

Temas de Biología y Geología del Noa

Revista de Divulgación Científica del Instituto de Bio y Geociencias

ОПЫТЪ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ.

ОСНОВАННОЙ НА ВѢСЪ АТОМНОЕ ВѢСЪ И ХИМИЧЕСКОЕ СХОДСТВО.

		Ti = 50	Zr = 90	? = 180.		
		V = 51	Nb = 94	Ta = 182.		
		Cr = 52	Mo = 96	W = 186.		
		Mn = 55	Rh = 104,1	Pt = 197,1.		
		Fe = 56	Ru = 104,1	Ir = 198.		
		Ni = Co = 59	Pd = 106,8	Os = 199.		
		Cu = 63,4	Ag = 108	Hg = 200.		
H = 1		Be = 9,1	Mg = 24	Zn = 65,2	Cd = 112	
		B = 11	Al = 27,1	? = 68	U = 116	Am = 197?
		C = 12	Si = 28	? = 70	Sn = 118	
		N = 14	P = 31	As = 75	Sb = 122	Bi = 210?
		O = 16	S = 32	Se = 79,1	Te = 128?	
		F = 19	Cl = 35,5	Br = 80	I = 127	
	Li = 7	Na = 23	K = 39	Rb = 85,4	Cs = 133	Tl = 204.
			Ca = 40	Sr = 87,6	Ba = 137	Pb = 207.
			? = 45	Ce = 92		
			?Er = 56	La = 94		
			?Yt = 60	Di = 95		
			?In = 75,6	Th = 118?		

REPORTAJES

José María Tubía Martínez

ARTÍCULOS

Modelos analógicos en Geología

Microtomografías y reconstrucciones tridimensionales

Sistemas geotermales y el método magnetotelúrico

Temas de Biología y Geología del Noa

Comité Editorial

Marissa Fabrezi. IBIGEO, CCT SALTA-JUJUY.
Carolina Montero. IBIGEO, CCT SALTA-JUJUY.
Silvia Quinzio. IBIGEO, CCT SALTA-JUJUY.

Contenidos

REPORTAJES

José María Tubía Martínez1

ARTÍCULOS

Modelos analógicos: una herramienta para entender la deformación de la corteza terrestre. Agustina Villagrán, Facundo Apaza, Melina Celedón y Emilio Barrabino.....4

Imágenes no destructivas de Rayos X: Microtomografías y reconstrucciones tridimensionales. Germán Tirao.....9

El aprovechamiento del calor de los Andes para el desarrollo energético sustentable. María Florencia Ahumada, Rubén Filipovich, Agostina Chiodi, Walter Báez y José Viramonte.....18

Imágen de tapa

Tabla periódica de Mendeleiev de 1869. La Asamblea General de las Naciones Unidas declaró el año 2019 como el Año Internacional de la Tabla Periódica de los elementos Químicos, en homenaje al 150 aniversario del descubrimiento del sistema periódico de los elementos químicos.

IBIGEO

INSTITUTO DE BIO
Y GEOCIENCIAS DEL NOA

www.ibigeo-conicet.gov.ar

CCT-Salta-Jujuy

9 de julio 14

Rosario de Lerma-4405 (Salta)

República Argentina

Es una Unidad Ejecutora de doble pertenencia CONICET-Universidad Nacional de Salta.

El **ibigeo** tiene entre sus objetivos principales: 1) planificar y ejecutar investigaciones en diversos temas relacionados con los recursos naturales de la región; 2) promover la difusión de los resultados de las investigaciones en el ámbito científico; 3) participar en la formación de recursos humanos universitarios de grado y postgrado; 4) colaborar en la organización de conferencias, reuniones y cursos; 5) asesorar en ámbitos públicos y/o privados para la planificación y/o resolución de problemas; y 6) estimular el interés del público por las ciencias y difundir el conocimiento generado por el estudio de temas específicos de la región.

ESTUDIAR GEOLOGÍA EN ESPAÑA



JOSÉ MARÍA TUBÍA MARTÍNEZ

Catedrático en Universidad del País Vasco (UPV/EHU)

Departamento de Geodinámica, Facultad de Ciencia y Tecnología, campus de Leioa, Vizcaya.

Realizó estudios de Licenciatura y Doctorado en la UPV y postdoctorales en Laboratoire de Tectonophysique (Univ. de Nantes, Francia).

Impulsó investigaciones de la estructura interna de plutones graníticos mediante Geología Estructural y métodos geofísicos. Actualmente, estos estudios suman también la elaboración de cartografía geológica detallada y datos termo-barométricos y geocronológicos, con vistas a establecer la cinemática y la evolución dinámica de la litosfera. Las zonas de trabajo seleccionadas incluyen regiones con granitos y migmatitas (Zona Centro-Ibérica y Zona Axial del Pirineo, en España; Cordillera Oriental de los Andes y zonas del Orógeno Famatiniano y Patagonia en Argentina).

TEMAS BGNOA ¿Cuál es la estructura y el perfil de la carrera de geología en España?

JMTM: La titulación académica del Grado en Geología está organizada de forma similar en las diez universidades españolas en las que se imparten dichos estudios. El Grado en Geología supone una carga de trabajo total de 240 créditos (1 crédito = 10 horas de estudio), repartida a razón de 60 créditos por cada uno de los cuatro cursos académicos del grado. Por ley, todas las universidades están obligadas a ofrecer una serie de asignaturas troncales, que garanticen una formación teórica y práctica sobre las disciplinas básicas para la formación de profesionales en Geología. La carga docente del grado se completa con otras asignaturas, de carácter obligatorio en unos casos y optativo en otros, que pueden ser diferentes en cada universidad, pues dependen de la especialización de los profesores que componen sus plantillas docentes. Las salidas al campo y los cursos de Geología de campo también se contabilizan en los 240 créditos, generalmente a razón de medio crédito por día (aunque la duración de una jornada de campo exceda ampliamente cinco horas). Al final del cuarto curso, el alumnado debe realizar un Trabajo de Fin de Grado (TFG; entre 9 y 12 créditos). Ese trabajo puede ser bibliográfico, de investigación (de campo y/o laboratorio) o de Geología aplicada y debe ser defendido públicamente ante un tribunal evaluador. Para presentar el TFG es preciso haber superado el resto de las materias que componen el grado.

TEMAS BGNOA ¿Cuáles son las condiciones de ingreso y permanencia como estudiante en la carrera?

JMTM: En España, el acceso a las universidades públicas requiere superar una prueba de Selectividad, con distintas características según la línea curricular del estudiantado (Ciencias, Humanidades, etc.). Los exámenes de selectividad se superan consiguiendo una nota de 5 sobre 10 (hasta 14 con pruebas adicionales, de carácter voluntario). El acceso a titulaciones muy solicitadas requiere superar notas de corte elevadas (por ejemplo, 12,534 para el Grado en Bioquímica y Biología Molecular de la Universidad del País Vasco). En Geología, en cambio, la nota de ingreso es de 5 en ocho de las universidades donde se imparte, siendo la más alta de 5,562. En cuanto a la permanencia, los requisitos demandados son similares en todas las universidades, y conciernen a la superación del primer curso académico y a cada una de las materias cursadas. Como ilustración, en la UPV/EHU el alumnado deberá aprobar, como mínimo, el 15% (9 créditos) de la carga lectiva de primer curso entre las convocatorias ordinaria y extraordinaria. Y al final del segundo año de matrícula, deberá tener aprobado como mínimo el 30 % (18 créditos) de la carga lectiva del primer curso. Además, para superar cada una de las asignaturas se dispone de seis convocatorias de evaluación (2 por curso). Por último, para completar los estudios de grado, el alumnado dispone de seis años de matrícula, correspondiente a los cuatro cursos del grado más dos años adicionales. Si no se superan esos requisitos, no es posible continuar los estudios de ese grado en la UPV/EHU, aunque sí es posible solicitar la admisión en otra universidad española que imparta el mismo grado.

TEMAS BGNOA. Una vez que se obtiene el título ¿cuál es el campo o salida laboral del egresado?

JMTM: Las salidas laborales de los geólogos en el sector privado se han visto reducidas a raíz de la crisis económica en España, al reducirse drásticamente la inversión en obra pública, gestión medioambiental y en construcción de viviendas. Los sucesivos y cuantiosos recortes de los Presupuestos del Estado también están afectando a las salidas laborales en el campo de la docencia (profesorado de educación preuniversitaria y universitaria) y la investigación; de hecho, como para el resto de la Función Pública, por cada diez funcionarios docentes solo se consigue una nueva plaza de renovación.

A pesar de lo anterior, las expectativas laborales son buenas en sectores como: geotecnia, hidrogeología, hidrocarburos, roca ornamental y gestión del patrimonio natural (Geoparques y Parques Nacionales).

TEMAS BGNOA ¿Hay diferencias en la formación de los geólogos con los nuevos planes de estudio que te llamen la atención?

JMTM: La renovación de los planes de estudio universitarios para adaptarse a la normativa europea supuso una reducción de la carga docente necesaria para graduarse en Geología. Por ejemplo, en la Universidad del País Vasco, la Licenciatura en Geología estaba estructurada en cinco cursos, con una carga lectiva global de 345 créditos. Además, las prácticas de campo y los campamentos de campo no contaban en esos 345 créditos; es decir, la carga lectiva total superaba 375 créditos. En una disciplina eminentemente práctica, como la Geología, una reducción tan ostensible (3750 horas antes; 2400 horas ahora) ha producido una merma apreciable en las habilidades prácticas de los graduados actuales frente a los antiguos licenciados. En concreto, se aprecian carencias significativas en la capacidad para realizar mapas geológicos, en la realización de cortes geológicos en zonas de poca complejidad estructural y en el reconocimiento microscópico de muestras petrográficas.

