

# **La Caldera de colapso del Cerr o Aguas Calientes, Salta, Argentina: evolución y esquema estructural**

## **The Cerr o Aguas Calientes collapse Caldera, Salta, Argentina: evolution and structural scheme**

I. A. PETRINOVIC

*Universidad Nacional de Salta CONICET, Buenos Aires 177, A-4400, Salta, Argentina, petrino@unsa.edu.ar*

### RESUMEN

Basándose en un estudio volcanológico de detalle, se ha identificado el centro de emisión e interpretado los mecanismos eruptivos de numerosos depósitos piroclásticos, en el extremo oriental de la Cadena Volcánica Transversal del Quevar, provincia de Salta, Argentina.

La interpretación de los datos sugiere la formación de una caldera de colapso vinculada a un régimen tectónico transcurrente. La edad de su formación es de ca 10-10,5 Ma. El volumen total de magma vesiculado es de 200-250 km<sup>3</sup>. Se definen los siguientes depósitos piroclásticos: Ignimbrita Verde, Ignimbrita Chorrillos, Ignimbrita Tajamar e Ignimbrita Abra del Gallo.

La historia volcánica comienza con eventos explosivos, apertura de conductos, colapso del borde oriental de la caldera y depósito de la Ignimbrita Verde con apertura de conductos centrales. El colapso es continuo con desarrollo de conductos laterales y depósito de las Ignimbritas Chorrillos, Tajamar y Abra del Gallo. La Ignimbrita Tajamar representa la unidad de colapso principal en facies de intracaldera. La facies de extracaldera está representada por la Ignimbrita Abra del Gallo.

El colapso se completa en un corto intervalo de tiempo, seguido de un evento de resurgencia del piso de la caldera debido a relajación del campo de esfuerzos regionales y/o intrusión de un domo. La actividad postcaldera está representada por la presencia de zonas de alteración y yacimientos hidrotermales.

Los datos de paleocorrientes y paleotemperaturas de emplazamiento en los diferentes depósitos piroclásticos son coherentes con datos de anisotropía de susceptibilidad magnética. La implantación de la cámara magmática, así como la formación de la caldera, han sido controladas por un sistema transcurrente, de orientación ONO-ESE, coincidente con la traza del Lineamiento Calama-Olacapato-Toro. Posterior al colapso, el sistema transcurrente deformó la geometría original de la caldera. La actividad volcánica podría haber migrado hacia el Oeste a los 8 Ma, formando el complejo volcánico Quevar-Azufretero.

*Palabras clave:* Caldera de colapso. Ignimbrita. Andes. Volcanismo. Mioceno.

## ABSTRACT

A new emission center of extensive pyroclastic flows has been recognized and interpreted, near San Antonio de los Cobres. The eruptive parameters and the volcanic history of the volcanic complex are pointed out.

A caldera collapse controlled by left-lateral strike-slip faulting is proposed. The age of this caldera is 10-10.5 Ma. The least vesiculated magma volume is 200-250 km<sup>3</sup>.

The identified pyroclastic flows are Verde Ignimbrite, Chorrillos Ignimbrite, Tajamar Ignimbrite and Abra del Gallo Ignimbrite. The volcanic history started with explosive events and opening of vents. The initial collapse of the caldera was asymmetric and only the eastern side developed. The eruption of the Verde Ignimbrite took place in this stage in a central vent. The continuous collapse and the opening of rim vents are related with the Chorrillos, Tajamar and Abra del Gallo ignimbrites. The Ignimbrite Tajamar is the principal collapse with intracaldera characteristics. The extracaldera facies is represented by the Ignimbrite Abra del Gallo.

The collapse is completed in a short period of time, followed by a generalized resurgence in the caldera floor. Regional detumescence and probably the intrusion of a dome produced this resurgence. The postcaldera activity is represented by hydrothermal-geothermal activity. All of this process took place in a short period of time, ca 10-10.5 Ma. The field and petrographic data are coherent with the direction determinations of the Magnetic Anisotropy Susceptibility, and with the calculated temperatures of emplacement.

The magmatic chamber geometry and the collapse of a caldera were controlled by the regional structural scheme. A WNW-ESE trend strike-slip fault system with left lateral movement called Calama-Olacapato-El Toro Lineament caused the local distension. These strike-slip faults continued and deformed the north side of the caldera. The magmatic system could have migrated to the west originating the Quevar volcanic complex (8Ma).

*Keywords:* Collapse caldera. Ignimbrite. Andes. Miocene volcanism.

---

## EXTENDED ABSTRACT

The volcanism produced from de early Miocene to the present in the Central Andes (North of Chile, NW Argentina and South Bolivia) covers almost 80 % of the present surface. The eruptive center presented (24° 15'LS-66°30'W) is located near San Antonio de los Cobres, Salta, Argentina (Fig. 1). It belongs to the Transversal Volcanic Chain of El Quevar (Viramonte et al., 1984).

The volcanic rocks related to this eruptive center are a thick and large pyroclastic sequence. Most of them are strongly hydrothermalized with economic concentrations of Sb-Au and Pb-Ag-Zn (Distrito Incachule y Distrito La Poma). Furthermore, present geothermal fields are closely associated to this center. The origin of the emission center is quite associated with a strike-slip fault system with left lateral movement.

### **Regional and structural geology**

The regional basement is represented by a thick sequence of Precambrian-Cambrian marine sediments (Omarini, 1983) with incipient metamorphism called Puncoviscana Formation (Turner, 1959). The Ordovician is represented by marine sediments with an interbedded plutonic-volcanic association (Fig. 1).

