

TEMAS DE BIOLOGÍA Y GEOLOGÍA DEL NOA

ISSN 1853-6700

Revista de Divulgación Científica del Instituto de Bio y Geociencias

NOTA BREVE

Gravimetría y magnetometría en Corrientes

ARTÍCULOS

Biotecnología y enfermedades infecciosas

Geotermalismo en el NOA

CONICET



I B I G E O

TEMAS DE BIOLOGÍA Y GEOLOGÍA DEL NOA

Revista de Divulgación Científica del Instituto de Bio y Geociencias

Volumen 14, Número 2, Agosto 2024

ISSN 1853-6700

Comité Editorial

Silvana Geuna. IBIGEO, CCT SALTA - JUJUY.

Carolina Montero. IBIGEO, CCT SALTA - JUJUY.

Soledad Valdecantos. IBIGEO, CCT SALTA - JUJUY.

Natalia Zimicz. IBIGEO, CCT SALTA - JUJUY.

EDITORIAL

Pág. 1- Editorial

NOTA BREVE

Pág. 3- Gravimetría y magnetometría en la provincia de Corrientes

Jl Peroni, G Ramé, J Benítez, J Bedmar, N Moyano

ARTÍCULOS

Pág. 10- Biotecnología aplicada al estudio de enfermedades infecciosas desatendidas: enfoques y logros de la Unidad de Biotecnología y Protozoarios

L Acuña, DE Barraza, CM Pérez Brandán

Pág. 20- Geotermalismo en el Noroeste Argentino
JG Viramonte, E Bustos, A Chiodi, R Filipovich, C Peralta

Imagen de tapa: Estudio de las emisiones difusas de CO₂ en el sistema geotermal del cerro Galán, Catamarca. JG Viramonte

I B I G E O

IBIGEO INSTITUTO DE BIO Y GEOCIENCIAS DEL NOA

<https://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.

CONICET



I B I G E O

Editorial

Estimados lectores,

En este segundo número del año de Temas BGNOA coinciden contribuciones que, aunque de temas variados, tienen una cosa en común: todas muestran el progreso de líneas activas de investigación en nuestras instituciones científico-tecnológicas.

En una nota breve, Javier Peroni y sus colegas del Instituto de Geología y Recursos Minerales (IGRM) perteneciente al Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR) presentan el avance de sus trabajos de relevamiento geofísico terrestre en la provincia de Corrientes. La prospección geofísica forma parte de un proyecto geológico-geofísico en el marco de un convenio con la Secretaría de Energía de la provincia, y tiene el objetivo de aportar a la evaluación del potencial geológico correntino en el subsuelo.

Leonardo Acuña y colaboradoras, investigadores de la Unidad de Biotecnología y Protozoarios (UBIPRO), del Instituto de Patología Experimental "Dr. Miguel Ángel Basombrío" (IPE, CONICET-UNSa), escriben acerca de sus investigaciones tendientes a desarrollar fármacos para el tratamiento y vacunas para la prevención de enfermedades tropicales desatendidas que tienen gran difusión en nuestra región, como la leishmaniasis y la enfermedad de Chagas.

Para cerrar el número, geólogos/as de IBIGEO encabezados por José Viramonte resumen una publicación reciente de su autoría, en la que abordan el geotermalismo del NOA y sus relaciones con la geología regional: el volcanismo como fuente de calor, los sistemas de fracturas/fallas geológicas como vías para la migración del agua hacia y desde la profundidad de la Tierra, y en qué medida estos rasgos geológicos controlan los lugares en los cuales se manifiestan los fluidos calientes en la superficie.

Además de compartir con nuestros lectores los objetivos y progresos en sus investigaciones, los autores de este número dejan bien en claro el impacto social de sus tareas, relacionado con el potencial económico del recurso geológico (en forma de energía geotérmica, por ejemplo) o en temas candentes de salud pública. Apenas tres botones de muestra de todo lo que la ciencia argentina puede aportar al desarrollo del país y a mejorar la vida cotidiana de quienes lo habitamos.

Gracias a los autores, y los invitamos a disfrutar de la lectura.

Comité Editorial

Temas de Biología y Geología del NOA

Silvana Geuna

Carolina Montero

Soledad Valdecantos

Natalia Zimicz

Gravimetría y magnetimetría en la provincia de Corrientes

Javier Ignacio Peroni¹, Gustavo Ramé¹, Javier Benítez¹, José Bedmar¹, Nicolás Moyano²

¹ Servicio Geológico Minero Argentino; e-mail: javier.peroni@segemar.gov.ar, gustavo.rame@segemar.gov.ar, javier.benitez@segemar.gov.ar, jose.bedmar@segemar.gov.ar

² Secretaría de Energía de la provincia de Corrientes; e-mail: nmoyano@corrientes.gob.ar

En el marco del acuerdo de Cooperación firmado entre el Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR) y la Secretaría de Energía de la provincia de Corrientes se realizaron una serie de campañas geofísicas con el fin de contribuir con el conocimiento geológico de superficie y del subsuelo de la provincia de Corrientes. Los métodos geofísicos son ampliamente utilizados en geología como una herramienta esencial para explorar y comprender las características del subsuelo. Estos métodos permiten a los geólogos interpretar qué hay debajo de la superficie terrestre sin la necesidad de realizar perforaciones, lo cual resulta en una manera eficiente y menos invasiva de estudiar la composición y estructura del subsuelo (ver [Vázquez Lucero y Prezzi, 2021. Temas BGNOA, vol. 11, n°2](#); y [Geuna et al., 2023. Temas BGNOA, vol. 13, n°2](#)).

Como primera área para este proyecto, se eligió el sector delimitado por las ciudades de La Cruz, Paso de los Libres, Mercedes y la intersección de la ruta provincial 40 con la ruta provincial 114, abarcando de esta forma un área aproximada de 15.000 km².

Debido a los escasos afloramientos en el área, el objetivo de este estudio fue realizar una serie de relevamientos terrestres utilizando técnicas de gravimetría y magnetimetría, que sirvieron como técnicas de apoyo para la elaboración de un modelo geológico-geofísico conciso, que abarque desde la superficie hasta el basamento.

En geología, el término “basamento” se refiere a las rocas más antiguas y profundas que forman la base de la corteza terrestre. Estas rocas, generalmente ígneas o metamórficas, se encuentran por debajo de las capas sedimentarias más jóvenes y forman la base sobre la cual se han depositado otras formaciones geológicas a lo largo de millones de años. En esta región, el basamento es irregular y profundo, y está compuesto por altos y bajos estructurales, los cuales llegan a profundidades entre los 3.500 a 4.500 metros.

Técnicas geofísicas utilizadas

En este trabajo se combinaron dos técnicas: Gravimetría y Magnetometría. La gravimetría es un método de medición del campo de gravedad. Esta técnica permite medir las variaciones en la aceleración de la gravedad sobre el terreno; estas variaciones se consideran indicios de diferencias de densidad existentes en el subsuelo, por la presencia de diferentes litologías. Estas variaciones en la densidad de las rocas son las que generan las anomalías en el campo gravitatorio terrestre, las cuales son medidas e interpretadas por geofísicos y geólogos.

A su vez, la magnetometría es otro método de investigación geofísico que utiliza mediciones de las variaciones magnéticas locales frente al campo magnético terrestre global. Estas variaciones se denominan “anomalías magnéticas” y son causadas por las propiedades magnéticas de las rocas subyacentes. Al igual que la gravimetría, el objetivo de la magnetometría es investigar la geología del subsuelo con el mayor nivel de detalle y precisión.

En resumen, el objetivo de este trabajo fue medir y combinar datos geofísicos tomados en el terreno (ya que esta zona de Corrientes carece de datos geofísicos aéreos), junto con la geología de superficie y algunos perfiles de pozos de agua, presentes dentro del área de estudio, que permitieron el conocimiento directo de la litoestratigrafía hasta los 700 m de profundidad.

La litoestratigrafía es una rama de la geología que se dedica a estudiar y describir las capas de rocas (o estratos) en función de sus características físicas y composición. Ayuda a los geólogos a entender la disposición y la edad relativa de las rocas, lo cual es fundamental para la exploración de recursos naturales y la reconstrucción del pasado geológico. Es importante resaltar que, para hacer una interpretación precisa de los datos geofísicos obtenidos sobre el subsuelo, se requiere información adicional sobre las rocas que realmente se encuentran allí. Esta información se obtiene principalmente a partir de pozos de perforación, que proporcionan datos directos sobre la composición, estructura y propiedades de las rocas en profundidad. Dado que solo se puede perforar un número limitado de pozos debido a los altos costos y la complejidad del proceso, estos puntos de datos son valiosos y cruciales.

Para los relevamientos geofísicos terrestres se diagramaron y desarrollaron varias campañas geofísicas en donde se realizaron una serie de mediciones a lo largo de rutas nacionales, provinciales, caminos rurales y en predios de estancias de la zona. En estas campañas, un grupo de trabajo se ocupó de las mediciones de gravedad, las cuales se obtuvieron mediante un gravímetro marca SODIN 200T con precisión de 0,01 mGal perteneciente al SEGEMAR (Figura 1A).



Figura 1. A: Gravímetro marca SODIN 200T con precisión de 0,01 mGal, perteneciente al SEGEMAR.
B: Punto nodal Mercedes, Corrientes con gravedad conocida.

Para recordar: en el Sistema Internacional de medidas (SI) la unidad de la fuerza de gravedad es el m/s^2 , y en estas unidades, sobre la superficie terrestre la gravedad (g) $\approx 9,8 \text{ m/s}^2$. En el Sistema Cegesimal de Unidades (CGS), y en honor a Galileo Galilei, se definió el Gal:

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 0,01 \text{ m/s}^2$$

Por lo tanto, en estas unidades, el valor normal de la aceleración debida a la gravedad (g) en la superficie terrestre es de aproximadamente 980 Gal. Ya que en Gravimetría se estudian pequeñísimas variaciones alrededor del valor normal de g , normalmente se trabaja con miligales (mGal).

$$1 \text{ mGal} = 10^{-3} \text{ Gal} = 0,001 \text{ cm/s}^2 = 10^{-5} \text{ m/s}^2$$

Se sabe que el valor de la gravedad (g) no es uniforme en todo el planeta. Existen variaciones locales en g causadas por factores como la altitud, la latitud y las diferencias en la densidad del subsuelo. Para medir estas pequeñas variaciones de g , se utilizan gravímetros como el utilizado en esta campaña, que son instrumentos altamente sensibles. Sin embargo, es importante entender

que los gravímetros no miden el valor absoluto de g , sino que detectan variaciones relativas en la gravedad con una gran precisión. Esto significa que, por sí solos, los gravímetros no nos dicen cuál es el valor exacto de g en un punto, sino cómo cambia g en comparación con otros puntos.

Para poder interpretar correctamente estas variaciones, los gravímetros se calibran usando puntos de referencia conocidos como estaciones de gravedad absoluta. En estas estaciones, el valor absoluto de g ha sido medido con gran precisión usando métodos especiales. Estas mediciones absolutas proporcionan una base o una red a la cual se pueden vincular las lecturas relativas de los gravímetros. En este trabajo se usaron nodales y puntos fijos de las líneas de gravedad pertenecientes al Instituto Geográfico Nacional IGN (Figura 1B).

Para posicionar las estaciones de medición se utilizó un GPS TRIMBLE PRO-XRT geodésico de doble frecuencia, con toma de medición entre 1 a 4 minutos. Los datos obtenidos fueron corregidos empleando los registros de las bases permanentes de la Red RAMSAC perteneciente al Instituto Geográfico Nacional (IGN, base Paso de los Libres) con la finalidad de obtener resultados con precisiones en el plano (latitud y longitud) de 0,3 m e inferiores a 0,6 m en la cota (altura). Es necesario ser muy precisos en la adquisición de la posición, en especial en la determinación de la altitud, ya que la altura también influye, y mucho, en el valor de g , y por eso debe considerarse su efecto en el cálculo de anomalías de gravedad.