CONSIDERACIONES FINALES

Además del Grado en Geología, siete universidades españolas ofertan el Grado en Ingeniería Geológica (4 cursos; 240 créditos) y dos un Doble Grado en Ciencias Ambientales +Geología (5 y 6 cursos;+ de 340 créditos). Tras unos primeros años de auge al ofertarse como nuevas titulaciones, su capacidad de atracción ha decaído frente al Grado en Geología. Cada universidad pública española tiene autonomía para establecer el precio de la matriculación en sus cursos. Ciñéndose a la Geología, y para el primer curso, el coste varía entre 757 € en la Universidad de Granada a más de 1.500 € en la Universidad

Autónoma de Barcelona, la U. de Barcelona, la U. Complutense de Madrid y la U. de Salamanca. Además, en caso de no superar una materia en las dos convocatorias disponibles para cada curso, el precio de sucesivas matriculaciones en dicha materia se va incrementando. Por ejemplo, en la Universidad del País Vasco, el precio por crédito es de 19,84 € para la primera matriculación, lo que supone 119,04 € para una asignatura de 6 créditos (1.190,4 € por curso). En caso de no aprobarla, su 2ª matrícula asciende a 28,60 €/crédito y a 43,04 €/crédito para la tercera (y última posibilidad) de matriculación.



Artículos

Modelados analógicos: una herramienta para entender la deformación de la corteza terrestre

Agustina Villagrán, Facundo Apaza, Melina Celedón y Emilio Barrabino

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

La litósfera es la unidad geodinámica (según la clasificación de las capas de la Tierra basada en el comportamiento mecánico de los materiales) más superficial de la Tierra, formada por la corteza terrestre y la parte superior del manto superior, con un espesor aproximado de 50 a 300 km. Según la teoría de la Tectónica de Placas, la litósfera está dividida en fragmentos (placas tectónicas o litosféricas), los cuales están en continuo movimiento uno respecto al otro, generando bordes convergentes, divergentes y transformantes según el tipo de interacción existente. La interacción entre las placas produce grandes esfuerzos y las rocas de la corteza se deforman dando lugar a la generación de estructuras (ej. pliegues, fallas, entre otras).

La Geología Estructural es la rama de la Geología que se dedica al estudio de la corteza terrestre, sus estructuras y las relaciones geométricas de las rocas que la forman, lo que permite interpretar las condiciones y los mecanismos de deformación. Además del interés científico, la Geología Estructural es fundamental para apoyar otras áreas, como la Geotecnia, que se encarga de estudiar las propiedades mecánicas del suelo para la construcción de obras de ingeniería (puentes, diques, rutas, etc.), la exploración y explotación minera e hidrocarburífera, la sismología, entre otras.

La metodología clásica empleada para realizar el análisis estructural de un área, es en primer lugar la descripción geométrica de los cuerpos rocosos a través de las observaciones de campo, realización de mapas geológicos e interpretación de perfiles estructurales. En segundo lugar, se realiza un análisis en detalle de las estructuras (el cual se denomina análisis cinemático) que fueron interpretadas anteriormente determinando los desplazamientos de las estructuras, caracterizando la deformación y proponiendo los procesos que dieron lugar a las deformaciones (campo de esfuerzos y la naturaleza de las fuerzas). Por último, se trata de crear uno o varios modelos que expliquen o ejemplifiquen las estructuras interpretadas. Los modelos pueden ser de tipo: 1) Geométricos (Fig.1), constituyen modelos estáticos que muestran las estructuras dentro de la corteza terrestre en dos o tres dimensiones, 2) Cinemáticos, que muestran la evolución de una estructura en el tiempo, desde un estado inicial (sin deformación) hasta un estado final (deformado) (Fig. 2) y 3) Experimentales, también conocidos como modelos analógicos, que utilizan principios físicos y esfuerzo mecánico para representar las estructuras que tienen lugar en la corteza terrestre, los cuales serán desarrollados a continuación.

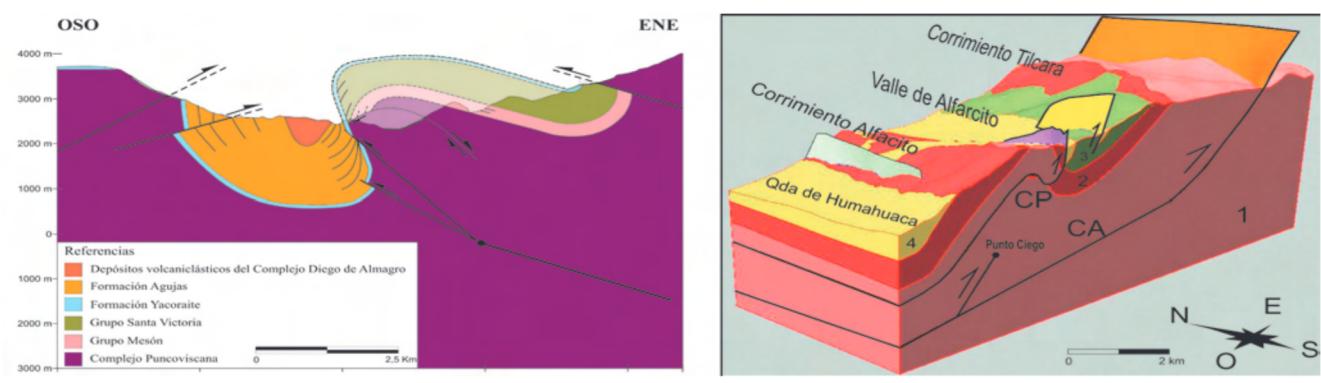


Figura 1. Ejemplos de modelos geométricos en dos y tres dimensiones, que muestran las estructuras interpretadas de un área de estudio.

La modelización experimental es una técnica ampliamente utilizada en Geología Estructural para reproducir procesos geológicos a pequeña escala que son utilizados para estudiar el desarrollo y la cinemática de estructuras geológicas con fines científicos, económicos, de enseñanza y de divulgación de la ciencia.

La utilización de modelos analógicos en el ámbito científico sirve para entender los procesos de formación de las estructuras, comparar ejemplos reales con modelos de laboratorio y utilizar los resultados obtenidos en softwares de modelados numéricos para la interpretación de las estructuras en subsuelo, principalmente en lugares

donde no se cuenta con información de pozos o geofísica. Por otro lado, la utilización de modelos analógicos con fines económicos está orientada al estudio de sistemas de fallas extensionales para exploración y explotación de hidrocarburos.

El primer modelo analógico documentado fue creado por Cadell (1889) en una caja a presión y usando materiales de arcilla (Fig. 3). Posteriormente le siguieron muchos otros autores quienes experimentaron en diferentes aparejos (cajas y mesas de modelados) y con variados materiales, los cuales aportan información acerca de los parámetros a tener en cuenta para modelar.

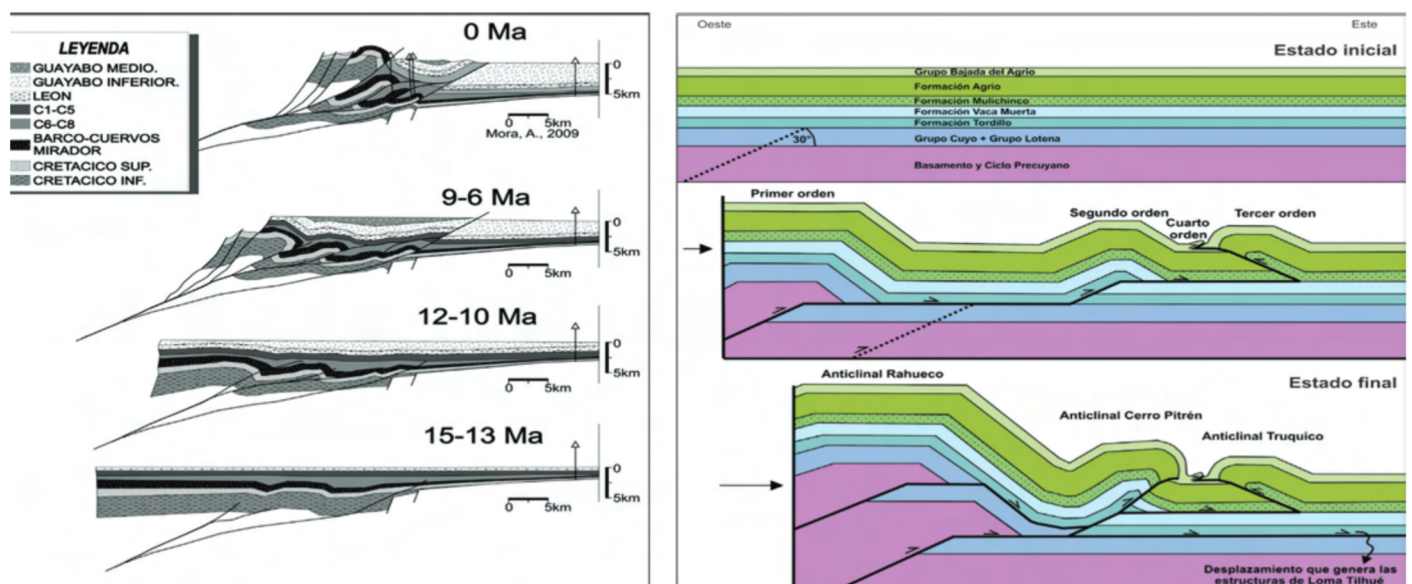


Figura 2. Ejemplos de modelos cinemáticos, donde se muestran las diferentes etapas evolutivas de un área, desde un estado inicial hasta uno final pasando por uno o más estados intermedios.

A

Este método ha evolucionado mucho, partiendo de experiencias puramente cualitativas en sus inicios, a complejos modelos desarrollados actualmente en los que se respetan las reglas de similitud (geométrica, cinemática y dinámica) para representar de la manera más real las propiedades y características de los materiales utilizados. Además, el uso de nuevas tecnologías utilizadas en otros campos de la ciencia ha permitido un gran progreso, desde el uso de motores y programas computacionales para impartir el movimiento, hasta técnicas de análisis fotográfico seriado y escaners milimétricos.

En la Facultad de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Salta se cuenta con un Laboratorio de Modelado Analógico que está integrado por una mesa de modelado en cuyo extremo se sitúa un motor paso a paso acoplado a un reductor de velocidad unido a un tornillo sin fin, que acciona un pistón o pared móvil (Fig. 4). El motor está conectado a una computadora que cuenta con un software diseñado por el Profesor Daniel Hoyos de la Facultad de Ciencias Exactas, que le permite movimientos de avance o retroceso a la pared móvil.



