

MAPA DE FAVORABILIDAD GEOTÉRMICA APLICANDO EL MÉTODO DE ANÁLISIS GEOHERMAL PLAY FAIRWAY Area I, Puna Norte, Argentina

**Gabriel Asato, Raúl Seggiaro, Alejandro Conde Serra,
Noelia Carrizo, Nicolás Larcher, Diego Azcurra, Silvia Castro Godoy,
Federico Carballo, Cintia Marquetti, Virginia Naón, Cary Lindsey,
Bridget Ayling, James Faulds y Mark Coolbaugh**



MAPA DE FAVORABILIDAD GEOTÉRMICA APLICANDO EL MÉTODO DE ANÁLISIS GEOTHERMAL PLAY FAIRWAY

AREA I, PUNA NORTE, ARGENTINA

Gabriel Asato¹: Geoestadística y Procesamiento.

Raúl Seggiaro³: Geología Estructural.

Alejandro Conde Serra¹: Interpretación Modelos Geotérmicos.

Noelia Carrizo⁴: Geoquímica de Fluidos.

Nicolás Larcher⁵: Hidrología y Manifestaciones Termales

Diego Azcurra², Silvia Castro Godoy², Federico Carballo²: Sensores Remotos

Cintia Marquetti¹: Alteraciones Hidrotermales

Virginia Naón¹: Base de Datos.

Cary Lindsey⁵: Geoestadística y Procesamiento

Bridget Ayling⁶: Metodología.

James Faulds⁶: Geología Estructural

Mark Coolbaugh⁶: Geología General y Rasgos Geotérmicos

¹*Dirección de Recursos Geológicos Mineros (DRGM), Instituto de Geología y Recursos Mineros (IGRM),
Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR)*

²*Dirección de Geomática, Instituto de Geología y Recursos Minerales (IGRM),
Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR)*

³*Delegación de la Provincia de Salta del Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR)*

⁴*Delegación de la Provincia de Catamarca del Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR)*

⁵*Delegación de la Provincia de Jujuy del Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR)*

⁶*Great Basin Center for Geothermal Energy (GBCGE), Nevada Bureau of Mines and Geology,
Universidad de Nevada, Reno, EE.UU.*

SERVICIO GEOLÓGICO MINERO ARGENTINO

Presidente: Dr. Eduardo O. Zappettini

Secretaria Ejecutiva: Lic. Silvia Chavez

INSTITUTO DE GEOLOGÍA Y RECURSOS MINERALES

Director: Dr. Martín Gozálvez

DIRECCIÓN DE RECURSOS GEOLÓGICO MINEROS

Directora: Lic. Dolores Álvarez

INSTITUTO DE GEOLOGÍA MINERA

Director: Lic. Guillermo A. Cozzi

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

Esta publicación debe citarse como:

Asato, G., Seggiaro, R., Conde Serra, A., Carrizo, N., Larcher, N., Azcurra, D., Castro Godoy, S., Carballo, F., Marquetti, C., Naón, V., Lindsey, C., Ayling, B., Faulds, J., Coolbaugh M. 2020. Mapa de Favorabilidad Geotérmica Aplicando el Método de Análisis Geothermal Play Fairway Area I, Puna Norte, Argentina. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino. Serie Contribuciones Técnicas Geotermia N° 3, 34 pp. Buenos Aires

ISSN 2618-4818

ES PROPIEDAD DEL INSTITUTO DE GEOLOGÍA Y RECURSOS MINERALES – SEGEMAR
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN



Av. General Paz 5445 (Colectora provincia) 1650 - San Martín - Buenos Aires - República Argentina

Edificios 14 y 25 | (11) 5670-0100

www.segemar.gov.ar

BUENOS AIRES - 2020

CONTENIDO

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUCCIÓN	3
2. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL	4
3. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS PLAY FAIRWAY	5
3.1 Metodología Geothermal Play Fairway aplicada al Área 1, Puna Norte.....	6
3.1.1 Modelo de análisis e integración de datos	7
4. RESULTADOS DE LOS MODELOS DE SUBSISTEMAS	7
4.1 Modelo del subsistema Fluidos	7
4.2 Modelo del subsistema Permeabilidad	12
4.3 Modelo del subsistema Calor	15
4.4 Modelo de Resultados de Potencial Geotérmico. Mapa de Favorabilidad Geotérmica	18
5. CONCLUSIONES	19
ANEXO: PROCESAMIENTO DE DATOS Y GENERACIÓN DE MAPAS DE EVIDENCIA	19
1. ALTERACIONES ASTER	22
1.1 Detección de Alteraciones	22
1.2 Asignación de edades a las alteraciones	22
2. CALDERAS	23
2.1 Descripción del procesamiento:	23
3. FALLAS CUATERNARIAS	23
3.1 Descripción del procesamiento:	24
4. RASGOS ESTRUCTURALES FAVORABLES	24
5. SALARES	24
5.1 Descripción del procesamiento:	25
6. SISMOS SOMEROS	26
6.1 Descripción del procesamiento:.....	26
7 MANANTIALES FRÍOS (COOL SPRINGS)	27
7.1 Descripción del procesamiento	29

8 MANANTIALES CALIENTES (HOT SPRINGS)	29
8.1. Descripción del procesamiento	30
9. VOLCANISMO	31
9.1. Descripción del procesamiento	31
TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO	32

RESUMEN

Como resultado del acuerdo firmado entre el *Great Basin Center of Geothermal Energy (GBCGE)* y el Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR) se inició un nuevo proyecto cuyo objetivo fue el descubrimiento de recursos geotérmicos ocultos o ciegos en una porción de la Puna (NOA).

Para el cumplimiento de este objetivo la metodología *Geothermal Play Fairway*, diseñada por el GBCGE, fue implementada en la región seleccionada con el propósito de detectar zonas de favorabilidad geotérmica de alta entalpía dentro del área de estudio. Esta metodología consiste en la superposición de mapas de evidencias, según la metodología adoptada, de manera tal que cada punto del mapa resultante obtiene un puntaje otorgado por la cantidad y calidad de las evidencias de sistemas geotermiales asociadas a dicho punto. Se recolectó, analizó y procesó información tanto de evidencias directas como indirectas de la existencia de Fluidos, Flujo calórico y Permeabilidad (principales componentes de un sistema geotermal) para producir mapas ponderados de cada uno de estos subsistemas. Luego se combinaron los mapas resultantes para crear un Mapa de Favorabilidad Geotérmica de la región de estudio.

La eficacia del método se verificó después de reconocer cuatro sitios con recursos geotérmicos previamente conocidos. Los sistemas geotérmicos de Aguas Calientes Caldera, Incachule, Tocomar, Pompeya y Antuco (Zona A); Caldera de Coranzulí (Zona B); y Volcán Tuzgle (Zona D). Además, se detectaron otras ubicaciones potenciales con antecedentes no previos, como las áreas de Rosario de Coyaguaima y Pairique (Zona C). Y así mismo cabe agregar el sector que comprende el Salar de Rincón como área de interés. Es bien sabido que una mayor investigación y la incorporación de más datos podrían aumentar la posibilidad de descubrir nuevos sitios con potencial geotérmico.

Este reporte presenta un resumen de la metodología empleada, la descripción de las evidencias consideradas y las razones de los pesos asignados a cada una de las evidencias. La intención no es sólo presentar los resultados obtenidos para el área de estudio, sino también generar una guía que permita al lector implementar la metodología *Geothermal Play Fairway* en otras regiones de Argentina.

Palabras clave: *fluidos, calor, permeabilidad, favorabilidad, entalpía, metodología, potencial.*

ABSTRACT

After the agreement signed between the Great Basin Center for Geothermal Energy (GBCGE) and the Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR), a new project was started with the objective of discovering hidden geothermal resources in a portion of the Puna region (NW Argentina).

To achieve this goal the Geothermal Play Fairway methodology, designed by the GBCE, was implemented in the selected region with the purpose of highlight high enthalpy geothermal favorability zones inside the study area. This methodology consisted in the integration of evidence maps, according to the adopted methodology, in a way that each point of the resulting map obtains a score given by the quantity and quality of the weighted evidences of the geothermal systems associated to that point. Information, regarding direct and indirect evidences of the existence of Fluids, Heat flux and Pemeability (main components of a geothermal systems), were gathered, analyzed and processed to produce weighted evidence maps for each of these subsystems. These maps were then combined to create a geothermal favorability map of the study region.

The effectiveness of the method was checked after they were recognized four sites with previously known geothermal resources. These geothermal systems are Aguas Calientes Caldera, Incachule, Tocomar (Zone C), Pompeya y Antuco (Zone A); Coranzulí Caldera (Zone B); and Tuzgle Volcano (Zona D). In addition, other potential locations with non-prior antecedents were detected, such as the areas of Rosario de Coyaguaima and Pairique (Zone C). It is well know that further research and the incorporation of more data could increase the chance discovering new geothermal potential sites.

This report presents a summary of the methodology used, the description of the evidences considered and the reasons for the weights assigned to each of the evidence maps. The intention is not only to present the *results* obtained for the study area, but also to generate a guide that allows the reader to implement the Geothermal Play Fairway methodology in other regions of Argentina.

Keywords: *fluid, heat, permeability, favorability, enthalpy, methodology, potential.*

1. INTRODUCCIÓN

En el año 2017 el *Great Basin Center of Geothermal Energy (GBCGE)* del estado de Nevada, EE.UU., recibió fondos del *Bureau of Energy Resources* del Departamento de Estado de los EE.UU. para el desarrollo del programa *GEODE (Geothermal Development)*, donde la aplicación del método *Geothermal Play Fairway (GPF)* se comprobó como una herramienta eficaz para la exploración y desarrollo de la geotermia para la generación de electricidad.

La Argentina tiene condiciones geológicas suficientes como para disponer de un potencial en recursos geotérmicos de gran cuantía y aptos para satisfacer las necesidades energéticas de numerosas poblaciones e industrias. Con ese enfoque el Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR) firmó un Convenio de Colaboración Científica con el *GBCGE* para la puesta en práctica del método *GPF* para la cartografía de favorabilidad geotérmica.

La ejecución del convenio se inició con un programa de visitas a la Argentina del equipo del *GBCGE* para el dictado de cursos sobre las características del método. Posteriormente se completó la instrucción con una misión del cuerpo de geólogos

del SEGEMAR, del 4 al 23 de mayo del año 2019, a la Universidad de Reno, a los efectos de realizar reconocimientos geológicos con enfoque geotérmico sobre el territorio de los estados de Nevada y California. En ese sentido se realizaron visitas a sitios donde la aplicación del método *GPF* demostró su aptitud en el descubrimiento de campos geotérmicos ciegos.

El conocimiento adquirido por el SEGEMAR sobre esta metodología tiene el objetivo de desarrollar un programa de cartografía del potencial geotérmico de alta entalpía en todo el territorio nacional. Los resultados que se alcancen serán publicados y puestos a disposición para la consulta de autoridades nacionales de aplicación, organismos científicos y académicos (nacionales y extranjeros) y empresas interesadas en la exploración y explotación de los recursos geotérmicos de la Argentina.

Para el inicio de este Proyecto se seleccionó una región denominada Área 1, comprendida entre las provincias de Jujuy y Salta, en el sector norte de la Puna argentina. El Área 1 ocupa una superficie de 44.300 km², delimitando un polígono regular entre las coordenadas: 22° 32' S - 66° 48' O, 22° 32' S - 65° 20' O, 25° 5' S - 65° 57' O y 25° 5' S 67° 32' O (Figura 1).

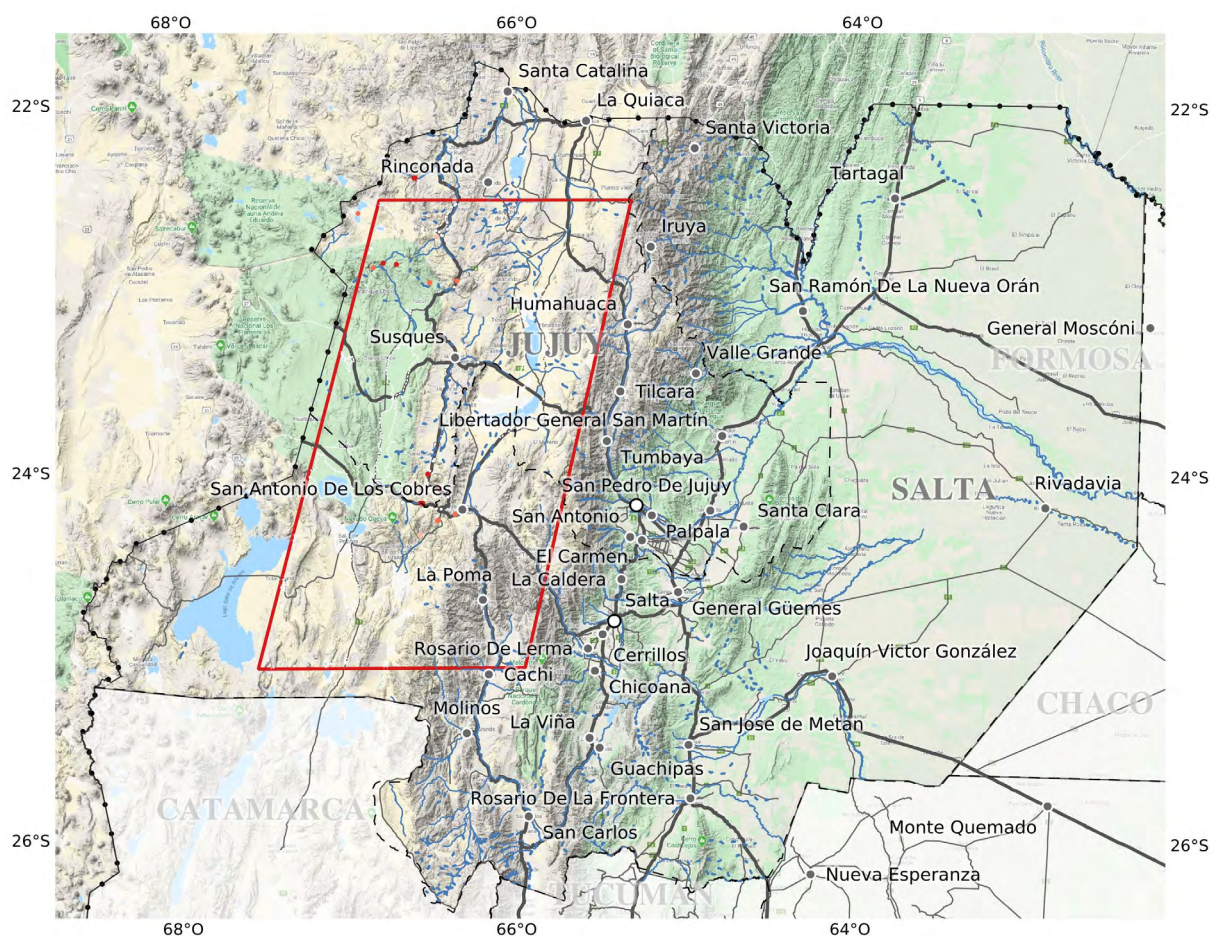


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio

Pese a tratarse de una región con condiciones de aislamiento geográfico, donde la provisión de energía eléctrica alternativa constituiría un aporte valioso para mejorar la calidad de vida de sus habitantes, son escasos los estudios geotérmicos realizados en la Puna. El presente trabajo intenta propiciar el desarrollo de la exploración geotérmica en zonas del Área 1 seleccionadas por su favorabilidad mediante el método *Geothermal Play Fairway* aquí aplicado.

Para la construcción de los mapas de favorabilidad geotérmica se apeló a la información geológica disponible de la región, con especial atención a trabajos estructurales, volcanológicos, hidrotermales, geoquímicos, geofísicos y geotérmicos.

La presente contribución técnica tiene como objetivo describir la metodología aplicada en el área mencionada, explicar las características de los modelos utilizados y generar un primer mapa de potencial geotérmico empleando la metodología de análisis *Play Fairway*.

2. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

La Puna argentina forma parte de los Andes Centrales donde la placa de Nazca subduce a la placa Sudamericana, con aproximadamente 30° E (Jordan *et al.* 1983. Isacks 1988. Allmendinger *et al.* 1997). Constituye una altiplanicie con elevación media de 3.700 m s.n.m., 1.800 km de largo en sentido norte sur y 400 km de ancho, limitada al Oeste por el arco magmático Mioceno-Holoceno y al Este por las provincias geológicas Cordillera Oriental y Sierras Pampeanas septentrionales. Su relieve se caracteriza por la presencia de sierras elongadas en dirección meridiana, separadas por amplios valles frecuentemente ocupados por salares.

La columna estratigráfica de la región está compuesta por leptosedimentitas del Precámbrico-Cámbrico inferior, sedimentitas marinas cámbrico-ordovícicas, granitoides ordovícicos, depósitos cretácicos continentales y marinos de sin y pos *rift*, sedimentitas fluviales paleógenas y neógenas y volcanitas e intrusivos miocenos a pleistocenos. Para más descripción sobre aspectos geológicos del ámbito donde se ha puesto en práctica el método GPF, se ha apelado al mapa geológico resultante del Proyecto *MAPGAC* tal como se ilustra en la figura 2.

La tectónica andina produjo sistemas de co-

rrimientos, en algunos casos controlados por la inversión de fallas normales generadas durante un *rift* intracontinental en el Cretácico (e.g. Grier *et al.* 1991. Mon, Salfity 1995) o por anisotropías del basamento paleozoico (Salfity *et al.* 1976, Hongn *et al.* 2010. Payrola-Bosio *et al.* 2009. Seggiaro *et al.* 2017).

Según diversos autores, el levantamiento de la Puna se habría llevado a cabo durante el Mioceno medio a tardío, debido al efecto combinado de acortamiento tectónico y adición magmática en la corteza inferior (Perkins *et al.* 2016. Allmendinger *et al.* 1983. Jordan, Alonso 1987. Allmendinger *et al.* 1997. Isacks 1988).

Valores elevados de flujo térmico en coincidencia con anomalías de conductividad, velocidad y atenuación sísmica (Ibarra, Prezzi 2019), sugieren para la Puna, la presencia de una capa fundida, en niveles intermedios de la corteza, conocida como *Altiplano Puna Magma Body (APMB)* (Chmielewski, Zandt 1999), que le otorgaría un elevado gradiente térmico regional.

Los corrimientos con rumbos meridianos, son interrumpidos de manera aproximadamente equidistante a lo largo de toda la Puna, por lineamientos de dirección NO - SE transversales al rumbo andino (Salfity, 1985). El origen de estos lineamientos es atribuido a diferentes factores como; modificaciones en el ángulo de convergencia de la placa de Nazca, cambios en la dirección de movimiento de la placa sudamericana (Marrett *et al.* 1994), estiramiento paralelo al orógeno (e.g. Riller, Oncken 2003. Riller *et al.* 2001) o a zonas de transferencia que acomodan desplazamientos diferenciales entre corrimientos (Petrinovic *et al.* 2010. Norini *et al.* 2013. Acocella *et al.* 2011. Lanza *et al.* 2013. Giordano *et al.* 2013).

El rasgo sobresaliente de los lineamientos transversales, esta expresado en la disposición sobre sus trazas, de cadenas volcánicas (Viramonte *et al.* 1984) donde se emplazan mega calderas. En el Área 1, se destacan los lineamientos Coyahuaima y Calama-Olacapato-Toro (COT) sobre los cuales se disponen las calderas miocenas Coranzulí (Seggiaro 1994) y Aguas Calientes (Petrinovic 1994), respectivamente, con presencia de fuentes termales en su interior.

El estado termo mecánico de la corteza en la Puna, sumado a dominios estructurales que facilitan la movilidad de fluidos, configuran entornos geológicos que reúnen condiciones de permeabilidad y temperatura favorables para el emplazamiento de campos geotérmicos.