The Cretaceous-Paleocene basin in the area are related to a rift process (Bianucci et al., 1981) and it is called Salta Group (Turner, 1959). The outcrops of these sediments are recognized in the North and East of the work area (Fig. 1).

From the late Oligocene to the present, continental basins were developed. The main lineament in the area is called "Lineamiento El Toro" (Mon, 1979) or "Lineamiento Calama-Olacapato-Toro" (Salfity et al., 1985). This lineament has been interpreted as a strike-slip fault with left lateral movement (Salfity et al., 1985; Llambías et al., 1985). The latter could

be recognized as “Chorrillos fault” in the northern rim, and as “Pastos Grandes fault” (Fig. 1) in the southern end of the caldera.

These faults are strike-slip with left lateral movement and generate a local distension in the caldera Aguas Calientes and Quevar volcanic centers. This distension is evidenced by conjugated N 70°-90° normal faults in the interior of this transcurrent system. The conjugated system was produced by left lateral movement geometry. The distension favoured the magma ascent and the caldera formation. An hydrothermal system, after the caldera event, was strongly conditioned by the continuity of the structural scheme. Most of the fault planes studied are reactivation of old faults developed in the basement.

### **The Aguas Calientes collapse caldera and its deposits**

Four ash flows units are related to the collapse caldera (Petrinovic, 1994). They were called Verde Ignimbrite, Chorrillos Ignimbrite, Tajamar Ignimbrite and Abra del Gallo Ignimbrite (some names proposed by Coira y Paris, 1981). All of them are crystal rich, dacitic in composition and strongly welded. There is not field evidence of a considerable period of time between them (Petrinovic, 1994). The geochronological determinations (Petrinovic et al., this volume) indicates a quick succession at 10-10.5 Ma, of ash flow eruptions with the developing of a collapse caldera (Petrinovic, 1994). The paleotemperature determinations indicate 400-450 degrees to the intracaldera facies and 300-350 to the extracaldera facies.

The eruptive mechanisms in each ash-flow eruption were very similar. There are not ash-falls recognized. There is no evidence of a plinian-subplinian column. A contemporaneous single collapse event with the Verde Ignimbrite is the first event in the caldera history. A common presence of pyroclastic lag breccias is interpreted as vents opening during the eruption. The vent dimension must have been wide enough to provoke a quick column collapse. The second phase of the collapse was contemporaneous with the eruption of the Chorrillos, Tajamar and Abra del Gallo Ignimbrites. New vents located near the collapse fractures were developed.

The Tajamar Ignimbrite characteristics are typically of intracaldera ash-flow. The rheological properties of the Tajamar Ignimbrite changed when the main body of the ash-flow could climb the caldera rim. The outflow facies of the Tajamar Ignimbrite is the Abra del Gallo Ignimbrite. The impact zone must have been very close to the caldera rim inside the collapsed area. An asymmetrical collapsed area could have been the response of old fractures reactivation. The Magnetic Anisotropy Susceptibility (MAS) measurements indicate NW trend for the vent to the intracaldera facies and SSE trend for the outflow facies.

A 350°-400° range was determined for the outflow facies and 400°-450° to the intracaldera facies according to the MAS paleotemperature measurements. The present difference of 1,400 m between the floor of the caldera (present cerro Aguas Calientes hill) and the present topographic rim can be interpreted as resurgence caused by regional detumescence and/or a dome intrusion. The existence of El Quevar (8 Ma, Olson y Guilzean, 1987) volcanic complex could be used to interpret the migration of the magmatic system towards the west.

### **Conclusions**

A collapse caldera is supposed to be the origin of the Ignimbrites Verde, Chorrillos, Tajamar and Abra del Gallo. The caldera creation happened ca. 10-10.5 Ma. The collapse is asymmetric. Only the eastern border was developed. The caldera creation started with a generalised collapse of the floor, explosive events and central vent openings with intracaldera ash flow eruption (Verde Ignimbrite) (Fig. 2). Then a short eruptive column with basal ground surge deposits and large ash flow deposits (Tajamar y Abra del Gallo Ignimbrites) was generated. It was contemporary with the reactivation of a collapse fractures. The final stage of the caldera history was the resurgence produced by regional detumescence. The hydrothermal and thermal activity was the last event in the caldera history. The age of the caldera (ca. 10-10.5 Ma) is coincident with a maximum compression rate period in the Central Andes. This indicates that the extensive sectors of the transcurrent system were the most favoured places for the caldera location.

