

Artículos

El aprovechamiento del calor de los Andes para el desarrollo energético sustentable

María Florencia Ahumada, Rubén Filipovich, Agostina Chiodi, Walter Báez, José Viramonte

Instituto de Bio y Geociencias del NOA (IBIGEO-CONICET) y Universidad Nacional de Salta.

La creciente demanda energética mundial por parte de la industria y la sociedad, como así también ciertos aspectos relacionados con el medio ambiente, tales como la contaminación, la emisión de gases de efecto invernadero y el agotamiento de los recursos, han acentuado los problemas de déficit energético alrededor del mundo. Esto ha ocasionado el consiguiente desarrollo de políticas públicas y privadas diseñadas para fomentar el aprovechamiento de energías limpias, no convencionales y renovables, que reduzcan la dependencia de combustibles fósiles para la generación de energía como es el caso de la energía geotérmica. Si bien Argentina posee un alto potencial geotérmico debido a las condiciones geológicas favorables, es decir sobre un borde tectónico convergente con vulcanismo activo a lo largo de la Cordillera de los Andes, no existe hasta el momento ninguna planta geotérmica en todo el país (Fig. 1).

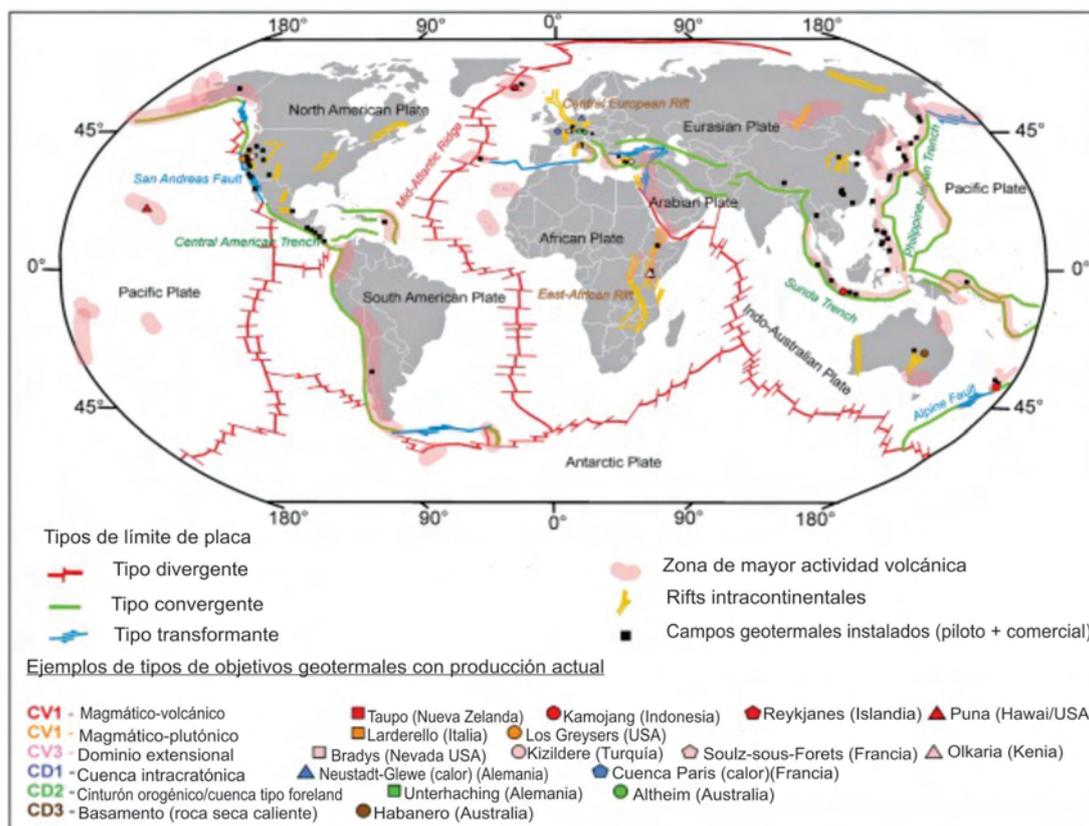


Figura 1: Mapa que muestra la distribución de los principales sistemas geotérmicos en el mundo y su relación con los distintos ambientes tectónicos (modificado de Gehringer y Loksha, 2012).

¿QUÉ ES LA GEOTERMIA?

El término geotermia proviene del griego geo (Tierra) y thermos (calor); literalmente “calor de la Tierra”, se refiere a la energía o calor natural que proviene del interior de la Tierra. La cual se encuentra constituida por diferentes capas concéntricas; la corteza (rocas en estado sólido), el manto (materiales en estado semifundidos) y el núcleo (núcleo externo líquido y núcleo interno sólido).