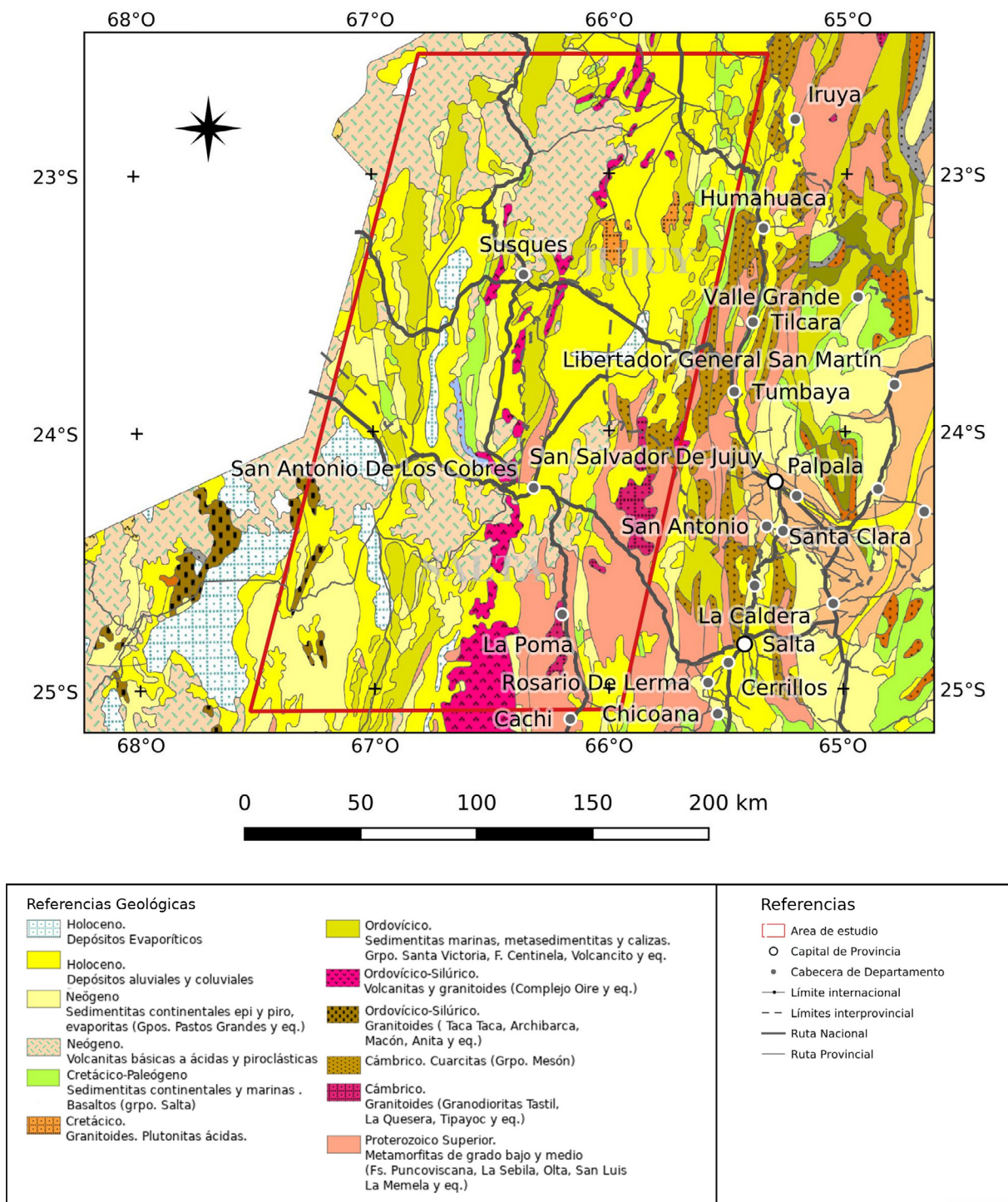


Figura 2. Mapa geológico regional extraído y modificado del mapa digital 1:1.000.000 del Proyecto MAPGAC

3. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS PLAY FAIRWAY

La metodología de análisis *play fairway* es un instrumento aplicable a estudios de escala regional originalmente utilizada en la industria petrolera con el fin de identificar y priorizar áreas con potencial, a los efectos de reducir los costos y riesgos de exploración (Fraser, Gawthorpe, 2003).

Esta técnica fue adaptada para la prospección de los recursos geotérmicos por Siler y Faulds (2013), quienes definieron como factores geológicos claves para la yacencia de este recurso, la existencia de calor, permeabilidad y fluidos.

Se define como *Play* al conjunto y combinación de rasgos geológicos (variables independientes del estudio) que permiten la identificación de áreas favorables para la exploración del recurso geotermal. El *Fairway*, es el área geográfica sobre la cual se

reconoce que el *Play* puede caracterizar un recurso geotermal. Entonces el análisis *Play Fairway*, es un método utilizado para estudiar un área a escala regional a los fines de reconocer rasgos geológicos claves que permitan caracterizar un recurso geotermal. Los resultados se materializan en un mapa de potencial o favorabilidad geotérmica, producto que deberá ser validado y enriquecido con posteriores estudios de campo. En la tabla 1, se detallan los objetivos principales de la técnica *geothermal play fairway*.

Objetivos del Análisis <i>Play Fairway</i> para estudios geotérmicos
a. Identificar y mapear áreas de potencial geotérmico a nivel regional.
b. Proveer elementos para la identificación de potenciales sistemas geotermales ciegos.
c. Permitir en forma concreta y objetiva la definición de sitios prioritarios de exploración de detalle, así como también establecer las necesidades de nuevos datos que permitan mejorar el modelo conceptual geotérmico (geología, geoquímica, geofísica, perforaciones de exploración, etc.).
d. Reducir los costos y el riesgo de exploración.

Tabla 1. Objetivos del Análisis *Play Fairway* para estudios geotérmicos

No hay una única forma de realizar el análisis *Play Fairway*, tal cual se ha podido comprobar en los numerosos estudios en los que se ha empleado esta metodología. El diseño y aplicación del método de análisis dependen en gran medida de la disponibilidad de datos y de su calidad en términos de escala, cobertura y precisión. En especial, de la existencia de datos robustos de campo que permitan verificar los resultados, por ejemplo, la presencia de manantiales calientes (*hot springs*) con sus correspondientes análisis geoquímicos completos.

3.1 METODOLOGÍA GEOTHERMAL PLAY FAIRWAY APLICADA AL ÁREA I, PUNA NORTE

Transportar los datos a un modelo de inferencias georreferenciado conlleva diferentes pasos, a saber:

- Obtención de datos digitales.
- Adecuación de la información a los fines de la metodología.
- Generación de mapas de potencial geotérmico.

a) Obtención de datos digitales

Se parte de que el análisis *Play Fairway* requiere de la compilación de datos preexistentes donde se identifica el conjunto de datos primarios necesarios para su implementación, a saber: imágenes satelitales de alteraciones hidrotermales, sismos, mapas geológicos (para ubicar aparatos volcánicos y calderas), información estructural, hidrográfica, litoestratigráfica, cronología volcánica, como así también caracterización geoquímica y geotermométrica de manifestaciones termales.

La información utilizada fue seleccionada a partir de la búsqueda de publicaciones científicas, bibliografía inédita y cartografías existentes en universidades, institutos geocientíficos, empresas privadas y en el repositorio de publicaciones del SEGEMAR.

Para el reconocimiento de las alteraciones hidrotermales se apeló a imágenes satelitales *ASTER LIT* procedentes del repositorio digital *Earth Explorer* del *United State Geological Survey (USGS)* y del Área de Sensores Remotos del SEGEMAR.

En lo referente a información sismológica se recurrió a la base de datos del Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES) (http://contenidos.inpres.gob.ar/buscar_sismo) elaborada especialmente para el SEGEMAR (Delegación Mendoza).

La información estructural fue generada mediante la digitalización de fallas, en especial cuaternarias, sobre imágenes *Google Earth* y la compilación de las publicadas en el Catálogo de Deformaciones Cuaternarias de la República Argentina desarrollado por el SEGEMAR y en las Hojas Geológicas 1:250.000 2569-II Socompa (Zappettini y Blasco 2001), 2569-IV, Antofalla (Seggiaro *et al.* 2007), 2366-I I / 2166-III Mina Pirquitas (Coira *et al.* 2004), 2366-III Susques (Seggiaro *et al.* 2015), 2566-I San Antonio de los Cobres (Blasco *et al.* 1996), 2566-III Cachi (Hongn *et al.* 2001), 2366-II/2166-IV La Quiaca (Rubiolo *et al.* 1997), 2366-IV Ciudad del Libertador General San Martín (González *et al.* 2003), 2566-II Salta (Seggiaro *et al.* 2019a) y 2566-IV Metán (Salfity *et al.* 2006). Así mismo se empleó la base de datos del Sistema de Información Geológica Ambiental Minera (SIGAM), del Instituto de Geología y Recursos Minerales (IGRM).

La identificación de manantiales fríos (*cool springs*) se obtuvo mediante la interpretación de imágenes de *Google Earth* y de informes técnicos y publicaciones (Dames, Moore 1999. Saluso, Moraña 2015). En lo que respecta a manantiales calientes (*hot springs*) se tomaron los datos proce-

dentos del Catálogo de Manifestaciones Termiales del SEGEMAR (Pesce, Miranda 2003) y de estudios específicos realizados por Peralta Arnold *et al.* (2016), el Centro Regional de Energía Geotérmica de Neuquén (CREGEN), Sierra (1988), Aquater (1980) y Carrizo (2015).

Los datos correspondientes a rocas volcánicas fueron extraídos del mapa geológico digital en escala 1:1.000.000 del Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas (MAPGAC) elaborado por el SEGEMAR en conjunto con el *Geological Survey of Canada*.

b) Adecuación de la información a los fines de la metodología.

Consistió en procesos de extracción, conversión, clasificación y generación de capas de evidencias referidas al sistema cartográfico POSGAR 94, Faja 3 (EPSG 22183) y su posterior conversión del formato vectorial a *raster* del tipo *Geo Tiff* binario real. Estas operaciones se realizaron con el objetivo de extraer y adecuar la información requerida por el modelo a construir y así poder generar un nuevo conjunto de datos que constituya el *Play*. La conversión a formato *rASTER* se realizó a los efectos de tratar los datos utilizando álgebra de mapas.

A partir de los datos primarios mencionados se generaron capas de información de alteraciones hidrotermales (argílica y filica), calderas, fallas cuaternarias, manantiales calientes, salares, volcanismo, etc.

Los detalles sobre el procesamiento aplicado para cada capa de información se exponen en anexo.

3.1.1 MODELO DE ANÁLISIS E INTEGRACIÓN DE DATOS

Se optó por utilizar un modelo de inferencias basado en el conocimiento experto según el método de *Index Overlay* (Bonham, Carter *et al.* 1988) agrupándose los datos según los modelos de los subsistemas de permeabilidad potencial, fluidos y calor (Siler, D.L., Faulds, J.E. 2013).

La base de datos que respalda cada subsistema o modelo de subsistema, se construyó a partir de conjugar elementos geológicos favorables a la presencia de calor, la existencia de fluidos geotermiales y todos aquellos componentes estructurales que coadyuvan a la permeabilidad, circulación y/o entrapamiento de los fluidos termiales.

Entonces se debe cumplir para cada subsistema que:

$$Y = \sum_{i=1}^n (Xi * Wi) \div \sum_{i=1}^n Wi$$

Donde Y corresponde a cada subsistema, Xi a cada mapa de evidencia y Wi su peso correspondiente.

Y posteriormente para el esquema de investigación se empleó la siguiente ecuación para generar el modelo *Play Fairway*:

$$Z = (Ypp * Wpp + Yfl * Wfl + Yc * Wc) \div (Wpp + Wfl + Wc)$$

Donde Z corresponde al modelo *Play Fairway*, Y a los modelos de subsistemas permeabilidad potencial, fluidos y calor, y W a los pesos de cada subsistema.

Cada mapa de evidencia corresponde a una variable independiente o elemento geológico que caracteriza al sistema geotermal que se pretende definir. Dado que la metodología involucrada trata sobre “conocimiento experto”, los pesos asignados a cada mapa de evidencia corresponden a valoraciones numéricas que se deben a valoraciones en lenguaje natural. Es así que un peso igual a cero correspondería a “no favorable”, mientras que un valor equivalente a 1 ó 100, dependiendo de la escala que se elige, corresponde a “muy favorable”. Se entiende que los valores intermedios atañen a valoraciones intermedias. La tabla 2 identifica los pesos asignados a los componentes de cada mapa de evidencia.

A su vez cada mapa de evidencia está compuesto por varias clases con distintos pesos (ver tabla 3),

En adelante se ilustra con las figuras 3, 4, 5 y la figura 6 de integración, los esquemas de valorización que parten del *workflow* y en orden, las tablas 4 y 5 correspondientes a las diferentes valorizaciones establecidas por el equipo de expertos para cada componente de los subsistemas y la tabla 6 específica integral de los mismos.

4. RESULTADOS DE LOS MODELOS DE SUBSISTEMAS

4.1 MODELO DEL SUBSISTEMA FLUIDOS

El modelo del subsistema de fluidos busca inicialmente determinar la disponibilidad de agua en

Modelo de Subsistema	Mapa de Evidencia	Peso	Peso Normalizado
Fluidos	Alteraciones	2	0,13
	Salares	1	0,07
	Manantiales fríos (con un corredor de 2.5 km)	2	0,13
	Manantiales calientes (con un corredor de 2.5 km)	10	0,67
Permeabilidad Potencial	Manantiales Calientes (hot springs)	6	0,17
	Fallas Cuaternarias	6	0,17
	Calderas	7	0,19
	Sismos Someros	2	0,06
	Rasgos Estructurales Favorables	10	0,28
	Alteraciones	5	0,14
Calor	Volcanismo	9	0,36
	Temperatura (manantiales y geotermometría)	10	0,4
	Alteración	6	0,24

Tabla 2. Pesos por mapa de evidencias

Fluidos		
Mapa de Evidencia	Clases	Peso por clase
Alteraciones (argílica avanzada y fílica)	Más antigua que Mioceno	0,01
	Mioceno	0,1
	Plioceno/Cuaternario	0,3
	Cuaternario	0,8
	<1Ma	1
Salares		1
Manantiales fríos (cool springs) Con un corredor de 1km.		1
Manantiales calientes (hot springs) Con un corredor de 5km.		1

Tabla 3. Pesos para cada clase por mapa de evidencia del subsistema Fluidos

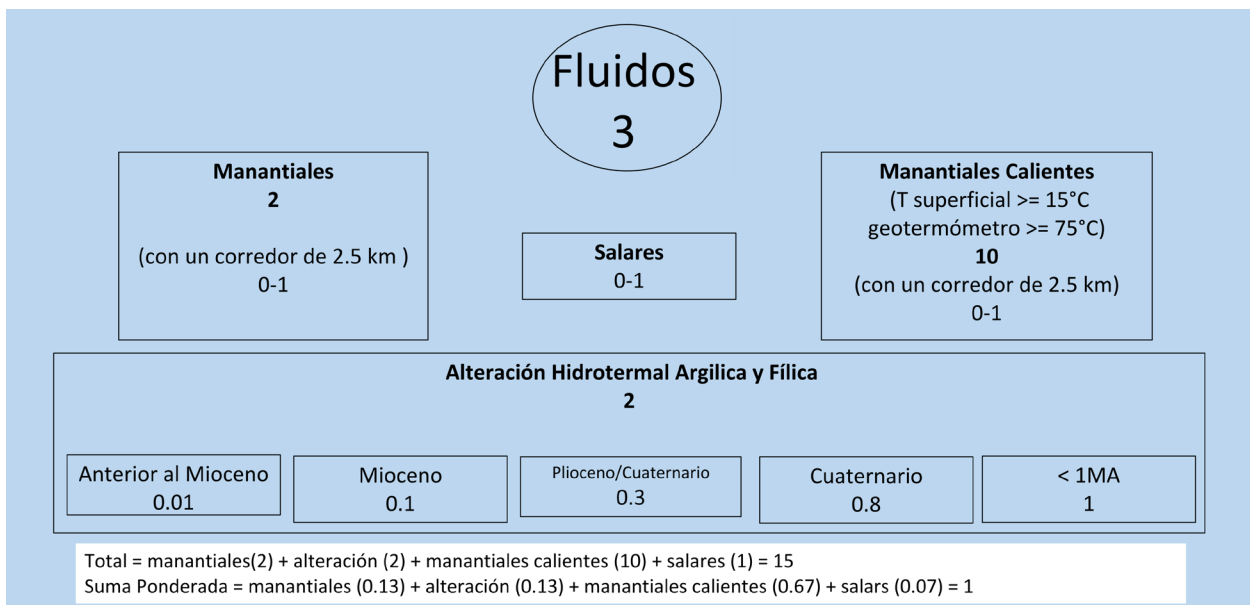


Figura 3. Esquema de pesos para cada clase y mapa de evidencia del subsistema Fluidos

Permeabilidad		
Mapa de Evidencia	Clases	Peso por clase
Manantiales Calientes (hot springs) (con corredor de 2,5 km)	<15°C	0
	15-30°C	0,2
	30-50°C	0,5
	50-70°C	0,8
	>70°C	1
Fallas Cuaternarias (con un corredor de 1km)	Normal, de desplazamiento	1
	Corrimiento, inversa, desconocida	0,3
Calderas	Más antiguas que cuaternario	0,7
	Cuaternarias	1
Sismos Someros (< 20km de profundidad y con un corredor de 5km)		1
Rasgos Estructurales Favorables (las áreas que se superponen se suman y se normalizan entre 0-1)	Lineamiento	0,2
	Steps-over	0,4
	Intersección	0,7
	Pull-Apart	1
Alteraciones (argílica avanzada y fílica)	Más antigua que Mioceno	0,01
	Mioceno	0,1
	Plioceno/Cuaternario	0,3
	Cuaternario	0,8
	<1Ma	1

Tabla 4. Pesos para cada clase por mapa de evidencia del subsistema Permeabilidad

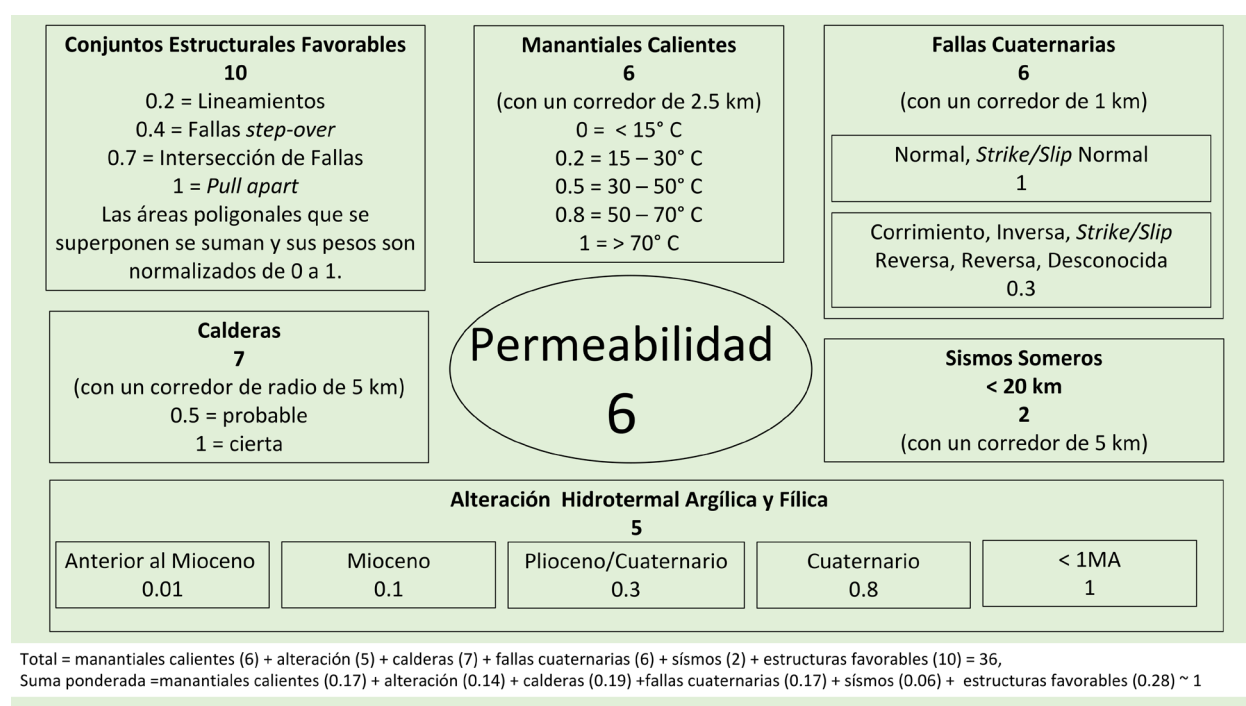


Figura 4. Esquema de pesos para cada clase y mapa de evidencia del subsistema Permeabilidad

