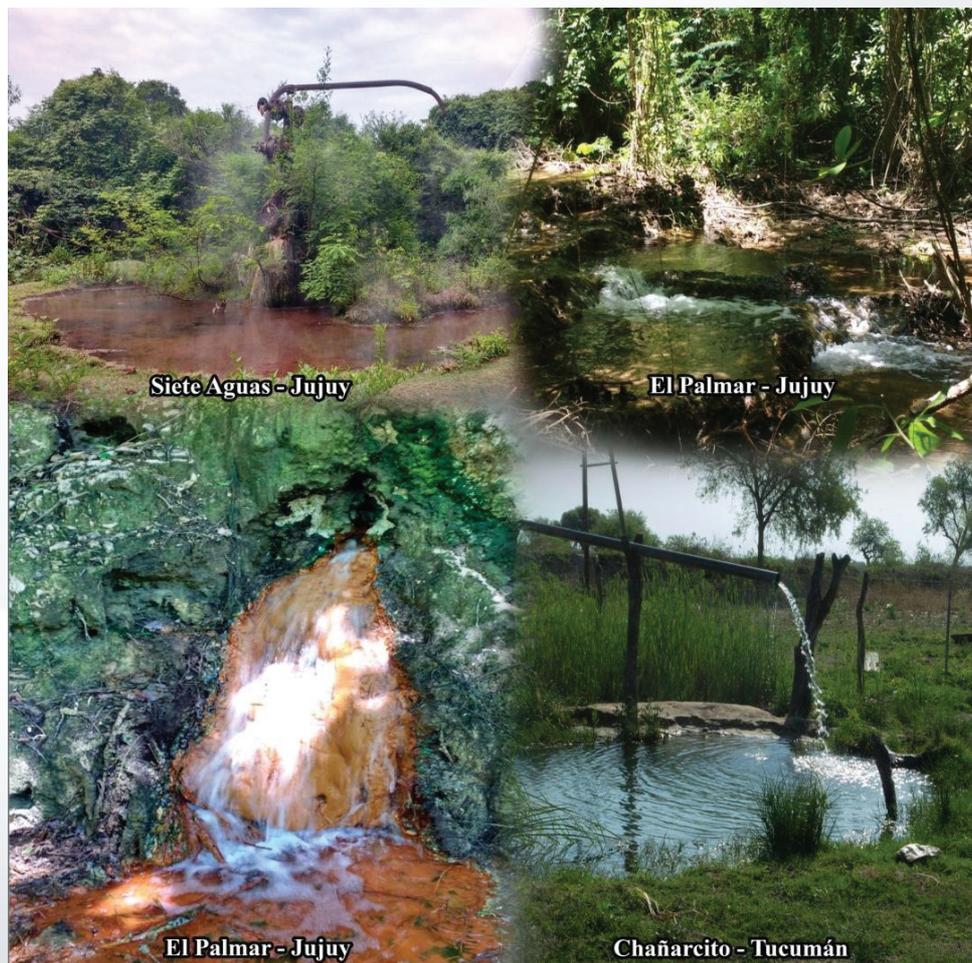


MAPA DE FAVORABILIDAD GEOTÉRMICA APLICANDO EL MÉTODO DE ANÁLISIS GEOTHERMAL PLAY FAIRWAY

*Área 2: Sierras Subandinas, cuenca de Tucumán
y su extensión en la provincia de Santiago del
Estero, Argentina*

Carlos Gabriel Asato, Alejandro R. Conde Serra, Raúl E. Seggiaro,
Eduardo A. Molina, Marcelo I. Cegarra, Mariano Hernández,
Noelia Carrizo, Yésica J. Peralta Arnold, Nicolás E. Larcher,
Diego S. Fernández, Javier I. Peroni, Gustavo A. Ramé y Virginia Naón



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

Área 2: Sierras Subandinas, cuenca de Tucumán y su extensión en la provincia de Santiago del Estero, Argentina

Carlos Gabriel Asato¹, Alejandro R. Conde Serra¹, Raúl E. Seggiaro²,
Eduardo A. Molina², Marcelo I. Cegarra¹, Mariano Hernández³,
Noelia Carrizo⁴, Yésica J. Peralta Arnold⁵, Nicolás E. Larcher⁵,
Diego S. Fernández⁶, Javier I. Peroni¹, Gustavo A. Ramé⁷ y
Virginia Naón¹

1. Servicio Geológico Minero Argentino – Instituto de Geología y Recursos Minerales
2. Servicio Geológico Minero Argentino – Centro Salta
3. Servicio Geológico Minero Argentino – Centro General Roca
4. Servicio Geológico Minero Argentino – Sub centro Catamarca
5. Servicio Geológico Minero Argentino – Centro Jujuy
6. Servicio Geológico Minero Argentino – Centro Tucumán
7. Servicio Geológico Minero Argentino – Centro Córdoba

Coordinador: Alejandro R. Conde Serra

Geoestadística y procesamiento digital: Carlos Gabriel Asato

Geología Estructural: Raúl E. Seggiaro, Mariano Hernández

Geología Regional: Eduardo A. Molina

Neotectónica: Marcelo I. Cegarra

Geoquímica de fluidos: Noelia Carrizo, Yésica J. Peralta Arnold, Diego S. Fernández

Hidrología y manifestaciones termales: Noelia Carrizo, Nicolás E. Larcher

Hidrogeología: Diego S. Fernández

Geofísica: Javier I. Peroni, Gustavo A. Ramé, Mariano Hernández, Alejandro R. Conde Serra

Interpretación geotérmica: Alejandro R. Conde Serra

Base de datos: Carlos Gabriel Asato, Virginia Naón

Supervisión: Pablo Esteban Johanis

Validación: Lidia Inés Korzeniewski

Edición: Marcos Vila

SERVICIO GEOLÓGICO MINERO ARGENTINO

Presidente: Dr. Eduardo O. Zappettini

Secretaria Ejecutiva: Lic. Silvia Chavez

INSTITUTO DE GEOLOGÍA Y RECURSOS MINERALES

Director: Dr. Martín Gozalvez

DIRECCIÓN DE RECURSOS GEOLÓGICO-MINEROS

Director: Lic. Pablo E. Johanis

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

Esta publicación debe citarse como:

Asato, C.G., Conde Serra, A.R., Seggiaro, R.E., Molina, E.A., Cegarra, M.I., Hernández, M., Carrizo, N., Peralta Arnold, Y.J., Larcher, N.E., Fernández, D.S., Peroni, J.I., Ramé, G.A., Naón, V. 2022. Mapa de favorabilidad geotérmica aplicando el método de análisis *Geothermal Play Fairway*. Área 2: Sierras Subandinas, cuenca de Tucumán y su extensión en la provincia de Santiago del Estero, Argentina. Servicio Geológico Minero Argentino. Serie Contribuciones Técnicas – Geotermia N° 5, 72 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

CONTENIDO

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUCCIÓN	3
2. MARCO GEOLÓGICO	3
3. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS <i>PLAY FAIRWAY</i>	6
3.1. Metodología <i>Geothermal Play Fairway</i> aplicada al Área 2.....	6
3.1.1. Modelo de análisis e integración de datos.....	7
4. ÁREAS DE FAVORABILIDAD GEOTÉRMICA EN EL ÁREA 2	8
4.1. Modelo del subsistema Permeabilidad	8
4.1.1. Lineamientos	11
4.1.2. Corrimientos	11
4.1.3. Fallas normales reactivadas.....	11
4.1.4. Fallas detectadas por geofísica	11
4.1.4.1. Fallas normales reactivadas.....	11
4.1.4.2. Fallas normales.....	12
4.1.4.3. Fallas Inversas	12
4.1.5. Asociaciones estructurales.....	12
4.1.6. Sismicidad	12
4.2. Modelo del subsistema Calor	12
4.2.1. Geotermometría	14
4.2.2. Rangos empleados en la distribución de pesos.....	16
4.3. Modelo del subsistema Fluidos	16
4.3.1. Hidroquímica	19
5. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS	20
ANEXO I. Procesamiento de datos y generación de mapas de evidencia	24
Área de Trabajo	24
Fallas Cuaternarias	24
Hidroquímica (pozos, manantiales).....	26
Sismos	27
Fallas por Geofísica	28
Rasgos Estructurales Favorables	29
Volcanismo (Lavas Antillas)	30
ANEXO II. Mapas de densidad de exploración	32
ANEXO III. Mapas de ubicación de pozos provinciales	34
ANEXO IV. Mapas de ubicación de pozos en el área del Embalse Río Hondo	38
ANEXO V. Valores de parámetros físicos y químicos para los pozos y manantiales del área	60
TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO	69

RESUMEN

En la presente contribución se da a conocer el resultado de la aplicación del método *Geothermal Play Fairway* en una región de aproximadamente 71.000 km² que comprende parte de las Sierras Subandinas, Cordillera Oriental, Sistema de Santa Bárbara y Llanura Chaco-Pampeana, en las provincias de Jujuy, Salta, Tucumán, Santiago del Estero y Catamarca, denominada en su conjunto Área 2. De acuerdo a esta metodología que integra y modela diversos tipos de datos geológicos directos e indirectos, se generaron mapas de evidencias correspondientes a los tres factores geológicos principales para la existencia de un recurso geotermal: los subsistemas de Permeabilidad, Fluidos y Calor. Estos tres componentes en conjunto integran el mapa resultante de Potencial Geotérmico del Área 2. Se asignó mayor influencia en el cómputo de favorabilidad geotérmica al subsistema de Permeabilidad, el cual está condicionado por la presencia de estructuras (fallas y lineamientos) o conjuntos de estructuras que generan los espacios necesarios para el ascenso de fluidos geotermales. Estos rasgos, determinados por mapeo geológico y por métodos geofísicos en subsuelo, fueron ponderados según su tipología, edad, interacción con otras estructuras y profundidad de los sismos asociados a ellos.

En segundo lugar de importancia se consideró al subsistema Calor, en donde se utilizaron evidencias geoquímicas (mediante cálculos geotermométricos de muestras de aguas termales), información de pozos y anomalías geofísicas, que determinaron una participación de fuentes profundas de calor.

Finalmente, el menor peso fue asignado al subsistema de Fluidos, integrado por expresiones hidrotermales cuyos análisis hidroquímicos permitieron deducir la participación de fluidos geotérmicos de alta entalpía.

La combinación de los distintos mapas de evidencias con sus respectivas ponderaciones constituye el mapa final de favorabilidad geotérmica para el Área 2, en el cual, se destacan zonas o áreas con características distintivas:

- Zona Norte: Se circunscribe a la región del Sistema de Santa Bárbara y es clasificada como un sistema conductivo. Se encuentran gradientes geotérmicos normales y se interpretan reservorios geotérmicos profundos asociados a fallas de alto ángulo que juegan un rol preponderante en la conducción de fluidos y/o la compartimentalización de bloques (barreras).
- Zona Sur: Abarca la llanura Tucumano-Santiagoueña y se la clasifica como un sistema convectivo-conductivo. Presenta gradientes geotérmicos anómalos diseminados por el área, con indicios de fluencia ascendente de calor de origen mantélico a través del basamento y en asociación con estructuras profundas.
- Otros sectores con probabilidad de albergar sistemas ciegos (no aflorantes).

Palabras Clave: *Geothermal Play Fairway, potencial geotérmico, favorabilidad geotérmica, Sierras Subandinas, noroeste argentino*

ABSTRACT

This report shows the Geothermal Play Fairway methodology applied to a vast area (71.000 km²) of Northwestern Argentina, comprising the morphostructural regions of Subandean Ranges, Eastern Cordillera, Santa Barbara System and Chaco-Pampean Plain (Salta, Jujuy, Tucumán, Santiago del Estero and Catamarca provinces).

According to this methodology that integrates and models various types of direct and indirect geological data, maps of evidence corresponding to the three main geological factors for the existence of a geothermal resource were generated: the Permeability, Fluids and Heat subsystems. These three components together make up the resulting map of Geothermal Potential of Area 2.

Greater influence in the computation of geothermal favorability was assigned to the Permeability subsystem, which is conditioned by the presence of structures (faults and lineaments) or sets of structures that generate the necessary spaces for the rise of geothermal fluids. These features, determined by geological mapping and subsurface geophysical methods, were weighted according to their typology, age, interaction with other structures, and depth of the earthquakes associated with them.

In second place of importance was the Heat subsystem, where geochemical evidence was used (through geothermometric calculations of hot springs samples), information from wells and geophysical anomalies, which determined a participation of deep heat sources. Finally, the least weight was assigned to the Fluids subsystem, made up of hydrothermal expressions whose hydrochemical analyzes allowed deducing the participation of high enthalpy geothermal fluids.

The combination of the different maps of evidence with their respective weights makes up the final map of geothermal favorability for Area 2, in which zones or areas with distinctive characteristics are highlighted:

- Northern Zone: It is circumscribed to the region of the Santa Bárbara System and is classified as a conductive system. Normal geothermal gradients are found and deep geothermal reservoirs associated with high-angle faults that play a preponderant role in fluid conduction and/or block compartmentalization (barriers) are interpreted.
- Southern Zone: It covers the Tucumano-Santiagueña plain and is classified as a convective-conductive system. It presents anomalous geothermal gradients scattered throughout the area, with indications of upward flow of heat of mantle origin through the basement and in association with deep structures.
- Other zones likely to host blind (not outcropping) geothermal systems.

Keywords: *Geothermal Play Fairway, geothermal potential, geothermal favorability, Sierras Subandinas, northwestern Argentina.*

1. INTRODUCCIÓN

El conocimiento adquirido por el SEGEMAR sobre la metodología *Geothermal Play Fairway* en el año 2019, aplicado y detallado en la Contribución Técnica Geotermia N° 3 (Asato *et al.* 2020), permitió continuar el programa de cartografía del territorio nacional sobre demarcación de áreas con potencial geotérmico de alta entalpía. Los resultados alcanzados en la presente publicación están a disposición para su consulta por parte de autoridades nacionales de aplicación, organismos científicos y académicos o empresas interesadas en la exploración y explotación de los recursos geotérmicos de la República Argentina.

La región estudiada comprende parte de las Sierras Subandinas, la Cordillera Oriental, el Sistema de Santa Bárbara, y la Llanura Chaco-Pampeana. Abarca el este de la provincia de Jujuy, el centro de la provincia de Salta, el centro-este de la provincia de Tucumán, parte del oeste de la provincia de Santiago del Estero y un pequeño sector oriental de la provincia de Catamarca. Ocupa una superficie de 70.930 km², delimitada por un polígono definido por las coordenadas: 24°01'S – 65°28'O, 23°25'S - 65°00'O, 23°27'S - 64°10'O, 28°17'S - 64°33'O, 28°16'S - 65°36'O, 27°33'S - 66°13'O y 27°18'S - 66°13'O (Fig. 1).

Las manifestaciones termales del NOA se agrupan en dos regiones con características geológicas diferentes y responden a la tipificación de sistemas geotérmicos desarrollada por Moeck (2014) y adoptada por la *International Geothermal Association* (IGA). Las manifestaciones termales localizadas en la Puna, responden al tipo *Volcanic Field Type*; y el posible sistema geotermal profundo de la cuenca de Tucumán y su extensión en Santiago del Estero podría ubicarse dentro del modelo *Extensional Domain Type*, donde predominan fallas profundas y ambiente de corteza delgada con fluencia de calor astenosférico. No obstante, también se conciben en el Área 2 esquemas híbridos y de coexistencia de modelos geotérmicos, como aquellos bajo la influencia del dominio calórico por conducción de los sistemas *Orogenic Belt Type* (Cordillera-cum-Foreland) y con la particularidad de que en algunos sitios exista una coparticipación de corrientes de calor convectivo. En ese concepto también están incluidos los escenarios hidrotermales del Sistema de Santa Bárbara, la franja suroccidental de la Cordillera Oriental y la cuenca del río Salí entre Tucumán y el oeste de Santiago del Estero.

2. MARCO GEOLÓGICO

En el área de estudio, uno de los rasgos geológicos más sobresalientes es el límite estructural entre el sistema de Santa Bárbara y la Cordillera Oriental, integrado por frentes de corrimiento con rumbos meridianos vergentes al Este, y el límite sur de la región serrana con la cuenca del río Salí, definido por el lineamiento de Tucumán de rumbo NE – SO (Mon 1976).

La columna estratigráfica regional en el sector centro norte del Área 2 está conformada por leptometamorfitas neoproterozoicas del Complejo Puncoviscana, sedimentitas marinas del Paleozoico inferior, unidades cretácicas a paleógenas del Grupo Salta y depósitos fluviales neógenos del Grupo Orán (Fig. 2).

El ciclo Ándico se inició en el Cretácico con el desarrollo de un *rift* intracratónico (Grier *et al.* 1991), cuyas etapas evolutivas están representadas por las unidades que componen el Grupo Salta. El Subgrupo Pirgua constituyó la respuesta sedimentaria a la etapa mecánica del *rift*, con el relleno de *grabens* y *hemigrabens* limitados por fallas normales de alto ángulo.

La etapa de post *rift* estuvo dominada por procesos de subsidencia térmica regional, junto con la ingresión marina que conformó al Subgrupo Balbuena.

Las secuencias del Subgrupo Balbuena, integradas mayoritariamente por rocas carbonáticas, trasladaron los bordes de las fosas del *rift*, apoyándose en discordancia sobre rocas precámbricas y paleozoicas.

La relación de depósitos de post *rift* discordantes sobre el basamento resulta evidente en gran parte de la Cordillera Oriental, donde durante la etapa de *rift* se estructuró un alto, denominado dorsal Salto – Jujuña, mientras que, en el sistema de Santa Bárbara, ubicado al Este, las secuencias de *sinrift* están presentes rellenando fosas limitadas por fallas normales.

La diferente estructuración cretácica entre la Cordillera Oriental, que se comportó como un bloque elevado sin la presencia de fallas normales, y el sistema de Santa Bárbara, dominado por fosas tectónicas, constituyó un factor primordial de control durante la compresión andina, con la generación de corrimientos en el primer caso e inversión tectónica en el segundo.

A partir del Paleógeno sobrevino la compresión andina, con el desarrollo de sistemas de corrimientos que propagaron el frente orogénico hacia el antepaís. En sus etapas iniciales, la inversión tectónica de fallas cretácicas (Mon *et al.* 2005, Iaffa *et al.* 2011 a, Seggiaro *et al.* 2015) y la reactivación de estructuras paleozoicas (Seggiaro *et al.* 2014, Iaffa *et al.*

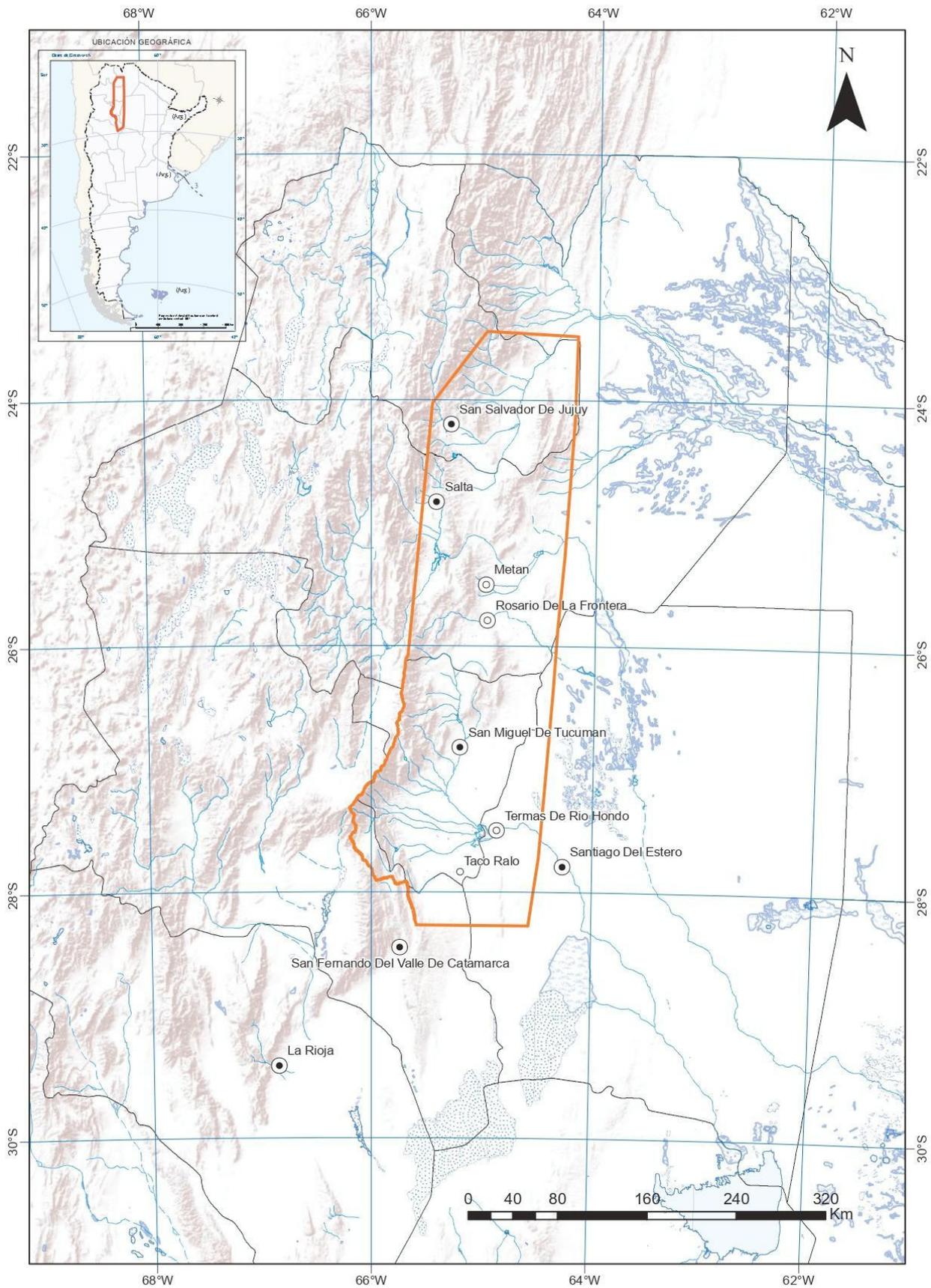


Figura 1. Ubicación del área de estudio

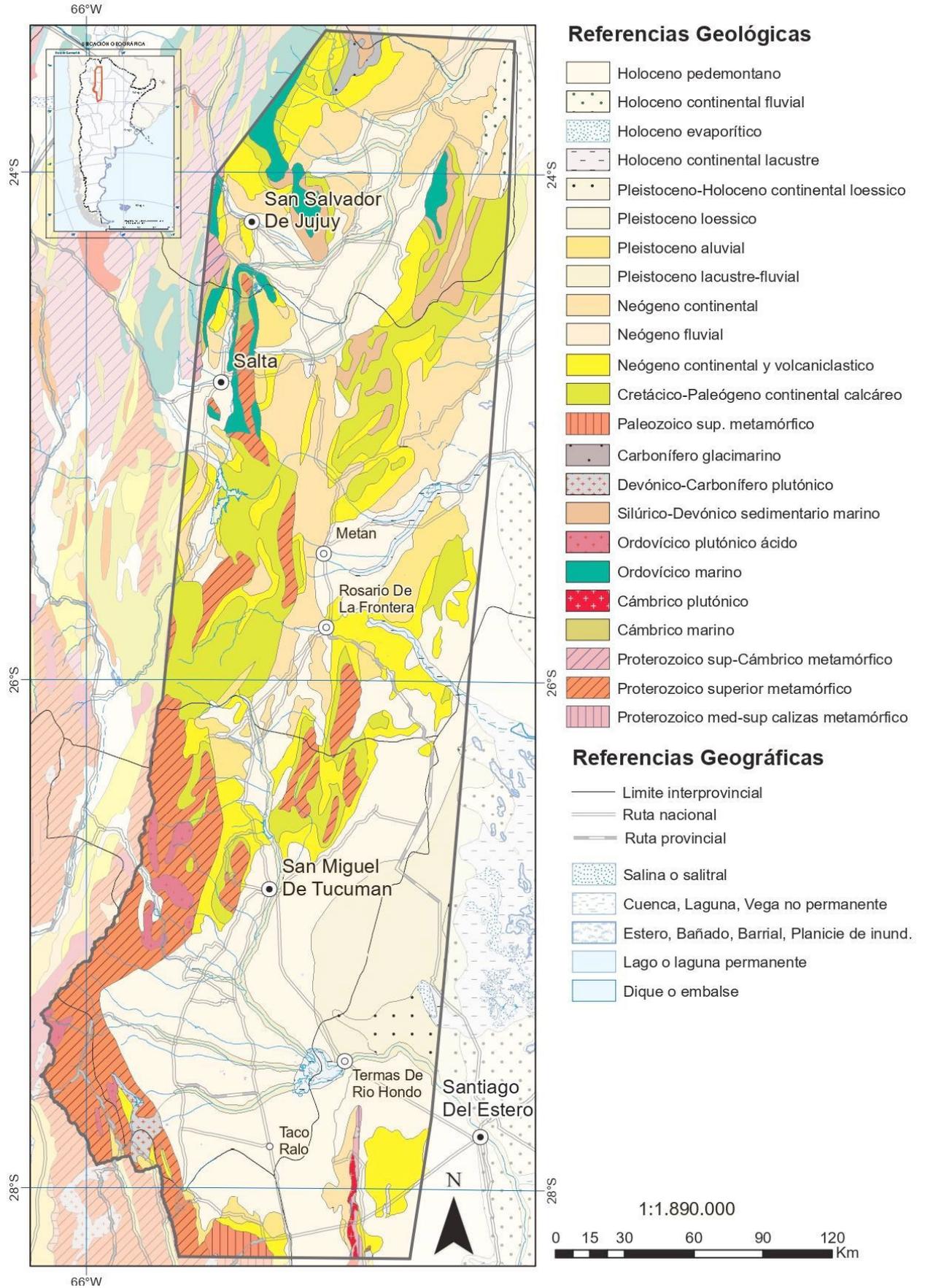


Figura 2. Geología regional del área de estudio (SIGAM, 2022)

2013), controlaron gran parte de la deformación, fragmentando la cuenca de antepaís a nivel regional (Del Papa *et al.* 2010, Hongn *et al.* 2011, Payrola Bosio *et al.* 2009).

Los depósitos de antepaís, coetáneos con la estructuración, y el avance hacia el Este de la faja plegada y fallada, están representados en la región por los ciclos fluviales grano y estrato crecientes del Grupo Orán.

Algunas fallas normales reactivadas fueron selladas por las secuencias superiores del Grupo Orán, indicando un episodio de inversión pre Mioceno medio (Del Papa *et al.* 2004), mientras que otras involucran estratos del Mioceno superior al Plioceno (Mon *et al.* 2005).

Los corrimientos alcanzaron el Sistema de Santa Bárbara en el Mioceno superior (Carrera *et al.* 2006, Carrapa *et al.* 2011), con profundidades de despegue estimadas entre 20 y 10 km (Cristallini *et al.* 1997, Kley y Monaldi 2002).

Parte de estos corrimientos registran evidencias de reactivación entre el Plioceno inferior y el Holoceno (Carrera *et al.* 2006, Carrapa *et al.* 2011). La vigencia de la deformación andina en la región se expresa también en la frecuente actividad sísmica y en los cabalgamientos que involucran depósitos cuaternarios en los valles de Lerma y de Sianca (González 2011, García *et al.* 2011, 2013, 2019, Barcelona *et al.* 2014, Arnous *et al.* 2020).

La caracterización de surgencias termales controladas por fallas profundas en la región, como en Rosario de la Frontera, Termas de Río Hondo, El Palmar y en La Quinta, entre otras, sugiere que las fallas normales cretácicas, parcial o totalmente invertidas (Iaffa *et al.* 2011 b), constituyen un rasgo crítico para el descubrimiento de nuevos sistemas geotermales. De esta manera la correcta valoración de los subsistemas permeabilidad, fluidos y calor en el área seleccionada, resulta un aporte para la orientación de futuros proyectos de exploración.

3. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS PLAY FAIRWAY

El análisis *Play Fairway* es una metodología aplicable a estudios de escala regional, utilizada en la industria petrolera, con el fin de identificar y priorizar áreas con potencial productivo, a los efectos de reducir los costos y riesgos de exploración (Fraser y Gawthorpe 2003).

Esta técnica fue adaptada para la prospección de los recursos geotérmicos por Siler y Faulds (2013),

quienes definieron como factores geológicos principales para la presencia 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 a un recurso geotermal. Entonces el análisis *Geothermal Play Fairway* es un método utilizado para estudiar un área a escala regional e identificar los rasgos geológicos que permiten caracterizar un recurso geotermal, y en este caso con posibilidad de poseer una entalpía de interés para la generación de energía eléctrica renovable. Los resultados se materializan en un mapa de potencial o favorabilidad geotérmica, producto que deberá ser validado y enriquecido con posteriores estudios de campo.

Los objetivos principales de la técnica *Geothermal Play Fairway* son:

- Identificar y mapear áreas de potencial geotérmico a nivel regional.
- Proveer elementos para la identificación de potenciales sistemas geotermales ciegos u ocultos.
- Permitir en forma concreta y objetiva la definición de sitios prioritarios de exploración de detalle, como así también establecer aquellos nuevos datos necesarios para mejorar el modelo conceptual geotérmico (geología, geoquímica, geofísica, perforaciones de exploración, etcétera).
- Reducir los costos y riesgos de exploración.

No hay una única forma de realizar el análisis *Play Fairway*, como se ha podido comprobar en numerosos estudios en los que se ha empleado esta metodología. El diseño y aplicación del método de análisis depende 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. Como novedad reciente es que esta técnica evaluativa se está comenzando a emplear a escalas de prospecto, bajo la condición de que la densidad de la información sea representativa.

3.1. METODOLOGÍA GEOTHERMAL PLAY FAIRWAY APLICADA AL ÁREA 2

Transportar los datos a un modelo de inferencias georreferenciado implicó llevar adelante las siguientes acciones:

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

Para el análisis *Play Fairway* se realizó la compilación de datos preexistentes, identificándose un conjunto de datos primarios necesarios para su implementación: imágenes satelitales específicas, datos sísmicos, mapas geológicos a distintas escalas, información estructural, hidrográfica, hidrogeológica, litoestratigráfica, y conocimiento de la dinámica tectónica, como así también la caracterización geoquímica y geotermométrica de las manifestaciones termales.

La información utilizada fue seleccionada a partir de la búsqueda de publicaciones científicas, bibliografía inédita y cartografía existente en universidades e institutos geocientíficos, y en el repositorio de publicaciones del Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR).

En lo referente a la información sísmológica se recurrió a la base de datos del Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES).

La información estructural fue generada mediante la digitalización de fallas, sobre imágenes *Google Earth*, la compilación de las publicadas en el Catálogo de Deformaciones Cuaternarias de la República Argentina desarrollado por el SEGEMAR y las Hojas Geológicas (escala 1:250.000): Ciudad de Libertador General San Martín (González *et al.* 2003), Salta (Seggiaro *et al.* 2019), Metán (Salfity *et al.* 2006), San Miguel de Tucumán (González *et al.* 2000), Concepción (Dal Molin *et al.* 2003) y San Fernando del Valle de Catamarca (Blasco *et al.* 1994). Asimismo, se empleó la base de datos del Sistema de Información Geológica Ambiental Minera (SIGAM), del Instituto de Geología y Recursos Minerales (IGRM) del SEGEMAR.

En lo que respecta a manantiales y pozos termales se tomaron los datos procedentes del Catálogo de Manifestaciones Termales del SEGEMAR (Pesce y Miranda, 2003), de estudios específicos realizados por Falcón (2004), Peralta Arnold (2013), Falcón *et al.* (2016), Peralta Arnold *et al.* (2020), pozos de gradiente geotérmico (Miranda y Pesca 2015) y todos los datos de pozos termales y cursos de agua con componente termal del informe de Scatizza y Galar (2018). Los datos de ubicación (coordenadas) fueron revisados, especialmente aquellos procedentes de informes antiguos en los que se realizaron algunas correcciones de posición de manantiales o pozos.

3.1.1. MODELO DE ANÁLISIS E INTEGRACIÓN DE DATOS

En líneas generales, los métodos de análisis digital para la obtención de mapas de potencial son clasificados en: (i) orientados a conocimiento experto y (ii) orientados a datos (Bonham-Carter *et al.* 1988). Las metodologías orientadas a conocimiento experto se basan en los desarrollos en donde un algoritmo o programa de computación trata de emular la habilidad de un ser humano para tomar decisiones o hacer valoraciones. Dentro de este grupo se tienen metodologías simples tales como el *Boolean Overlay*, que consiste en la superposición de capas en términos de verdadero o falso, y el *Index Overlay* y sus variaciones, que incluyen información acerca de la importancia de cada mapa de evidencia como indicadores directos o indirectos del recurso estudiado, en este caso el geotérmico. En el grupo de metodologías orientadas a datos se encuentran los métodos *Weight of Evidence*, *Logistic Regression*, *Neural Networks*, etc. métodos que necesitan una muestra de entrenamiento para poder funcionar y dar resultados confiables.

Para el caso particular del Área 2 se optó por utilizar un modelo de inferencias basado en el conocimiento experto según el método de *Index Overlay* (Bonham-Carter *et al.* 1988), donde se agruparon los datos según los modelos de los subsistemas de permeabilidad potencial, fluidos y calor (Siler y Faulds, 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 geotermales y todos aquellos componentes estructurales que coadyuvan a la permeabilidad, circulación y/o entrapamiento de los fluidos geotérmicos.

Para cada subsistema se tiene que cumplir:

$$Y = \sum_{i=1}^n (X_i * W_i) \div \sum_{i=1}^n W_i$$

Donde Y corresponde a cada subsistema, X_i a cada mapa de evidencia y W_i su peso correspondiente.

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

$$Z = (Y_{pp} * W_{pp} + Y_{fl} * W_{fl} + Y_c * W_c) \div (W_{pp} + W_{fl} + W_c)$$

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 correspondió a una variable independiente o elemento geológico que caracterizó al sistema geotermal. Dado que la metodología involucrada trata sobre “conocimiento experto”, los pesos asignados a cada mapa de evidencia responden a valoraciones numéricas que se deben a valoraciones en lenguaje natural. Es así que un peso igual a cero corresponde a “no favorable”, mientras que un valor equivalente a 1 ó 100, dependiendo de la escala que se elija, corresponde a “muy favorable”. Se entiende que los valores intermedios atañen a valoraciones intermedias.

Se tuvo en cuenta que al calcular el guarismo Z como una suma ponderada de factores, se generaron modelos de tipo “Voto”, es decir el valor en cada mapa de evidencia tuvo una incidencia directa en el modelo final. Si bien no fue considerado en este trabajo, una manera diferente de evaluación es considerando el modelo de inferencias basado en productos ponderados a partir de modelos de tipo “Veto”. Pero su aplicación hubiese implicado que un valor bajo de alguno de los modelos (calor, permeabilidad, fluidos) generaría valores bajos de potencial. En ese sentido la ausencia de uno de los modelos directamente anula a los otros dos, poniendo el valor del mapa de potencial en cero.

En este trabajo cada mapa de evidencia está compuesto por varias clases con distintos pesos. Se con-

signan los pesos aplicados para cada subsistema en una tabla, junto con un esquema de evidencias para permeabilidad (Fig. 3), calor (Fig. 4) y fluidos (Fig. 5). Para el cálculo final que integra permeabilidad, calor y fluidos con la ponderación correspondiente, se consigna resumiendo *Play Fairway* pesos (Cuadro 1) y esquema (Fig. 6).

4. ÁREAS DE FAVORABILIDAD GEOTÉRMICA EN EL ÁREA 2

4.1. MODELO DEL SUBSISTEMA PERMEABILIDAD

La permeabilidad valorada por la metodología *Play Fairway* está referida a la existencia de escenarios tectónicos favorables para la circulación y ascenso de fluidos desde niveles profundos de la corteza.

Con el objetivo de determinar la distribución de valores de este subsistema dentro del área de estudio, se ponderaron lineamientos, tipos de fallas, asociaciones estructurales y sismicidad, como potenciales generadores de permeabilidad secundaria asignándoseles un peso (Cuadro 2).