Mientras tanto, otro grupo de trabajo se encargó del relevamiento magnetométrico. Para esto, se realizaron una serie de perfiles magnéticos terrestres utilizando un magnetómetro protónico Scintrex Envi Mag, el cual posee una precisión de ± 1 nT y una sensibilidad de 0,1 nT a una frecuencia de muestreo de 2 segundos (Figura 2A). En magnetometría, la unidad de medida de la intensidad del campo magnético es el nanotesla (nT) siendo:

$$1 \text{ nanotesla (nT)} = 1 \times 10^{-09} \text{ Tesla (T)}$$

En la zona de Corrientes donde se trabajó, el campo magnético es de aproximadamente 22.200 nT o $2,22 \times 10^{-05}$ Tesla.

Por cada estación se hicieron entre 5 a 10 mediciones, para controlar la repetitividad del dato. Una vez controlado este aspecto, se procedió a registrar el valor obtenido. Para el posicionamiento de la medición se utilizó un GPS de mano Garmin C30 pues estas mediciones no requieren tanta exactitud con respecto a su posición.

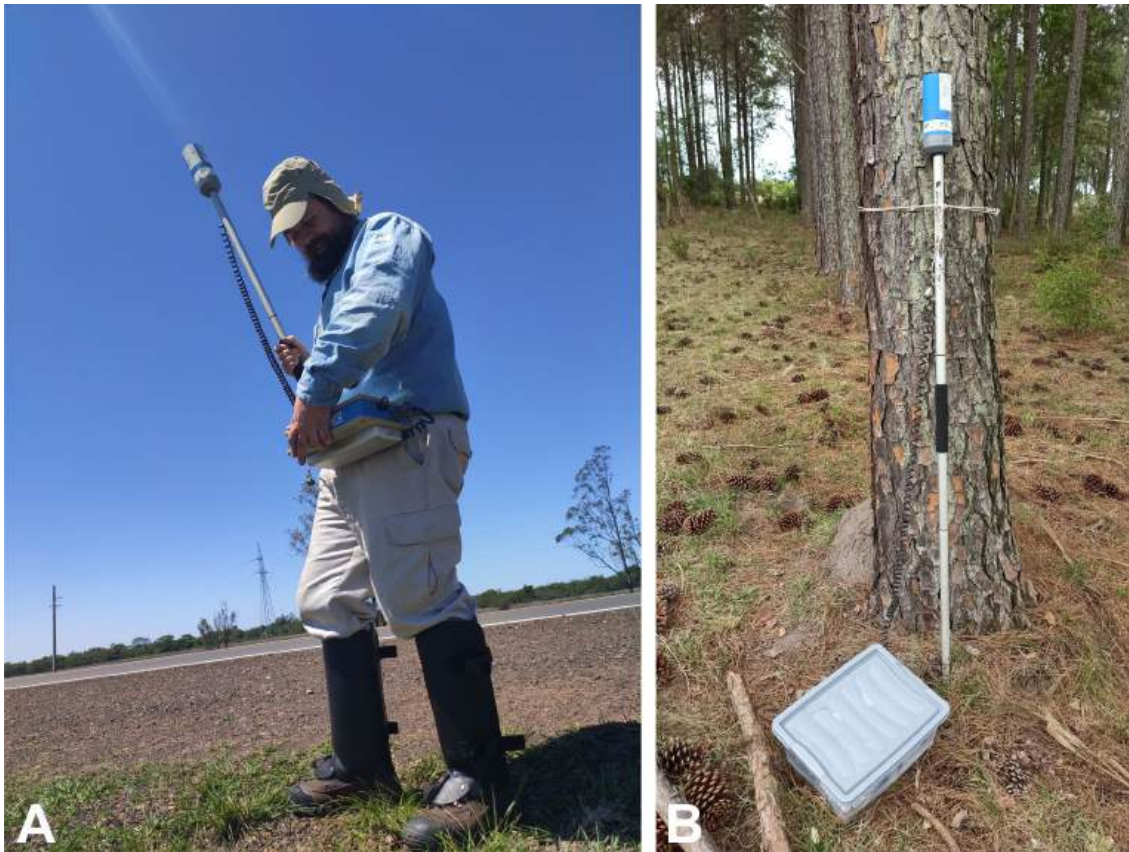


Figura 2. A: Magnetómetro protónico Scintrex Envi Mag utilizado como equipo móvil. B: Estación base que medía de forma continua, con mediciones cada un minuto, ubicada en los terrenos del INTA Mercedes.

En magnetometría, una vez obtenidos los datos en el campo, es necesario realizar una corrección de los mismos denominada “corrección diurna”. Este ajuste sirve para compensar las variaciones en las mediciones debidas a la actividad de la radiación solar, en especial durante las horas del mediodía cuando el sol posee mayor actividad. Para poder realizar esta corrección se utilizó otro magnetómetro similar al anterior, el cual ejecutaba un registro por minuto, durante todo el tiempo que duraban las mediciones en el campo y que constituyó nuestra estación base para el registro de la variación diurna del campo magnético terrestre en esta zona.

Los sitios elegidos para situar el magnetómetro base fueron la Escuela E.F.A “La Cruz” IS-45 en el sector NE del área de estudio, en la primera campaña y dentro de los terrenos del INTA Mercedes, en la segunda campaña. Se optó por estos lugares debido a la necesidad de dejar la base en un sector alejado de interferencias como pueden ser vehículos, maquinaria agrícola en movimiento, o tendidos eléctricos cercanos, los cuales podrían ser fuente de error para las mediciones de la estación base (Figura 2B). Este método, además de servir para realizar la corrección diurna, es útil para corroborar

la ausencia de tormentas magnéticas¹ durante el tiempo de duración de los relevamientos, lo que podría provocar errores en las mediciones.

Una vez realizada la corrección diurna es necesario realizar otro ajuste a los datos magnéticos denominado “corrección por IGRF” (por sus siglas en inglés: “Campo geomagnético internacional de referencia”). Consiste en restar de las observaciones, el valor regional del campo magnético terrestre, que se conoce a partir de datos de observatorios fijos en todo el mundo, satélites y su modelado matemático. Finalmente, una vez restado ese campo regional, los datos medidos resaltan las anomalías locales que son las de mayor interés.

Por último, al haber realizado tanto estudios de gravimetría como de magnetometría, fue posible combinarlos mediante un modelado geofísico (Figura 3), considerando toda la información obtenida

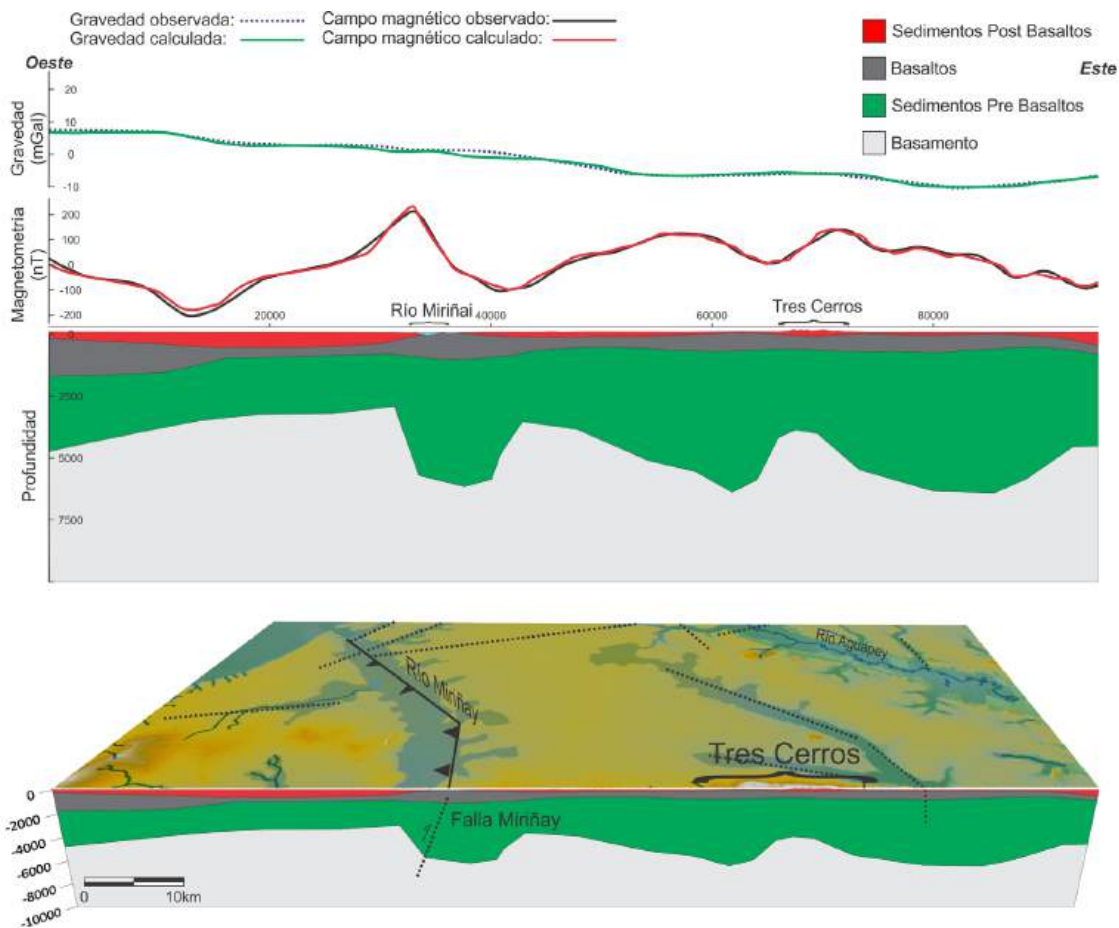


Figura 3. Arriba: Modelado geofísico sobre la RP114. Abajo: Bloque diagrama en 3D del perfil donde se combinó la información obtenida a partir de los datos de magnetometría y gravimetría modelados, junto con las estructuras identificadas en la superficie del modelo de elevación digital (Folguera et al., 2021).

¹Una tormenta magnética es una perturbación temporal del campo magnético de la Tierra, causada por la interacción del viento solar con la magnetosfera.

en el campo. La integración de ambos tipos de datos permitió a los intérpretes mejorar la precisión de sus modelos del subsuelo. Las anomalías detectadas con un solo método pueden ser ambiguas, pero al corroborarlas con otro método, la interpretación se vuelve más precisa y confiable. El modelado geofísico se realizó mediante un software especializado, con el cual se crea un modelo tridimensional del subsuelo basado en los datos procesados. Este modelo muestra las diferentes capas de rocas, su profundidad, estructuras y responde a sus propiedades físicas, como la densidad y la magnetización. En zonas con una geología compleja, como el área estudiada, su aplicación ofreció una imagen más detallada de la geología local.

REFERENCIAS

FOLGUERA A, J PERONI, G RAMÉ, P BOUJÓN, L GUEVARA, A CONDE SERRA, J BEDMAR, L FERPOZZI. 2021. Caracterización geológica del área que comprende las localidades de Guaviraví, Estancia Tres Cerros y La Cruz, Provincia de Corrientes. 179 p. Buenos Aires, Servicio Geológico Minero Argentino. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Instituto de Tecnología Minera.