Calor		
Mapa de Evidencia	Clases	Peso por clase
Volcanismo = Edad x Roca		
Volcanismo (por edades)	Mioceno	0
	Plioceno/Cuaternario	0,5
	Cuaternario	0,8
	<1Ma	1
Volcanismo (por tipo de roca)	Máfica	0,3
	Intermediarias	0,9
	Félsicas	1
Manantiales Calientes (hot springs) y Geotermometría (se obtiene el máximo de ambos valores)		
Manantial Caliente (hot spring)	<15°C	0
	15-30°C	0,2
	30-50°C	0,5
	50-70°C	0,8
	>70°C	1
Geotermometría	<75°C	0
	75-120°C	0,2
	120-150°C	0,8
	>=150°C	1
Alteraciones (argílica avanzada y filíca)	Más antigua que Mioceno	0,01
	Mioceno	0,1
	Plioceno/Cuaternario	0,3
	Cuaternario	0,8
	<1Ma	1

Tabla 5. Pesos para cada clase por mapa de evidencia del subsistema Calor

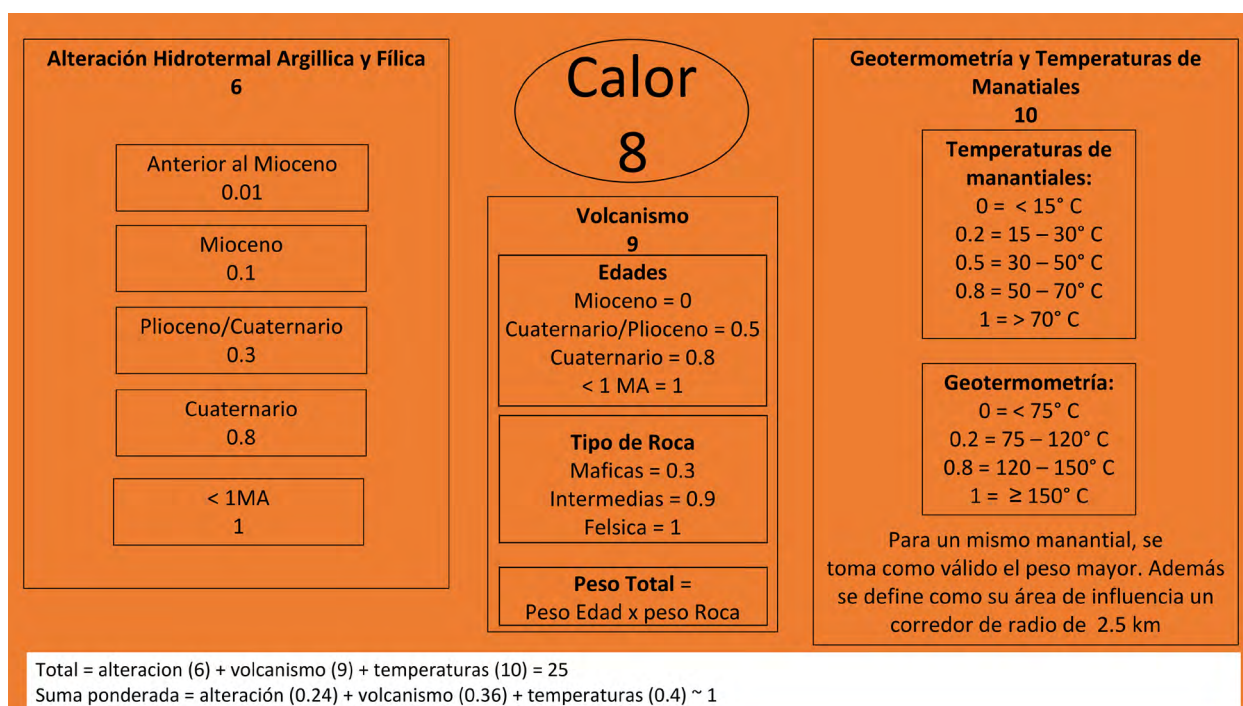


Figura 5. Esquema de pesos para cada clase y mapa de evidencia del subsistema Calor

Modelo de Subsistema	Peso	Peso Normalizado
Permeabilidad	6	0,35
Fluidos	3	0,18
Calor	8	0,47

Tabla 6. Pesos por modelo de subsistema

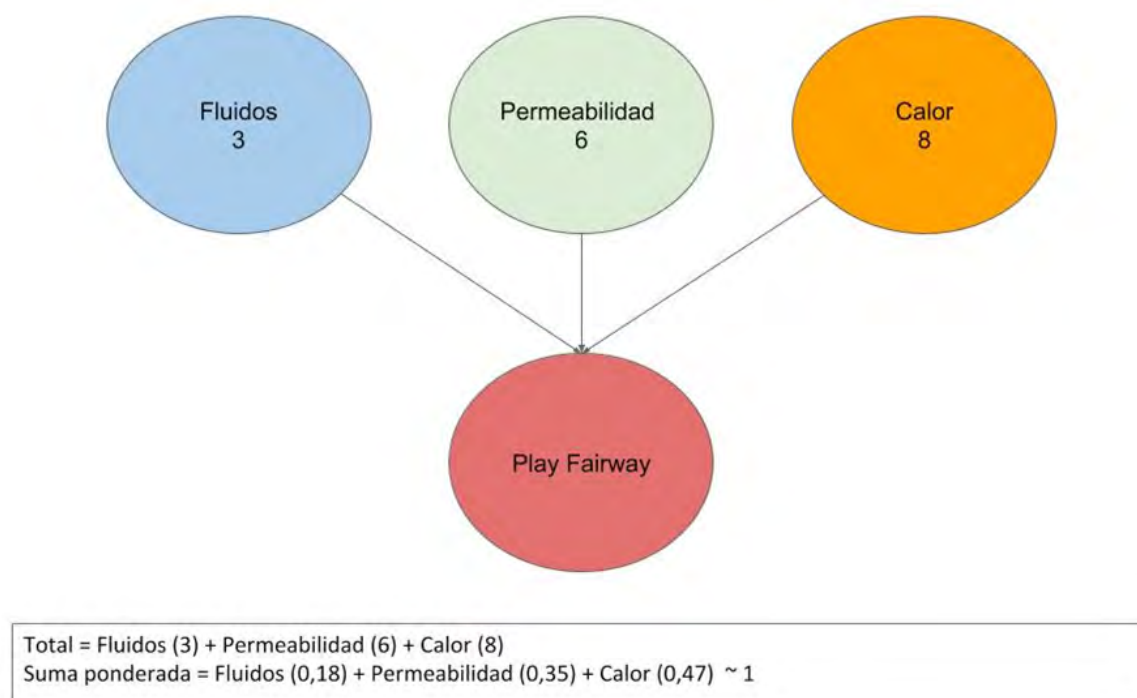


Figura 6. Esquema de pesos por subsistema para calcular el Play Fairway

el Área 1. Los fluidos en un sistema geotermal, en este caso el agua, actúan como medios de transporte de la energía calórica del sistema desde las profundidades hacia la superficie. En contraposición, la ausencia de fluidos conlleva a sistemas geotermales secos en los cuales, para capturar la energía de las fuentes de calor profundo, es necesario ejecutar altas inversiones para la inyección de agua proveniente de acuíferos cercanos.

Debido a la escasa información hidrológica disponible para el área de estudio y para la Puna en general, se recurrió a métodos indirectos para la generación de este subsistema.

Se distinguieron y categorizaron cuatro tipos de evidencias de la circulación de fluidos en un determinado lugar: manantiales calientes (*hot springs*), manantiales fríos (*cool springs*), salares y zonas de alteración

Mediante el uso del *Google Earth* se identificaron 29.935 “manantiales fríos” permitiendo apreciar de manera indirecta la magnitud del potencial de

aporte de aguas meteóricas al sistema geotermal. Estos manantiales se pueden considerar cursos naturales de agua en la superficie con un tamaño o flujo lo suficientemente grande como para ser detectadas en una imagen de *Google Earth*. Se debe tener en cuenta que su presencia depende de la resolución de la imagen y del periodo de tiempo en que esta imagen fue adquirida. El calificativo “frío” se debe a la imposibilidad de medir la temperatura del agua con el método de mapeo utilizado con lo cual se consideró, por defecto, a todos estos manantiales. No hubo disponibilidad de reportes de balances hídricos, con una interpretación hidrogeológica asociada, como para modelizar el esquema de cargas y recargas a los sitios donde estos manantiales podrían asociarse a sistemas geotermales.

Los salares representan los depocentros de las cuencas endorreicas de la Puna. En ellos la tasa de evapotranspiración se reduce a 0, a escasos metros por debajo de la superficie. Esto permite la existencia de un nivel freático somero, por debajo del

cual existe agua disponible en forma permanente. Estas condiciones están presentes tanto en el núcleo salino como en las planicies fangosas con eflorescencias salinas que lo rodean. Los cambios de pendiente que se registran entre los abanicos aluviales que alimentan a los salares y las planicies fangosas son evidentes en las imágenes satelitales, y fueron usados como límites de las áreas con niveles freáticos someros asociadas a cada salar. Las áreas delimitadas para cada salar fueron consideradas entonces como regiones con disponibilidad de agua cercana a la superficie, pero mayormente no afloran. Los lugares en los que el agua aflora, dentro de los salares, fueron incluidos dentro de los manantiales fríos.

Los manantiales calientes (*hot springs*) prueban la disponibilidad de fluidos y a la vez la existencia de sistemas geotermales activos. Su presencia en el campo da indicios de una posible anomalía de calor y/o de condiciones favorables de conexión estructural entre un reservorio geotermal y la superficie. Sus datos de caudales y las composiciones químicas permiten deducir las características del reservorio en profundidad, así como su origen y evolución.

Se consideró manantial caliente a aquél cuyas aguas tienen temperaturas superiores a la temperatura promedio de la Puna (15 °C). Aun en los casos de temperaturas levemente superiores al promedio, se estima que las aguas entraron en contacto con fuentes de calor. Si bien en algunos casos la baja temperatura superficial puede deberse a la presencia de sistemas geotérmicos de baja o muy baja entalpía, en otros puede tratarse de porciones distales de sistemas de alta entalpía en los cuales las aguas se enfriaron luego de recorrer un largo trayecto desde el reservorio. No se cuenta con un censo de los manantiales con temperaturas mayores a los 15 °C presentes en el Área 1, por lo que sólo se incluyeron aquellos disponibles en la bibliografía.

Las alteraciones hidrotermales son evidencia de circulación actual o pasada de fluidos calientes. Su detección se materializó mediante el empleo de imágenes satelitales *ASTER* en sus distintas bandas espectrales debido a los diferentes valores de reflectancia. Para una visión cronológica de la actividad hidrotermal reflejada en las alteraciones se realizó una categorización relativa sobre la base de la edad de las rocas afectadas. De esta manera se otorgó un puntaje de 0,01 para las alteraciones anteriores al Mioceno; 0,1 para las alteraciones miocenas; 0,3 para las pliocenas; 0,8 para las cuaternarias mayores a 1 Ma y 1 para las menores a 1 Ma. La edad de las alteraciones fue determinada de manera relativa

según la edad de la roca alterada y de los eventos volcánicos asociados.

En la ponderación final del subsistema de fluidos se consideró un valor de 1 para los salares, 2 para los manantiales fríos (*cool springs*) y alteraciones hidrotermales y 10 para los manantiales calientes (*hot springs*). Las áreas consideradas son iguales a las de las áreas cubiertas para los salares y alteraciones.

El puntaje final para un punto determinado del Área 1, es el resultado de la sumatoria de los puntajes de cada una de las evidencias para ese punto, dividida por el puntaje máximo posible (15). De esta forma se obtuvo el mapa de la figura 7 en el que la disponibilidad estimada de fluidos está representada en una escala cromática de 0 a 1.

4.2 MODELO DEL SUBSISTEMA PERMEABILIDAD

Teniendo en cuenta las características de los sistemas geotermales en donde las fuentes de calor (ubicadas a niveles relativamente profundos de la corteza) se conectan con la superficie principalmente a través de estructuras que cortan en distintos ángulos a los estratos rocosos, el término permeabilidad en el GPF se refiere exclusivamente a permeabilidad secundaria. La permeabilidad primaria de cada capa de roca no fue considerada ya que su influencia tiende a tener un sentido horizontal y ser mayor en las cercanías de la superficie, siendo así ineficaz para el transporte de fluidos calientes desde las profundidades. Debido a la naturaleza metodológica del *Geothermal Play Fairway* se estimó la permeabilidad secundaria del Área 1 a partir de la existencia de rasgos estructurales favorables, calderas, fallas cuaternarias y sismos someros.

Por otro lado, se consideró como evidencia directa de permeabilidad, la presencia de manantiales calientes (*hot springs*) y zonas de alteración.

Se consideraron con diferentes puntajes de favorabilidad los siguientes rasgos estructurales:

- Lineamientos (puntaje 0,2). Se trata de fajas transversales al rumbo andino definidas por conjuntos discontinuos de centros volcánicos, valles fluviales, manantiales y trazas de fallas con una orientación preferencial NO - SE. Desde el punto de vista conceptual, estos lineamientos no constituyen estructuras en sentido estricto, sino rasgos morfológicos generados como respuesta a un fuerte control estructural, ejercido por fallas profundas con componente de rumbo como cinemática dominante.
- Saltos laterales de fallas o *steps overs* (puntaje 0,4). Sistemas estructurales compuestos por fractura-

Mapa de Índice Subsistema de Fluidos

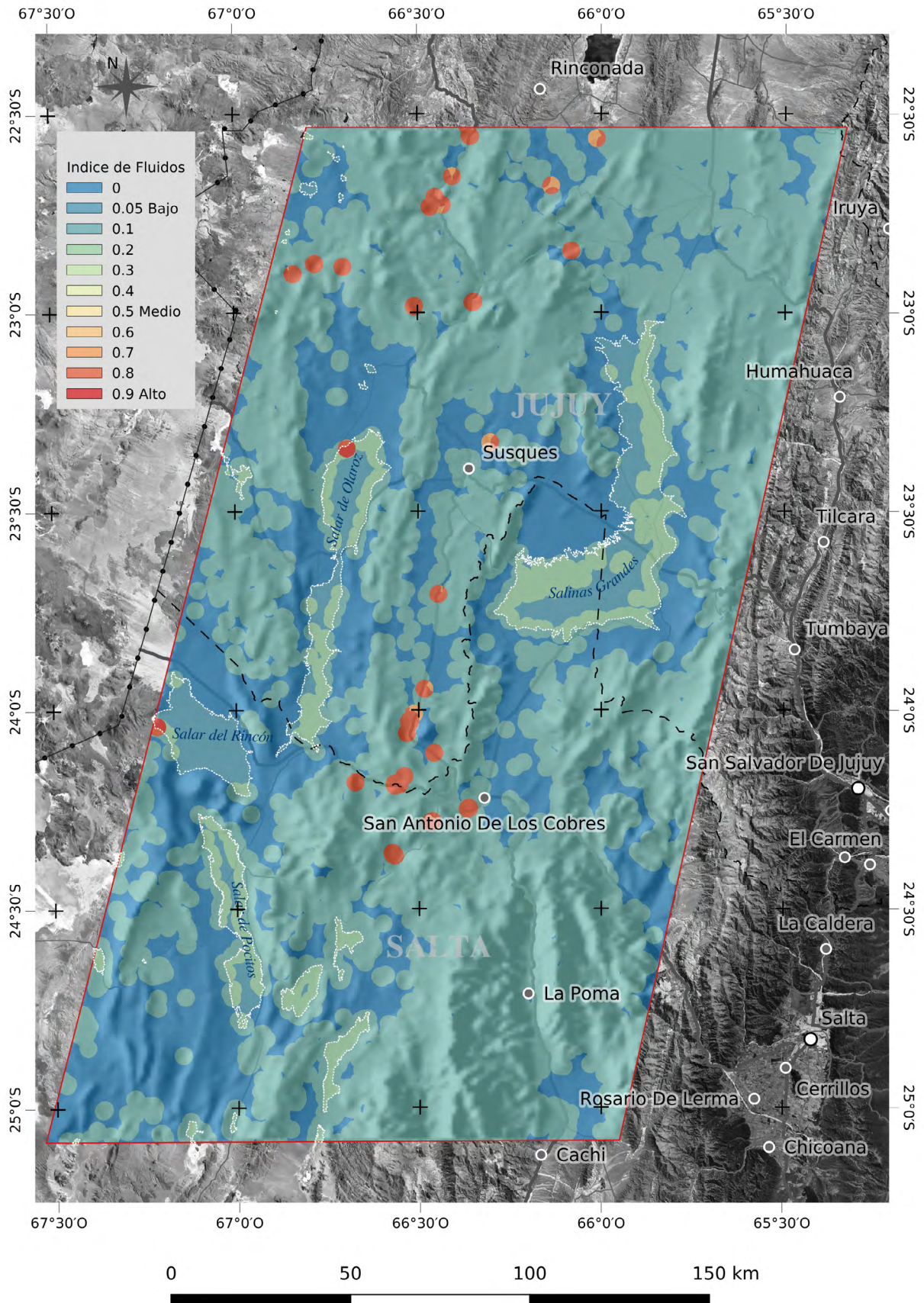


Figura 7. Mapa de resultados del modelo de subsistema Fluidos

ción secundaria en zonas de solapamientos de fallas transcurrentes. Cuando las fallas transcurrentes se desarrollan en trazas discontinuas, los desplazamientos entre tramos individuales producen zonas de relevos mediante saltos laterales (*step overs*). De acuerdo a la relación entre el sentido de desplazamiento y la dirección del salto, las zonas de relevo pueden ser contraccionales o extensionales, y desarrollan en su interior sistemas de fallas secundarias oblicuas inversas o normales respectivamente. El puntaje intermedio otorgado a este conjunto estructural, estuvo en función de que solo en los sistemas de *steps overs* extensionales se presentan condiciones favorables de permeabilidad secundaria.

- Intersecciones de fallas (puntaje 0,7). El estilo estructural andino está dominado por sistemas de corrimientos paralelos con rumbo general N - S. Las intersecciones de fallas de mayor escala se ubican en donde los lineamientos transversales con rumbos NO - SE cortan a los corrimientos y fallas inversas de rumbo meridiano. Otras intersecciones menores se desarrollan en los enjambres de fallas secundarias generadas en el interior de las fajas transcurrentes que componen los lineamientos.
- Cuencas *pull apart* (puntaje 1). A estas zonas se les otorgó el máximo puntaje de favorabilidad debido a que se trata de depresiones estructurales generadas en zonas de relevos (*steps overs*) o curvaturas (*bend*) de fallas transcurrentes, con cinemática netamente extensional.
- Calderas volcánicas son estructuras de colapso generadas por el desalojo repentino de cámaras magmáticas durante una erupción. En el episodio de colapso las calderas generan fallas normales profundas con geometría anular que delimitan el área deprimida. Los bordes estructurales de las calderas pueden estar definidos por fallas simples que alcanzan el nivel de las cámaras magmáticas, o por sistemas de fallas escalonadas que se reparten el desplazamiento normal. También, de acuerdo al modelo estructural de la caldera, se pueden desarrollar diferentes sistemas de fallas extensionales asociadas en su interior, aumentando la permeabilidad secundaria de las rocas involucradas.