Figura 3. Primer modelo analógico documentado tomado de Cadell (1889)

El material más utilizado es la arena seca de distintos colores, que simula la mecánica de las rocas en los niveles superiores de la corteza, ya que no tiene cohesión, tiene un ángulo de fricción interna de 30° similar al de las rocas sedimentarias y un comportamiento frágil. Sin embargo, se pueden utilizar variados materiales como por ejemplo azúcar, café, harina, pinturas, arcillas,

parafinas, etc. para simular capas geológicas; láminas de acetato, papel vegetal y microesferas de vidrio para simular planos de fallas y niveles de despegue; siliconas, globos, geles, slime, etc. para simular rocas con comportamiento dúctil o domos. Todos los materiales mencionados, entre otros, fueron probados por diferentes autores para experimentar sus comportamientos y comprobar el efecto logrado.

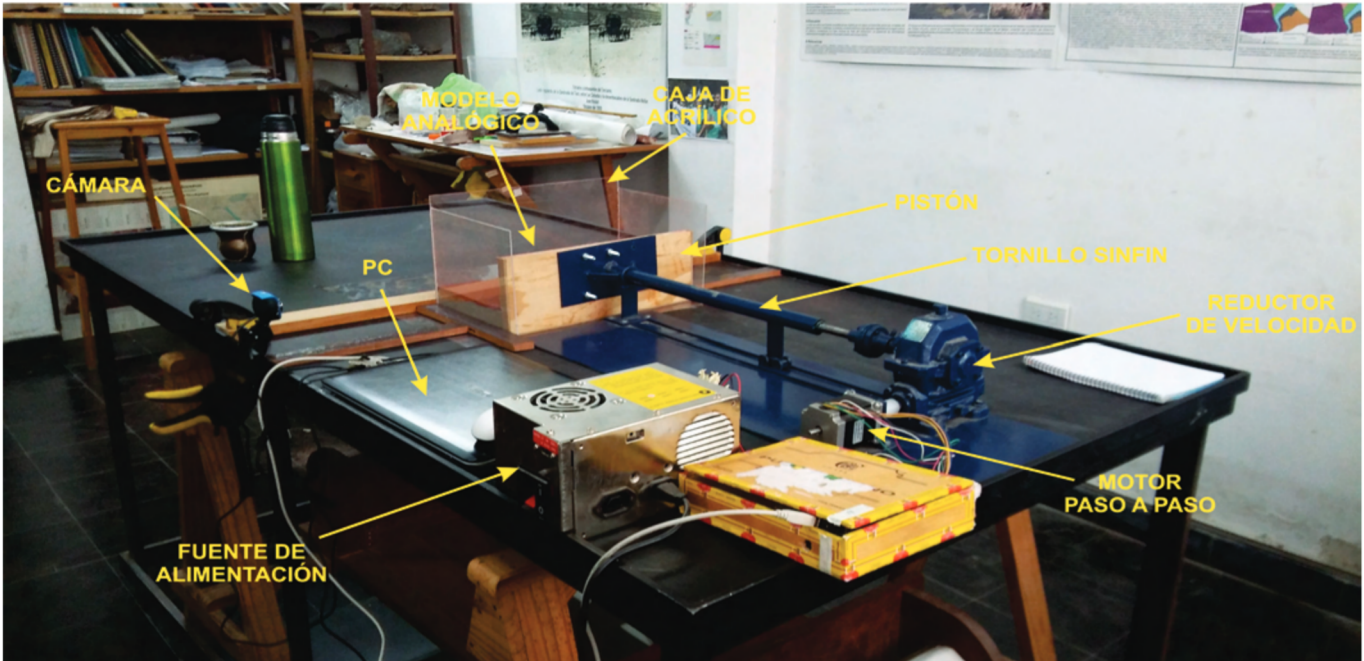


Figura 4. Mesa de modelado analógico de la Cátedra de Geología Estructural, Facultad de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Salta.

La preparación del modelo consiste en la colocación de capas de arena de distintos colores con sus dimensiones escaladas (Fig. 5), todo el preparado se dispone en una caja de acrílico y se deforma mediante la pared móvil, con movimientos compresivos o extensionales según sea el caso. El registro de la evolución de los modelos durante el experimento se hace con cámaras fotográficas digitales, colocadas sobre trípodes. Se toman fotografías a intervalos de tiempos regulares tanto de

perfil como de planta de los modelos. Para tener un registro completo de la deformación y analizar la estructura interna, los modelos son gelificados (Fig.6a) y cortados en secciones ortogonales al rumbo de las estructuras generadas (Fig. 6b). Estas secciones pueden ser utilizadas como modelos didácticos para la enseñanza o pueden ser fotografiadas e insertadas en programas computacionales para la interpretación de las estructuras en profundidad.



Figura 5. Preparación del modelo: sedimentación de las capas de arena que representan capas geológicas.

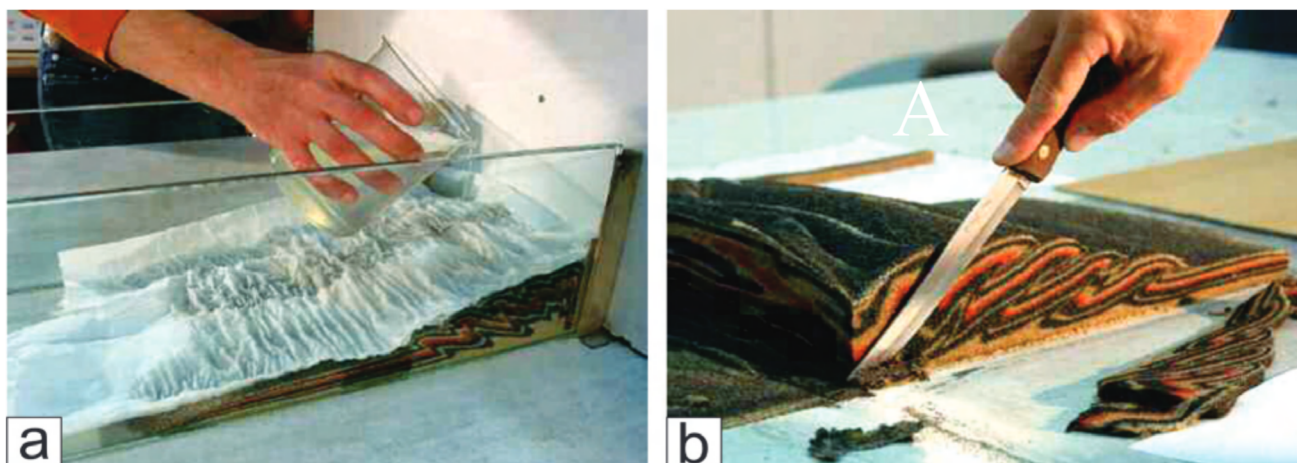


Figura 6. Una vez deformados, los modelos son gelificados y cortados en secciones perpendiculares al rumbo de las estructuras.

Para conocer más...

Cadell, H. 1889. VII Experimental Researches in Mountain Building. Transactions of the Royal of Edinburgh, 35(1): 337-357.

Liesa, C.L., Román, T., Arlegui L.E., Cortés, A.L. y Gil, A. 1997. El uso de modelos experimentales en la enseñanza de Geología Estructural (II) aplicación a la deformación discontinua. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra (5.3): 226-234.

McClay, K.R. 1990. Extensional fault systems in sedimentary basins: a review of analogue model studies. Marine and Petroleum Geology 7: 206-233.

Murcia López, M. y Crespo Blanc, A. 2008. La formación de océanos y cadenas de montañas a partir de modelos análogos: maquetas y nuevos materiales. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra (16.2): 173-177.

Seggiaro, R., Gallardo, E., Aguilera, N., Vitulli, N. Brandan, E., Bercheñi, V., Barrabino, E., Celedón, M y Villagrán, A. 2015. Modelo estructural del área termal de la sierra La Candelaria, departamento Rosario de la Frontera, Salta. Revista de la asociación Geológica Argentina 72(2): 265-278.

Artículos

Imágenes no destructivas de Rayos X: microtomografías y reconstrucciones tridimensionales

Germán Tirao

Facultad de Matemática, Astronomía y Física, Universidad Nacional de Córdoba

Instituto de Física Enrique Gaviola - CONICET

Los avances tecnológicos en tomografías y microtomografías de rayos X han revolucionado la investigación en diferentes áreas disciplinares. En el ámbito de las investigaciones en Biología y más recientemente en Geología estas técnicas se están convirtiendo en el principal método para visualizar y describir estructuras en diferentes tipos de muestras con gran detalle y precisión. En este artículo se describe en que consiste la técnica, sus diferentes aplicaciones y sobre el equipo de desarrollo íntegramente local con el que cuenta la Facultad de Matemática, Astronomía y Física de la Universidad Nacional de Córdoba, al servicio del sistema científico y tecnológico del país.

¿QUE ES UNA TOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA?

Supongamos que fotografiamos un objeto, la imagen obtenida nos muestra solo un lado del mismo, sin poder visualizar el otro pero, si fotografiamos el objeto desde muchos lados (ángulos), podremos obtener una visión completa de todo el volumen del objeto. Ahora, si la imagen es obtenida por rayos X, es decir que el objeto es irradiado y atravesado por este tipo de rayos; los rayos que atraviesan el objeto son proyectados en una placa en donde las partes internas del mismo que no son visibles se revelan en diferentes tonos de obteniéndose una radiografía.

Una radiografía revela la distribución bidimensional (2D) de las estructuras internas del objeto, es decir según su alto y ancho pero no nos permite conocer la distribución en profundidad de esas estructuras. Sin embargo, si tomamos muchas radiografías desde distintos ángulos (proyecciones), por medio de algoritmos matemáticos (es decir, un conjunto de operaciones que permiten hacer un cálculo) podremos reconstruir el volumen en tres

dimensiones (3D) de las estructuras internas y la distribución de sus densidades. Esta propiedad de un objeto, que se obtiene al usar rayos X, es en lo que se basa la técnica de tomografías computadas (TC) por rayos X.