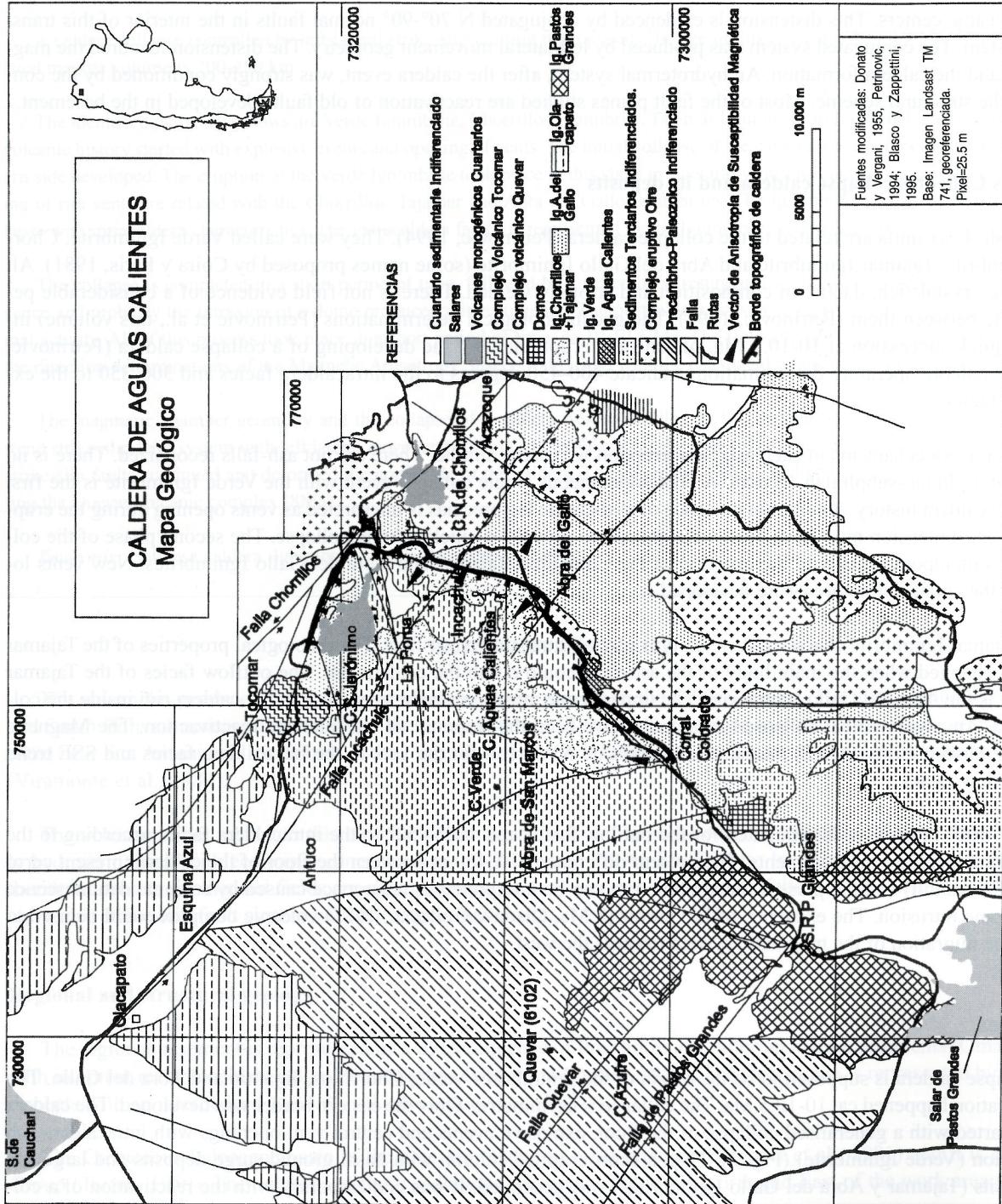


Figura 1. Mapa Geológico de la caldera de Aguas Calientes.

Figure 1. Geological map of the Aguas Calientes caldera.



## INTRODUCCIÓN

Los materiales volcánicos producidos durante el Neógeno en los Andes Centrales del Sur (Norte de Chile, noroeste de Argentina y Sur de Bolivia), cubren casi el 80 % de su superficie. La mayor parte de estos materiales son extensos depósitos de ignimbritas generados por colapso de calderas. Esto indica la importancia de su estudio para la comprensión de los procesos físicos y químicos en zonas de conjunción de placas. El centro eruptivo estudiado ( $24^{\circ} 15'S-66^{\circ}30'W$ ) se encuentra ubicado en las inmediaciones de la localidad de San Antonio de los Cobres, en la provincia de Salta, Argentina (Fig. 1). Constituye uno de los representantes más orientales de la cadena volcánica transversal del Quevar (Viramonte et al., 1984). Se encuentra en la traza del Lineamiento El Toro (Mon, 1979) o Lineamiento Calama-Olacapato-Toro (Salfity et al., 1985). Este centro eruptivo se encuentra afectado por sistemas hidrotermales que han generado concentraciones minerales de Sb-Au y Pb-Ag-Zn (Distritos Mineros de Incachule y La Poma). Campos geotérmicos activos se relacionan a diferentes estructuras y depósitos del centro eruptivo cerro Aguas Calientes.

## GEOLOGÍA REGIONAL

El basamento de la región está representado por la Formación Puncoviscana (Turner, 1964) constituida por una secuencia sedimentaria con metamorfismo de bajo grado, que ha sido interpretada como marina profunda (Omarini, 1983). La edad de esta Formación es Precámbrico Superior-Cámbrico Inferior (Fig. 1).

Durante el Paleozoico Inferior se depositaron en el área de la Puna turbiditas en facies marinas profundas, secuencias sedimentarias y volcano-sedimentarias (Coira, 1973; 1975; Schwab, 1973; Koukharsky et al., 1987; Zappettini, 1989; Balhburg, 1990). Cuerpos intrusivos de granitoides de igual edad conforman una faja extendida con sentido N-S (Fig. 1), que es parte de la Faja Eruptiva de la Puna (Méndez et al., 1973) o Complejo Eruptivo Oire (Blasco et al., 1995).

El Cretácico-Paleoceno está representado por el Grupo Salta (Turner, 1959) y está relacionado con episodios de *rift* (Bianucci et al., 1981). El Subgrupo Santa Bárbara (Moreno, 1970) aflora al Norte del área (Fig. 1) de trabajo (Schwab, 1980).