GEUNA S, A ARAMAYO, L ALVARADO, L ELÍAS. 2023. ¿Qué hay bajo tierra? Cómo saberlo usando electricidad. [Temas de Biología y Geología del NOA, 13\(2\): 4-9.](#)

VÁZQUEZ LUCERO S, C PREZZI. 2021. Buenos Aires tiembla. [Temas de Biología y Geología del NOA, 11\(2\): 19-28.](#)

Biotecnología aplicada al estudio de enfermedades infecciosas desatendidas: enfoques y logros de la Unidad de Biotecnología y Protozoarios

Leonardo Acuña¹, Daniela E. Barraza¹ y Cecilia M. Pérez Brandán¹

¹Unidad de Biotecnología y Protozoarios (UBIPRO), Instituto de Patología Experimental “Dr. Miguel Ángel Basombrío”, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Universidad Nacional de Salta, Argentina. e-mail: acunaleonardo@hotmail.com, barrazadaniela86@gmail.com, perezbrandan@gmail.com

Acerca de la UBIPRO

La Unidad de Biotecnología y Protozoarios, abreviadamente UBIPRO, es una Unidad de Trabajo que agrupa a investigadores, docentes y becarios del CONICET y de la UNSa, que se desempeñan en el Instituto de Patología Experimental “Dr. Miguel Ángel Basombrío” (IPE. CONICET-UNSa). La conformación de la UBIPRO se oficializó en el 2022, e inicialmente estuvieron a cargo del Dr. Leonardo Acuña y la Dra. Cecilia Pérez Brandán, ambos investigadores del CONICET, docentes universitarios y responsables del laboratorio. En un comienzo, con un grupo reducido de colaboradores, la UBIPRO inició estudios tendientes al desarrollo de biotecnologías sanitarias con impacto social, como ser la obtención de vacunas con antígenos recombinantes y componentes bacterianos. Estas primeras tareas estuvieron financiadas exclusivamente por CONICET y permitieron la incorporación de becarios doctorales para su formación científica. Posteriormente, con la obtención de subsidios de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica, la UNSa y fundaciones como Florencio Fiorini y Bunge y Born se produjo un fortalecimiento institucional que permitió la incorporación de nuevos investigadores y becarios, así como la adquisición de equipamiento científico de última generación. En simultáneo, se establecieron convenios de colaboración con varios centros de investigación locales, nacionales e internacionales en EE.UU., Francia, Italia, España, Canadá y Brasil, lo cual se vio reflejado en el intercambio de becarios para la realización de estadías de formación en laboratorios de referencia en el exterior, trabajos en colaboración y publicaciones en conjunto (Pérez Brandán et al., 2019; Salazar et al., 2023; Vázquez et al., 2023, 2024).

En la actualidad, la UBIPRO está compuesta por tres investigadores del CONICET, cuatro becarios doctorales y estudiantes de grado realizando sus trabajos finales. Además, cuenta con el apoyo de personal técnico del CONICET y colaboradores de diferentes dependencias de la UNSa.

Debido al alto volumen de trabajo efectuado a lo largo del tiempo, la unidad ha logrado consolidarse en la temática de biotecnología aplicada para combatir parásitos causantes de enfermedades endémicas¹, contando con participación en congresos científicos todos los años y trabajos publicados en importantes revistas científicas.

Misión

La misión de la UBIPRO es realizar investigaciones biomédicas de vanguardia con el objetivo principal de contribuir al desarrollo de nuevas formas de prevenir y tratar enfermedades parasitarias desatendidas. Generamos conocimiento científico de excelencia usando ideas innovadoras, aplicando biotecnología desde la provincia donde viven las personas con estas enfermedades.

Otro foco central es formar recursos humanos altamente capacitados en temas de enfermedades infecciosas, microbiología y biotecnología. Para ello, desde la UBIPRO se busca que los estudiantes que se incorporan cuenten con becas de investigación para realizar pasantías, tesis de finalización de grado y tesis de doctorados.

Por último, se promueve la transferencia al sector público y privado local, nacional e internacional de todos los avances que se realizan desde la UBIPRO, así como el apoyo científico y técnico en prevención y tratamientos.

Líneas de investigación

Las líneas de investigación de la UBIPRO, se enfocan en desarrollar y estudiar nuevos medicamentos y tratamientos para combatir dos tipos de enfermedades infecciosas desatendidas: Chagas y leishmaniasis, cuyas principales características se resumen en la Tabla 1.

Existe un grupo heterogéneo de enfermedades infecciosas que comparten características especiales y que son conocidas con el nombre de Enfermedades Tropicales Desatendidas (NTDs, por sus siglas en inglés). Las NTDs afectan principalmente a poblaciones de bajos recursos con atención primaria de salud escasa o nula, por consiguiente, las industrias farmacéuticas y las grandes corporaciones mundiales no enfocan su atención en estas patologías. Debido a esto, resulta imprescindible la participación e inversión del estado para combatir estas enfermedades. Actualmente la Organización Mundial de la Salud reconoce 15 enfermedades desatendidas, encontrándose entre

¹Endémica: que es propio o característico de una localidad o región determinada. Se aplica a enfermedades o fenómenos naturales limitados a una zona geográfica concreta. Zona endémica: zona o región en la que una enfermedad es endémica, es decir, donde existe de forma permanente o habitual, afectando de modo característico a la población de esa zona.

ellas la Enfermedad de Chagas y la leishmaniasis, ambas de suma importancia en el norte argentino y ampliamente estudiadas en el IPE. Estas enfermedades son causadas por parásitos intracelulares pertenecientes a la familia Trypanosomatidae y desafortunadamente hasta la fecha, no se ha logrado desarrollar una vacuna que genere una protección total y duradera para ninguna de ellas.

ENFERMEDAD		
CARACTERÍSTICAS	LEISHMANIASIS	CHAGAS
AGENTE CAUSAL	Parásito protozoario del género <i>Leishmania</i> .	Parásito protozoario <i>Trypanosoma cruzi</i> .
TRANSMISIÓN	Vectorial: por picadura de flebótomos (insecto hematófago similar al mosquito) hembras infectadas con el parásito.	Vectorial: contacto con heces de vinchucas infectadas. Congénita: de madre a hijo. Transfusión de sangre. Trasplante de órganos. Accidental u oral.
SÍNTOMAS	Existen diferentes formas clínicas: -Leishmaniasis tegumentaria cutánea y mucocutánea. La primera produce úlceras en la piel, heridas que no cicatrizan, a veces cicatrices permanentes. Y la segunda, lesiones en mucosas orales, nasales y faríngeas. -Leishmaniasis visceral produce fiebre prolongada, pérdida de peso, hepatoesplenomegalia (agrandamiento del hígado y del bazo), puede causar la muerte.	Existen 2 fases: Fase aguda o inicial: produce fiebre, fatiga, dolor de cuerpo y cabeza, pérdida de apetito, diarrea y vómitos. Si no se trata la infección evoluciona a una fase crónica donde se pueden producir graves problemas intestinales y cardíacos.
TRATAMIENTOS	Leishmaniasis cutánea: antimonio de meglumina, anfotericina B y miltefosina. Leishmaniasis visceral: anfotericina B, miltefosina y paromomicina. En la mayoría de los casos se administran inyecciones diariamente durante largos periodos.	Fase aguda: benznidazol o nifurtimox. Administración oral. Fase crónica: tratamiento para síntomas específicos.
DISPONIBILIDAD DE VACUNAS PREVENTIVAS	No hay vacuna disponible.	No hay vacuna disponible.
MÉTODOS DE PREVENCIÓN ACTUALES	Uso de repelentes y mosquiteros. Control de vectores y eliminación de criaderos. Protección durante actividades al aire libre. Monitoreo y tratamiento de lesiones cutáneas	Uso de repelentes y mosquiteros. Control de vinchucas y mejoras en vivienda. Evaluación y control en transfusiones de sangre y trasplantes. Detección y tratamiento temprano de la enfermedad en áreas endémicas.

Tabla 1. Características generales de las enfermedades de Chagas y leishmaniasis.

La Enfermedad de Chagas, producida por el parásito *Trypanosoma cruzi*, es una problemática actual y desatendida en muchos países del mundo. Argentina posee una de las tasas chagásicas más altas del mundo siendo endémica en la región noroeste del país (Dirección Nacional de Epidemiología, 2017).

Otra enfermedad tropical desatendida que cada vez se expande más y ha llegado a centros urbanos es la leishmaniasis. Se denomina leishmaniasis a un grupo de enfermedades causadas por protozoarios flagelados del género *Leishmania*. La Organización Mundial de la Salud (OMS) las mantiene en la lista de alta prioridad y recomienda su investigación en diversos aspectos. La leishmaniasis tegumentaria Americana (LTA) es endémica en la Argentina y causa una morbilidad considerable en los pacientes que la padecen, quienes en su mayoría son trabajadores rurales. La enfermedad les quita con frecuencia la capacidad de trabajar, representando un fuerte impacto en su sustento económico y bienestar. Si los casos de LTA permanecen sin diagnóstico o tratamiento, pueden derivar en otras formas más graves, llevando incluso a la muerte (SWGL, 2004). Además, cerca del 80% de los pacientes desarrollan efectos adversos y alrededor de un 20% no responde a los tratamientos con las drogas actuales de referencia. Esto se debe, en general, a que estas drogas producen serios efectos tóxicos en los pacientes, además de que deben ser administradas mediante inyecciones diarias, lo cual limita su uso en las zonas endémicas (Mears et al., 2015; SWGL, 2004).

En este contexto, los proyectos de trabajo de la UBIPRO tienen como propósito el desarrollo de medicamentos y nuevos tratamientos. Para ello, se siguen dos líneas principales de investigación. Una de ellas consiste en la obtención de proteínas recombinantes y plataformas para la vehiculización de estas proteínas. Estas plataformas se ensayan como vacunas contra enfermedades parasitarias. Para ello, se diseñan racionalmente y estudian los dos componentes principales de las vacunas: antígenos y adyuvantes. El antígeno es la molécula ajena al organismo que es reconocida por el sistema inmune como foránea, mientras que el adyuvante es la sustancia que potencia la respuesta contra dicho antígeno. Para este diseño nos enfocamos en sus características inmunológicas, efectividad y seguridad. Si bien se han realizado grandes esfuerzos en torno al desarrollo de vacunas contra los patógenos causantes de enfermedades tropicales causadas por protozoarios, ninguna vacuna había sido aprobada para su uso en humanos. Sin embargo, recientemente en un claro momento histórico, la OMS recomendó administrar en niños la vacuna RTS,S/AS01 para prevenir el paludismo por *Plasmodium falciparum* en las regiones donde la transmisión sea moderada o alta, abriendo las puertas a un mayor interés en el desarrollo de vacunas contra este tipo de enfermedades (WHO, 2019). Esto destaca el futuro impacto que tiene esta línea de investigación de la UBIPRO en la población del norte argentino y en las poblaciones que la requieran. El objetivo del desarrollo de estas vacunas

consiste en que puedan ser utilizadas de forma profiláctica, es decir, como medidas de prevención primaria capaces de evitar el desarrollo clínico de la enfermedad. De presentarse algún caso de infección a pesar de la vacunación, el objetivo secundario de una vacuna profiláctica es que disminuya la gravedad de los síntomas y complicaciones asociadas a la enfermedad.

