

# MODELO ESTRUCTURAL DEL ÁREA TERMAL DE LA SIERRA LA CANDELARIA, DEPARTAMENTO ROSARIO DE LA FRONTERA, SALTA

Raúl SEGGIARO<sup>1,2</sup>, Eduardo GALLARDO<sup>1</sup>, Néstor AGUILERA<sup>1</sup>, Néstor VITULLI<sup>1</sup>, Esteban BRANDAN<sup>1</sup>, Víctor BERCHEÑI<sup>1,2</sup>, Emilio BARRABINO<sup>3</sup>, Melina CELEDON<sup>3</sup> y Agustina VILLAGRAN<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Consejo de Investigaciones, Universidad Nacional de Salta. E-mail: rulisseggiaro@yahoo.com.ar

<sup>2</sup> Servicio Geológico Mínero Argentino, Salta.

<sup>3</sup> CONICET, Universidad Nacional de Salta, Salta.

## RESUMEN

Las surgencias termales de Rosario de La Frontera se emplazan en el norte de la sierra La Candelaria situada en la franja suroccidental del Sistema de Santa Bárbara, provincia de Salta. Esta sierra forma parte de una faja plegada que involucra el basamento integrado por la Formación Medina, depósitos cretácicos y paleógenos del Grupo Salta y las secuencias neógenas del Grupo Orán. A partir del mapeo y de la interpretación de dos líneas sísmicas extendidas al oeste y al este de la sierra, se construyeron tres secciones estructurales que, integradas, definen un sistema de corrimientos vergentes al este. El corrimiento que elevó la sierra La Candelaria produjo la rotación de una falla normal cretácica, inclinada al este, con un mecanismo corroborado por modelado analógico. La intensa fracturación del basamento en la zona de falla sumado a los depósitos de *sin-rift* del Subgrupo Pirgua dio como resultado una zona de alta permeabilidad, que conectó el reservorio de agua caliente con la superficie. Este reservorio se ubica en la base del Subgrupo Pirgua a 2.500 m de profundidad. La temperatura de equilibrio en el reservorio fue calculada por geotermometría en 130° C y el gradiente geotérmico local en 0,046° C/m. El valor anómalo del gradiente se corresponde con un ascenso relativamente joven de la sierra. La surgencia de aguas termales a más de 90° C se explica mediante la circulación rápida del agua por fracturas en un recorrido relativamente corto hacia la superficie.

**Palabras clave:** *Geotermia, inversión tectónica, modelo análogo, Rosario de la Frontera, Sistema de Santa Bárbara*

## ABSTRACT

*Structural model of the Sierra La Candelaria thermal area, Department of Rosario de la Frontera, Salta*

The thermal springs of Rosario de la Frontera are located in the extreme north of La Candelaria belt within the southeastern part of Santa Barbara System. La Candelaria belt belongs to a fold and thrust belt which involves a low grade metamorphic basement of Medina Formation, cretaceous and paleogene syn and post-rift Salta Group deposits and the Orán Group Neogene-foreland sequences. From the map of La Candelaria belt and the interpretation of two seismic lines extended to the west and to the east, three structural sections were constructed, from which it was possible to define an imbricate thrust system with the vergence to the east. The thrust that elevate La Candelaria belt rotates a Cretaceous normal fault deeping to the east. This rotation mechanism was simulated in an analog model. From the intense fracturation of the basement along the fault zone and the syn-rift Pirgua Subgroup deposits result a high permeability zone that allow to connect a hot water reservoir with the surface. This reservoir, located 2.500 m deep, at the base of Pirgua Subgroup, has water equilibrium temperatures of 130° C showing a local anomalous gradient of 0,046° C/m. The anomalous gradient is in correspondence with a young uplift of the belt. The thermal waters surge at 90° C is explained by fast water circulation along fractures to the surface.

**Keywords:** *Geothermic, tectonic inversion, analog model, Rosario de la Frontera, Santa Bárbara System*

## INTRODUCCIÓN

El noroeste argentino cuenta con manifestaciones de aguas termales que pueden ser agrupadas en dos regiones bien diferenciadas, las vinculadas al arco magmático en sentido amplio, localizadas en la Puna y las que se emplazan a lo largo de la franja oriental de la faja plegada y fallada de antepaís que integra el sistema suban-

dino en general (Fig.1). Estos dos ambientes geológicos sugieren, *a priori*, diferencias genéticas y estructurales entre sus respectivos campos geotérmicos. Mientras que en la Puna, los campos termales están asociados a gradientes térmicos elevados por el magmatismo y a estructuras de aparatos volcánicos o cuerpos intrusivos, en la faja plegada, la ausencia de magmatismo y de aparatos volcánicos re-

quiere modelos diferentes para explicar su presencia.

Dentro de la faja plegada y corrida, el Sistema de Santa Bárbara (Fig.1) cuenta con un rosario de manifestaciones termales alineadas en sentido norte sur que se disponen frecuentemente en las proximidades de fallas normales, generadas durante la extensión cretácica, algunas de ellas parcial o totalmente invertidas. Entre es-

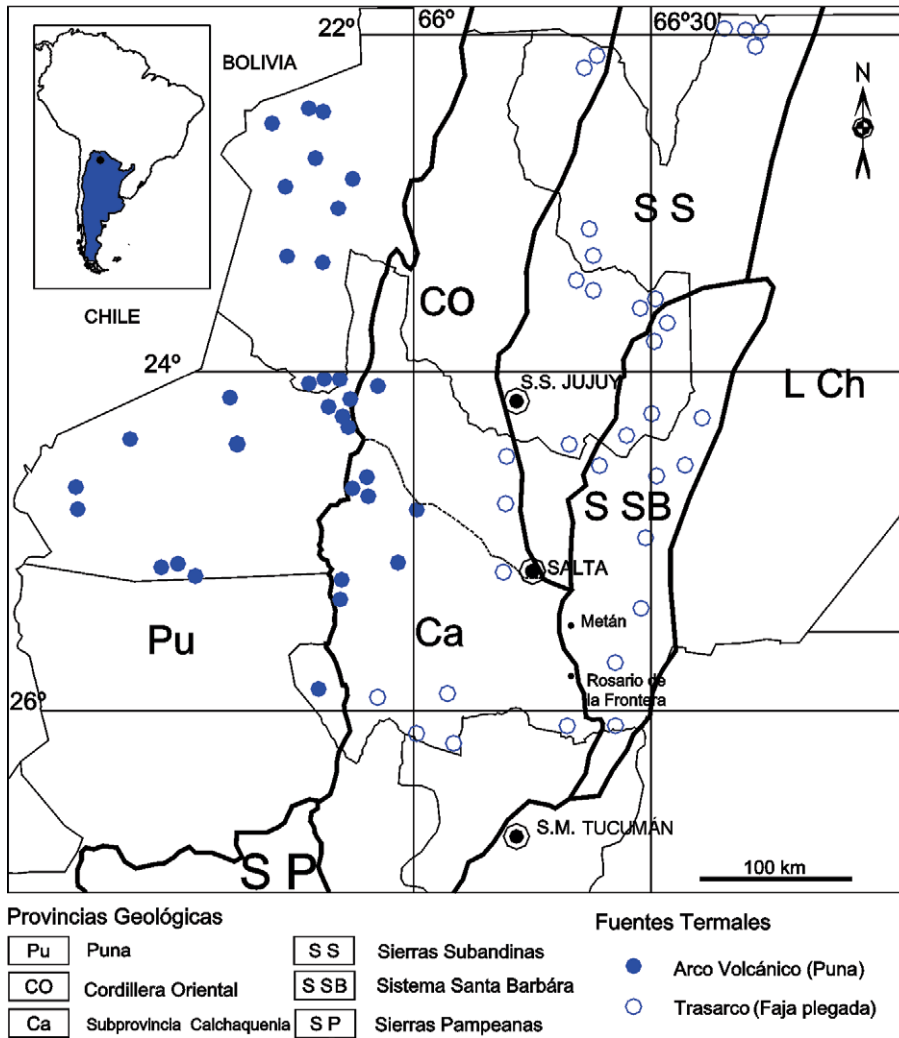


Figura 1: Mapa de ubicación del área de estudio con la distribución regional de las fuentes termales.

tas surgencias se destacan las de Rosario de La Frontera, emplazadas en el extremo norte de la sierra La Candelaria, con temperaturas que alcanzan los 90° C (Fig. 2). Si bien el origen de las anomalías térmicas del Sistema de Santa Bárbara es aún incierto debido a la ausencia de estudios geofísicos específicos, Seggiaro *et al.* (1997) e Invernizzi *et al.* (2014) coinciden en proponer para Rosario de la Frontera un modelo de calentamiento a partir de la circulación profunda de aguas meteóricas, sin otra fuente de calor que el gradiente térmico local. Este modelo justifica la surgencia de aguas a temperaturas elevadas mediante la circulación rápida desde el reservorio hasta la superficie a lo largo de fallas de alto ángulo que alcanzan niveles

profundos de la corteza. En este trabajo se presentan nuevas secciones estructurales a partir de datos de superficie y de información de subsuelo que complementan y ajustan el modelo geotérmico propuesto por Seggiaro *et al.* (1997) e Invernizzi *et al.* (2014) y el estilo de deformación dominante en la región de la sierra La Candelaria. La interpretación del modelo geotérmico conceptual y del mecanismo de circulación de las aguas termales fue elaborada en base al análisis integral de las características litológicas de las unidades estratigráficas para definir potenciales rocas sello y reservorios, la geometría de las estructuras principales y la caracterización geoquímica y geotermométrica de las aguas termales.

## METODOLOGÍA

La información de superficie fue volcada sobre un mapa geológico a escala 1:50.000 y se complementó con el análisis de las secciones sísmicas de YPF L 04207 y L 36100 (Fig.2) representadas con visualizador *Seis View*, sobre las que se extrapolaron datos geológicos del pozo de YPF. Ar.X1 (El Arenal), localizado al oeste de Rosario de la Frontera (Fig.2).

A partir de la información de superficie y de subsuelo se elaboraron perfiles balanceados mediante los cuales se obtuvo la geometría y profundidad de despegue de los corrimientos principales. La evolución de la estructura mayor de la sierra La Candelaria fue analizada y reproducida a escala en una mesa de modelado analógico, con capas de arenas de colores y granulometrías diferentes en una caja de deformación de 50 cm por 30 cm, con movimiento controlado por motor paso a paso.