Durante parte del Oligoceno Superior al Mioceno Medio se desarrollan cuencas aisladas con sedimentación

clástica y evaporítica pertenecientes al Grupo Pastos Grandes (Turner, 1964).

## DEPÓSITOS PIROCLÁSTICOS

En la figura 2 se muestran las columnas estratigráficas generalizadas organizadas por localidades. Las descripciones petrográficas, análisis geoquímicos y mediciones geocronológicas se encuentran en Petrinovic et al. (éste volumen). En esta contribución se describe en detalle los mecanismos eruptivos y depósitos involucrados en la generación de la caldera de colapso del cerro Aguas Calientes. Por otro lado se establece la relación entre el evento volcánico y el marco estructural asociado.

La *Ignimbrita Verde* (Petrinovic, 1994) es equivalente al Complejo Volcánico Aguas Calientes de Coira y Paris (1981) y a las Dacitas y Tobas de Dacitas Viejas (Vilela, 1969). El contacto inferior no se observa, mientras que el superior está constituido por la Ignimbrita Chorrillos. Sus afloramientos están expuestos en las laderas oriental y occidental del cerro Aguas Calientes, en la quebrada de Tajamar, en las inmediaciones de la Estación Tocomar, desde Abra del Gallo hasta Corral Colorado, y en las inmediaciones del cerro Verde, donde se observan sus mayores espesores (Fig. 1). El depósito es homogéneo, rico en cristales inmersos en una matriz cinerítica con mayores contenidos de pómez hacia el centro de emisión en las proximidades del cerro Verde (Fig. 1). El color es verde a verde-grisáceo, debido a una fuerte alteración en fase de vapor. Este depósito está intensamente soldado, con una matriz cinerítica casi totalmente recristalizada. A menudo presenta desarrollo de esferulitas por desvitrificación. Sus características físicas indican transporte y deposición a altas temperaturas (alteración con gases internos, compactación primaria, etc.). Debido a que la base de este miembro no es visible, los cálculos de espesor entre 200 y 500 metros son mínimos. El volumen estimado es de  $50 \text{ km}^3$ . Esta ignimbrita presenta solamente facies de intracaldera ya que no superó el desnivel topográfico oriental. Representa el episodio eruptivo inicial en la formación de la caldera.

La *Ignimbrita Chorrillos* tiene sus principales afloramientos en las inmediaciones de Abra de Chorrillos y en el Abra del Gallo (Fig. 1). Esta unidad no se puede cartografiar ya que no tiene expresión superficial, encontrándose cubierta por la Ignimbrita Tajamar. El contacto inferior se observa en las inmediaciones de la cumbre del

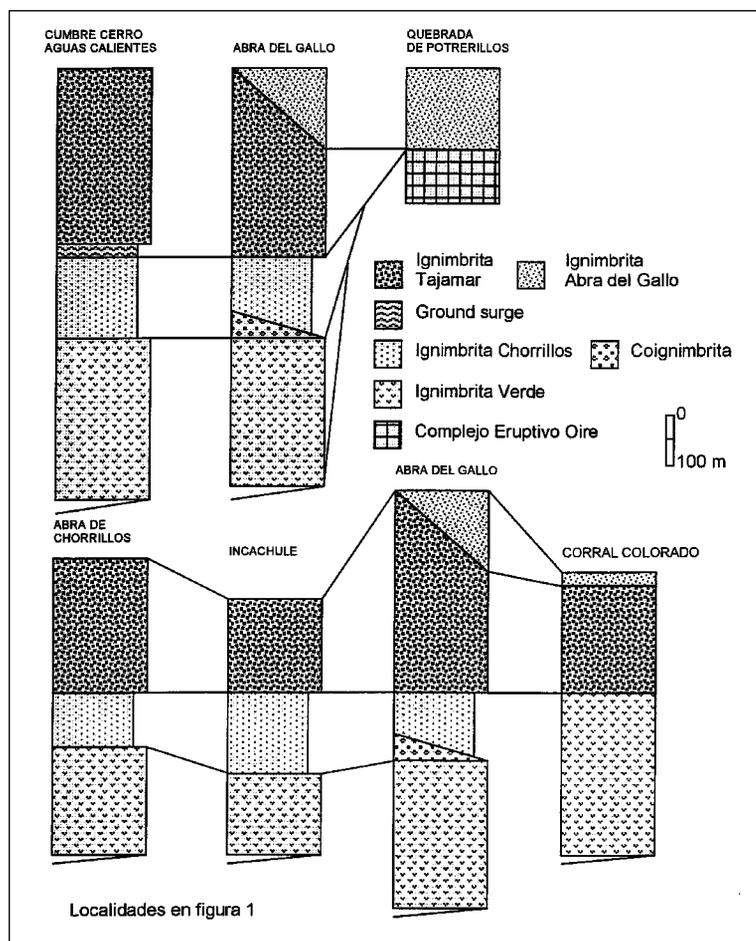


Figura 2. Secciones estratigráficas sintéticas.