Si bien la permeabilidad primaria de las unidades litoestratigráficas cumple un rol esencial en el almacenamiento de fluidos de los reservorios geotérmicos, el método *Geothermal Play Fairway* solo valora la

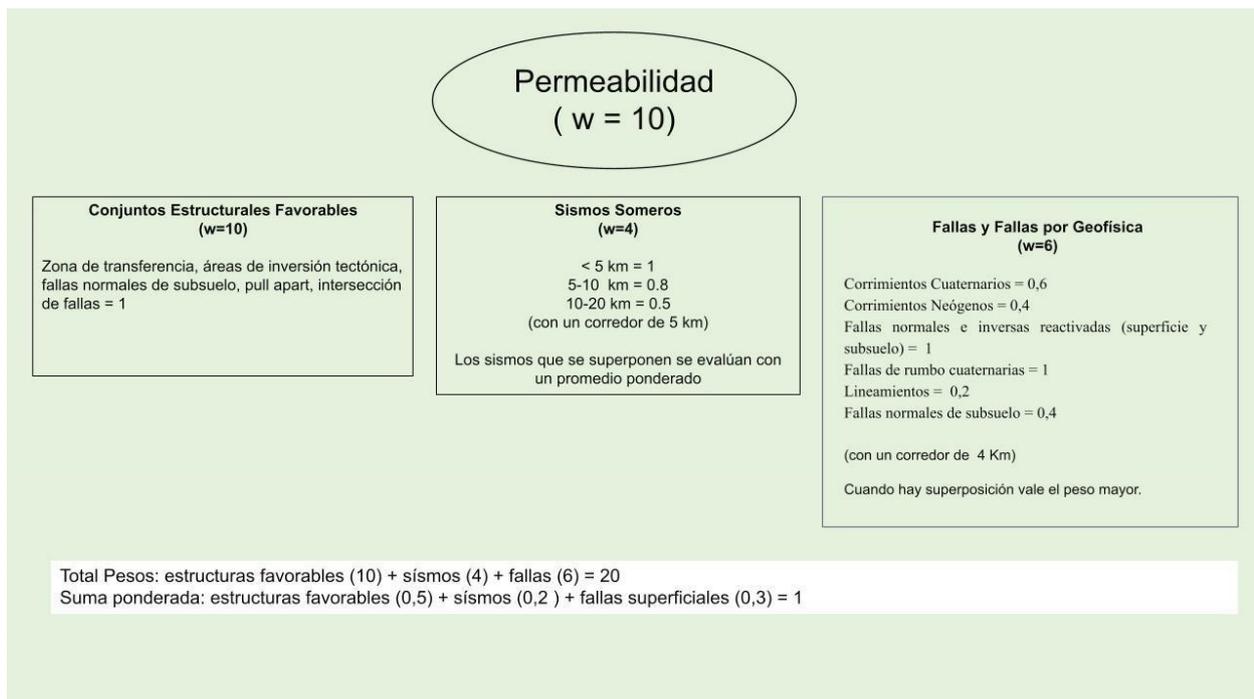


Figura 3. Esquema de pesos para el subsistema Permeabilidad

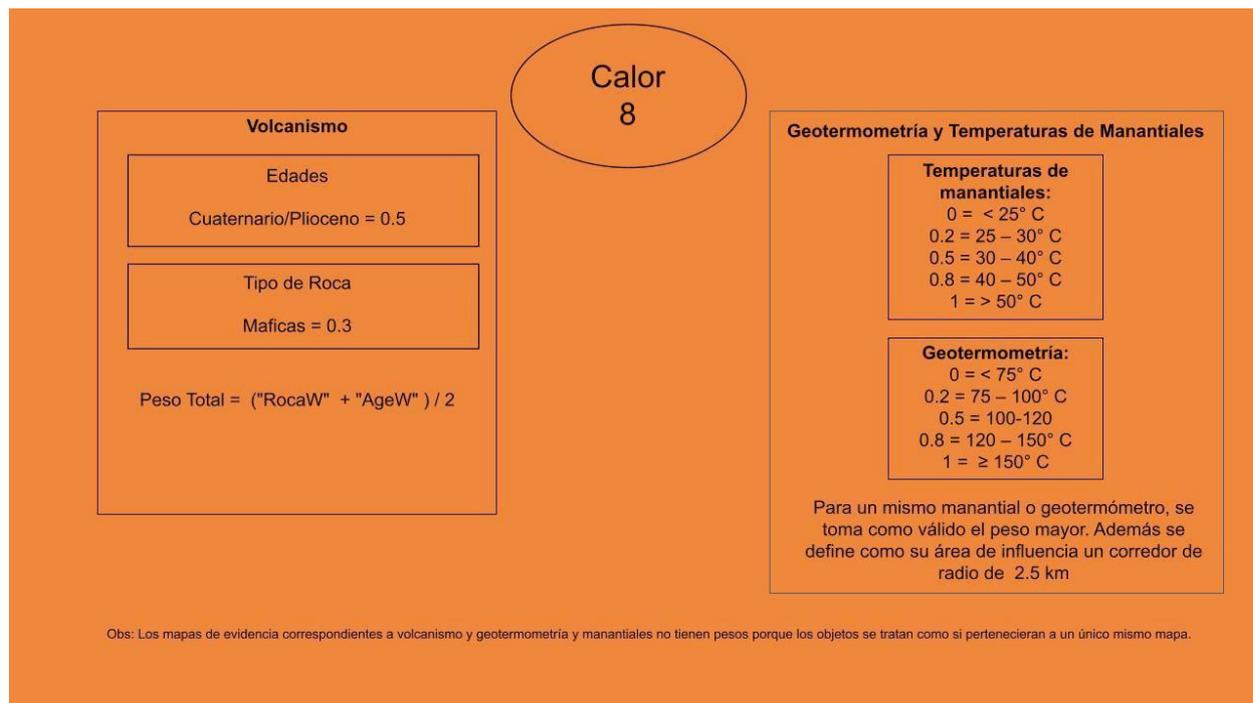


Figura 4. Esquema de pesos para el subsistema Calor

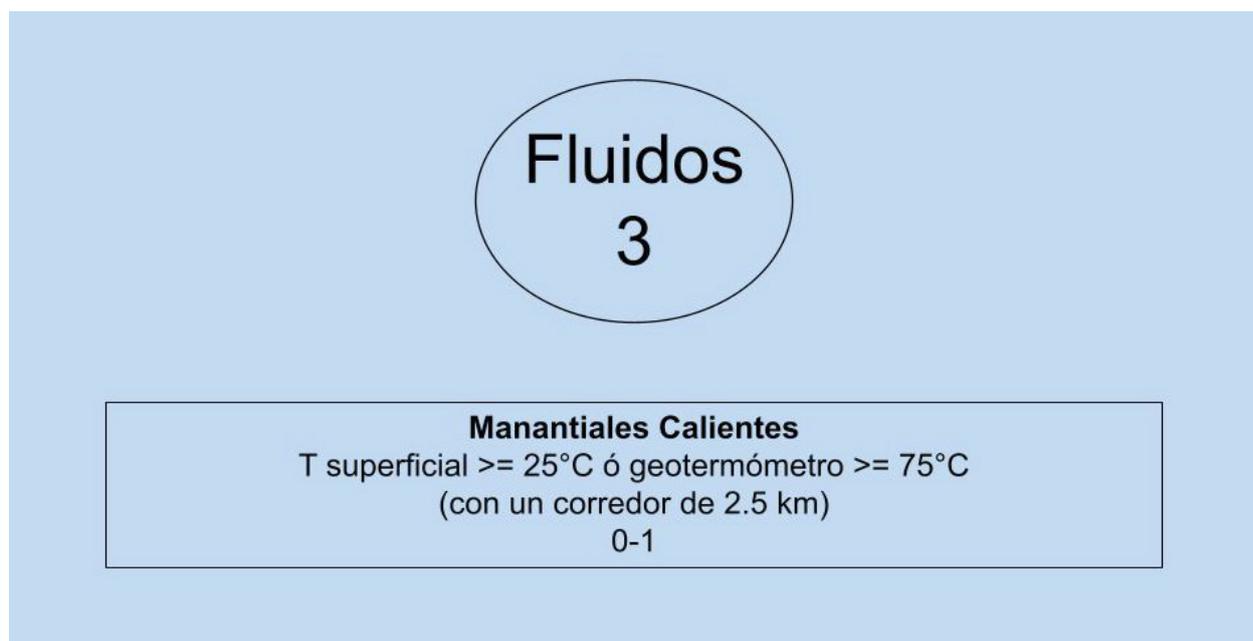
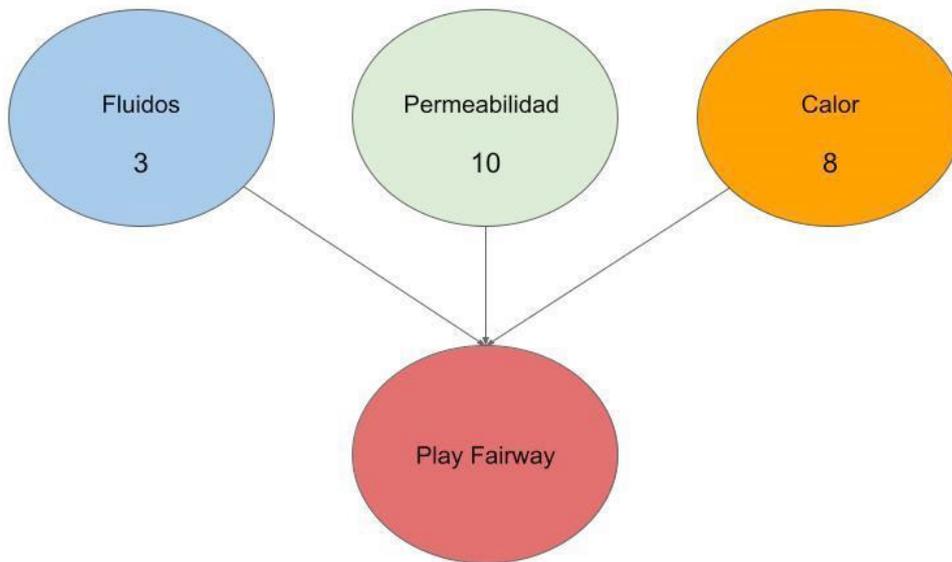


Figura 5. Esquema de pesos para el subsistema Fluidos

Modelo de Subsistema	Peso	Peso Normalizado
Permeabilidad	10	0,48
Calor	8	0,38
Fluidos	3	0,14

Cuadro 1. Pesos por modelo de subsistema



Total = Fluidos (3) + Permeabilidad (10) + Calor (8)
 Suma ponderada = Fluidos (0,14) + Permeabilidad (0,48) + Calor (0,38) ~ 1

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

Permeabilidad		
Mapa de Evidencia	Clases	Peso por clase
Fallas Cuaternarias y Fallas Detectadas por Geofísica (con un corredor de 4 km). Se superponen las áreas así definidas y se le da prioridad al valor más alto.	Corrimientos Cuaternarios	0,6
	Corrimientos Neógenos	0,4
	Fallas normales e inversas reactivadas (superficie y subsuelo)	1
	Fallas de rumbo cuaternarias	1
	Lineamientos	0,2
	Lineamientos	0,4
Sismos Someros (< 20 km de profundidad y con un corredor de 5 km). Los datos se normalizan a través de un promedio ponderado.	<5 km	1
	5-10 km	0,8
	10-20 km	0,5
Conjuntos estructurales favorables	Zonas de transferencia	1
	Zonas de Inversión tectónica	1
	Intersección de fallas	1

Cuadro 2. Pesos para cada clase por mapa de evidencia del subsistema Permeabilidad

potencialidad de las fracturas en la circulación de fluidos hacia la superficie, dejando el análisis de permeabilidades de rocas sello y la propia del reservorio para etapas posteriores de exploración (estudios sobre mecánica de circulación de fluidos en los reservorios).

4.1.1. LINEAMIENTOS

Están definidos por rasgos estructurales, topográficos, morfológicos y/o fisiográficos alineados. Su persistencia regional constituye una evidencia indirecta de control estructural presumiblemente asociado a anisotropías del basamento y/o a sistemas de fallas profundas de magnitud cortical.

Dado la incertidumbre sobre el origen y la edad de estos lineamientos, se consideró una valoración de permeabilidad relativamente baja de 0,2 puntos.

4.1.2. CORRIMIENTOS

Los corrimientos cuaternarios se observan preferentemente en depósitos de pie de monte o abanicos aluviales acumulados en el bloque yacente de los corrimientos neógenos, en su mayoría emergentes al pie de las sierras. Presentan geometrías lítricas de bajo ángulo y nivel de despegue somero.

La asociación de corrimientos antiguos, inactivos en su tramo superior, que transfieren su desplazamiento en atajo hacia corrimientos cuaternarios, constituye un escenario tectónico favorable, que presupone la reapertura de fracturas en zonas de daño, inferiores a intermedias de los corrimientos neógenos.

Los corrimientos cuaternarios fueron valorados con un puntaje intermedio (0,6 p) debido a que, aun sin alcanzar niveles profundos, la actividad neotectónica sugiere la potencial reapertura de fracturas antiguas.

Con un área de influencia (*buffer*) de 2 km la asociación cercana de corrimientos neógenos (con valor de 0,4 p) y cuaternarios alcanzaría la valoración máxima (1 p).

Las fallas cuaternarias de otro tipo o con sentido de desplazamiento desconocido fueron valoradas de igual manera que los corrimientos.

4.1.3. FALLAS NORMALES REACTIVADAS

Las fallas normales generadas durante el desarrollo del *rift* cretácico presentan en general geometría lítrica, con alto ángulo en su tramo superior, conectando niveles profundos de la corteza con

la superficie. Durante la compresión andina en el Cenozoico gran parte de estas fallas se reactivaron de manera selectiva, dependiendo su orientación en función de los vectores de esfuerzos.

En particular las fallas que presentan rumbos aproximadamente perpendiculares al esfuerzo compresivo regional, se reactivan por inversión tectónica de falla normal a inversa, siguiendo la misma superficie o zona de falla y/o generando nuevas fallas que compensan los desplazamientos.

La recurrencia de movimientos sobre las mismas zonas de falla, amplía las zonas de daño con la reapertura y la generación de nuevas fracturas. Si bien en gran parte de estas fallas no fue posible determinar su actividad neotectónica, se asume que la ocurrencia de sismos recientes constituyó un factor favorable para mantener las fracturas abiertas. Esta condición sumada a su geometría original de alto ángulo, que alcanza niveles profundos de la corteza, convierte a las fallas con inversión tectónica en uno de los conductos más eficientes para la circulación de fluidos termales, por lo que fueron ponderadas con el máximo puntaje (1 p).

4.1.4. FALLAS DETECTADAS POR GEOFÍSICA

Diversos autores han analizado, interpretado y participado en prospecciones geofísicas para determinar la estructuración del subsuelo de la zona de estudio (Pomposiello *et al.* 1993, Iaffa *et al.* 2011a y b, Iaffa *et al.* 2013, Conde Serra 2019, Guevara *et al.* 2020, entre otros), con resultados variados y en diversas escalas, han sido publicados en revistas científicas, contribuciones técnicas e informes.

Los tres métodos principales para la detección y caracterización de las fallas profundas fueron gravimetría, sísmica de reflexión y magnetotélurica. Teniendo en cuenta que estas fallas suponen vías de comunicación de fluidos entre sectores profundos de las cuencas con sectores más someros o incluso superficiales.

Las fallas profundas detectadas por geofísica pertenecen en su mayoría al *rifting* cretácico y afectan al basamento de la cuenca. La profundidad de estas fracturas puede superar los 10 kilómetros y las mismas se pueden dividir en tres grupos:

4.1.4.1. Fallas normales reactivadas

Presentan las características descritas previamente. Tienen rumbo aproximado N-S, con alta inclinación hacia el E y O. Corresponden a las fallas de borde de *grabens* y *hemigrabens* cretácicos reac-

tivadas con movimiento reverso (inversión tectónica) durante el Plioceno-Cuaternario. Esta reactivación quedó registrada en los estratos de crecimiento circunscriptos a las adyacencias de los anticlinales de inversión, que se suelen formar debido al movimiento inverso de las fallas. Generalmente estas estructuras se ubican hacia los bordes de las subcuencas del Área 2. Se ponderan con el puntaje máximo (1 punto).

4.1.4.2. Fallas normales

Estas estructuras difieren de las anteriores en que no presentan evidencias de reactivación inversa. Son fallas con rumbo NE-SO y alta inclinación hacia SE o NO. Identificadas mayormente en el sector central de la subcuenca de Tucumán. Se ponderan con un puntaje de 0,4 puntos.

4.1.4.3. Fallas Inversas

Fallas inversas de alto ángulo con rumbo N-S a NNE-SSO e inclinación mayormente al E, de edad pliocena-cuaternaria, indicadas por estratos de crecimiento modernos. En su extremo superior pueden observarse flexiones monoclinales o anticlinales abiertos. Se interpretan como reactivaciones de antiguas zonas de debilidad cortical y presentan características estructurales similares a fallas normales invertidas.

Como se mencionó previamente, la tectónica andina fue la responsable de reactivar o generar las estructuras contraccionales (fallas inversas y fallas normales reactivadas) también en profundidad, sugiriendo que los procesos de fracturación han tenido una probable conexión subsuelo-superficie. Se ponderan con puntaje de 1 punto.

4.1.5. ASOCIACIONES ESTRUCTURALES

Al tratarse de una región donde las aguas termales están relacionadas a fallas que interceptan reservorios-acuíferos profundos, la determinación de asociaciones estructurales con permeabilidad favorable, constituye un factor preponderante para la detección de nuevos sistemas geotermales y zonas con potencialidad geotérmica.

Las asociaciones estructurales seleccionadas se basaron en las observadas en los campos geotermales reconocidos en el Área 2. De tal forma fueron seleccionados 3 sistemas con el máximo puntaje de favorabilidad (p): intersecciones de fallas, zonas con inversión tectónica y zonas de transferencia.

Las asociaciones de intersecciones de fallas y de inversión tectónica son dominantes en el Área 2,

por ejemplo, en el Sistema de Santa Bárbara, donde se alojan campos geotermales reconocidos, entre los que se destacan Rosario de la Frontera, El Palmar, La Quinta y Pozo Siete Aguas.

Por otro lado, los sectores de transferencia están representados en la llanura tucumano santiagueña por el sistema geotérmico presente en la zona de Taco Ralo, Villa Río Hondo y Termas de Río Hondo.

4.1.6. SISMICIDAD

Los sismos someros, con hipocentros de profundidad inferior a los 20 kilómetros, fueron considerados como potenciales generadores de permeabilidad reciente, mediante la reactivación de fallas cuaternarias y/o la reapertura de fallas antiguas.

Se valoraron con diferentes puntajes tres rangos de profundidades de hipocentros. Considerando que los más someros tienen mayor incidencia en la reapertura de las fracturas que conectan los reservorios geotermales con la superficie, los puntajes otorgados fueron: de 0 a 5 km: 1 p, de 5 a 10 km: 0,8 p y de 10 a 20 km: 0,5 puntos.

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

El cálculo final del subsistema Permeabilidad se consigna en un mapa de resultados (Fig. 7).

4.2. MODELO DEL SUBSISTEMA CALOR

En el sector norte del Área 2, en el ámbito de las manifestaciones termales yacentes en Sierras Subandinas, la fuente de calor no presenta relación con intrusivos ígneos o cámaras magmáticas. El calentamiento de las aguas termales se produciría entonces por la interacción de aguas de origen meteórico con rocas permeables a profundidades significativas. Este modelo hidrotermal fue propuesto para las termas de La Quinta y El Palmar (Claros, 2020), El Sauce (Chiodi *et al.* 2016) y Rosario de la Frontera (Seggiaro *et al.* 2015, Chiodi *et al.* 2015). No obstante, en el caso de Rosario de la Frontera se comprobó además la contribución de gases de origen mantélico (helio), vinculados a fracturas profundas que probablemente conecten el manto con el reservorio (Chiodi *et al.*, 2015). En lo referente al sector sur del Área 2, las evidencias sobre las fuentes de calor se determinaron a diferentes escalas.

La evidencia de una fuente de calor que impactaría en todo el basamento de la cuenca artesiana de Tucumán y su extensión en Santiago del Estero se deduce de manera indirecta a través de pros-

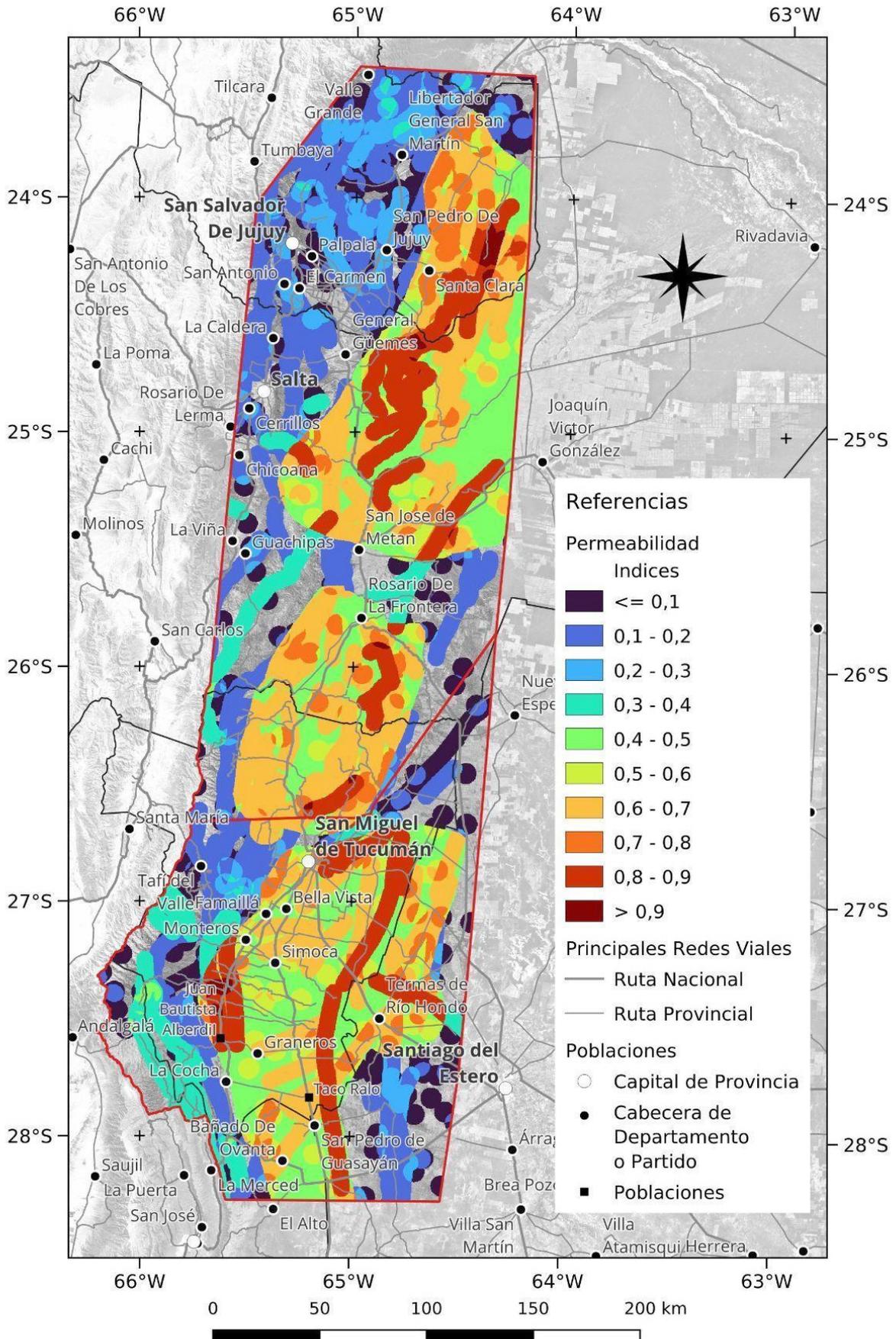


Figura 7. Mapa de resultados del subsistema Permeabilidad.

pección magnetotélúrica (MT) de largo período (Baldis *et al.* 1983 y Pomposiello *et al.* 2002) y analizado desde el punto de vista geotérmico por Conde Serra (2019). Al respecto se ha hallado una unidad conductiva de fondo a una profundidad no mayor a los 10 km que indicaría una fluencia ascendente de calor de origen mantélico. Con ello se explican los gradientes geotérmicos anómalos hallados en esta región del Área 2. A manera de ejemplo se citan los estudios desarrollados por el SEGEMAR en una zona de confluencia de fallas muy profundas ubicada en la localidad de Villa Río Hondo, en la provincia de Santiago del Estero, en donde los registros median los 10,5°C cada 100 m (con un pico de 13°C c/100 m) de profundidad (Fig. 8) (Miranda *et al.* 2015).

En el sector sur del Área 2 se destaca la presencia de un acuífero termal somero y de baja entalpía como unidad acuífera superficial que recibe el impacto calórico profundo y está reconocido en las locali-

dades de Villa Río Hondo, Termas de Río Hondo y Taco Ralo, que presentan las temperaturas más significativas (Falcón 2004).

En el subsistema Calor del Área 2 la única expresión magmática neógena registrada en el área de estudio son las “lavas de Antilla”. Este complejo volcánico de edad pliocena (circa 4.7 Ma), está representado por rocas máficas alcalinas derivadas de un manto subcontinental deprimido (Gioncada *et al.* 2010). La importancia de este complejo radica no en el calor que pueda aportar una hipotética cámara magmática ya que por el tiempo transcurrido estaría extinguida, sino en la presencia de fracturas profundas, potencialmente reactivadas por neotectónica, que conectan al manto con la superficie.

4.2.1. GEOTERMOMETRÍA

Calcular la geotermometría en el modelo del subsistema calor es de suma importancia ya que

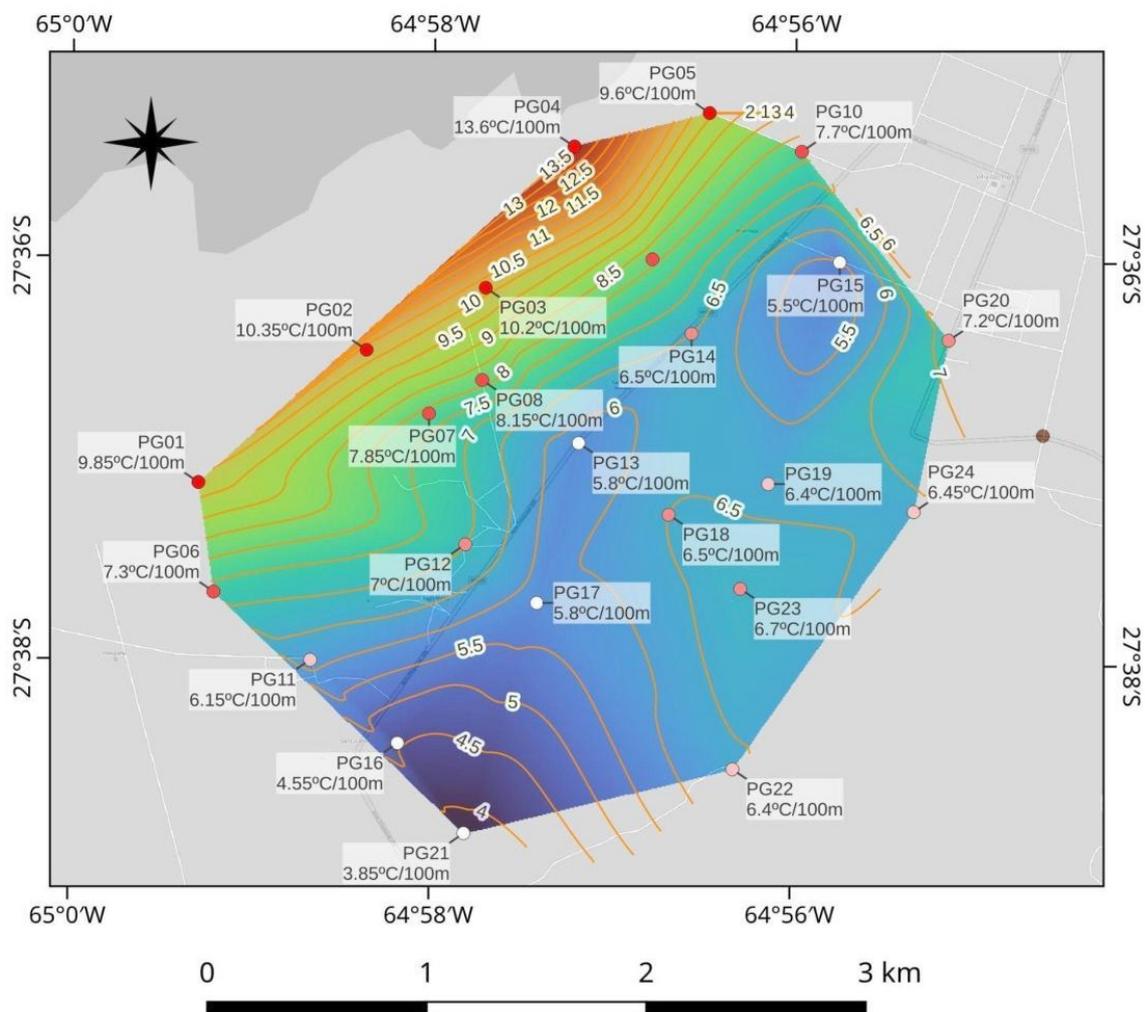


Figura 8. Mapa de Gradiente generado a partir de datos de Miranda y Pesce (2015), Villa Río Hondo. Interpolación propia realizada por el método de triangulación de Delaunay.

estas temperaturas indirectamente permiten estimar el potencial de los sistemas geotermales y la condición térmica de sus reservorios. El diagrama de Giggenbach (Fig. 9) permite observar cuales muestras caen en el campo de equilibrio total, equilibrio parcial y el de aguas inmaduras; como así también cuales tendrían una mayor componente meteórica (puntos más cercanos al vértice de Mg = 0).

Este análisis ayuda a interpretar qué muestras son las más apropiadas para calcular las temperaturas con geotermómetros catiónicos (las ubicadas en el campo de equilibrio parcial) y cuales con geotermómetros de sílice. Estos últimos se utilizan generalmente para aguas inmaduras y en el caso del área de estudio, para las que a su vez presentan mayor temperatura de surgencia. Ya que se infiere que estos geotermómetros serían los más representativos del sistema geotermal profundo, por la conexión con fracturas como en el caso de los manantiales, como por la intercepción de acuíferos termales, como en las perforaciones.

No obstante, se observó una sobrestimación y subestimación de las temperaturas en algunos sitios termales, dado que en muchos casos es probable la mezcla de aguas de diferentes acuíferos.

Los geotermómetros se calcularon ingresando los elementos químicos en la tabla *Liquid Analysis V3* (Powell y Cumming 2010) la cual tiene las fórmulas predefinidas para los geotermómetros catiónicos (Na, K, Ca, Mg) y los de sílice.

Inicialmente se aplicó el geotermómetro de cuarzo conductivo a estas medidas representativas, pero en el caso de temperaturas inferiores a los 120 °C se utilizó en su lugar el geotermómetro de calcedonia (conductivo). Los resultados alcanzados al momento en base al nivel de investigación indican que la temperatura de equilibrio de los sistemas geotérmicos del Área 2 están dentro del rango de 60 a 170 °C. El gráfico de la figura 6, también confirma que las temperaturas de los reservorios estimadas estarían por debajo de los 200 °C. Cabe aclarar que estas temperaturas son solo indicativas, debiendo realizar

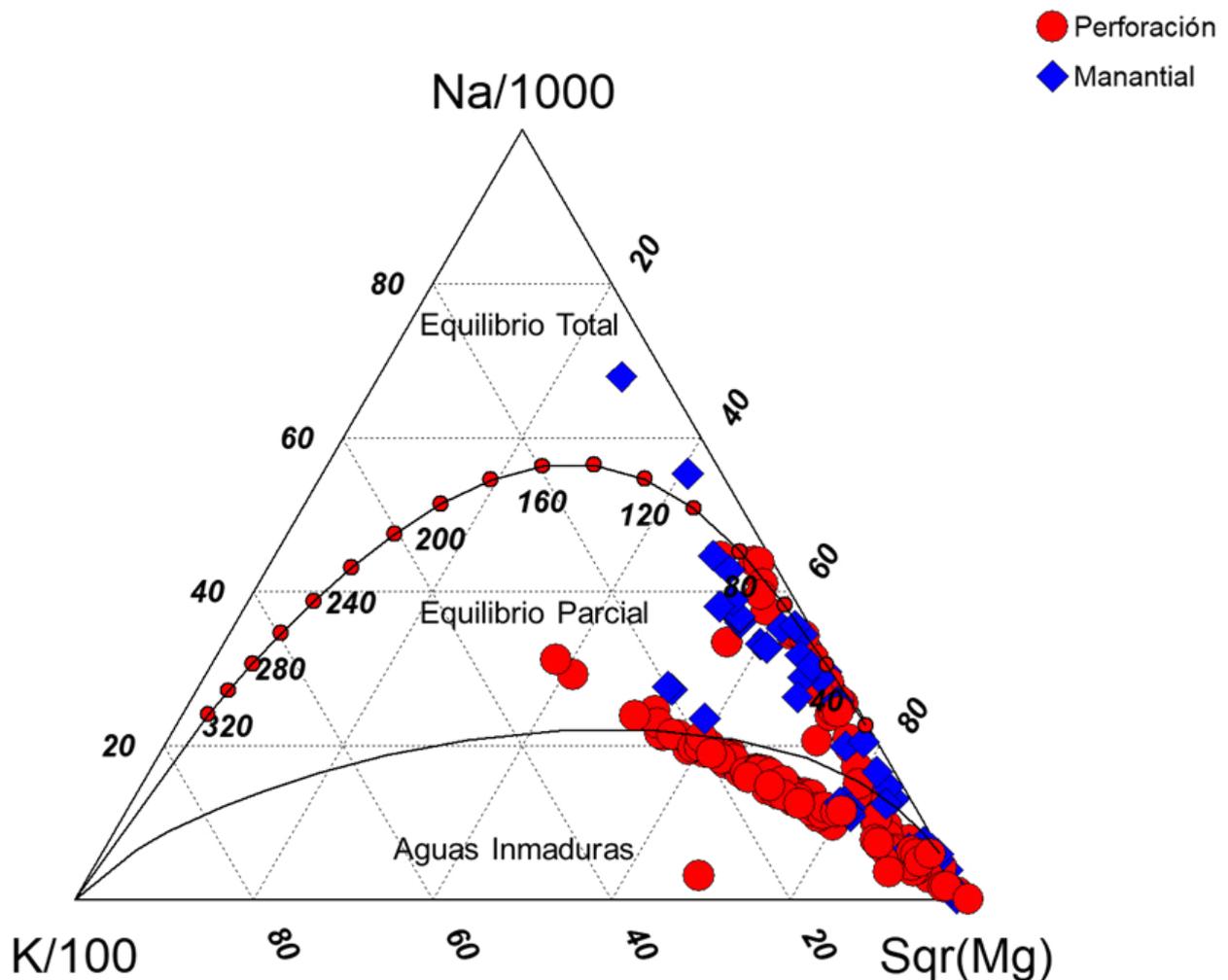


Figura 9. Diagrama triangular de Giggenbach

geotermometría de equilibrio multicomponentes para poder corroborar estos datos.

4.2.2. RANGOS EMPLEADOS EN LA DISTRIBUCIÓN DE PESOS

En el subsistema Calor las temperaturas obtenidas de los geotermómetros son las utilizadas para establecer las clases y los pesos por clases (Cuadro 3), y el resultado del subsistema se despliega en un mapa (Fig. 10). Se asignó un peso nulo a todas las muestras analizadas con temperaturas menores a 75 °C, ya que tales temperaturas no serían adecuadas para generar energía eléctrica, ni siquiera con sistemas de ciclos binarios. En presencia de temperaturas por encima de los 120 y 150 °C el sistema geotérmico se denomina de alta entalpía, e involucra el rango de temperaturas que permite generar electricidad a menor costo y de forma más eficiente; por ello, el peso definido para éste rango es mayor (0,8 y 1).

También se tuvo en cuenta la temperatura medida *in situ*, considerando que un agua termal es aquella que presenta valores por encima de los 25 °C, teniendo en cuenta el promedio de las temperaturas anuales de toda el Área 2. A todas las muestras que

se manifiestan con temperaturas menores a 25 °C (no termales) se le asignó un peso de 0, dando un mayor valor a las que se encuentran por encima de 30 y 50 °C (0,5 y 1 respectivamente) considerando que a mayor temperatura, mayor puede ser el calentamiento en profundidad y por consiguiente mayor la probabilidad de estar en presencia de un sistema geotermal.

4.3. MODELO DEL SUBSISTEMA FLUIDOS

El modelo del subsistema de fluidos está representado principalmente por aguas termales procedentes de manantiales surgentes, aguas de mezcla, pozos construidos para la captura específica de agua termal y pozos de suministro de agua con participación de acuíferos termales. Se consideró fluidos con influencia geotermal aquellos con temperatura de surgencia ≥ 25 °C y geotermometría ≥ 75 °C asignándole un peso por clase de 1 (Cuadro 4), con los resultados volcados en un mapa del subsistema (Fig. 11).

Se recopilaron un total de 233 datos que incluyen manantiales y perforaciones, todos ellos obtenidos de diferentes publicaciones, trabajos inéditos e in-

Calor		
Mapa de Evidencia	Clases	Peso por clase
Volcanismo Peso total = (Edad + Roca) / 2 Con un corredor de 2,5 km.		
Volcanismo (por edades)	Plioceno	0,5
Volcanismo (por tipo de roca)	Máfica	0,3
Geotermometría y Temperatura de Manantiales (el mapa de evidencia se obtiene por superposición de un corredor de 2,5 km y el máximo de ambos valores)		
Manantial Caliente y Pozo Termal	<25°C	0
	25-30°C	0,2
	30-40°C	0,5
	40-50°C	0,8
	>50°C	1
Geotermometría	<75°C	0
	75-100°C	0,2
	100-120°C	0,5
	120-150°C	0,8
	≥ 150 °C	1

Cuadro 3. Asignación de pesos al subsistema Calor.

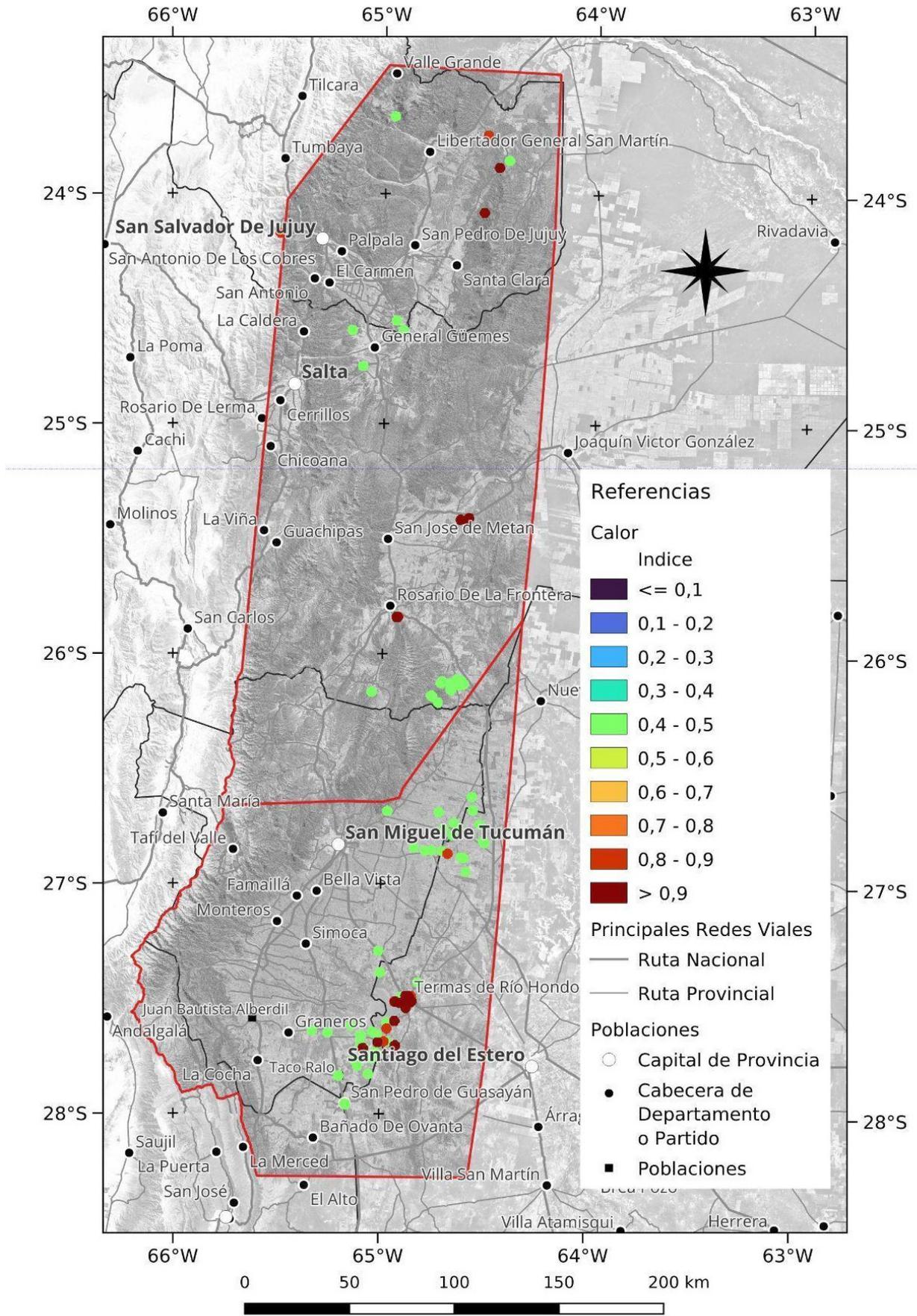


Figura 10. Mapa del modelo del subsistema Calor.

Fluidos		
Mapa de Evidencia	Clases	Peso por clase
Manantiales calientes Con un corredor de 2,5 km.	Temp superficial $\geq 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	1
	Geotermómetro $\geq 75\text{ }^{\circ}\text{C}$	

Cuadro 4. Asignación de pesos al subsistema Fluidos.