La otra línea de la UBIPRO, consiste en la búsqueda de nuevos tratamientos para estas enfermedades. El tratamiento se refiere al conjunto de medidas terapéuticas utilizadas para combatir una enfermedad, modificar su evolución y lograr la recuperación del paciente. En nuestro caso, esta búsqueda se orienta a la administración de fármacos cuando ya se contrajo la infección. En este aspecto, el principal enfoque es el reposicionamiento de fármacos (“repurposing”). Para ello se estudia la efectividad y los mecanismos de acción contra parásitos de medicamentos desarrollados originalmente para tratar otras enfermedades. Resulta ser que, además de las escasas inversiones farmacéuticas, el descubrimiento de nuevas sustancias con posterior desarrollo, producción, aceptación, registro y aplicación en salud resulta demasiado largo, costoso e inefectivo. En este contexto, el reposicionamiento de fármacos surge como una propuesta viable y muy prometedora. Posee algunas ventajas frente al descubrimiento tradicional de drogas debido a que: i) existe información disponible respecto a la seguridad y calidad del fármaco, ii) si se mantienen las dosis habituales, solo se debe demostrar la efectividad, iii) el desarrollo tradicional requiere entre 11 y 15 años, mientras que el reposicionamiento pasa directamente a la fase clínica 2 (período acortado de 5 a 6 años) (Andrade Neto et al., 2018).

Flujo de trabajo

El proceso de investigación y desarrollo de la UBIPRO se inicia en el planteo de la problemática y búsqueda de posibles soluciones. Respecto a la línea de trabajo consistente en desarrollar vacunas, se comienza diseñando de forma racional los componentes de estos nuevos medicamentos contra *T. cruzi* y *Leishmania spp.* Estos componentes son los antígenos y los adyuvantes. Nuestros antígenos se tratan en general de proteínas, mientras que nuestros adyuvantes se tratan en general de componentes bacterianos como sistemas de vehiculización y entrega de las proteínas.

Para la producción de proteínas, se utilizan técnicas de ingeniería genética para obtenerlas en un microorganismo de fácil manipulación. Luego se purifican y caracterizan siguiendo normas de control de calidad.

Posteriormente se realizan pruebas *in vitro* para evaluar el efecto que pueden presentar estos compuestos sobre los parásitos, y así poder entender cómo y dónde actúan a nivel molecular. Los

ensayos *in vitro* consisten en pruebas experimentales realizadas sobre los parásitos crecidos en medios de cultivo y condiciones de laboratorio. Permiten evaluar de manera preliminar los posibles efectos de compuestos fuera de las condiciones complejas del organismo. Se busca dilucidar los mecanismos y blancos farmacológicos de acción sobre los parásitos, estableciendo dosis efectivas, antes de realizar ensayos sobre modelos animales. En el caso de la línea de investigación acerca del reposicionamiento de medicamentos, nuestro flujo de trabajo comienza en esta etapa de evaluación *in vitro*. Finalmente, se llevan a cabo ensayos en modelos animales (*in vivo*), evaluando exhaustivamente la eficacia preventiva y/o terapéutica de los compuestos, de acuerdo a estrictos protocolos éticos. Estas pruebas experimentales consisten en evaluar los efectos de nuestros fármacos bajo condiciones fisiológicas reales. Se monitorea la eficacia, toxicidad, interacciones con otros fármacos, respuesta inmune, entre otros parámetros. Estos ensayos *in vivo* permiten validar los resultados obtenidos previamente en ensayos *in vitro*. Los resultados de ambas líneas de trabajo son comunicados en congresos y en revistas científicas de excelencia a medida que van atravesando sus diferentes etapas.

1. Diseño radical de vacunas

En la UBIPRO, uno de los objetivos principales es el diseño racional de nuevas vacunas para el tratamiento de las NTDs como la leishmaniasis y el Chagas. En este sentido, en primer lugar se decide cuáles son las características que se desean conseguir para los compuestos a ensayar (antígeno y/o adyuvante) y se los diseña previamente de manera teórica. Esto implica la búsqueda bibliográfica y el uso de herramientas informáticas para saber cómo obtener los compuestos candidatos capaces de actuar sobre los blancos terapéuticos seleccionados. Se toma como punto de partida el conocimiento que existe sobre cómo funcionan otros compuestos ya probados. Se estudia específicamente en qué parte o proceso actúan esas sustancias para generar un efecto. Luego, basándose en ese conocimiento inicial sobre los mecanismos de acción, se diseñan nuevos productos con la intención de que causen un efecto similar o aún mejor contra el microorganismo patógeno.

2. Producción de vacunas

En esta etapa, una vez diseñada la proteína de interés, comienzan los pasos para producirla a gran escala en el laboratorio. Se estudian con detenimiento qué bacterias u otros microorganismos servirían para obtenerla, así como las herramientas y técnicas disponibles para introducirle los genes deseados. Se utilizan técnicas moleculares avanzadas para modificar los genes bacterianos. Esto nos permite introducir pequeños cambios en el ADN de las bacterias que usarán para producir

la proteína de interés. Mediante reacciones en cadena de la polimerasa, conocidas como PCR, se agregan secuencias genéticas especiales. Estas cumplen funciones como facilitar la identificación de la proteína una vez creada o permitir su separación fácil de otras sustancias dentro de la bacteria.

A continuación, se utilizan cepas de *Escherichia coli* optimizadas para lograr altos rendimientos en la expresión y purificación. En algunos casos se utilizan otros tipos de bacterias GRAS (del inglés, *generally recognized as safe*) (Figura 1). Las bacterias recombinantes se cultivan y las proteínas se aíslan mediante precipitación selectiva, fraccionamiento y cromatografías. Esto permite obtener proteínas de gran pureza listas para su caracterización. Se emplean técnicas electroforéticas, inmunológicas, cromatográficas, microscópicas y espectroscópicas para analizar parámetros como peso molecular, estructura primaria y presencia de modificaciones químicas.

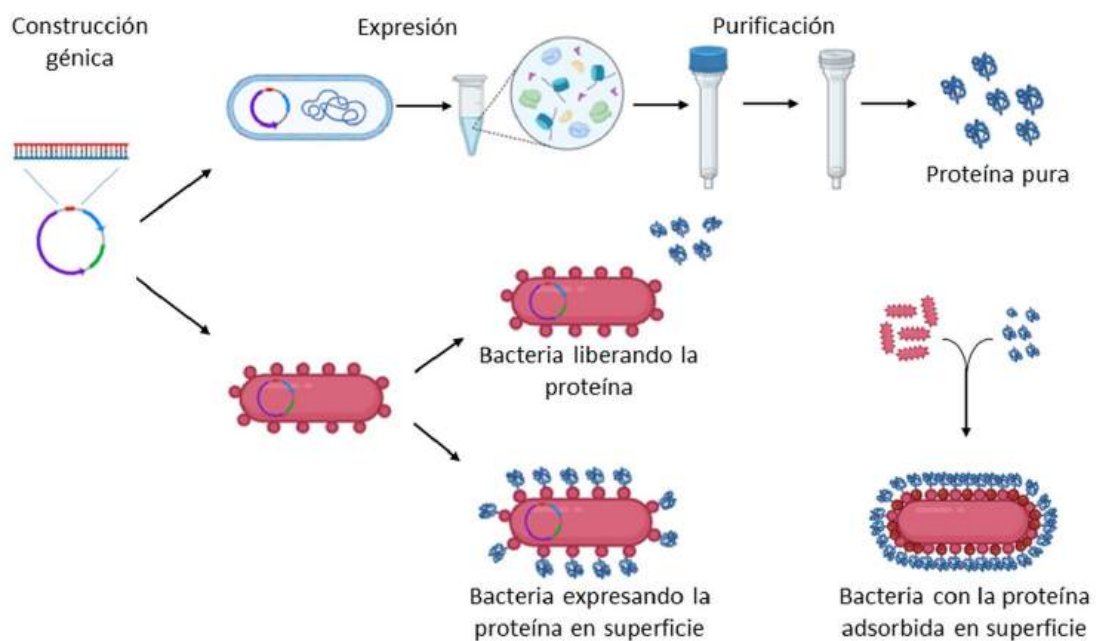


Figura 1. Diseño y producción de proteínas y formulaciones de interés biotecnológico basadas en componentes bacterianos. Se representa el flujo del proceso de obtención de proteínas mediante herramientas de ingeniería genética, su expresión en sistemas de producción microbianos y posterior formulación de bioproductos.

Finalmente, se realizan formulaciones completas a ensayar como vacunas, que incluyen estas proteínas purificadas, ya sea solas o unidas a componentes bacterianos. Cabe destacar que estas plataformas de expresión, purificación y vehiculización de proteínas también sirven para otras aplicaciones de interés biotecnológico en diferentes industrias como ser la alimentaria (Acuña et al., 2020).

3. Evaluación *in vitro*: identificación de actividades biológicas, mecanismos y blancos de acción

Para el caso de las vacunas preventivas, una vez obtenidas las formulaciones, los ensayos posteriores se centran en modelos *in vivo* ya que se requiere determinar su eficacia en un organismo superior. Sin embargo, cuando ensayamos tratamientos terapéuticos (posterior infección) de leishmaniasis y Chagas, previo a los ensayos en animales se realiza la evaluación *in vitro* de los compuestos. Respecto a la línea de investigación tendiente al reposicionamiento de fármacos, los ensayos se inician en esta etapa, ya que se parte de sustancias que han sido purificadas y caracterizadas previamente. Se estudian los efectos de las sustancias de interés contra *Leishmania spp.* y *T. cruzi* describiendo y cuantificando las alteraciones provocadas, con el fin de determinar su capacidad inhibidora y caracterizar dicha actividad. Esto es posible mediante diversas técnicas bioquímicas y biofísicas, observando efectos a niveles celulares y moleculares. También caracterizamos otras acciones biológicas de las sustancias de interés como ser la actividad antiinflamatoria, antioxidante, antiagregante, entre otras (Acuña et al., 2019). Además, se busca identificar los posibles blancos de acción de los compuestos sobre los parásitos ya sea de un modo directo o indirecto. Por otra parte, se prueban los efectos causados por los compuestos sobre células de organismos superiores (células hospedadoras de los parásitos) (Figura 2). De esta forma, luego de un análisis exhaustivo, se seleccionan aquellas sustancias que presentan mayores posibilidades de éxito ya sean empleadas de manera individual o en combinaciones con otras.

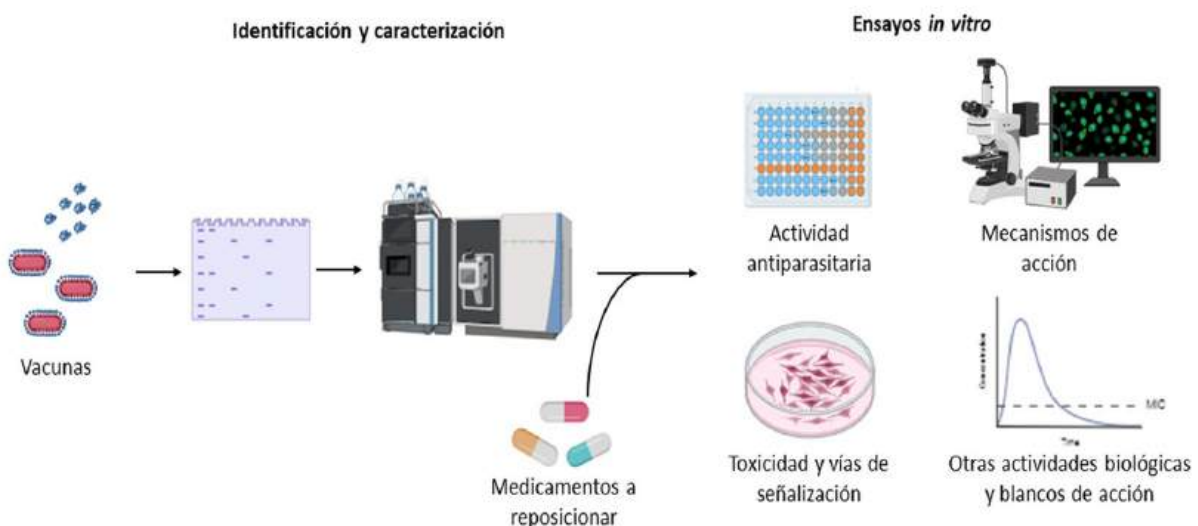


Figura 2. Ensayos biológicos *in vitro* de vacunas y/o medicamentos para su reposicionamiento. Se muestra un esquema del protocolo experimental para la evaluación de nuevos candidatos vacunales o fármacos de reposicionamiento, mediante ensayos de actividad biológica sobre cultivos celulares, parásitos a nivel extracelular, previo a estudios preclínicos en modelos animales.