Figure 2. Generalized stratigraphic sections.

cerro Aguas Calientes, mientras que el superior se observa en el abra de Chorrillos. El depósito está compuesto por una matriz cinerítica en la que se encuentran inmersos cristales. Estos constituyen el 40 % de la roca. Contiene litoclastos de pelitas que alcanzan dimensiones de 7 cm y fragmentos pumíceos deleznable menores de 7 cm. No contiene líticos de fragmentos lávicos-subvolcánicos de composición dacítica como las unidades anteriores, por lo que se interpreta que representa la apertura de nuevos conductos de emisión o un descenso en el nivel de fragmentación. Presenta menor compacidad que el resto de las unidades. Tiene un espesor máximo de 120 m en el Abra del Gallo, mientras que en la cumbre del cerro Aguas Calientes no supera los 10 metros. El volumen estimado es de cerca de 10 km<sup>3</sup>. En el Abra del Gallo presenta lentes de brechas formadas por fragmentos líticos de granitoides, lavas y pelitas de diámetro variable (de 5

cm a 200 cm) inmersos en una matriz cinerítica. Los fragmentos líticos provienen del basamento pelítico Precámbrico y de los granitoides ordovícicos del Complejo Eruptivo Oire. El contenido en pómez subredondeadas supera el 20 %, con diámetros máximos de 12 cm. Se las interpreta como brechas coignimbríticas proximales “*coignimbrite lag breccias*” (Druitt y Sparks, 1982), originados por eventos explosivos a través de nuevos conductos. Los afloramientos de la Ignimbrita Chorrillos en la cumbre del cerro Aguas Calientes indican que se depositó en un área deprimida con una dirección preferencial hacia el NW. Las direcciones de flujos obtenidas a través del análisis de anisotropía de susceptibilidad magnética son coincidentes con los datos de campo (Fig. 1).

La *Ignimbrita Tajamar* es de color rojo a rosado. Está compuesta por una matriz cinerítica altamente re-

cristalizada, con cristales de plagioclasa, cuarzo, biotita, augita, y fragmentos de pumitas colapsadas con diámetros máximos de 25 cm en las facies proximales. Su alta compacidad es producto de alteración en fase de vapor ocurrida durante su depositación. Son comunes fragmentos líticos de lava dacítica que caracterizan este depósito y se los utiliza como diagnóstico para su correlación. En las cercanías de la cumbre del cerro Aguas Calientes, esta unidad tiene en la base un depósito compuesto por *sets* de láminas con estratificación de capa plana y gradación inversa de los fragmentos líticos. El espesor de cada *set* es de 2-4 cm. El espesor total del depósito es de 3-4 metros. Este depósito es el producto de una oleada piroclástica seca tipo “*ground surge*” (Sparks y Walker, 1973) generada a partir de un disparo violento (Wholetz et al., 1984), con la apertura de los conductos emisores y la formación de una colada piroclástica con alta participación de líticos (Ignimbrita Tajamar). El depósito ignimbrito suprayacente es contemporáneo. Los espesores promedio de la Ignimbrita Tajamar son de 250-300 m (con un máximo medido de 415 m) y se mantienen en una línea Norte-Sur desde la mina La Poma hasta la localidad de Corral Colorado (Fig. 1). Los depósitos denominados Ignimbrita Olacapató e Ignimbrita Pastos Grandes (Petrinovic, 1994) (Tablas 1 y 2) pueden correlacionarse con esta unidad. Los volúmenes totales calculados para esta unidad son de 70-100 km<sup>3</sup>. Las características de la Ignimbrita Tajamar, tales como grandes espesores (más de 300 m), alto soldamiento del depósito, desvitrificación y alteración en fase vapor, son típicas de un depósito intracaldera.

La *Ignimbrita Abra del Gallo* en la quebrada de Potrerillos tiene un espesor promedio de 100 m, con un máximo de 170 m en las inmediaciones de Acazoque (Fig. 1). Los volúmenes calculados son de 45-50 km<sup>3</sup> (vesiculado) sin tener en cuenta los efectos de la erosión. La *Ignimbrita Abra del Gallo* se diferencia del resto del complejo volcánico por su coloración blanquecina y menor grado de soldamiento. La diferencia entre las *Ignimbritas Tajamar* y *Abra del Gallo* es facial, ya que geocronológicamente, geoquímicamente y petrográficamente son idénticas. El cambio en las propiedades hidrodinámicas del flujo al superar el borde de la caldera controló las diferencias faciales entre los depósitos de intracaldera y extracaldera. Con la finalidad de separar unidades cartografiables a escala de afloramientos, se ha otorgado diferente nominación a estos depósitos. Entre la quebrada de Tajamar y el cerro Negro de Chorrillos (Fig. 1) se encuentra un domo exógeno con pequeños flujos lávicos y autobrechas. Intruye los gra-

nitoides ordovícicos del Complejo Eruptivo Oire. No se han encontrado relaciones de campo con los depósitos de la caldera. El domo, de composición fenodacítica, podría corresponder a un evento subvolcánico desarrollado en el borde de la caldera hacia el final del ciclo de la caldera.

## EVOLUCIÓN DE LA CALDERA DEL CERRO AGUAS CALIENTES

Se interpretan las cuatro ignimbritas consideradas (*Ignimbrita Verde*, *Ignimbrita Chorrillos*, *Ignimbrita Tajamar* e *Ignimbrita Abra del Gallo*) como una rápida sucesión eruptiva ocurrida ca 10-10,5 Ma. Estos depósitos están vinculados al desarrollo de una caldera de colapso con centro de subsidencia en el actual cerro Aguas Calientes (Fig. 3). Los mecanismos eruptivos han sido similares en los diferentes pulsos. La ausencia o presencia muy subordinada de depósitos plinianos de caída en la base de cada ignimbrita, indican una rápida y extensa erupción sin desarrollo de una columna vertical de dimensiones considerables. Las características descritas son comunes para la mayoría de las ignimbritas andinas (Petrinovic y Viramonte, 1997). El radio del conducto debió ser lo suficientemente grande como para que la columna colapsara inmediatamente. Las velocidades de erupción deben haber sido del orden del 10<sup>6</sup>-2x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/sg.