El flujo de calor que se transmite desde el interior de la Tierra hacia las capas más superficiales de la corteza terrestre genera variaciones de temperatura a diferentes profundidades, esto se conoce como gradiente geotérmico. En los sectores más superficiales de la corteza este varía de 2,5-3 °C por cada 100 metros de profundidad. A pesar de esto, existen regiones donde el valor de dicho gradiente es varias veces superior al normal, fenómeno que se destaca por la presencia de temperaturas elevadas en niveles superficiales de la corteza. La presencia de estas zonas “anómalas” pueden deberse a varios factores (químico, radiométrico y/o tectónico), siendo el más

relevante aquel asociado al emplazamiento de cuerpos magmáticos en niveles superficiales de la corteza (3-10 km) (ej. en los límites de placas tectónicas, donde el deslizamiento de estas favorece el ascenso de magma) (ver Fig. 1). Estas regiones de la corteza donde el gradiente geotérmico es “anómalo” constituyen zonas de gran interés geotérmico. Posteriormente, para que esa energía del interior de la Tierra pueda ser aprovechada, es necesario que se acumule en algún cuerpo o región del interior de la corteza. En esta zona, se generan procesos de interacción de fluidos calientes (agua y/o vapor) con la roca porosa y permeable que los aloja, sellada a su vez por una cubierta de roca impermeable, denominados sistemas geotérmicos.

Los elementos principales que definen a un sistema geotérmico son (Fig. 2): 1) una fuente de calor, generalmente se trata de un cuerpo magmático somero; 2) un reservorio donde acumular fluidos calientes (roca permeable), del cual se extrae el calor, 3) una barrera que mantiene el calor confinado (capa sello, de baja permeabilidad), evitando la disipación de la energía, y 4) un fluido hidrotermal, que transfiere el calor y recarga el reservorio.

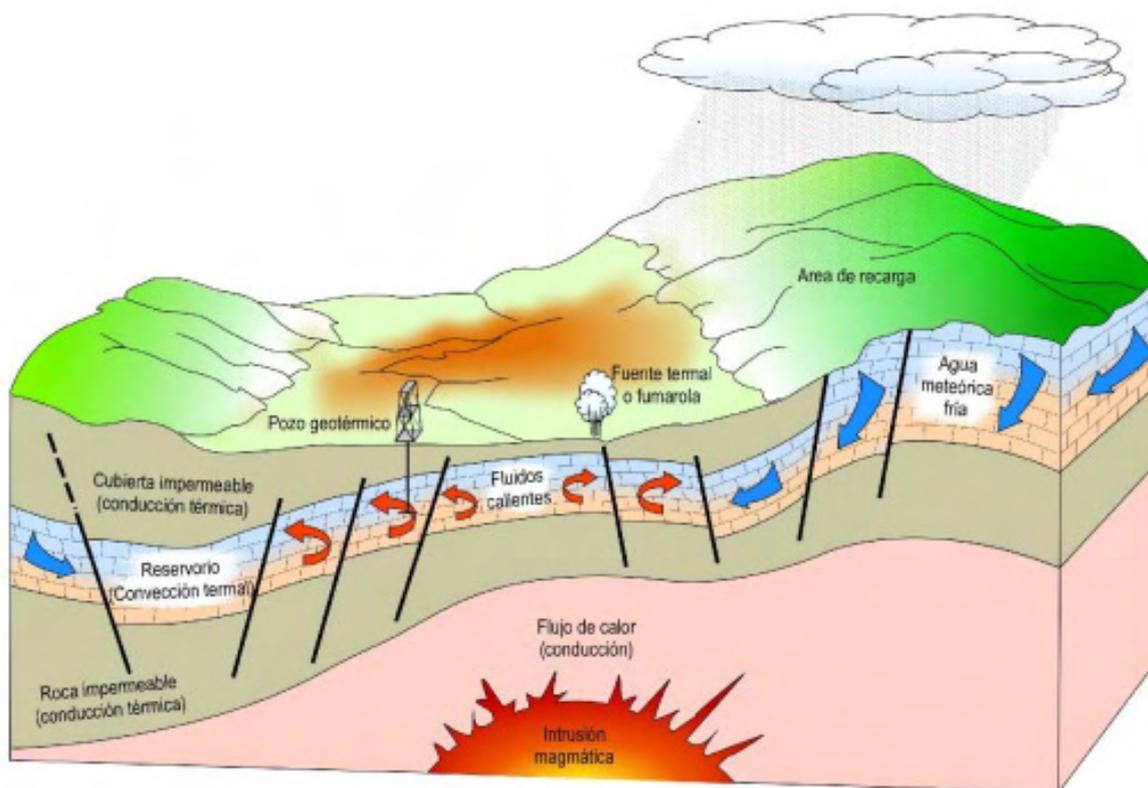


Figura 2: Modelo conceptual de un sistema geotérmico con sus elementos principales (modificado de Dickson y Fanelli, 2004)



A

Los fluidos calientes alojados en estos reservorios se extraen y pueden ser utilizados dependiendo de su temperatura, para generar energía eléctrica o para ser utilizado de manera directa, como pueden ser: balneología (uso terapéutico), calefacción y refrigeración, agricultura (principalmente calefacción de invernaderos y criaderos de animales), acuicultura (calefacción de piletas para peces y crustáceos), procesos industriales (a pequeña, mediana y gran escala), etc. (Fig. 3).