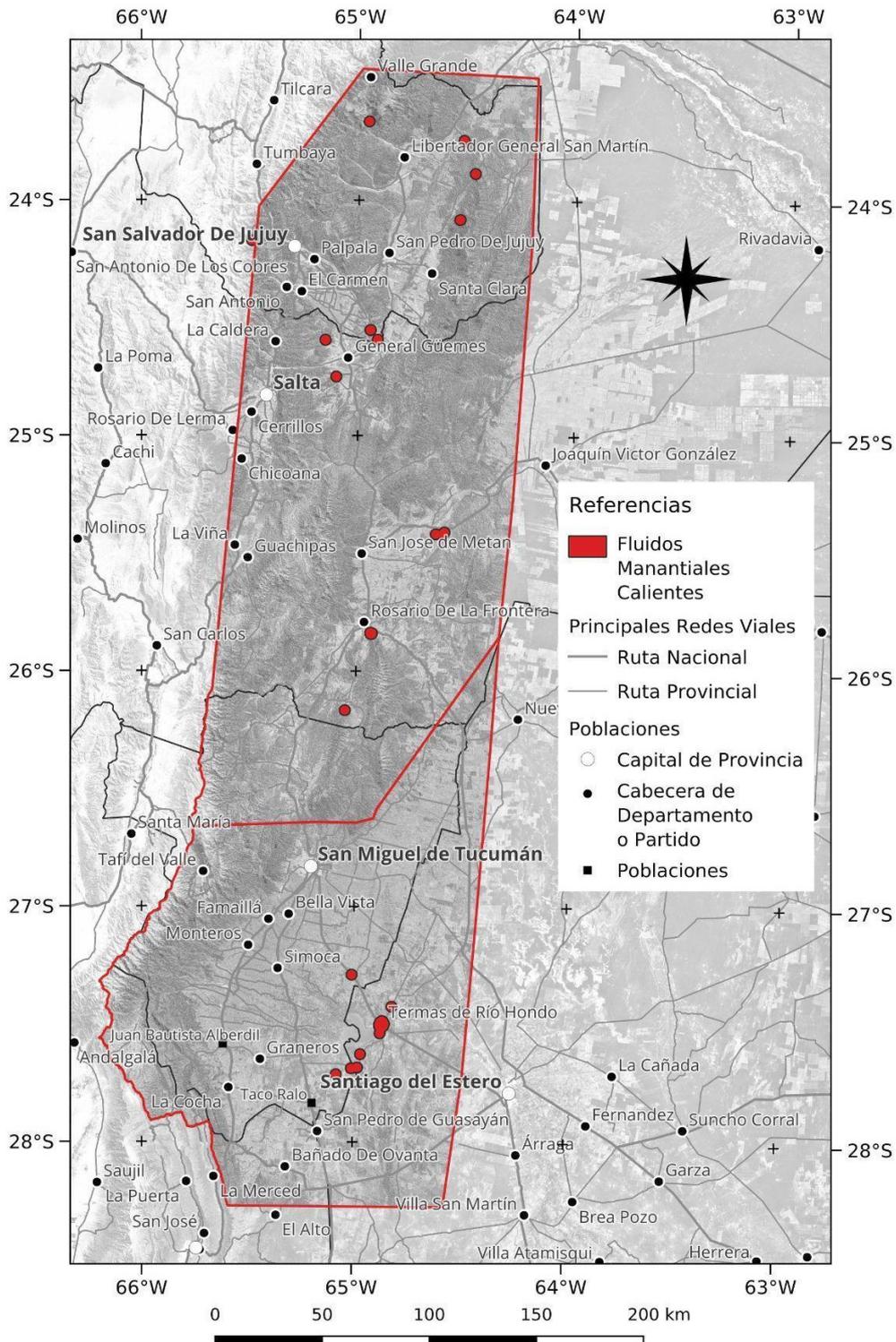


Figura 11. Mapa del modelo del subsistema Fluidos.

formes técnicos de instituciones públicas y privadas (Boujon *et al.* 2019; Crincoli y Pesce (2001); Pesce y Miranda (2003); Chiodi *et al.* (2016); Moreno Espelta *et al.* (1978); Chiodi *et al.* (2015); Scatizza y Galar (2018); Peralta Arnold *et al.* (2020); Vergara *et al.* (1998); Avellaneda (2014); INTA (2016); García (2005); SAT (2015); Falcón (2004) y DPA (2015). La información colectada fue muy variable, ya que algunos no contaban con datos constructivos del pozo, medición de parámetros hidráulicos, fisico-químicos, ni análisis hidroquímicos. Respecto a los manantiales también se encontraron localizaciones imprecisas, faltante de parámetros físicos y análisis químicos. Debido a ello, se realizó un filtrado de la información, seleccionado sólo aquellos sitios que tenían al menos los datos de cationes y aniones mayoritarios (necesarios para estimar la geotermometría) y la temperatura de surgencia. Luego se calculó el balance iónico, aceptando como muestras confiables aquellas que no superan el 10% de error ($\% \text{ error} = (\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}) * 100 / (\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones})$). Por otra parte, algunos sitios fueron

relocalizados geográficamente mediante *Google Earth*, no obstante, hay puntos cuya posición respeta la expresada originalmente en la bibliografía. En el caso de que un mismo punto de análisis haya sido tratado por diferentes autores, el criterio aplicado fue el de escoger aquel que contaba con mayor información o el proveniente del trabajo más reciente.

4.3.1. HIDROQUÍMICA

Respecto a los parámetros físico-químicos en el Área 2, la información recopilada manifiesta valores de conductividades eléctricas (CE) entre 200 a 15180 $\mu\text{S/cm}$, pH entre 5,50 y 9,76 y temperaturas entre 22 a 90,5 °C (Ver ANEXO V).

Como se puede apreciar en el siguiente diagrama de Piper (Fig. 12) las muestras se agrupan en los tipos cloruradas sódicas-potásicas, bicarbonatadas cálcicas, sulfatadas - bicarbonatadas sódicas y cloruradas - sulfatadas sódicas. Estas diferencias químicas pueden deberse a la circulación de los fluidos por estratos sedimentarios de diferentes litologías.

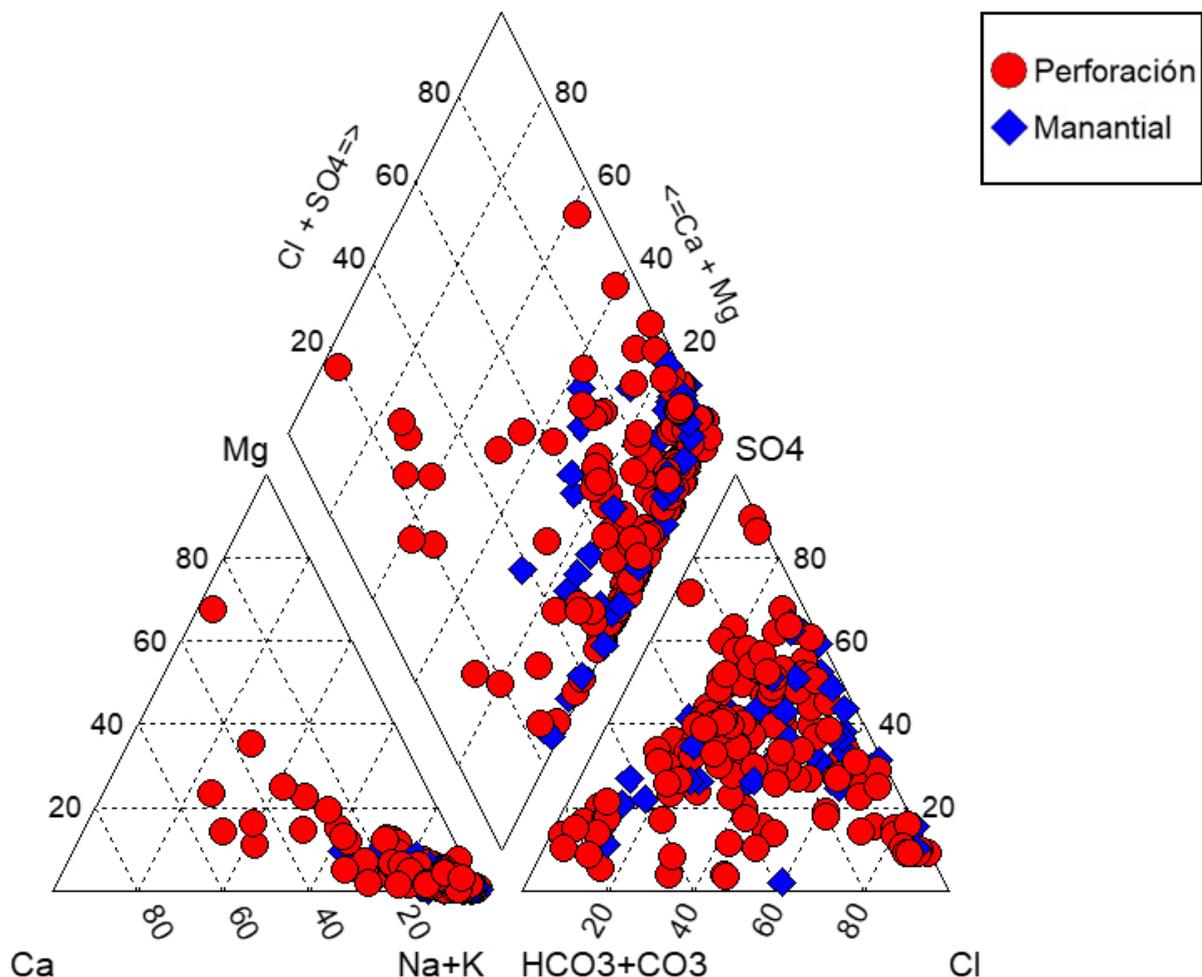


Figura 12. Diagrama Piper para mostrar los tipos de aguas

5. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

El método *Play Fairway*, fue aplicado con la finalidad de detectar blancos de interés geotérmico en un área que abarca dos regiones con morfologías diferenciadas y contrastantes; el sistema de Santa Bárbara, compuesto por cordones montañosos y valles intramontanos y la llanura Tucumano – Santiagueña, solo interrumpida por la sierra de Guasayán al sur de la localidad de Río Hondo.

Los resultados obtenidos se basaron en información específica compilada de la bibliografía y cartografía preexistentes, de modo que la distribución de potencialidades generadas estuvo fuertemente condicionada por el volumen, calidad y pertinencia de los datos conjugados.

En la cuenca de Tucumán y su extensión en la provincia de Santiago del Estero el 97% de las evidencias termales se registró en perforaciones que interceptan acuíferos calientes o mezcla de acuíferos calientes y fríos con temperaturas medias de 40 °C. Por su parte, en el área serrana que abarca las provincias de Salta y Jujuy, el 99% de las fuentes termales corresponde a manantiales con promedios de temperaturas entre 40 °C y 50° centígrados.

El subsistema de Permeabilidad basado principalmente en tipos de fallas y registros sísmicos presenta el mayor peso de los tres subsistemas con un valor de ponderación 0,48, porque no solo se constituye en una evidencia tangible, sino que en el contexto geológico del Área 2 es determinante para la existencia de sistemas geotérmicos activos. Este subsistema muestra una marcada diferenciación de la zona serrana con exposición de fallas terciarias y cuaternarias y abundante presencia de focos sísmicos, con respecto de la zona de la llanura tucumano santiagueña en donde, exceptuando la sierra de Guasayán, las fallas fueron detectadas mediante estudios geofísicos y escasos registros sísmicos.

El subsistema Calor fue considerado de manera indirecta en base a estimaciones geotermométricas superiores a 75 °C procedentes de análisis geoquímicos de aguas termales. Por otra parte, deduciendo la existencia de fuentes de calor a partir de la identificación de anomalías geofísicas asociadas que fueron halladas a profundidades subcorticales (Febrer *et al.* 1982; Miró 2008, Pomposiello *et al.* 2000 y 2002 b). Con todo ello se conformó un valor total de ponderación de 0,38.

Y finalmente el subsistema Fluido, basado en temperaturas por encima de los 25 °C medidas *in*

situ, presentó el menor peso con un valor total de 0,14. Al respecto, ha sido limitada la determinación de la presencia de fluidos geotérmicos de origen profundo mediante geoquímica y nula la existencia de alteraciones hidrotermales conexas.

A partir de los valores ponderados de calor, permeabilidad y fluidos se elaboraron mapas específicos para cada subsistema, que luego fueron integrados en forma conjunta para la construcción de los mapas de potencial (Fig. 13) y mapa de favorabilidad geotérmica, utilizando el método *Index Overlay* (Bonham-Carter *et al.* 1988). Se obtiene como resultado una zonificación gradada colorimétricamente que representa los sitios con diferente potencial geotérmico. Para una mejor discriminación de las áreas de potencial, el resultado obtenido fue sometido a una clasificación utilizando la fórmula de Jenks de saltos naturales. De esta manera se genera un mapa en donde los valores de potencial obtenidos son agrupados en clases con varianza reducida, mientras que por otro lado se maximiza la varianza del conjunto completo de datos, logrando de esta manera una mejor separación y visualización de las agrupaciones de datos.

El mapa de áreas de favorabilidad geotérmica (Fig. 14) se generó seleccionando las clases más significativas del mapa de potencial, es decir las cuatro clases mayores o iguales a 0,40, a las cuales se les asignó valores de: favorabilidad posible (0,40-0,45), intermedia (0,45-0,70) y alta (mayor que 70).

Del análisis comparativo de los mapas de cada subsistema con los resultantes mapas de favorabilidad, se desprende que las áreas que muestran valores con mayor potencial geotérmico en la región están vinculadas básicamente a fallas profundas con inversión tectónica en la zona que abarca el sistema de Santa Bárbara (Zona Norte) y a sectores con gradientes anómalos por ascenso de flujo calórico profundo sumado a la presencia de fallas en el subsuelo, en la zona de la llanura Tucumano-Santiagueña (Zona Sur).

A partir de estos resultados en el presente trabajo se discriminan en forma preliminar la existencia de potenciales campos geotérmicos vinculados a sistemas de calor conductivos en la Zona Norte y convectivos - conductivos (Cengel y Boles 2011 y Moeck 2014) en la Zona Sur.

Zona Norte (Sistema conductivo). El sistema de Santa Bárbara está caracterizado por gradientes geotérmicos aproximadamente normales con existencia de reservorios geotérmicos profundos

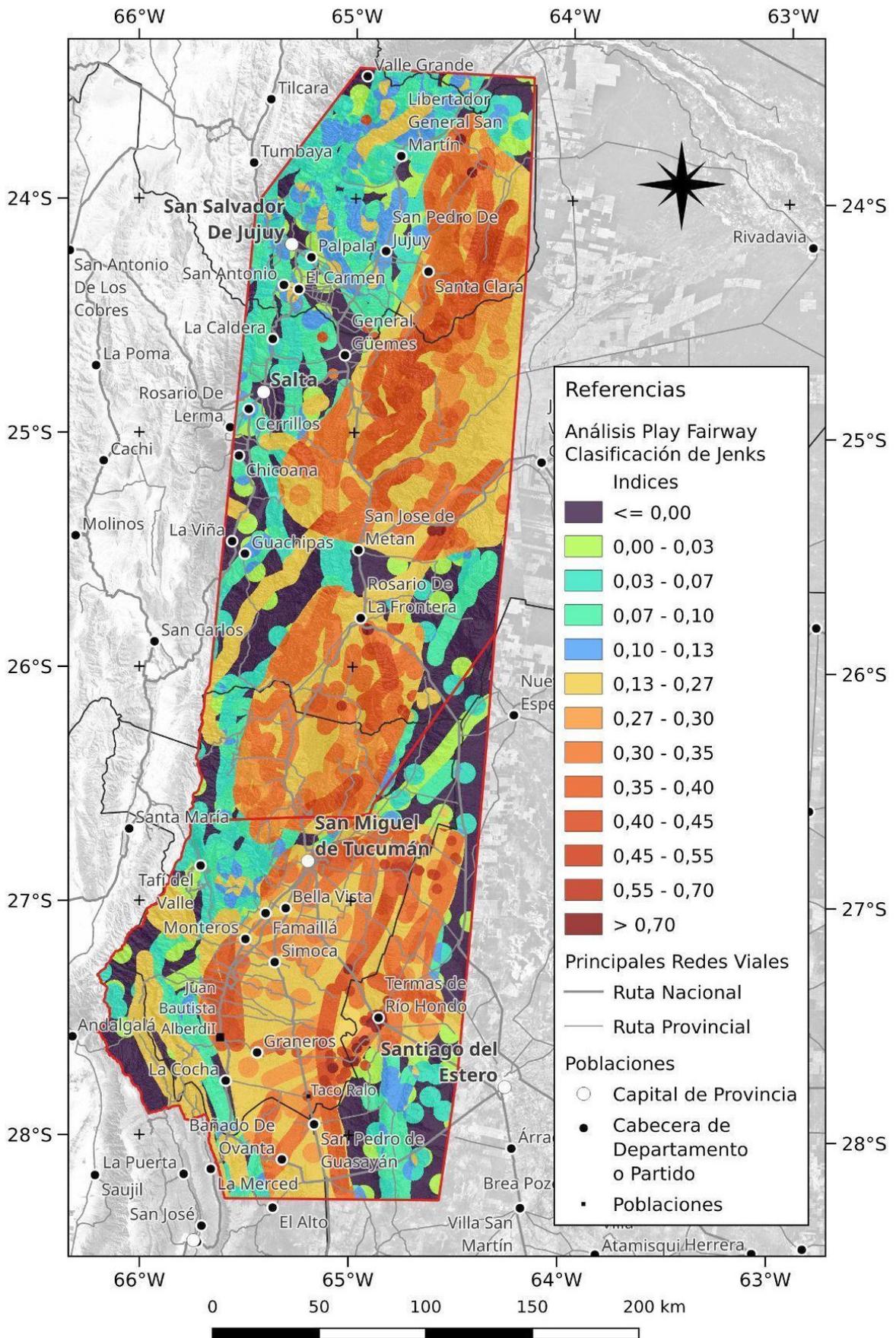


Figura 13. Mapa de Potencial Geotérmico del Área 2.

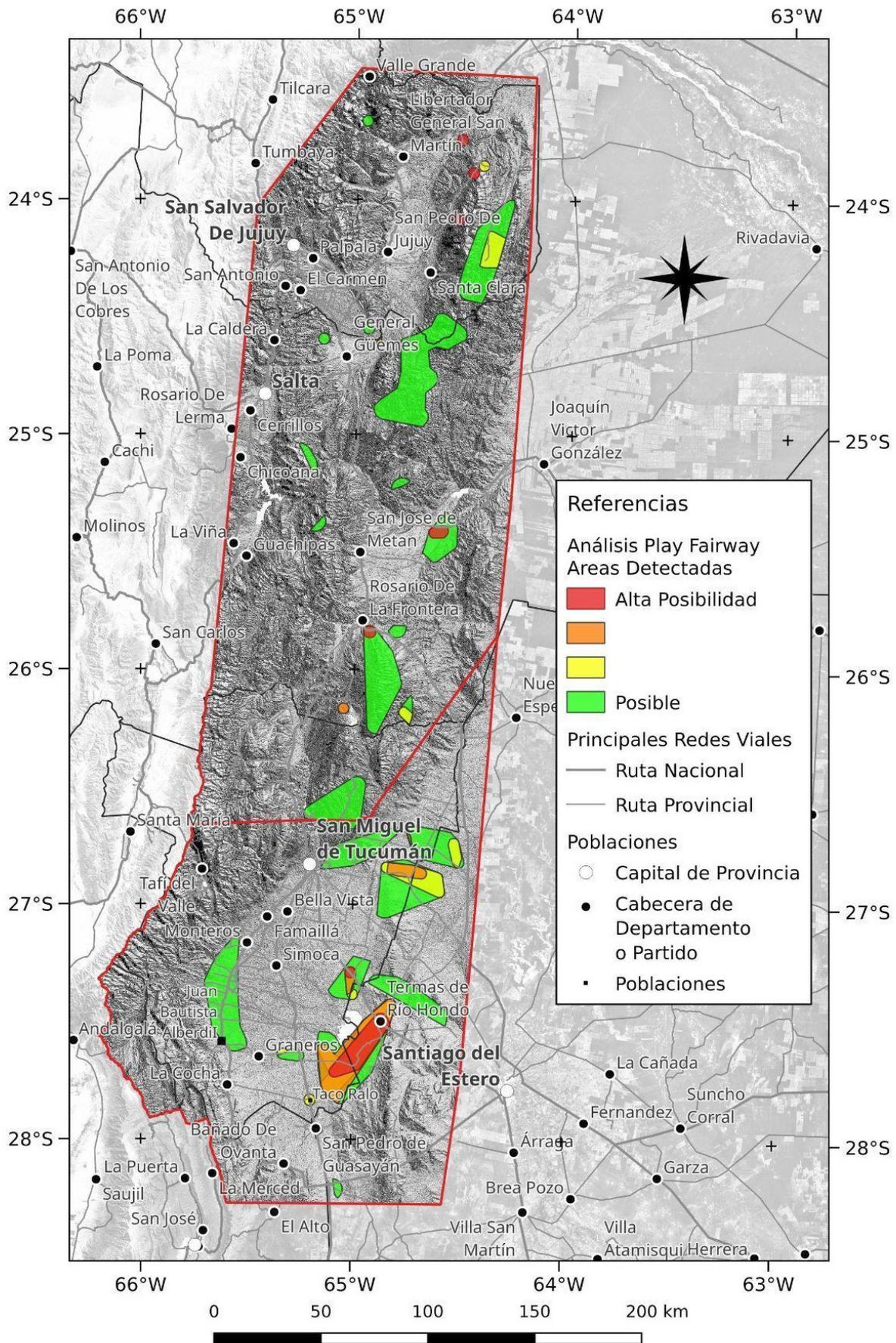


Figura 14. Mapa de Favorabilidad Geotérmica del Área 2.

conectados por fallas de alto ángulo (Seggiaro *et al.* 2015, Chiodi *et al.* 2015). Las fallas juegan un rol preponderante como conductos o barreras que compartimentan el sistema en bloques. En este sentido, las zonas mejor valoradas se concentran en fajas de orientación NNE – SSO, aproximadamente paralelas a las trazas de las fallas principales, separadas por áreas con favorabilidad baja a intermedia. Dentro de estas fajas se emplazan surgencias termales reconocidas en Rosario de la Frontera (Seggiaro *et al.* 2015, Chiodi *et al.* 2015) y El Palmar (Claros, 2020), entre otras, que corroboran los resultados obtenidos en el mapa de favorabilidad, otorgándoles un elevado interés exploratorio.

Zona Sur (Sistema convectivo-conductivo).

La llanura Tucumano Santiagueña se distingue por la presencia diseminada de gradientes geotérmicos anómalos determinados a partir de mediciones de temperatura y geotermometría de aguas termales de pozos. A modo de referencia, se destaca el gradiente geotérmico determinado en la localidad de Villa Río Hondo con valores promedios de 10,5 °C cada 100 metros.

Se suma a los datos geotermométricos, el registro geofísico profundo mediante el método magnetotérmico (MT) de largo período que detecta una unidad conductiva debajo del basamento, interpretada en base a su diseño y proyección ascendente, como

generada por fluencia de calor de origen mantélico (Baldis *et al.* 1983 y Pomposiello *et al.* 2000, 2002 a). Ésta unidad conductiva fue detectada en el zócalo de Taco Ralo a 7 km de profundidad, donde las temperaturas determinadas por geotermometría están entre las más elevadas del área. Se estima que la fluencia calórica impacta toda la cuenca tucumano-santiagueña (Avellaneda y Falcón 2015).

A la anomalía térmica regional se suma a esta zona la presencia de fallas detectadas en el subsuelo también por métodos geofísicos (Iaffa *et al.* 2011a y b, Iaffa *et al.* 2013), a partir de las cuales se conecta un acuífero somero dispuesto en la Formación Las Cañas (Battaglia 1982, Armella *et al.* 2020) del Plioceno, con aguas termales provenientes de niveles profundos. De esta manera, a la coexistencia de un sistema de calor convectivo por circulación ascendente de fluidos geotérmicos a través de las estructuras profundas, se suma la transmisión por conducción del calor impactado en el basamento de la cuenca de Tucumán y su extensión en la provincia de Santiago del Estero.

Los ejemplos más evidentes de coexistencia de calor convectivo y conductivo se encuentran en los alrededores de Villa Río Hondo, Termas de Río Hondo y Taco Ralo donde precisamente el mapa de favorabilidad registra los máximos valores distribuidos en fajas vinculadas a trazas y cruces de fallas.

ANEXO I. PROCESAMIENTO DE DATOS Y GENERACIÓN DE MAPAS DE EVIDENCIA

Los datos pueden descargarse en formato digital para su consulta en el Catálogo de Datos Abiertos Geoespaciales del sistema de información geológica ambiental minera SIGAM del SEGEMAR en: <https://sigam.segemar.gov.ar/geonetwork39/srv/spa/catalog.search#/metadata/be8bb085-e625-4da5-8e01-b0ba81379a69>

Área de Trabajo

Autor: Nicolás Larcher, Eduardo Molina.

Formato: *ESRI Shapefile*, geometría polígono. Codificación: UTF-8

Sistema de Referencia: EPSG:22183 - POSGAR 94 / Argentina 3

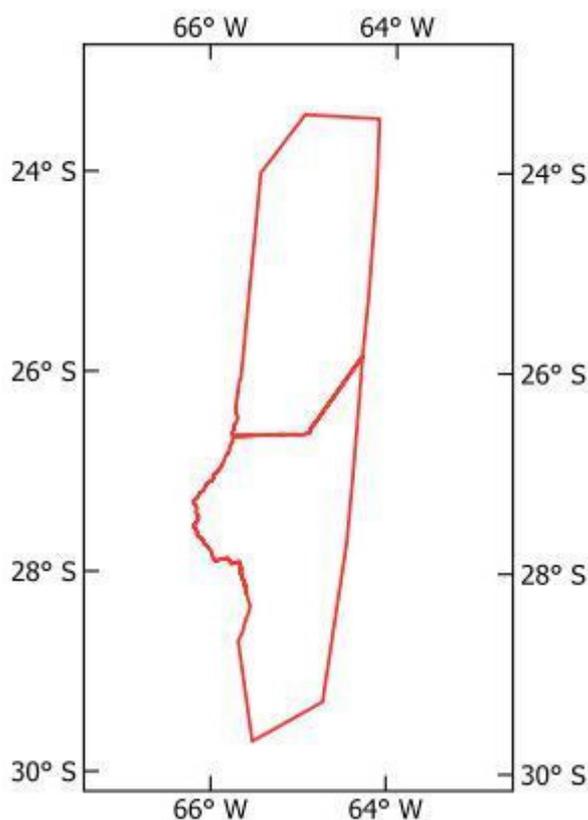


Figura 15. Esquema del mapa del área de estudio

Fallas Cuaternarias

Autor de información: Raúl Seggiaro, Marcelo Cegarra, Mariano Hernández, Eduardo Molina.

Fuente:

Formato: *ESRI Shapefile*, geometría arcos. Codificación: UTF-8.

Sistema de Referencia: EPSG:22183 - POSGAR 94 / Argentina 3

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.

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.
2. Cálculo de azimut y longitud (m) de las fallas con el siguiente algoritmo:

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

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

3. Cálculo de la orientación de las fallas en términos de referencias cardinales (N, S, E, W, NE, SE, SW y NW) con el siguiente algoritmo:

CASE

When $(0 \leq \text{azimuth} \leq 22.5)$ ó $(157.5 \leq \text{azimuth} \leq 202.5)$ ó $(337.5 \leq \text{azimuth} \leq 360)$ *then* 'N-S'.

When $(22.5 \leq \text{azimuth} \leq 67.5)$ ó $(202.5 \leq \text{azimuth} \leq 247.5)$ *then* 'NE-SW'.

When $(67.5 \leq \text{azimuth} \leq 112.5)$ ó $(247.5 \leq \text{azimuth} \leq 292.5)$ *then* 'E-W'.

When $(112.5 \leq \text{azimuth} \leq 157.5)$ ó $(292.5 \leq \text{azimuth} \leq 337.5)$ *then* 'NW-SE'

END

4. Transcripción y desagregado del ítem *KMZ*, descripción a tipo de falla, edad, inclinación.
5. Incorporación de la referencia. Por ejemplo: 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.

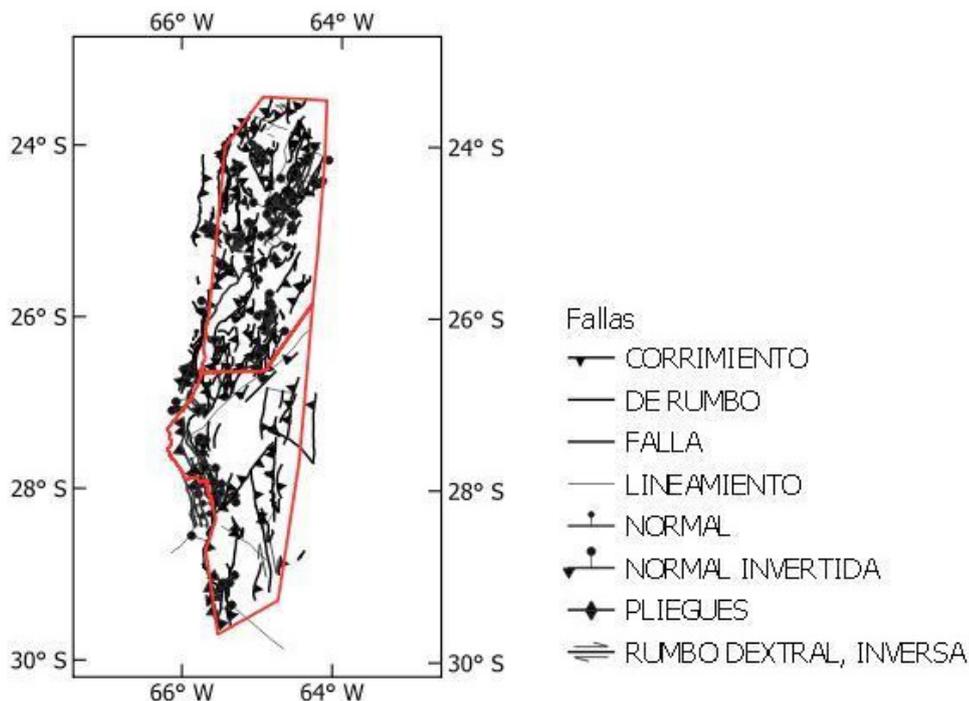


Figura 16. Esquema del Mapa de Evidencia de Fallas Cuaternarias

Hidroquímica (Pozos, manantiales)

Autor de información: Noelia Carrizo, Diego Fernández, Nicolás Larcher, Yesica Peralta Arnold, Alejandro Conde Serra.

Fuente: Boujon *et al.* (2019); Crincoli y Pesce (2001); Pesce y Miranda (2003); Chiodi *et al.* (2016); Moreno Espelta *et al.* (1978); Chiodi *et al.* (2015); Scatizza y Galar (2018); Peralta Arnold *et al.* (2020); Vergara *et al.* (1998); Avellaneda (2016); INTA (2016); García (2005); SAT (2015); Falcón (2004) y DPA (2015).

Formato: *ESRI Shapefile*, geometría punto. Codificación: UTF-8.

Sistema de Referencia: EPSG:22183 - POSGAR 94 / Argentina 3

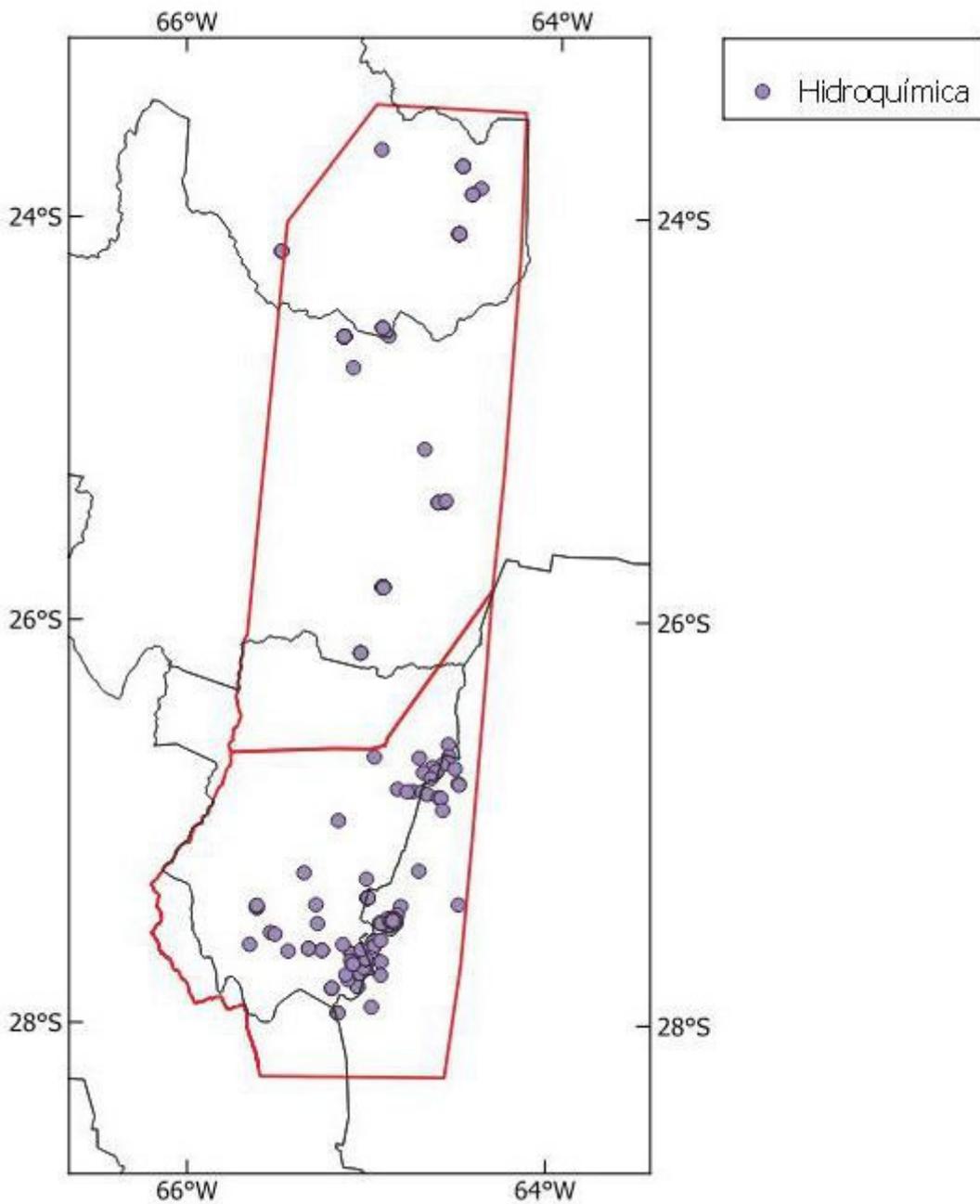


Figura 17. Esquema del Mapa de Evidencia de Datos Hidroquímicos (manantiales y pozos)

Sismos

Autor de información: Carlos Gabriel Asato, Virginia Naón.

Fuente: Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES), http://contenidos.inpres.gob.ar/buscar_sismo.

Formato: *ESRI Shapefile*, geometría punto. Codificación UTF-8

Sistema de Referencia: EPSG:22183 - POSGAR 94 / Argentina 3

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, seleccionando los datos con una profundidad menor e igual a 20 kilómetros.

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 ítems 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 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.

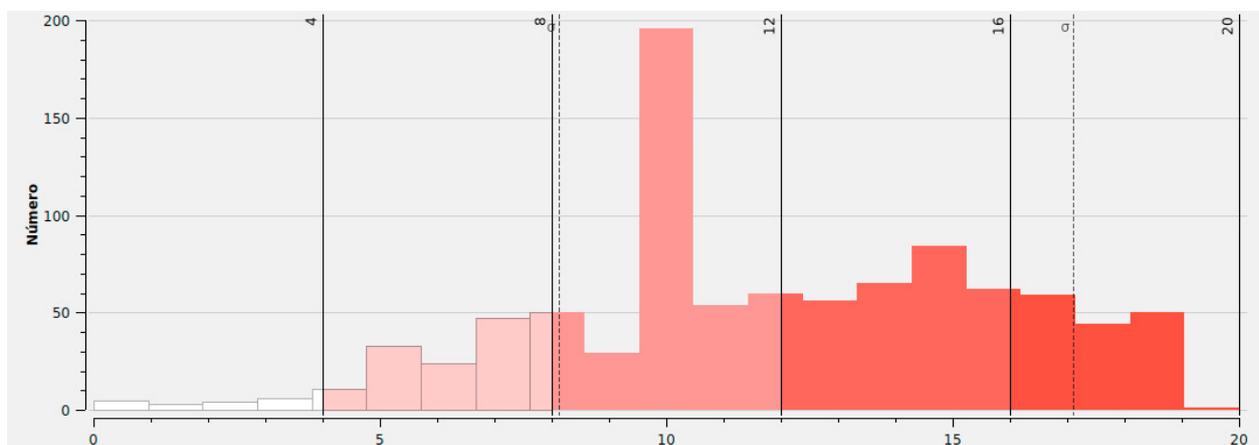


Figura 18. Histograma de Sismos en función de la profundidad

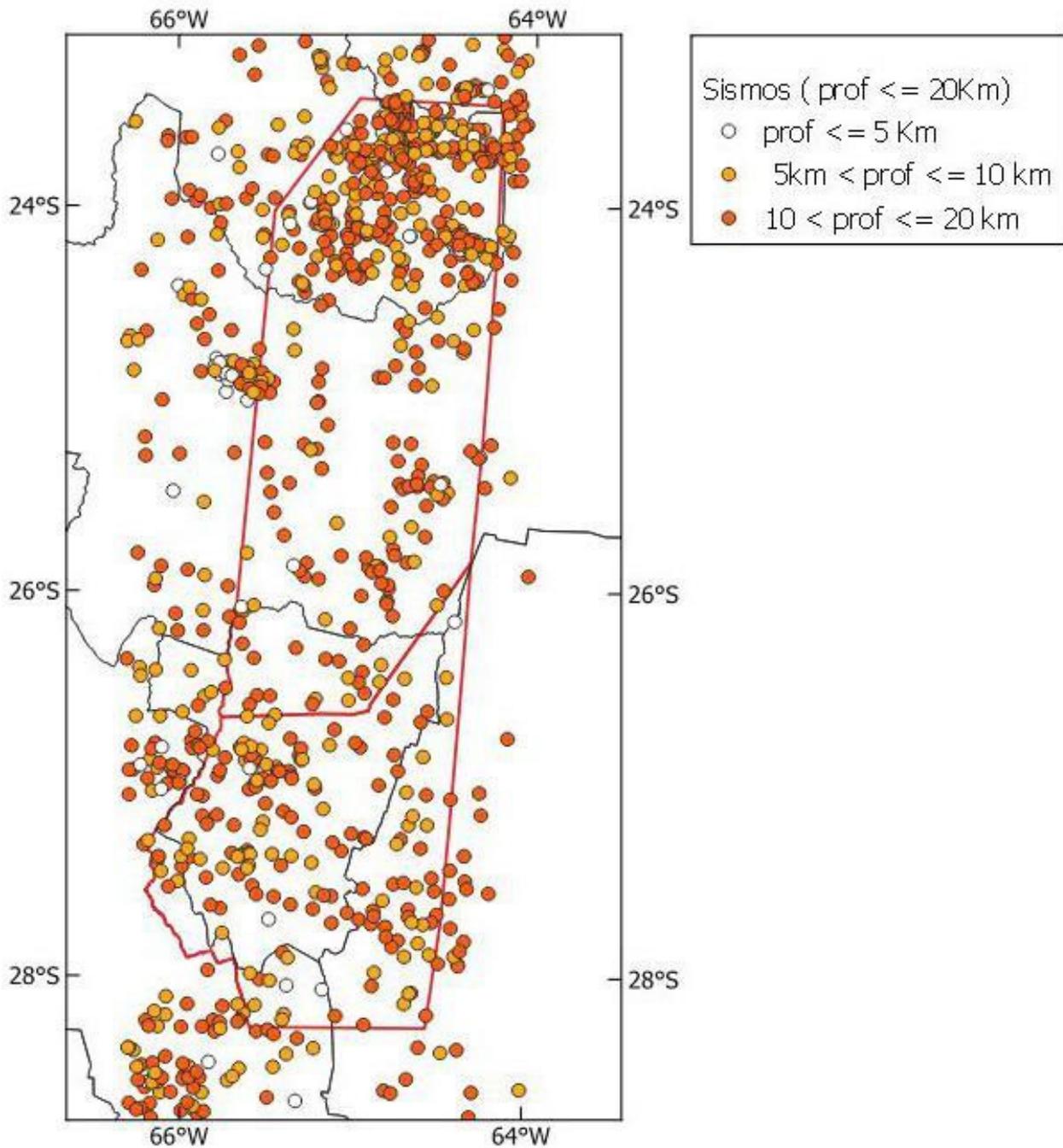


Figura 19. Esquema del Mapa de Sismos (INPRES)

Fallas por Geofísica

Autor de la capa de información: Mariano Hernández, Alejandro Conde Serra.