El análisis de la fuente de calor del modelo geotérmico fue realizado a partir de datos geoquímicos de las aguas tomados de Seggiaro *et al.* (1995) y de las temperaturas de pozos exploratorios cercanos (Fig.2).

## MARCO TECTÓNICO

La sierra La Candelaria (Fig.2) forma parte del Sistema de Santa Bárbara desarrollado durante la orogenia andina, como una faja plegada y corrida de piel gruesa que involucra rocas con edades precámbricas hasta cenozoicas.

El Sistema de Santa Bárbara limita al oeste con la Cordillera Oriental por medio del frente de fracturación Tacónico Oriental (Baldis *et al.* 1976) y con la llanura chaqueña al este (Fig. 1). Fue originalmente incluido dentro de las Sierras Subandinas por Bonarelli (1913), con un criterio que obedeció más a su ubicación geográfica, alineada en sentido meridiano con dichas sierras, que a sus características geológicas. Trabajos posteriores de Baldis *et al.* (1976) y Rolleri (1976), consideraron al Sistema de Santa Bárbara como una unidad diferenciada del resto de las provincias geológicas en base a la litología aflorante y a su estilo estructural.

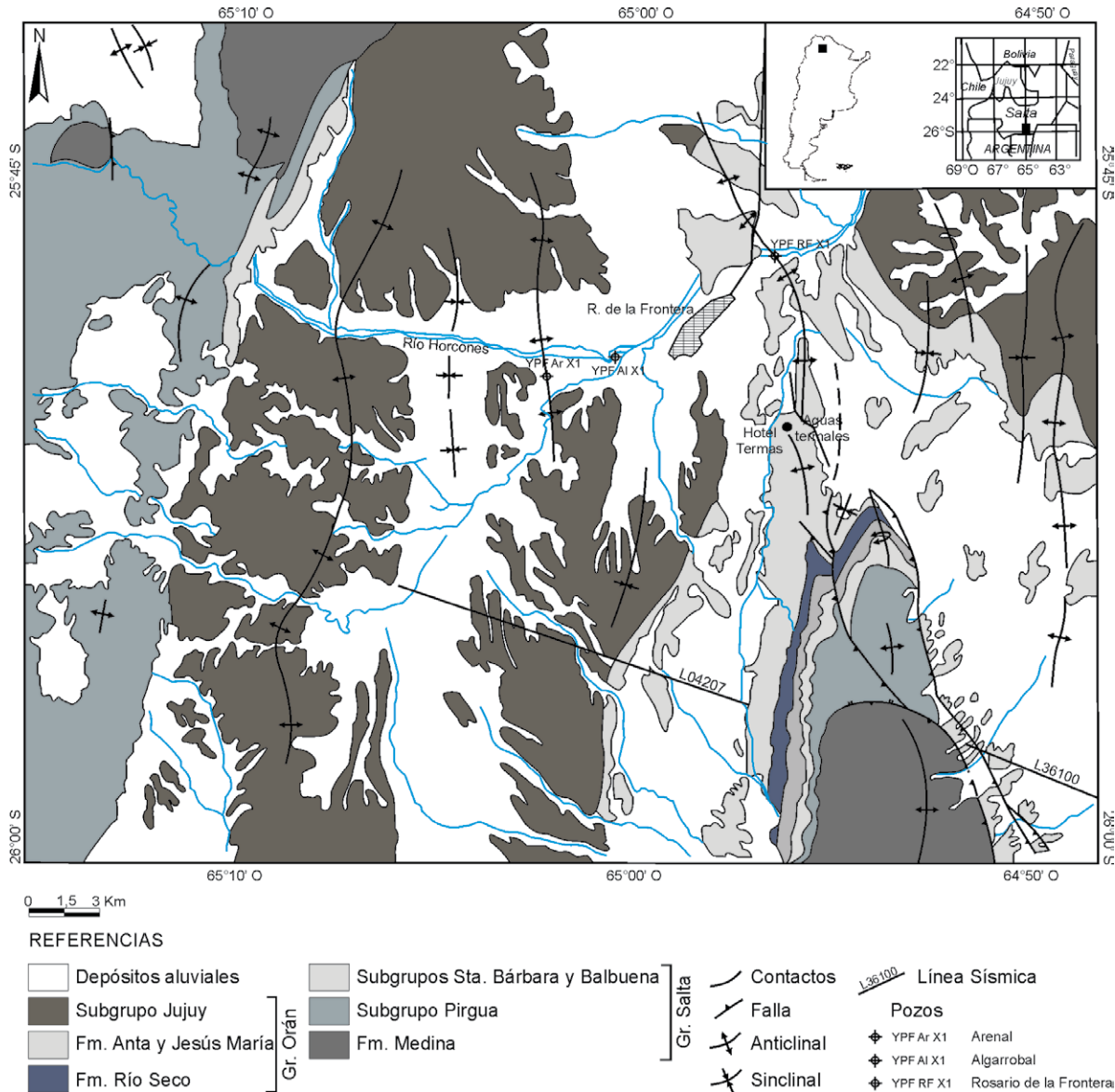


Figura 2: Mapa geológico de la sierra La Candelaria y alrededores.

La presencia del basamento leptometamórfico y de espesores restringidos de unidades paleozoicas en contacto discordante con estratos cretácicos de *sin-rift*, diferencia la estratigrafía del Sistema de Santa Bárbara de la de las Sierras Subandinas septentrionales, caracterizada por sucesiones del Paleozoico inferior mejor desarrolladas y una potente columna del Paleozoico superior que representa el extremo sur de la cuenca de Tarija (Azcu y Caminos 1988). La estratigrafía del Sistema de Santa Bárbara se diferencia también de las Sierras Pampeanas (Fig. 1), localizadas al sur, donde el basamen-

to metamórfico subyace en discordancia a los estratos terciarios. El Sistema de Santa Bárbara presenta evidencias estratigráficas y estructurales de algunos de los eventos tectónicos más destacados que caracterizan al noroeste argentino: la fase Tilcara, del Cámbrico inferior (Turner y Méndez 1975, Turner y Mon 1979), cuya deformación impresa en las unidades del basamento proterozoico constituye el límite entre los ciclos Pampeano y Famatiniano (Aceñolaza y Toselli 1976), la extensión cretácica, ocurrida durante el ciclo Andino con la generación de un *rift* intracratónico, y el desarrollo

posterior de un sistema compresivo de fajas plegadas y falladas iniciado a partir del Paleógeno. El estilo estructural del Sistema de Santa Bárbara está dominado por corrimientos frecuentemente inducidos por la reactivación de fallas normales, característico de cuencas extensionales parcialmente invertidas (McClay y Buchanan 1992). El Grupo Salta (Turner 1959), que se extiende desde el Cretácico hasta el Paleógeno, guarda registro del inicio del ciclo orogénico Andino, desarrollándose inicialmente en una cuenca mecánica de *rift* seguida de un estadio de subsidencia térmica.

mica (Bianucci *et al.* 1981, Salfity y Marquillas 1986, 1994). Los depósitos de pre-*rift*, sobre los que se apoyan en discordancia angular los sedimentos del Grupo Salta, están integrados por sucesiones paleozoicas y proterozoicas. Las diferentes orientaciones de las fallas extensionales del *rift* y el subsecuente acortamiento en dirección oeste - este dio como resultado un complejo sistema de inversión tectónica selectiva (Salfity 1979, Grier *et al.* 1991, Monaldi *et al.* 2008).

La compresión andina estructuró cuencas fragmentadas con corrimientos fuera de secuencia, muchos de los cuales fueron inducidos por la inversión de fallas normales cretácicas (Mon *et al.* 2005, Iaffa *et al.* 2011a), por la reactivación de estructuras paleozoicas (Seggiaro *et al.* 2014) o por anisotropías del basamento (Iaffa *et al.* 2014).

Al restituir el acortamiento andino, llevando la base del Cretácico a la horizontal, se revela la existencia de un sustrato pre-cretácico heterogéneo (Salfity y Marquillas 1989), tanto en el Sistema de Santa Bárbara como en la Cordillera Oriental. Esta relación discordante fue representada en algunas secciones geológicas (Mon *et al.* 1993, Alonso *et al.* 2012, Seggiaro y Aguilera 2014) con fallas y pliegues paleozoicos truncados angularmente por la secuencia cretácica, algunos de ellos con mayor desplazamiento que los andinos. Algunas de estas fallas paleozoicas fueron reactivadas, favoreciendo la generación de fallas normales en el Cretácico (Hongn y Seggiaro 1998, Iaffa *et al.* 2014), o exhumadas y transportadas pasivamente durante el desarrollo de la faja plegada andina (Seggiaro *et al.* 2014).

La influencia de la inversión de fallas normales cretácicas en la estructuración del Sistema de Santa Bárbara (Bianucci *et al.* 1981, Cristallini *et al.* 1997, Mon *et al.* 2005, Iaffa *et al.* 2011a, b) lo diferencia del sistema de faja plegada de piel fina de las Sierras Subandinas (Allmendinger *et al.* 1983, Aramayo Flores 1989, Mingramm *et al.* 1979) y del fallamiento de bloques de basamento de las Sierras Pampeanas (González Bonorino 1950, Jordan y Allmendinger 1986, González y Mon 1996).

Estos abruptos cambios estructurales entre las Sierras Subandinas, el Sistema de Santa Bárbara y las Sierras Pampeanas son aproximadamente coincidentes con los bordes del *rift* cretácico (Grier *et al.* 1991, Kley y Monaldi 2002).

Los corrimientos andinos alcanzaron el Sistema de Santa Bárbara durante el Mioceno superior- Plioceno inferior y fueron reactivados en el Pleistoceno-Holoceno (Carrera *et al.* 2006, Carrapa *et al.* 2011). Las profundidades de despegue de los corrimientos fueron estimadas en 20 km por Cristallini *et al.* (1997) y en 10 km y 16 km por Kley y Monaldi (2002).

Los depósitos de antepaís, coetáneos con la estructuración y el avance hacia el este de la faja plegada y fallada, están representados por los ciclos fluviales grano y estratotrecientes del Grupo Orán (Russo 1972). Algunas fallas normales reactivadas están 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). Estas fallas normales adquieren especial relevancia en el análisis de las fuentes termales del Sistema de Santa Bárbara, ya que favorecen la penetración de aguas meteóricas hasta profundidades donde se alojan reservorios con temperaturas suficientemente elevadas (Seggiaro *et al.* 1997, Invernizzi *et al.* 2014).