SISTEMAS GEOTÉRMICOS: CLASIFICACIÓN

Existen diversos tipos de clasificaciones de los sistemas geotermales, una primera clasificación se realiza en función de la temperatura (T) (Cuadro 1); otra clasificación se basa en función de la naturaleza del reservorio (Cuadro 2):

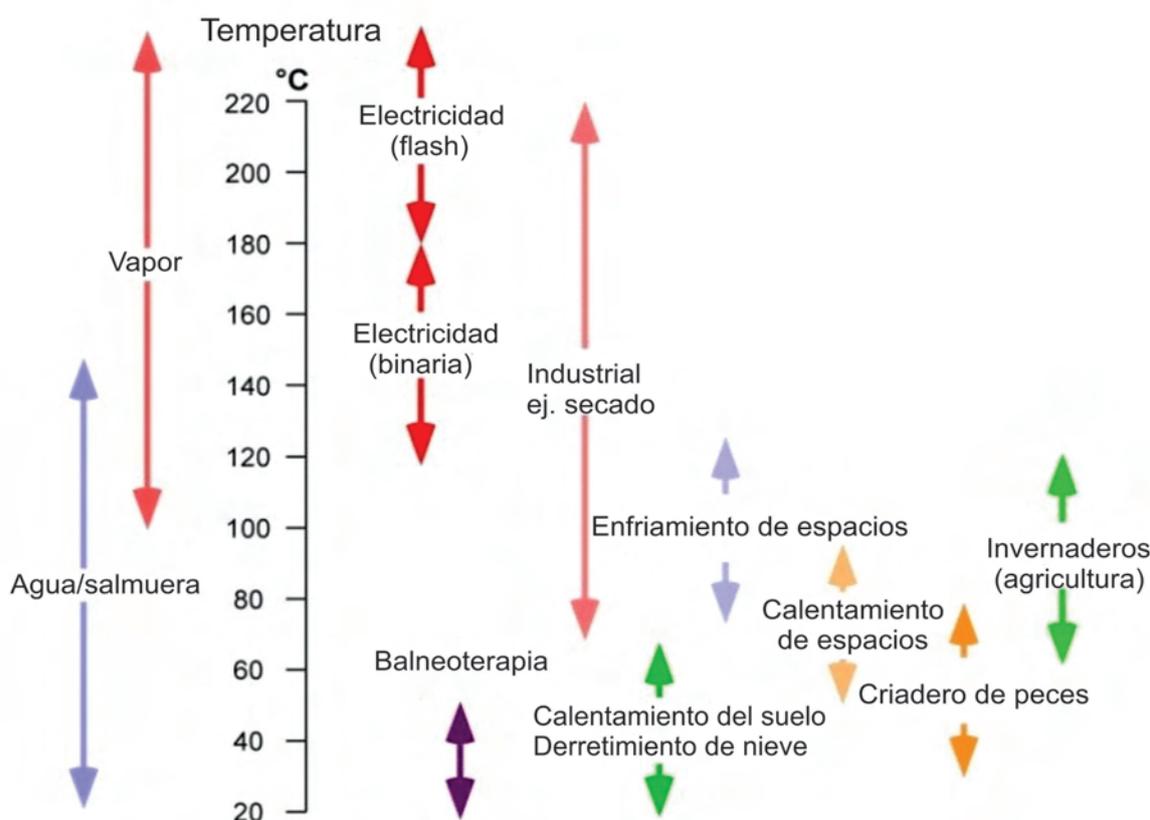


Figura 3: Alguno de los principios usos de la geotermia de acuerdo a la temperatura de los fluidos (modificado de UNU-GTP, 2016).

Cuadro 1: Clasificación de los sistemas geotérmicos en base a la temperatura

	Muffler (1978) (°C)	Hochstein (1988) (°C)	Benderitter y Cormy (1990) (°C)	Haenel et al. (1988) (°C)
Baja T	<90	<125	<100	<150
Moderada T	90-150	125-225	100-200	-
Alta T	>150	>225	>200	>150

Cuadro 2: Clasificación de los sistemas geotérmicos en base a la naturaleza del reservorio (modificado de Wright et al. (1985))

Tipo de recurso	Temperatura característica
Recursos asociados a magmatismo Sistemas hidrotermales convectivos	
Dominados por agua caliente Dominados por vapor (vapor seco)	Alrededor de 30°C a más de 350°C Alrededor de 240°C
Sistemas de roca caliente Roca seca caliente Fundidos parciales	90°C a 650°C más de 600°C
Recursos hospedados en rocas no volcánicas Fluidos calientes en reservorios a gran escala Fluidos calientes en reservorios geo-presurizados	Alrededor de 30°C a 200°C Alrededor de 90°C a 200°C

LA GEOTERMIA EN SUDAMERICA

Las condiciones geológicas a lo largo de los Andes Centrales de Sudamérica (Perú, Bolivia, Chile y Argentina), principalmente asociadas con la intensa actividad tectónica y magmática presente en la región (límites de placas tectónicas), ha permitido el desarrollo de una gran variedad de campos geotérmicos de alta temperatura (alta entalpía), para la generación de energía eléctrica. Por otro lado, en la región centro-oriental del continente sudamericano, existen recursos geotérmicos de menor

temperatura (media y baja entalpía), que pueden presentar condiciones aptas para plantas geotermo-eléctricas de pequeña a mediana escala, con tecnología binaria (plantas geotérmicas que pueden operar con fluidos de menor temperatura <150°C). Este tipo de recurso esta generalmente asociado con cuencas sedimentarias y circulación profunda de fluidos en zonas de gradientes normales a ligeramente anómalos (e.g. Brasil, Uruguay) (Fig. 4). A pesar de este panorama, los Andes Centrales continúan siendo una de las regiones geotérmicas más grandes del mundo que aún continúa sin explotar este recurso en su totalidad.