Fuentes: Baldis *et al.* (1983), Conde Serra, A. (2019), Cristallini *et al.* (2004), Guevara *et al.* (2020), Iaffa *et al.* (2011a), Iaffa *et al.* (2011b), Iaffa *et al.* (2013), Pomposiello *et al.* (1991), Pomposiello, *et al.* (2002 b).

Formato: *ESRI Shapefile*, geometría línea. Codificación: UTF-8

Sistema de Referencia: EPSG:22183 - POSGAR 94 / Argentina 3

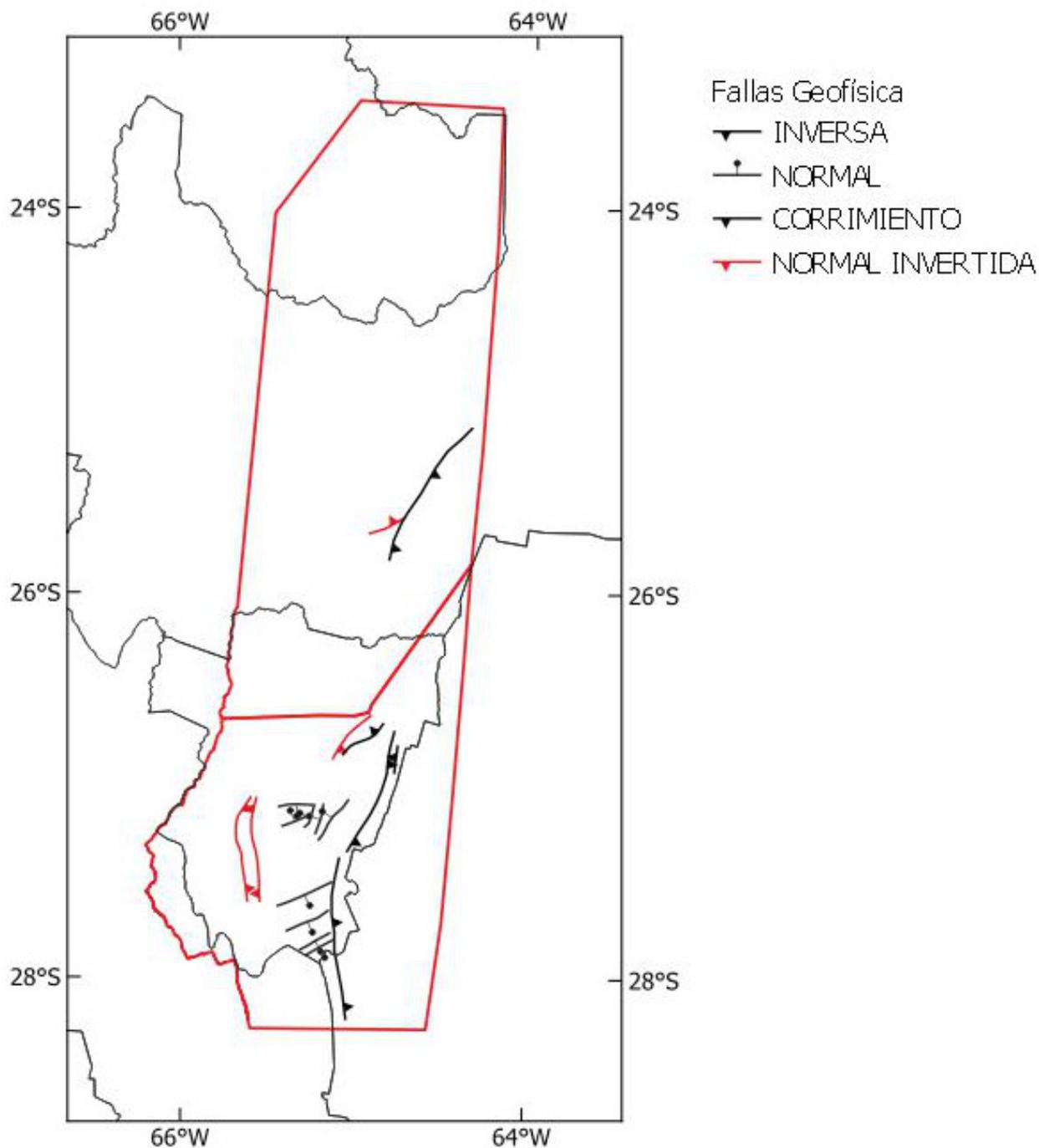


Figura 20. Esquema del Mapa de Evidencia de Fallas Profundas

Rasgos Estructurales Favorables

Autores de información: Raúl Seggiaro, Marcelo Cegarra, Mariano Hernández.

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

Formato: *ESRI Shapefile*, geometría polígono. Codificación UTF-8

Sistema de Referencia: EPSG:22183 - POSGAR 94 / Argentina 3

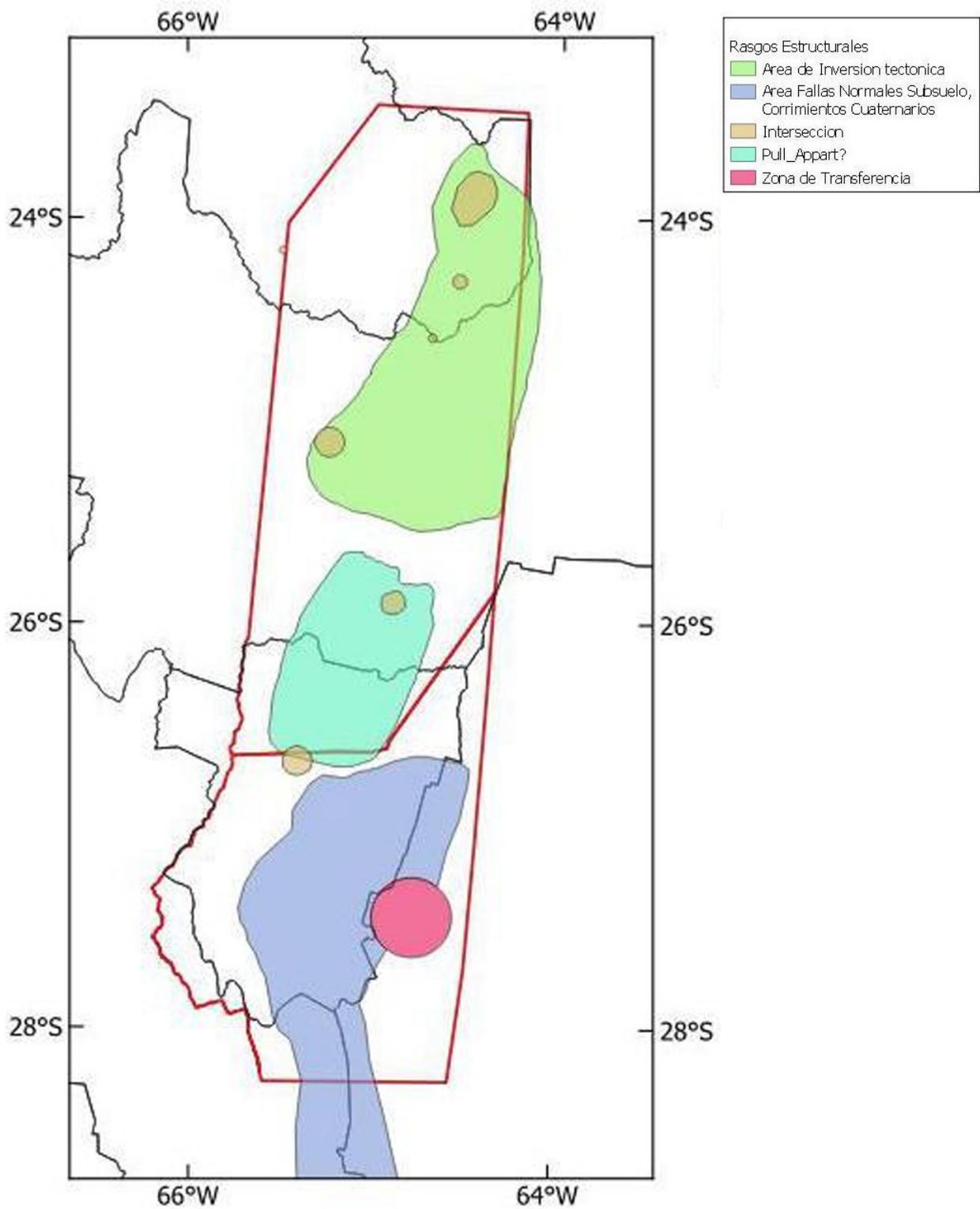


Figura 21. Esquema del Mapa de Evidencia de Rasgos Estructurales Favorables

Volcanismo (Lavas Antillas)

Autor: Raúl Seggiaro.

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

Formato: *ESRI Shapefile*, geometría punto y polígono. Codificación: UTF-8

Sistema de Referencia: EPSG:22183 - POSGAR 94 / Argentina 3

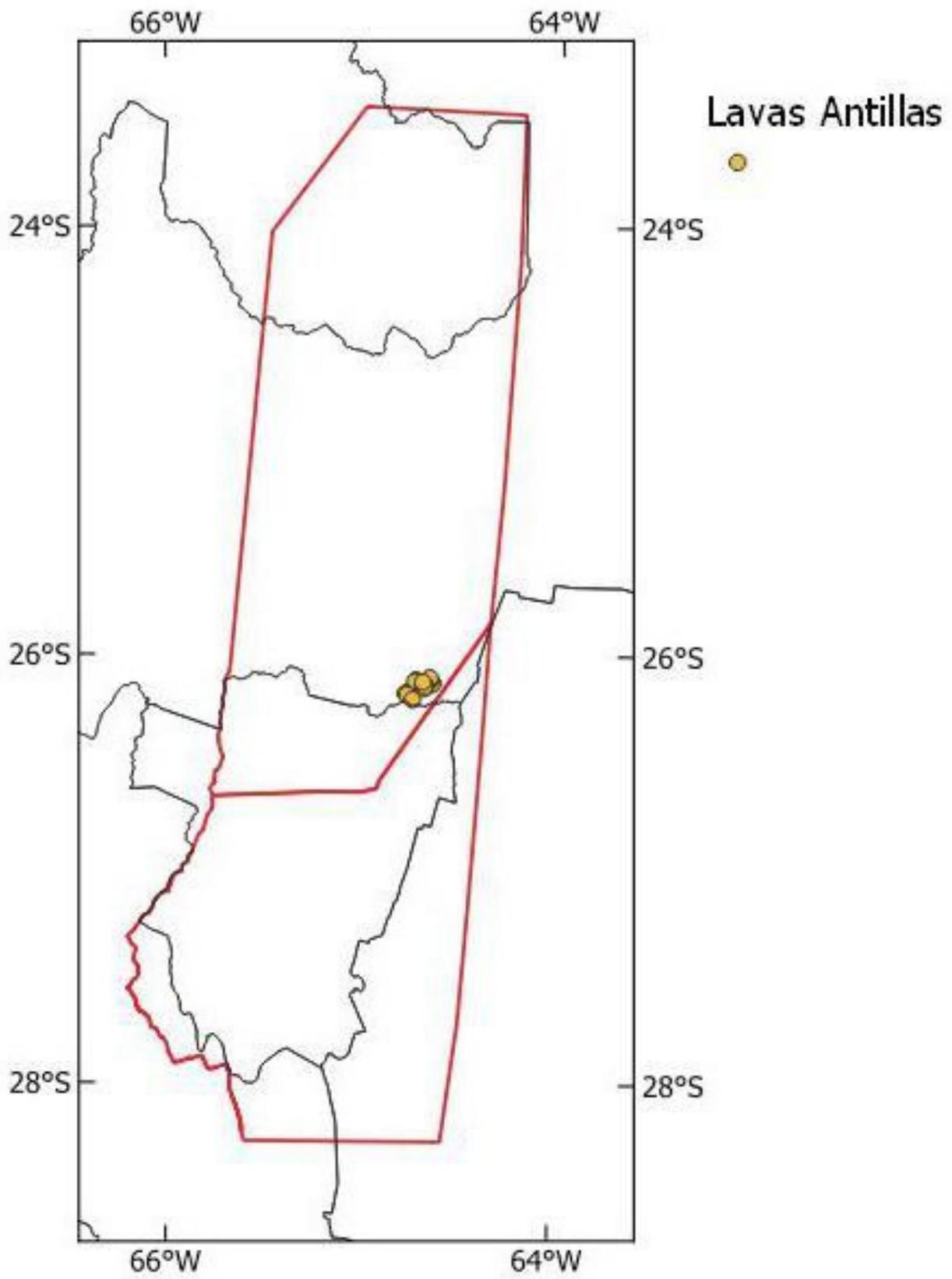


Figura 22. Esquema del Mapa de las Lavas Antillas

ANEXO II. MAPAS DE DENSIDAD DE EXPLORACIÓN

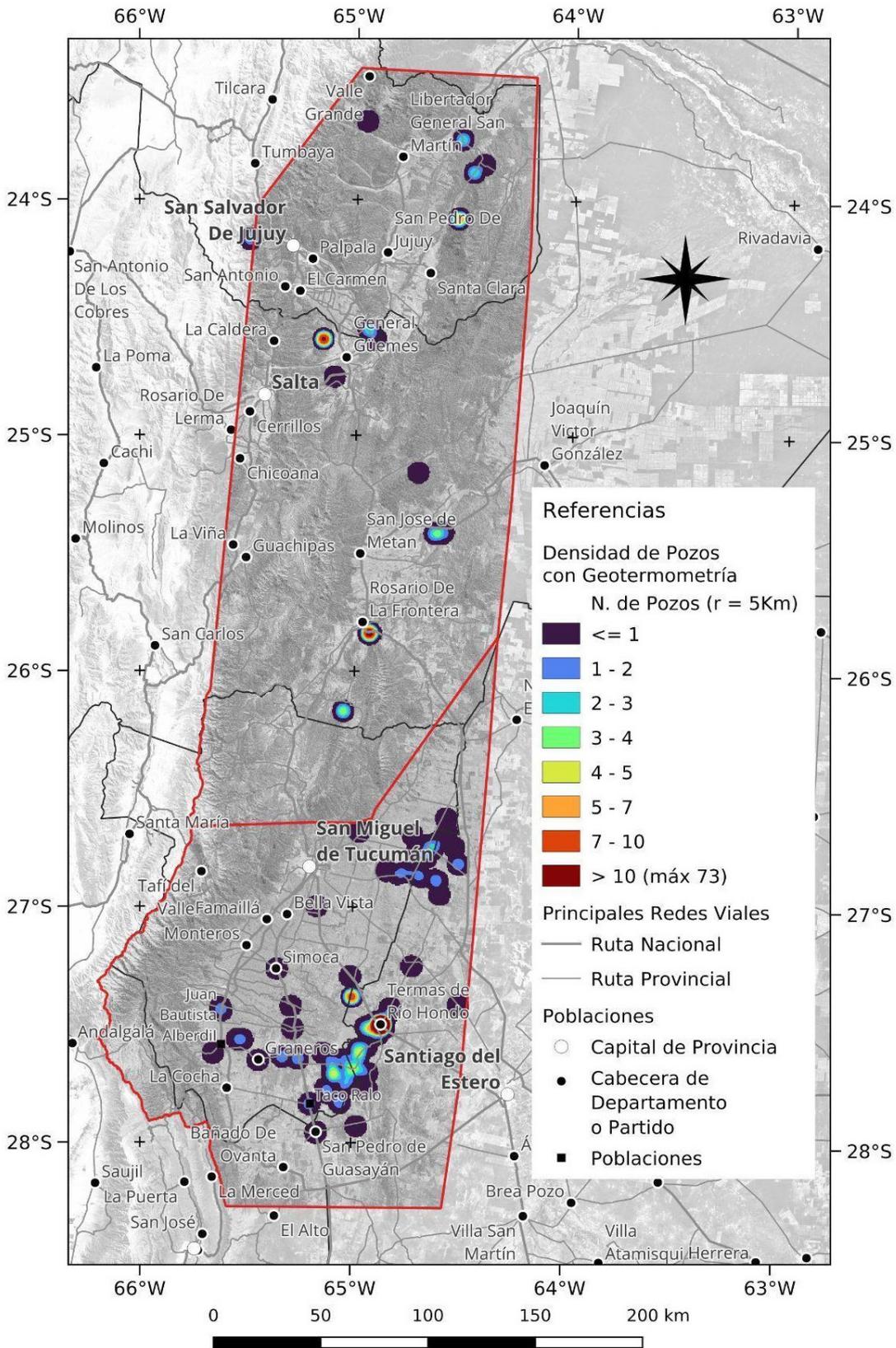


Figura 23. Mapa de Densidad de Pozos con Geotermometría (radio = 5 km)

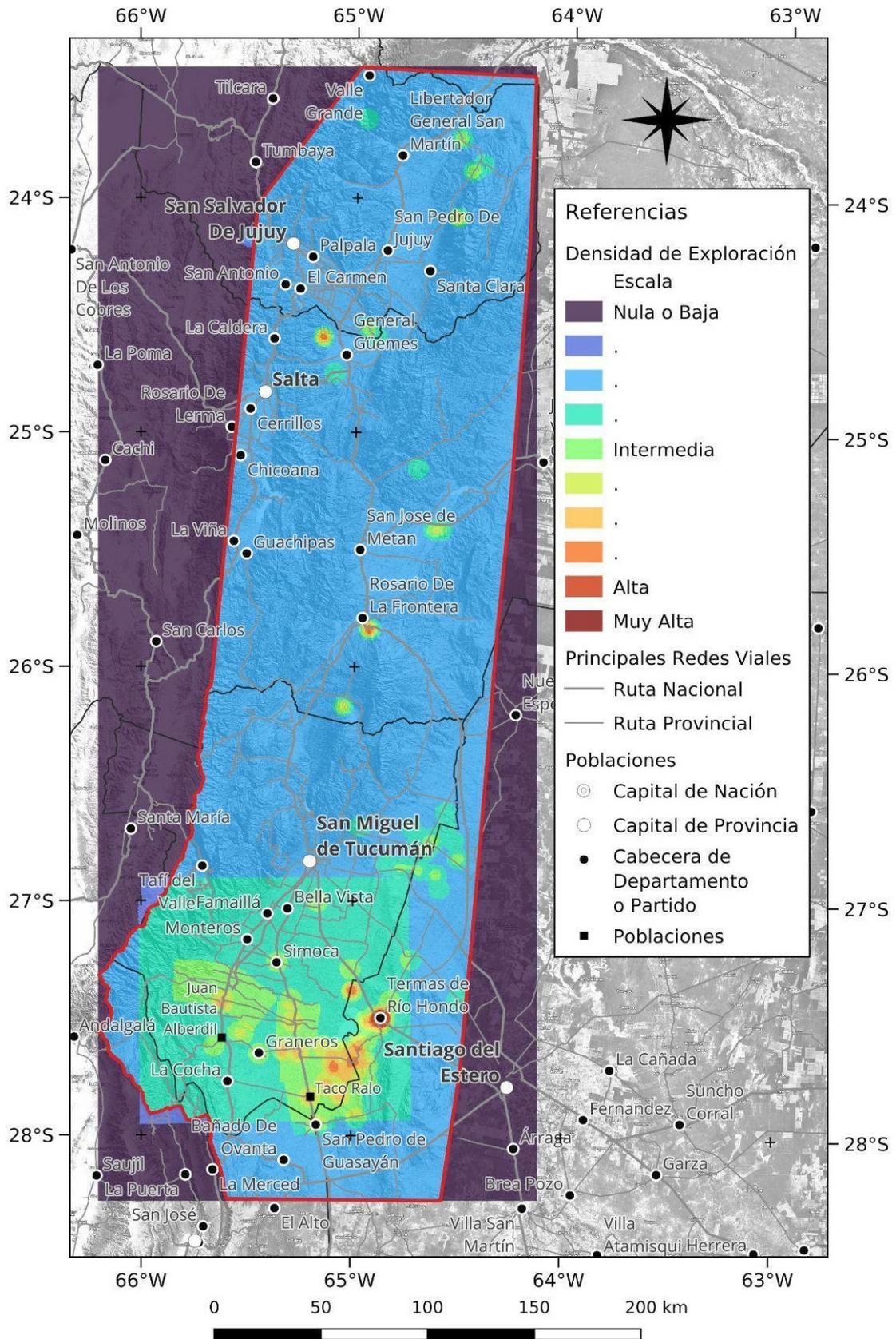


Figura 24. Mapa de Densidad de Exploración referida a los datos utilizados en el Análisis Play Fairway.

ANEXO III. MAPAS DE UBICACIÓN DE POZOS PROVINCIALES

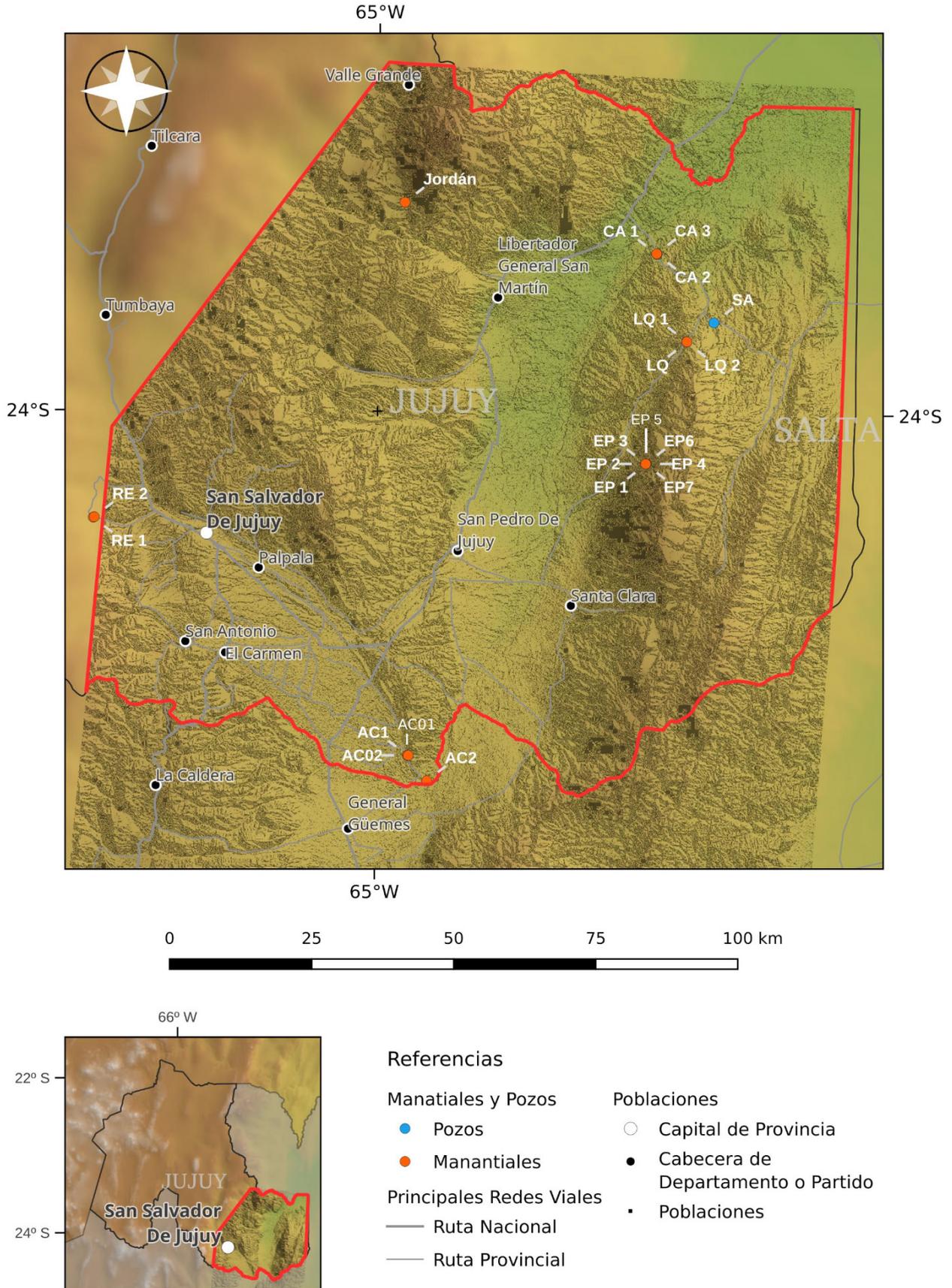
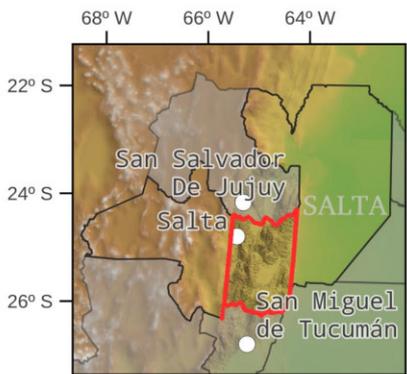
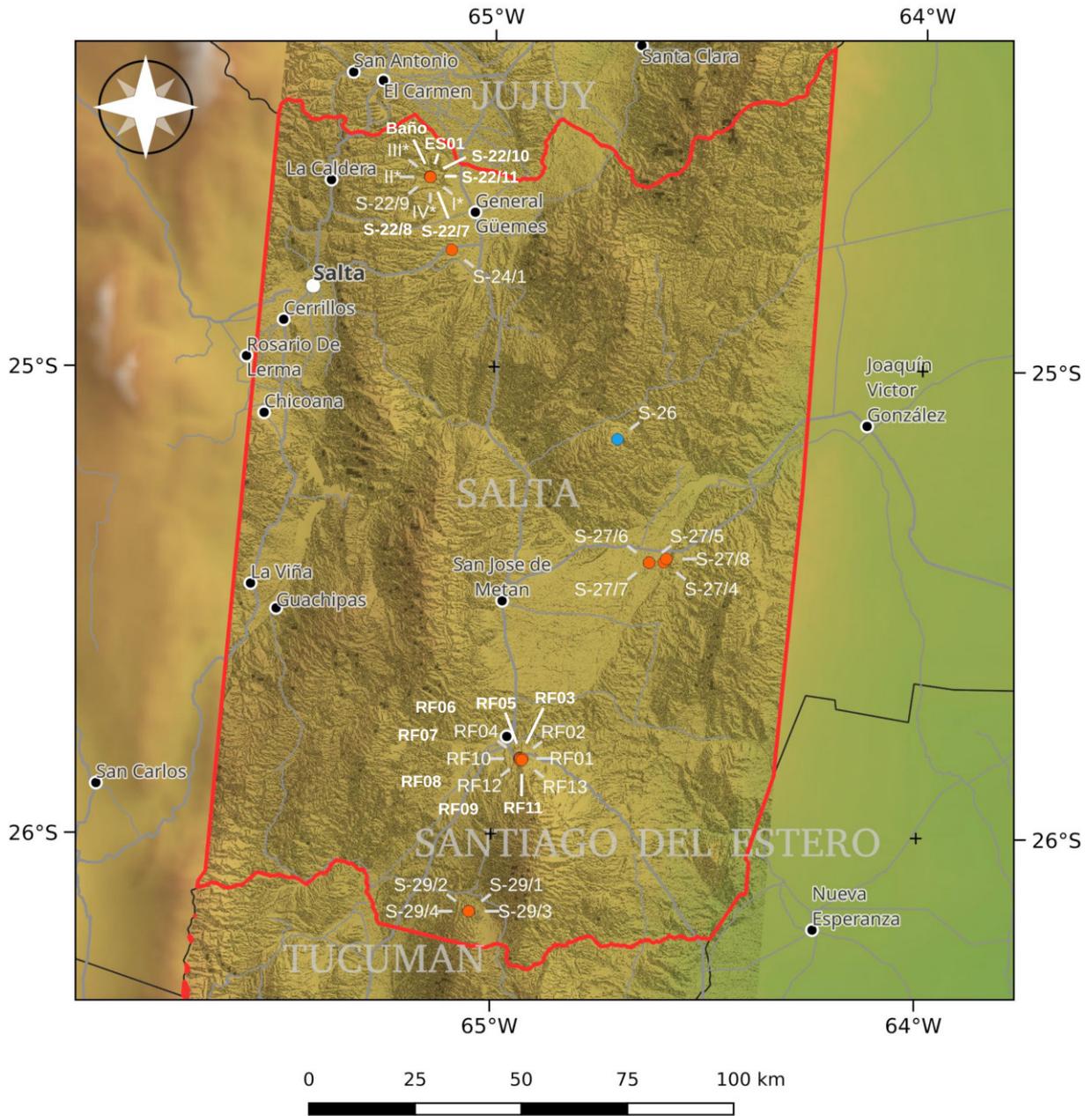


Figura 25. Ubicación de pozos y manantiales. Provincia de Jujuy



Referencias

Manantiales y Pozos

- Pozos
- Manantiales

Principales Redes Viales

- Ruta Nacional
- Ruta Provincial

Poblaciones

- Capital de Provincia
- Cabecera de Departamento o Partido
- Poblaciones

Figura 26. Ubicación de pozos y manantiales. Provincia de Salta

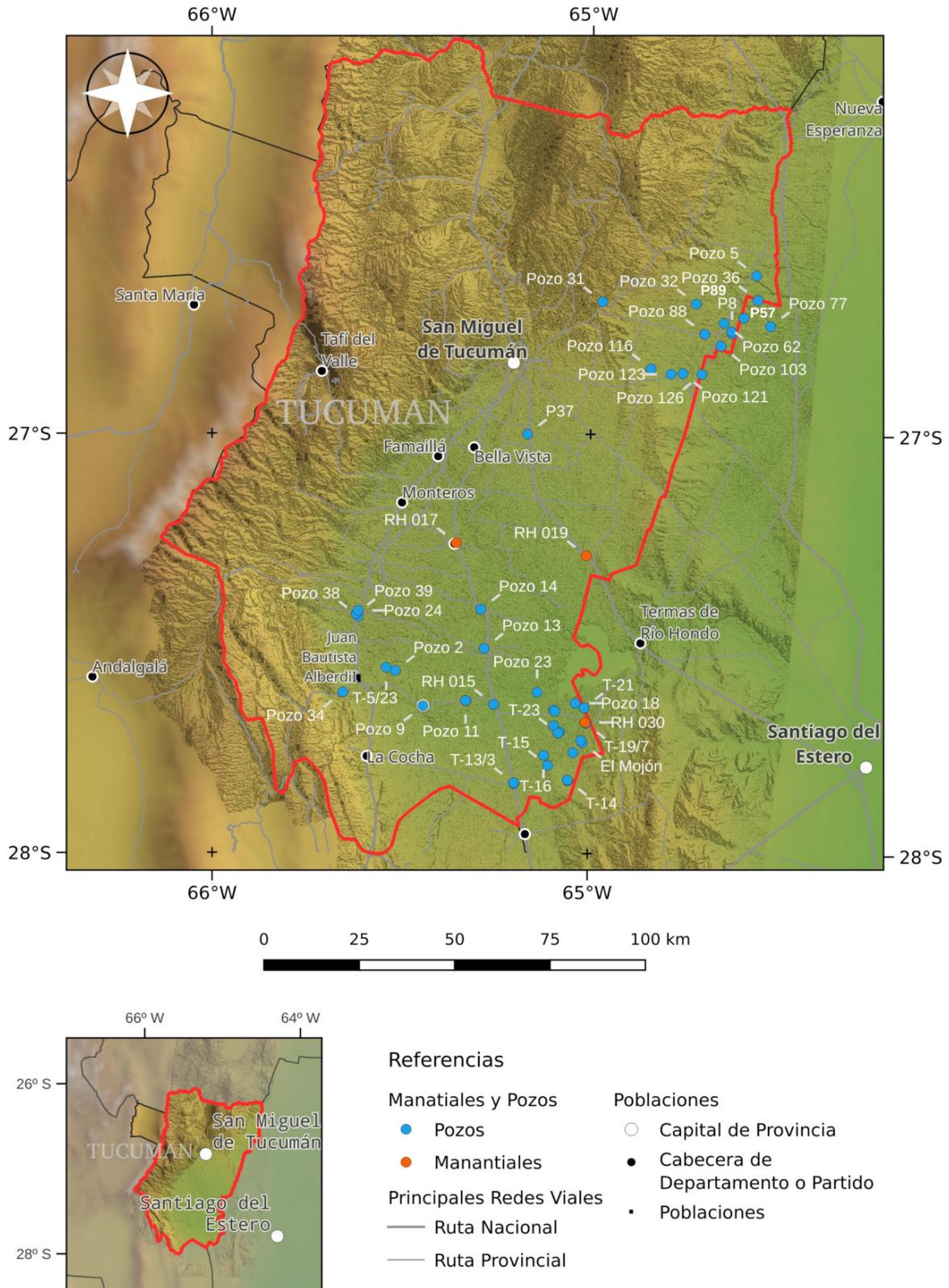
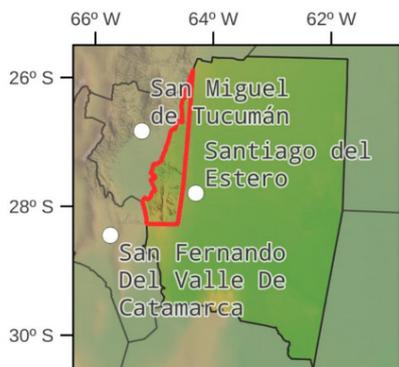
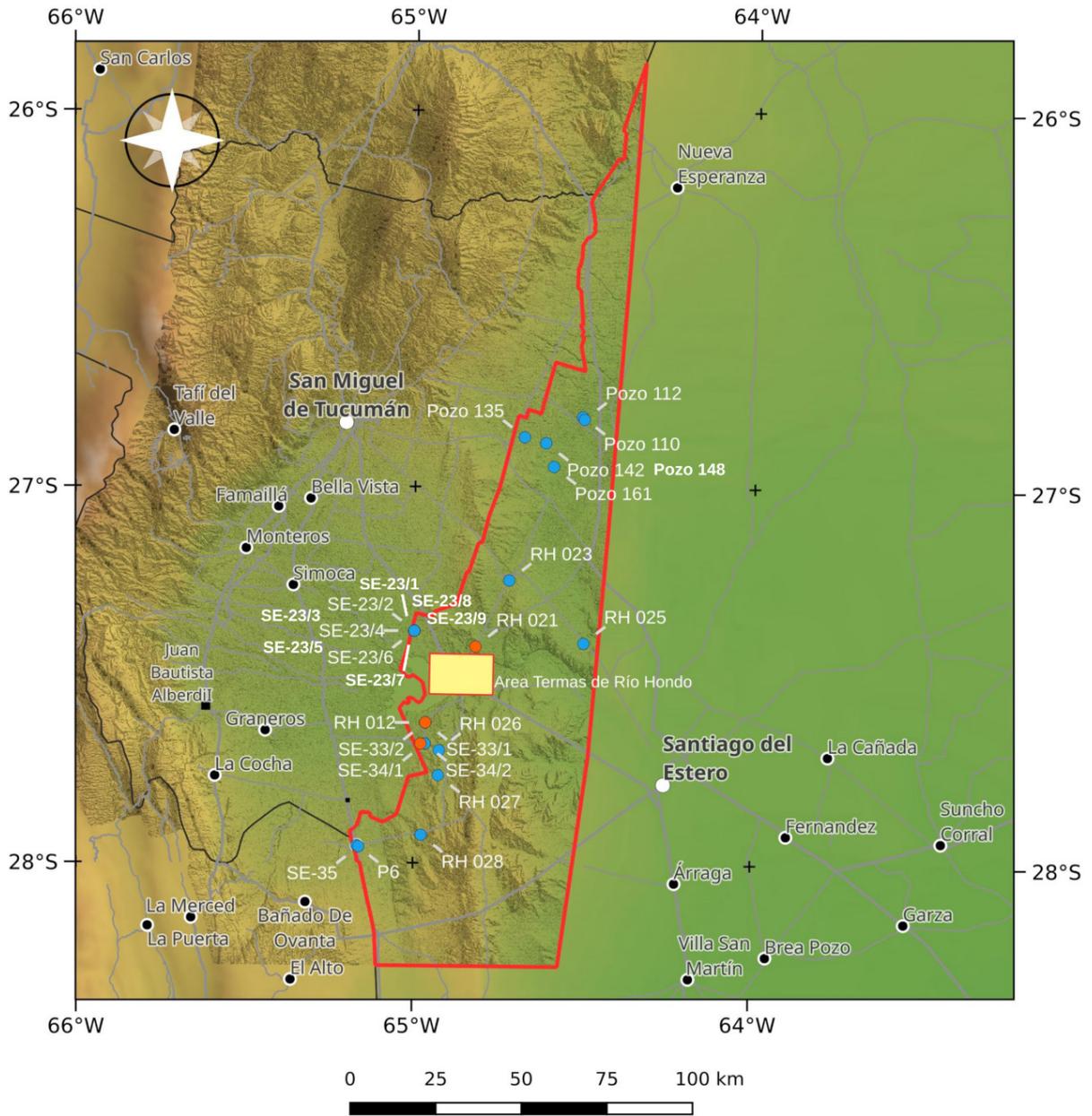