## GEOLOGÍA DE LA SIERRA LA CANDELARIA

### Estratigrafía

La columna estratigráfica en la región norte de la sierra La Candelaria (Fig.3) se inicia con rocas del basamento precámbrico - eocámbrico de la Formación Medina (Bossi 1969), integrado por filitas y esquistos de bajo grado con tonalidades grises y verdosas. La abundancia de micropliegues, el clivaje de crenulación y las frecuentes venas de cuarzo son características distintivas de esta unidad. Sobre la Formación Medina se asienta en discordancia angular el Grupo Salta (Turner 1959) compuesto por el Subgrupo Pir-

gua (Reyes y Salfity 1973), sincrónico con el desarrollo del *rift* cretácico, el Subgrupo Balbuena (Moreno 1970) generado durante la etapa de subsidencia debido al enfriamiento del sistema de *rift* y el Subgrupo Santa Bárbara (Moreno 1970), correspondiente a la etapa de post-*rift*.

El Subgrupo Pirgua está integrado por conglomerados polimícticos y areniscas cuarzosas continentales rojas (Moreno Espelta *et al.* 1975, 1976) con participación de rocas intrusivas y volcánicas alcalinas integradas por basaltos olivínicos, traquitas olivínicas y brechas. Presenta un abrupto incremento de más de 1000 m de espesor en la ladera oriental de la sierra La Candelaria respecto de su ladera occidental.

El Subgrupo Balbuena, del Cretácico tardío a Paleógeno temprano, se asienta concordantemente sobre el Subgrupo Pirgua. Durante su depositación se produjo una notable disminución de la actividad tectónica manifiesta por la escasa frecuencia de fallas normales que lo afectan (Bianucci *et al.* 1981) y por la continuidad lateral de sus espesores. Se reconocieron las tres formaciones que integran el Subgrupo Balbuena con un espesor total de 185 m.

La Formación Lecho (Turner 1959) presenta niveles conglomerádicos compuestos por clastos finos de cuarzo, pelitas y areniscas amarillentas de grano fino a mediano dispuestas en bancos tabulares de aspecto masivo.

La Formación Yacoraite (Turner 1959) está integrada por areniscas calcáreas, calcarinitas, calizas y limolitas grises amarillentas y verdosas dispuestas en estratificación mediana a fina. La Formación Olmedo (Moreno 1970) fue identificada en la región con 15 m de limolitas y lutitas calcáreas grises oscuras de estratificación fina a mediana.

Durante el Paleógeno se depositaron secuencias continentales del Subgrupo Santa Bárbara en discordancia regional sobre el Subgrupo Balbuena. Las unidades basales Mealla y Maíz Gordo (Moreno 1970), están constituidas por areniscas y arcilitas con intercalaciones carbonáticas mientras que la unidad superior, integrada por la Formación Lumbrera, se com-

pone de estratos rojos de origen mayoritariamente fluvial.

En discordancia erosiva sobre el Grupo Salta sobreyacen secuencias fluviales granocrecientes del Grupo Orán, como registro sedimentario de la elevación y el avance del frente orogénico andino durante el Neógeno.

El Grupo Orán está subdividido en los subgrupos Metán y Jujuy (Gebhard *et al.* 1974). El Subgrupo Metán, integrado por las formaciones Río Seco, Anta y Jesús María presenta buenos afloramientos en los anticlinales menores que generan las sierras Termas y Balboa, ubicadas al norte de la sierra La Candelaria (Fig.4). La Formación Río Seco está integrada por areniscas grises amarillentas a grises rosadas, de aspecto sacaroide, con estratificación masiva y entrecruzamientos de gran escala. Intercalan en menor proporción niveles lenticulares de conglomerados polimícticos finos y bancos fangolíticos de tonalidades rojizas y verdosas.

La Formación Anta (Gebhard *et al.* 1974) está integrada por pelitas amarillo verdosas y areniscas limosas de coloración marrón rojiza con estratificación mediana a gruesa. Esta unidad presenta, hacia el este de la sierra, frecuentes niveles con yeso singenético y bancos tobáceos. El espesor promedio de la Formación Anta obtenido por Nesossi (1947) es de 400 m. La Formación Río Salí (Ruiz Huidobro 1960), equivalente a la Formación Anta, aflora en el extremo suroriental de la sierra de La Candelaria. Consta de un miembro basal compuesto por areniscas con intercalaciones de fangolitas rojizas y conglomerados polimícticos y un miembro superior, de colores amarillentos, verdes y grises, integrado por pelitas y areniscas con intercalaciones de yeso de varios metros de potencia. La sección inferior de La Formación Río Salí está intruida por diques y filones capas de basaltos grises oscuros (Viramonte *et al.* 1994) y cuerpos de lavas con disyunción columnar de alrededor de 600 m de largo por 400 m de ancho.

Hacia el techo del Subgrupo Metán, continúa la Formación Jesús María (Gebhard *et al.* 1974) con secuencias de limolitas y fangolitas arenosas intercaladas con are-

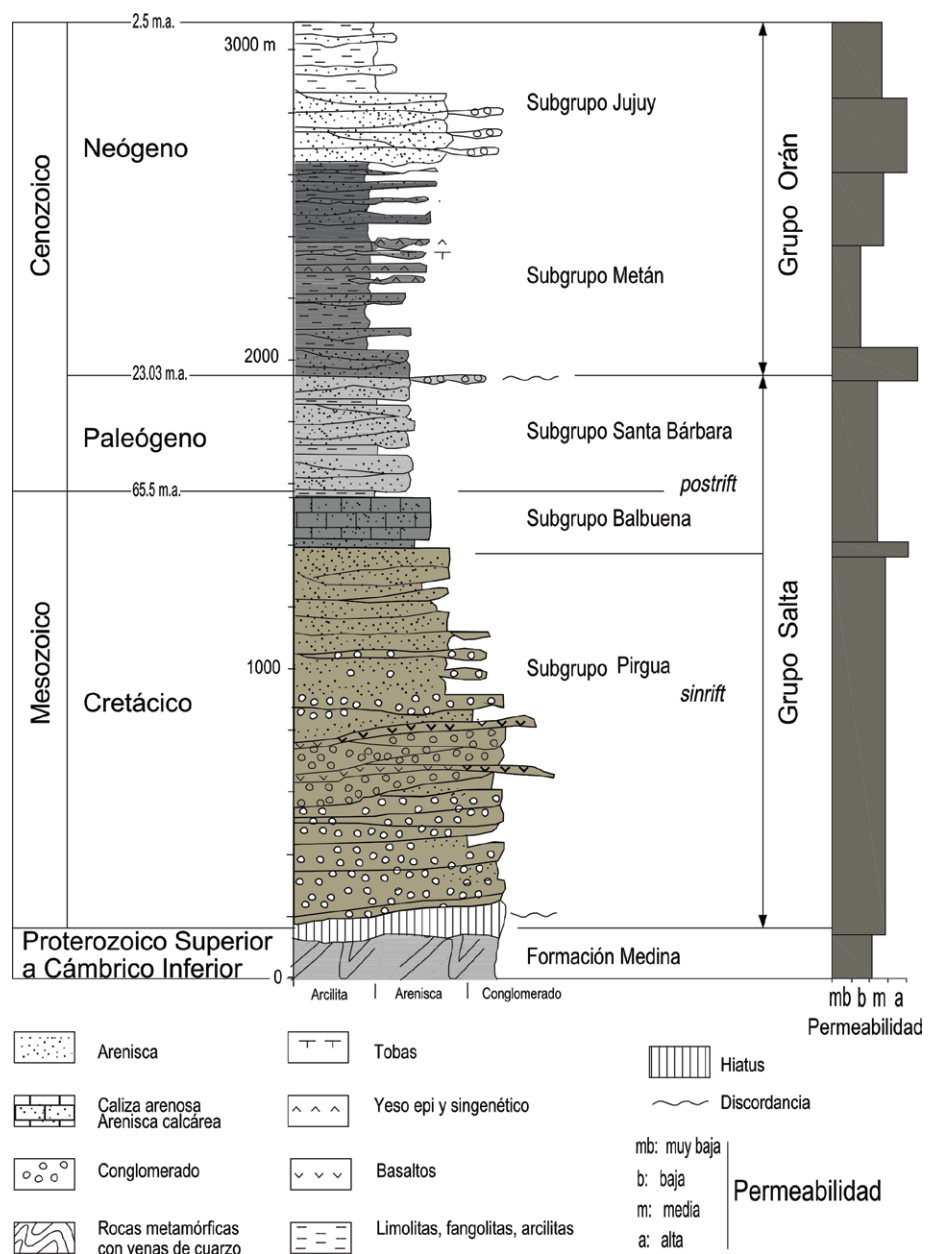


Figura 3: Columna estratigráfica generalizada de la sierra La Candelaria. A la derecha se muestran las permeabilidades de las unidades.

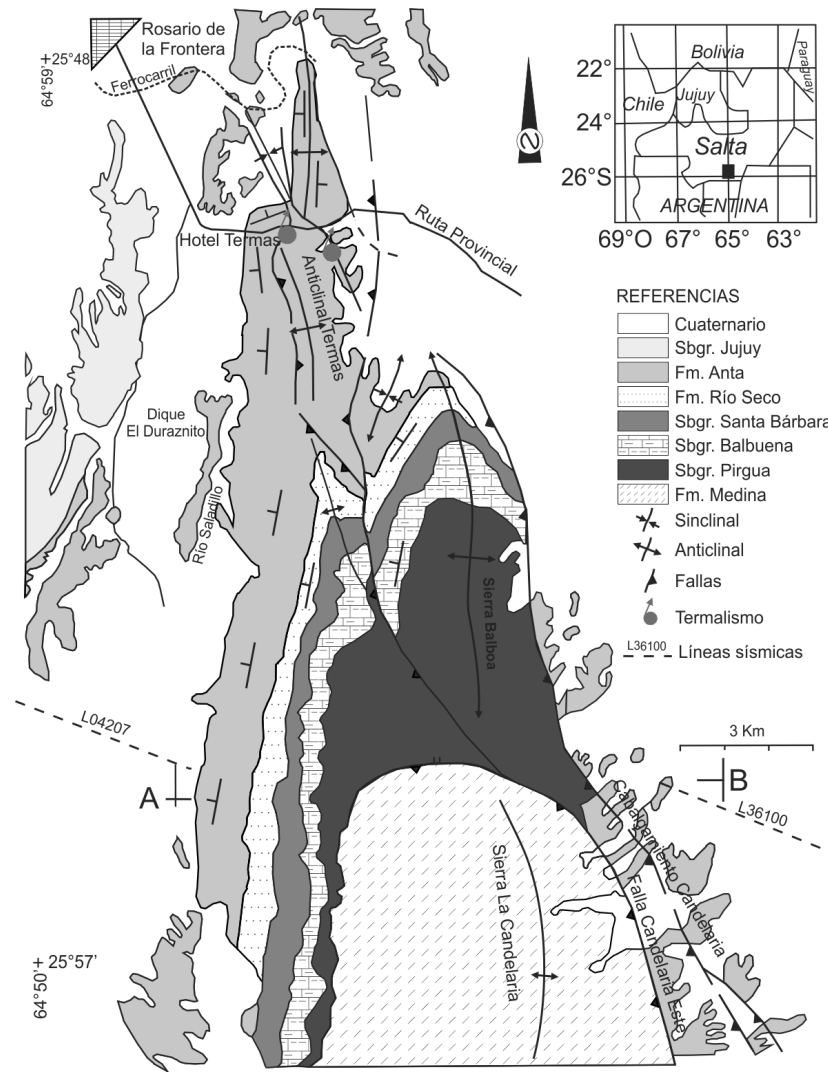
niscas. Las areniscas presentan estructura interna entrecruzada e intercalaciones de niveles finos de conglomerados con clastos de cuarzo e intraclastos pelíticos. El espesor promedio estimado para esta unidad es de 250 m.