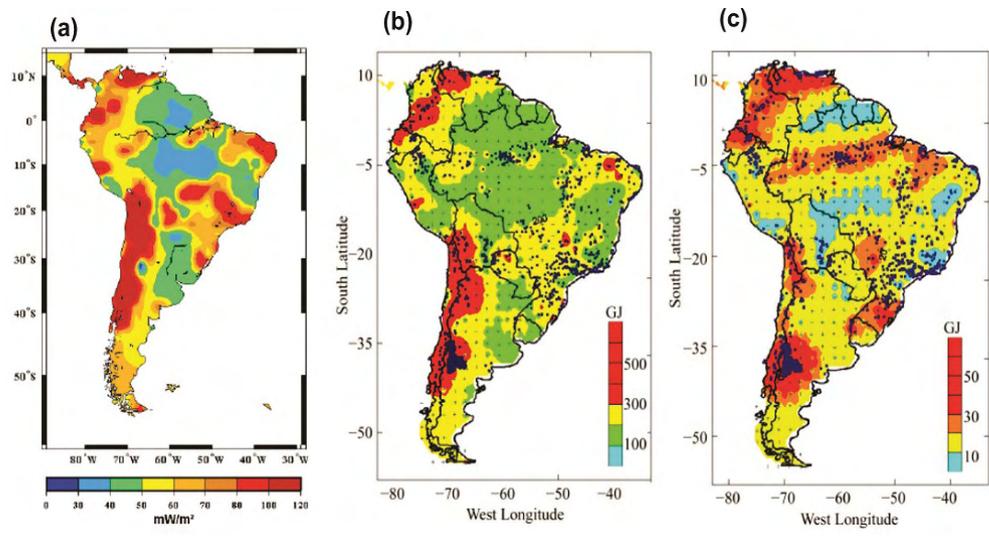


Figura 4: Distribución del recurso geotérmico en América del Sur: a) mapa de flujo de calor (tomado de Cardozo, 2010), b y c) mapas de recurso base y recurso recuperable (tomados de Pinto Vieira y Hamza, 2014).

En este contexto, la Argentina es uno de los países de Sudamérica que ha tenido mayor avance en el estudio de sistemas hidrotermales (ver Fig. 6). Las primeras fases de exploración se llevaron a cabo durante la década de 1970, a cargo del Gobierno Argentino, a través de la “Comisión Nacional de Estudios Geotérmicos”, integrada por el Ministerio de Energía, la empresa petrolera estatal YPF y el Gobierno Provincial de Neuquén; las tareas de

exploración se realizaron en las áreas de Copahue y Domuyo (Provincia de Neuquén) (ver Fig.5), cuyo principal propósito era mejorar y diversificar la matriz energética.

Actualmente el 78 % de la matriz energética de nuestro país depende de los combustibles fósiles y recursos no renovables. Este panorama ha impulsado el desarrollo de distintas iniciativas por parte de organismos gubernamentales para generar energías alternativas, renovables, económicas, más limpias y amigables con el medio ambiente como es el caso de la energía geotérmica.

En el caso del noroeste argentino (NOA), la investigación de los sistemas geotérmicos en esta región comenzó en los

años '70, '80 y principio de los '90, donde el área geotérmica de Tuzgle y Tocomar (Puna) es considerada un sector de extenso interés geotérmico ubicado en el límite entre las provincias de Salta y Jujuy, a aproximadamente 135 km al noroeste de la ciudad de Salta y a 25 km al oeste de la ciudad de San Antonio de Los Cobres (ver Fig. 5). Ambos sistemas presentan vías de acceso (RN 40 y RN 51), a pesar de su ubicación remota, y encontrarse a aproximadamente 4.000 m.s.n.m. Además, el Sistema Geotérmico de Tocomar (SGT) es atravesado por una línea de alta tensión internacional y una vía del ferrocarril Belgrano (Ramal C14) facilitando el desarrollo de estos sistemas.