Figura 27. Ubicación de pozos y manantiales. Provincia de Tucumán



Referencias

Manantiales y Pozos

- Pozos
- Manantiales

Principales Redes Viales

- Ruta Nacional
- Ruta Provincial

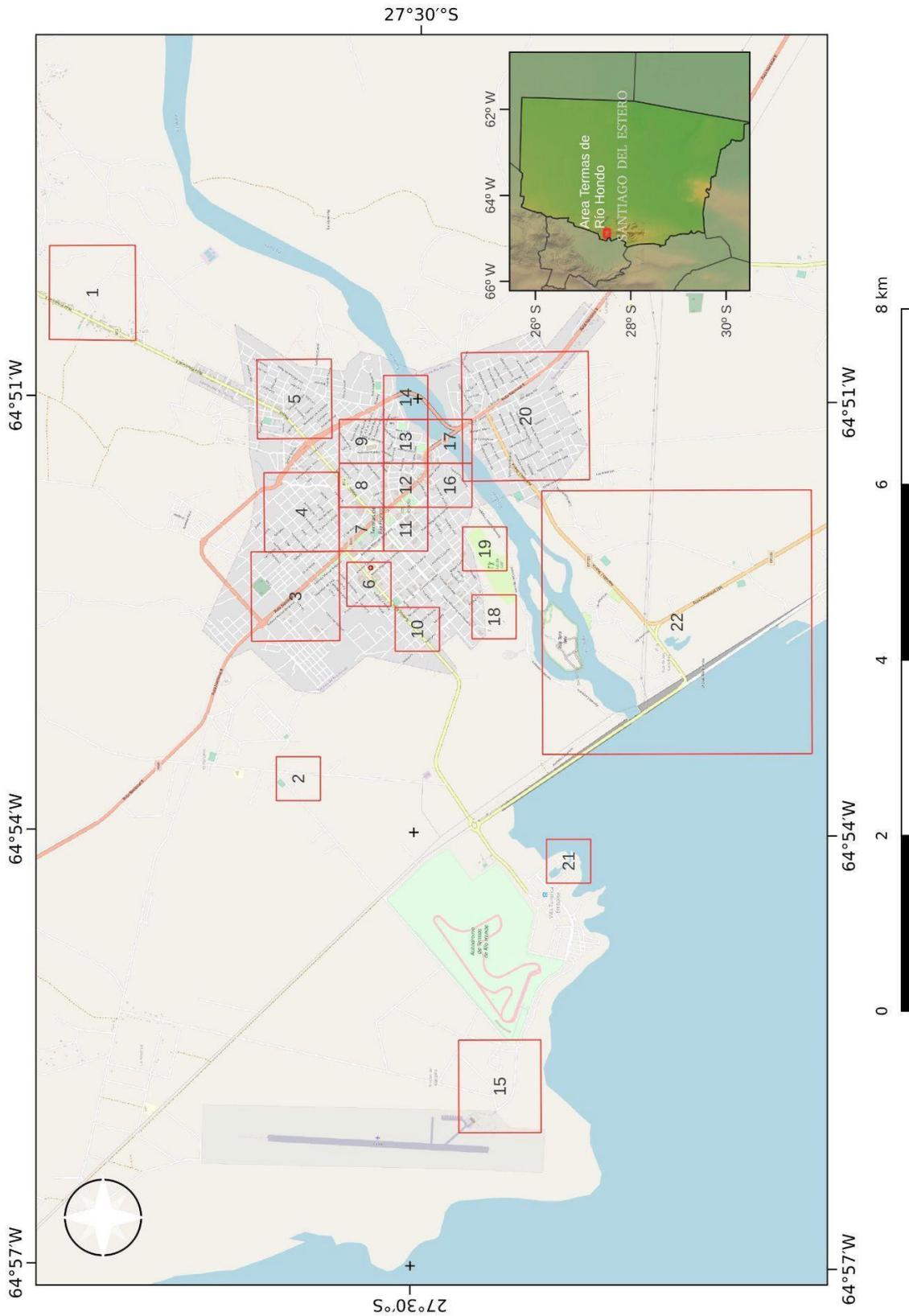
Poblaciones

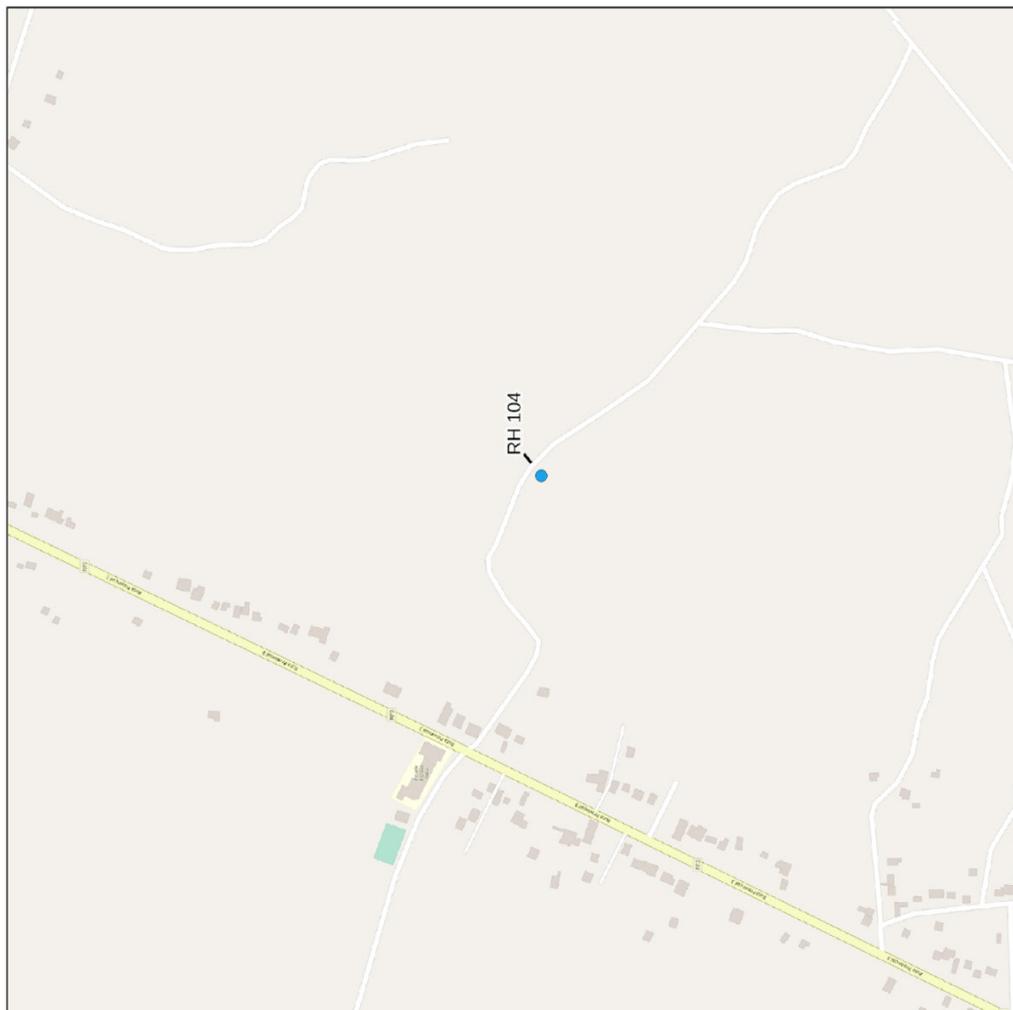
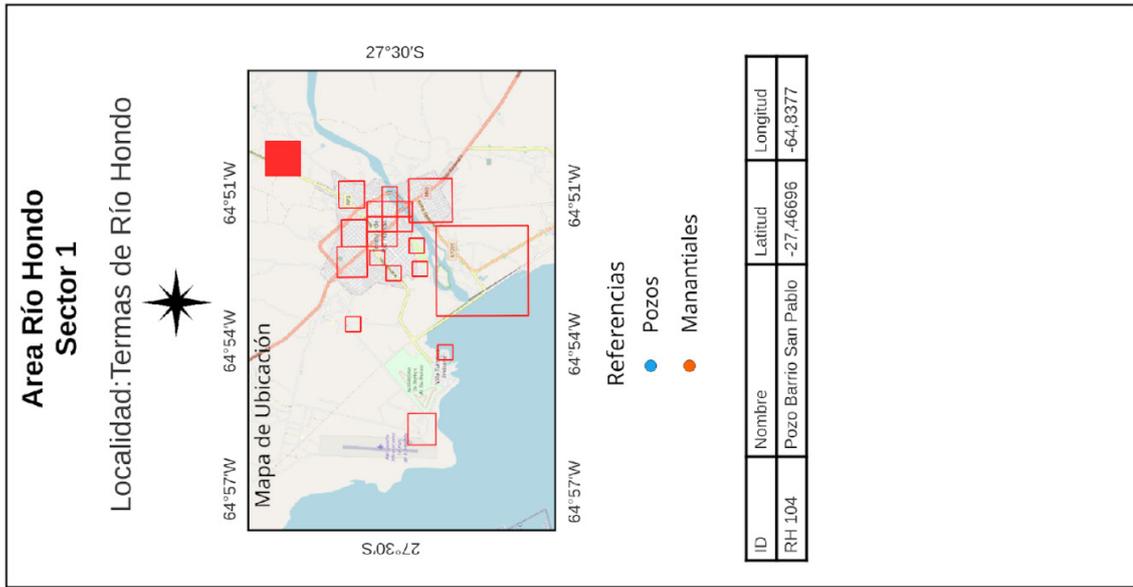
- Capital de Provincia
- Cabecera de Departamento o Partido
- Poblaciones

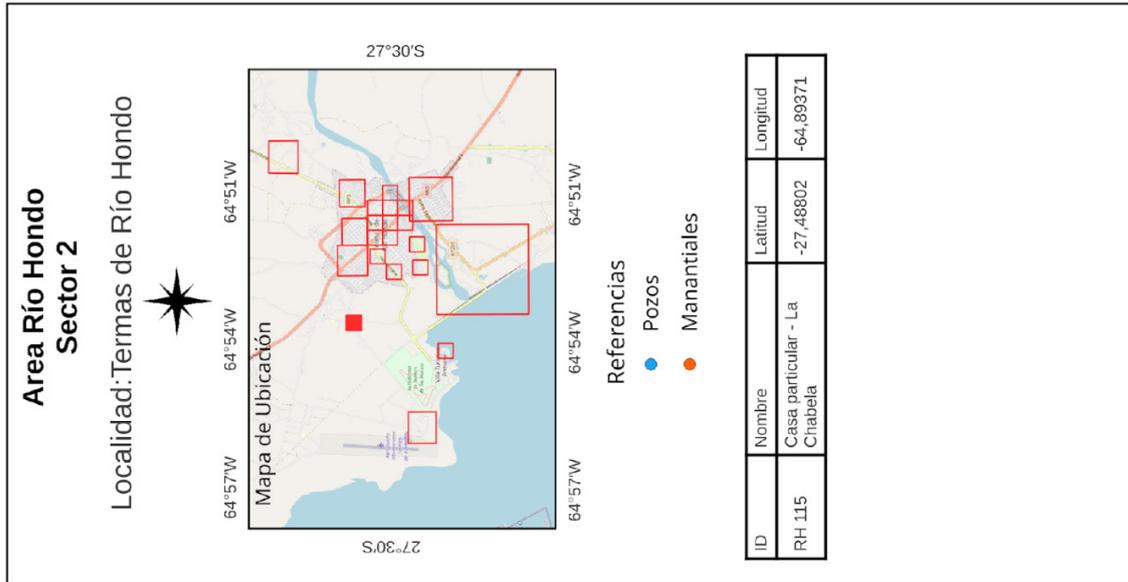
Figura 28. Ubicación de pozos y manantiales. Provincia de Santiago del Estero

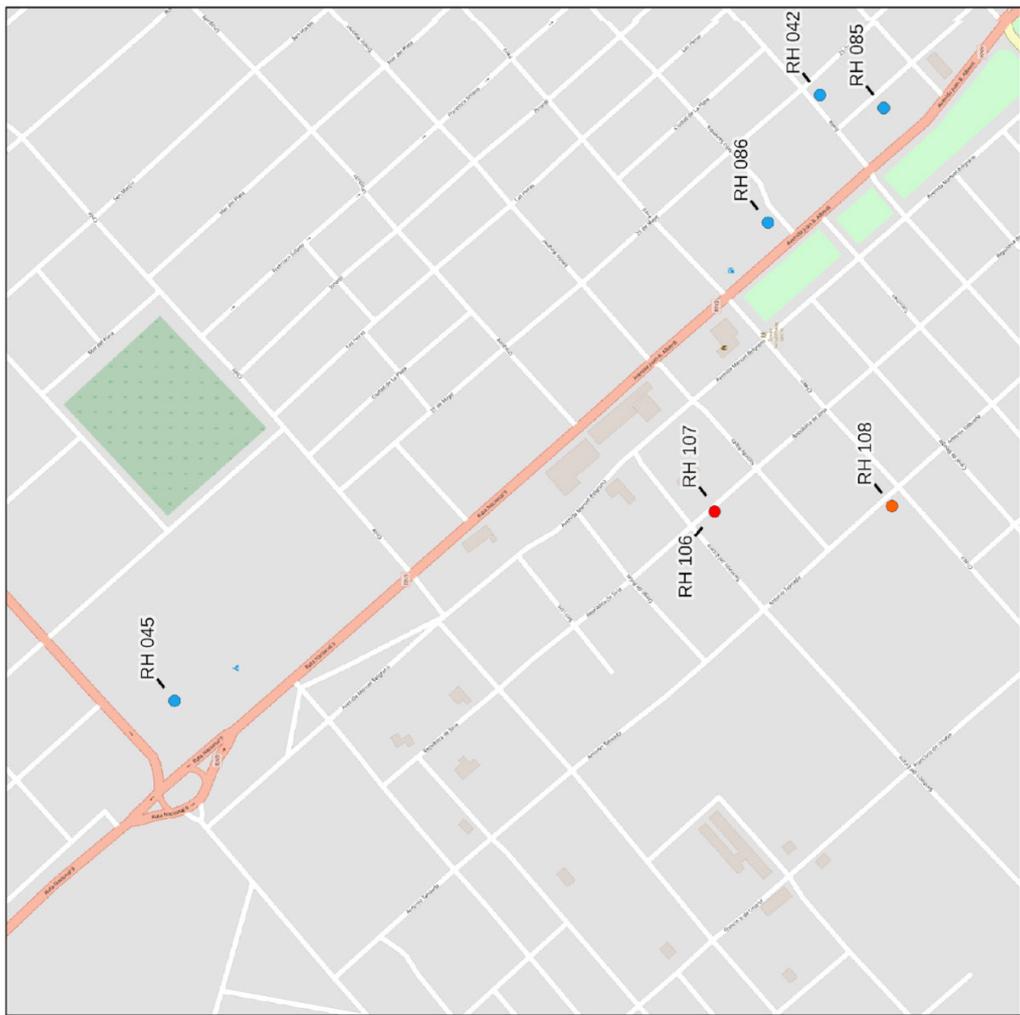
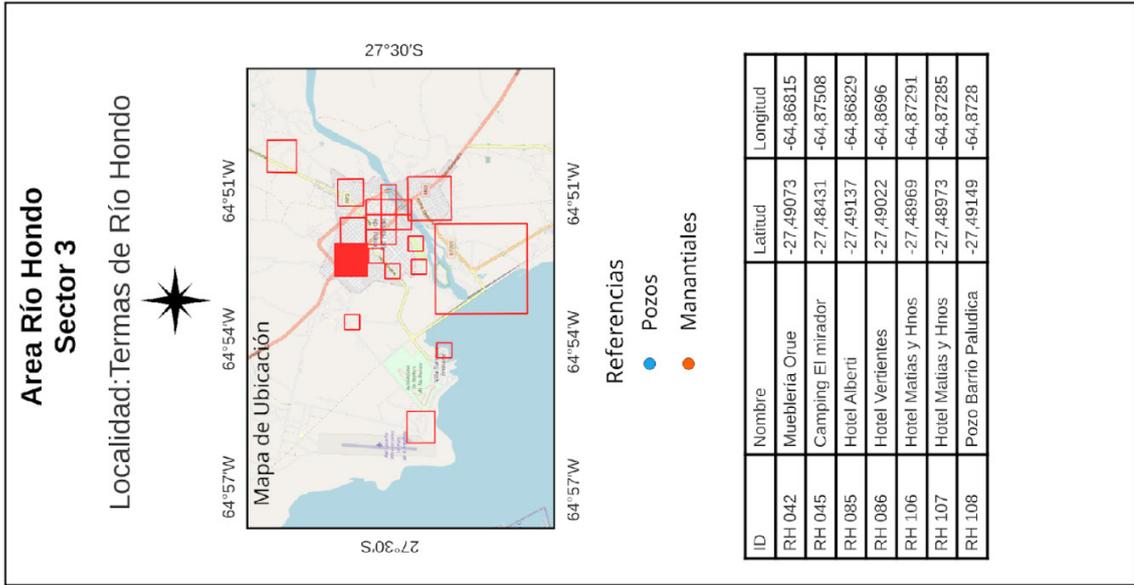
ANEXO IV. MAPAS DE UBICACIÓN DE POZOS EN EL ÁREA DEL EMBALSE RÍO HONDO

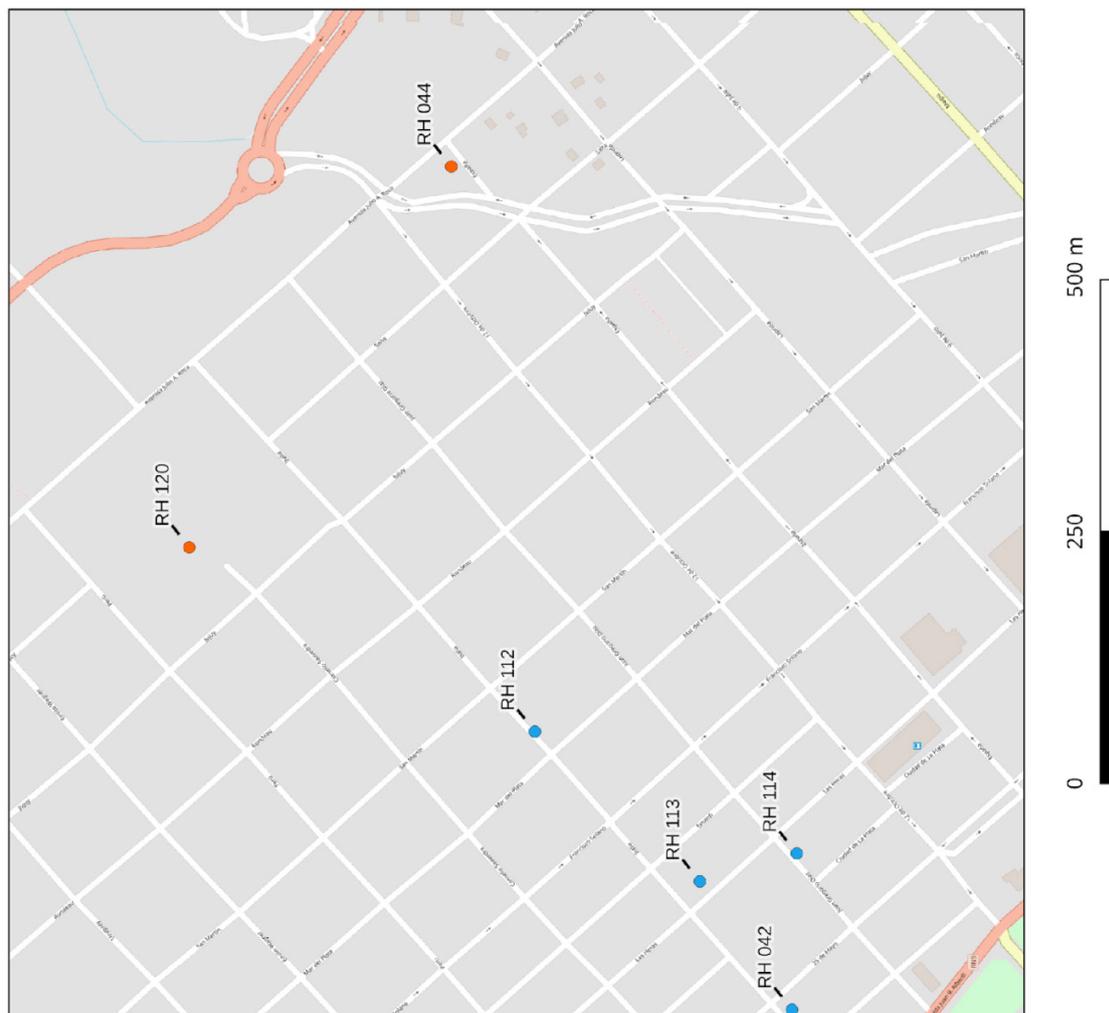
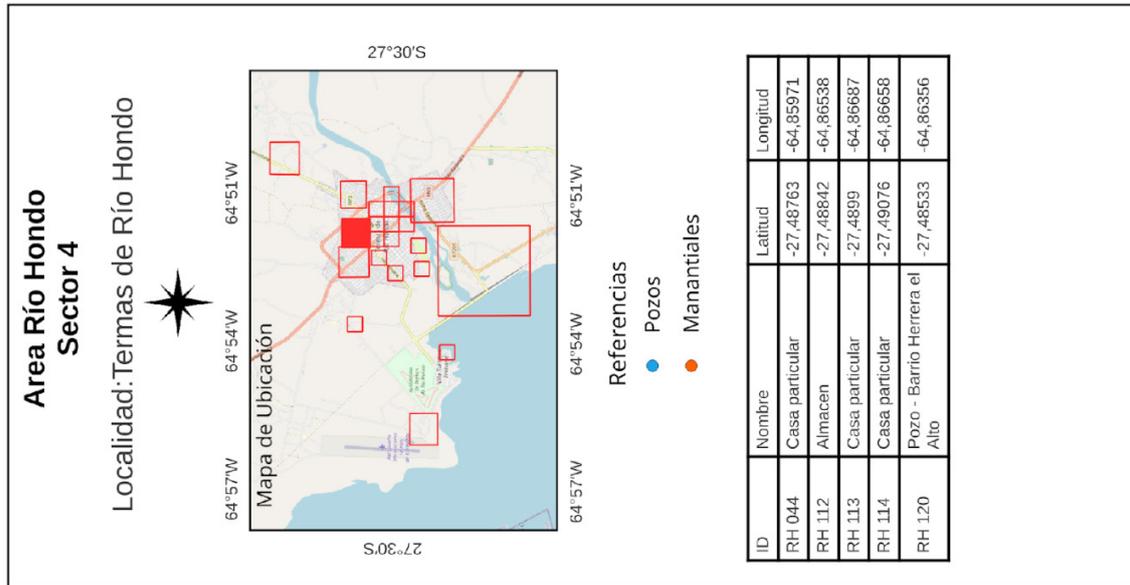
Grilla Índice de los Mapas del Área de Termas de Río Hondo

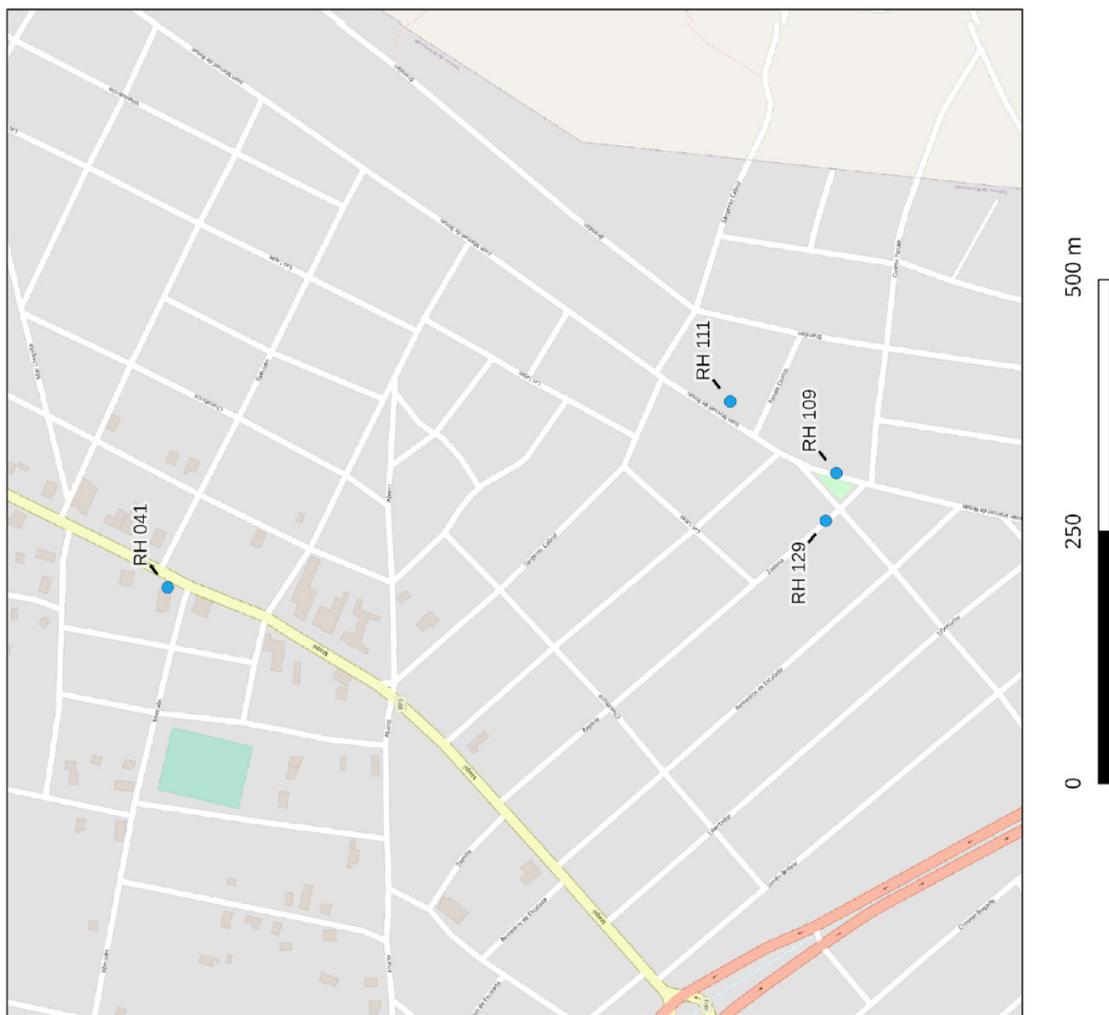
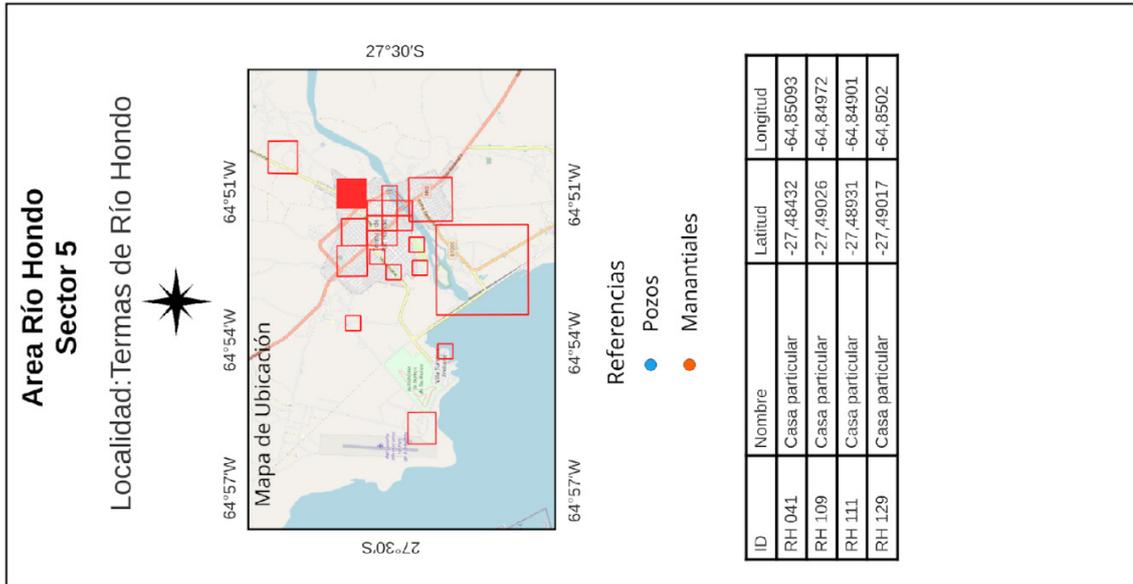


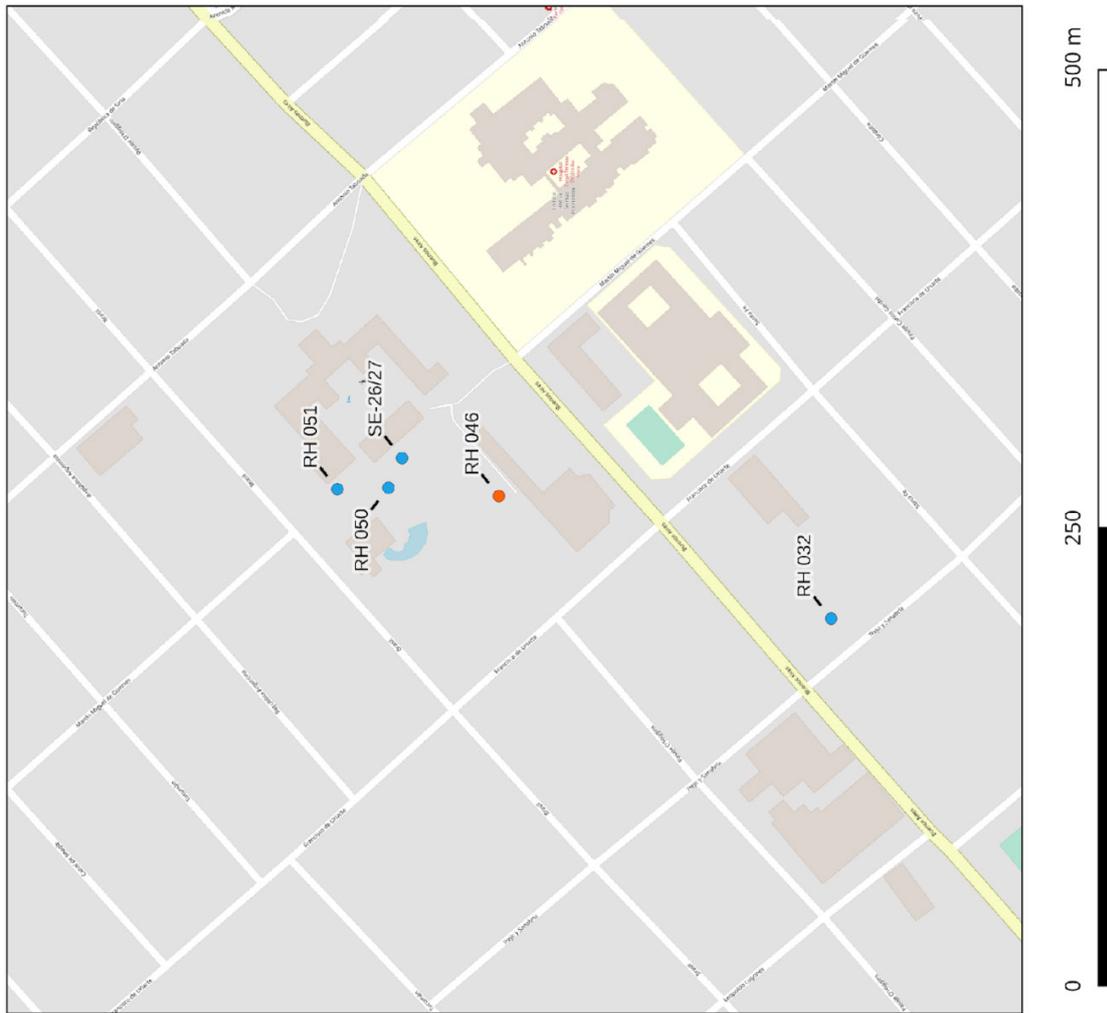
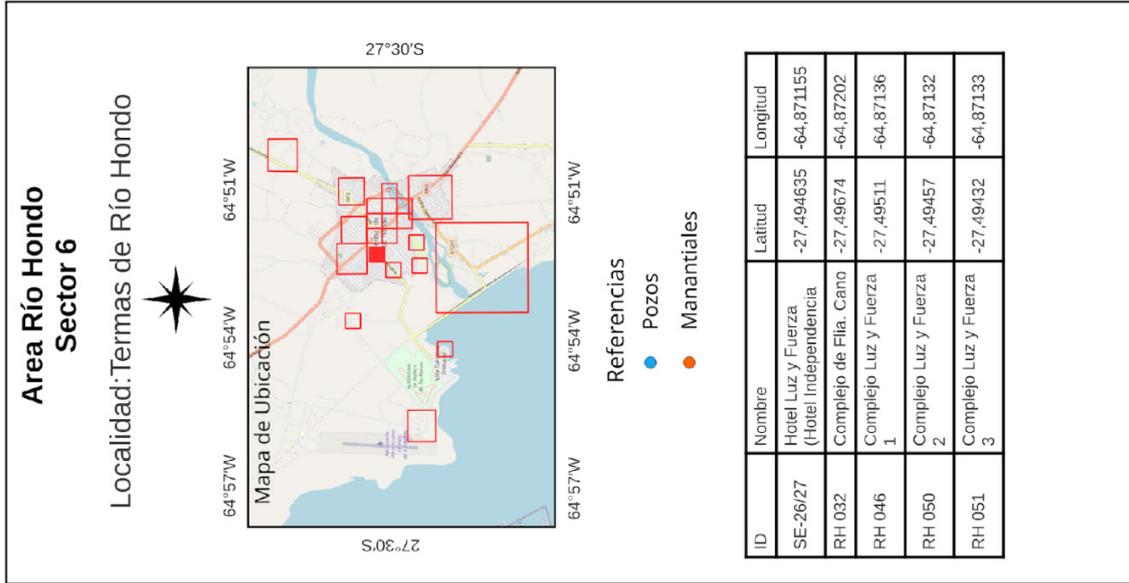


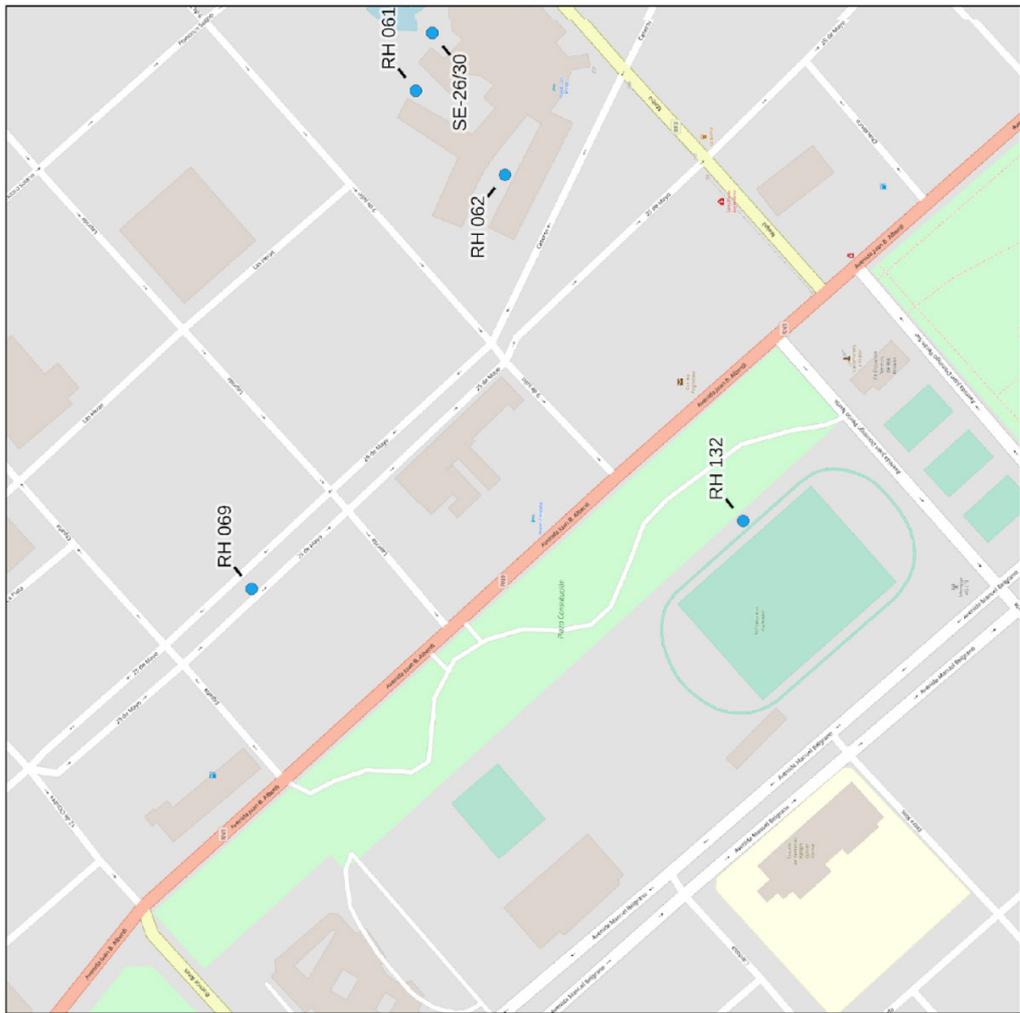
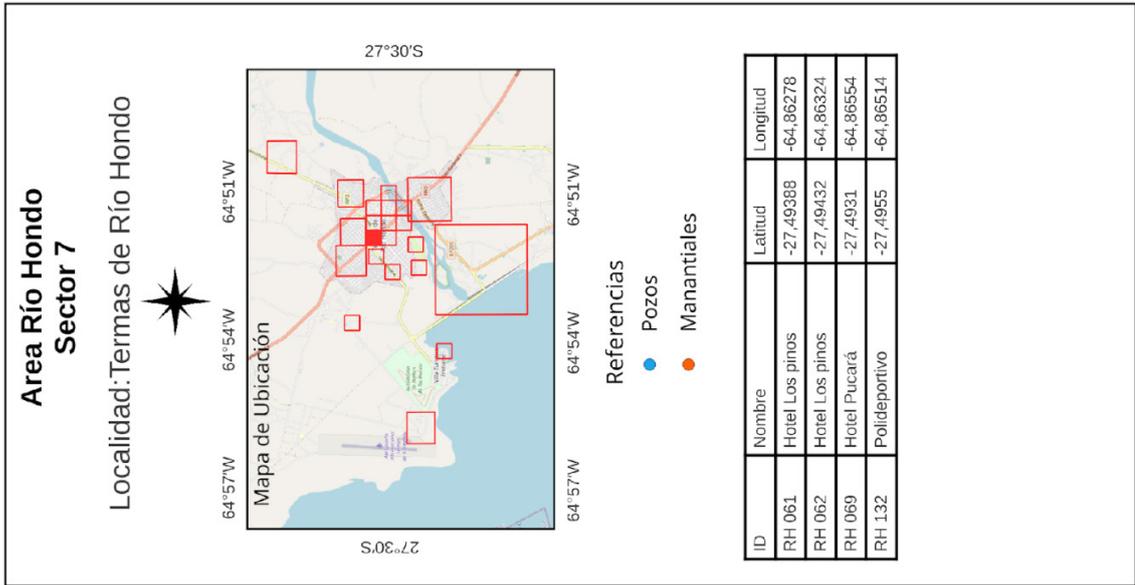