El conjunto estructural generado por las fallas de borde como las asociadas en su interior, favorecen la circulación de fluidos desde niveles profundos. En las etapas finales del magmatismo, los fluidos calientes generan alteraciones hidrotermales que tienden a sellar las fracturas, por consiguiente, a disminuir la permeabilidad, de manera que esta es cada vez

menor a medida que los fluidos tienen mayor tiempo de circulación.

De acuerdo a este último concepto, se estima que las calderas más modernas presentan mayor posibilidad de conservar las fracturas abiertas y por lo tanto mayor permeabilidad secundaria. Sobre esta premisa se discriminaron las calderas según su edad asignándoles a las cuaternarias puntaje 1 y a las pre cuaternarias puntaje 0,7.

Las alteraciones hidrotermales como componente del modelo del subsistema permeabilidad, se presentan en zonas donde la roca es o fue lo suficientemente permeable para permitir la circulación de fluidos calientes. Como ya se ha comentado, constituyen un rasgo que puede ser detectado y caracterizado mediante el uso de imágenes satelitales.

Conocer la edad de su génesis es importante ya que se considera que la permeabilidad en aquellas unidades más jóvenes indicaría mayor favorabilidad, dado que, a menor tiempo de circulación de los fluidos, menor sería el sellado de poros en las rocas por la mineralización de alteración.

Las edades de las alteraciones fueron estimadas de manera relativa comparando la edad de la roca afectada y los eventos volcánicos asociados; de esta forma se le asignó 1 a aquellas alteraciones menores a 1 Ma, 0,8 para las cuaternarias, 0,3 a las pliocenas, 0,1 las miocenas y 0,01 para las anteriores al Mioceno.

Los manantiales calientes (*hot springs*) fueron valorados en este ítem, dado que constituyen la expresión superficial de reservorios geotérmicos alojados en profundidad. Su existencia supone la presencia de zonas de alta permeabilidad, asociadas a fracturas abiertas. De acuerdo a este razonamiento se establecieron puntajes basados en la temperatura del agua de los manantiales en superficie para valorar las zonas permeables asociadas a ellos. A estas zonas se les otorgó un radio de influencia (*buffer*) de 2,5 kilómetros desde el lugar de la surgencia. El puntaje otorgado fue de 0,2 para los manantiales de entre 15 y 30 °C; de 0,5 para aquellos de entre 30 y 50 °C; de 0,8 para los que se encuentran entre 50 y 70 °C y de 1 para los que tienen temperaturas mayores a 70 °C.

Respecto a la sismicidad regional, la misma se halla directamente vinculada a los esfuerzos compresivos generados por la subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana. De esta manera existen sismos directamente relacionados con la movilidad de la placa subductada generados a profundidades mayores de 200 km y sismos someros generados dentro de la corteza frágil a profundidades inferiores a los 20 kilómetros.

Estos últimos, si bien son escasos en la región, fueron considerados como potenciales generadores de permeabilidad reciente mediante la creación de nuevas fallas cuaternarias, o la reactivación y/o reapertura de fallas antiguas.

Para cada sismo somero registrado se consideró un área de influencia (*buffer*) de 5 km de diámetro a partir de su epicentro.

Las fallas cuaternarias constituyen evidencias de actividad neotectónica directamente vinculada a la sismicidad de la región. Estas fallas fueron identificadas a partir de la edad relativa de las rocas afectadas tomando como límite inferior al Plioceno superior.

Para su ponderación, a estas fallas se les asignó un área de influencia de 1 km a ambos lados de su traza y se discriminaron entre normales o de rumbo con componente normal, estipulando un puntaje de 1 y fallas inversas, corrimientos o fallas de rumbo con componente inversa, con puntaje 0,3. Las fallas cuaternarias con sentido de desplazamiento desconocido fueron valorizadas de igual manera que las inversas.

En adelante en la figura 8 se ilustra como mapa de resultados del índice del subsistema permeabilidad potencial.

4.3 MODELO DEL SUBSISTEMA CALOR

El magmatismo en la Puna, expresado en el arco volcánico andino actual y el denominado Complejo Volcánico Altiplano Puna (CVAP) extendido en el trasarco, constituye el reflejo de la fusión parcial generada por la subducción de la placa de Nazca.

El CVAP es un sistema volcánico desarrollado mayoritariamente en el Mioceno con la erupción de grandes volúmenes de ignimbritas a partir de las cuales se produjeron calderas de colapso de gran escala entre las cuales se encuentran las de Coranzulí y Aguas Calientes, emplazadas en el área analizada en este trabajo.

La actividad volcánica en la Puna disminuyó a partir del Cuaternario, no obstante, la presencia del extenso cuerpo fundido Altiplano Puna *Magma Body*, interpretado a partir de una capa sísmica de baja velocidad a 20 km de profundidad, supone un elevado gradiente térmico regional. Los valores de flujo de calor calculados recientemente por Ibarra y Prezzi, (2019), y la existencia de fuentes termales y actividad volcánica cuaternaria de pequeña escala, ratifican la existencia de un gradiente térmico anómalo en el sector comprendido por el Área 1.

La inferencia de anomalías calóricas cercanas a las superficies se realizó, en este trabajo, a partir de la información cartográfica y bibliográfica existente. A tal fin se consideraron 3 subtipos de manifestaciones

superficiales que indican magmatismo neógeno: alteraciones hidrotermales, vulcanismo y manantiales calientes.

Las alteraciones hidrotermales constituyen evidencias de circulación de fluidos calientes que invaden cuerpos rocosos. Para el área de estudio se decidió considerar a las alteraciones argílica avanzada y filicas como indicativas de la circulación de fluidos a temperaturas lo suficientemente altas como para inferir que existieron o se hallan en profundidad sistemas geotermales de alta entalpía. Las alteraciones argílicas fueron descartadas por considerarse de baja temperatura y periféricas al sistema hidrotermal. Las alteraciones silíceas, a pesar de ser producto de altas temperaturas, se encuentran escasamente desarrolladas en el Área 1, por tal razón no fueron tenidas en cuenta. La ponderación de las áreas de alteración identificadas se realizó teniendo en cuenta las edades de estas. Las edades más jóvenes recibieron valores más altos de acuerdo a lo mostrado en la figura 5. Esto se justifica en el razonamiento de que mientras más joven sea una alteración, mayores posibilidades habrá de que albergue un sistema geotermal activo por debajo de ella. La edad de las alteraciones fue determinada de manera relativa según la edad de la roca alterada y de los eventos volcánicos asociados.

Los centros de emisión volcánica constituyen obvias evidencias de fuentes magmáticas en profundidad a partir de las cuales se alimentan. Dependiendo de la edad del vulcanismo, las fuentes de alimentación magmáticas pueden conservar calor, hallarse en proceso de enfriamiento (calor residual) o estar completamente frías. Por lo que, el factor tiempo fue determinante en la ponderación de potenciales anomalías de calor. Para ello se utilizaron las dataciones radimétricas disponibles en la bibliografía, otorgándole a las rocas volcánicas pliocenas o más jóvenes, mayor puntaje que a las anteriores a esa edad.

Otro factor considerado para la ponderación del vulcanismo como fuente de calor, fue su composición, partiendo de fijar como idea general, que las rocas máficas provienen directamente del manto o de la base de la corteza, mientras que las rocas félsicas y de composición intermedia provienen de cámaras magmáticas alojadas en la corteza superior. Con esta idea se ponderó con mayor puntaje a los centros volcánicos de composición intermedia, ya que implican la existencia de fuentes de calor más cercanas a la superficie. Teniendo en cuenta estos dos factores, edad y composición, el peso total del vulcanismo en cada caso, se obtuvo a partir de la multiplicación de ambos puntajes.

Mapa de Índice del Subsistema Permeabilidad Potencial

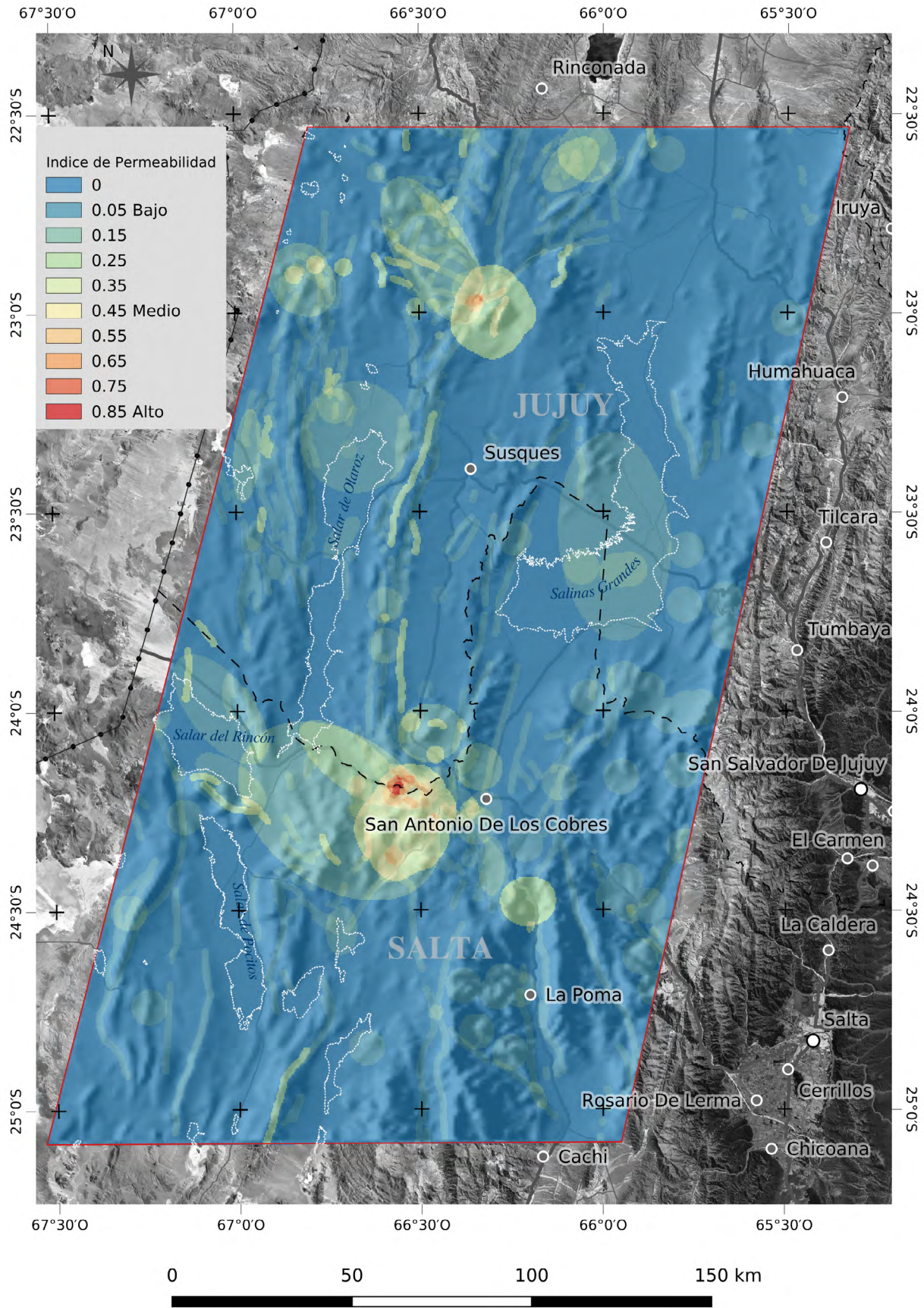


Figura 8. Mapa de resultados del subsistema permeabilidad.

Por otra parte, las temperaturas de las manifestaciones termales (*hot springs*) medidas en forma directa sobre la superficie y las calculadas mediante geotermometría fueron consideradas con la máxima ponderación para este subsistema. Al no contar con perforaciones (medición directa en profundidad),

la geotermometría es la mejor forma de obtener un valor de temperatura posible del reservorio o de los fluidos de circulación profunda.

Los resultados de esta evaluación se presentan en un mapa de resultados (figura 9) del índice del subsistema calor.

Mapa Índice del Subsistema Calor

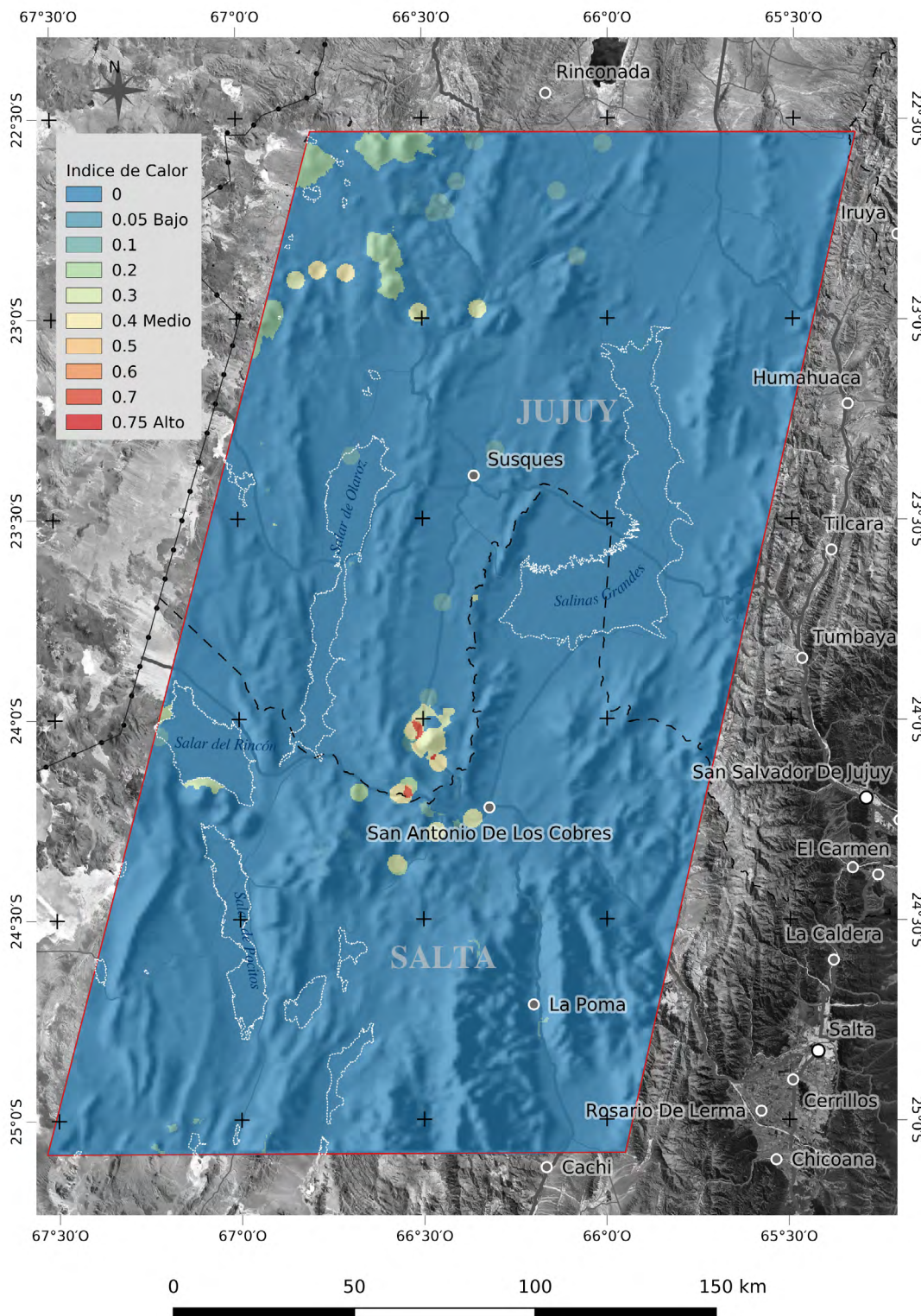


Figura 9. Modelo de Calor. Se aprecia una zonación del subsistema calor.

4.4 MODELO DE RESULTADOS DE POTENCIAL GEOTÉRMICO. MAPA DE FAVORABILIDAD GEOTÉRMICA

A partir de la integración de los factores permeabilidad, calor y fluidos en el mapa de favorabilidad geotérmica (Figura 10) se destaca que, en términos generales, los sistemas geotermales con mayor potencial dentro del Área 1, se ubican a lo largo de los lineamientos COT y Coyaguayma.

Ambos lineamientos desarrollan fajas de cizallas transcurrentes de 20 a 40 km que interceptan el rumbo estructural andino, en cuyo interior se emplazan la mayoría de las fuentes termales registradas.

En estas fajas, interactúan fallas cuaternarias, sistemas estructurales antiguos intensamente fracturados y calderas de colapsos miocenas con extensas zonas de alteración, creando las condiciones de permeabilidad favorables para la circulación y el entrapamiento de fluidos hidrotermales.

Por otra parte, las estimaciones de flujo térmico obtenidos por Ibarra y Prezzi (2019) ya mencionadas, indican la existencia de una anomalía de calor particularmente elevada dentro del Área 1

Sobresalen cuatro zonas preferenciales con elevado potencial geotérmico, de las cuales, al menos tres, se hallan dentro de los lineamientos, hecho que denota a priori un fuerte control estructural.

Zona A

Se ubica sobre el COT (faja transcurrente-transversiva Calama - Olacapato - Toro) abarcando el área donde se emplaza la caldera Aguas Calientes y sus alrededores.

La caldera Aguas Calientes, concentra las termas de Incachule y Aguas Calientes en su interior. Es particularmente llamativa la coincidencia de estas fuentes termales con una extensa zona de alteración argílica avanzada y filica generada durante las etapas póstumas del volcanismo Mioceno.

En el borde norte de la caldera, las termas de Tocomar emanan sobre potentes depósitos de travertinos antiguos que sugieren la historia de un sistema hidrotermal relativamente moderno.

Los registros sísmicos a 5 km de profundidad aproximada y la presencia de fallas cuaternarias en esta zona, indican la existencia de actividad neotectónica como probable impulsora de la reapertura de fracturas por donde circulan los fluidos termales actuales.

De acuerdo a su orientación en relación con el campo de esfuerzo regional, las fallas secundarias se comportan dentro del lineamiento, como vías

de circulación o barreras de fluidos. Las manifestaciones termales de Pompeya y Antuco, alojadas fuera de la caldera Aguas Calientes, se disponen en la intersección de fallas transcurrentes favorables a la circulación de fluidos, con corrimientos N-S que los sellan. Las zonas de falla de estos corrimientos, constituyen barreras que actúan como diques de las aguas termales en el bloque inferior, por donde emergen siguiendo las zonas de daño estructural.

El volcanismo cuaternario, representado en la zona por las piroclastitas dacíticas de Tocomar (0,5 Ma) y las lavas máficas de los volcanes Negro de Chorrillos (0,2 Ma), San Gerónimo (0,7 Ma), sugiere la existencia de cámaras magmáticas aun calientes, estacionadas en la corteza media y/o superior. Si bien, en la mayoría de los casos el ascenso de magmas máficos se produce en forma directa desde el manto superior hasta la superficie, el potente espesor de la corteza en la Puna, de aproximadamente 70 km, resulta un factor que promueve el estacionamiento de estos magmas en niveles intermedios o superiores.