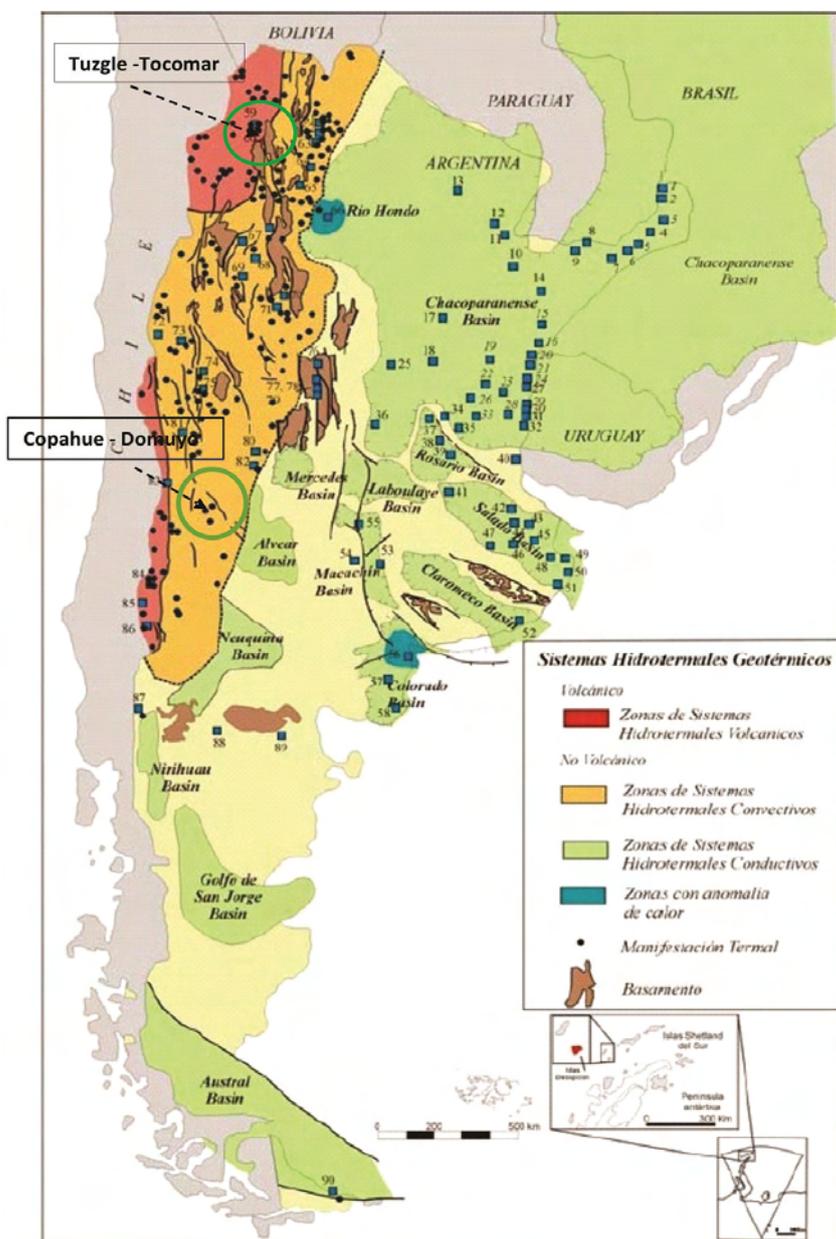


Figura 5: Mapa de distribución de los sistemas hidrotermales geotérmicos en Argentina modificado de Pesce et al., 2014). Los círculos verdes muestran la ubicación de las áreas Tuzgle-Tocomar y Copahue-Domuyo.

El interés geotérmico en esta región reside en la presencia de manifestaciones termales alrededor del Volcán Tuzgle (estratovolcán de 0,5 Ma, con actividad en el Holoceno) (Fig. 6) y a lo largo del sistema de fallas Calama-Olacapato-Toro (Fig. 7), con temperaturas que varían de 30-50°C, llegando a alcanzar hasta 80°C. De

acuerdo con estimaciones geotermométricas realizadas indican rangos de temperatura para el reservorio de 131-235 °C para el SGT (recurso de media a alta temperatura; Giordano et al., 2016) y 130-143°C para el Tuzgle (recurso de media a alta temperatura; Coira 2008 y referencias allí insertadas).



Figura 6: Imágenes de afloramiento del Sistema Geotermal de Tuzgle.

EXPLORACIÓN GEOFÍSICA

El correcto y más apropiado estudio de los sistemas geotermales en una primera etapa de exploración del recurso, debe llevarse a cabo de manera multidisciplinaria utilizando numerosas herramientas de las geociencias (volcanología, estratigrafía, geología estructural, hidrogeoquímica y geofísica) para la resolución de un problema geológico particular. En este sentido, la geofísica (ciencia que se encarga del estudio de la Tierra desde el punto de vista de la física) juega un rol fundamental ya que proporciona un medio para delimitar las característi-

cas del subsuelo, cubriendo extensas áreas poco tiempo y a menor costo que una perforación. Además de las principales características estructurales superficiales y profundas, permite detectar otros elementos de los sistemas geotermales, tales como, la fuente de calor, la extensión del reservorio, capa sello (clay cap), zona de ascenso (upflow) y descarga (outflow) de los fluidos, zonas de alta permeabilidad, así como permitir evaluar el potencial energético (MWe) del recurso. Todos estos elementos pueden ser detectados a partir de una anomalía geotérmica causada por contrastes entre las propiedades físicas (temperatura, resistividad/conductividad eléctrica, porosidad, etc.) de las rocas y los fluidos dentro y fuera del reservorio.