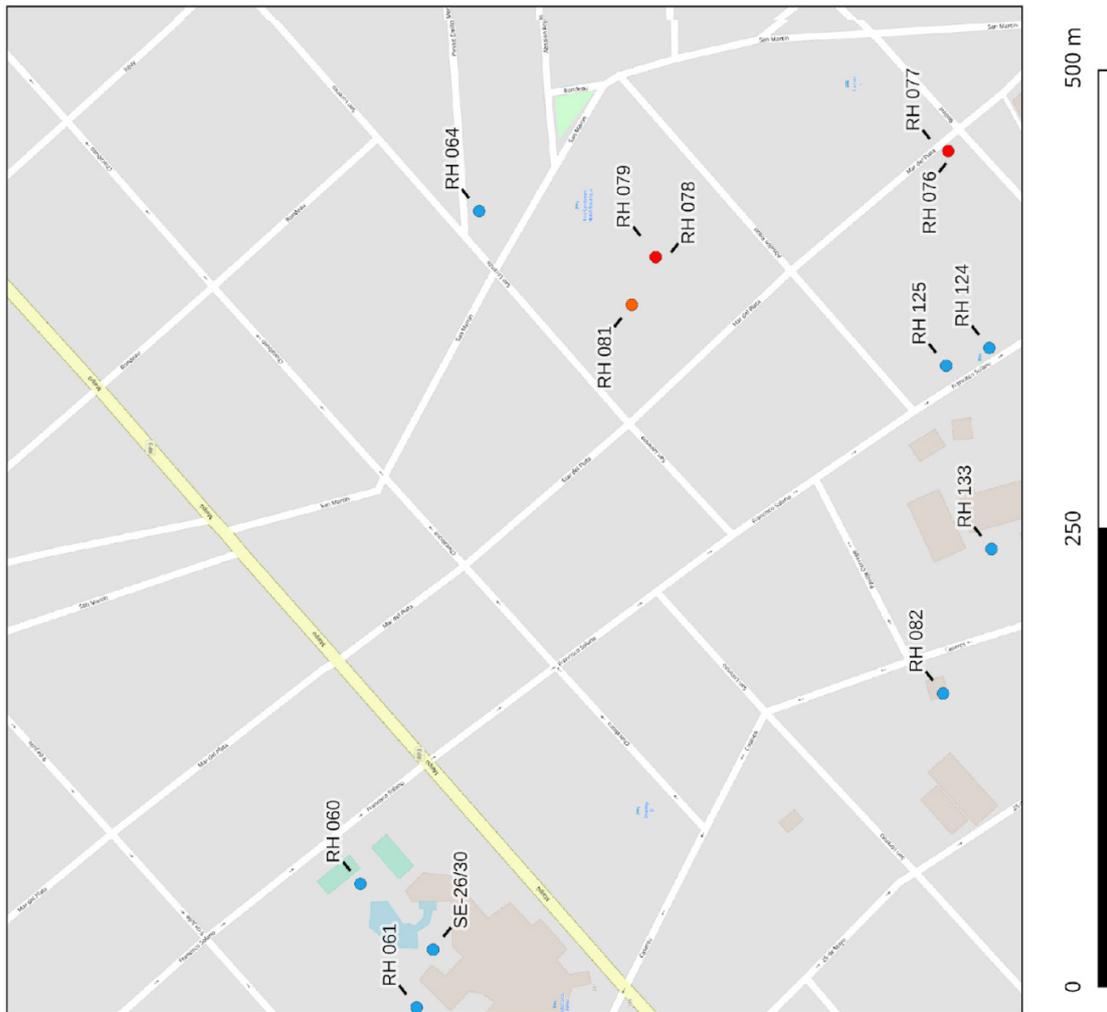
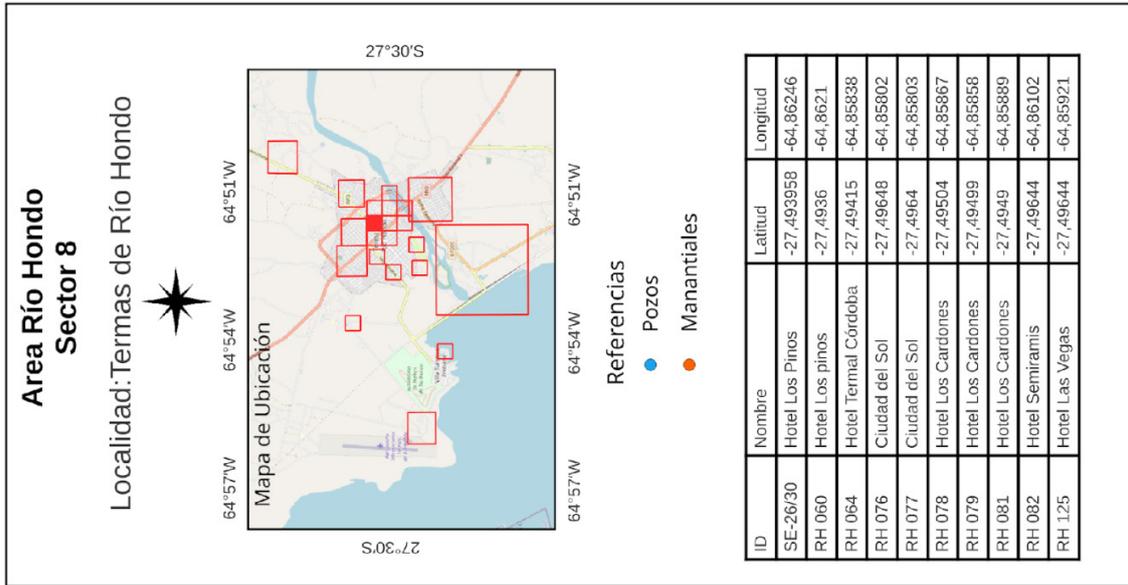


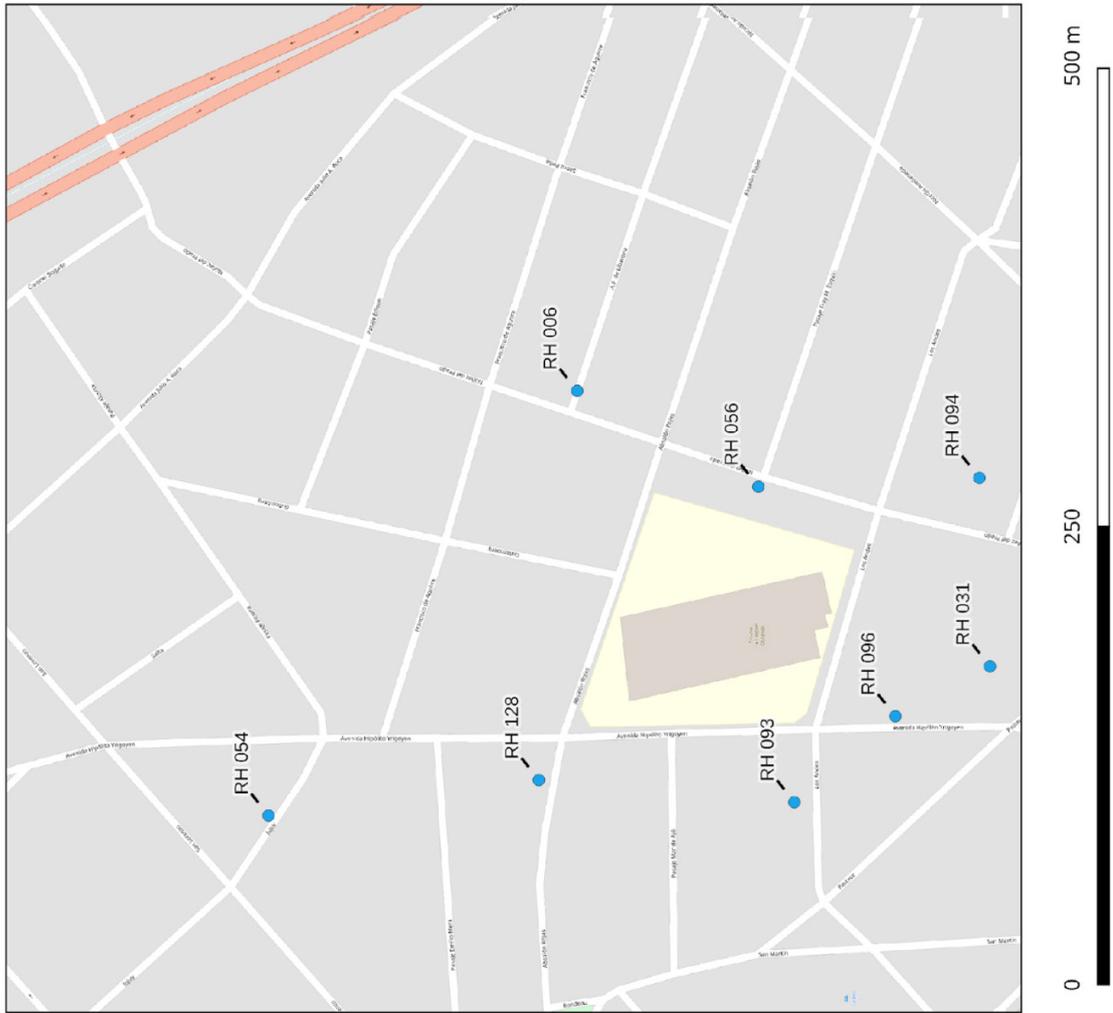
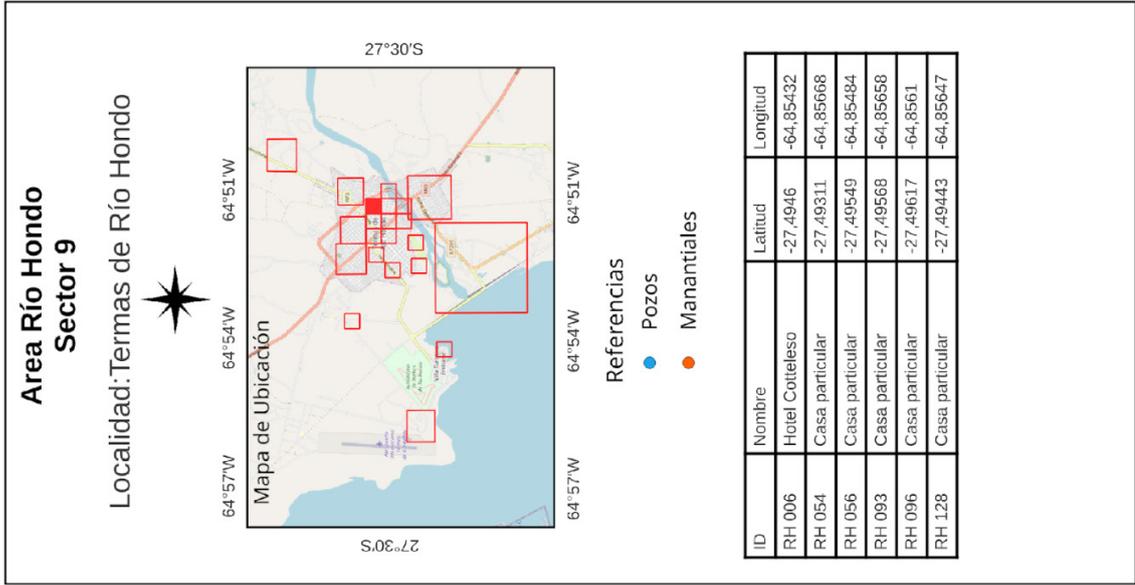


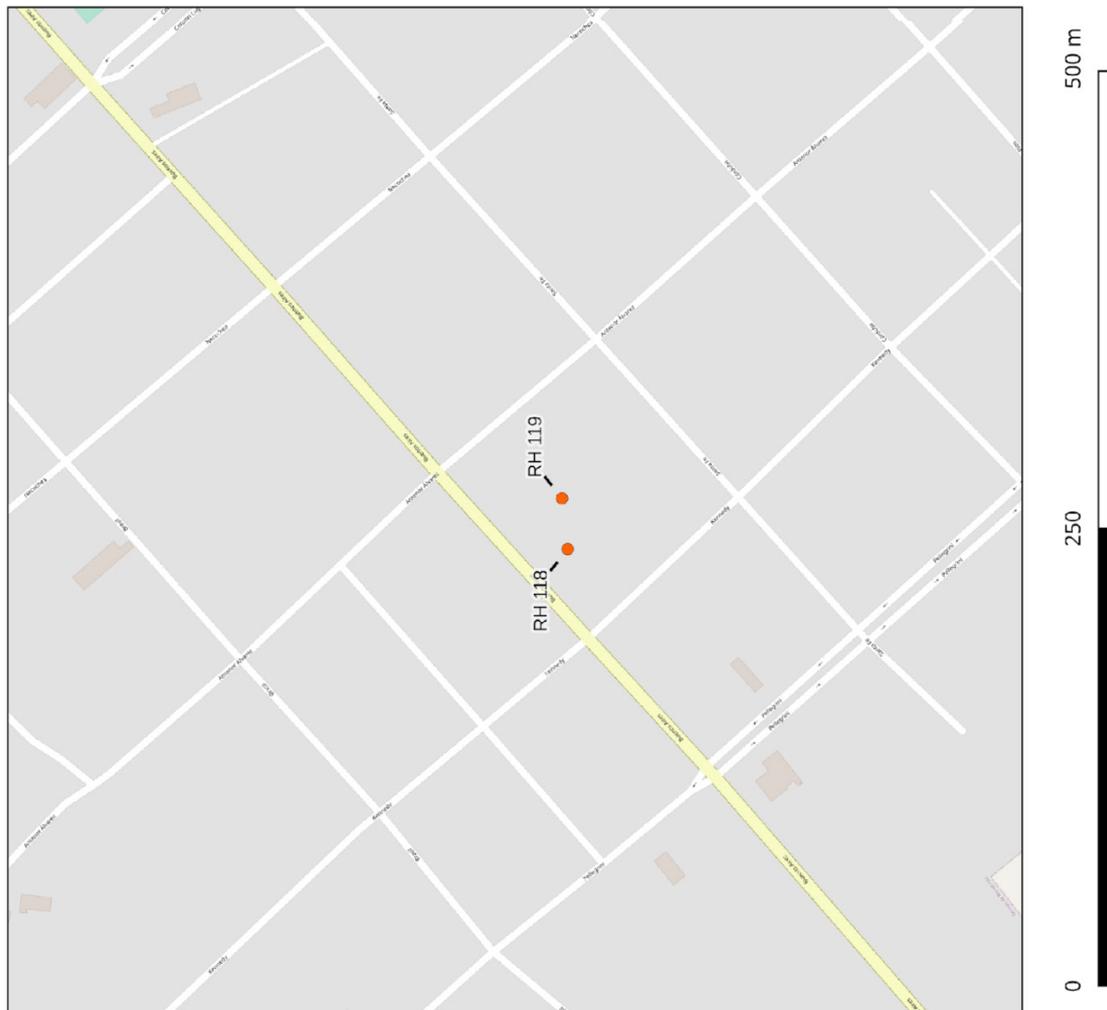
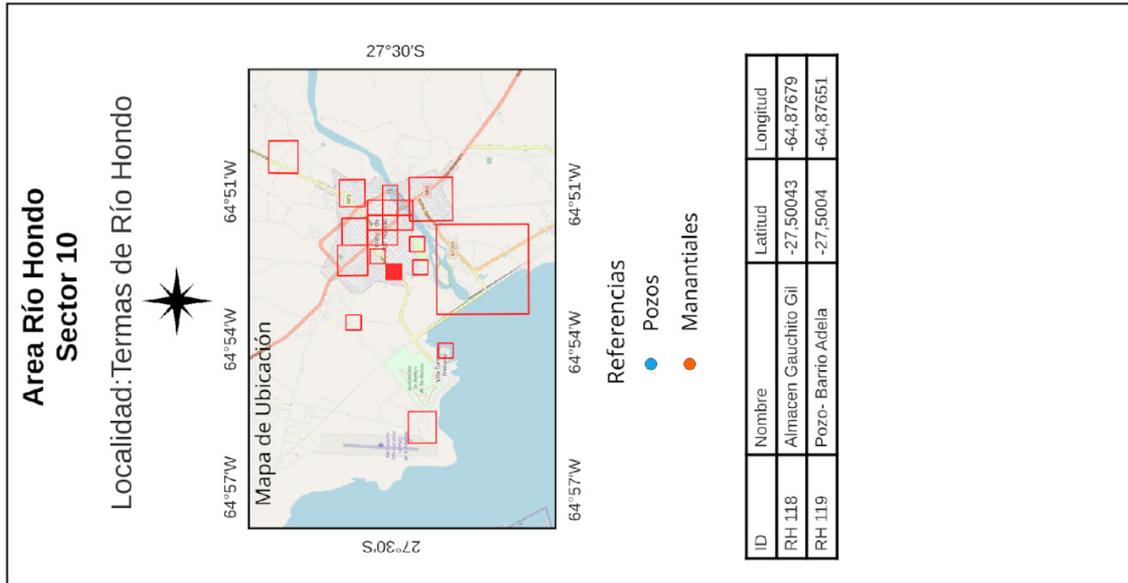


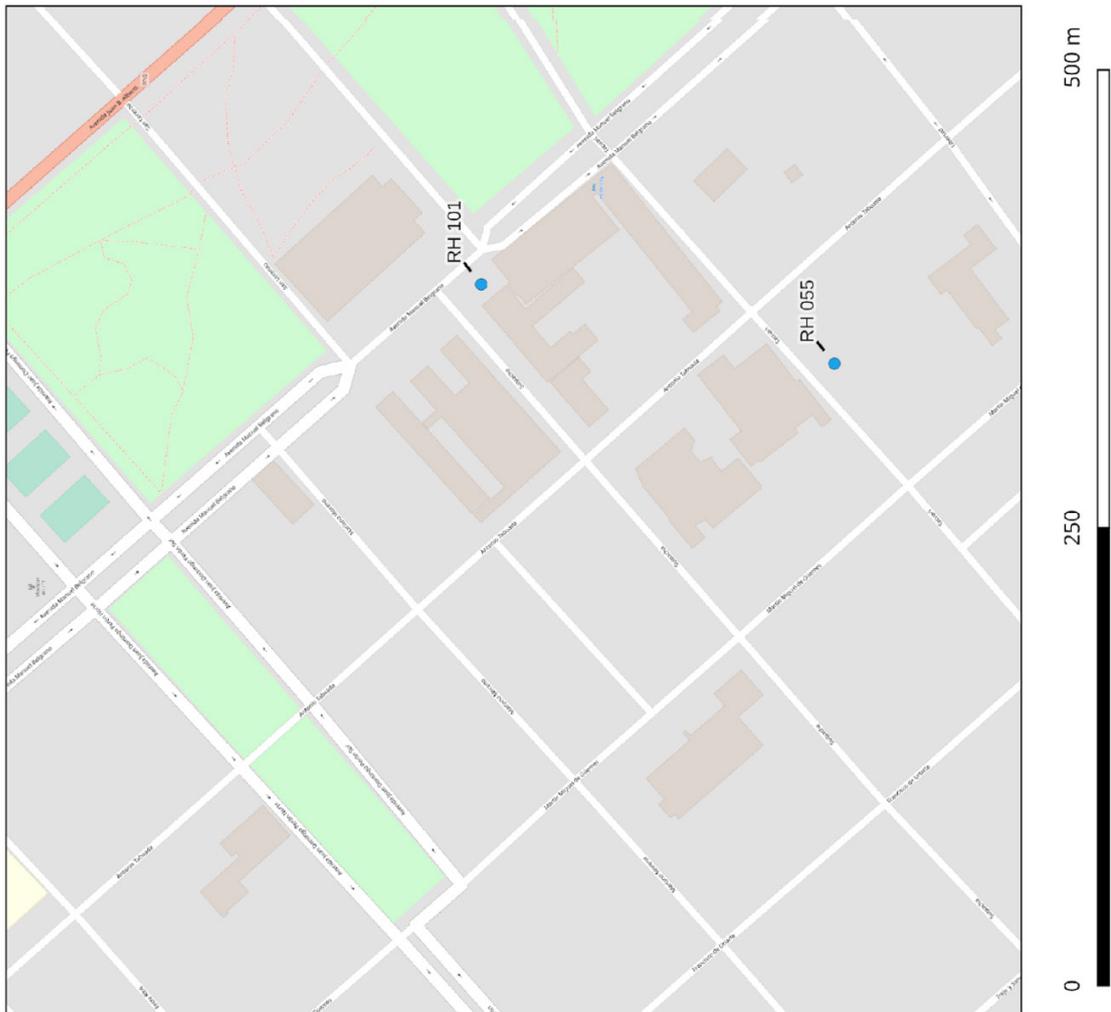
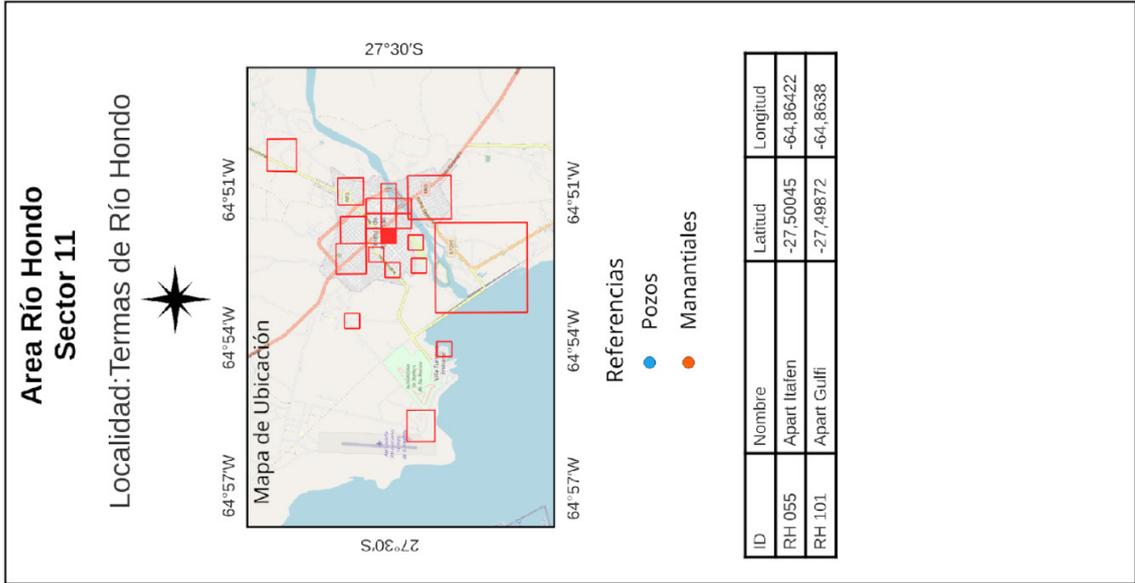


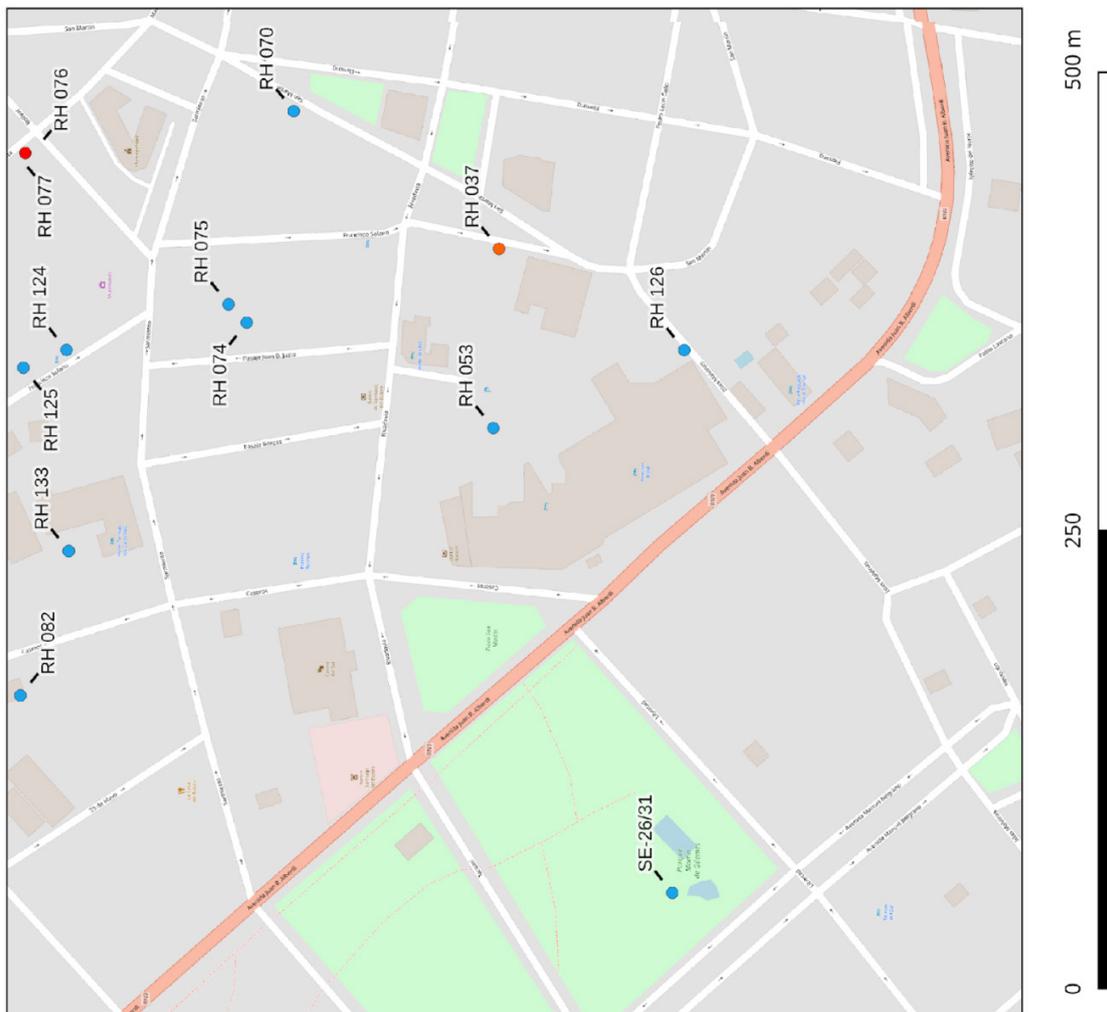
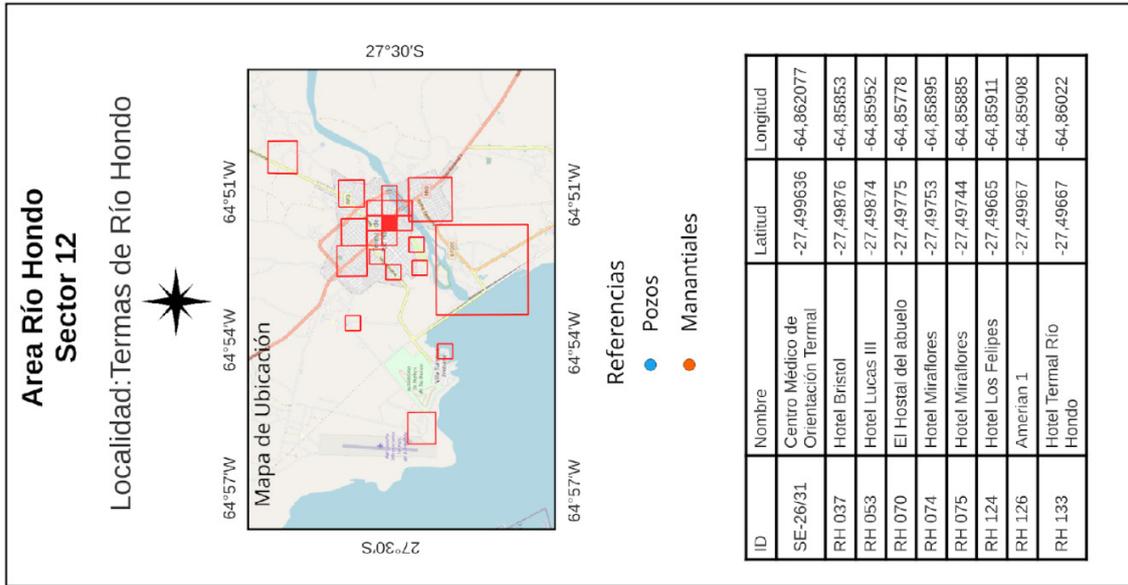


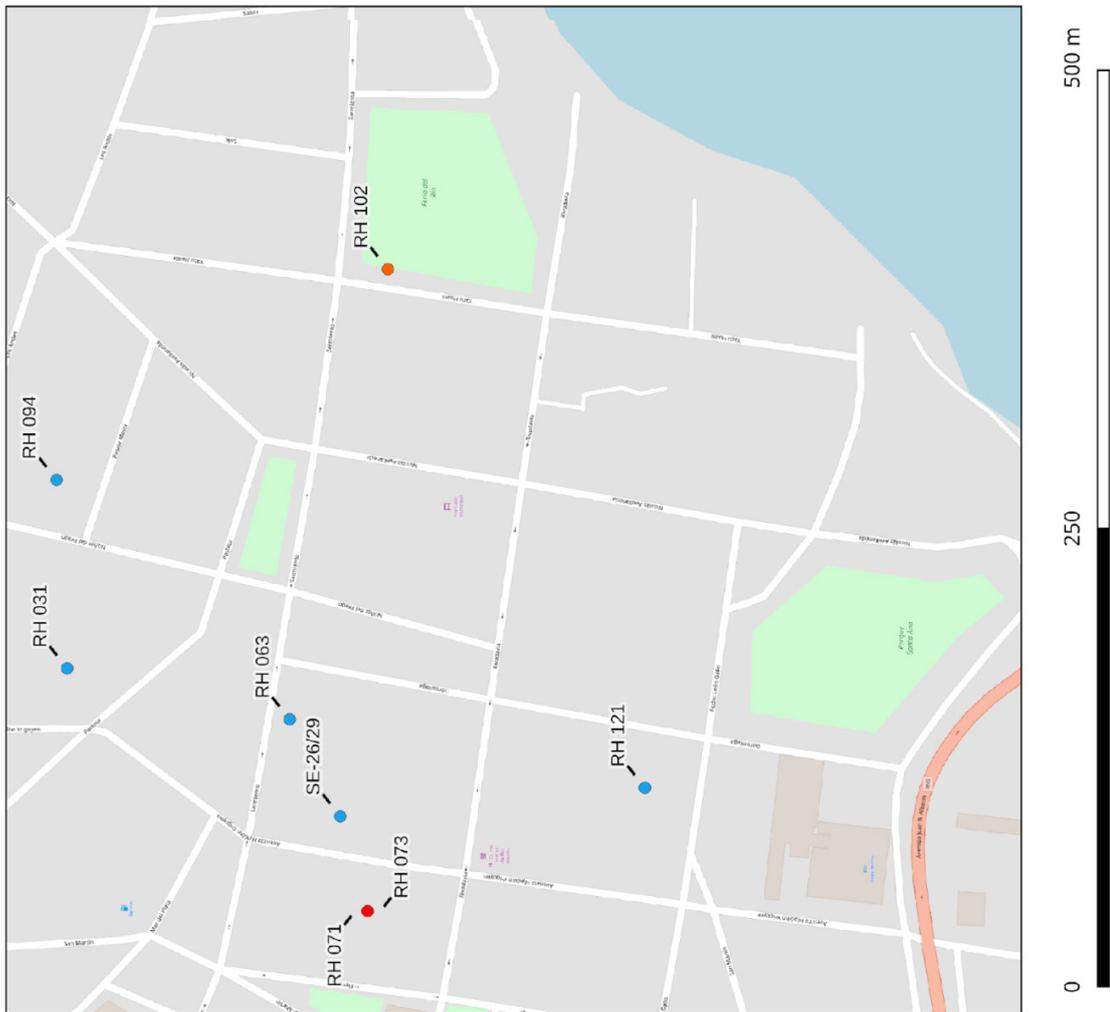
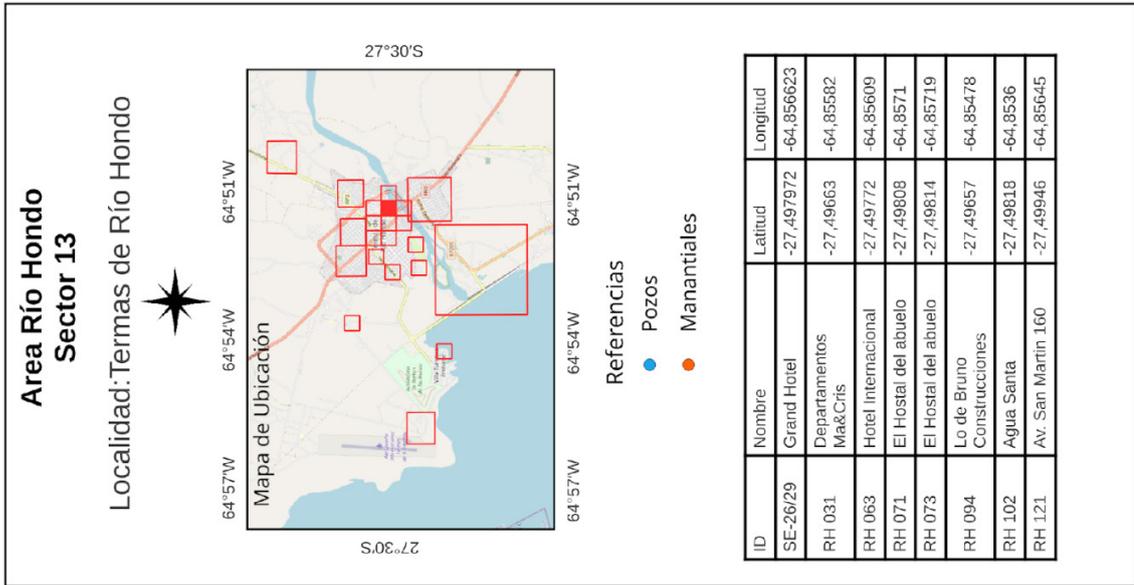


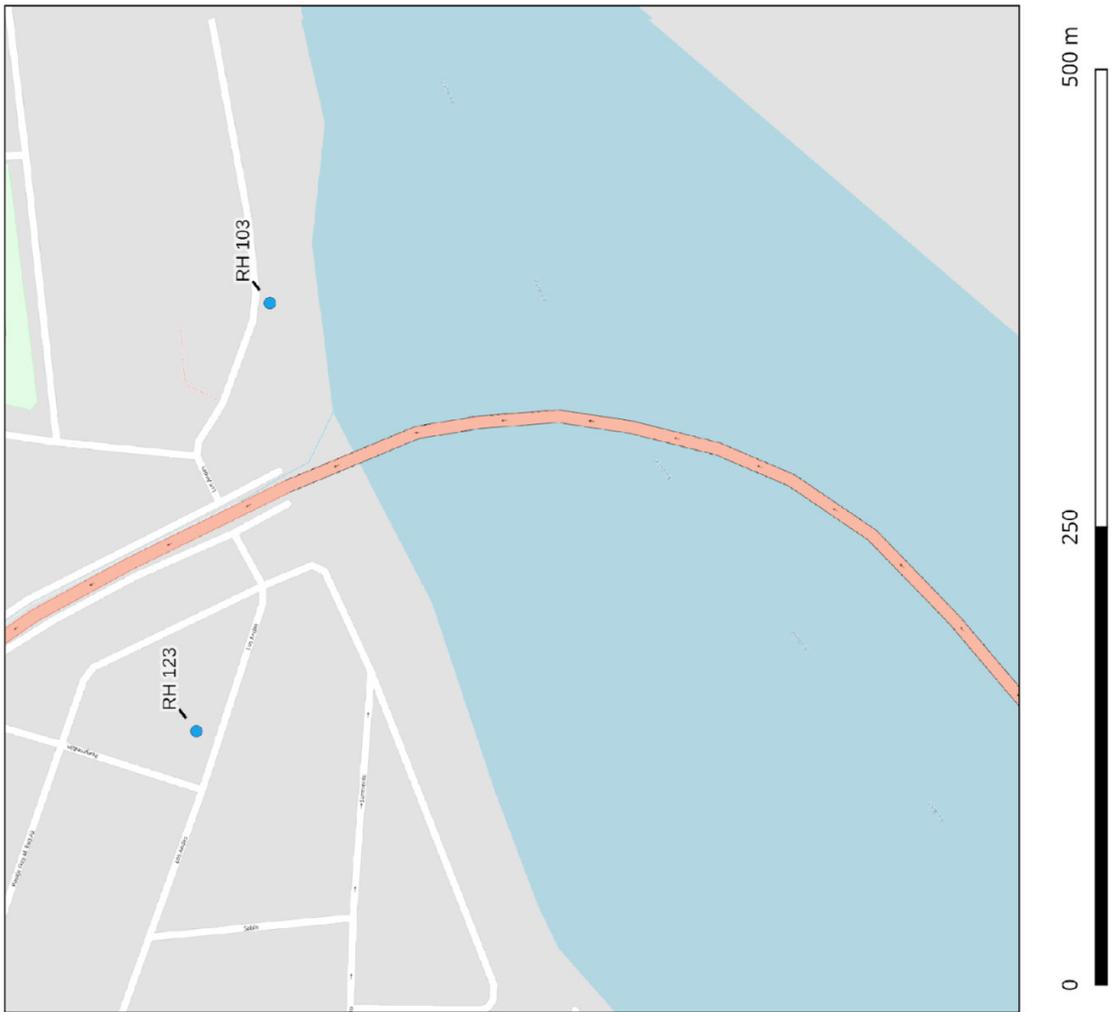
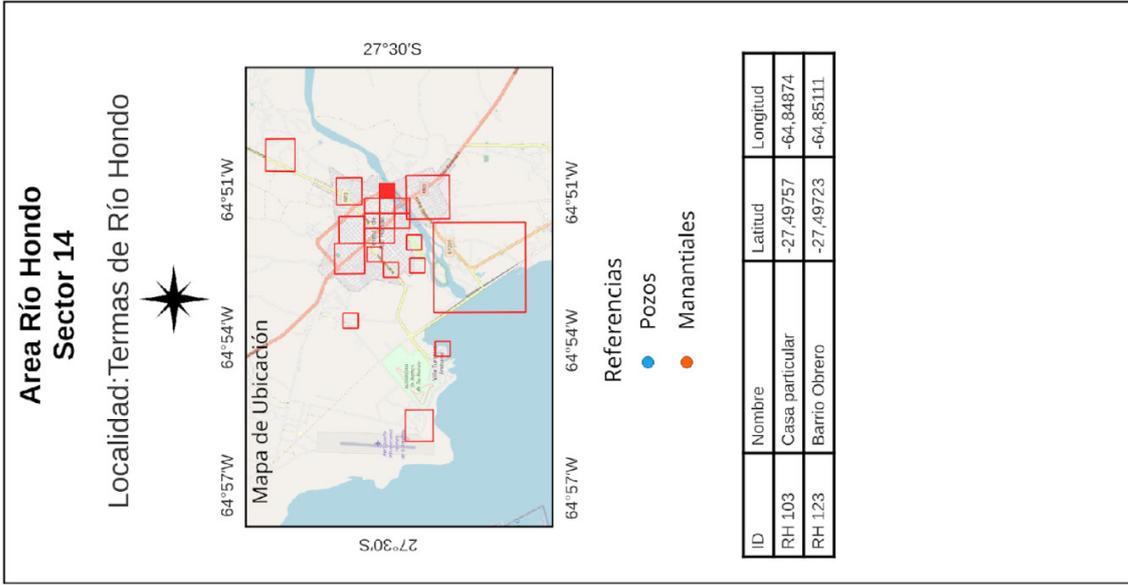