4. Evaluación *in vivo*: ensayos preclínicos. Evaluación de eficacia y análisis de elementos moleculares involucrados en la prevención y/o tratamiento

Conociendo las actividades biológicas y modos de acción de las sustancias de interés, se definen cuáles serán las condiciones que merecen ser estudiadas en profundidad en modelos *in vivo*. En esta etapa, se realizan ensayos que permiten realizar una evaluación de manera integral de la eficacia de los nuevos tratamientos. Para ello la UBIPRO, cuenta con modelos experimentales de infección establecidos en roedores, que siguen rigurosamente los protocolos establecidos por el Comité Institucional de Cuidado y Uso de Animales de Laboratorio (CICUAL) de la Facultad de Ciencias de la Salud (UNSa).

En el caso de las vacunas, se prueban distintas opciones de aplicación para evaluar su efectividad. En un esquema usual, primero se aplica la vacuna para inmunizar. Luego, después de un tiempo, se exponen a los animales de estudio controladamente al parásito que causa la enfermedad. De esta forma se pueden analizar variables como el nivel de protección otorgado, la cantidad de parásitos presentes y cómo transcurre naturalmente la infección. Para ello, se realiza un análisis de manera exhaustiva de los mecanismos celulares y moleculares involucrados en la prevención o tratamiento de la patología, incluyendo la presencia de parásitos en sangre y tejidos, variables bioquímicas y respuestas celulares específicas (Figura 3).

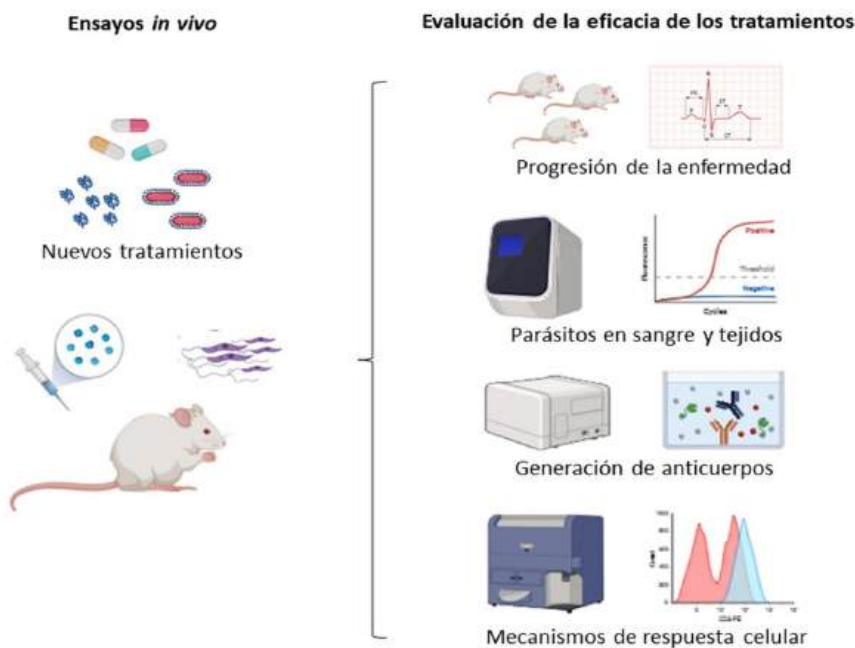


Figura 3. Ensayos preclínicos en modelos animales de experimentación. Se estudian esquemas de prevención, así como de tratamientos posteriores a la infección. La figura muestra un diagrama del flujo metodológico para la realización de ensayos *in vivo* que permitan validar la eficacia y seguridad de nuevas vacunas y tratamientos, tanto con fines profilácticos como terapéuticos, utilizando modelos animales de infección experimental.

Este riguroso proceso evalúa todas las dimensiones de la infección y la eficacia de las intervenciones con el fin de cumplir con las normas de las 3R (reducir, refinar y reemplazar) para el uso compasivo de animales en experimentación.

REFERENCIAS

ACUÑA L, S HAMADAT, NS CORBALÁN, F GONZÁLEZ-LIZÁRRAGA, M DOS-SANTOS-PEREIRA, J ROCCA, J SEPÚLVEDA DÍAZ, E DEL-BEL, D POPY-GARCÍA, RN CHEHÍN. 2019. Rifampicin and its derivative rifampicin quinone reduce microglial inflammatory responses and neurodegeneration induced in vitro by α -synuclein fibrillary aggregates. *Cells*, 8: 776.

ACUÑA L, N CORBALAN, M QUINTELA-BALUJA, J BARROS-VELAZQUEZ, A BELLOMIO. 2020. Expression of the hybrid bacteriocin Ent35-MccV in *Lactococcus lactis* and its use for controlling *Listeria monocytogenes* and *Escherichia coli* in milk. *International Dairy Journal*, 104: 104650.

ANDRADE NETO VV, EF CUNHA JUNIOR, V FAIOES, TP MARTINS, RL SILVA, LL LEON, ECT SANTOS. 2018. Leishmaniasis treatment: update of possibilities for drug repurposing. *Frontiers in Bioscience*, 23: 967-996.

Dirección Nacional de Epidemiología. Ministerio de Salud. Presidencia de la Nación. 2017. Boletín Integrado de Vigilancia. <https://bancos.salud.gob.ar/recurso/boletin-integrado-de-vigilancia-n345-se4-02022017>

MEARS ER, F MODABBER, R DON, GE JOHNSON. 2015. A review: the current in vivo models for the discovery and utility of new anti-leishmanial drugs targeting cutaneous leishmaniasis. *PLoS neglected tropical diseases*, 9: e0003889.

PÉREZ BRANDÁN C, AC MESIAS, L ACUÑA, TL TEIXEIRA, CV DA SILVA. 2019. Evaluation of pathogen P21 protein as a potential modulator of the protective immunity induced by *Trypanosoma cruzi* attenuated parasites. *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*, 114: e180571.

SALAZAR PB, M FANZONE, BA ZABALA, MJ RODRIGUEZ VAQUERO, E CILLI, PA BARROSO, C MINAHK, L ACUÑA. 2023. A byproduct from the Valles Calchaquíes vineyards (Argentina) rich in phenolic compounds: a tool against endemic *Leishmania* dissemination. *Environmental Science and Pollution Research*, 30: 97377-97385. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29276-0>

Scientific Working Group on Leishmaniasis. Meeting (2004: Geneva, Switzerland) & UNDP/World Bank/WHO Special Programme for Research and Training in Tropical Diseases. 2004. Report of the Scientific Working Group meeting on Leishmaniasis, Geneva, 2-4 February, 2004. <https://iris.who.int/handle/10665/68897>

VÁZQUEZ ME, AC MESÍAS, L ACUÑA, J SPANGLER, B ZABALA, C PARODI, M THAKUR, E OH, SA WALPER, CP BRANDÁN. 2023. Exploring the performance of *Escherichia coli* outer membrane vesicles as a tool for vaccine development against Chagas disease. *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*, 118: e220263. <https://doi.org/10.1590/0074-02760220263>

VÁZQUEZ ME, BA ZABALA, AC MESÍAS, L BISCARI, CD KAUFMAN, A ALLOATTI, F SIANO, G PICARIELLO, NS CORBALÁN, BA LENIS. 2024. Protective Efficacy of the Epitope-Conjugated Antigen N-Tc52/TSkb20 in Mitigating *Trypanosoma cruzi* Infection through CD8+ T-Cells and IFN γ Responses. *Vaccines*, 12: 621.

WHO. 2019. WHO recommends groundbreaking malaria vaccine for children at risk. <https://www.who.int/news/item/06-10-2021-who-recommends-groundbreaking-malaria-vaccine-for-children-at-risk>

Geotermalismo en el Noroeste Argentino

José G. Viramonte^{1*}, Emilce Bustos^{1,2}, Agostina Chiodi^{1,2}, Rubén Filipovich^{1,2}, Carlos Peralta²

¹ Instituto de Bio y Geociencias del NOA (IBIGEO, UNSa-CONICET)

² Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta (CIUNSA, UNSa)

*e-mail: joseviramonte@yahoo.com.ar

A medida que descendemos hacia el interior de la Tierra, observamos un incremento en la temperatura (Figura 1). Este aumento térmico se debe tanto al calor residual desde la formación del planeta, como al calor generado continuamente por la desintegración radioactiva de elementos inestables en las rocas, especialmente uranio (U), torio (Th) y potasio (K) (ver [Ortiz, 2021, Temas BGNOA, vol. 11, n°3](#)). Cabe recordar que el núcleo terrestre aún registra temperaturas superiores a los 4000°C. Ello produce dentro del manto una lenta y permanente transmisión térmica por convección, que intenta equilibrar su temperatura. El aumento de temperatura con la profundidad que resulta de todos esos procesos, se denomina gradiente geotérmico y no es igual en toda la superficie, estando condicionado principalmente por la geología, la tectónica y especialmente por la dinámica de las placas litosféricas en que está dividido el planeta (ver Ahumada et al., 2019, [Temas BGNOA, vol. 9, n° 1](#); Figuras 2 y 3).

El gradiente geotérmico, que en los primeros kilómetros de la corteza tiene un promedio de 25-30° C/km, no es el mismo si se mide en un fondo marino, una zona continental estable, una dorsal

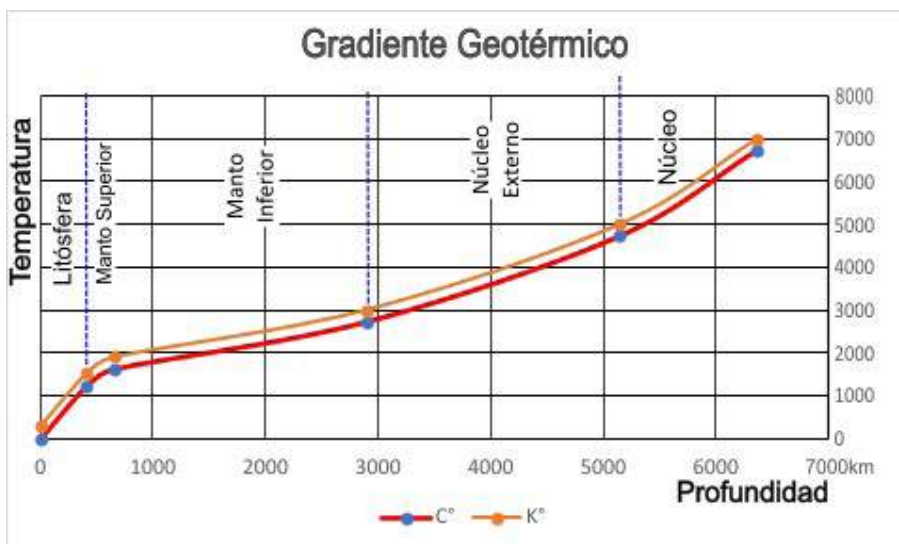


Figura 1. El gráfico muestra la estructura térmica de la Tierra al aumentar la temperatura según la profundidad desde la superficie al Núcleo (tomado de Viramonte et al., 2024).