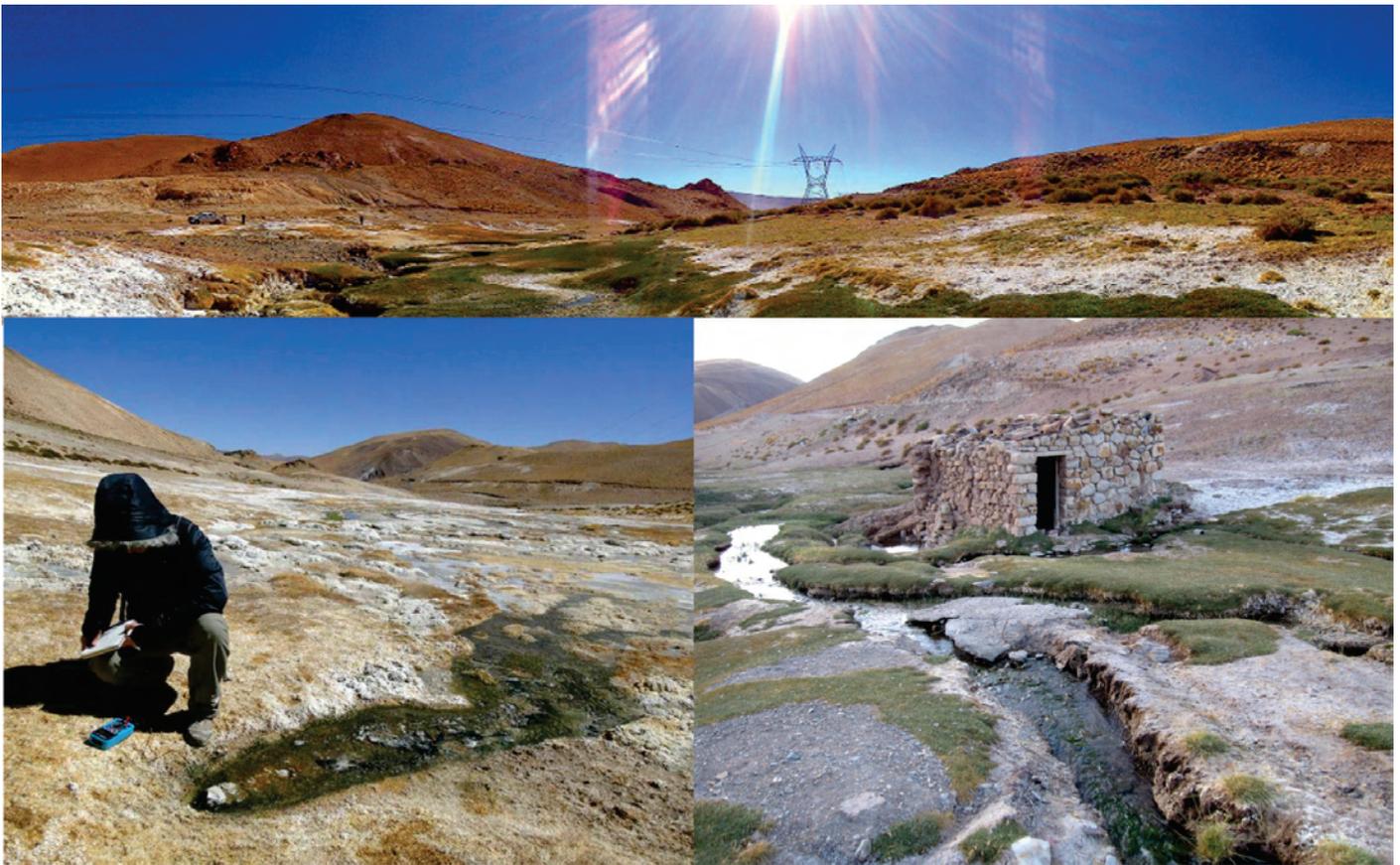


Figura 7: Imágenes de afloramiento del Sistema Geotermal Tocomar.

MÉTODO MAGNETOTELÚRICO (MT)

Dentro de los métodos geofísicos, la magnetotelúrica (MT) es uno de los métodos electromagnéticos más utilizados en la exploración de los sistemas geotermales debido a su capacidad para obtener información de profundidades de cientos de kilómetros; además, puede proveer información valiosa acerca de la variación lateral (espacial) y/o vertical (profundidad) de la resistividad eléctrica (capacidad de los materiales de resistir el paso de la corriente eléctrica) y/o conductividad eléctrica (capacidad de los materiales de conducir la corriente eléctrica) de los materiales de la corteza terrestre. Los sistemas geotermales están compuestos generalmente por una región o sistema de fallas y fracturas rellenas de fluidos geotermales, los cuales pueden tener altas

concentraciones de sales disueltas, generando conducción electrolítica en la matriz rocosa. Tanto la resistividad del fluido y de la roca dependen de la temperatura; generalmente la resistividad eléctrica del sistema geotermal exhibe valores más bajos que la correspondiente a la roca que los aloja. Las alteraciones de los minerales arcillosos provocadas por los procesos hidrotermales que tienen lugar en los sistemas geotermales presentan características muy conductoras (Fig. 8). Esto hace que los sistemas geotermales sean objetivos ideales para el método MT, el cual se ha convertido en el método estándar para la exploración de estos sistemas en muchos países. El objetivo principal del método en la geotermia es determinar la distribución espacial y la geometría de los diferentes componentes de los sistemas geotérmicos (clay cap, reservorio, fuente de calor, vías de ascenso de los fluidos).