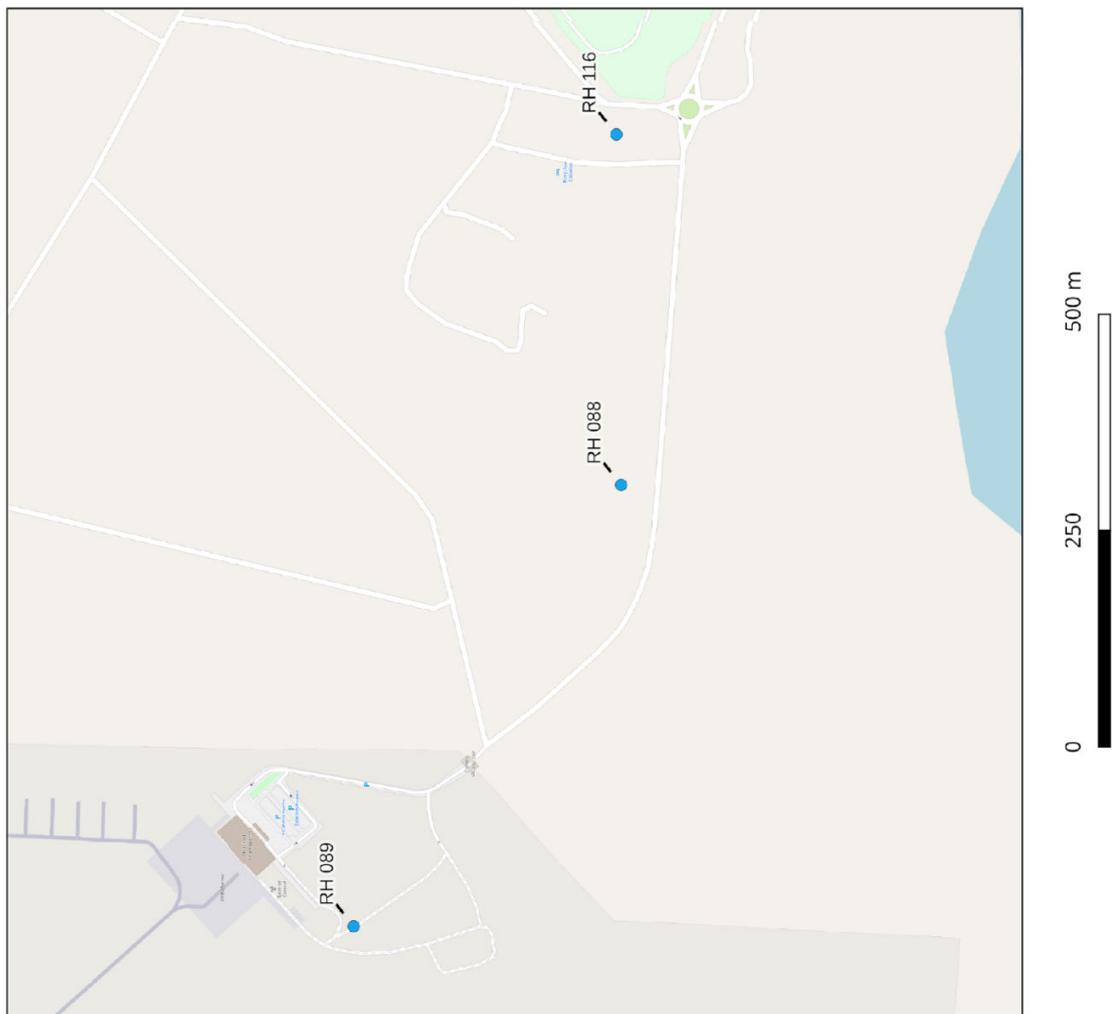
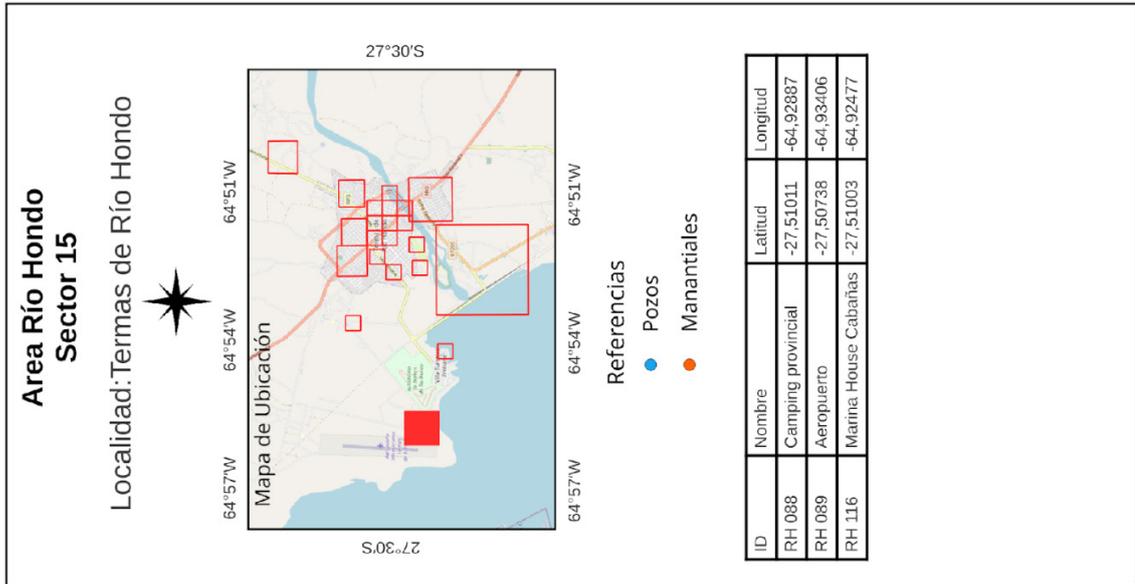


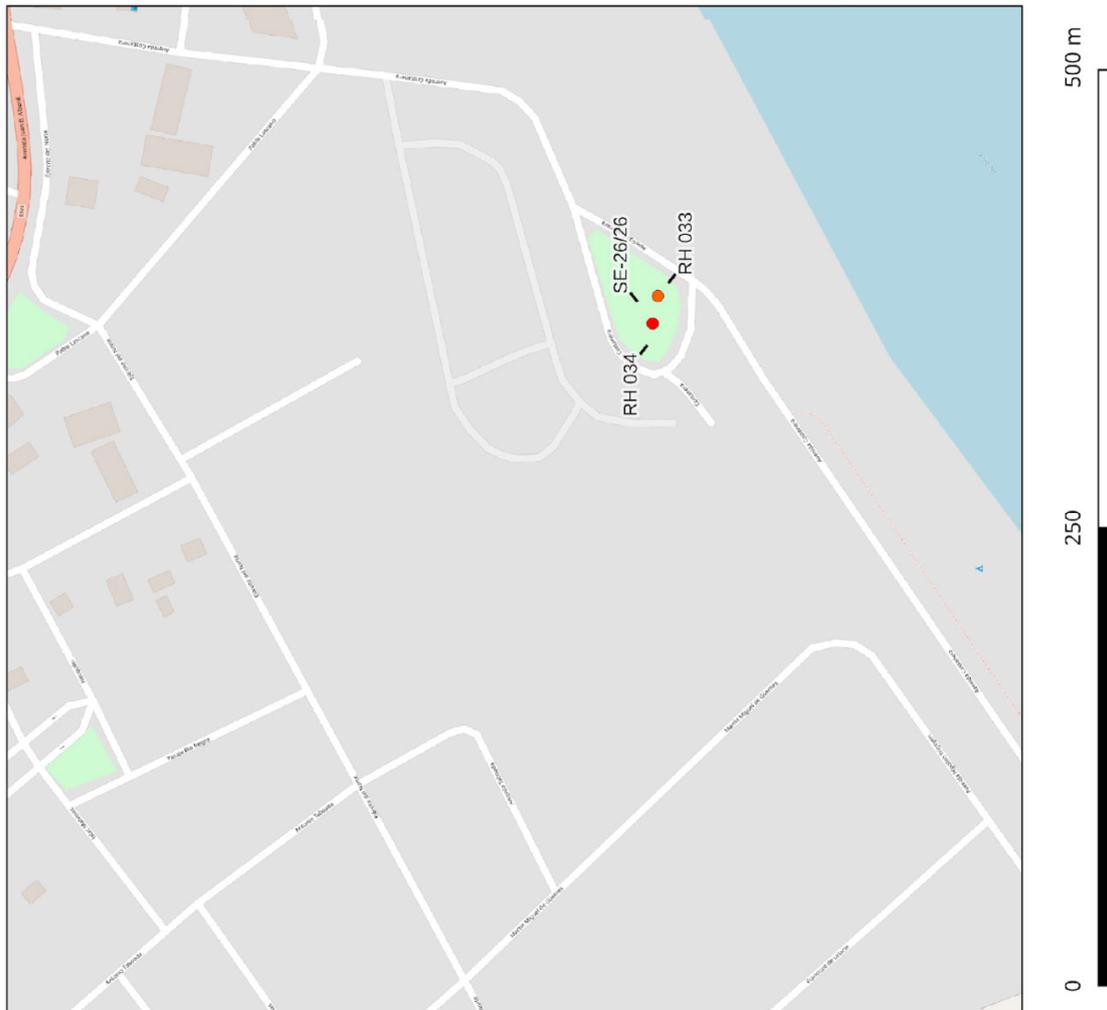
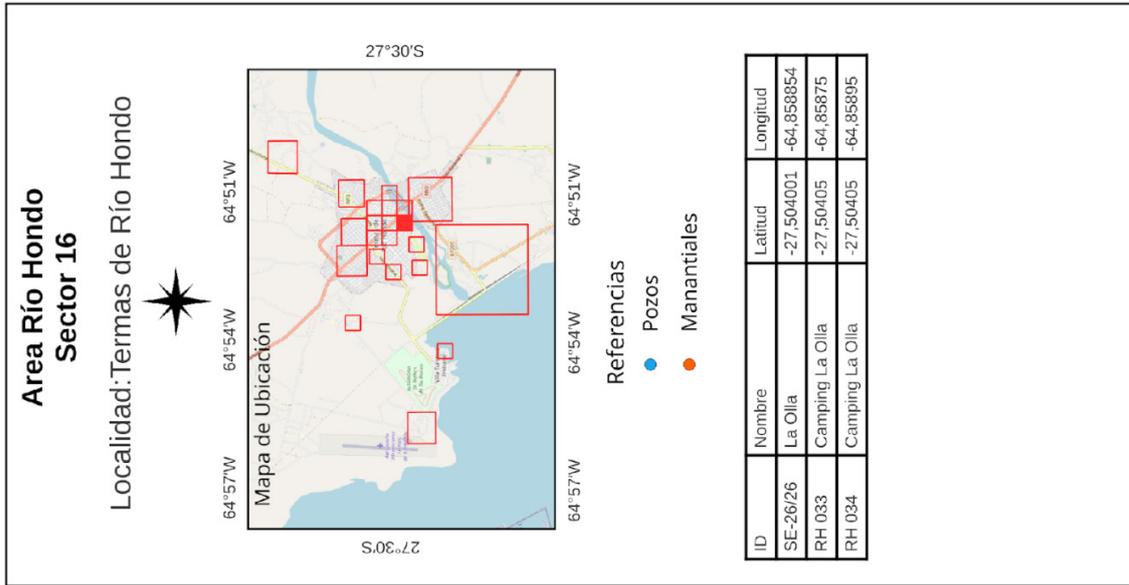


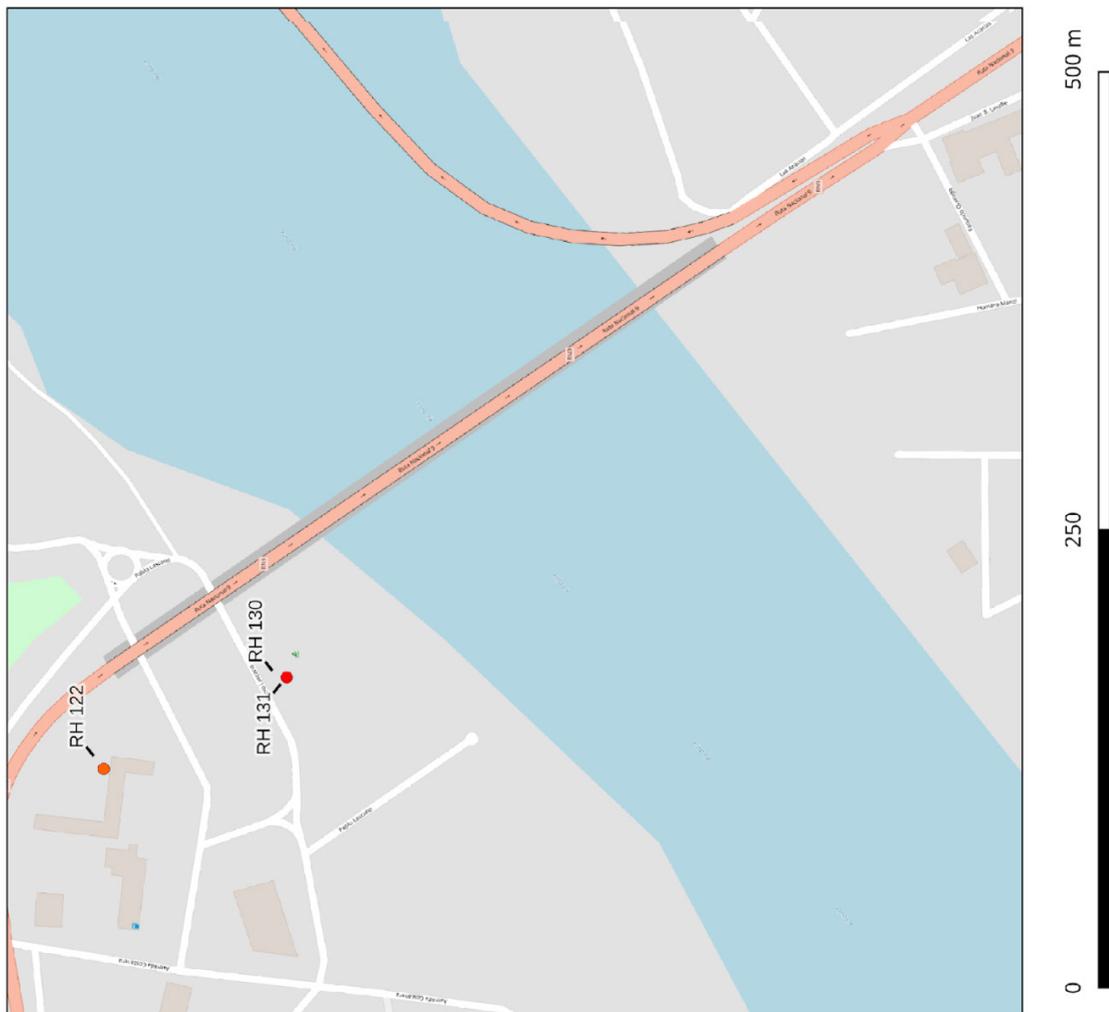
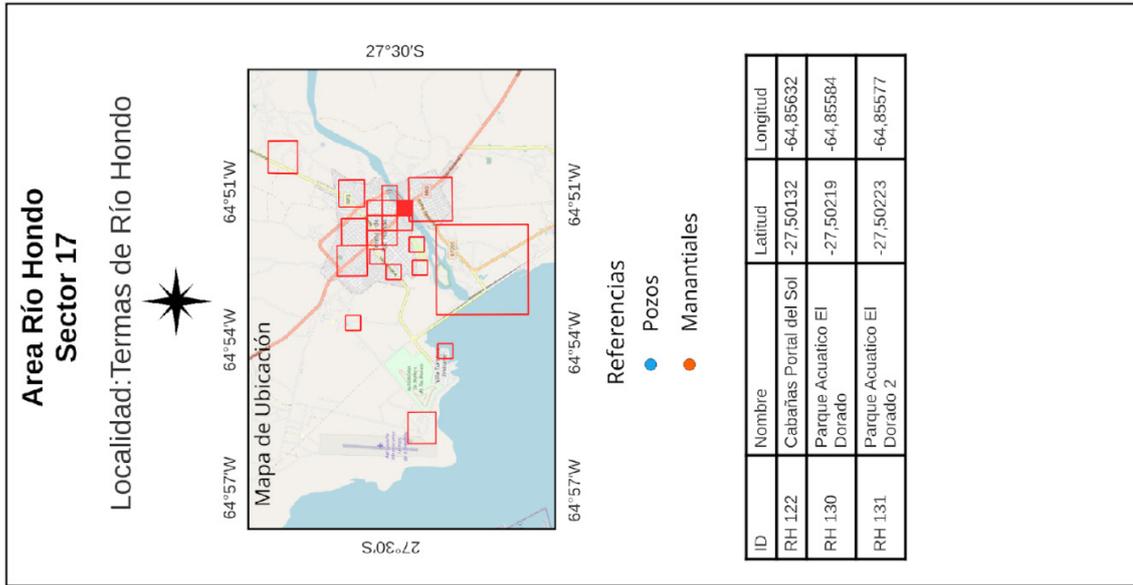


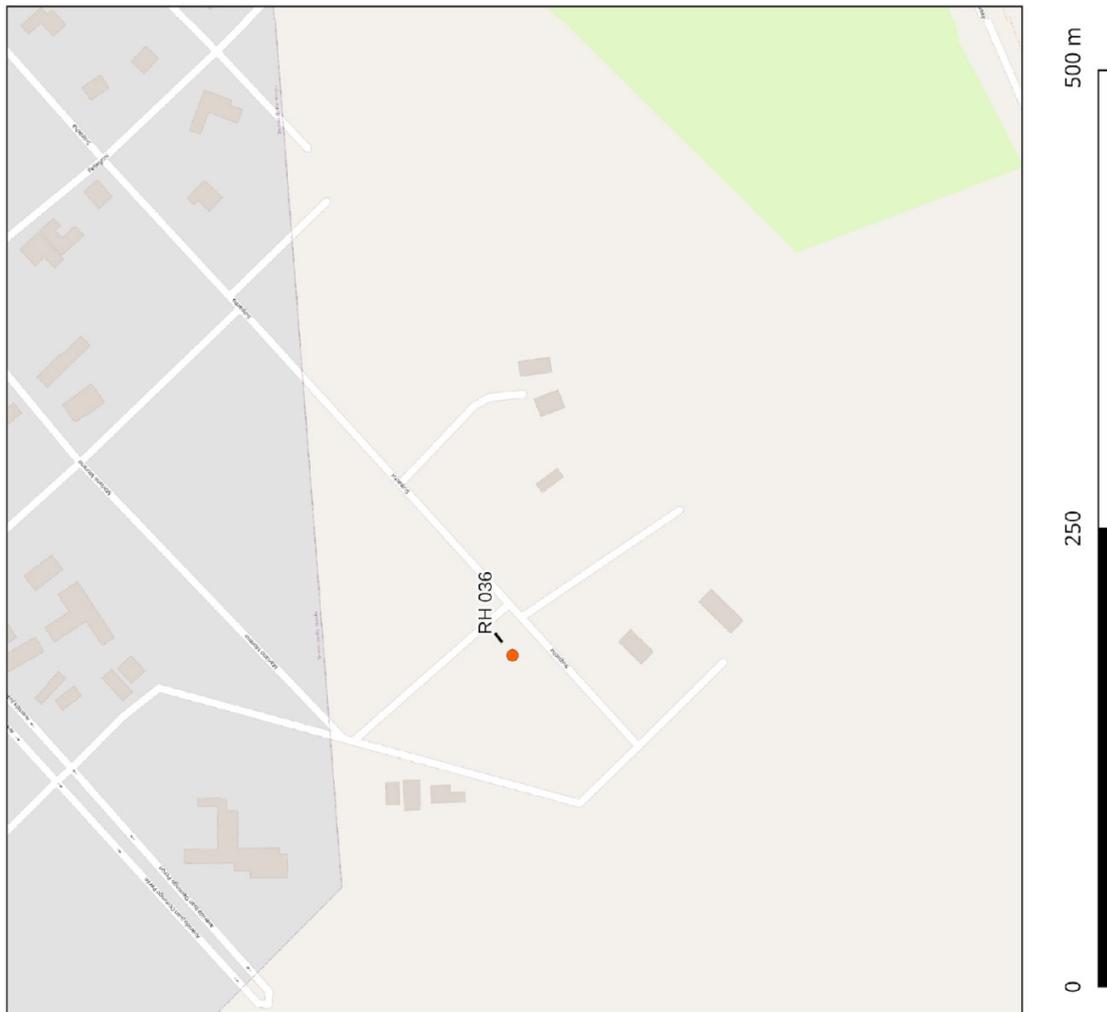
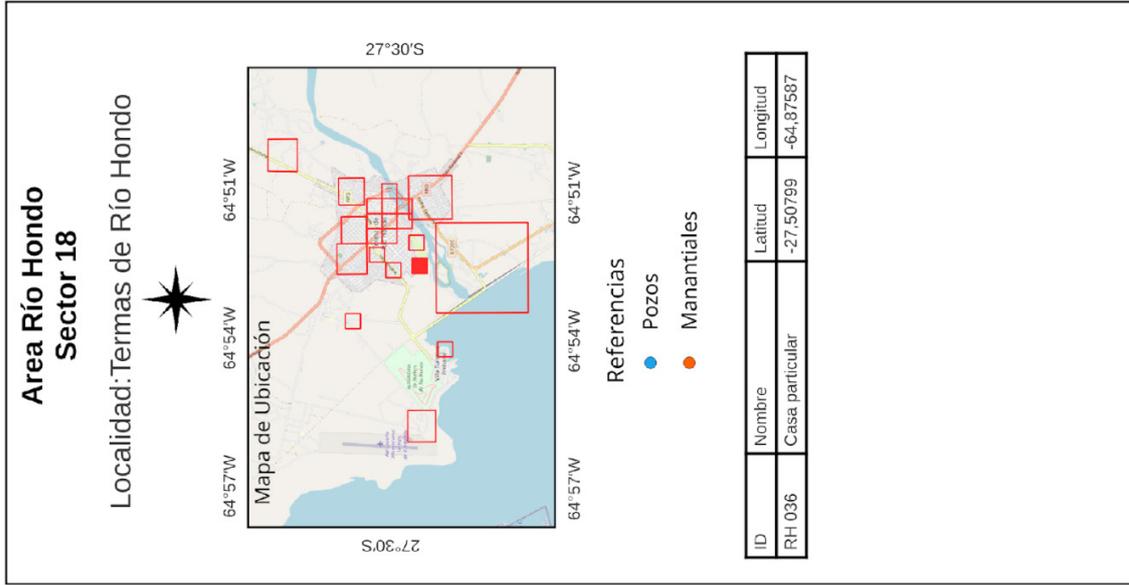


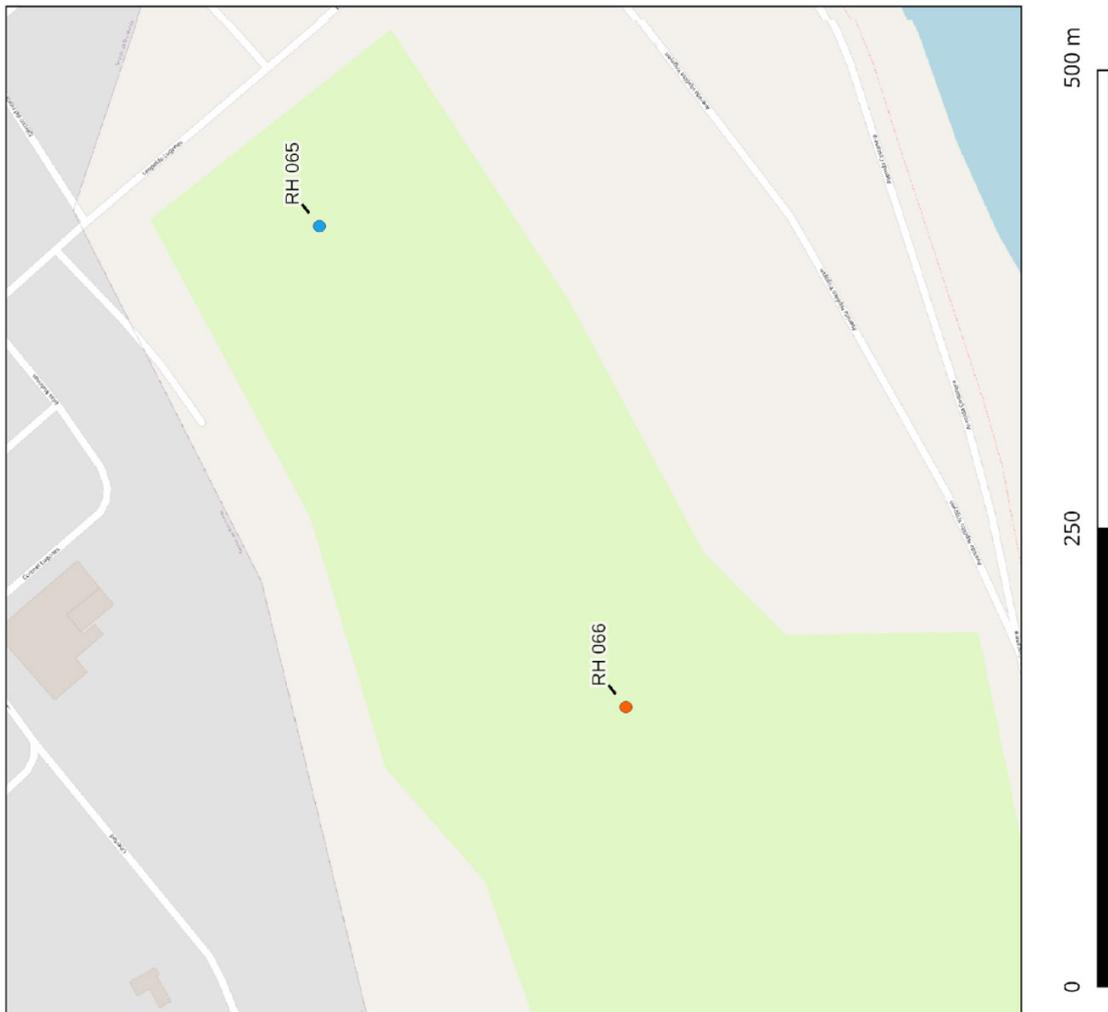
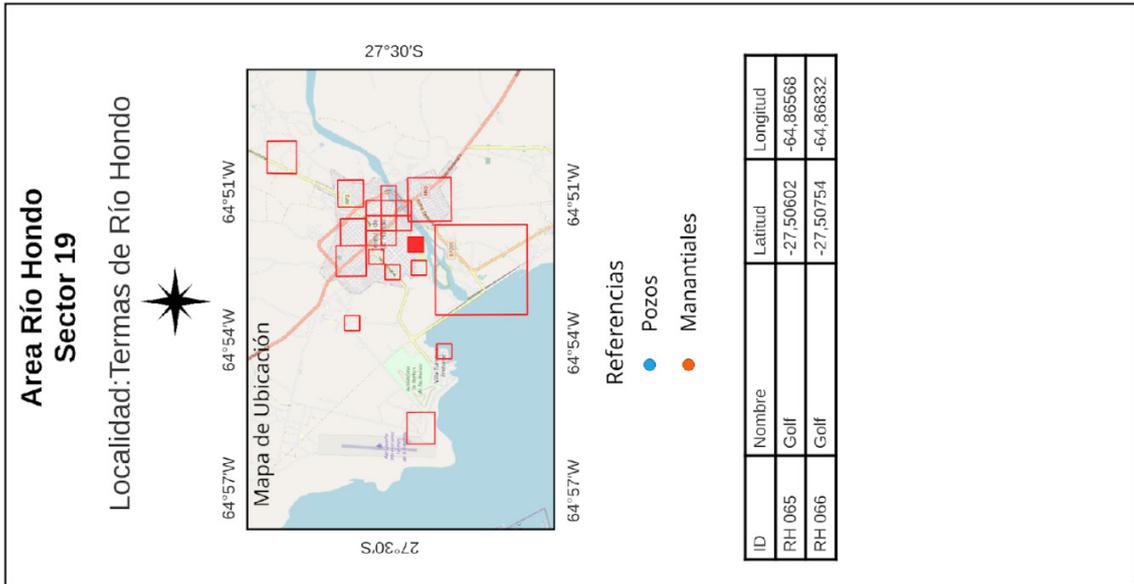


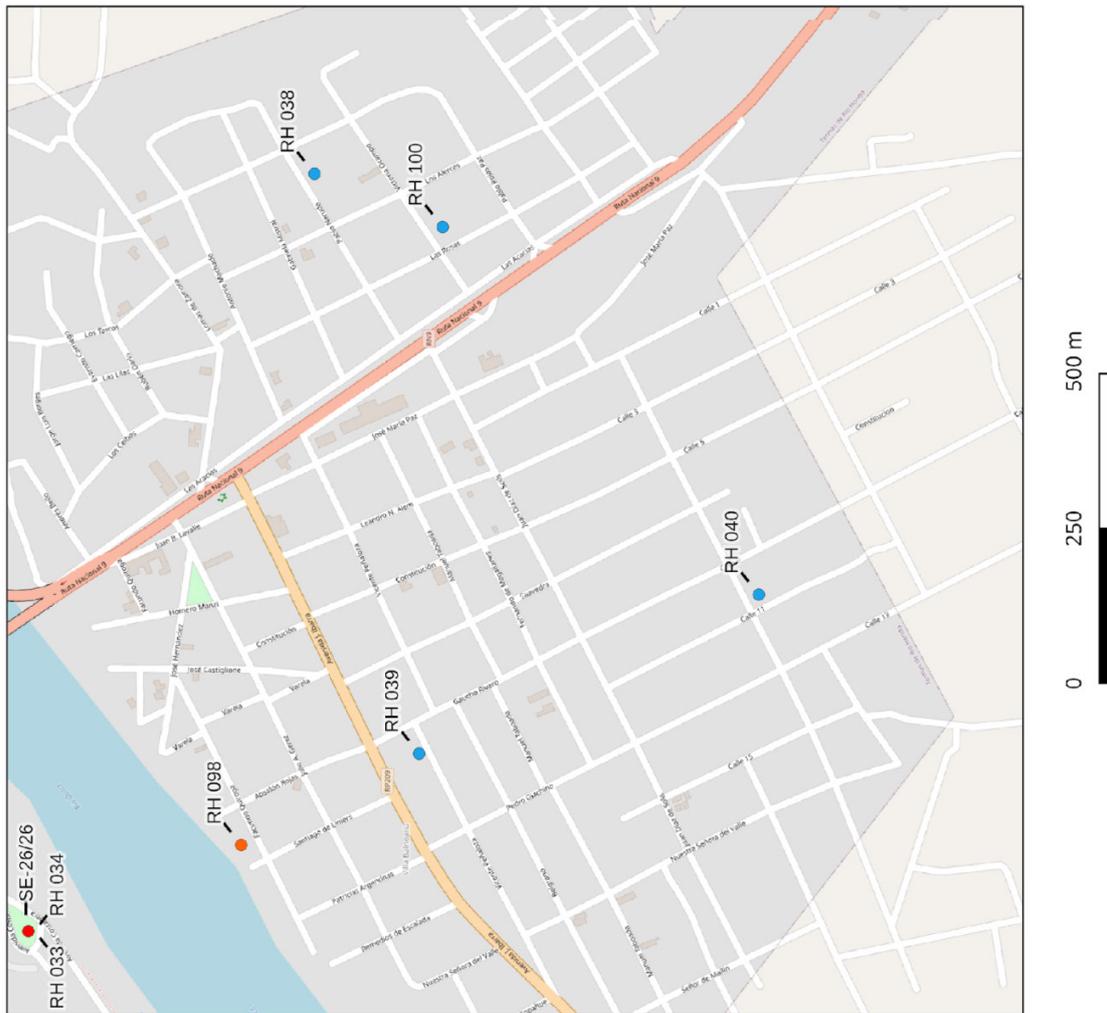
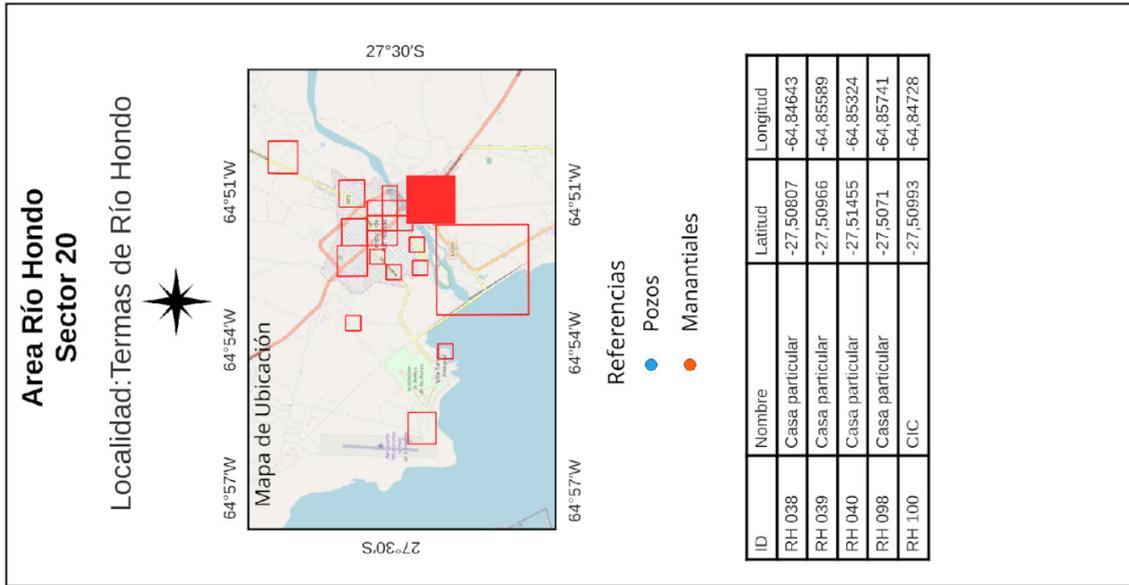


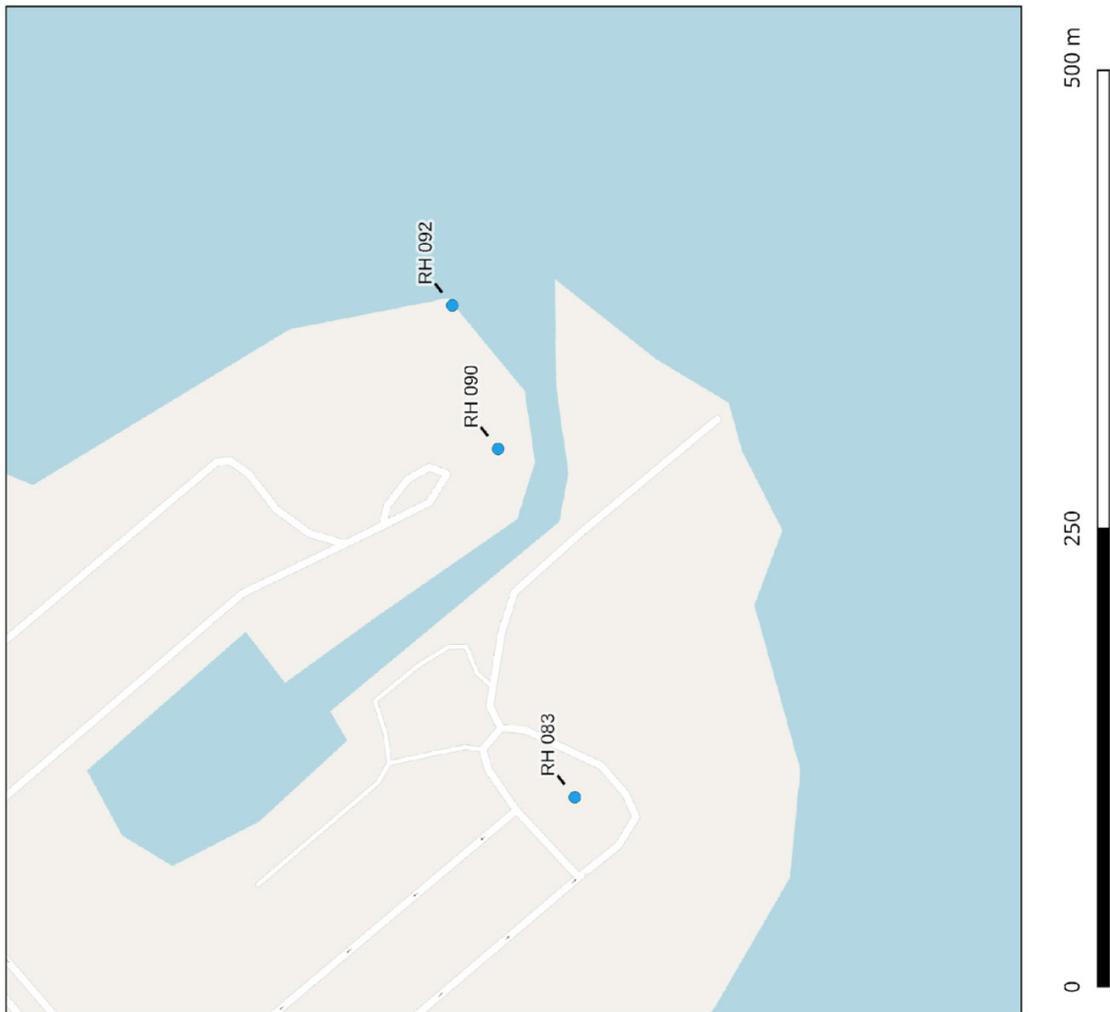
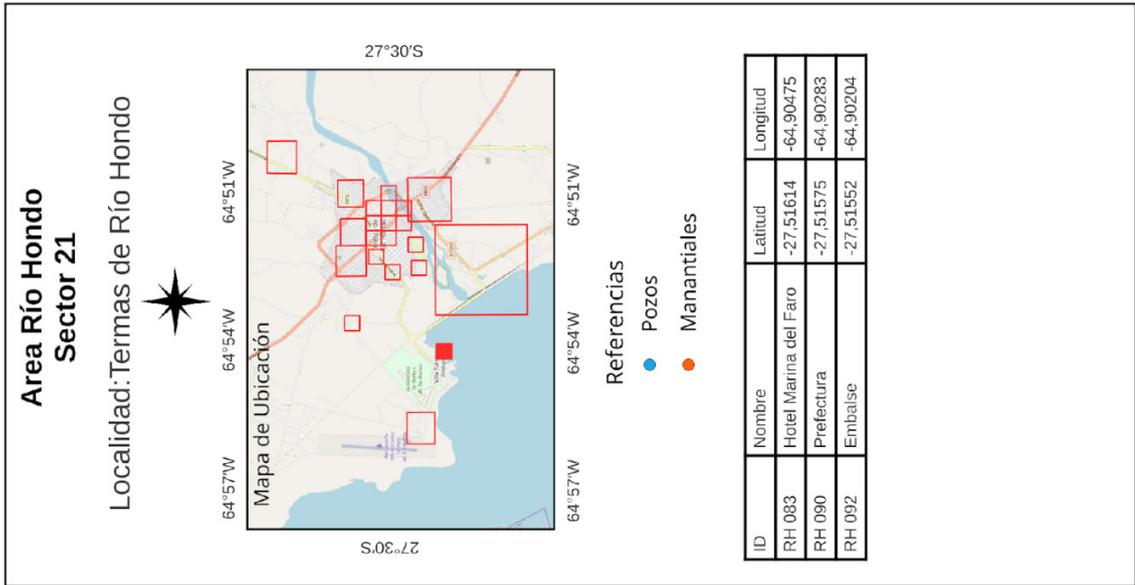












ANEXO V. VALORES DE PARÁMETROS FÍSICOS Y QUÍMICOS PARA LOS POZOS Y MANANTIALES DEL ÁREA

ID	Tipo	Temperatura °C	pH	CE (µS/cm)	STD (mg/L)	Fuente
P6	Pozo	27.30	7.83	1,100.00	827	Boujon <i>et al.</i> 2019
P8	Pozo	37.10	8.11	1,362.00	977	Boujon <i>et al.</i> 2019
Amumpa	Pozo	29.50	7.40	755.00	564	Crincoli y Pesce 2001
El Espinal	Pozo	42.50	7.60	596.00	425	Crincoli y Pesce 2001
El Mojón	Pozo	41.00	7.80	1,270.00	896	Crincoli y Pesce 2001
La Iguana	Pozo	42.50	7.60	1,528.00	1,060	Crincoli y Pesce 2001
La Esperanza	Pozo	32.50	7.20	732.00	550	Crincoli y Pesce 2001
La Madrid 1 (RH15)	Pozo	40.00	7.50	510.00	386	Crincoli y Pesce 2001
SE-23/1	Pozo	30.00	7.9		609	Pesce 2003
SE-23/2	Pozo	38.50	8.00		666	Pesce 2003
SE-23/3	Pozo	35.50	8.90		552	Pesce 2003
SE-23/4	Pozo	27.00	8.00		670	Pesce 2003
SE-23/5	Pozo	28.00	7.90		619	Pesce 2003
SE-23/6	Pozo	4.50	7.40		714	Pesce 2003
SE-23/7	Pozo	25.00	8.10		598	Pesce 2003
SE-23/8	Pozo	35.20	7.60	894.00	651	Pesce 2003
SE-23/9	Pozo	37.00	7.70	923.00	631	Pesce 2003
SE-26/26	Manantial	40.40	8.50	566.00	432	Pesce 2003
SE-26/27	Pozo	53.00	8.40	464.00	362	Pesce 2003
SE-26/29	Pozo	52.00	7.50	11,000.00	8,031	Pesce 2003
SE-26/30	Pozo	54.50	8.30	1,430.00	987	Pesce 2003
SE-26/31	Pozo	52.00	7.51	30,400.00	19,592	Pesce 2003
SE-30/1	Pozo	37.00	9.10		544	Pesce 2003
SE-30/2	Pozo	35.00	9.20		600	Pesce 2003
SE-30/3	Pozo	37.50	8.60	774.00	532	Pesce 2003
SE-31	Pozo	45.00	8.50	580.00	422	Pesce 2003
SE-33/1	Pozo	46.00	8.50		694	Pesce 2003
SE-33/2	Pozo	45.50	8.30	962.00	715	Pesce 2003
SE-34/1	Pozo	42.00	7.90		777	Pesce 2003
SE-34/2	Pozo	42.50	8.20	1,025.00	708	Pesce 2003
SE-35	Pozo	32.00	7.50	2,070.00	1,489	Pesce 2003

Cuadro 5. Valores y parámetros físicos y químicos para los pozos y manantiales del Área 2.