El Subgrupo Jujuy de edad pleistocena, refleja los depósitos proximales del frente orogénico y de cuencas intramontanas. Está dispuesto en relación pseudo-concordante sobre el Subgrupo Metán, con secuencias grano y estrato crecientes que

se inician con depósitos fluviales de areniscas medianas y conglomerados finos a medianos y culminan con conglomerados polimícticos gruesos y masivos de abanicos aluviales.

**Estructura**

La sierra La Candelaria presenta las mayores alturas de toda la franja suroriental del Sistema de Santa Bárbara. Constituye el reflejo topográfico de un braquianticlinal elongado en sentido meridiano con



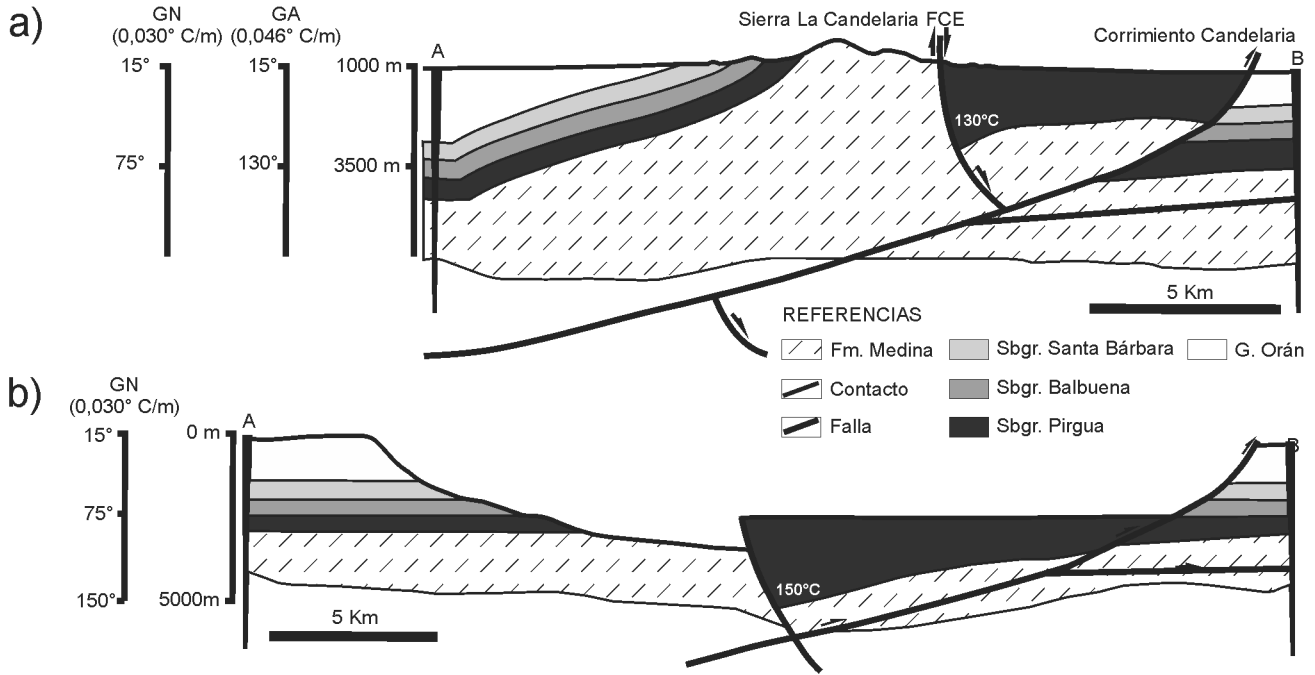
**Figura 4:** Mapa geológico detallado del norte de la sierra La Candelaria. AB: traza del perfil geológico representado en la figura 5.

núcleo en el basamento (Moreno Espelta *et al.* 1975). Desde la sierra La Candelaria hacia el este, el paisaje está modelado por suaves lomadas que pasan transicionalmente y en pocos kilómetros a la llanura chaqueña (Fig. 2). El plegamiento y la elevación de la sierra La Candelaria se produjo como consecuencia del corrimiento Candelaria, con vergencia oriental y emergente al este de la sierra (Fig. 4). A partir de datos de superficie se realizó el perfil AB (Figs. 4 y 5), transversal a las estructuras principales, que se balanceó por longitudes estratales obteniendo un acortamiento del 20%. El corrimiento Candelaria está cortado en

una sección oblicua por la falla Candelaria Este (CE) que pone en contacto el basamento con el Subgrupo Pirgúa (Fig. 5). Al norte y noreste de la falla CE, el Subgrupo Pirgúa aumenta bruscamente su espesor, claramente visible en la sección palinspástica de la Figura 5. Al ubicar el punto nulo en el techo del Subgrupo Pirgúa, la falla CE queda debajo e inclinada hacia el este, delimitando el borde de un hemigraben cretácico, por lo que se interpreta que la misma fue rotada por el corrimiento Candelaria durante la tectónica andina. La inclinación original hacia el noreste de la falla CE durante su etapa como falla normal, está en correspondencia con

otras fallas normales cretácicas observadas en la depresión de Metán por Cristallini *et al.* (1997), pocos kilómetros al norte de la sierra La Candelaria. El braquianticlinal de La Candelaria, se transfiere en el extremo norte de la sierra a un conjunto de fallas y pliegues suaves, entre los que se destacan los anticlinales Balboa y Termas (Fig. 4), en coincidencia con el incremento de los espesores de las secuencias cretácicas y la presencia de los estratos neógenos. El anticlinal Termas está cortado en su flanco occidental por un retrocorrimiento a lo largo del cual emergen la mayoría de las fuentes termales de la sierra (Fig. 4). Este retrocorrimiento fue observado en superficie y detectado en el subsuelo, frente al Hotel Termas, por medio de sondeos eléctricos verticales (SEV), donde el bloque inferior se encuentra al oeste con un rechazo estimado en 170 m (Seggiaro *et al.* 1994).

A los fines de adquirir una visión estructural regional, la sección transversal de la sierra La Candelaria fue extendida lateralmente integrándola con las interpretaciones de las líneas sísmicas de YPF: L 04207 al oeste y L 36100 al este (Fig. 2). La sección sísmica LS 04207 muestra en su parte media el corrimiento El Arenal, vergente al este (Fig. 6) y enraizado en el nivel de despegue principal dentro del basamento. Las unidades diferenciadas en la sección sísmica fueron extrapoladas de los datos de profundidades del pozo El Arenal (YPF.St.Ar.X1), ubicado sobre la charnela del anticlinal El Arenal, pocos kilómetros al norte de la línea sísmica (Fig. 2). El corrimiento El Arenal desarrolló un pliegue que presenta en superficie una curvatura suave de los depósitos del Subgrupo Jujuy (Fig. 6). El perfil sísmico muestra reflectores de buen realce correspondientes a la Formación Yacoraite y al Subgrupo Pirgúa. El nivel de despegue estimado se encuentra a 8 km de profundidad. Al este de la sierra La Candelaria, la línea sísmica LS 36100 muestra dos corrimientos con vergencia hacia el este (Fig. 7). El ubicado al poniente, corresponde al sector emergente del corrimiento Candelaria



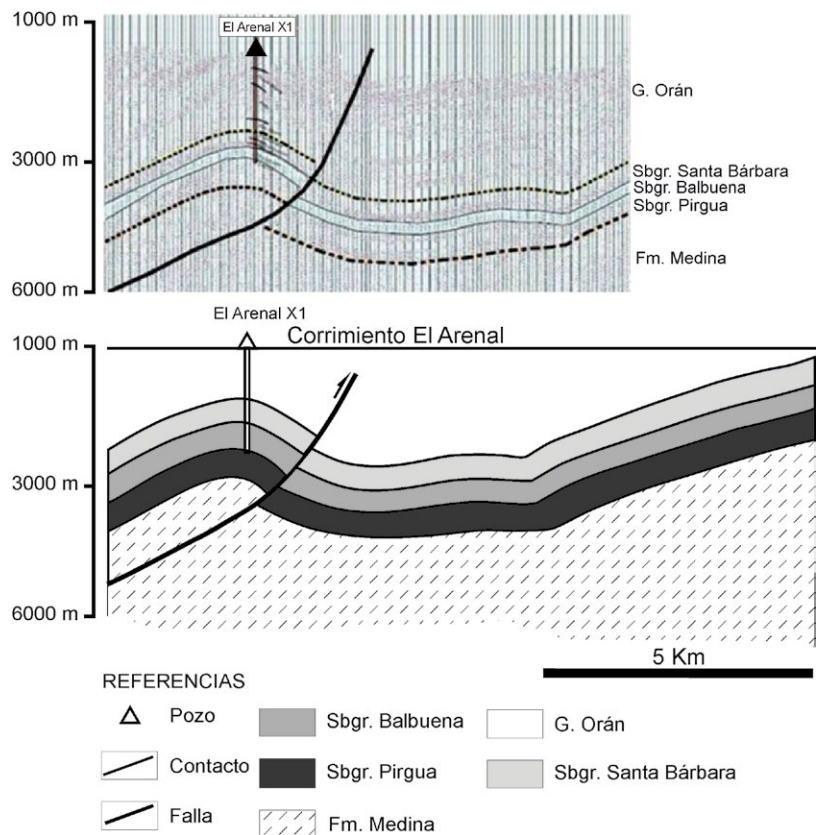
**Figura 5:** a) Sección AB transversal a la sierra La Candelaria donde se observa el corrimiento Candelaria con la falla CE rotada y plegada sobre el bloque colgante; b) Reconstrucción palinspástica con la posición original de la falla CE en el borde de un hemigraben cretácico. Al costado se comparan los gradientes geotérmicos normal (GN) y anómalo (GA) antes y después de la deformación. 130 °C: temperatura actual del reservorio; 150°C: temperatura en el reservorio antes de la elevación de la sierra.

ria donde el basamento y los estratos del Subgrupo Pirgúa suprayacentes cabalgan sobre depósitos terciarios. El corrimiento Antillas ubicado al este del anterior, alcanza los 5000 m de profundidad en las proximidades de la sierra La Candelaria y genera un pliegue de amplio radio de curvatura en su bloque colgante (Fig. 7). En esta sección se observa que el Subgrupo Pirgúa presenta el mayor espesor en la proximidad de la falla CE y se adelgaza hacia el este.