La primer fase de colapso fue previa a la erupción de la *Ignimbrita Verde* ya que ésta se restringe al interior de la caldera, con conductos en la zona central. El colapso produce una subsidencia del bloque de basamento (Complejo Eruptivo Oire). La segunda fase del colapso originó la deposición de las *Ignimbritas Chorrillos*, *Tajamar* y *Abra del Gallo*. El colapso fue asimétrico con el borde oriental de la caldera representando la máxima subsidencia. En este pulso, se desarrollaron nuevos conductos en el borde oriental, por donde surgieron los flujos que originaron la *Ignimbrita Chorrillos*. La *Ignimbrita Chorrillos* quedó restringida al interior de la caldera. Las medidas de anisotropía de susceptibilidad magnética obtenidas para esta unidad indican dirección NW (Fig. 1) hacia el interior de la caldera.

Las características de la *Ignimbrita Tajamar*, cambiaron al superar la barrera topográfica producida por la subsidencia de un bloque de basamento (Complejo Eruptivo Oire). La zona de impacto del flujo piroclástico por el colapso de la columna eruptiva, se debió ubicar dentro o muy cerca del borde de la caldera, dada la escasa altura

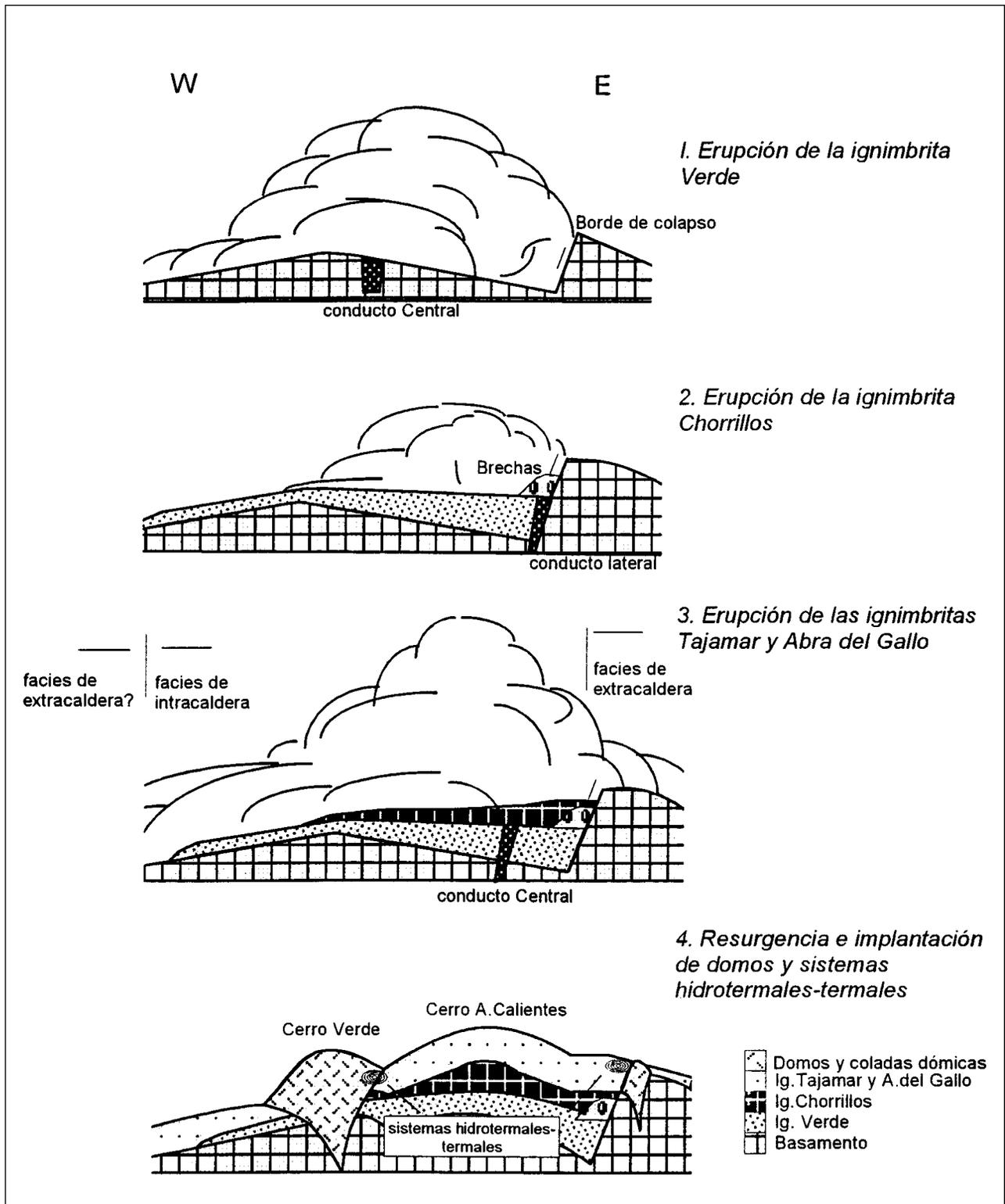


Figura 3. Modelo de evolución de la caldera de colapso de Aguas Calientes.