Básicamente, un equipo tomográfico, consiste en (Fig. 1): 1) una fuente emisora de rayos X, la que puede tener diferentes características en cuanto al mecanismo y los materiales que emiten los rayos que atravesarán el objeto a analizar, 2) camilla (en tomógrafos hospitalarios) o mesa giratoria (en tomógrafos para investigación), y 3) detectores de la radiación los cuales registran los rayos X que logran atravesar la muestra luego de interactuar con ella como una proyección. Cuando los rayos X salen del objeto, son captados por los detectores y transmitidos a una computadora de control. Luego, con las proyecciones obtenidas, se aplican los diferentes algoritmos matemáticos necesarios que permiten obtener la distribución de densidades de las diferentes estructuras internas del objeto, y posteriormente se trabaja con software que permiten realizar la representación/visualización tridimensional del objeto.

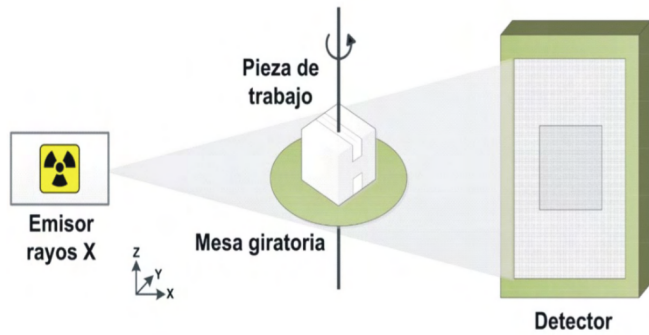


Figura 1: Esquema de un equipo tomográfico de rayos X de investigación (izquierda) y fotografía de un tomógrafo típico hospitalario (derecha).

La tomografía computarizada (TC) fue desarrollada en 1972 por el ingeniero electrónico Godfrey Newbold Hounsfield quien logró con esta nueva técnica superar las tres grandes limitaciones de la radiografía convencional por rayos X: 1) la imposibilidad de mostrar la información tridimensional en una imagen radiológica bidimensional; 2) la limitada capacidad para distinguir tejidos blandos y; 3) la dificultad de cuantificar las diferentes densidades de los tejidos. Si bien las primeras imágenes de tomografía reconstruidas con el primer escáner desarrollado en los Laboratorios EMI y comercializado en 1973 contaban con

una muy baja resolución espacial (es decir el nivel de detalle de las imágenes obtenidas) y tardaba nueve horas en total para obtener todas las imágenes angulares de un cerebro humano por ejemplo (Fig. 2), la técnica de tomografía representó una revolución en el campo de la radiología (análisis por rayos X), principalmente aplicado al diagnóstico por imágenes en Medicina. En la Figura 2 puede observarse una imagen obtenida en los equipos tomográficos actuales, donde claramente se ven los avances en calidad, resolución y detalles estructurales que facilitan el diagnóstico médico.

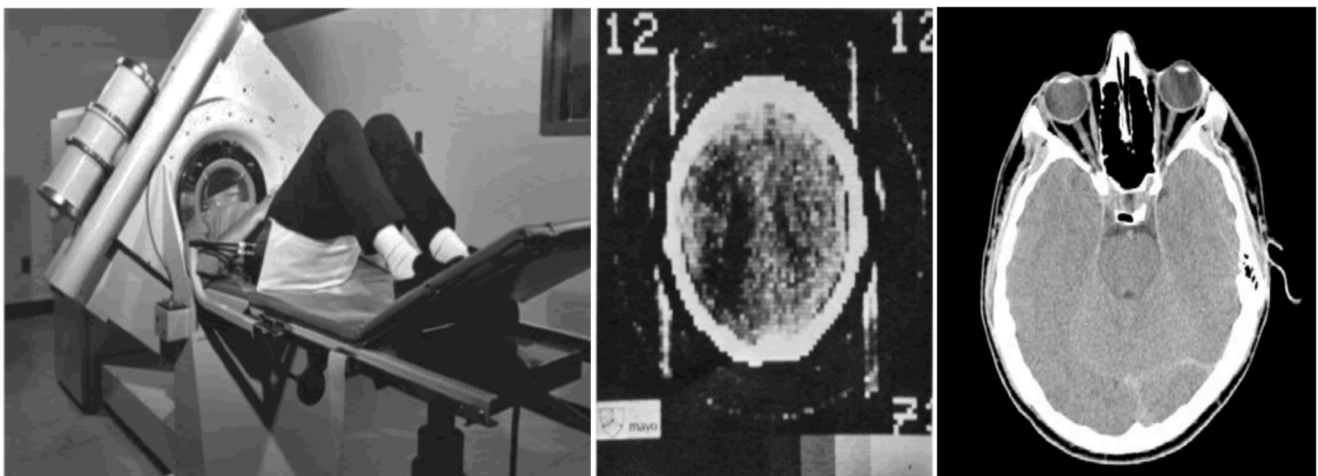


Figura 2: Paciente ubicado en un tomógrafo EMI Mark 1 (izquierda) y corte tomográfico del cerebro del paciente (centro). Fotos cortesía Mayo Clinic, Rochester-MN, EEUU. Corte tomográfico actual de un cerebro (derecha).

DESARROLLOS TECNOLÓGICOS, EQUIPOS Y APLICACIONES

A partir de 1980, se desarrollaron innovaciones en el campo de las tomografías computarizadas que permitieron mejorar parámetros fundamentales para el diagnóstico por imágenes como por ejemplo: una mayor velocidad de adquisición de las proyecciones o resolución temporal, lo que implicaba menor tiempo de exposición a la radiación de los pacientes; aumentar la calidad de la imagen es decir mejorar la resolución espacial y minimizar las dosis de radiación ionizante. Mejoras en cada uno de los componentes del tomógrafo (por ejemplo las fuentes emisoras de rayos X o los detectores de la radiación emitida por el objeto) y el desarrollo de software cada vez más especializados y complejos en técnicas de reconstrucción de la imagen, aportaron significativamente a la mejora de cada uno de los parámetros expuestos (Fig. 3). Así, se desarrollaron la tomografía en espiral o helicoidal

que se caracteriza porque no hay un movimiento continuo de la camilla ya que es el que rota es el gantry (parte del tomógrafo en continua rotación que contiene tanto al tubo emisor de rayos X como los detectores de radiación). Los tomógrafos denominados multi-tajadas o multi-detectores se caracterizan por tener varias líneas de detectores de la radiación que permiten recoger datos correspondientes a varias proyecciones simultáneamente y por lo tanto reducen el número de rotaciones del tubo de rayos X necesaria para cubrir una región anatómica específica, mejorando así la resolución temporal.

También, avances muy recientes incluyen la tomografía de doble fuente de rayos X que permiten tiempos de adquisición de imágenes cada vez más cortos, en hasta 83 milisegundos por proyección, con lo cual es posible tomar imágenes de estructuras anatómicas que se encuentran en constante movimiento como un corazón, logrando altos niveles de detalles de las arterias coronarias, las válvulas cardíacas y el músculo cardíaco, de gran valor clínico.

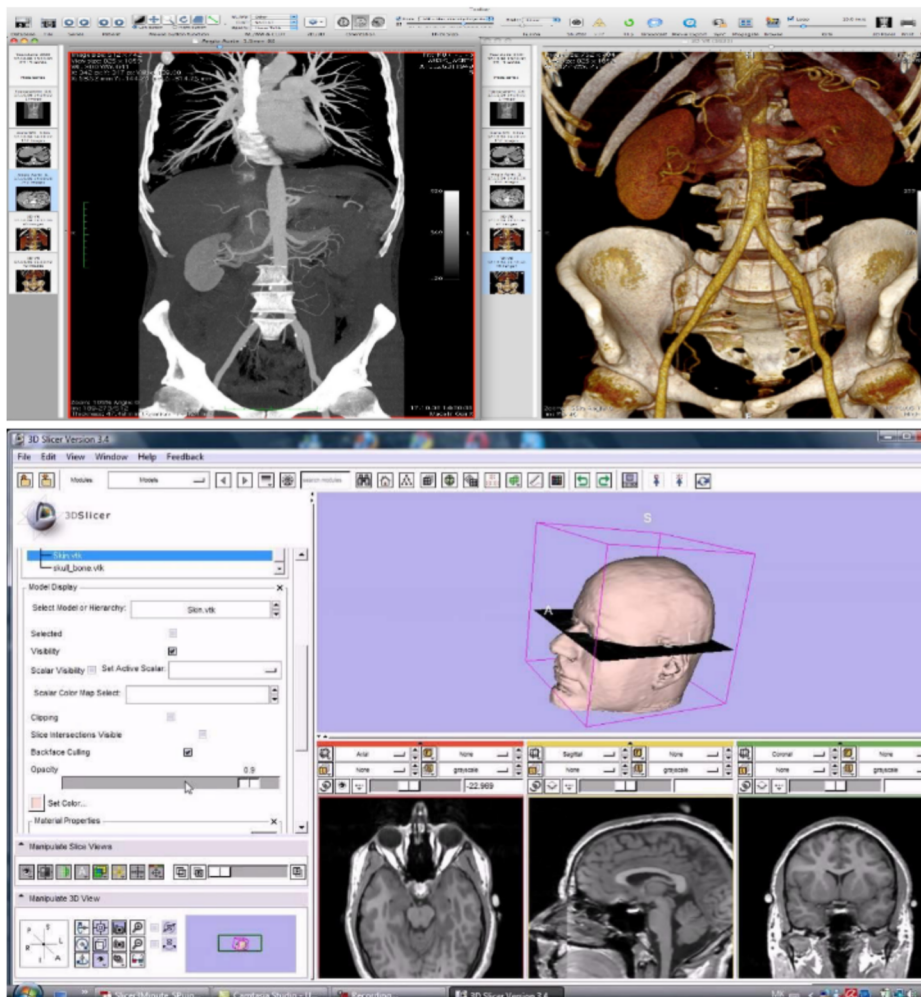


Figura 3: Captura de pantallas de dos softwares de visualización y manipulación de tomografías de rayos X: Osirix (arriba) y 3DSlicer (abajo).



Todos estos desarrollos tecnológicos son constantemente impulsados por la Medicina y el área del diagnóstico por imágenes. En la actualidad, el uso de esta técnica y sus continuas innovaciones ha sido adoptada por el campo de la investigación para el desarrollo de estudios en diferentes áreas disciplinares, en particular porque su aplicación, respecto a otras técnicas para la obtención de datos y particularmente para la reconstrucción tridimensional de diferentes tipos de muestras (biológicas y no biológicas), no implica su destrucción.