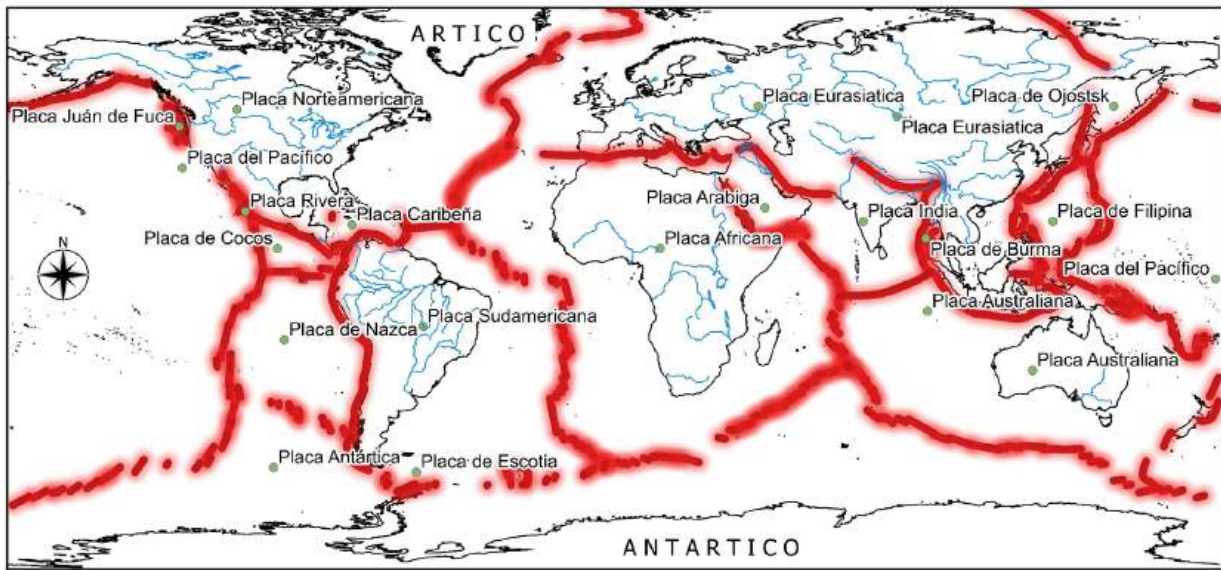


Figura 2. La figura muestra en líneas rojas la estructuración de la litósfera en placas tectónicas. Estas interactúan unas con otras a lo largo de sus límites provocando intensas deformaciones en la corteza de la Tierra. Modificado de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Placas_tectonicas_es.svg

oceánica, una zona de subducción o en una zona continental con fuerte tectonismo (Figura 3). Ese gradiente será mucho mayor en una zona con volcanismo activo o fuerte actividad tectónica que en una zona estable y tranquila de la corteza.

Si a este aumento de la temperatura le sumamos la presencia de agua, proveniente de la infiltración desde la superficie, es fácil comprender que, en ciertos lugares de la corteza terrestre, puede producirse un calentamiento importante de esa agua (del orden de los 250-300° C) y por situaciones geológicas y tectónicas especiales, concentrarse y entramparse y conformar lo que denominamos un campo geotérmico (Figura 4).

El geotermalismo se visualiza en la superficie terrestre por la aparición de zonas de *pérdida*, por donde surge el agua caliente y/o vapor de agua, tales como fumarolas, géiseres, manantiales

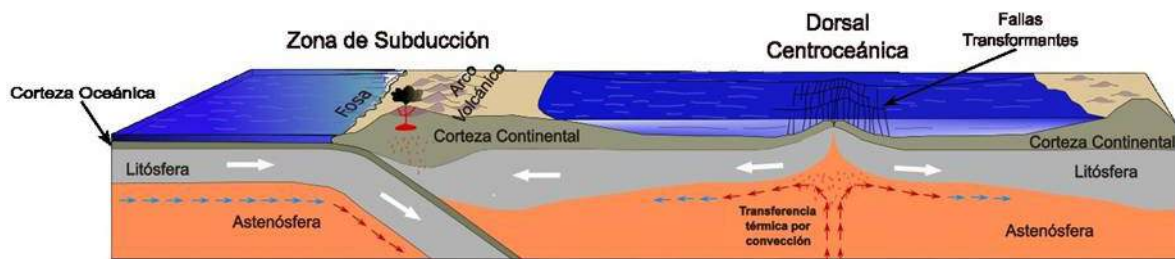


Figura 3. Modelo idealizado del proceso y evolución de la corteza terrestre según la Teoría de tectónica de placas que propone la expansión de los fondos oceánicos. Las flechas rojas/azules representan la convección en el manto semisólido. Las flechas blancas marcan el desplazamiento relativo de las placas litosféricas (tomado de Viramonte et al., 2024).

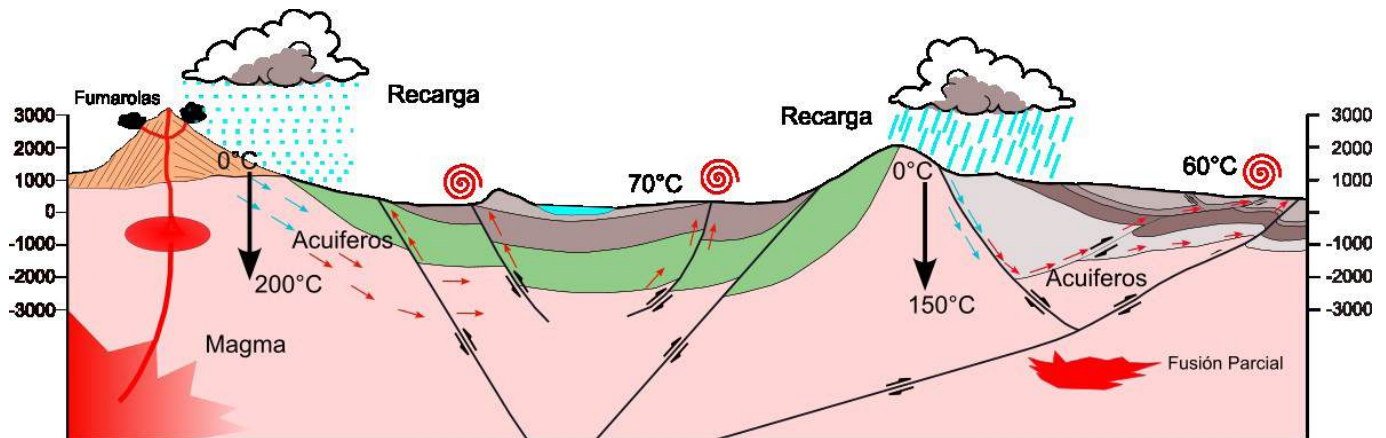


Figura 4. Modelo esquemático general de un campo geotérmico clásico donde en el extremo izquierdo se visualiza una zona de recarga de los acuíferos, la zona de infiltración, una fuente de calor (una intrusión magmática y/o volcanismo activo) que produce una anomalía térmica a su alrededor y calienta el agua del acuífero y una zona impermeable o "caprock" (en marrón) por encima que entrapa el agua y fluidos calientes y produce un yacimiento geotérmico que puede ser perforado y explotado mediante pozos geotérmicos. En el extremo derecho se idealiza un campo geotérmico por emanación de manantiales termales genéticamente relacionados al gradiente geotérmico regional (tomado de Viramonte et al., 2024).

geotermiales, piscinas burbujeantes, etc., que representan diversas formas de manifestación de esas anomalías térmicas existentes en profundidad.

Queda claro entonces que existe una estrecha relación entre el marco geológico, geotectónico e hidrogeológico con el geotermalismo. También es fácil visualizar que las manifestaciones geotermiales pueden representar procesos, situaciones y orígenes muy distintos, por lo cual es preciso realizar su estudio, para conocer el mecanismo que las genera. De esta manera podemos determinar si una manifestación es una fumarola, en el cráter o las laderas de un volcán, o bien en el otro extremo, una fuente termal producida simplemente por la infiltración profunda de agua meteórica, que debido a situaciones tectónicas favorables afloran en superficie (Figura 4). Más complicadas son las manifestaciones híbridas, en donde existe una sumatoria de factores.

Las características físicas, fisicoquímicas y geoquímicas del geotermalismo, serán muy diferentes dependiendo de su origen, pudiendo determinar el verdadero mecanismo que las genera mediante su análisis y estudio.

Por lo antes expuesto, tal como lo señalan Viramonte et al. (2024), el análisis del potencial del geotermalismo en el Noroeste Argentino, debe estar inserto en un estudio en conjunto con el marco geológico, volcanológico y geotectónico de la región, a los que se deben sumar los análisis de sus

características fisicoquímicas, geoquímicas, termodinámicas, etc. Ello nos permitirá conocer el origen y naturaleza de las fuentes termales y de esta manera estimar su potencial regional.

Marco geológico regional

La cordillera de los Andes es el rasgo geológico – geomorfológico más importante producido por la subducción (es decir, el hundimiento) de la placa oceánica de Nazca debajo de la placa litosférica continental sudamericana (Figura 5). Este fenómeno produce un cordón montañoso de orientación sub-meridiana, siendo el volcanismo durante el Cenozoico allí existente, también el producto de este mismo proceso.

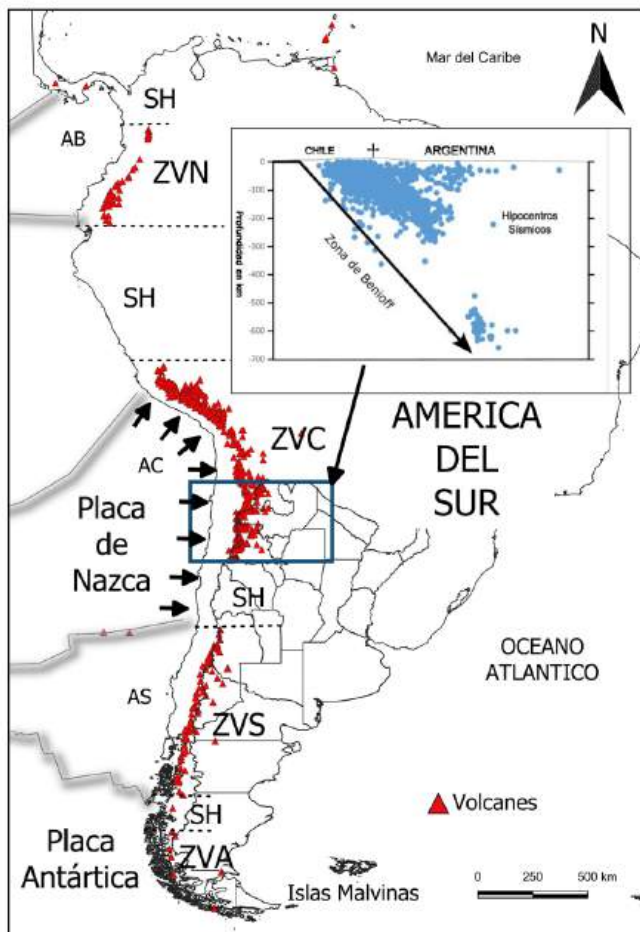


Figura 5. La figura muestra la distribución de volcanes recientes (desde aproximadamente 23 Ma hasta el presente), en la geografía de Sudamérica lo cual define las zonas volcánicas o Arco Magmático (<https://www.insugeo.org.ar/publicaciones>). La ventana de detalle es una sección que muestra la distribución de hipocentros sísmicos históricos (1692-1992) en el NOA (CERESIS, 2024; tomado de Viramonte et al., 2024).

