondo de Cultura Económica.
- http://www.elclima.com.mx/poblaciones_cercanas_a_valle_de_bravo.htm consultado 14/13/2015 18:30 hrs.
- <http://www.edomexico.gob.mx/atizapansantacruz/municipio-atizapan.html> consultado: 14/13/2015 18:30 hrs.

- http://www.semarnat.gob.mx/temas/ordenamientoecologico/Documents/documentos_monarca/anexo_turistica_monarca.pdf consultado: 14/13/2015 18:30 hrs.
- <http://sferaproyectoambiental.wordpress.com/2013/11/25/geotermia-aplicaciones/> consultado: 15/12/2013 16:50 hrs.
- http://www.wwf.org.mx/que_hacemos/desierto_chihuahuense/cachorrillo_de_julimes/ consultado: 22/04/2015 13:20hrs.
- Sierra, J. L., y G. Pedro (1998) *Energía geotérmica*
- Tarbuck, E. J., y F. Lutgens (2009) *Ciencias de la tierra: una introducción a la geología física*. Madrid: Prentice Hall. P. 51-54.
- Tonda, J., (1998) *El Oro solar y otras fuentes de energía*. México: La ciencia para todos. P. 110.
- Yarza de-De la Torre, E. (1992) *Volcanes de México*. México. D.F: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Wilson-Jerry D., y J. A. Buffa (2003) *Física*. México: Pearson. P. 333.

ANEXOS