Los avances tecnológicos en el ámbito de la investigación han tenido objetivos levemente diferentes como: aumentar la resolución espacial para mejorar la calidad de la imagen ya que en este ámbito, la velocidad y la dosis de radiación no son parámetros limitantes ya que no se trabaja con pacientes que se pueden ver afectados por las dosis y el tiempo de exposición a la radiación, sino de muestras de diversa naturaleza como especímenes biológicos fijados para fines científicos, rocas, fósiles, piezas dentarias, autopartes, distintos materiales como polímeros, entre otras.

A diferencia de los tomógrafos utilizados en medicina, en donde lo que rota es el emisor de rayos X y el detector, en los tomógrafos desarrollados para investigación, generalmente lo que se mueve es la muestra, la cual rota alrededor de un eje central (Fig.1). El funcionamiento es simple y similar al tomógrafo hospitalario, para cada posición angular de la muestra se realiza una radiografía convencional en 2D o proyección, en donde los diferentes tejidos o estructuras se revelan en diferentes escalas de grises y donde cada gris representa una densidad diferente (es decir un tipo diferente de tejido o material); luego aplicando los algoritmos matemáticos sobre las proyecciones adquiridas, se reconstruye la distribución espacial de las diferentes densidades.

En este ámbito, el desarrollo de la microtomografía computarizada, ha permitido la formación de imágenes de rayos X en 3D mediante el mismo método utilizado en exploraciones de TC convencional, pero a pequeña escala, es decir que trabaja con muestras pequeñas y con una resolución de las imágenes muy superior. Permite, formar imágenes de estructuras internas y externas de objetos muy pequeños o finos, llegándose a representar una imagen microscópica en 3D y de manera no destructiva. Este detalle no es menor dado que la aplicación de esta técnica permite conservar la muestra, que en algunos casos suele ser escasa o única (cómo es el caso de los fósiles) o porque puede ser utilizadas para otro tipo de análisis.

Mientras que un equipo de TC convencional permite escanear objetos o muestras de gran tamaño, la resolución espacial, es decir el tamaño mínimo de una estructura que puede ser detectada en cada proyección, está entre 0,5 - 1 mm, aproximadamente, los equipos de microtomografía permiten obtener imágenes de mayor resolución de muestras que generalmente varían de 5 a 300 mm de tamaño, con resoluciones espaciales variables de 300 a 5 μm . Algunos equipamientos de última generación alcanzan resoluciones de 60 nanómetros (la doble hélice de ADN tiene un diámetro de aproximadamente 2 nanómetros; un microscopio óptico alcanza unos 200 nanómetros de resolución). Los últimos avances tecnológicos en microtomografías de rayos X involucran la radiación de sincrotrón (la emisión de rayos X se obtiene por aceleración de electrones) la que permite lograr una resolución espacial de submicrones obteniéndose imágenes de alto contraste y de manera rápida, en muestras donde las densidades son muy similares. Si bien la TC convencional todavía es utilizada para el análisis de objetos o muestras más grandes, la microtomografía con rayos X ha permitido a los investigadores obtener información detallada de una amplia gama de muestras en cuanto a su tamaño y naturaleza.

El desarrollo de las técnicas de tomografías y microtomografías computarizadas, abrió una nueva alternativa para las investigaciones en diferentes disciplinas respecto a otras técnicas como son la microscopía óptica y electrónica, permitiendo el análisis de diferentes tipos de muestras, de tamaños variables desde muy pequeños a muy grandes y la reconstrucción de sus estructuras internas sin destruirla. La creciente demanda de herramientas y equipamiento tecnológico que permitan a investigadores y técnicos la generación de conocimiento científico con un mayor y mejor grado de análisis a para su aplicación en diferentes ámbitos las hace imprescindibles para un mejor desarrollo de las investigaciones. Sin embargo, el costo de este tipo de equipamiento representa una limitante para su adquisición y su incorporación en laboratorios locales, por lo que en general se recurre a laboratorios de otros países para poder realizar este tipo de análisis.

EL MICROCT DEL LAMARX

Actualmente, el Laboratorio de Microscopía Electrónica y Análisis por Rayos X (LAMARX), con sede en la Facultad de Matemática Astronomía y Física (FAMAF) de la Universidad Nacional de Córdoba, cuenta con un equipo de microtomografías computarizadas cuyo desarrollo ha sido íntegramente llevado a cabo en el país.

Primero como físico y después también ya como profesor de FAMAF e investigador del CONICET, siempre me interesé por el desarrollo de tecnologías. La idea de diseñar y construir un microtomógrafo de rayos X, fue producto de la necesidad de contar con equipos de este tipo por su utilidad en el desarrollo de nuevas investigaciones en el país. Fue fundamental el apoyo financiero de diferentes entidades públicas de promoción científica y tecnológica como son el CONICET, la ANPCYT y la SECYT, y de instituciones educativas como el FAMAF en cuanto a personal de apoyo involucrado en el taller mecánico de precisión y el taller de electrónica. El proyecto se inició en el año 2007 y demandó 1 año entero de trabajo

y a partir del año 2008 el equipo está en funcionamiento de manera continua.

El diseño del microtomógrafo giró en torno a una fuente disponible de rayos X. Esta fuente es una fuente convencional de rayos X (la misma que se utiliza para radiografías convencionales) que permite trabajar con las configuraciones típicas (tamaño de la fuente emisora y material que genera los rayos X). Este equipo permite conformar el haz de rayos X que van a incidir en la muestra según los requerimientos del experimento a realizarse (tamaño, foco específico a una zona, naturaleza del material, etc.). Por ello este equipo tiene gran versatilidad para analizar diferentes tipos de muestras, realiza el escaneado tridimensional no destructivo y no invasivo con una buena resolución espacial de muestras de gran volumen en relación a otros microtomógrafos. El Micro-CT trabaja con muestras de hasta 1000 cm³ de volumen y posee una resolución espacial de alrededor de 150 micrones lo que facilita un análisis preciso de diferentes tipos de muestras que poseen muy diferentes propiedades físicas como densidad, absorción o dispersión para el estudio de su morfología (Cuadro 1).

Los datos técnicos de la instalación principal del Micro-CT son:

- Detector plano de rayos X de alta resolución (Varian - PaxScan 2020+).
- Electromecánica de alta precisión dedicada y dispositivo de control.
- Campo de visión: 200 mm x 200 mm.
- Espesor: 7 cm² / g equivalente (aprox.).
- Área de imagen: 200 mm x 200 mm.
- Resolución espacial: ~150 micrones.
- Homogeneidad del haz en el área de exploración máxima: 99.5%.
- Alto rango de eficiencia de detección de fotones: 10-150 keV.
- Software de alto rendimiento para análisis de imágenes, reconstrucción de tomografía y cuantificación de características.

Equipamiento informático de control y soporte

- PC de escritorio Intel® Core™ i3-2100 CPU @ 3.10 GHz Memoria (RAM) 8.00GB.
- Sistema operativo Windows 10 64 bits.
- Software de control desarrollado en C++.
- Software de procesamiento de reconstrucción 3D desarrollado en Matlab 2008.
- Software de visualización 3DSlicer, ImageJ.
- Software de visualización y análisis: 3DSlicer, ImageJ, desarrollos específicos en Matlab.



Vista externa e interna del MicroCT del LAMARX

Entre los análisis llevados a cabo a por el equipo de Micro-CT del LAMARX, se han procesado muestras como rocas, fósiles, muestras biológicas diversas, piezas dentarias y alimentos para su aplicación en diversas disciplinas como Geología, Paleontología, Biología,

Ingeniería, Química, Odontología, en metalurgia, etc. Las reconstrucciones tridimensionales obtenidas a partir de las microtomografías tienen aplicaciones varias en relación al tipo de muestra y al campo en el que se aplique la información obtenida (Fig. 3).

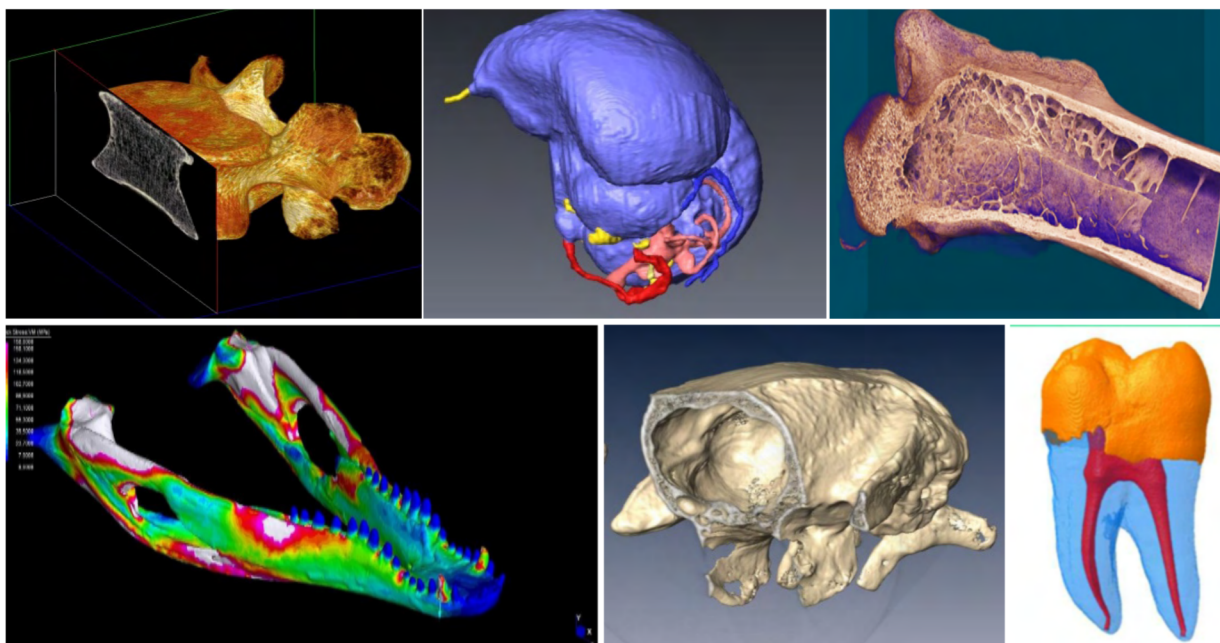


Figura 4: Diferentes visualizaciones obtenidas para el estudio de estructuras internas, morfología, parámetros biomecánicos, etc.