Uno de los rasgos topográficos más sobresalientes de los Andes Centrales es el desarrollo de una altiplanicie denominada *plateau* de la Puna Argentina-Altiplano Peruano-Boliviano o *plateau* Andino, el cual constituye uno de los mayores del mundo, superado solo por el Tíbet.

El magmatismo de los últimos 65 millones de años (Ma) de los Andes Centrales, es coherente con una placa en subducción bajo el Altiplano Austral y la Puna, que aumentó su ángulo a través del tiempo. La información geofísica existente evidencia la presencia de áreas con roca fundida (zonas de fusión parcial) en niveles medios de la corteza, debajo del Altiplano boliviano y del sector norte de la Puna. Las zonas de fusión son muy importantes desde el punto de vista geotermal, ya que están indicando la presencia de una anomalía térmica regional asociada a esas regiones.

Geotermalismo

Los sistemas geotérmicos aparecen normalmente en zonas de la Tierra que tienen

un flujo de calor elevado y configuraciones estructurales que respaldan una eficaz circulación de fluidos a través de redes de fracturas. Cuando el flujo de calor está relacionado con intrusiones magmáticas, el sistema geotermal desarrollado es producto de la interacción entre: a) un cuerpo magmático, que actúa como fuente de calor; b) fluidos meteóricos que se infiltran desde la superficie y se calientan en profundidad; c) fluidos calientes, aportados por el magma (pueden ser ocasionales); d) un reservorio permeable o reservorio geotérmico que contiene a los fluidos calientes, y e) una roca impermeable por encima del reservorio llamada sello o caprock (Figura 4) (e.g., Stimac et al., 2015). Las fallas actúan como vías preferentes para la migración ascendente y la eventual liberación de los fluidos de origen profundo hacia acuíferos someros o directamente a la atmósfera. Las expresiones superficiales hidrotermales pueden ser visibles, como manantiales termales y fumarolas, así como emisiones difusas, no visibles a través de los suelos.

Por otro lado, existen zonas de la Tierra donde por situaciones propicias tanto geológicas, geotectónicas y estructurales, las aguas meteóricas se infiltran a altas profundidades (2-3 km), se calientan por gradiente geotérmico (ya sea normal o anómalo) y, por condiciones tectónicas favorables, ascienden y afloran en superficie. Estas aguas y fluidos calientes por diversas situaciones se pueden acumular y entrapar, formando campos geotermales (Figura 4). Por otro lado, pueden existir innumerables situaciones mixtas y especiales asociadas a la variación del gradiente geotérmico, el cual puede estar influenciado por condiciones geológicas y geotectónicas especiales tales como la presencia de intrusiones magmáticas someras, zonas de adelgazamiento de la corteza

Desde el punto de vista térmico, los fluidos geotermales, al tener diferentes temperaturas, se clasifican generalmente como:

De alta temperatura que son aquellos que presentan temperaturas superiores a 150 °C, denominados *hipertermales*. Son yacimientos de los cuales se puede extraer fácilmente calor para producir energía eléctrica en forma directa. Se localizan principalmente en zonas con gradientes geotérmicos elevados, principalmente volcánicos y se sitúan a profundidades muy variables.

De temperatura media que generalmente alcanzan temperaturas entre 100 y 150 °C (*mesotermales*), lo cual permite su aprovechamiento para producción de electricidad mediante procesos especiales, pero con un rendimiento menor que los de alta temperatura. Pueden ser aprovechados directamente en forma de calor para sistemas de calefacción urbanos o usos industriales. Se localizan en áreas con un contexto geológico y estructural favorable y un gradiente superior a la media.

De baja temperatura con temperaturas entre 30 y 100 °C, llamados *hipotermales*. Su utilización está dirigida a usos térmicos en sistemas de calefacción urbanos, en procesos industriales y especialmente en balneoterapia. Se localizan habitualmente en zonas con un contexto geológico favorable con presencia de acuíferos profundos.

De muy baja temperatura son yacimientos localizados unos metros por debajo de la superficie del suelo y la temperatura es inferior a los 30 °C (*atermales*). Se suelen utilizar como intercambiador térmico en sistemas de climatización mediante bombas de calor. Estos yacimientos se pueden localizar en cualquier punto, ya que el gradiente geotérmico sólo condiciona la eficiencia del sistema. El rendimiento de estas bombas de calor es mayor que si se intercambia con el aire exterior.

con zonas de fusión parcial, zonas de fracturamiento profundo, etc. que condicionarán la naturaleza del geotermalismo que se pueda generar (Figura 4).

Relaciones entre la geología y el geotermalismo en el NOA

En la Figura 6 se indican la mayoría de las fuentes y pozos termales al presente conocidos (coloreadas según sus temperaturas), sobre un mapa de las provincias geológicas existentes en el NOA y sus rasgos tectónicos y estructurales más importantes.

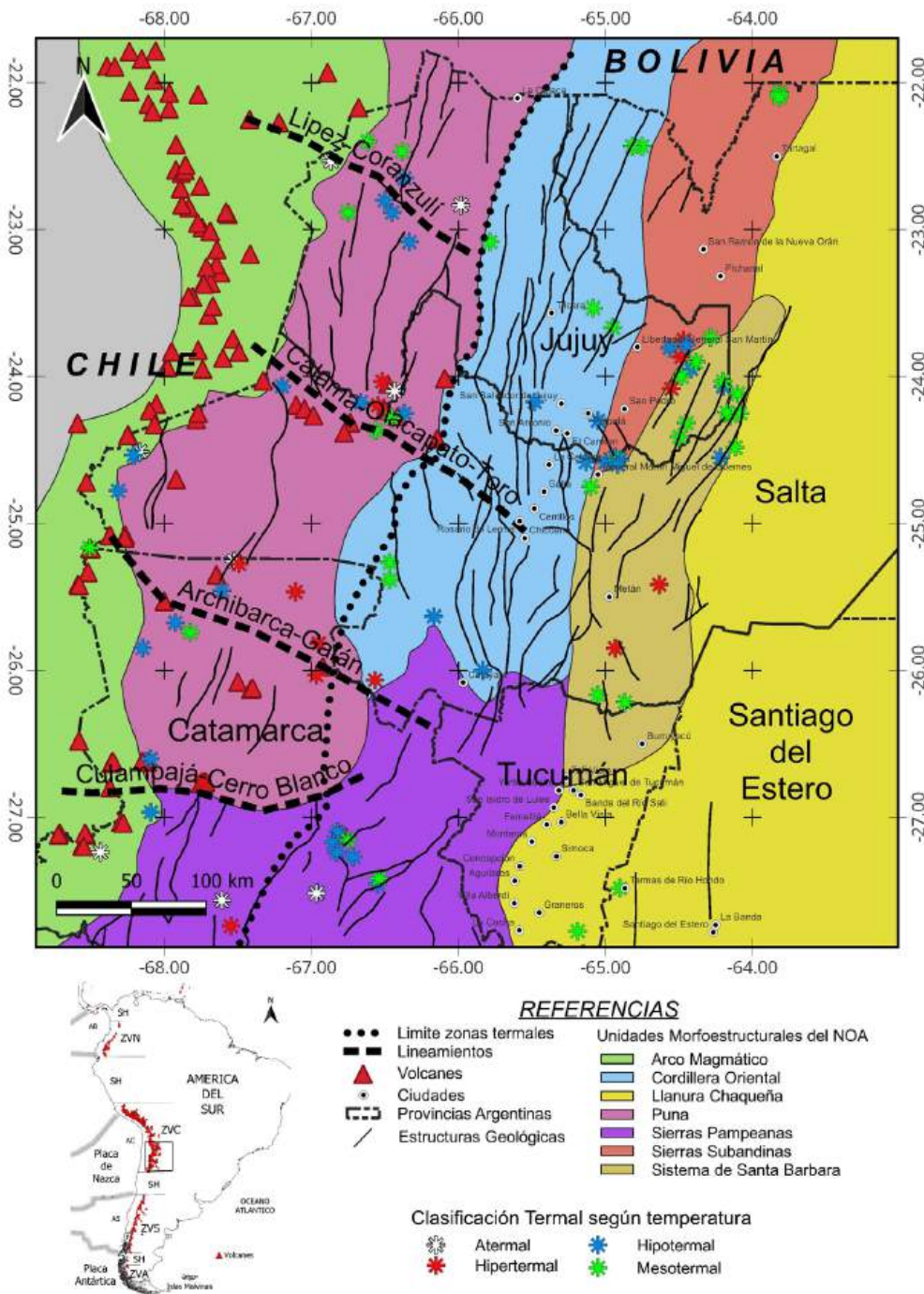


Figura 6. Mapa mostrando las distintas provincias geológicas del NOA (Arco Volcánico activo actual, área de la Puna con volcanismo activo, Área de Cordillera Oriental, Sierras Subandinas, Sistema de Santa Bárbara y Sierras Pampeanas y Área de la llanura Chaqueña), sus principales características tectónicas y las fuentes termales existentes. La línea de puntos separa el área con fuentes termales asociadas al volcanismo activo (hacia el oeste) y las asociadas a infiltración profunda de agua meteórica (hacia el este) con gradiente geotérmico normal o anómalo (tomado de Viramonte et al., 2024).

En la provincia geológica Puna se observa una marcada asociación del geotermalismo con el volcanismo, como así también al tectonismo. Las características geoquímicas de esas fuentes, señalan que la mayoría de ellas son derivadas y están relacionadas al fenómeno volcánico. Se destaca la presencia de fuentes termales asociadas a la cadena volcánica principal, conformada por grandes estratovolcanes de orientación submeridiana del límite Argentina-Chile-Bolivia, pudiéndose aquí señalar solo a manera de ejemplo, la presencia del importante campo geotermal de Socompa, asociado a la actividad del volcán homónimo que ya ha sido objeto de valoración para su posible explotación económica.

Por otro lado, puede observarse geotermalismo asociado a la penetración de ese volcanismo hacia el este, siguiendo los lineamientos tectónicos de orientación NNO-SSE señalados por Viramonte et al. (1984). En este sentido es de destacar la presencia de importantes campos geotermales asociados, tales como los de Tocomar, Tuzgle y Pompeya (Figura 7), directamente asociados a la megaestructura de orientación NNO-SSE Calama-Olacapato-El Toro (COT). En el yacimiento Tocomar se ha identificado una anomalía térmica reciente asociada al Centro Volcánico Tocomar de edad pleistocena (0,5 Ma) que sería la fuente calórica que produciría la actividad geotermal actual, donde la fracturación generada por el COT brinda las condiciones de permeabilidad y proporciona las vías



Figura 7. Pozo termal en las Termas de Pompeya. Departamento Los Andes, Salta (tomado de Viramonte et al., 2024).

principales para el ascenso de fluidos calientes y profundos a lo largo de fallas de rumbo NNO-SSE y la malla de fracturas asociadas.

Del mismo modo el yacimiento Tuzgle está asociado a la misma estructura transversal y al volcán homónimo, así como las Termas de Pompeya cercanas a San Antonio de los Cobres (Figura 7) y que ya ha sido objeto de valoración para su explotación desde el punto de vista económico. Especial interés presentan las termas Puente del Diablo y Domo Travertínico, localizadas directamente en el Frente Púnico en el extremo norte del Valle Calchaquí (Figura 8).



Figura 8. Termas de la Poma, mantos de travertinos. Valles Calchaquíes, Salta (tomado de Viramonte et al., 2024).