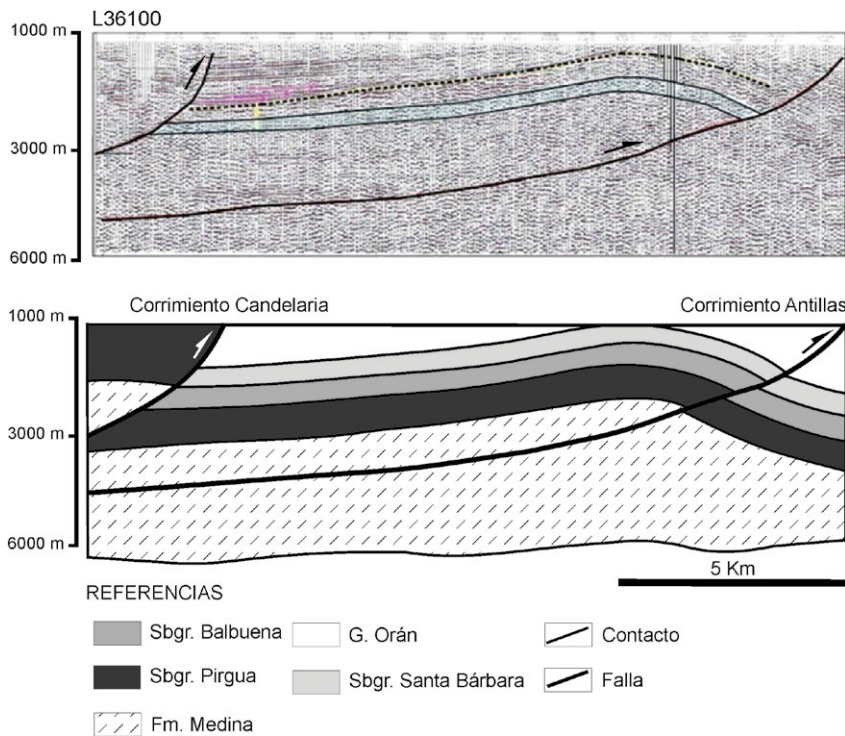
El perfil esquemático de la figura 8 permite observar, de manera integral, la estructuración regional de los tres corrimientos vergentes hacia el antepaís, con un nivel de despegue que pasa de 8 km de profundidad en el oeste a 2,5 km en el este.

### MODELADO ANALÓGICO

La cinemática de reactivación y rotación de la falla CE durante la compresión generada por el corrimiento Candelaria, fue analizada en laboratorio mediante un modelado analógico. La sección ensayada partió de la reproducción a escala de la reconstrucción palinspástica del perfil AB



**Figura 6:** Sección sísmica L04207 (Fig. 4) con la respectiva interpretación donde se muestra el corrimiento El Arenal. El pozo El Arenal fue proyectado sobre la línea sísmica siguiendo la charnela del pliegue homónimo (Fig. 2).



**Figura 7:** Sección sísmica L36100 (Fig. 4) con la respectiva interpretación donde se observan los corrimientos Candelaria y Antillas.

representada en la figura 5. El modelo fue preparado simulando estratos con arenas de diferentes colores y la falla normal fue inducida mediante un papel film inclinado en dirección contraria al pistón de empuje (Fig. 9).

La deformación de la sección fue generada por compresión mediante un motor paso a paso hasta lograr el acortamiento del 20 % calculado para la sección AB (Fig. 10).

El estrato oscuro simula la unidad de *sin-rift* depositada en un hemigraben con fuerte aumento de espesor en el bloque colgante (Fig. 10a).

Durante la primera etapa de deformación se produjo el plegamiento y la elevación parcial del sector equivalente a la sierra La Candelaria (Fig. 10b). Luego comenzó la rotación de la falla normal hasta rebatir su inclinación en sentido contrario al transporte tectónico (Fig. 10c). Cuando la falla normal quedó rebatida y con alto ángulo, se bloqueó su desplazamiento y se generó un corrimiento por delante de manera similar al corrimiento Candelaria (Fig. 10c). La geometría final obtenida en el mode-

lado analógico resultó satisfactoriamente comparable por su similitud con la del perfil AB (Fig. 10d). Las observaciones de los pasos evolutivos realizadas durante su desarrollo, enriquecieron la interpretación de la cinemática propuesta para la sierra La Candelaria.

## GEOQUÍMICA

Las termas de Rosario de la Frontera localizadas en el extremo norte de la sierra La Candelaria (Fig. 4), fueron caracterizadas desde el punto de vista geoquímico por Seggiaro *et al.* (1995) a partir del muestreo de seis surgencias principales y por Chiodi *et al.* (2012) con análisis isotópicos de aguas y gases. Los resultados de estos análisis indican que las aguas termales tienen un origen predominantemente meteórico.

Las muestras de Seggiaro *et al.* (1995) fueron analizadas por sus contenidos químicos mayores cuyos resultados se presentan en el Cuadro 1. Las muestras M1, M3, M4 y M5 caen en el campo de aguas bicarbonatadas diluidas o periférica y las

M2 y M6 en el de cloruradas alcalinas de acuerdo a la clasificación de Ellis y Mahon (1977) (Fig. 11). Las relaciones Cl/B, Na/K y Cl/Mg (Cuadro 2) dan resultados que evidencian diferentes proporciones de mezcla con aguas someras entre los cuales la muestra M2 es la más representativa de la fuente original. Las relaciones Cl/Mg obtenidas en todas las muestras son indicadoras de campos geotérmicos de baja entalpía. Los resultados analíticos de la relación Mg/K volcados en el diagrama propuesto por Giggenbach y Corrales Soto (1992) (Fig. 12), caen en el campo de aguas inmaduras cerca del límite de aguas parcialmente equilibradas. En el cuadro 2 se muestra el rango de temperaturas de equilibrio obtenido a partir de los geotermómetros de K-Mg, K-Na y SiO<sub>2</sub>. Las temperaturas de equilibrio de K-Mg calculadas en base al modelo de Giggenbach (1988) varían entre 90° C y 130° C, mientras que, usando el geotermómetro K-Na fueron encontradas temperaturas comprendidas entre 160° C y 260° C (Seggiaro *et al.* 2005). Dado que el sistema K-Mg se equilibra más rápido que el de K-Na, las temperaturas obtenidas mediante el geotermómetro K-Mg son atribuibles a condiciones de mezcla con aguas freáticas. Las temperaturas K-Na descartan reacciones adicionales en niveles más someras, por lo que podrían reflejar las condiciones de la fuente, no obstante, Giggenbach (1988) sugiere la no aplicación de este geotermómetro para las aguas bicarbonatadas diluidas.

En base al análisis de los diferentes geotermómetros utilizados se toma la temperatura de 130° C obtenida por SiO<sub>2</sub> para la muestra M2 (Cuadro 2) como la que mejor representa las condiciones de la fuente que alimenta el campo termal de Rosario de la Frontera.

## MODELO CONCEPTUAL DEL CAMPO GEOTÉRMICO

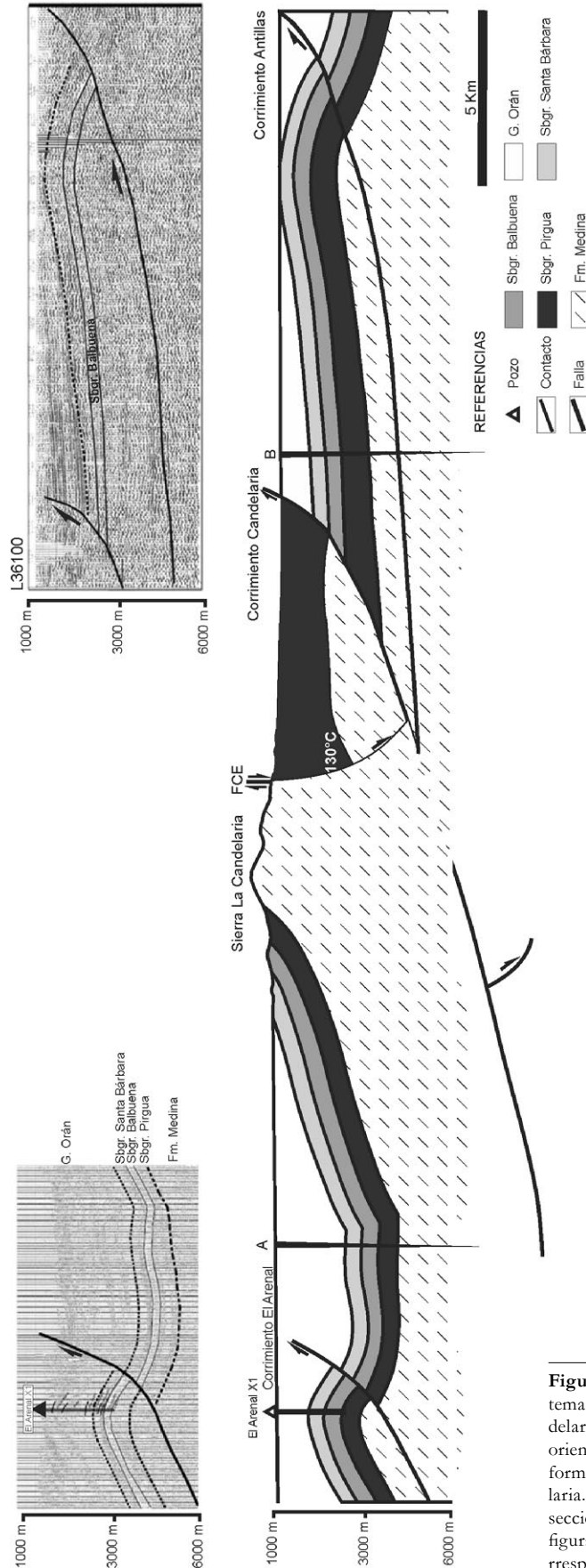
El modelo preliminar del campo geotérmico de Rosario de la Frontera aquí presentado, está basado en las características litoestratigráficas de las unidades involucradas, la geometría de las estructuras y