En biología y paleontología por ejemplo, se logra la reconstrucción de organismos completos que permiten determinar e identificar estructuras internas como esqueletos completos, forámenes, inserciones tendinosas y musculares y cuando la muestra lo permite vísceras, vasos y otras estructuras blandas, también permite determinar parámetros biomecánicos relacionados a distintos tipos de tejidos como su resistencia, fuerza o elasticidad (Figura 4). También en el área de la odontología y particularmente en la endodoncia, la visualización de la anatomía radicular de piezas dentarias de sus conductos y sus estados patológicos en forma volumétrica (3D) es una herramienta que permite obtener información de alta eficiencia diagnóstica.

En relación a muestras no biológicas, permite por ejemplo revelar detalles de la estructura interna como los poros de rocas de yacimientos gasíferos y comprender mejor las condiciones que afectan la producción del yacimiento. En el ámbito de la industria, esta técnica permite el control de calidad de manera no-destructiva brindando información tanto de la medición de estructuras internas con imágenes de alta resolución y al mismo tiempo mediciones dimensionales de alta precisión. Con el uso de esta técnica se inspecciona el control de

calidad industrial de piezas fabricadas con plásticos, polímeros, cerámicos, materiales de fundición y metales ligeros (aluminio por ejemplo), impresiones 3D, fibras y piezas ensambladas de la industria automotriz, aeroespacial y aeronáutica, médica y biomédica, y electrónica.

El equipo del LAMARX realiza el estudio y caracterización de materiales de diversa naturaleza y con las más variadas finalidades lo que ha facilitado el trabajo de científicos de todo el país ya que evita el envío de material al exterior lo que acelera los procesos de obtención de datos y disminuye costos. El grupo responsable del laboratorio reúne físicos, químicos, geólogos, biólogos, odontólogos, arqueólogos, etc., abarcando una amplia gama de disciplinas y temas de trabajo y se presta servicio a variados institutos de investigación del CONICET, Universidades Nacionales e Internacionales, como así también al sector privado.

Ante la disponibilidad de un equipo local que les permite incorporar el uso de microtomografías para el análisis de diversas muestras en sus investigaciones, durante el mes de agosto del año pasado algunos miembros del IBIGEO realizaron una capacitación bajo mi orientación en donde se abordaron algunos principios básicos de la técnica de microtomografías por rayos X, como la adquisición de imágenes, su procesamiento y su visualización en 3D.

A

En particular la capacitación estuvo orientada al entrenamiento en el uso de software libres (ImageJ, 3DSlicer), que con herramientas alternativas permiten diferentes tipos de procesamientos de las imágenes tomográficas y/o visualizaciones en 3D, dependiendo de las necesidades o requerimientos de cada análisis (Fig. 5).

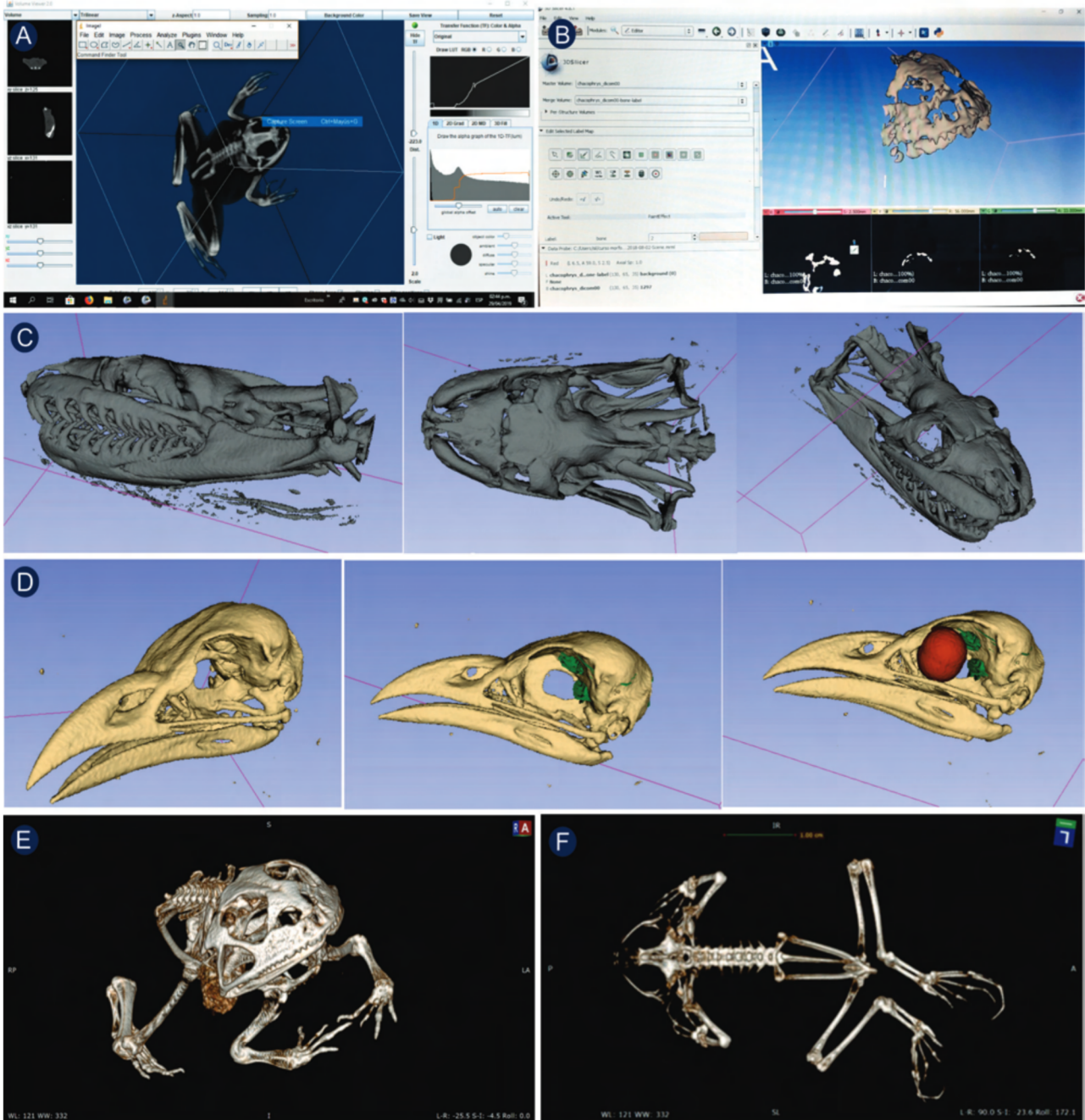


Figura 5. Resultados de la capacitación llevada a cabo por miembros del IBIGEO. Los software utilizados, ImageJ (A) y 3D Slicer (B) permiten el procesamiento de las imágenes con distintos objetivos. Con ImageJ, es posible reconstruir el volumen del objeto o tomografiado modificando algunos parámetros para una mejor visualización. El 3D Slicer, permite identificar y segmentar (etiquetar con diferentes colores) estructuras las cuales se distinguen como diferentes tonos de gris en el volumen virtual. C. Diferentes vistas de la reconstrucción del volumen del cráneo de una serpiente, anaconda amarilla, luego de la segmentación en la secuencia de cortes tomográficos de los huesos del cráneo (imágenes de L. Díaz Fernández). D. Reconstrucción del cráneo de un pájaro carpintero, en la secuencia se puede observar como las diferentes estructuras pueden ser etiquetadas de manera independiente con el programa y reconstruirlas en un modelo 3D de manera conjunta o individual. E y F. Segmentación de esqueletos completos de dos especies de ranas obtenidos luego del trabajo con el programa 3D Slicer. E. Especimen de escuerzo de las salinas (Imagen de M. Fabrezi). E. Especimen de ranita llorona (Imágen de M. Chuliver Pereyra).

Para conocer más...

A

Para obtener más información acerca del microtomografo del LAMARX y/o para asesoramiento técnico se puede acceder a la web del laboratorio (lamarx.famaf.unc.edu.ar/). Además, la gestión de turnos para el servicio se realiza a través del sitio web del Sistema Nacional de Microscopia (<http://turnos.microscopia.mincyt.gob.ar/sistema/externo/login.php>) en donde además de los servicios del MicroCT se encuentran disponibles todos los otros servicios tecnológicos del LAMARX (Microscopia Electrónica, Microscopia Confocal, Microanálisis con Sonda de Electrones).

En la actualidad existen varios sitios web en donde se publicitan diferentes software (pagos y gratuitos) para el análisis de imágenes tomográficas como así también bases de datos que cuentan con reconstrucciones tridimensionales de diferentes tipos de muestras que son de acceso libre, algunos ejemplos son:

<https://www.morphosource.org/>

<https://all3dp.com/es/1/mejores-programas-diseno-3d-gratis-modelado-3d/>

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).