En ese sentido, el volcanismo ácido de Tocomar, coetáneo y muy próximo al volcán San Gerónimo, constituye una evidencia de fusión en niveles intermedios de la corteza. Sobre la base de estas consideraciones, se infiere entonces para este sector, un gradiente térmico elevado por cámaras magmáticas someras.

A las características estructurales y volcanológicas referidas, se suma la presencia de potenciales rocas reservorios integradas por granitoides ordovícicos con elevada permeabilidad.

Esta combinación de factores concede a la zona A, el potencial geotérmico más promisorio de la región.

Zona B

Corresponde al sector oriental del lineamiento Coyaguayma. El mismo presenta características estructurales similares a las del COT. La caldera del Coranzulí, ubicada en el extremo oriental del lineamiento, se emplaza en la concurrencia de fallas transcurrentes con rumbos N - S, NE - SO y NO - SE (Seggiaro y Hongn 1994).

Los movimientos relativos de estas fallas focalizan un campo extensional que habría favorecido la erupción piroclástica y el colapso de la caldera Coranzulí en el Mioceno (Seggiaro *et al.* 2019b).

En el sector central de la caldera se dispone una extensa zona de alteración hidrotermal desarrollada durante la etapa póstuma del volcanismo. Al igual que en la caldera Aguas Calientes, las fuentes termales emanan en el interior de estas zonas de alteración, rasgo que podría obedecer a la persistencia

de calor residual de la cámara magmática antigua y a la reapertura de viejas vías por movimientos neotectónicos.

Próximo a la caldera Coranzulí y sobre la zona de falla que limita el borde sur del lineamiento Coyaguayma, se destaca una reducida área con potencial geotérmico, ampliando las expectativas del sector (Figura 10).

El control estructural para la circulación de aguas desde niveles profundos entrampadas en las depresiones de la caldera, configura un contexto favorable para el desarrollo de un reservorio geotérmico en su interior.

Zona C

Esta zona se halla próxima al límite sur occidental de lineamiento Coyaguayma. Desde el punto de vista estructural, el sector se ubica en el cruce de una falla transcurrente de rumbo paralelo al lineamiento NO - SE, con un cabalgamiento de rumbo N - S que desplaza rocas ordovícicas sobre volcánicas miocenas. Un derrame fisural de lavas andesíticas miocenas emitido desde la falla transcurrente, revela su condición de falla profunda con componente extensional desde ese periodo.

Es justamente en el cruce de estas fallas por donde surgen las aguas termales de Rosario de Coyaguayma y se emplaza el complejo volcánico Pairique.

Este complejo volcánico está constituido por depósitos piroclásticos, lavas y domos miocenos que definen una estructura anular deprimida, cuyo origen como colapso de caldera o de un sistema volcánico erosionado, es motivo de discusión (Seggiaro *et al.* 1995, Caffè *et al.* 2007). Como ocurre en Aguas Calientes y en Coranzulí, en el interior de la depresión del Pairique, las surgencias termales coinciden con un área de alteración relacionada a la actividad hidrotermal póstuma del volcanismo mioceno.

Zona D

Esta zona se circunscribe al área de influencia del volcán Tuzgle. Es el único sector del Área 1 que presenta un potencial geotérmico por fuera de los lineamientos transversales.

El estilo estructural dominante fuera de los lineamientos es el más representativo de la tectónica andina a nivel regional. Las estructuras que lo componen, mayoritariamente fallas inversas y cabalgamientos de bajo ángulo, generan un potencial de permeabilidad secundaria notablemente inferior al de las zonas geotermales anteriormente descritas.

Esta condición estructural, constituye una posible causa de la escasa presencia de centros volcánicos y

manifestaciones termales fuera de los lineamientos transversales, entre los cuales, el volcán Tuzgle y las fuentes termales asociadas constituyen casi una excepción.

El volcán Tuzgle, cercano al límite norte del COT, no presenta evidencias que indiquen que haya existido un control estructural para su emplazamiento. Está integrado por un conjunto de unidades volcánicas que evolucionaron en el tiempo desde términos ácidos integrados por ignimbritas riódacíticas, domos y lavas dacíticas, hasta básicos con lavas andesíticas y basálticas.

Algunos modelos elaborados a partir de información geofísica (Aguater 1980 y Coira 2008) sugieren que, durante la etapa inicial del volcanismo, la emisión de ignimbritas a los 2 Ma habría generado una caldera de pequeña escala, posteriormente sepultada por emplazamientos de domos y emisiones de lavas.

Las sucesivas emisiones de lavas hasta las más recientes, indican un proceso de diferenciación magmática dentro de una cámara aún caliente.

Las dos manifestaciones termales asociadas al Tuzgle, Mina Bety y Aguas Calientes, se disponen al sudeste y al noroeste del volcán respectivamente, posiblemente en las proximidades de los supuestos bordes de la caldera críptica.

Una factible explicación que justifica el ascenso de magma y la circulación de fluidos termales sin un control estructural directo, podría encontrarse en la litología del basamento donde se emplaza el Tuzgle, integrada por granitoides ordovícicos intensamente fracturados y con alta permeabilidad secundaria.

5. CONCLUSIONES

El *Geothermal Play Fairway* tiene como ventaja sobre los métodos tradicionales de estudio para diseñar programas de exploración geotérmica, en que permite ordenar la información mediante un procedimiento analítico basado en la ponderación de los datos disponibles y del conocimiento geológico de una región. Y obtener así, un producto que focaliza la exploración en determinadas zonas, disminuyendo el riesgo.

Combina la geoestadística, con una valuación, calificación o ponderación de los datos que luego se cargan en una plataforma *GIS* para generar como producto mapas con una zonificación de la favorabilidad geotérmica. El resultado es provisorio y preliminar permitiendo adicionar información para la modelización de los subsistemas a fin de reevaluar la potencialidad de las áreas seleccionadas.

Mapa de Potencial Geotérmico Análisis con el Método Play Fairway

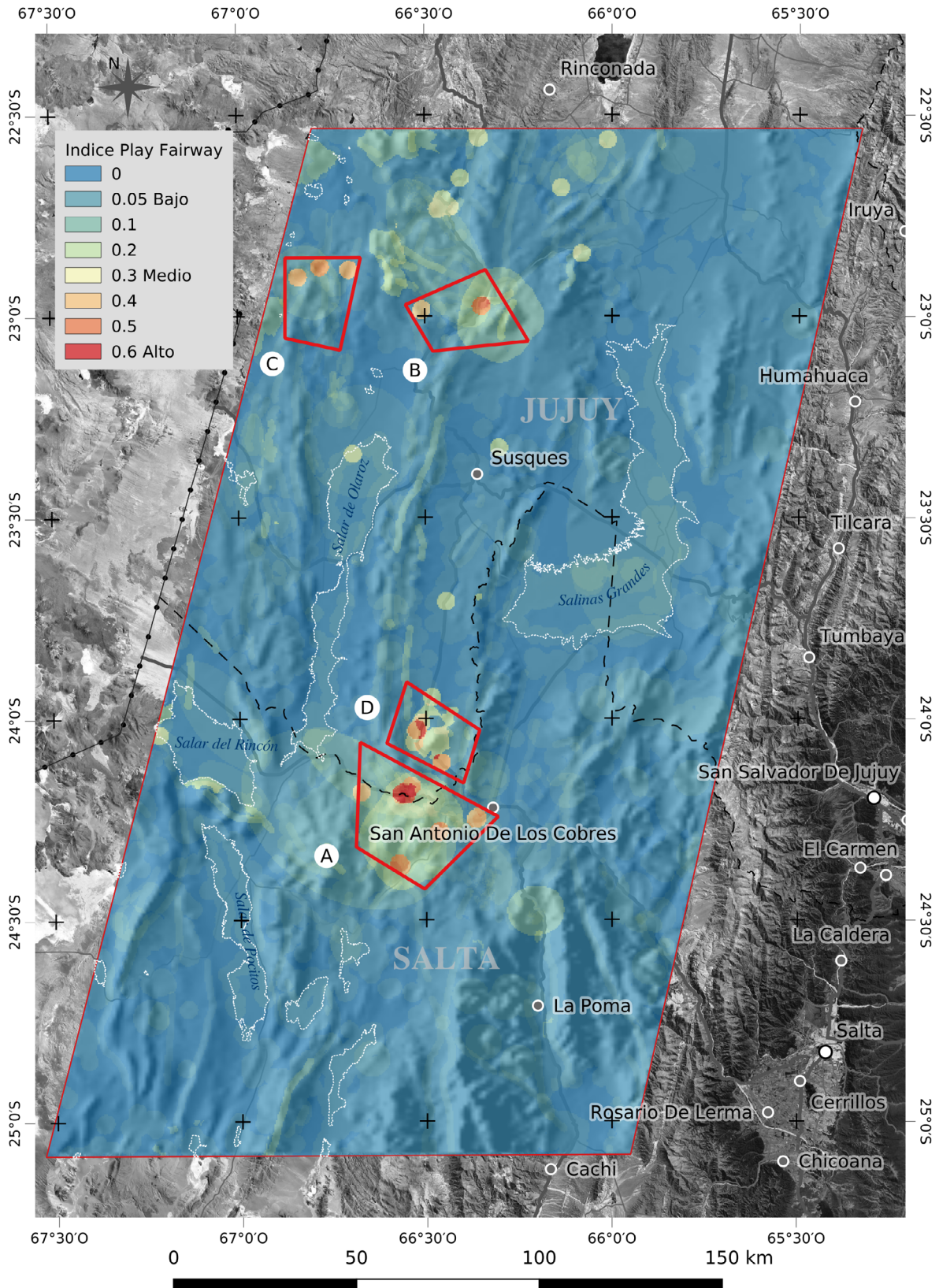


Figura 10. Mapa de favorabilidad geotérmica del Área 1, Puna Norte.

Este método discrimina zonas favorables para la existencia de campos geotermales de aquellas zonas donde *a priori* no deberían ser consideradas en los planes de exploración.

Los registros geológicos comprobados en terreno dentro del Área 1 son relativamente escasos, no obstante, a partir de la integración de los factores fluido, permeabilidad y calor en el mapa de potencialidad geotérmica se han diferenciado zonas con potencial.

El método probó ser efectivo al resaltar fuertemente cuatro distritos con recursos geotermales previamente conocidos como Incachule, Tocomar, Pompeya y Antuco (Zona A); Caldera de Coranzulí (Zona B) y volcán Tuzgle (Zona D). Otras potenciales áreas, con escasos antecedentes de registros geotérmicos, entre las que se destacan las de Rosario de Coyaguaima y Pairique (Zona C), el margen occidental del Salar de Rincón, norte del Salar de Olaroz, cercanías de la localidad de Susques y las proximidades de Mina Pirquitas, fueron resaltadas mediante la aplicación de este método (Figura 10), ampliando las posibilidades de futuras exploraciones.

En términos generales, los sistemas geotermales con mayor potencial se ubicaron a lo largo de los lineamientos transversales COT y Coyaguayma, en cuyo interior se emplazan la mayoría de las fuentes termales registradas.

En estos lineamientos, interactúan fallas cuaternarias, sistemas estructurales antiguos intensamente fracturados y calderas de colapsos miocenas con extensas zonas de alteración, creando condiciones de permeabilidad, suficientes y favorables, para la circulación y el entrapamiento de fluidos hidrotermales.

Fuera de los lineamientos, las estructuras dominantes están compuestas por pliegues y cabalgamientos de bajo ángulo por lo que su potencial geotérmico resultó notablemente inferior al de las fajas de cizallas transversales. Esta condición es-

tructural, constituye un factor preponderante que condiciona la escasa presencia de centros volcánicos y manifestaciones termales fuera de los lineamientos COT y Coyaguayma, entre los cuales se destaca de manera excepcional el campo geotérmico del volcán Tuzgle (Zona D).

Estos resultados preliminares para orientar la exploración deben ser considerados advirtiendo que, para casos de sistemas geotermales ciegos (*blind geothermal systems*), donde las evidencias directas de manifestaciones termales son exiguas o nulas, será necesario intensificar la información de campo para alcanzar una valoración de los subsistemas que permita obtener modelos confiables.

AGRADECIMIENTOS

Esta contribución técnica no hubiese alcanzado el nivel de calidad y desarrollo necesarios sin los valiosos aportes de conocimiento de los profesionales colegas del Servicio Geológico Minero Argentino, especialmente de la Lic. Dolores Alvarez, el Dr. Javier Peroni, la Lic. Manuela Elissondo, la Lic. Johanna Kaufman, la Lic. Adriana Balbi y el Dr. Luis Ferpozzi. Así mismo la colaboración inestimable de los profesionales del Sistema de Información Geológico y Ambiental Minero en las personas de los Lics. Gabriel Candaosa y Federico Ferpozzi. Es de mencionar el aporte brindado por la Lic. Verónica Castano de la Delegación Mendoza del SEGEMAR.

Cabe destacar también la colaboración de la Dra. Yésica Peralta Arnold del Instituto de Geología y Minería de la Universidad Nacional de Jujuy y de la Dra. Agostina Chiodi de la Universidad Nacional de Salta.

ANEXO: PROCESAMIENTO DE DATOS Y GENERACIÓN DE MAPAS DE EVIDENCIA

1. ALTERACIONES ASTER

Autores de información: Diego Azcurra, Federico Carballo y Silvia Castro Godoy del SEGEMAR y Cary Lindsey del *Great Basin Center of Geothermal Energy (GBCGE)*.

Formato: *ESRI Shapefile*, geometría polígono y *GTiff*, resolución espacial 30 x 30 m.

Fuente de datos: Imágenes *ASTER* imágenes del *Earth Explorer-USGS*.

1.1 DETECCIÓN DE ALTERACIONES

Se procesaron imágenes *ASTER* L1T ortorrectificadas con corrección del efecto *crossstalk* presente en las bandas *SWIR* del sensor *ASTER*. Las imágenes

así obtenidas fueron convertidas a reflectancia con el módulo *FLASSH* del programa de procesamiento de imágenes *ENVI*.

La identificación de las zonas con alteraciones hidrotermales se realizó a través de la aplicación de procedimientos algebraicos y relaciones lógicas entre bandas y el establecimiento de umbrales (Mars y Rowan 2006, Mars 2013), utilizando para ello el *Band Math Tool* del programa *ENVI*.

Las alteraciones detectadas son del tipo argílica y filica. Subsecuentemente se generaron mosaicos para cada tipo de alteración. Ver figura 11.

1.2 ASIGNACIÓN DE EDADES A LAS ALTERACIONES

Se realizó cruzando la información de Rocas de Origen Volcánico con los mosaicos de alteraciones obtenidos. De esta manera se reclasificaron los datos en función de su edad.

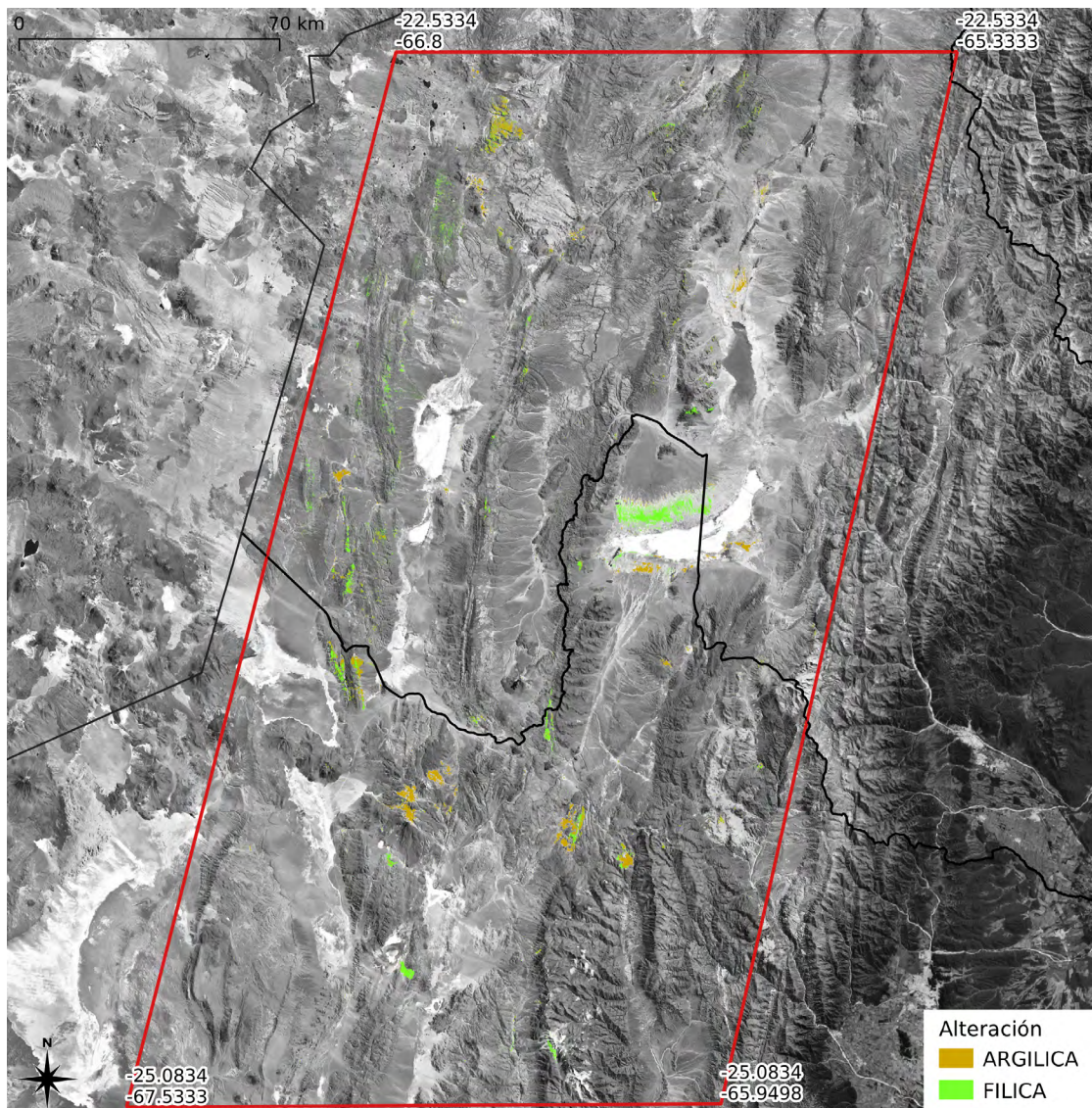


Figura 11 - Esquema del Mapa de evidencia de alteraciones ASTER

2. CALDERAS

Autor de información: Raul Seggiaro, Delegación Salta del SEGEMAR

Fuente: Interpretación realizada con relevamientos de campo y usando imágenes satelitales.

Formato: *ESRI Shapefile*, geometría polígono.

En cuanto a los atributos se describen en la tabla 7.

Item	Descripción
Nombre	Nombre de la caldera
Ma	Millones de años. Edad.

Tabla 7. Descripción de la tabla de atributos

2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESAMIENTO:

1. Extracción de las calderas de los mapas geológicos digitales por selección y copiado en una nueva capa de información,

2. Incorporación de los atributos “Nombre” y “Ma”.

Se ilustra en la figura 12 las evidencias correspondientes al componente Calderas.

3. FALLAS CUATERNARIAS

Autores de información: Raúl Seggiaro de la Delegación Salta del SEGEMAR y el Catálogo de Fallas Cuaternarias (Casa *et al.* 2011)

Formato: *ESRI Shapefile*, geometría línea.