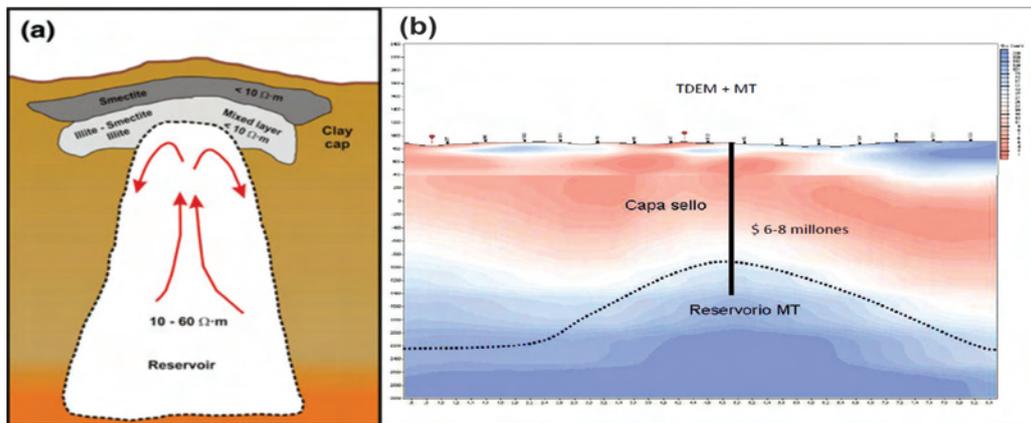


Figura 8: a) Modelo de un sistema geotermal idealizado, donde se observan las capas de alteración hidrotermal (clay cap $< 10 \Omega \cdot m$; reservorio $> 10 \Omega \cdot m$) (tomado de Muñoz 2014), b) Ejemplo de un modelo MT, donde se distingue la capa sello (clay cap) y el reservorio.

La magnetotelúrica (MT) es una técnica que consiste en la medición simultánea de los campos eléctrico (E_x y E_y) y magnético (H_x , H_y y H_z) sobre la superficie de la tierra (Simpson y Bahr, 2005). El campo eléctrico se mide con pares de electrodos enterrados en la tierra (impolarizables) y el campo magnético se registra con magnetómetros de inducción (bobinas). Se realiza el registro temporal de los campos, almacenándolos en un sistema de adquisición de datos, obteniéndose series temporales

con un determinado intervalo de muestreo, que estará relacionado con el intervalo de frecuencias a estudiar (Fig. 9). Luego de la inspección visual de las series temporales se calcula el tensor de impedancia (Z) (parámetro que contiene la información sobre la distribución de la resistividad eléctrica) y posteriormente, se debe realizar un análisis de la dimensionalidad geoelectrica o sea cómo varía la resistividad eléctrica en el medio, análisis que puede ser en 1D, 2D ó 3D obteniéndose así varios modelos (Fig. 10).

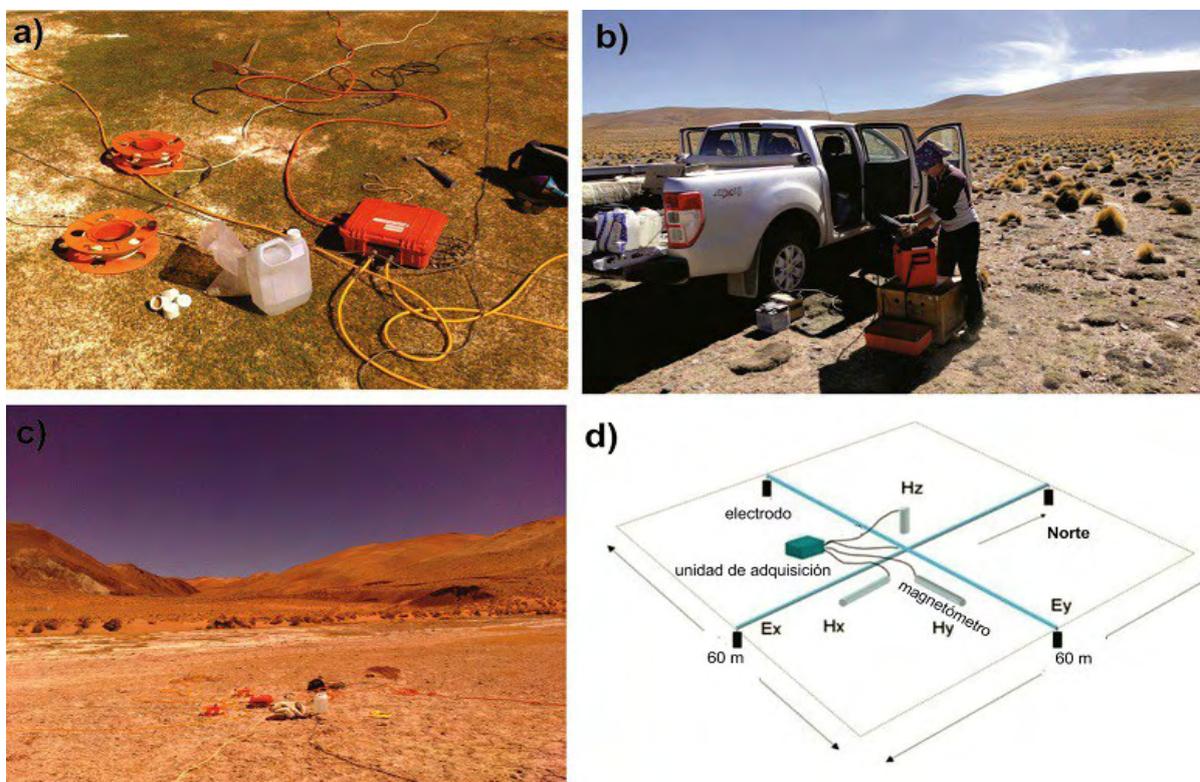


Figura 9: a), b) y c): Fotos de afloramiento donde se observa el instrumental de adquisición, d) arreglo geométrico de los magnetómetros de inducción y los electrodos impolarizados (tomado de Ahumada et al., 2017).