Figure 3. Evolution sketch of the Aguas Calientes collapse caldera.

de la columna. La energía propia del flujo disminuyó al intentar superar el borde de la caldera, a medida que evolucionaba el colapso de la columna y parte del mismo recircula dentro de la columna. El efecto de choque produce una progresiva disminución de la altura de la columna eruptiva y la zona de impacto del colapso de columna se retrae; los depósitos a partir de ese momento son sólo de intracaldera. Esto explica porqué los depósitos intracaldera del cerro Aguas Calientes son volumétricamente mayoritarios (70-100 km<sup>3</sup> de material, contra sólo 45-50 km<sup>3</sup> en la facies extracaldera).

Fueron tomadas muestras de paleomagnetismo con la finalidad de medir la anisotropía de susceptibilidad magnética en la facies de intracaldera y extracaldera (Fig. 1). Los resultados obtenidos son coherentes con el modelo de colapso de caldera propuesto. Las muestras correspondientes a la facies de intracaldera tienen una dirección preferencial hacia el NW, mientras que las obtenidas en la facies extracaldera tienen una dirección hacia el SE. Mediante la aplicación de la técnica de magnetismo termoremanente se obtuvieron temperaturas de emplazamiento de 350-400° para la Ignimbrita Abra del Gallo y de 400-450°, para la Ignimbrita Chorrillos. Estas determinaciones son coherentes con las diferencias descritas para las facies intracaldera y extracaldera.

Los volúmenes totales calculados son de aproximadamente 170-210 km<sup>3</sup>. Si se correlacionan las Ignimbritas Pastos Grandes y Olacapato con la Ignimbrita Tajamar el volumen calculado es de 270 km<sup>3</sup>. De acuerdo al ritmo de erupción estimado, este volumen debiera haber sido desalojado en un período de 24-48 horas, probablemente separado por breves intervalos sin erupción. La diferencia topográfica entre el actual interior de la caldera (5.380 m) y su borde (4.300 m), se interpreta como una resurgencia (Smith y Bailey, 1968) de aproximadamente 800-1000 metros del piso de la caldera por relajamiento de la roca de caja regional (Chery et al., 1991). La caldera, durante su formación por subsidencia, produjo una relajación general en el campo de tensiones regional, con una amplitud de onda mayor que el bloque hundido. La relajación produjo el almacenamiento del magma residual en la cámara, induciéndolo a moverse hacia la superficie sin alcanzarla. Este ascenso produjo el combamiento del área previamente subsidida. La resurgencia produjo fracturación en bloques meridianos de la facies intracaldera.

A partir de los 10 Ma aproximadamente, el sistema magmático migró al Oeste. Esta nueva actividad magmática está representada por los aparatos eruptivos cen-

trales de los cerros Quevar, Nevado de Pastos Grandes y Azufrero, donde ocurren los episodios lávicos datados por Olson y Gilzean (1987) en la quebrada de Mamaturi y Quirón, en 8.0 +/- 2.0 Ma y 8.6 +/- 0.5 Ma respectivamente.

## ESTRUCTURAS REGIONALES

El mayor lineamiento identificable en el área es el Lineamiento El Toro (Mon, 1979) o Lineamiento Calama-Olapato-Toro (Salfity et al., 1985). Consiste en un sistema de fracturación regional transcurrente de sentido levógiro (Salfity et al., 1985; Llambías et al., 1985), desarrollado a través de múltiples fracturas menores de igual dirección y sentido. En el área de trabajo, se reconoce el Lineamiento El Toro en: Falla de Chorrillos (Marret, 1990), Falla de Pastos Grandes y Falla del Quevar (Fig. 1). La Falla de Chorrillos controla el borde Norte de la caldera. Esta falla presenta en el borde Norte de la caldera un rumbo promedio de 330° y una inclinación de 70° NE, desplazando dos bloques de la ignimbrita intracaldera. El plano de falla está caracterizado por una zona de alteración hidrotermal de 10 metros de ancho en el bloque hundido. El bloque elevado tiene un clivaje espaciado. Este plano de falla se halla cubierto por coladas shoshoníticas del centro monogénico del cerro San Jerónimo (Fig. 1).

La traza de la falla de Pastos Grandes (Fig. 1), coincide con los volcanes Tul-Tul-del Medio-Pocitos y Azufrero. La traza se pierde al noroeste del Salar de Pastos Grandes (Fig. 1). Los clivajes de falla sobre este lineamiento tienen un rumbo marcado N 120° con desplazamiento de bloques en sentido levógiro. La traza de la falla de Quevar, similar a la anterior, coincide con la cumbre del cerro Quevar, perdiendo identidad al noroeste de la localidad de Pastos Grandes (Fig. 1). Las fallas de Chorrillos, Quevar y Pastos Grandes componen un sistema transcurrente levógiro con sistemas de fallas conjugadas en los complejos volcánicos del cerro Quevar y la caldera de Aguas Calientes. Estas fracturas conjugadas son normales y transcurrentes con componente normal.

Este sistema se origina como consecuencia del arrastre producido por la cupla levógira de la transcurrente. El rumbo de las fallas es 70-90° y 330-340°. El sistema 70-90° tiene movimiento horizontal y levógiro de los bloques. El sistema 330-340° tiene movimiento horizontal levógiro y componente normal en algunos sectores (Fig. 1). Sobre el primer sistema, se emplazó el yacimiento de Pb-Ag y Zn de Mina la Poma (Fig. 1). La ve-

ta es posterior a la formación de la caldera ya que este hidrotermalismo no podría haber sobrevivido como entidad, luego de un episodio catastrófico como es la formación de una caldera. En el área de Incachule (Fig. 1) la alteración hidrotermal de Sb-Au se desarrolló sobre vetas orientadas N 90° sobre la traza de la Falla de Incachule con desplazamiento de rumbo sinistral en los bloques, con alteración propílica sobre la Ignimbrita Tajamar. La mayoría de las fallas intracaldera reconocidas, presentan evidencias de ser reactivaciones de fallas pre-existentes.