Las trazas de fallas fueron obtenidas de las hojas geológicas 1:250.000 denominadas 2569-II Socompa (Zappettini y Blasco 2001), 2569-IV, Antofalla (Seggiaro *et al.* 2007), 2366-I I / 2166-III Mina Pirquitas (Coira *et al.* 2004), 2366-III Susques (Seggiaro *et al.* 2015), 2566-I San Antonio de los Cobres (Blasco *et al.* 1996), 2566-III Cachi (Hongn *et al.* 2001), 2366-II/2166-IV La Quiaca (Rubiolo *et al.* 1997), 2366-IV Ciudad del Libertador General San Martín

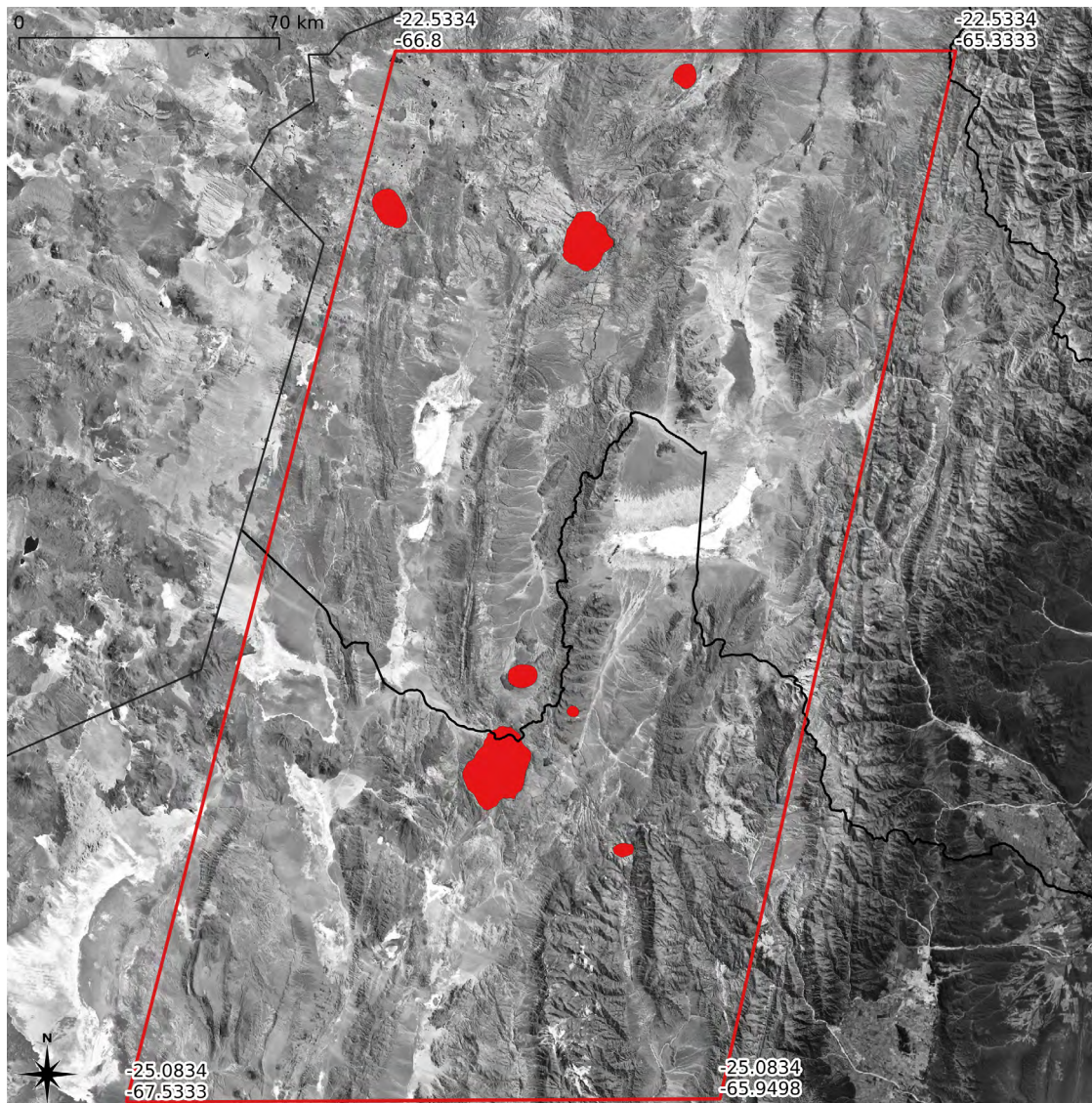


Figura 12 - Esquema del Mapa de Evidencia de Calderas

(González *et al.* 2003), 2566-II Salta (Seggiaro *et al.* 2019a) y 2566-IV Metán (Salfity *et al.* 2006). Y observaciones del Área 1 mediante imágenes *Google Earth*. Se sumó a esta información los datos del Catálogo de Fallas Cuaternarias (Casa *et al.* 2011)

En lo que respecta al procesamiento de los datos, la ubicación de las fallas interpretadas fue originalmente digitalizada utilizando el *software Google Earth*. Este programa genera archivos vectoriales en formatos *KML* y *KMZ* utilizando coordenadas geográficas. Para su efectiva utilización en el *Geothermal Play Fairway Analysis* fue necesario realizar un cambio de formato y transformación a coordenadas planas, para adecuar su estudio por medio de algoritmos matemáticos. Después se verificó la consistencia de la información en la tabla de atributos y la consecuente desagregación de los datos en distintos ítems que permitieron el análisis de la información.

3.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESAMIENTO:

1. Conversión de datos *KMZ* a *SHP*
 - a. Lectura de datos *KMZ*
 - a.1. Selección de los *Line String Objects*
 - a.2. Chequeo de la tabla de atributos original para detectar incompatibilidades entre objetos *KMZ*.
 - b. Combinar los objetos *KMZ* en un layer *GIS*.
 - c. Mantener sólo los ítems *Name* y *Descriptions*. Los otros se eliminan.
 - d. Transformación de los datos de EPSG: 4326 a EPSG: 22183 (POSGAR 94 faja3)
 - e. Limpieza de geometrías repetidas. Se recuperaron 334 de 1357
2. Cálculo de azimut y longitud (m) de las fallas con el siguiente algoritmo:

$$\text{Rumbo} = \text{Degree} (\text{azimuth} - \text{StartPoint} (\text{geometry}) - \text{EndPoint} (\text{geometry}))$$

$$\text{Longitud} = \text{Length} (\text{geometry})$$

3. Cálculo de la orientación de las fallas en términos de referencias cardinales (N, S, E, O, NE, SE, SO y NO) con el siguiente algoritmo:

CASE

When (0 <= azimuth <= 22.5) ó (157.5 <= azimuth <= 202.5) ó (337.5 <= azimuth <= 360) then 'N-S'.

When (22.5 <= azimuth <= 67.5) ó (202.5 <= azimuth <= 247.5) then 'NE-SO'.

When (67.5 <= azimuth <= 112.5) ó

(247.5 <= azimuth <= 292.5) then 'E-O'.
When (112.5 <= azimuth <= 157.5) ó
(292.5 <= azimuth <= 337.5) then 'NO-SE'
END

4. Transcripción y desagregado del ítem *KMZ*, descripción a tipo de falla, edad, inclinación.
5. Incorporación de la referencia. Ref = 'SEGGIARO'.
6. Incorporación de datos del Catálogo de Fallas Cuaternarias (Casa *et al.* 2011).
 - a. Incorporación de los *Line String Objects* del Catálogo.
 - b. Incorporación de la referencia. Ref = 'CASA-CEGARRA'.
 - c. Transcripción de los pdf accesibles en internet de los datos EDAD, TIPO, INCLINACIÓN, RUMBO del BUZAMIENTO.

El registro de fallas cuaternarias se muestra en la figura 13.

4. RASGOS ESTRUCTURALES FAVORABLES

Autores de información: Raúl Seggiaro de la Delegación Salta del SEGEMAR, James Faulds, Mark Coolbaugh del *GBCGE* del *Bureau of Mines and Geology* del Estado de Nevada, EE.UU y Alejandro Conde Serra del SEGEMAR.

Fuente: Interpretación utilizando imágenes satelitales, digitalización directa en pantalla.

Formato: *ESRI Shapefile*, geometría polígono.

En cuanto a los campos que conforman los atributos se expresan en la tabla 8.

Se corrigieron y normalizaron los valores correspondientes al ítem *SETTINGS*.

Los rasgos estructurales favorables para la construcción del subsistema su delimitación se ilustra en la figura 14.

5. SALARES

Autor de información: Nicolás Larcher de la Delegación Jujuy del SEGEMAR.

Fuente: Los salares fueron directamente mapeados utilizando imágenes de la plataforma *Google Earth*. La interpretación se realizó marcando la línea de quiebre de pendiente entre los abanicos aluviales y la planicie del salar.

Formato: *ESRI Shapefile*, geometría polígono.

Se representa en la figura 15 la identificación del componente salares

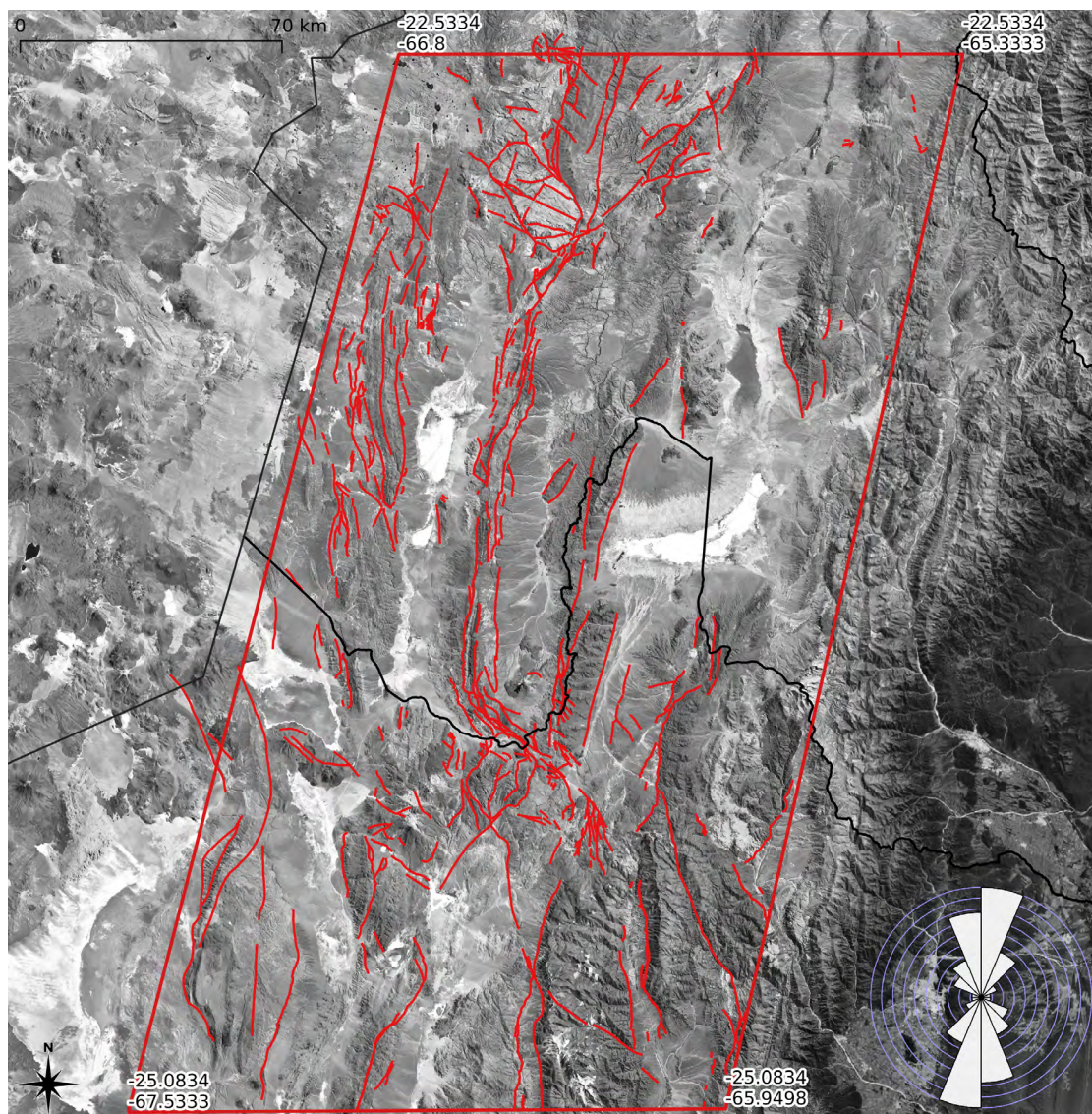


Figura 13 - Esquema del Mapa de Evidencia de Fallas Cuaternarias

Item	Descripción	Valores
Settings	Tipo de conjunto estructural	[PULL APART, INTERSECTION, FAULT, NORMAL FAULT, Q FAULT, COLLAPSE FAULTS]
Certainty	Certeza del dato	[0:1, 4]
Quality	Calidad del dato	[0:1]

Tabla 8 - Descripción de los campos de la tabla de atributos

5.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESAMIENTO:

1. Conversión de datos KMZ a SHP.

- a. Se cargó del archivo KMZ a un archivo GIS que aceptó el formato.
- b. Los datos fueron combinados en una sola capa dado que cada manantial se almacena en una capa KML.

- c. Se realizó una transformación de EPSG: 4326 a EPSG: 22183 porque *Google Earth* sólo almacena la información en el sistema de referencia WGS84.
- d. La digitalización en *Google Earth* tendió a duplicar rasgos. Por esa razón fue necesario limpiar puntos que se repitieron.

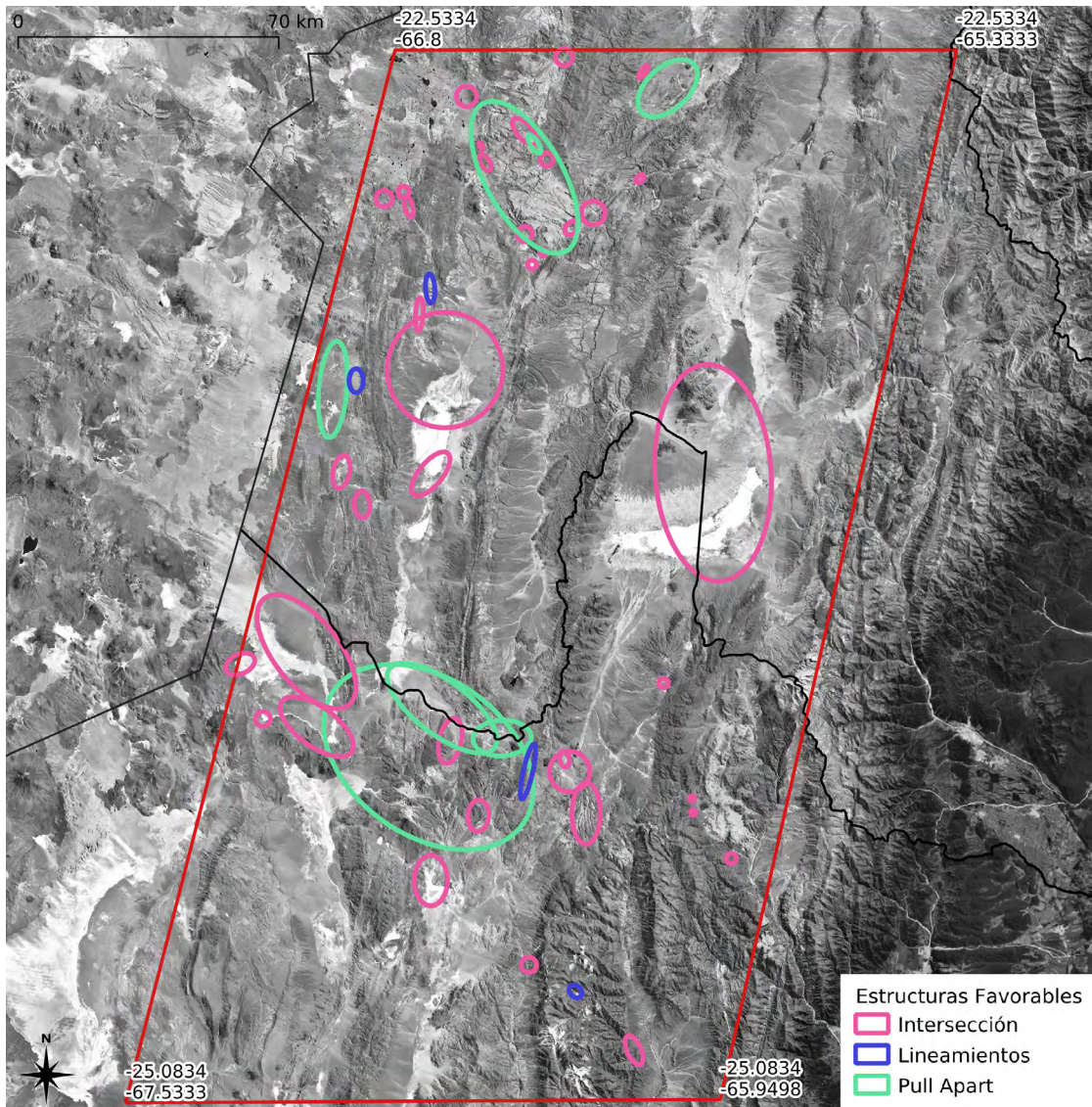


Figura 14 - Esquema del Mapa de Evidencia de Rasgos Estructurales Favorables

6. SISMOS SOMEROS

Autor de información: Verónica Castano de la Delegación Mendoza del SEGEMAR.

Fuente: Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES).

Formato: *ESRI Shapefile*, geometría punto.

Los datos originales fueron recuperados de la página web del INPRES en formato *CSV*. Para permitir su procesamiento se realizó la conversión a un formato de puntos georreferenciados. Y para obtener los datos correspondientes a sismos someros se realizaron estadísticas en base a la profundidad de los mismos, seleccionándose los datos con una profundidad menor e igual a 20 kilómetros. Al respecto, la figura 16 ilustra sobre las proporcionalidades de cuantías del componente sismos. Como así también a través de la figura 17 se observa la distribución de lecturas de los sismos someros.

Con esta información se procedió a generar una capa de información derivada de densidad de sismos.