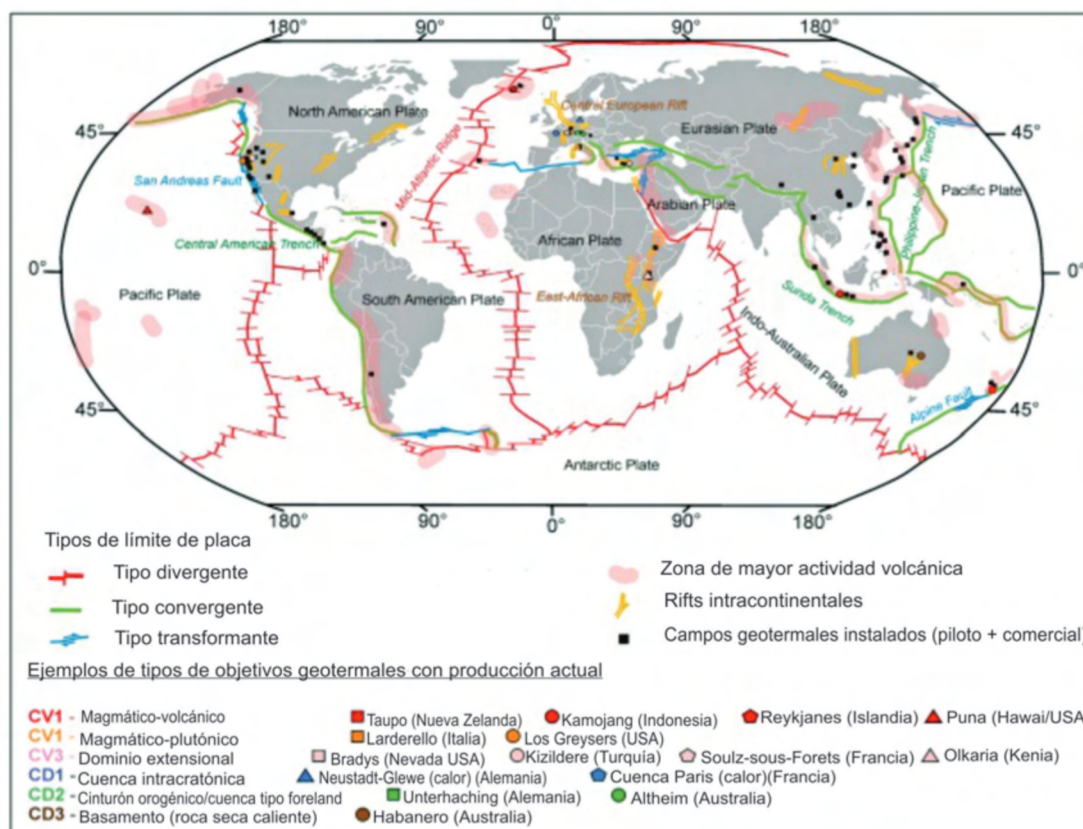


Figura 1: Mapa que muestra la distribución de los principales sistemas geotérmicos en el mundo y su relación con los distintos ambientes tectónicos (modificado de Gehringer y Loksha, 2012).

¿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.

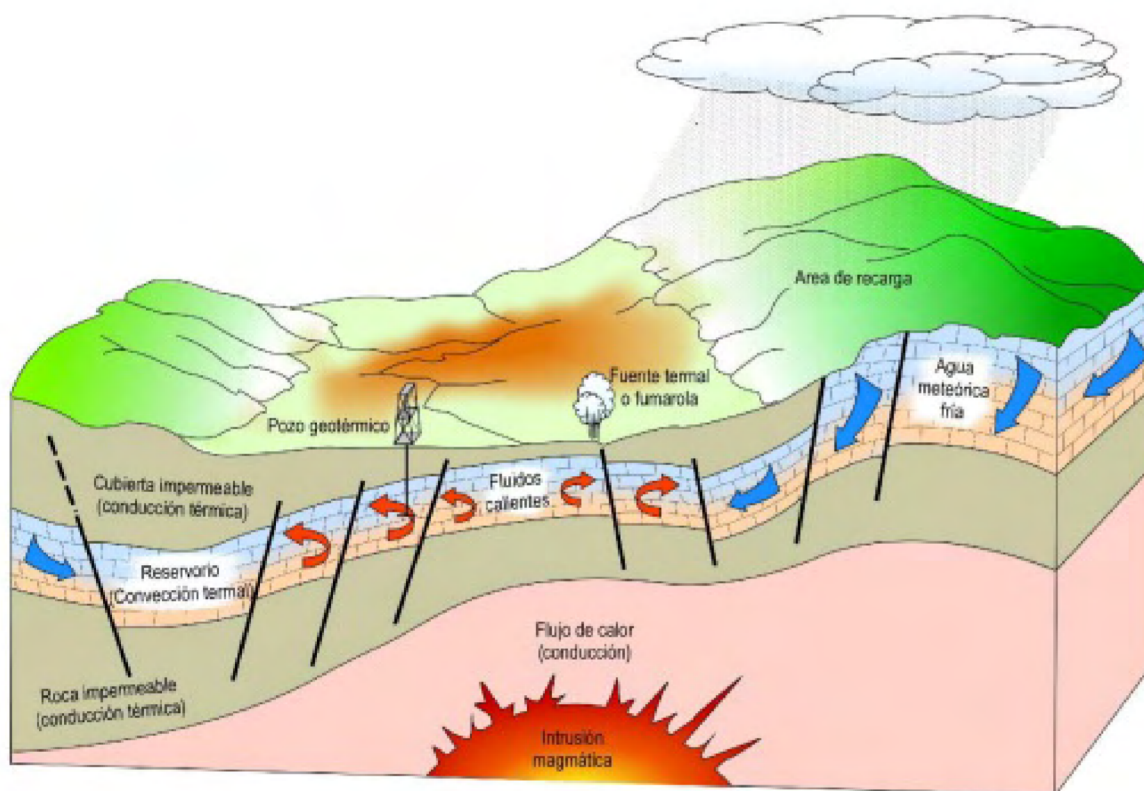


Figura 2: Modelo conceptual de un sistema geotérmico con sus elementos principales (modificado de Dickson y Fanelli, 2004)

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):

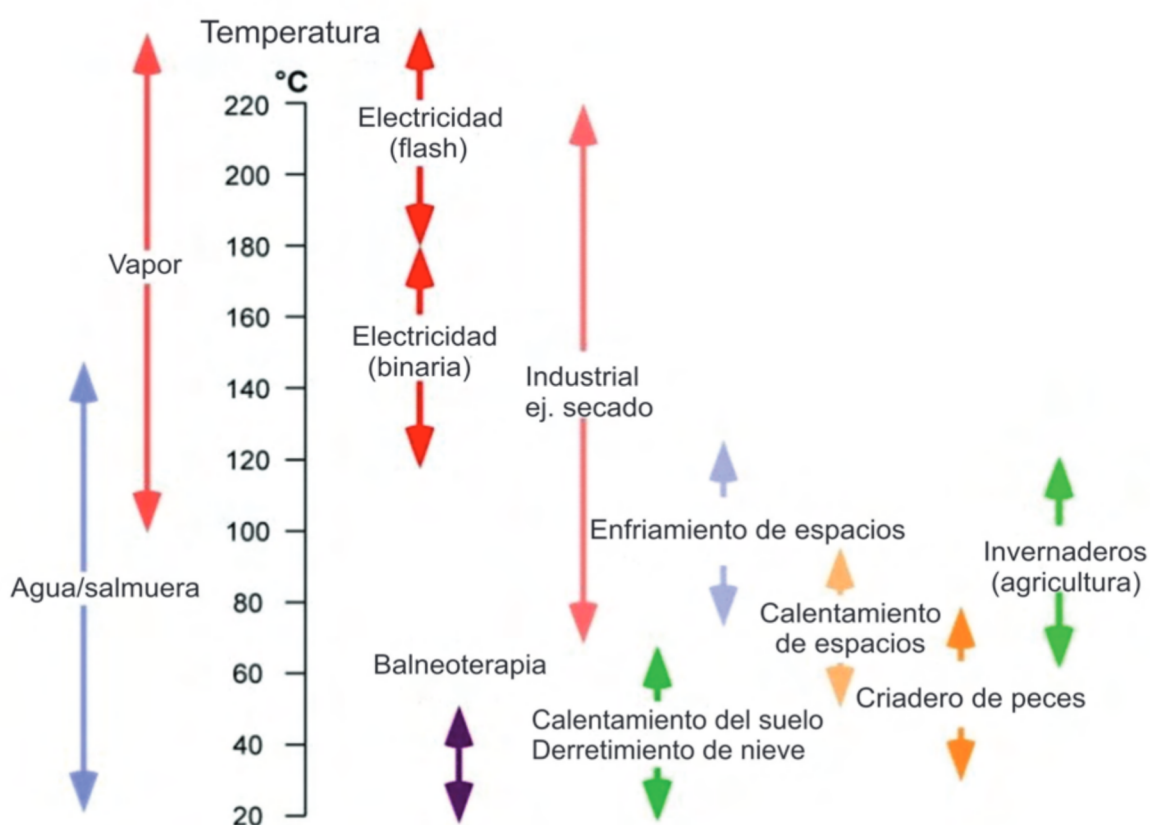


Figura 3: Alguno de los principales usos de la geotermia de acuerdo a la temperatura de los fluidos (modificado de UNU-GTP, 2016).

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.

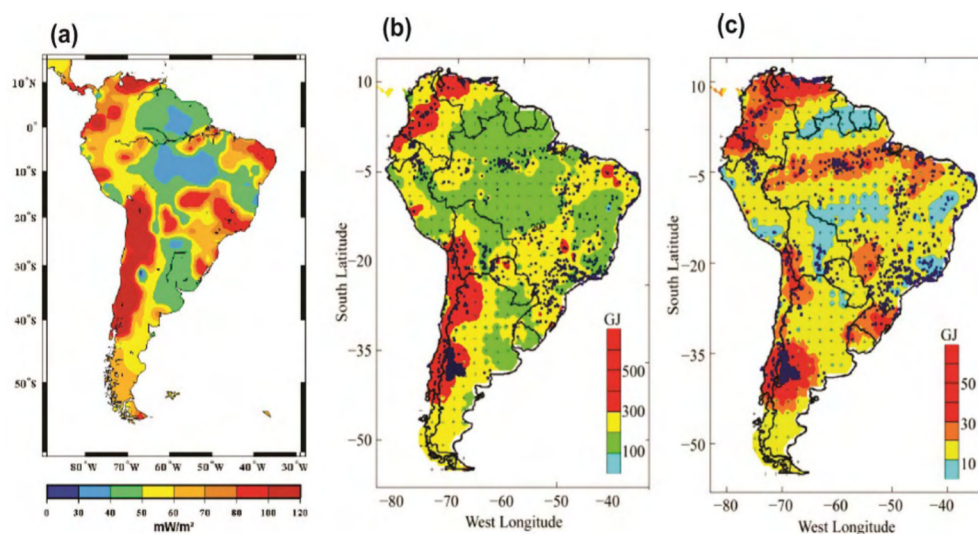


Figura 4: Distribución del recurso geotérmico en América del Sur: a) mapa de flujo de calor (tomado de Cardozo, 2010), b y c) mapas de recurso base y recurso recuperable (tomados de Pinto Vieira y Hamza, 2014).