los resultados geoquímicos y geotermométricos de las aguas termales. Las permeabilidades relativas de las unidades estratigráficas basadas en sus componentes litológicos dominantes (Fig. 3), indican que el Subgrupo Pirgua, integrado por facies proximales gruesas, y la Formación Río Seco, compuesta por areniscas eólicas medianas con buena selección, constituyen las potenciales rocas reservorio y de circulación de las aguas termales de la región. Invernizzi *et al.* (2014) suman también a la Formación Yacoraité como posible roca reservorio debido a su permeabilidad secundaria por fracturación. Las tres unidades con permeabilidades aptas para reservorios, están confinadas por capas impermeables que se comportan como rocas sello o de cubierta.

Desde el punto de vista estructural, la superposición de desplazamientos normales e inversos a lo largo de la falla CE en la sierra La Candelaria, habría causado una intensa fracturación en las rocas del basamento generando una zona de falla de elevada permeabilidad secundaria a la que se suma la permeabilidad primaria inherente a la litología del Subgrupo Pirgua. La zona de falla, habría favorecido la circulación del agua meteórica desde el área de recarga, localizada en la cumbre de la sierra La Candelaria, hasta los niveles basales del Subgrupo Pirgua ubicados en el bloque colgante de la falla CE a 2.500 m de profundidad (Fig. 5). El agua a esta profundidad adquiere una temperatura de 130°C y llega a la superficie en el extremo norte de la sierra La Candelaria con 90°C (Fig. 4). Las fracturas menores conectan las aguas del reservorio con la superficie en un recorrido relativamente corto, razón por la cual la pérdida de calor durante el trayecto es mínima (Fig. 13).

Los resultados de secciones audiomagnetotelélicas (AMT) realizadas por Barcelona *et al.* (2012) en las cercanías del Hotel Termas (Fig. 4) indican la presencia de una anomalía conductiva por debajo de los 100 m que, de acuerdo a la geología del área, podría corresponder a la circulación de las aguas termales cercanas a la



**Figura 8:** Sección integral del sistema de corrimientos Arenal, Candelaria y Antillas, con vergencia oriental. Se observa la falla CE deformada por el corrimiento Candelaria. La traza correspondiente a la sección AB está representada en la figura 4. Las secciones sísmicas corresponden a las figuras 7 y 8.

**CUADRO 1:** Composición Química (mg/kg) de aguas surgentes en el campo geotermal Rosario de La Frontera (Seggiaro *et al.* 1995).

ID	T °C	Ph	Ca	Mg	Na	K	B	Cl	SO <sub>4</sub>	SiO <sub>2</sub>	HCO <sub>3</sub>
M1	89,2	7,80	2,0	2	230,0	15,6	0,7	180	110	92	195
M2	75,6	7,90	2,0	2	276,0	42,9	0,5	270	110	92	207
M3	84,3	7,90	0,7	2	230,0	19,5	0,6	170	125	90	195
M4	52,8	8,15	0,7	1	174,8	7,8	0,4	99	85	80	202
M5	76,2	7,90	0,7	2	163,3	23,4	0,7	90	95	86	207
M6	25,0	7,20	400,0	188	5565,0	780,0	3,0	5100	3100	41	476

**CUADRO 2:** Relaciones Cl/B-Na/K-Cl/Mg y temperaturas de equilibrio aplicando diversos geotermómetros.

ID	Cl/B	Na/K	Cl/Mg	TKm °C	Tkn °C	TSiO <sub>2</sub> °C
M1	264,7	14,7	90	97	203	130
M2	574,4	6,4	135	127	270	130
M3	283,3	11,8	85	103	220	129
M4	241,4	22,4	99	88	175	124
M5	136,4	7,0	45	108	263	127
M6	172,3	70,0	27	147	261	96

Se adopta la temperatura obtenida por el geotermómetro de SiO<sub>2</sub> de la muestra M2 como la más representativa del reservorio en el campo de Rosario de la Frontera (Seggiaro *et al.* 1995).

superficie dentro de la Formación Río Seco.

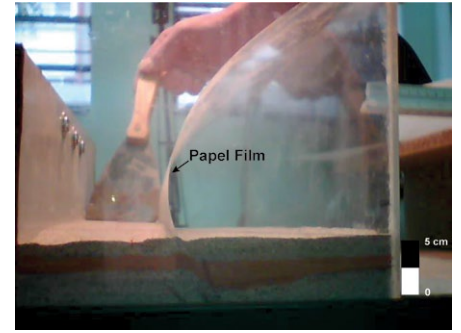
Los estudios hidrogeológicos y geoquímicos realizados por Invernizzi *et al.* (2014) estiman un volumen equilibrado en 39 km<sup>3</sup> de aguas meteóricas en el reservorio, con un tiempo de residencia que supera los 50 años desde su infiltración hasta la surgencia termal.

El gradiente geotérmico en el norte de la sierra La Candelaria fue calculado en 0,046°C/m a partir de la temperatura de equilibrio (130 °C) en la fuente, la profundidad (2.500 m) del reservorio y la temperatura superficial promedio de 15°C (Fig. 5). El valor obtenido es anómalo con respecto al gradiente de 0,030°C/m, estimado a partir del promedio de gradientes de los pozos de YPF más cercanos (Arenal X1: 0,023°C/m, Algarrobal X1001: 0,031°C/m, Rosario de la Frontera X1: 0,037°C/m) (Fig. 2).

El origen de esta anomalía térmica, focalizada en la sierra La Candelaria, constituye una incógnita aun no develada. Si bien en las aguas termales, Chiodi *et al.* (2012) registraron relaciones isotópicas de gases burbujeantes que indican procedencia mantélica, no parece probable, de acuerdo a la geología regional, atribuirlos a la presencia de un cuerpo magmático actual,

alojado en niveles superiores de la corteza, ni a conexiones estructurales recientes con el manto. La procedencia de estos gases, podría explicarse a partir de acumulaciones retenidas en estratos de la Formación Río Salí durante el magmatismo mioceno de Antillas (pocos kilómetros al este de la sierra La Candelaria). Las fallas normales cretácicas, conectadas con niveles profundos de la corteza, habrían favorecido el ascenso desde el manto de los basaltos intercalados en la Formación Río Salí, antes de ser cortadas o reactivadas por los corrimientos andinos, entre el Mioceno y el Plioceno (del Papa *et al.* 2004, Mon *et al.* 2005).

La anomalía térmica local, sin vinculación con una fuente de calor magmática, podría explicarse a partir de la evolución estructural de la sierra La Candelaria, suponiendo que su elevación se produjo con los movimientos más jóvenes de la región, entre el Pleistoceno y el Holoceno (Carrapa *et al.* 2011). Esta hipótesis se afirma en la interpretación de la sección AB (Fig.5) donde la base del reservorio, integrado por el Subgrupo Pirgua, se encontraba a una profundidad de 5.000 m, antes de que la sierra fuera elevada por el corrimiento Candelaria. A esta profundidad inicial, la roca reservorio habría



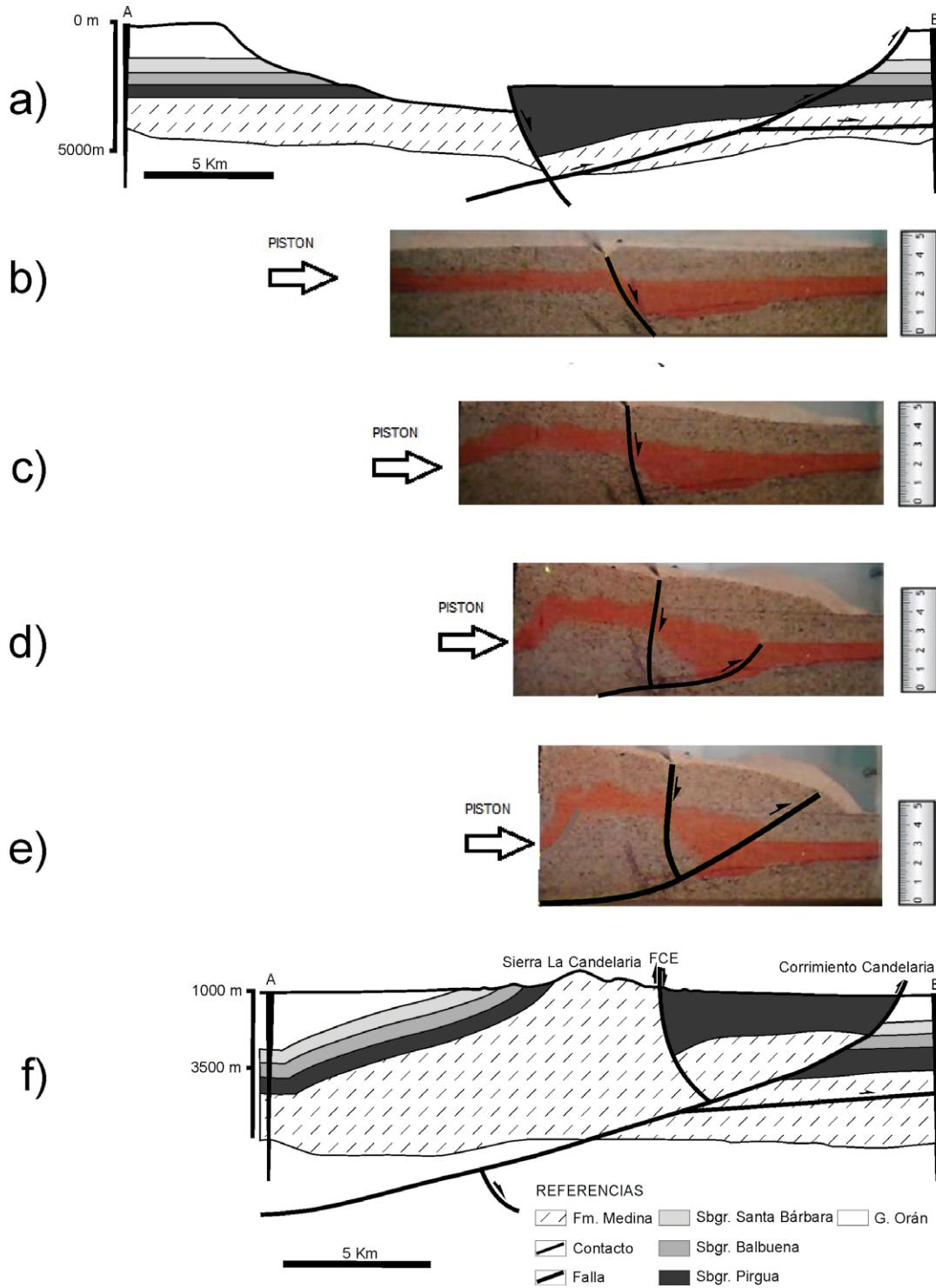
**Figura 9:** Construcción del modelo analógico. La falla normal cretácica fue simulada por el papel film. La arena roja representa los depósitos de *syn-rift* (Subgrupo Pirgua).