6.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESAMIENTO:

1. Importación, y transformación de los datos.
 - a. Se obtuvieron dos archivos diferentes para las provincias de Salta y Jujuy en formato *xlsx*.
 - b. Se generaron dos *shapefiles* de puntos para cada provincia.
 - c. Se revisó la estructura de los items para detectar posibles incompatibilidades entre los datos.
 - d. Luego de la revisión se combinó la información de los dos archivos.
 - e. Se transformó la información de EPSG: 4326 a EPSG: 22183 (POSGAR 94 faja3).
2. Normalización del campo fecha.
 - a. Se detectó que el campo fecha tenía un formato

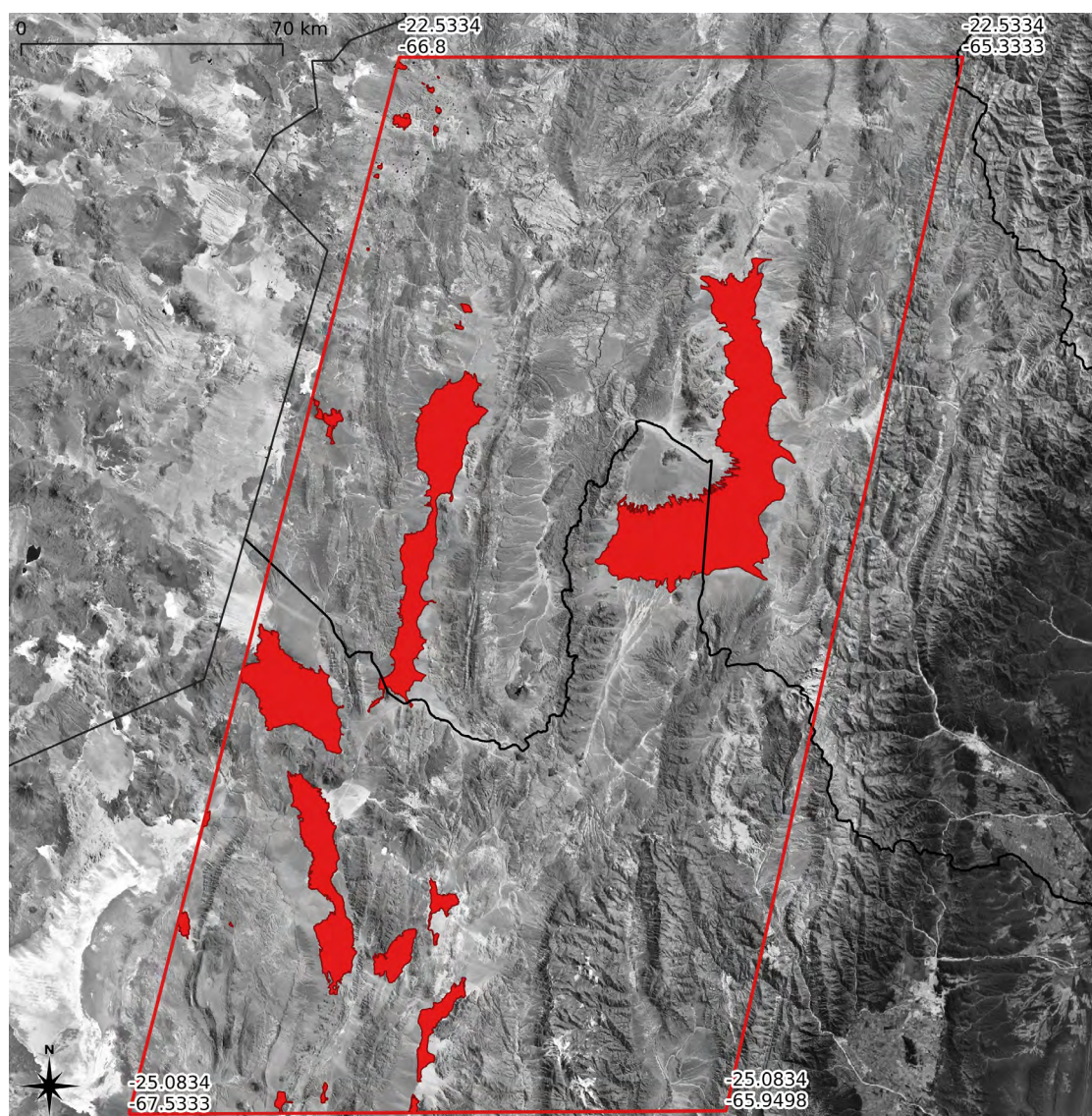


Figura 15. Esquema del Esquema del Mapa de Evidencia de Salares

- diferente para las dos provincias. En este caso como estándar se optó por el formato de fecha científico (aaaa-mm-dd).
- b. Selección de los datos correspondientes a la provincia de Salta.
 - c. Creación de ítems temporales para año, mes, día y resultado.
 - d. Se operó sobre el texto extrayendo el año, mes y día con operaciones de manipulación de cadena de caracteres (*left*; *right*; *strpos*; *len*).
 - e. Se le sumó un cero (0) a los días y meses menores de diez.
 - f. Se calculó la nueva fecha utilizando el campo *results*. *results*=Concat (“año”, “-”, “mes”, “-”, “día”).
 - g. Revisión de los resultados.
 - h. Traspaso de los datos de *results* a fecha. Set “Fecha” = “*results*”.
 - i. Borrado de los campos temporales año, mes, día y *results*.
3. Exploración de datos (EDA) y selección de sismos someros.
 - a. Se generó el histograma de los sismos en función de la profundidad.
 4. Se seleccionaron los sismos con profundidad menor e igual a 20 km.

7. MANANTIALES FRÍOS (COOL SPRINGS)

Autor de información: Nicolás Larcher de la Delegación Jujuy del SEGEMAR.

Número total de manantiales fríos digitalizados: 29.935.

Fuente: Los manantiales fríos fueron directamente mapeados utilizando imágenes de la plataforma *Google Earth*.

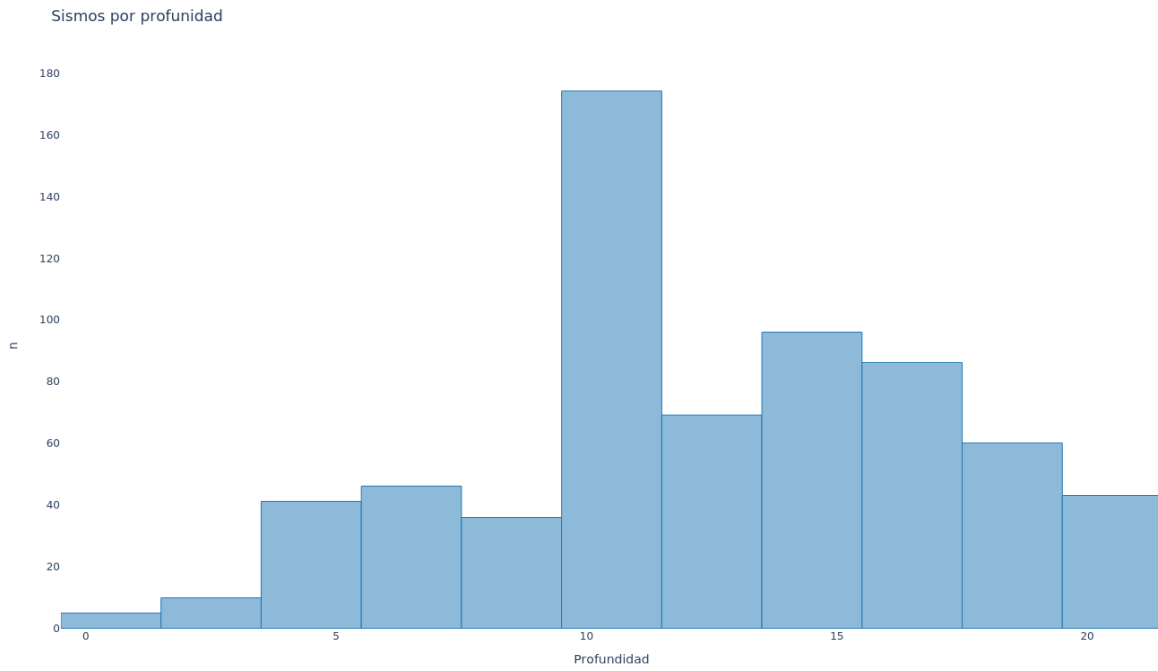


Figura 16 - Histograma de sismos cantidad vs profundidad

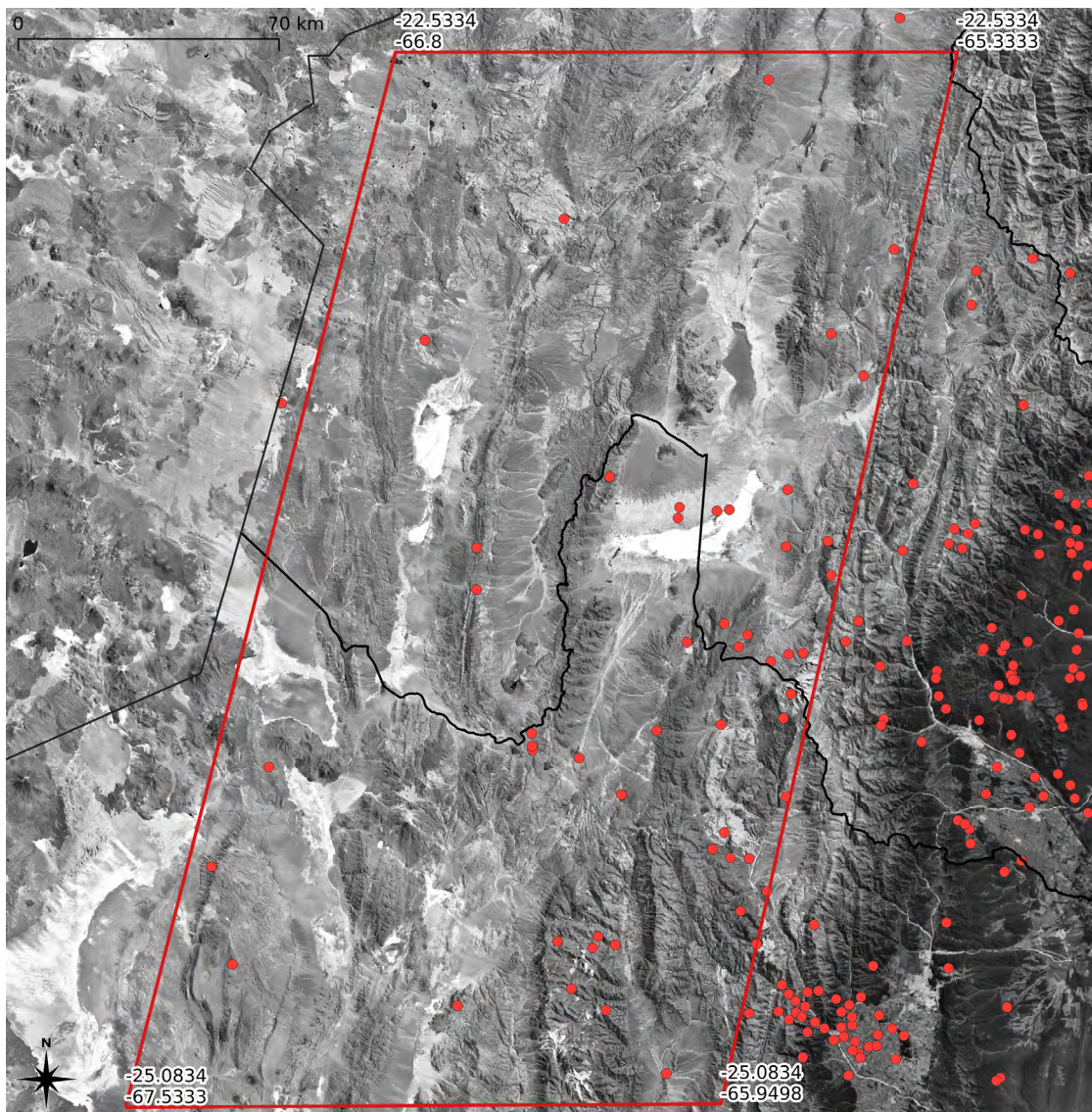


Figura 17 - Mapa de Evidencia de Sismos Someros

Formato: *ESRI Shapefile*, geometría punto.
Los resultados del *plotteo* de manantiales fríos (*cool springs*) se ilustra en la figura 18.

7.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESAMIENTO:

1. Conversión de datos *KMZ* a *SHP*.
 - a. Se cargó del archivo *KMZ* a un archivo *GIS* que aceptó el formato.
 - b. Los datos fueron combinados en una sola capa dado que cada manantial se almacena en una capa *KML*.
 - c. Se realizó una transformación de EPSG: 4326 a EPSG: 22183 porque *Google Earth* sólo almacena la información en el sistema de referencia *WGS84*.

- d. La digitalización en *Google Earth* tendió a duplicar rasgos. Por esa razón fue necesario limpiar puntos que estén repetidos.

8. MANANTIALES CALIENTES (*HOT SPRINGS*)

Autores de información: Noelia Carrizo de la Delegación Catamarca del SEGEMAR, Bridget Aying del *GBCGE* del *Bureau of Mines and Geology* del estado de Nevada, EE.UU, Alejandro Conde Serra y Virginia Naón del SEGEMAR.

Fuentes: Catálogo de Manifestaciones Termales de la República Argentina SEGEMAR (Pesce, Miranda, 2003), Peralta Arnold *et al.* (2016), Centro Regional de Energía Geotérmica de Neuquén (Sierra,

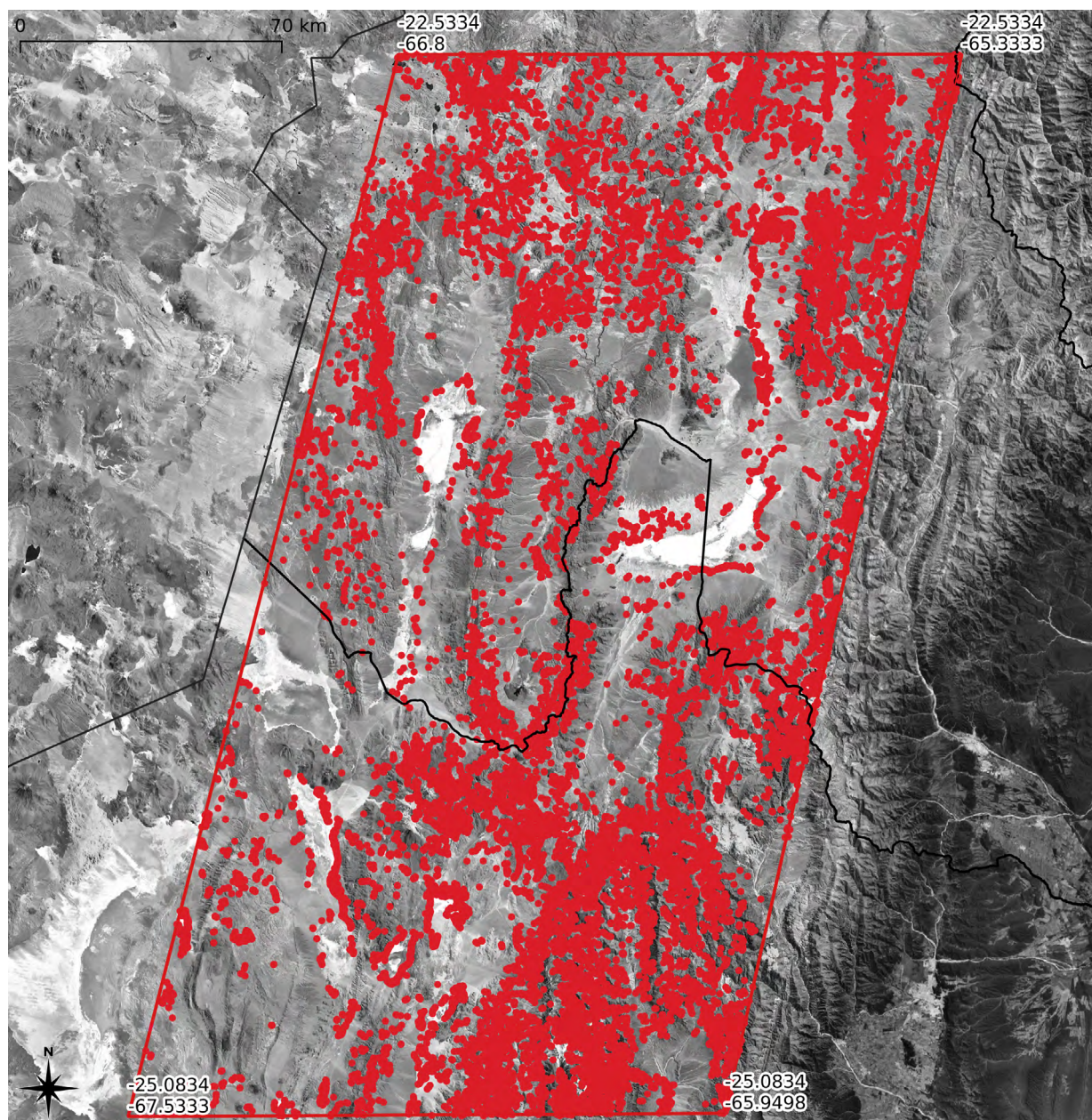


Figura 18 - Mapa de Evidencia de Manantiales Fríos

Pedro, 1988), Dames, Moore (1999), Carrizo (2015) y Saluso, Moraña (2015).

Formato: *ESRI Shapefile*, geometría punto.

8.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESAMIENTO

1. Limpieza de la planilla de cálculo y ordenamiento de campos. Esta operación se realizó para mantener la consistencia y calidad de los datos y una estructura que sea compatible con una base de datos.

a. A partir de la planilla de cálculo se utilizaron los campos correspondientes a la ubicación de la muestra (latitud y longitud en grados decimales) para obtener los puntos y así construir la capa de información geoespacial.

2. Importación del formato excel a *SHP*.

a. Se realizó la transformación de datos de formato excel a *SHP*.

b. Se realizó una evaluación visual de la localización de los puntos a fin de constatar la correcta transformación de los datos.

3. Evaluación y selección de puntos con temperaturas superficiales $temperature \geq 15$. Se realizó esta operación a fin de filtrar los datos, dado que se considera como manantial caliente a todos aquellos con temperaturas mayores a la referida.

La identificación de manantiales calientes (hot springs) se presenta en su ubicación a través de la figura 19.

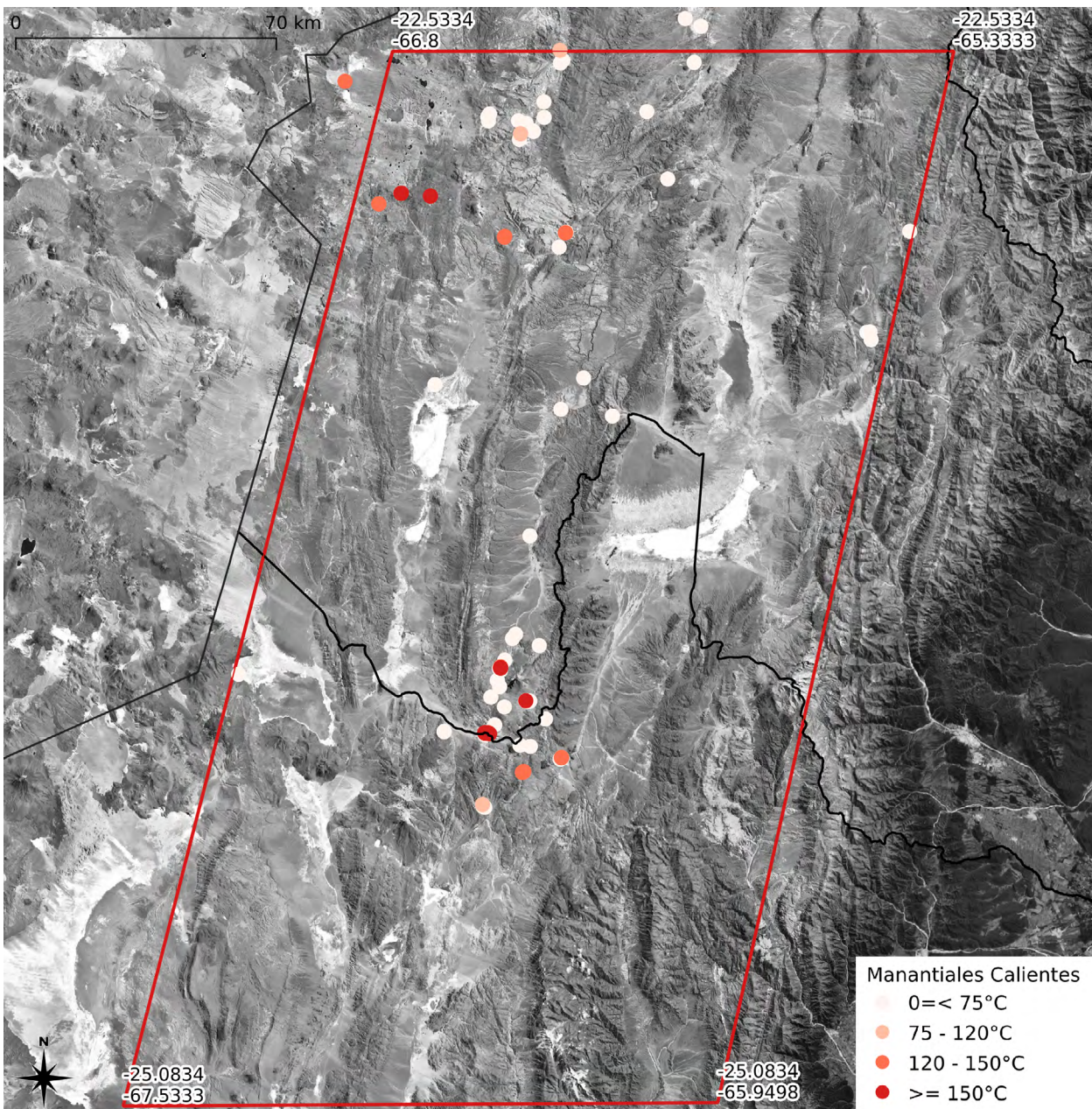


Figura 19 - Mapa de Evidencia de Manantiales Calientes

9. VOLCANISMO

Fuente: Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas (MAPGAC, en sus siglas en inglés) elaborado por el SEGEMAR en conjunto con el *Geological Survey of Canada*.