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.

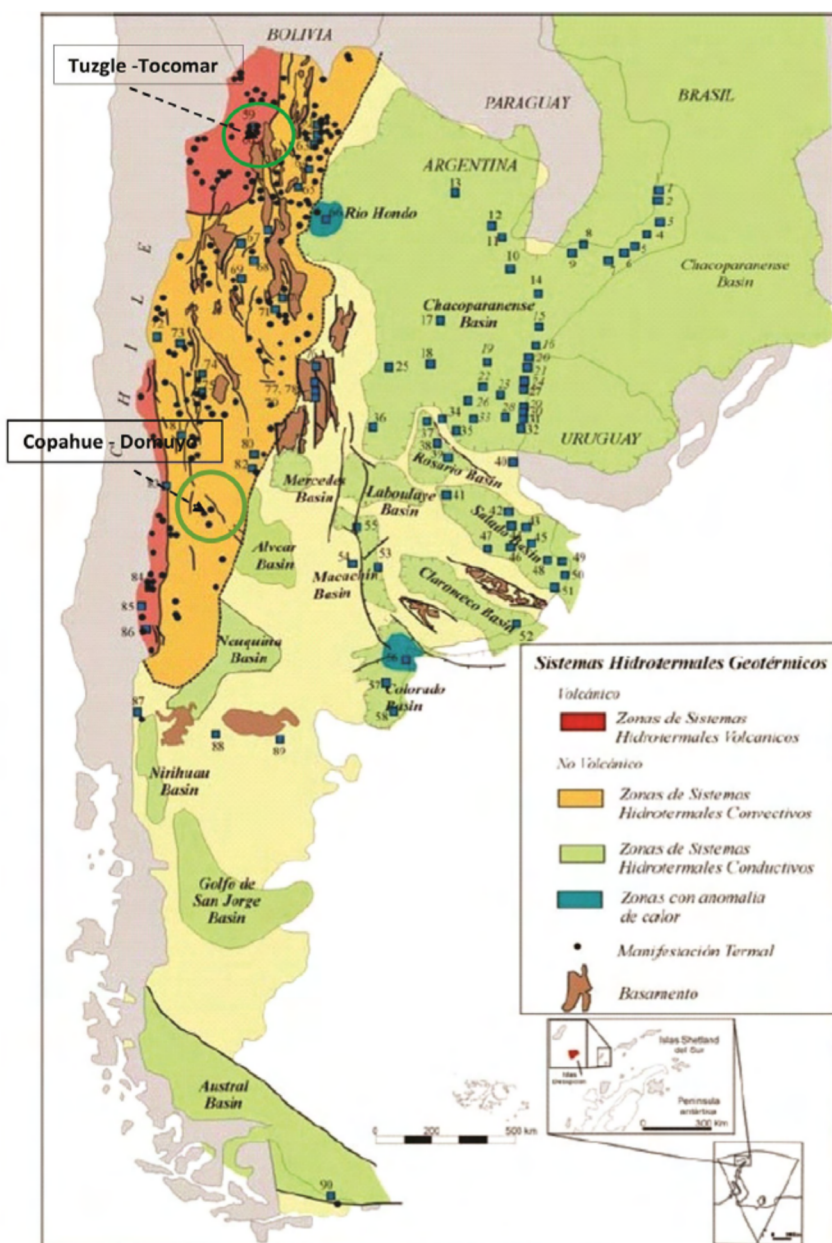


Figura 5: Mapa de distribución de los sistemas hidrotermales geotérmicos en Argentina modificado de Pesce et al., 2014). Los círculos verdes muestran la ubicación de las áreas Tuzgle-Tocomar y Copahue-Domuyo.

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).

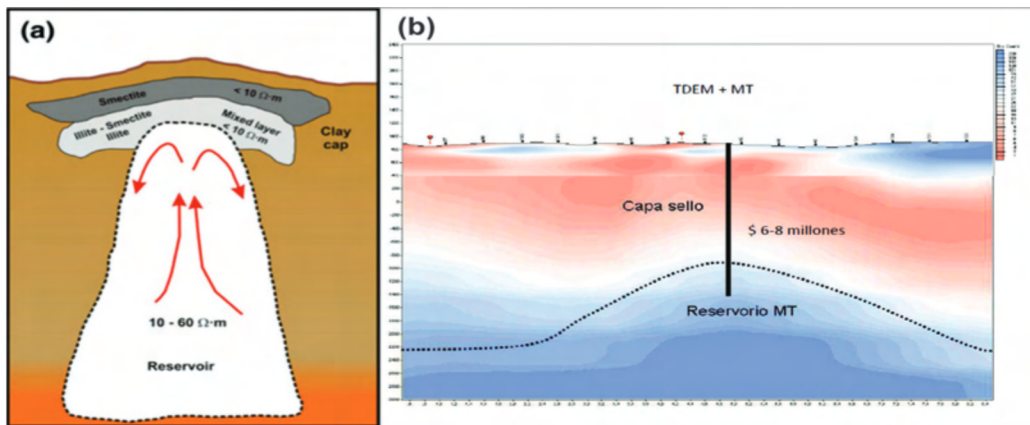


Figura 8: a) Modelo de un sistema geotermal idealizado, donde se observan las capas de alteración hidrotermal (clay cap $< 10 \Omega \cdot m$; reservorio $> 10 \Omega \cdot m$) (tomado de Muñoz 2014), b) Ejemplo de un modelo MT, donde se distingue la capa sello (clay cap) y el reservorio.

La magnetotelúrica (MT) es una técnica que consiste en la medición simultánea de los campos eléctrico (Ex y Ey) y magnético (Hx, Hy y HZ) 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).

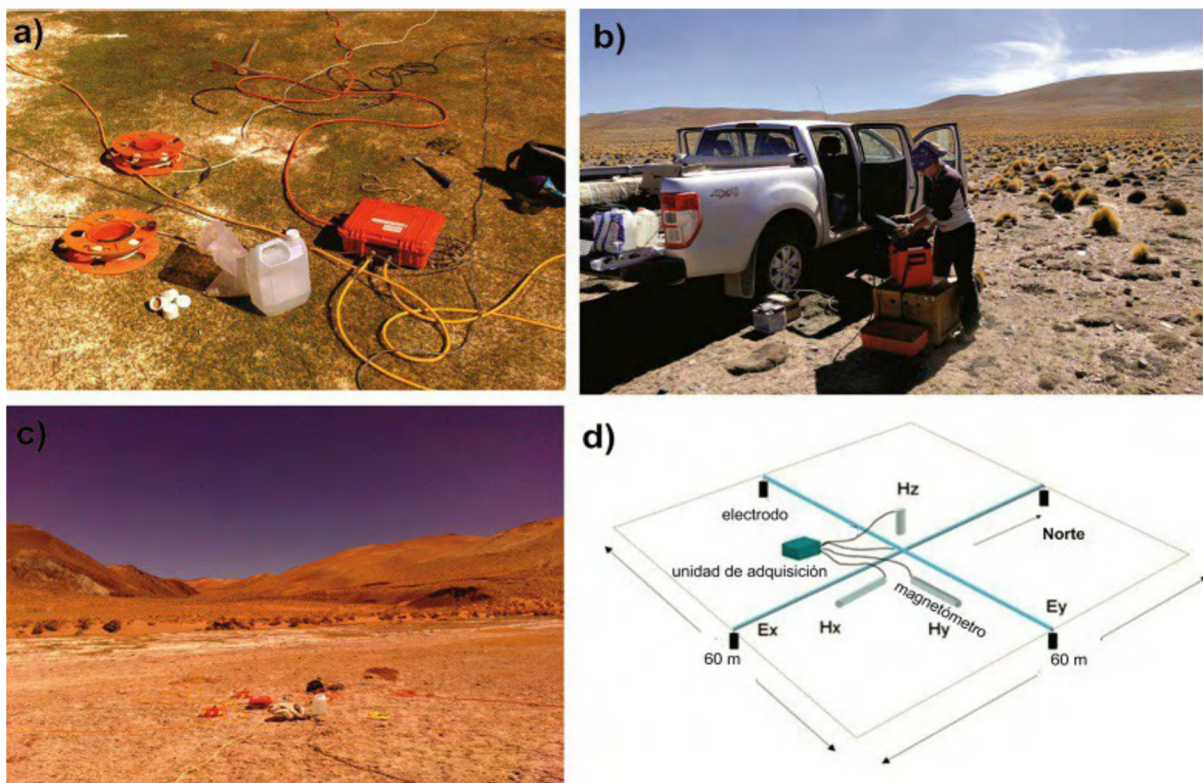


Figura 9: a), b) y c): Fotos de afloramiento donde se observa el instrumental de adquisición, d) arreglo geométrico de los magnetómetros de inducción y los electrodos impolarizados (tomado de Ahumada et al., 2017).

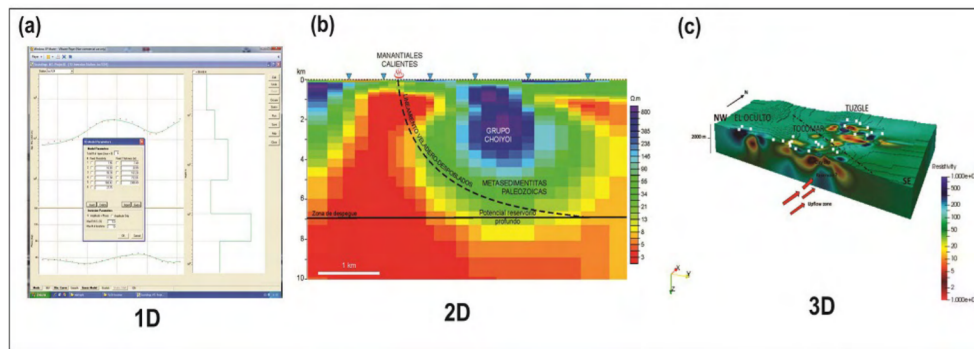


Figura 10: Ejemplos de modelos de inversión a) 1D, b) 2D (tomado de Barcelona et al., 2014) y c) 3D

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.

Temas de Biología y Geología del Noa

Revista de Divulgación Científica del Instituto de Bio y Geociencias

Volumen 9, Número 1, Abril 2019