Últimamente, diversos estudios realizados han detectado zonas de favorabilidad geotérmica para toda la región NOA, marcando entre los prospectos más importantes para la región de la Puna el volcán Llullaillaco, laguna Lastarria, Caldera del Cerro Galán, Caldera del Cerro Blanco, entre otros (Figura 9).



Figura 9. Estudio de las emisiones difusas de CO_2 en el sistema geotermal del cerro Galán, Catamarca (tomado de Viramonte et al., 2024).

Todos las investigaciones realizadas marcan, en general, para el geotermalismo de la región Puna, una relación estrecha con el fenómeno volcánico con posibles temperaturas de reservorio altas a muy altas, por lo cual se puede visualizar para esta región la posibilidad de yacimientos geotérmicos aptos para la generación de energía eléctrica por uso directo del vapor de los mismos. El incremento de la demanda energética en la región Puna por el desarrollo de numerosos emprendimientos mineros, especialmente de litio, hace que la explotación de la energía geotérmica sea una opción económicamente posible. Por último, es importante recalcar que la energía geotérmica no solo es una opción económica posible, sino que a su vez tiene la ventaja de ser una energía limpia (con baja huella de carbono), lo que aumenta su valor.

Hacia el este de la Puna se desarrollan las provincias geológicas de Cordillera Oriental, Sierras Subandinas, Sistema de Santa Bárbara, Sierras Pampeanas y llanura Chaqueña (Figura 6). De manera diferente a lo descrito anteriormente, cuando se analiza el geotermalismo allí presente, se observa que las características geoquímicas de las mismas, señalan que el calentamiento está producido solo

por gradiente geotérmico. Este gradiente varía según las zonas, existiendo áreas donde es normal y otros anómalo. Asimismo, es una constante común, que las fuentes termales estén asociadas al sistema de fracturamiento y plegamiento, que constituyen los elementos estructurales más importantes (Figura 4).

Este sistema estructural permite que el agua meteórica se infiltre generalmente aprovechando los sedimentos rojos del Cretácico (aproximadamente 100 Ma) presente en toda la región y alcance profundidades muy grandes, se caliente por gradiente geotérmico que en algunos casos es anómalo, produciendo diferentes campos geotermales, fundamentalmente de temperatura media. Uno de los más conocidos es el de Rosario de la Frontera, provincia de Salta, en donde el reservorio está localizado a profundidades mayores de 2000 m en los sedimentos rojos del Cretácico y con fluidos que presentan temperaturas del orden de 130 °C. Otros campos geotermales importantes presentes en este mismo ambiente son El Sauce: 106 °C, El Galpón: 111 °C, La Quinta/El Palmar: 130-200 °C, Caimancito: 100-177°C, El Jordán, Siete Aguas: 75° C y otros, lo que habla de la importancia del recurso y sus posibilidades de explotación económica en el futuro.

Por último, cabe mencionar las manifestaciones y pozos termales localizados en la Llanura Chaqueña, tales como Termas de Río Hondo en Santiago del Estero y Taco Ralo en Tucumán entre los más importantes. En Termas de Río Hondo desde el punto de vista hidrogeológico posiblemente constituye un sistema multiacuífero inserto en la región denominada "Gran Chaco", limitado hacia el oeste por los acuíferos tucumanos originados en el faldeo oriental de las sierras de Aconquija, la alineación de las sierras de Guasayán y la dorsal Mujer Muerta, denominadas "Dorsal Oriental de Tucumán", de orientación N-S y constituye una barrera natural natural para el flujo superficial que se mueve hacia el este, que solo es sobrepasado a la altura de Termas de Río Hondo por el río Salí. El flujo subterráneo es interrumpido por esta barrera que ocasiona la ascensión de flujos termales justo en el entorno de la ciudad de Termas de Río Hondo. No obstante, otros autores sostienen que no hay evidencias de dicha interrupción y que la surgencia se debe más bien a que los sedimentos que contienen el reservorio de agua (acuíferos) en esta zona tienen tamaño de grano más pequeño.

Diversos estudios tanto hidrogeológicos como geofísicos, han mostrado la existencia de importantes acuíferos geotérmicos asociados a un adelgazamiento de la corteza en dicha región, con presencia de posibles zonas de fusión parcial. Asimismo, es una de las zonas de sismos profundos más importantes de la Argentina (Figura 10). Todos estos elementos estarían indicando la presencia en profundidad de una fuente de calor que produciría el geotermalismo en la región.

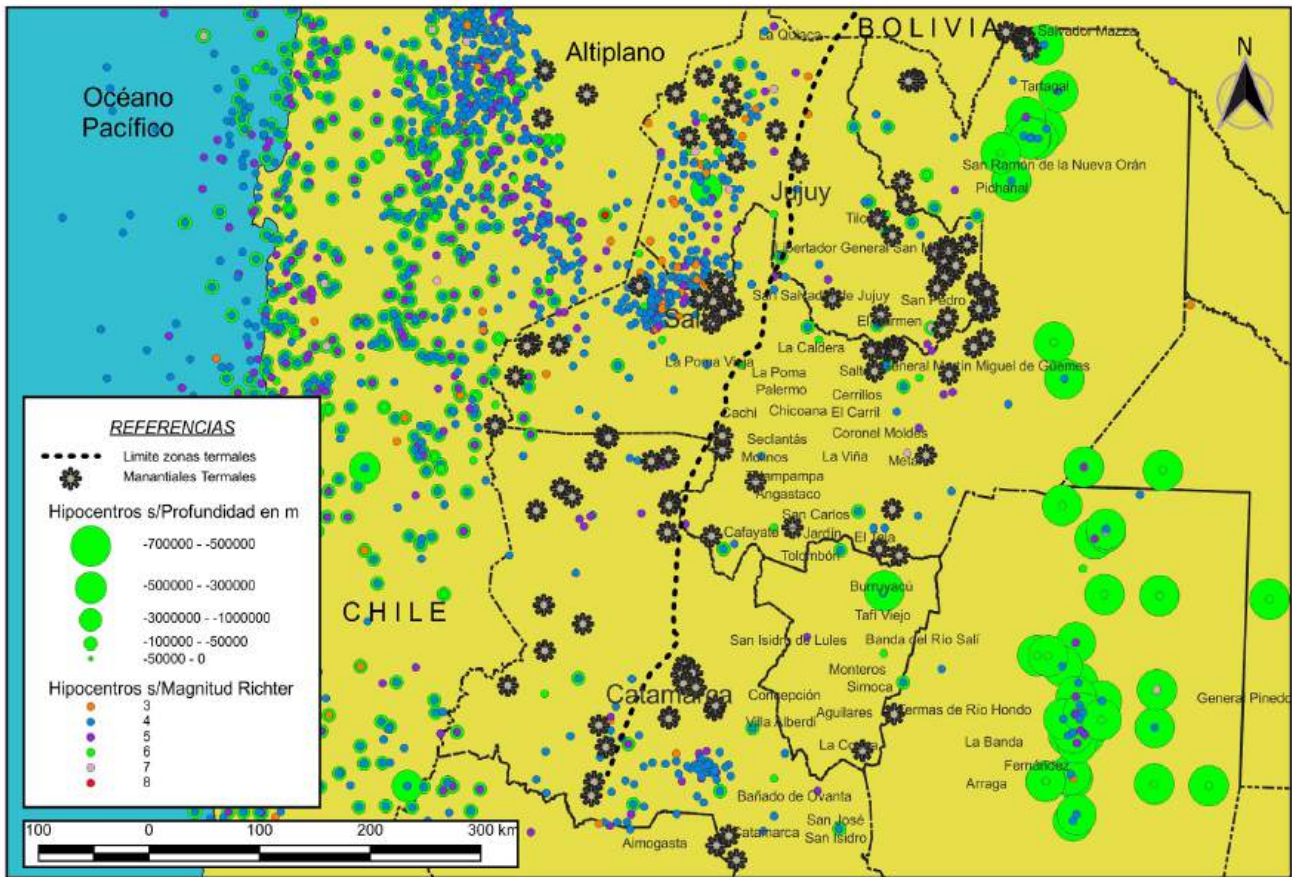


Figura 10. Mapa de distribución de manantiales termales e hipocentros sísmicos históricos del NOA (1692 a 1992) según profundidad y magnitud de Richter (tomado de Viramonte et al., 2024).

En esta área, tradicionalmente se ha utilizado el geotermalismo para su uso directo, constituyendo uno de los más importantes centros de balneoterapia de Argentina. Las temperaturas de las aguas termales son consideradas de temperatura media existiendo importantes caudales en muchos de los pozos perforados evidenciando que esta área termal tiene un elevado potencial de uso, tanto sea para la generación de energía eléctrica como para su uso directo para diversas aplicaciones incluida la balneoterapia.

Todo lo expuesto anteriormente, indica con bastante claridad la existencia de estrechas relaciones entre el geotermalismo, la geología, la tectónica y el ambiente geodinámico.

En el Noroeste Argentino podemos trazar una primera separación (Figura 6) entre la zona de la provincia geológica Puna, donde el geotermalismo está vinculado fundamentalmente al volcanismo activo allí presente, de las provincias geológicas Cordillera Oriental, Sierras Subandinas, Sistema de Santa Bárbara, Sierras Pampeanas y llanura Chaqueña donde el geotermalismo se asocia a infiltración de agua meteórica a grandes profundidades por condiciones tectónicas favorables, en zonas con gradientes geotérmicos ya sea normales o anómalos debido a eventos geodinámicos diversos.

Nota: Esta es una versión resumida y adaptada para divulgación científica del artículo de Viramonte et al. (2024), *Relaciones entre la geología, volcanismo y geotermalismo en el Noroeste Argentino*.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de esta contribución queremos agradecer a las Editoras de esta Revista por sus detallados comentarios que mejoraron sustancialmente la calidad de nuestro artículo.

REFERENCIAS

AHUMADA MF, R FILIPOVICH, A CHIODI, W BÁEZ, J VIRAMONTE. 2019. El aprovechamiento del calor de los Andes para el desarrollo energético sustentable. [Temas de Biología y Geología del NOA, 9 \(1\): 18-26](#).

CERESIS, Centro Regional de Sismología para América Latina. 2024. <https://ceresis.org>

ORTIZ A. 2021. Circón: un pequeño gran mineral. [Temas de Biología y Geología del NOA, 11 \(3\): 11-20](#).

STIMAC J, F GOFF, C GOFF. 2015. Intrusion-related geothermal Systems. pp. 800-822. En Sidgurdsson H, B Houghton, S McNutt, H Rymer, J Stix (Eds.), *Encyclopedia of Volcanoes*, 2º Edición.

VIRAMONTE JG, MA GALLISKI, V ARAÑA SAAVEDRA, A APARICIO, L GARCÍA CACHO, C MARTÍN ESCORZA. 1984. El finivulcanismo básico de la depresión de Arizaro, provincia de Salta, República Argentina. IX Congreso Geológico Argentino, Actas III: 234-254.

VIRAMONTE JG, A CHIODI, R FILIPOVICH, E BUSTOS, C PERALTA. 2024. Relaciones entre la geología, volcanismo y geotermalismo en el Noroeste Argentino. *Revista Ciencia e Investigación. Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias*, 74 (2): 5- 25.

TEMAS DE BIOLOGÍA Y GEOLOGÍA DEL NOA

Revista de Divulgación Científica del Instituto de Bio y Geociencias

Volumen 14, Número 2, Agosto 2024

I B I G E O

IBIGEO INSTITUTO DE BIO Y
GEOCIENCIAS DEL NOA

<https://ibigeo.conicet.gov.ar/>

CCT-Salta-Jujuy
9 de julio 14
Rosario de Lerma-4405 (Salta)
República Argentina
Tel: 54 (0) 387 4931755
ibigeotemas@gmail.com