ID	Tipo	Temperatura °C	pH	CE (µS/cm)	STD (mg/L)	Fuente
T-5/23	Pozo	37.00	7.90	576.00	405	Pesce 2003
T-13/2	Pozo	41.00	7.70	688.00	517	Pesce 2003
T-13/3	Pozo	42.00	7.70	648.00	496	Pesce 2003
T-14	Pozo	43.00	7.60	1,528.00	1,121	Pesce 2003
T-15	Pozo	50.00	7.70	917.00	716	Pesce 2003
T-16	Pozo	46.00	7.60	827.00	623	Pesce 2003
T-17	Pozo	37.00	7.60	924.00	675	Pesce 2003
T-18	Pozo	41.00	7.80	1,270.00	923	Pesce 2003
T-19/8	Pozo	36.00	7.60	837.00	649	Pesce 2003
T-19/7	Pozo	36.00	7.60	594.00	467	Pesce 2003
T-21	Pozo	36.00	7.40	671.00	571	Pesce 2003
T-22	Pozo	33.00	7.20	732.00	593	Pesce 2003
T-23	Pozo	38.00	7.60	596.00	486	Pesce 2003
T-24	Pozo	43.00	7.60	596.00	453	Pesce 2003
S-22/7	Manantial	31.70	7.10	12,800.00	9,319	Pesce 2003
S-22/8	Manantial	35.00	7.00	12,800.00	9,020	Pesce 2003
S-22/9	Manantial	35.20	7.30	12,800.00	9,366	Pesce 2003
S-22/10	Manantial	36.00	7.20	12,800.00	9,382	Pesce 2003
S-22/11	Manantial	39.00	7.30	12,800.00	9,469	Pesce 2003
S-24/1	Manantial	35.00	8.20	n.d	455	Pesce 2003
S-26	Pozo	41.00	7.70	872.00	619	Pesce 2003
S-27/4	Manantial	54.00	8.40	671.00	469	Pesce 2003
S-27/5	Manantial	46.00	7.90	2,135.00	1,409	Pesce 2003
S-27/6	Manantial	63.00	7.90	1,171.00	734	Pesce 2003
S-27/7	Manantial	58.00	8.20	1,293.00	841	Pesce 2003
S-27/8	Manantial	50.00	n.d	1,074.00	720	Pesce 2003
S-29/1	Manantial	36.20	8.10	660.00	420	Pesce 2003
S-29/2	Manantial	36.20	8.20	620.00	400	Pesce 2003
S-29/3	Manantial	38.60	8.30	560.00	360	Pesce 2003
S-29/4	Manantial	21.00	8.40	760.00	490	Pesce 2003
ES01	Manantial	35.00	6.70	15,180.00	10,349	Chiodi <i>et al.</i> 2016
I*	Manantial	31.70	7.10	12,800.00	9,025	Moreno Espelta <i>et al.</i> 1978
II*	Manantial	35.00	7.00	12,800.00	8,734	Moreno Espelta <i>et al.</i> 1978
III*	Manantial	35.20	7.30	12,800.00	8,959	Moreno Espelta <i>et al.</i> 1978
IV*	Manantial	36.00	7.20	12,800.00	9,033	Moreno Espelta <i>et al.</i> 1978
Baño*	Manantial	39.00	7.35	12,800.00	9,324	Moreno Espelta <i>et al.</i> 1978

ID	Tipo	Temperatura °C	pH	CE (µS/cm)	STD (mg/L)	Fuente
RF01	Manantial	74.00	6.75			Chiodi <i>et al.</i> 2015
RF02	Pileta burbujeante	81.20	6.88			Chiodi <i>et al.</i> 2015
RF03	Manantial	71.40	7.06			Chiodi <i>et al.</i> 2015
RF04	Manantial	24.10	6.84			Chiodi <i>et al.</i> 2015
RF05	Manantial	52.70	6.42			Chiodi <i>et al.</i> 2015
RF06	Manantial	64.80	6.09			Chiodi <i>et al.</i> 2015
RF07	Manantial	58.20	6.73			Chiodi <i>et al.</i> 2015
RF08	Manantial	74.90	6.83			Chiodi <i>et al.</i> 2015
RF09	Manantial	24.20	7.36			Chiodi <i>et al.</i> 2015
RF10	Manantial	90.50	6.12			Chiodi <i>et al.</i> 2015
RF11	Manantial	90.40	6.39			Chiodi <i>et al.</i> 2015
RF12	Manantial	45.20	6.77			Chiodi <i>et al.</i> 2015
RF13	Manantial	72.20	6.26			Chiodi <i>et al.</i> 2015
RH 006	Pozo	42	8.3	4060		Scatizza y Galar 2018
RH 007	Pozo	47.1	8.88	870		Scatizza y Galar 2018
RH 008	Pozo	39.8	9.14	1275		Scatizza y Galar 2018
RH 012	Pozo	43.4	8.84	1059		Scatizza y Galar 2018
RH 013	Pozo	40.6	8.85	1121		Scatizza y Galar 2018
RH 015	Pozo	37.6	8	563		Scatizza y Galar 2018
RH 017	Pozo	22.8	7.7	225		Scatizza y Galar 2018
RH 019	Pozo	30.2	7.71	1182		Scatizza y Galar 2018
RH 021	Pozo	29.9	8.76	2880		Scatizza y Galar 2018
RH 023	Pozo	28.4	6.65	1643		Scatizza y Galar 2018
RH 025	Pozo	25.5	7.98	2620		Scatizza y Galar 2018
RH 026	Pozo	29.6	8.52	1190		Scatizza y Galar 2018
RH 027	Pozo	29	8.23	1762		Scatizza y Galar 2018
ID	Tipo	Temperatura °C	pH	CE (µS/cm)	STD (mg/L)	Fuente
RH 028	Pozo	26.9	7.26	8910		Scatizza y Galar 2018

ID	Tipo	Temperatura °C	pH	CE (µS/ cm)	STD (mg/L)	Fuente
RH 029	Pozo	39.9	8.27	680		Scatizza y Galar 2018
RH 030	Pozo	34.2	8.3	660		Scatizza y Galar 2018
RH 031	Pozo	50	7.63	21600		Scatizza y Galar 2018
RH 032	Pozo	52.4	9	566		Scatizza y Galar 2018
RH 033	Pozo	48.5	8.53	3320		Scatizza y Galar 2018
RH 034	Manantial	38.4	8.99	654		Scatizza y Galar 2018
RH 036	Pozo	39.3	9.37	467		Scatizza y Galar 2018
RH 037	Pozo	39.2	8.59	1155		Scatizza y Galar 2018
RH 038	Pozo	26.4	9.09	700		Scatizza y Galar 2018
RH 039	Pozo	29.2	8.37	786		Scatizza y Galar 2018
RH 040	Pozo	30.6	8.84	833		Scatizza y Galar 2018
RH 041	Pozo	29	6.69	4260		Scatizza y Galar 2018
RH 042	Pozo	31.8	9.4	403		Scatizza y Galar 2018
RH 043	Pozo	44	9.24	631		Scatizza y Galar 2018
RH 044	Pozo	38.4	8.75	915		Scatizza y Galar 2018
RH 045	Pozo	39.5	9.25	542		Scatizza y Galar 2018
RH 046	Pozo	49.1	9.23	548		Scatizza y Galar 2018
RH 047	Pozo	26.1	9.14	863		Scatizza y Galar 2018
RH 050	Pozo	37.1	9.25	444		Scatizza y Galar 2018
RH 051	Pozo	40.9	9.15	450		Scatizza y Galar 2018
RH 053	Pozo	50.7	8.49	3440		Scatizza y Galar 2018
RH 054	Pozo	36.6	9.02	874		Scatizza y Galar 2018

ID	Tipo	Temperatura °C	pH	CE (µS/ cm)	STD (mg/L)	Fuente
RH 055	Pozo	47.2	9.18	605		Scatizza y Galar 2018
RH 056	Pozo	43.7	8.17	4170		Scatizza y Galar 2018
RH 060	Pozo	43.4	9.06	505		Scatizza y Galar 2018
RH 061	Pozo	40.9	9.07	518		Scatizza y Galar 2018
RH 062	Pozo	46.5	8.01	1472		Scatizza y Galar 2018
RH 063	Pozo	41.9	8.44	4450		Scatizza y Galar 2018
RH 064	Pozo	39.1	8.98	925		Scatizza y Galar 2018
RH 065	Pozo	41.2	9.27	596		Scatizza y Galar 2018
RH 066	Pozo	46	8.55	591		Scatizza y Galar 2018
RH 069	Pozo	40.8	9.24	492		Scatizza y Galar 2018
RH 070	Pozo	50.2	7.45	17130		Scatizza y Galar 2018
RH 071	Pozo	36.1	9.09	674		Scatizza y Galar 2018
RH 073	Pozo	36	9	667		Scatizza y Galar 2018
RH 074	Pozo	40.8	8	14040		Scatizza y Galar 2018
RH 075	Pozo	51.1	7.61	15850		Scatizza y Galar 2018
RH 076	Pozo	38.7	7.52	21000		Scatizza y Galar 2018
RH 077	Pozo	37.5	8.95	937		Scatizza y Galar 2018
RH 078	Pozo	48.9	8.02	8130		Scatizza y Galar 2018
RH 079	Pozo	41.5	9.24	661		Scatizza y Galar 2018
RH 081	Manantial	27.3	8.23	2390		Scatizza y Galar 2018
RH 082	Pozo	50	8.76	1583		Scatizza y Galar 2018
RH 083	Pozo	45.9	9.5	480		Scatizza y Galar 2018

ID	Tipo	Temperatura °C	pH	CE (µS/ cm)	STD (mg/L)	Fuente
RH 085	Pozo	44.8	9.25	489		Scatizza y Galar 2018
RH 086	Pozo	44.6	9.47	538		Scatizza y Galar 2018
RH 088	Pozo	36.4	9.52	366		Scatizza y Galar 2018
RH 089	Pozo	29	8.51	686		Scatizza y Galar 2018
RH 090	Pozo	38.2	9.76	377		Scatizza y Galar 2018
RH 092	Embalse	29.6	8.03	487		Scatizza y Galar 2018
RH 093	Pozo	32.7	8.6	2520		Scatizza y Galar 2018
RH 094	Pozo	33	8.29	2480		Scatizza y Galar 2018
RH 096	Pozo	33.1	9.27	726		Scatizza y Galar 2018
RH 098	Pozo	37.1	9.34	815		Scatizza y Galar 2018
RH 099	Pozo	40.6	9.3	932		Scatizza y Galar 2018
RH 100	Pozo	34.8	8.9	1183		Scatizza y Galar 2018
RH 101	Pozo	44.2	9.17	503		Scatizza y Galar 2018
RH 102	Manantial	29.4	8.19	1996		Scatizza y Galar 2018
RH 103	Pozo	26.6	9.42	676		Scatizza y Galar 2018
RH 104	Pozo	29.1	8.78	2960		Scatizza y Galar 2018
RH 106	Pozo	40.4	9.35	469		Scatizza y Galar 2018
RH 107	Pozo	35.2	9.5	538		Scatizza y Galar 2018
RH 108	Pozo	32.2	9.55	539		Scatizza y Galar 2018
RH 109	Pozo	26.3	9.28	485		Scatizza y Galar 2018
RH 111	Pozo	27.4	8.71	1716		Scatizza y Galar 2018
RH 112	Pozo	31	9.29	516		Scatizza y Galar 2018

ID	Tipo	Temperatura °C	pH	CE (µS/cm)	STD (mg/L)	Fuente
RH 113	Pozo	38.8	9.43	506		Scatizza y Galar 2018
RH 114	Pozo	33.5	8.73	756		Scatizza y Galar 2018
RH 115	Pozo	28.1	8.88	520		Scatizza y Galar 2018
RH 116	Pozo	42.4	9.57	380		Scatizza y Galar 2018
RH 118	Pozo	37.5	9.47	447		Scatizza y Galar 2018
RH 119	Pozo	51	9.22	662		Scatizza y Galar 2018
RH 120	Pozo	45	9.35	585		Scatizza y Galar 2018
RH 121	Pozo	45	7.78	5280		Scatizza y Galar 2018
RH 122	Pozo	38.6	8.76	2550		Scatizza y Galar 2018
RH 123	Pozo	35.9	8.34	1930		Scatizza y Galar 2018
RH 124	Pozo	40.7	8.98	1007		Scatizza y Galar 2018
RH 125	Pozo	32.4	8.55	2100		Scatizza y Galar 2018
RH 126	Pozo	46	8.21	4550		Scatizza y Galar 2018
RH 128	Pozo	30.3	8.8	1171		Scatizza y Galar 2018
RH 129	Pozo	33.2	9.43	577		Scatizza y Galar 2018
RH 130	Pozo	39.6	9.27	746		Scatizza y Galar 2018
RH 131	Pozo	48.7	8.44	1861		Scatizza y Galar 2018
RH 132	Pozo	31.7	9.41	469		Scatizza y Galar 2018
RH 133	Pozo	41.7	9.25	528		Scatizza y Galar 2018
RE 1	Manantial	47.90	7.69		1,054	Peralta Arnold <i>et al.</i> 2020
RE 2	Manantial	22.30	8.32		131	Peralta Arnold <i>et al.</i> 2020
AC1	Manantial	28.5	7.54		397	Peralta Arnold <i>et al.</i> 2020

ID	Tipo	Temperatura °C	pH	CE (µS/cm)	STD (mg/L)	Fuente
AC2	Manantial	29	7.74		326	Peralta Arnold <i>et al.</i> 2020
Jordán	Manantial	28.70	7.11		2,995	Peralta Arnold <i>et al.</i> 2020
CA 1	Manantial	49.30	7.88		1,392	Peralta Arnold <i>et al.</i> 2020
CA 2	Manantial	43.30	8.14		1,443	Peralta Arnold <i>et al.</i> 2020
CA 3	Manantial	49.00	8.21		1,610	Peralta Arnold <i>et al.</i> 2020
EP 1	Manantial	41.70	6.71		3,999	Peralta Arnold <i>et al.</i> 2020
EP 2	Manantial	47.90	6.66		4,432	Peralta Arnold <i>et al.</i> 2020
EP 3	Manantial	42.10	6.59		3,841	Peralta Arnold <i>et al.</i> 2020
EP 4	Manantial	48.40	5.74		4,276	Peralta Arnold <i>et al.</i> 2020
EP5	Manantial	42.2	5.63		3,686	Peralta Arnold <i>et al.</i> 2020
EP6	Manantial	42.9	5.52		3,766	Peralta Arnold <i>et al.</i> 2020
EP7	Manantial	41.4	5.5		3,678	Peralta Arnold <i>et al.</i> 2020
SA	Pozo	72.00	7.49		992	Peralta Arnold <i>et al.</i> 2020
LQ 1	Manantial	54.10	6.02		16,162	Peralta Arnold <i>et al.</i> 2020
LQ 2	Manantial	55.00	6.01		16,256	Peralta Arnold <i>et al.</i> 2020
LQ	Manantial	46.10	6.49		16,003	Peralta Arnold <i>et al.</i> 2020
AC01	Manantial	28.50	7.54	373.00	221	Peralta Arnold, 2013
AC02	Manantial	28.90	7.39	400.00	239	Peralta Arnold, 2013
Pozo 2	Pozo	38.40	8.64		446.50	Vergara <i>et al.</i> 1998
Pozo 9	Pozo	40.50	7.82		312.70	Vergara <i>et al.</i> 1998
Pozo 11	Pozo	38.20	7.92		665.80	Vergara <i>et al.</i> 1998
Pozo 23	Pozo	40.00	8.14		352.50	Vergara <i>et al.</i> 1998
Pozo 22	Pozo	42.60	8.22		454	Vergara <i>et al.</i> 1998
Pozo 18	Pozo	34.00	8.00		591	Vergara <i>et al.</i> 1998

ID	Tipo	Temperatura °C	pH	CE (µS/cm)	STD (mg/L)	Fuente
Pozo 34	Pozo	43.00	7.85	1,520.00	973	Avellaneda <i>et al.</i> 2016
Pozo 38	Pozo	34.00	8.4	467.00	356	INTA 2016
Pozo 39	Pozo	29.00	8.50	316.00		INTA 2016
Pozo 13	Pozo	31.30	7.90	167.00		García 2005
Pozo 14	Pozo	33.60	8.70	157.00		SAT 2015
Pozo 24	Pozo	28.00	7.40	546.00		SAT 2015
Pozo 5	Pozo	36.10				Falcón 2004
Pozo 31	Pozo	28.80				Falcón 2004
Pozo 32	Pozo	31.30				Falcón 2004
Pozo 36	Pozo	37.20				Falcón 2004
Pozo 57	Pozo	34.50				Falcón 2004
Pozo 62	Pozo	34.60				Falcón 2004
Pozo 77	Pozo	31.1				Falcón 2004
Pozo 88	Pozo	36.40				Falcón 2004
Pozo 89	Pozo	37.20				Falcón 2004
Pozo 103	Pozo	34.30				Falcón 2004
Pozo 110	Pozo	33.40				Falcón 2004
Pozo 112	Pozo	32.00				Falcón 2004
Pozo 116	Pozo	35.10				Falcón 2004
Pozo 121	Pozo	33.30				Falcón 2004
Pozo 123	Pozo	32.00				Falcón 2004
Pozo 126	Pozo	30.20				Falcón 2004
Pozo 135	Pozo	28.60				Falcón 2004
Pozo 142	Pozo	27.30				Falcón 2004
Pozo 148		26.70				Falcón 2004
Pozo 161	Pozo	27.90				Falcón 2004
P37	Pozo		8.1	1,044.00		DPA 2015

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Armella, M., Domínguez, L., Georgieff, S., Esteban, G., Sabater, S. 2020. Sedimentological analysis and radioisotope age of the Las Cañas Formation in Dulce river outcrops, Río Hondo, Santiago del Estero (Northwestern Argentina). *Journal of South American Earth Sciences* 104: 102868.
- Arnous, A., Zeckra, M., Venerdini, A., Alvarado, P., Arrowsmith, R., Guillemoteau, J., Landgraf, A., Gutiérrez, A., Strecker, M. 2020. Neotectonic Activity in the Low-Strain Broken Foreland (Santa Bárbara System) of the North-Western Argentinean Andes (26°S). *Lithosphere* 2020 (1). 25pp. doi.org/10.2113/2020/8888588
- 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
- Avellaneda, S.C. 2014. Hidroestratigrafía de la Cuenca del Río Marapa. Seminario de grado (inédito). Facultad de Ciencias Naturales e IML, Universidad Nacional de Tucumán. 184 pp.
- Avellaneda, S., Falcón, C. 2015. Patrimonio hidrogeológico geotermal en el piedemonte sud-occidental de la provincia de Tucumán. Serie Monográfica y Didáctica. Facultad de Ciencias Naturales e IML. San Miguel de Tucumán. Vol. 54. 109 pp.
- Baldis, B., Demicheli, J., Febrer, J., Fournier, H., García, E., Gasco, J.C., Mamani, M., Pomposiello, M.C., 1983. Magnetotelluric results along a 1200 km long deep profile with an important geothermal area and its north-west end in the provinces of Tucumán and Santiago del Estero in Argentina. *Acta Geodaetica Geophysica et Montanistica Hungarica* 18: 489-499.
- Barcelona, H., Peri, G., Tobal, J., Sagripanti, L., Favetto, A. 2014. Tectonic activity revealed by morphostructural analysis: Development of the Sierra de la Candelaria range, northwestern Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 56: 376-395.
- Battaglia, A. 1982. Descripción Geológica de las Hojas 13f-Río Hondo, 13g-Santiago del Estero, 14g-El Alto, 14h-Villa San Martín, 15g-Frías. Servicio Geológico Nacional, Boletín 186: 1-80, Buenos Aires.
- Blasco, G.; Caminos, R. L.; Lapidó, O.; Lizuáin, A.; Martínez, H.; Nullo, F. E.; Panza, J. L. A.; Sacomani, L. E.; Barber, E.L.G.; Chipulina, M. Á., Martínez, L. 1994. Hoja Geológica 2966 II-San Fernando del Valle de Catamarca, provincias de Catamarca, Santiago del Estero y Tucumán. Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina, escala 1:250.000. Servicio Geológico Minero Argentino. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Boletín N° 212, 50 pp.
- 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*, 54(77):1585-1592.
- Boujon, P., Fernández, D.S., Pereyra, F., Trevisol, S., Lamarca, L., Gabandié, L. y Rodríguez, V. 2019. Contribución al conocimiento hidrogeológico de la región chaqueña argentina. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino. *Anales* 57. 62pp., Buenos Aires.
- Carrapa, B., John, D. T. y Daniel F. S. 2011. Patterns and timing of exhumation and deformation in the Eastern Cordillera of NW Argentina revealed by (U-Th)/He thermochronology. *Tectonics* 30. doi:10.1029/2010TC002707.
- Carrera, N., Muñoz J. A., Sábato, F., Mon, R. y Roca, E. 2006. The role of inversion tectonics in the structure of the Cordillera Oriental (NW Argentinean Andes). *Journal of Structural Geology* 28:1921-1932.
- Casa, A., Yamin, M., Wright, E., Costa, C., Coppolecchia, M., 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.
- Cengel, Y., Boles, M. 2011. *Termodinámica*. 7ma. Edición. Ed. McGraw-Hill Companies, Inc. USA. 800 pp.
- Chiodi, A., Tassi, F., Báez, W., Maffucci, R., Invernizzi, C., Giordano, G., Corrado, S., Biccocchi, G., Vaseilli, O., Viramonte, J.G., Pierantoni, P.P. 2015. New geochemical and isotopic insights to evaluate the geothermal resource of the hydrothermal system of Rosario de la Frontera (Salta, northern Argentina). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 205: 16-25.
- Chiodi, A., Báez, W., Filipovich, R., Ahumada, M.A., Viramonte, J.G. 2016. Modelo conceptual preliminar del sistema geotermal El Sauce (Salta) a partir de estudios de geoquímica de fluidos. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 73(1): 93-103.
- Claros, M. 2020. Caracterización del área termal El Palmer y La Quinta, Dpto. Santa Bárbara. Provincia

- de Jujuy. Tesis de licenciatura inédita. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Jujuy.
- Conde Serra, A. 2019. Interpretación de los Resultados de la Prospección Magnetotelúrica (MT) del Sistema Geotermal del Sector Sudeste de la Cuenca de Tucumán y su Extensión en la Provincia de Santiago del Estero. Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR) <http://repositorio.segemar.gov.ar/308849217/1532>.
- Crincoli, A., Pesce, A.H. 2001. Análisis de las características geotérmicas de la cuenca Taco Ralo-Río Hondo y su implicancia económica. Informe inédito. SEGEMAR.
- Cristallini, E., Cominguez, A.H., Ramos, V.A. 1997. Deep structure of the Metán – Guachipas region: tectonic inversion in northwestern Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 10: 403-421.
- Cristallini, E.O., Comínguez, A., Ramos, V.A., Mercerat, E.D. 2004. Basement double wedge thrusting in the northern Sierras Pampeanas of Argentina (27° S) - constraints from deep seismic reflection. En: McClay, K.R. (Ed.), *Thrust Tectonics and Hydrocarbon Systems*. Memoir 82, AAPG: 1-26.
- Dal Molin, C., Fernández, D., Escosteguy, L., Villegas, D., González, O., Martínez, L. 2003. Hoja Geológica 2766-IV, Concepción, provincias de Tucumán, Catamarca y Santiago del Estero. Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina, escala 1:250.000. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín N° 342, 41 pp.
- Del Papa, C., Hongn, F., Petrinovic, I., Domínguez, R. 2004. Evidencias de la deformación pre-miocena media asociada al antepaís andino en la Cordillera Oriental (24° 35' S – 66° 12' O). *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 59(3): 506-509. Buenos Aires.
- Del Papa, Kirschbaum, A., Powell, J., Brod, A., Hongn, F., Pimentel, M., 2010. Sedimentological, geochemical and paleontological insights applied to continental omission surfaces: a new approach for reconstructing Eocene. *Journal of South American Earth Sciences* 29: 327-345.
- DPA. 2015. Archivo de perforaciones del Departamento Río Chico y Chichigasta, provincia de Tucumán. Dirección Provincial del Agua, Departamento Perforaciones. Perfiles e informes inéditos.
- Falcón, C.M. 2004. Hidrogeología del sector sudoriental de la Sierra de La Ramada y llanura adyacente, provincias de Tucumán y Santiago del Estero. Tesis Doctoral (inédito), 362 pp y anexos. Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo. Universidad Nacional de Tucumán.
- Falcón, C.M., Mena, J.E., Avellaneda, S.C. 2016. Geotermometría y Modelo Geotérmico del Extremo Sureste de la Provincia de Tucumán, Argentina. IX Congreso Argentino de Hidrogeología y VII Seminario Hispano-Latinoamericano sobre Termas Actuales de la Hidrología Subterránea: Relación Agua superficial – agua subterránea. Actas. ISBN 978-987-661-225-8. Catamarca.
- Febrer, J., Baldis, B., Gasco., Mamani, M., Pomposiello, M.C., Fournier, M. 1982. La Anomalía Geotérmica Calchaquí en el Noroeste Argentino: un nuevo proceso geodinámico asociado a la subducción de la placa de Nazca. V Congreso Latinoamericano de Geología, Actas 3: 691-703. Buenos Aires.
- Fraser, A. J., Gawthorpe, R. L. 2003. An Atlas of Carboniferous Basin Evolution in Northern England. Geological Society Memoir 28. 79 pp. Geological Society of London.
- García, J. 2005. Hidrogeología de la Cuenca del Río Gastona, Departamento Chichigasta, Provincia de Tucumán. Tesis doctoral (inédita). Facultad de Ciencias Naturales e IML, Universidad Nacional de Tucumán. 492 pp.
- García, V.H., Spagnotto, S., Hongn, F. 2011., El sismo de Salta del 27 de febrero de 2010. Magnitud, localización, mecanismo focal, réplicas y fuente sismogénica. XVIII Congreso Geológico Argentino (Neuquén), Abstracts.
- García, V. H., Hongn, F., Cristallini, E. O. 2013. Late Miocene to recent morphotectonic evolution and potential seismic hazard of the northern Lerma valley: Clues from Lomas de Medeiros, Cordillera Oriental, NW Argentina. *Tectonophysics* 608: 1238-1253.
- García, V., Hongn, F., Yagupsky, D., Pingela, H., Kinairde, T., Winocur, D., Cristallini, E., Robinson, R., Strecker, M. 2019. Late Quaternary tectonics controlled by fault reactivation. Insights from a local transpressional system in the intermontane Lerma valley, Cordillera Oriental, NW Argentina. *Journal of Structural Geology* 128. 16 pp. doi.org/10.1016/j.jsg.2019.103875
- Gioncada, A., Vezzoli, L., Mazzuoli, R., Omarini, R., Nonnotte, P., Guillou, H. 2010. Pliocene intraplate-type volcanism in the Andean foreland at 26°10'S, 64°40' W (NW Argentina): Implications for magmatic and structural evolution of the Central Andes. *Lithosphere* 2 (3): 153-171.
- González, D. 2011. Estudio estructural del tramo medio de la sierra de Mojotoro-Provincia de Salta. Tesis Profesional (inédito). Universidad Nacional de Salta.

- 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 de la República Argentina, escala 1:250.000. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino. Boletín N° 274, 109 pp.
- González, O. E., Viruel, M. E., Mon, R., Tchilinguirian, P., Barber, E. 2000. Hoja Geológica 2766-II San Miguel de Tucumán, provincias de Tucumán, Catamarca, Salta y Santiago del Estero. Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina, escala 1:250.000. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín N° 245, 135pp.
- 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.
- Guevara, L., Pomposiello, C., Favetto, A. 2020. Three-dimensional audio magnetotelluric characterization of geothermal area in Tucumán Basin, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 97: 102415.
- Hongn, F., Del Papa, C., Powell, J., Payrola, P., Petrinovic, I., Mon, R. 2011. Fragmented Paleogene foreland basin in the Valles Calchaquíes, NW of Argentina. En J.A. Salfity y R. Marquillas (Eds.), *Cenozoic Geology of the Central Andes of Argentina*. SCS Publisher: 189-209. Salta
- Iaffa, D.N., Sàbat, F., Bello, D., Ferrer, O., Mon, R., Gutiérrez, A.A., 2011a. Tectonic inversion in a segmented foreland basin from extensional to piggy back settings: the Tucumán basin in NW Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 31: 457-474.
- Iaffa, D.N., Sàbat, F., Muñoz, J.A., Mon, R., Gutiérrez, A.A. 2011b. The role of inherited structures in a foreland basin evolution. The Metán Basin in northwest Argentina. *Journal of Structural Geology* 33: 1816-1828.
- Iaffa, D.N., Sàbat, F., Muñoz, J.A., Carrera, N. 2013. Basin fragmentation controlled by tectonic inversion and basement uplift in Sierras Pampeanas and Santa Bárbara System, northwest Argentina. *Geological Society of London, Special Publications* 377: 101-117.
- INPRES. <http://contenidos.inpres.gob.ar/buscar/sismo>
- INTA. 2016. Análisis químicos de agua de pozos y ríos de los departamentos Río Chico, Chichigasta y Simoca, provincia de Tucumán. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Laboratorio de agua y suelos, sede Famaillá, Tucumán. (Inédito).
- Kley, J., Monaldi, C.R. 2002. Tectonic inversion in the Santa Barbara System of the central Andean foreland thrust Belt. Northwestern Argentina. *Tectonics* 21: 1-18.
- Miranda, F., Pesce, A.H., 2015. Sondeos de Temperatura para la Caracterización del Gradiente Geotérmico en el Área Villa Río Hondo, Santiago del Estero. Servicio Geológico Minero Argentino. Instituto de Geología y Recursos Minerales. 318 p.
- Miró, R., 2008. Los Acuíferos Termales de la Región de Río Hondo, Provincia de Santiago del Estero y Tucumán, Argentina; su potencial geotérmico. Servicio Geológico Minero Argentino. 14 p. Córdoba.
- Moeck, I.S., 2014. Catalog of geothermal play types based on geologic controls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 37:867-882.
- Mon, R., 1976. La tectónica del borde oriental andino en las provincias de Salta, Tucumán y Catamarca. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 31: 65-72.
- Mon, R., Gutiérrez, A., Vergani, G., Pacheco, M., Sàbat, F. 2005. Estructura de la depresión tectónica de Metán (Provincia de Salta). XVI Congreso Geológico Argentino (La Plata), Actas: 73-80.
- Moreno Espelta, C., Arias, J. y Chávez, A. 1978. Geología del área termal de El Sauce, Departamento Gral. Güemes, Provincia de Salta, República Argentina. *Revista del Instituto de Ciencias Geológicas, Universidad Nacional de Jujuy* 3: 97-118.
- Payrola Bosio, P.A., Powell, J., Del Papa, C., Hongn, F. 2009. Middle Eocene deformation-sedimentation in the Luracatao Valley: Tracking the initial Andean deformation in the Central Andes (NW Argentina). *Journal of South American Earth Sciences* 28 (2): 142-154.
- Peralta Arnold, Y. 2013. Caracterización de las fuentes hipotermales de San Antonio de Aguas Calientes. Depto. El Carmen. Jujuy. Universidad Nacional de Jujuy. Trabajo final Inédito.
- Peralta Arnold, Y.; Franco, G.; Tassi, F.; Caffè, P.J.; Jofre, C.; Claros, M.; Villalba Ulberich, J. P.; Rizzo, A.; Cabassi, J. 2020. Geochemical features of hydrothermal systems in Jujuy Province, Argentina: Hints for geothermal fluid exploration. *Journal of South American Sciences* 101: 102627.
- Pesce, A.H., Miranda, F. 2003. Catálogo de Manifestaciones Termales de la República Argentina, Vol. I, Región Noroeste, Provincias de Jujuy, Salta, Catamarca, Tucumán, Santiago del Estero, La Rioja y San Juan. Servicio Geológico Minero Argentino. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Anales 36. 171 p. Buenos Aires.

- Pomposiello, M.C., Favetto, A., Booker, J., Sainato, C., Li, S., Smith, J., Giordanengo, G. 2002 a. Deep crust and mantle electrical conductivity structure of the Northern Sierras Pampeanas, Argentina. XV Congreso Geológico Argentino (El Calafate), Actas 1: 369-372.
- Pomposiello, M.C., Favetto, A., Sainato, C., Booker, J., Shanghui, Li. 2002 b. Imaging the sedimentary basin of the Tucuman Plain in the Northern Pampean Range, Argentina. *Journal of Applied Geophysics*. 49: 47-58.
- Pomposiello, M.C., Galindo, G., Sainato, C. 2000. Modelo Geotérmico y Evaluación del Recurso en la Llanura Tucumana-Santiagoña. XX Reunión Científica de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas. CD-ROM: 175-179.
- Pomposiello, M.C., Mon, R., Diaz, M.T., 1991. The gravity field of the Tucumán Plain and its implications in structural geology. *Geodinamique* 6 (1): 3-6.
- Powell, T., Cumming, W. 2010. Spreadsheets for Geothermal Water and Gas Geochemistry. Proceedings, Thirty-Fifth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California. SGP-TR-188.
- SAT. 2015. Archivos de perforaciones de los departamentos Río Chico, Chichigasta y Simoca, provincia de Tucumán. Sociedad Aguas del Tucumán, Departamento de Obras y Planeamiento. Ex Dirección Provincial de Obras Sanitarias (DIPOS). Perfiles e informes inéditos de la Agencia Aguilares, Tucumán, Argentina.
- Scatizza, C.F., Galar, A. 2018. Estudios Hidrogeológicos en Termas de Río Hondo. Servicio Geológico Minero Argentino. Informe inédito. Dirección de Geología Ambiental y Aplicada.
- Salfity, J.A., Monaldi, C.R., González, E.O. 2006. Hoja Geológica 2566-IV, Metán, provincia de Salta. Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina, escala 1:250.000. Servicio Geológico Minero Argentino. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Boletín N° 352, 80 pp.
- Seggiaro, R.E., Aguilera, N., Amengual, R., Boso, M., Del Papa, C., Gallardo, E., Galli, C., Hongn, F., Marquillas, R., Ramallo, E., Sabino, I., 2019. Hoja Geológica 2566-II, Salta, provincias de Salta y Jujuy. Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina, escala 1:250.000. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín N° 440, 92 pp.
- Seggiaro, R., Gallardo, E., González, D., 2014 Tectónica superpuesta en la Sierra de Mojotoro, Cordillera Oriental Provincia de Salta. XIX Congreso Geológico Argentino (Córdoba). S22-63.
- Seggiaro, R., Gallardo, E., Aguilera, N., Vitulli, N., Brandan, M., Bercheni, V. 2015. Modelo estructural del área termal de la sierra La Candelaria, Departamento Rosario de la Frontera, Salta. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*. 72 (2): 265-278.
- SIGAM, 2022. Sistema de información Geológica Ambiental Minero. Capas Geología 1:2.5M SEGEMAR. <https://sigam.segemar.gov.ar/visor/>
- Siler, D.L., Faulds, J.E. 2013. Play Fairway analysis for geothermal exploration: Examples from the Great Basin, western USA. United State. <https://www.ostrigov/servlets/purl/1110514>.
- Vergara, G.A., Hidalgo, M., Balegno de Vergara, M. y Masmut, M.P. 1998. Corte geotérmico transversal de la provincia de Tucumán. En: Gianfrancisco M., Puchulu M.E., Durango de Cabrera J. y Aceñolaza G.F. (Eds.) *Geología de Tucumán*. Publicación especial del Colegio de Graduados en Ciencias Geológicas de Tucumán: 161-178.