canzado una temperatura de 150 °C, considerando un gradiente normal de 0,030 °C/m (Fig. 5). Luego de la deformación, el reservorio tuvo un ascenso vertical de 2.500 m, conservando un remanente de la temperatura adquirida previamente, con una pérdida de calor relativamente baja (de 150 °C a 130 °C). La conservación de la temperatura pre-deformacional en el reservorio es atribuible a que la disipación de calor no habría alcanzado aún el equilibrio con el gradiente regional, debido a que el levantamiento de la sierra se produjo en un tiempo relativamente reciente.

El modelo conceptual aquí postulado, si bien presenta un considerable grado de especulación, permite interpretar en forma preliminar, la existencia de un potencial geotérmico de interés económico en el norte de la sierra La Candelaria y extrapolarlo hacia otras zonas termales del ambiente subandino. Los resultados obtenidos por Seggiaro *et al.* (1995, 1997), Chiodi *et al.* (2012), Barcelona *et al.* (2012) e Invernizzi *et al.* (2014) y los presentados en este trabajo, alientan la necesidad de avanzar hacia una etapa exploratoria de subsuelo que, mediante métodos geofísicos y pozos exploratorios, permita evaluar con mayor precisión el campo geotérmico de Rosario de la Frontera.

## CONCLUSIONES

La sierra La Candelaria se estructuró en un sistema de corrimientos vergentes al

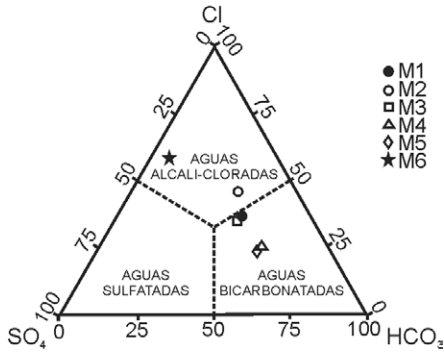


**Figura 10:** Modelo analógico de la sierra La Candelaria; a) Estado predeformacional, elaborado a partir de la sección palinspástica AB (arriba); b) Plegamiento del bloque yacente y rotación de la falla normal; c) Generación del corrimiento Candelaria; d) Estado final. Nótese la similitud del modelo con la disposición del corrimiento Candelaria y la falla CE de la sección AB (abajo).

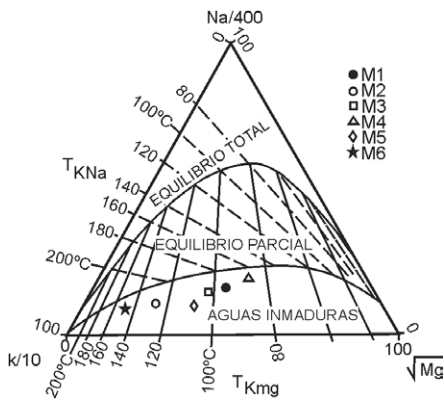
este con un nivel de despegue que disminuye de 8 a 2,5 km de profundidad en la dirección de transporte. El plegamiento y la elevación de la sierra

La Candelaria se produjo como consecuencia del corrimiento Candelaria y la rotación de la falla normal Candelaria Este (CE) de edad cretácica. La restauración

palinspástica de la sierra muestra a la falla CE, delimitando el borde occidental de un hemigraben, donde el Subgrupo Pirgúa aumenta bruscamente su espesor.

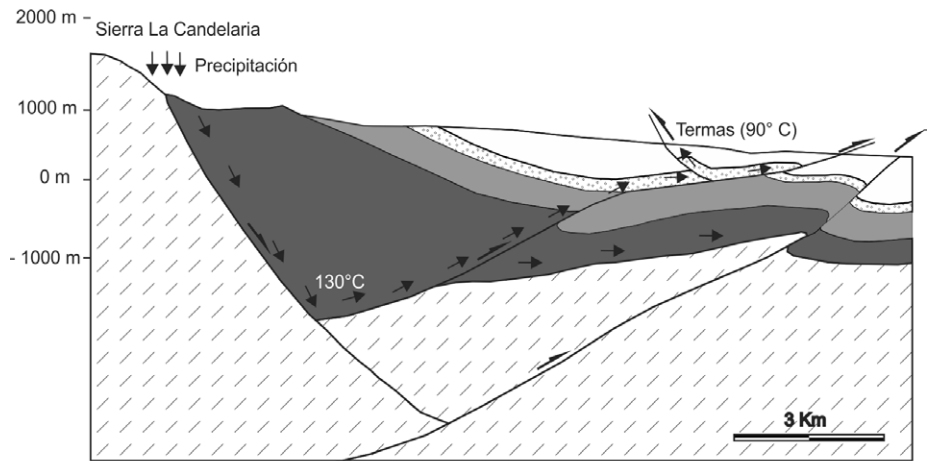


**Figura 11:** Clasificación de aguas termales de Rosario de la Frontera en base de contenidos relativos de Cl, SO<sub>4</sub> y HCO<sub>3</sub> (Ellis y Mahon 1977). Tomado de Seggiaro *et al.* (1995)



**Figura 12:** Diagrama de temperaturas de equilibrio agua-roca basado en contenidos de Na, K y Mg. (Giggenbach y Corrales Soto, 1992). Tomado de Seggiaro *et al.* (1995).

Las características litológicas del Subgrupo Pírgua y de la Formación Río Seco son consideradas las más aptas para almacenar las aguas meteóricas infiltradas. La sección de la sierra La Candelaria muestra al Subgrupo Pírgua a 2.500 m de profundidad donde las aguas, de origen meteórico, alcanzan temperaturas próximas a los 130 °C de acuerdo con las determinaciones geoquímicas y geotermométricas. La circulación de las aguas termales hacia la superficie se habría producido por las unidades con mayor permeabilidad y siguiendo zonas de fallas menores. El gradiente geotérmico de la sierra La Candelaria fue calculado en 0,046 °C/m. Este valor anómalo, se habría generado por que la temperatura de la roca reser-



**REFERENCIAS**

- Grupo Orán Indiferenciado
- ▨ Subgrupo Pírgua
- ▨ Formación Río Seco
- ▨ Subgrupos Balbuena y Santa Bárbara
- ➔ Dirección de circulación de fluidos

**Figura 13:** Modelo geotérmico conceptual. Esquema general en sección NS de la potencial infiltración, circulación (flechas), calentamiento y surgencia de aguas meteóricas en el extremo nortede la sierra La Candelaria.

vorio, adquirida antes del levantamiento de la sierra, no alcanzó, luego de su acenso vertical, el equilibrio con el gradiente geotérmico regional.

**AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo fue realizado gracias al financiamiento provisto por el Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta y al apoyo logístico del Servicio Geológico Minero Argentino.

**TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO**

Aceñolaza, F. y Toselli, A. 1976. Consideraciones estratigráficas y tectónicas sobre el Paleozoico inferior del Noroeste Argentino. 2º Congreso Latinoamericano de Geología, Actas 2: 755-763.

Allmendinger, R.W., Ramos, V.A., Jordan, T.E., Palma, M. e Isacks, L. 1983. Paleogeography and andean structural geometry, Northwest Argentina. *Tectonics* 2: 1-16.

Alonso, J.L., Seggiaro, R., Quintana, R.L., Gallastegui, J., Bulnes, M., Poblet, J., Heredia, N. y Rodríguez Fernández, L.R. 2012. Deformaciones paleozoicas en la Cordillera Oriental de los Andes a los 23°S (NO de Argentina).

8º Congreso Geológico de España, Actas: 16-21, Oviedo.

Aramayo Flores, R.F. 1989. El cinturón plegado y sobrecorrido del Norte Argentino. *Boletín de Informaciones Petroleras* 17: 2-16.

Azcuy, C.L. y Caminos, R. 1988. Características paleogeográficas y diastóricas de algunas cuencas neopaleozoicas de América del Sur, una reseña. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú* 78: 203-224.

Baldis, A., Gorroño, A., Ploszkiewicz, J. y Sarudiansky, R. 1976. Geotectónica de la Cordillera Oriental, Sierras Subandinas y comarcas adyacentes. 6º Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 3-22, Buenos Aires.

Barcelona, H., Ungarelli, C., Favetto, A., Pomposiello, C. y Peri, V. 2012. Audiomagnetotelluric study at the hot springs of the northern segment of the La Candelaria Range: preliminary results. *Societa Geologica Italiana* 21: 795-796.

Bianucci, H., Acevedo, O. y Cerdán, J. 1981. Evolución tectosedimentaria del Grupo Salta en la subcuenca Lomas de Olmedo (provincias de Salta y Formosa). 8º Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 159-172, San Luis.

Bonarelli, G. 1913. Las Sierras Subandinas del Alto Aguaraquíe y los yacimientos petrolíferos del distrito minero de Tartagal, dpto.