Formato: *ESRI Shapefile*, geometría polígono.

La descripción de los campos de la tabla de atributos se presenta en la tabla 9.

9.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESAMIENTO:

1. Del archivo original en formato *shapefile* se transformaron los datos desde el sistema de referencia *WGS84* a *EPSG: 22183*.
2. Se realizó una selección por consulta de todo tipo de rocas volcánicas. Y los resultados de la consulta se almacenaron en un nuevo *shapefile* (Figura 20).

Items	Descripción
Unidad	Código MAPGAC de la unidad geológica
Edad	Edad descrita en texto libre
Tipoderoca	Descripción del tipo de roca volcánica
Age	Edad en idioma inglés

Tabla 9 - Descripción de los campos de la tabla de atributos

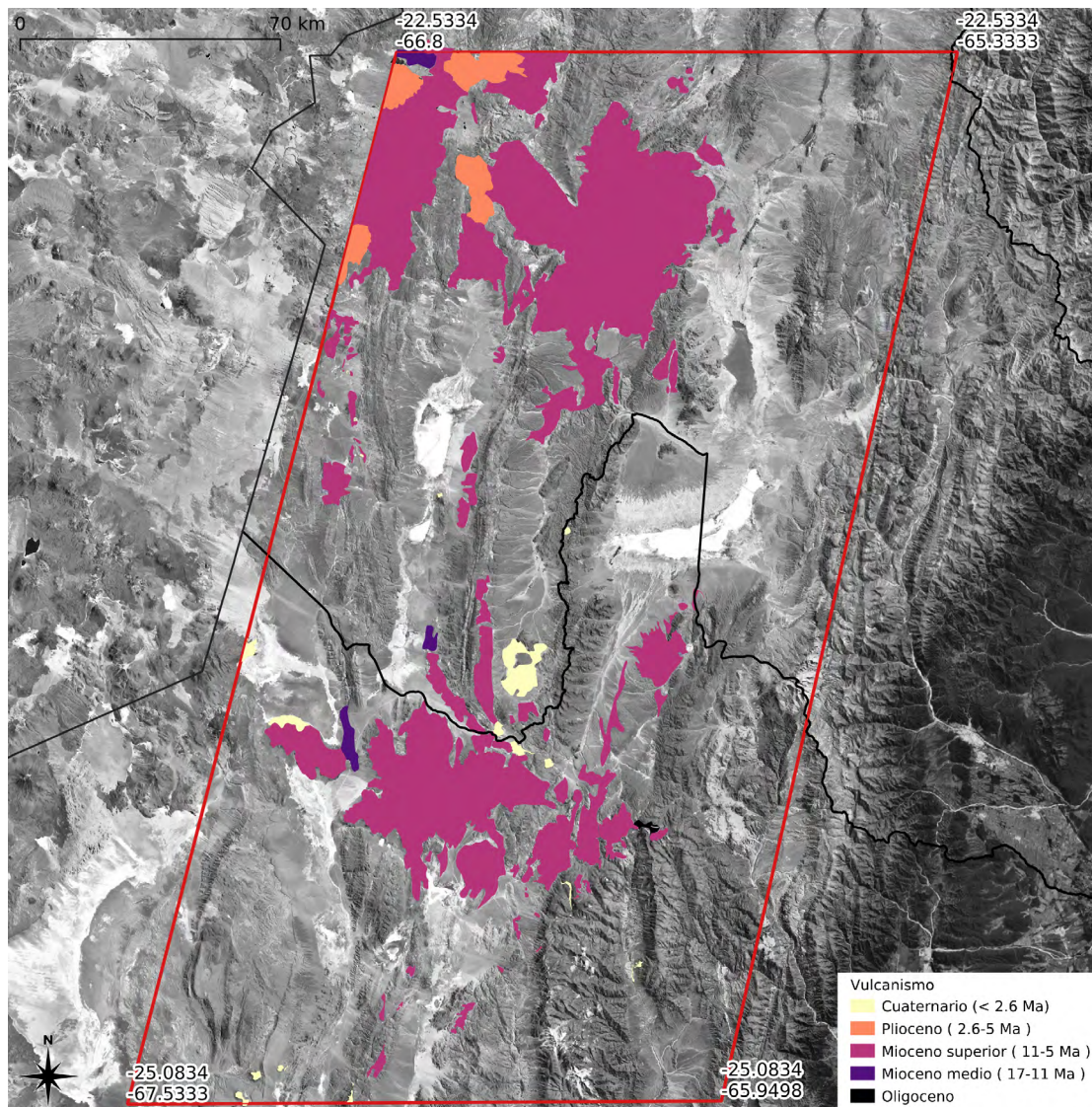


Figura 20 - Mapa de Evidencia de Volcanismo

(Se repite en la Fig. 10 en tamaño A3 para mayor claridad, tiene un archivo diferente para la figura en A3, Fig.10 3n A3)

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Acocella, V., Gioncada, A., Omarini, R., Riller, U., Mazzuoli, R., Vezzoli, L. 2011. Tectonomagmatic characteristics of the back-arc portion of the Calama–Olacapato–El Toro Fault Zone, Central Andes. *Tectonics* 30: TC 3005.
- Aquater 1980. Exploración geotérmica del área del Cerro Tuzgle. Provincia de Jujuy, República Argentina. Secretaria de Estado de Minería, Buenos Aires, Argentina (Inédito), p 170.
- Allmendinger, R., Jordan, T., Kay, S., Isacks, B. 1997. The evolution of the Altiplano – Puna Plateau of the central Andes. *Annual Review Earth Planet Sciences*, 25: 139–174.
- Allmendinger, R.W., Ramos, V.A., Jordan, T.E., Palma, M., Isacks, B.L. 1983. Paleogeography and Andean structural geometry, northwest Argentina. *Tectonics* 2: 1–16.
- Bonham-Carter, G.F., Rogers, P.J., Wright, D.F. 1988. Integration of Geological Datasets for Gold Exploration in Nova Scotia. *Photogrammetric Engineering and Remote sensing*, v. 54, n 77: 1585-1592.
- Blasco, G., Zappettini, E.O., Hongn, F. 1996. Hoja Geológica 2566-I, San Antonio de los Cobres. Provincias de Jujuy y de Salta. Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina 1:250.000. Servicio Geológico Minero Argentino. Boletín N° 217.
- Caffe, P., Soler, M., Coira, B., Cabrera, A., Flores, P. 2007. Estratigrafía y centros eruptivos de la región de Pairique, Puna jujeña, *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 62 (2): 242- 256.
- Carrizo, N. 2015. Estudio geológico y geoquímico de un campo geotérmico, caso de estudio: Argentina, trabajo de especialización, Universidad de El Salvador, República de El Salvador.
- Casa, A., M., Yamin, E., Wright, C., Costa, M., Coppolecchia y Cegarra, M. 2011. Deformaciones Cuaternarias de la República Argentina, Sistema de Información Geográfica. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Servicio Geológico Minero Argentino, DVD-ROM, v 1.0.
- Coira B., Caffè, P., Ramirez, A., Chayle, W., Díaz, A., Rosas, S., Pérez, A., Pérez, Orozco, O., Martínez, M. 2004. Hoja Geológica 2366-I / 2166-III, Mina Pirquitas. Provincia de Jujuy. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino. Buenos Aires. Boletín 269, 125 pp.
- Coira, B. 2008. Recursos Geotérmicos de Alta Entalpía de la provincia de Jujuy. Relatorio XII Congreso Geológico Argentino: 563-576
- Chmielowski, J., Zandt, G., Haberland, C. 1999. The Central Andean Altiplano-Puna magma body. *Geophysical Research Letters*. Vol. 26, N° 6: 783-786.
- Dames, G., Moore, T. 1999. Plan provincial de muestreo de recursos hídricos y de sedimentos de corriente áreas de estudio de la provincia de Jujuy. Estudios ambientales de base, Proyecto PASMA. Tarea 5, Establecimiento de datos de calidad ambiental. Tarea 4, Caracterización de fuentes de contaminación.
- Fraser, A. J., Gawthorpe, R. L. 2003. An Atlas of Carboniferous Basin Evolution in Northern England. Capítulo 5, Play Fairway Analysis. Geological Society Memoir no. 28. London, Bath: Geological Society of London. VI. 79 pp.
- González, M.A., Pereyra, F., Ramallo, E., Tchilinguirian, P. 2003. Hoja Geológica 2366-IV, Ciudad de Libertador General San Martín, provincias de Jujuy y Salta. Programa Nacional de Cartas Geológicas 1:250.000. Servicio Geológico Minero Argentino. Boletín 274, 109 pp.
- Grier, M.E., Salfity, J.A., Allmendinger, R.W. 1991. Andean reactivation of the Cretaceous Salta *rift*, northwestern Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 4: 351- 372.
- Giordano, G., Pinton, A., Cianfarra, P., Baez, W., Chiodi, A., Viramonte, J., Norini, G., GropPELLI, G. 2013. Structural control on geothermal circulation in the Cerro Tuzgle–Tocomar geothermal volcanic area (Puna plateau, Argentina). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 249: 77–94.
- Hongn, D., R.E. Seggiaro, C.R. Monaldi, R.N. Alonso, R.E. González, A.P. Igarzábal, E. Ramallo, M. Godeas, A. Fuertes, R. García, F. Moya, O. González. 2001 Hoja Geológica 2566-III, Cachi. Provincias de Salta y Catamarca. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino. Boletín 248, 94 pp.
- Hongn, F., Mon, R., Petrinovic, I., del Papa, C., Powell, J. 2010. Inversión y reactivación tectónicas cretácico-cenozoicas en el noroeste argentino: Influencia de las heterogeneidades del basamento neoproterozoico-paleozoico inferior. *Asociación Geológica Argentina, Revista* 66 (1): 38-53.
- Ibarra, F., Prezzi, C. 2019. The thermo-mechanical state of the Andes in the Altiplano-Puna region: insights from Curie isotherm and effective elastic thickness determination. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 76 (4): 352-362. Número especial: TECTÓNICA.
- Isacks, B.L. 1988. Uplift of the central Andean plateau and bending of the Bolivian orocline. *Journal of Geophysical Research*, 93: 3211–3231.

- Jordan, T.E., Isacks, B.L., Allmendinger, R.W., Brewer, J.A., Ramos, V.A., Ando, C.J. 1983. Andean tectonics related to geometry of subducted Nazca plate. *GSA Bulletin* 94: 341–361.
- Jordan, T., Alonso, R. 1987. Cenozoic stratigraphy and basin tectonics of the Andes Mountains, 20°28° South latitude: American Association of Petroleum Geologists, *Bulletin*, 71: 49-64.
- Lanza, F., Tibaldi, A., Bonali, F. L., Corazzato, C. 2013. Space–time variations of stresses in the Miocene–Quaternary along the Calama–Olacapato–El Toro Fault Zone, Central Andes. *Tectonophysics* 593 (2013): 33–56.
- Marrett, R.A., Allmendinger, R.W., Alonso, R.N., Drake, R.E. 1994. Late Cenozoic tectonic evolution of the Puna Plateau and adjacent foreland, northwestern Argentine Andes. *Journal of South American Earth Sciences* 7: 179–207.
- Mars, J.C. 2013. Hydrothermal alteration maps of the central and southern Basin and Range province of the United States compiled from Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (*ASTER*) data ver 1.1, April 8, 2014. U.S. Geological Survey Open-File Report 1139, 6 pp., 13 plates, scale 1:1,300,000. <http://dx.doi.org/10.3133/ofr20131139>.
- Mars, J.C., Rowan, L.C. 2006. Regional mapping of phyllic-and argillic-altered rocks in the Zagros magmatic arc, Iran, using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (*ASTER*) data and logical operator algorithms: *Geosphere* 2: 161–186, 2 plates. doi:10.1130/GES00044.1
- Mon, R., Salfity, J.A. 1995. Tectonic evolution of the Andes of northern Argentina. En: Tankard, A. J., Suárez, R, Welsink (eds.): *Petroleum basins of South America*. American Association of Petroleum Geologists, *Memoir* 62: 269-283.
- Norini, G., Baez, W., Becchio, R., Viramonte, J., Giordano, G., Arnosio, M., Pinton, A., Groppelli, G. 2013. The Calama – Olacapato – El Toro fault system in the Puna Plateau, Central Andes: Geodynamic implications and stratovolcanoes emplacement, *Tectonophysics* (2013), <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2013.06.013>.
- Payrola Bosio, P., Hong, F.D., Cristallini, E., García, V.H. 2012. Andean oblique folds in the Cordillera Oriental - Northwestern Argentina: Insights from analogue models *Journal of Structural Geology*: 42.
- Peralta, Arnold, Y., Cabassi, J., Tassi, F., Caffè, P. J., Vaselli, O. 2016. Geochemistry of the hydrothermal systems in the Jujuy Province, Argentina, and relationship with the regional geology. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 18, EGU2016.
- Perkins, J.P., Ward, K.M., De Silva, S.L., Zandt, G, Beck, S.L., Finnegan, N.J. 2016. Surface uplift in the Central Andes driven by growth of the Altiplano Puna Magma Body. *Nature Communications* 7(1): 1-10.
- Pesce, A.H., Miranda, F. 2003. Catálogo de Manifestaciones Termale de la República Argentina, Vol. I, Región Noroeste, Provincias de Jujuy, Salta, Catamarca, Tucumán, Santiago del Estero, La Rioja y San Juan. Repositorio SEGEMAR.
- Petrinovic, I.A. 1994. Volcanismo Cenozoico asociado al lineamiento Calama– Olacapato–El Toro en el tramo comprendido entre San Antonio de los Cobres y Olacapato, provincia de Salta, Argentina. Phd Thesis Universidad Nacional de Salta, Argentina. 234 pp. (inédito).
- Petrinovic, I.A., Martí, J., Aguirre-Díaz, G.J., Guzmán, S., Geyer, A., Salado Paz, N. 2010. The Cerro Águas Calientes caldera, NW Argentina: an example of a tectonically controlled, polygenetic collapse caldera, and its regional significance. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 194: 15–26.
- Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas (MAPGAC, en sus siglas en inglés) elaborado por el SEGEMAR en conjunto con el Geological Survey of Canada. <https://repositorio.segemar.gov.ar/handle/308849217/38>
- Riller, U., Oncken, O. 2003. Growth of the Central Andean Plateau by Tectonic Segmentation is Controlled by the Gradient in Crustal Shortening. *The Journal of Geology*. 111(3): 367-384
- Riller, U., Petrinovic, I.A., Ramelow, J., Strecker, M., Oncken, O. 2001. Late Cenozoic tectonism, collapse caldera and plateau formation in the Central Andes. *Earth Planet. Sci. Lett.* 188: 299– 311.
- Rubiolo, D., Seggiaro, R.E., Gallardo, E., Disalvo, A., Sánchez, M., Turel, A., Ramallo, E., Sandruss, A., Godeas, M. 2003. Hoja Geológica 2366-II / 2166-IV, La Quiaca. Provincias de Jujuy y Salta. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino. *Boletín* 246, 113 pp. Buenos Aires
- Salfity, J.A., Omarini, R., Baldis, B., Gutiérrez, W.J. 1976. Consideraciones sobre la evolución geológica del Precámbrico y Paleozoico del norte argentino. II Congreso Ibero-Americano de Geología Económica, Buenos Aires. *Actas* 4: 341-361.
- Salfity, J.A. 1985. Lineamientos transversales al rumbo andino en el Noroeste Argentino. Congreso Geológico Chileno, Antofagasta. No 4, *Actas* 2: 119-127.

- Saluso, M. y Moraña, L. 2015. Estructura y composición del fitoplancton de Mina Pirquitas, Jujuy, Argentina. *Revista mexicana de biodiversidad*, 86(3): 711-718.
- Salfity, J.A., C.R. Monaldi y González, O.E. 2006. Hoja Geológica 2566-IV, Metán. Provincia de Salta. Servicio Geológico Minero Argentino. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Boletín 352, 80 pp. Buenos Aires.
- Seggiaro, R.E., Becchio, R., Coira, B. y Hongn, F. 1995. La caldera del Pairique (Puna Jujeña), vinculación con zonas de alteración hidrotermal y manifestaciones metalíferas de posible interés económico. 5º Congreso Nacional de Geología Económica, Actas: 274-280.
- Seggiaro, R., Becchio, R., Pereyra, F. y Martínez, L. 2007. Hoja Geológica 2569-IV, Antofalla, provincias de Catamarca y Salta. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín 343, 62 pp. Buenos Aires.
- Seggiaro, R.E., Becchio, R., Bercheñi, V., Ramallo, L. 2015. Hoja Geológica 2366-III Susques, provincias de Jujuy y Salta. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín N°414, 103 pp. Buenos Aires.
- Seggiaro, R.E., Guzmán, S.R., Apaza, F.D. 2017. Control estructural sobre el magmatismo en los alrededores de San Antonio de Los Cobres, sector oriental de la Puna central. XX Congreso Geológico Argentino (2017) Actas S.T. 2: Geología Estructural y Geotectónica: 142-146.
- Seggiaro, R.E., Hongn, F. 1994. Tectónica transcurrente asociada al volcán Coranzulí, Jujuy, Argentina. VII Congreso Geológico Chileno. Concepción. Chile.
- Seggiaro, R.E. 1994. Petrología geoquímica y mecanismos de erupción del Complejo Volcánico Coranzulí, 1994. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Salta. Inédito.
- Seggiaro, R.E., Aguilera, N., Amengual, R., Boso, M., Del Papa, C., Gallardo, E., Galli, C., Hongn, F., Marquillas, R., Ramallo, E. y Sabino, I. 2019a. Hoja Geológica 2566-II, Salta. Provincias de Salta y Jujuy. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Servicio Geológico Minero Argentino. Boletín 440, 92 pp. Buenos Aires.
- Seggiaro, R.E., Guzman, S., Marti, J. 2019b. Dynamics of caldera collapse during the Coranzulí eruption (6.6 Ma) (Central Andes, Argentina). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* V. 374: 1-1
- Sierra, J. L., Pedro, G. 1987-1988. Estudio geotérmico del área Tuzgle - Tocomar - Pompeya. Centro Regional de Energía Geotérmica de Neuquén. CREGEN.
- Siler, D.L., Faults, J.E. 2013. Play Fairway analysis for geothermal exploration: Examples from the Great Basin, western USA: *Geological Society of America* v. 45, no. 7, p 239.
- Viramonte, J.G., Omarini, R.H., Araña Saavedra, V., Aparicio, A., Garcia Cacho, L. 1984. Edad, génesis y mecanismos de erupción de las riolitas granatíferas de San Antonio de los Cobres, provincia de Salta. IX Congreso Geológico Argentino. Bariloche. Asociación. Geológica Argentina: 216-233.
- Zappettini, E. O., Blasco, G. 2001. Hoja Geológica 2569-II, Socompa. Provincia de Salta. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino. Boletín 260, 62 pp. Buenos Aires.