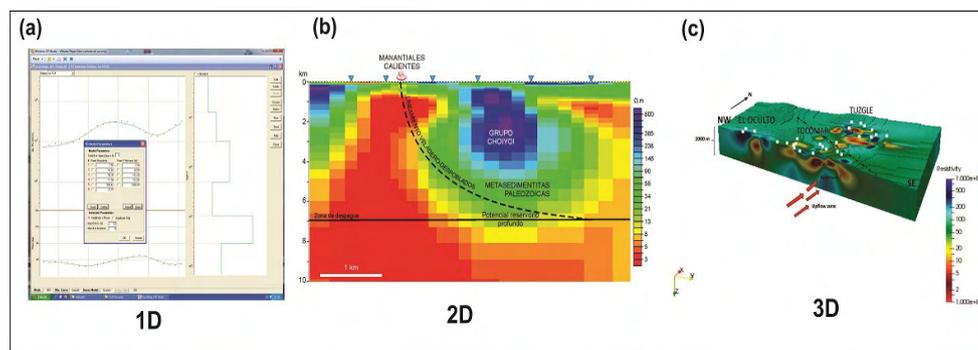


Figura 10: Ejemplos de modelos de inversión a) 1D, b) 2D (tomado de Barcelona et al., 2014) y c) 3D

Por último, cabe mencionar que el impulso de energías limpias y renovables es un paso esencial de cualquier sociedad que piensa en el futuro. El abastecimiento a partir de la energía que nos ofrece la Tierra es prácticamente ilimitado, siendo una verdadera fuente inagotable de energía. Por lo tanto, el desarrollo de la geotermia contribuirá en el futuro a la estabilidad del suministro energético, ya que esta, puede obtenerse las veinticuatro horas del día y en cualquier época del año. El potencial está ahí, pero el coste de cubrir la demanda de energía exclusivamente a través de la geotermia sería demasiado elevado. Con lo cual habrá que recurrir también a otro tipo de energías como la eólica, solar, hidráulica y a la

biomasa. La geotermia será, pues, una parte importante de la combinación de fuentes de energía del futuro.

AGRADECIMIENTOS: Agradecemos el apoyo otorgado por parte de los proyectos, PIO No. 3320140100015CO “Caracterización del Sistema Geotermal Tocomar y evaluación de su potencial como recurso energético no convencional sustentable para la Puna Argentina (2015-2017)”, CONICET e YPF S.A., dirigido por el Dr. J. G. Viramonte; y MINCyT MAE AR00197 di Grande Rilevanza “Sviluppo dei sistemi sostenibile geotermici Associati della ai sistemivulcanici Puna di nelle Salta Province (2014-2016)”, dirigido por el Dr. Guido Giordano y el Dr. J.G. Viramonte.

Para conocer más...

Ahumada, M. F., Favetto, A., Filipovich, R., Chiodi, A., Báez, W., Viramonte, J. G. y Guevara, L. (2017). Aplicación del método magnetotélúrico en la exploración del sistema geotermal Tocomar (Puna, NO Argentina). XX Congreso Geológico Argentino, San Miguel de Tucumán, 7-11 de agosto de 2017.

Aquater, (1981). Exploración Geotérmica del cerro Tuzgle, provincia de Jujuy, República Argentina. Estudio de prefactibilidad. Secretaría de Energía de la Nación, Buenos Aires, Informe inédito, p. 115.

Filipovich R., Barrios A., Ahumada F., Chiodi A., Báez W., Giordano G. and Viramonte J. (2017). Probabilistic assessment of electrical potential of Tocomar Geothermal Field (Central Puna - NW Argentina) using volumetric method. In Proceedings 39th New Zealand Geothermal Workshop, Rotorua, New Zealand.

Giordano, G., Ahumada, F., Aldega, L., Báez, W., Becchio, R., Bigi, S., Favetto, A., Filipovich, R., Fusari, A., Gropelli, G., Invernizzi, C., Maffucci, R., Norini, G., Pinton, A., Pomposiello, C., Tassi, F., Taviani, S. y Viramonte, J.G. (2016). Preliminary Data on the Structure and Potential of the Tocomar Geothermal Field (Puna Plateau, Argentina). Energy Procedia 97: 202-209.

Pesce A.H., Coira B., Caselli A.T. (2014) - Geotermia en Argentina. Desarrollo Actual y Potencial. ALCUENET Geothermal Energy Workshop – Salta, December, 2014. Documento disponible en: alcuenet.eu/dms-files.php?action=doc&id=681.

Simpson, F. y Bahr, K. (2005). Practical Magnetotellurics. Cambridge University Press, 272 p., Cambridge.