- Orán, Salta. Anales del Ministerio de Agricultura, Sección Geología: 8-4, Buenos Aires.
- Bossi, G.E. 1969. Geología y estratigrafía del sector sur del valle de Choromoro. Acta Geológica Lilloana 10, Parte 1: 17-64, Parte 2: Atlas, Tucumán.
- Carrapa, B., Trimble, J. y Stockli, D. 2011. Patterns and timing of exhumation and deformation in the Eastern Cordillera of NW Argentina revealed by (U-Th)/He thermochronology. *Tectonics* 30, TC 3003 doi: 10.1029/2010TC002707.
- Carrera, N., Muñoz, J. A., Sabat, 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.
- Chiodi, A., Tassi, F., Baez, W., Maffucci, R., di Paolo, L. y Viramonte, J. 2012. Chemical and isotope characteristics of the Rosario de la Frontera geothermal fluids, La Candelaria Range (Salta, Argentina). *Società Geologica Italiana* 21: 800-801.
- Cristallini, E., Cominguez, A.H. y 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.
- del Papa, C.E., Hongn, F.D., Petrinovic, I.A. y Domínguez, R. 2004. Evidencias de deformación pre-miocena media asociada al antepaís andino en la Cordillera Oriental (24° 35'-66° 12' O). *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 59: 506-509.
- Ellis, A.J. y Mahon, W. 1977. *Chemistry and Geothermal Systems*. Academic Press. 392 p., Nueva York.
- Gebhard, J., Giúdice, A. y Oliver Gascón, J. 1974. Geología de la comarca entre el río Juramento y arroyo Las Tortugas, provincias de Salta y Jujuy. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 39: 359-375.
- Giggenbach, W.F. 1988. Geothermal solute equilibria-derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers. *Geochimica et Cosmochimica* 52: 2749-2765.
- Giggenbach, W.F. y Corrales Soto, R. 1992. Isotopic and chemical composition of water and steam discharges from volcanic-magmatic-hydrothermal systems of the Guanacaste Geothermal Province, Costa Rica. *Applied Geochemistry* 7: 309-332.
- González Bonorino, F. 1950. Algunos problemas geológicos de las Sierras Pampeanas. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 5: 81-110.
- González, O. y Mon, R. 1996. Tectónica del extremo norte de las Sierras Pampeanas y su transición a la Cordillera Oriental y las Sierras Subandinas. 13° Congreso Geológico Argentino y 3° Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas 2:149-160, Buenos Aires.
- Grier, M.E., Salfity, J.A. y Allmendinger, R.W. 1991. Andean reactivation of the Cretaceous Salta rift. Northwestern Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 4: 351-372.
- Hongn, F. y Seggiaro, R. 1998. Estructuras del Basamento y su relación con el rift Cretácico, Valles Calchaquíes. Provincia de Salta. 10° Congreso Latinoamericano de Geología. Actas 2: 4-9, Buenos Aires.
- Iaffa, D., Sábato, F., Bello, D., Ferrer, O., Mon, R. y Gutierrez, A. 2011a. Tectonic inversion in a segmented foreland basin, from extensional to Piggy Back settings. The Tucumán basin on northwestern Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 31: 457-474.
- Iaffa, D., Sábato, F., Muñoz, J.A., Mon, R. y Gutierrez, A. 2011b. The role of inherited structures in a foreland basin evolution: The Metán Basin in NW Argentina. *Journal of Structural Geology* 33:1816-1828.
- Iaffa, D.N., Sábato, F., Muñoz, J.A. y Carrera, N. 2014. 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.
- Invernizzi, C., Pierantoni, P., Chiodi, A., Maffucci, R., Corrado, S., Baez, W., Tassi, F., Giordano, G. y Viramonte, J. 2014. Preliminary assessment of the geothermal potential of the Rosario de la Frontera area (Salta, NW Argentina): insight from hydro-geological, hydro-geochemical and structural investigations. *Journal of South American Earth Sciences* 54: 20-36.
- Jordan, T.E. y Allmendinger, R.W. 1986. The Sierras Pampeanas of Argentina: a modern analogue of Rocky Mountain foreland deformation. *American Journal of Science* 286: 737-764.
- Kley, J. y Monaldi, C.R. 2002. Tectonic inversion in the Santa Barbara System of the central Andean foreland thrust Belt. Northwestern Argentina. *Tectonics* 21: 1-18.
- McClay, K.R. y Buchanan, P.G. 1992. Thrust faults in inverted extensional basins. En: McClay, K.R. (Ed.) *Thrust Tectonics*: 93-104.
- Mingramm, A., Russo, A., Pozzo, A. y Cazau, L. 1979. Sierras Subandinas. En: Turner, J.C.M. (Ed.): *Geología Regional Argentina*: 95-138. Academia Nacional de Ciencias, Córdoba.
- Mon, R., Rahmer, S. y Mena, R. 1993. Estructuras superpuestas en la Cordillera Oriental. 12° Congreso Geológico Argentino y 2° Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas 2: 48-54, Mendoza.
- Mon, R., Gutierrez, A., Vergani, G., Pacheco, M. y Sábato, F. 2005. Estructura de la depresión tectónica de Metán (Provincia de Salta). 16° Congreso Geológico Argentino, Actas: 73-80, La Plata.
- Monaldi, C.R., Salfity, J.A. y Kley, J. 2008. Preserved extensional structures in an inverted Cretaceous rift basin, Northwestern Argentina. Outcrop examples and implications for fault reactivation. *Tectonics* 27:1011.
- Moreno, J.A., 1970. Estratigrafía y paleogeografía del Cretácico superior en la cuenca del noroeste argentino, con especial mención de los Subgrupos Balbuena y Santa Bárbara. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 25: 9-44.
- Moreno Espelta, C., Viramonte J.G. y Arias, J.E. 1975. Geología del área termal de Rosario de la Frontera y sus posibilidades Geotérmicas. 2° Congreso Iberoamericano de Geología Económica, Actas 4: 543-548, Buenos Aires.
- Moreno Espelta, C., Arias, J.E. y Chávez Manrique, A. 1976. Nuevos afloramientos de vulcanitas cretácicas (Grupo Salta) en la sierra de La Candelaria, Salta. República Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 31: 137-138.
- Nesossi, D. 1947. Estudio geológico de los departamentos de Rosario de la Frontera y Candelaria, Provincia de Salta. Yacimientos Petrolíferos Fiscales (inédito), Buenos Aires.
- Reyes, F.C. y Salfity, J.A. 1973. Consideraciones sobre la estratigrafía del Cretácico (Subgrupo Pirgua) del noroeste argentino. 5° Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 355-385, Villa Carlos Paz.
- Rolleri, E.O. 1976. Sistema de Santa Bárbara: una nueva provincia geológica argentina. 6° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 239-255, Bahía Blanca.
- Ruiz Huidobro, O.J. 1960. El Horizonte Calcáreo Dolomítico en la provincia de Tucumán. *Acta Geológica Lilloana* 3: 147-172.
- Russo, A. 1972. La estratigrafía terciaria en el no-

- roeste argentino. 5º Congreso Geológico Argentino. Resúmenes: 29. Villa Carlos Paz.
- Salfity, J.A. 1979. Paleogeología de la cuenca del Grupo Salta (Cretácico-Eocénico) del norte de Argentina. 7º Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 505- 515, Neuquén.
- Salfity, J.A. y Marquillas, R.A. 1986. Marco tectónico y correlaciones del Grupo Salta (Cretácico-Eoceno), República Argentina. En: Spalletti, L.A. (Ed.) Contribuciones de los Simposios sobre el Cretácico de América Latina Eventos y Registro Sedimentario, 174-188, La Paz.
- Salfity, J.A. y Marquillas, R.A. 1989. El basamento precretácico de la Argentina septentrional y regiones adyacentes. Comunicaciones 40: 17-28, Santiago.
- Salfity, J.A. y Marquillas, R.A., 1994. Tectonic and sedimentary evolution of the Cretaceous-Eocene Salta Group basin. Argentina. En: Salfity, J.A. (Ed.) Cretaceous tectonics of the Andes Earth Evolution Sciences Monograph Series, Friedrich Vieweg and Sohn, 266-315, Braunschweig/Wiesbaden.
- Seggiaro, R. y Aguilera, N. 2014. Cabalgamiento pre-andino en la Sierra de Santa Victoria, Cordillera Oriental, Noroeste Argentino. 19º Congreso Geológico Argentino. Actas Tectónica Preandina s21-53: 1515-1516, Córdoba.
- Seggiaro, R., Aguilera, N., Gallardo, E., Ferretti, J. y García, R. 1994. Estudio estructural del área geotérmica de Rosario de la Frontera. Informe del Proyecto 368, Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta (inédito), 50 p., Salta.
- Seggiaro, R., Aguilera, N., Gallardo, E. y Ferretti, J. 1995. Structure and geothermic potential of the Rosario de la Frontera thermal area, Salta, Argentina. World Geothermal Congress 2: 764-767, Florence.
- Seggiaro, R., Aguilera, N. Ferretti, J. y Gallardo, E. 1997. Estructura del área geotérmica de Rosario de la Frontera. Salta, Argentina. 8º Congreso Geológico Chileno, Actas 6: 390-394, Antofagasta.
- Seggiaro, R., Gallardo, E. y González, D. 2014. Tectónica superpuesta en la sierra de Mojotoro, Cordillera Oriental, Provincia de Salta. 19º Congreso Geológico Argentino. Actas Tectónica Andina s22-63: 1669-1670, Córdoba.
- Turner, J.C.M. 1959. Estratigrafía del cordón de Escaya y de la sierra de Rinconada (Jujuy). Revista de la Asociación Geológica Argentina 13: 15-39.
- Turner, J.C.M. y Méndez, V. 1975. Geología del sector oriental de los departamentos de Santa Victoria e Iruya, provincia de Salta, República Argentina. Boletín de la Academia Nacional de Ciencias 1: 11-24.
- Turner, J.C.M. y Mon, R. 1979. Cordillera Oriental. En: Turner J.C.M. (Ed.) Geología Regional Argentina 1: 57-95, Academia Nacional de Ciencias, Córdoba.
- Viramonte, J., Petrinovic, I., Galliski, M. y Aparicio Yague, A. 1994. Manifestaciones volcánicas cenozoicas de Antilla - San Lorenzo, Salta, Argentina (borde oriental de los Andes Centrales del sur). 7º Congreso Geológico Chileno, Actas 2: 1468-1472, Concepción.

Recibido: 30 de julio, 2013

Aceptado: 19 de febrero, 2015