De esta manera se deduce que un máximo de compresión a los 10 Ma tuvo un efecto directo sobre las transcurencias oblicuas al rumbo andino, aumentando su capacidad para producir distensión local. Esta distensión favoreció el ascenso del magma y la formación de una caldera de colapso. Probablemente el colapso asimétrico de la caldera, con sólo el borde oriental desarrollado, es reflejo de la mayor distensión producida en el área, condicionada por paleoestructuras.

## CONCLUSIONES

Se interpreta al complejo eruptivo del cerro Aguas Calientes como centro de emisión de las Ignimbritas Verde, Chorrillos, Tajamar y Abra del Gallo, y la formación de una caldera de colapso como centro de emisión de estos depósitos.

Del estudio se pueden derivar las siguientes conclusiones:

- a) El episodio de formación de esta caldera ocurrió a los 10-10.5 Ma.
- b) El volumen de material vesiculado es de 200-250 km<sup>3</sup>.
- c) El perfil de colapso de la caldera es asimétrico, ya que sólo se ha interpretado el desarrollo de un sólo borde de caldera. No se han encontrado evidencias del borde occidental.

La formación de la caldera comienza con un colapso generalizado del piso de la caldera, eventos explosivos, con apertura de conductos centrales y de borde y la deposición de material ignimbrítico y coignimbrítico (Ignimbrita Verde). Le sucede inmediatamente la formación de una columna eruptiva sin gran desarrollo vertical con depósitos de oleadas piroclásticas tipo “*ground-surge*” y de ignimbritas de gran volumen (Ignimbritas Chorrillos, Ta-

jamar y Abra del Gallo). Por último se completa el ciclo con el domamiento del piso de la caldera (resurgencia), producido por relajación de esfuerzos en la roca de caja regional y el probable ascenso de un cuerpo subvolcánico posterior. La formación de la caldera de Aguas Calientes está relacionada a los cuadrantes extensivos de un sistema transcuriente relacionado al Lineamiento Calama-Olacapato-Toro.

La actividad hidrotermal y termal posterior a la formación de la caldera, se aloja en áreas aledañas a las fracturas de colapso así como en los cuadrantes extensionales de los sistemas transcurientes asociados (principalmente en fracturas con dirección N 70°). Se propone esta pauta de prospección, para futuras exploraciones mineras en el área. La edad de la caldera de Aguas Calientes es coincidente con un período de máxima compresión en los Andes Centrales (10 Ma). Esta relación indica un momento de máxima distensión local en fracturas transcurientes ONO-ESE producida por la tectónica compresiva en los Andes Centrales.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo resume los aspectos volcanológicos del trabajo de Tesis para optar al título de Doctor en la Universidad Nacional de Salta, realizado por el autor y dirigido por el Dr. J. Viramonte. Agradezco al Dr. J. Martí las facilidades en el Inst. J. Almera (CSIC) para las determinaciones paleomagnéticas. Las contribuciones de dos revisores anónimos fueron muy útiles para la redacción final del trabajo. Este estudio fue parcialmente financiado por el CONICET PID/BID 315, el CIUNSA y la CEE a través del contrato CII\*-CT92-0098.

## BIBLIOGRAFÍA

- Balhbarg, H., 1990. The Ordovician Basin in the Puna of Argentina and Chile: geodynamic evolution, from back-arc to foreland basin. XI Congr. Geol. Arg., Actas, II, 293-296.
- Bianucci, H.A., Acevedo, O.M., Cerdán, J.J., 1981. Evolución tectosedimentaria del Grupo Salta en la subcuenca de Lomas de Olmedo (provincia de Formosa). VIII Congr. Geol. Arg., Actas, 3, 159-172.
- Blasco, G., Zappettini, E., Hongn, F., 1995. Hoja Geológica San Antonio de los Cobres, 2566-I. Secretaría de Minería de la Nación. Buenos Aires.
- Coira, B., 1973. Resultados preliminares sobre la petrología del ciclo eruptivo Ordovícico concomitante con la sedimentación de la Formación Acoite en la zona de Abra Pampa, prov. de Jujuy. Rev. Asoc. Geol. Arg., 28, 85-88.

- Coira, B., 1975. Ciclo efusivo Ordovícico registrado en la Formación Acoite, Abra Pampa, Prov. de Jujuy, Argentina. XI Congr. Iberoamer. Geol. Económica, Actas, I, 37-56.
- Coira, B., Paris, G., 1981. Estratigrafía volcánica del área del cerro Tuzgle, Provincias de Jujuy y Salta. VIII Congr. Geol. Arg., Actas, III, 659-671.
- Chery, J., Hery, J. A., Bonneville, J.P., Vilote, J., Yuen, D., 1991. Numerical modelling of caldera dynamical behaviour. *Geophys. Jour. Int.*, 105, 365-379.
- Druitt, T.H., Sparks, R.S.J., 1982. A proximal ignimbrite breccia facies on Santorini volcano. Greece. *J. Volc. Geoth. Res.*, 13, 147-171.
- Koukharsky, M., Coira, B., Morello, O., 1987. Vulcanismo Ordovícico de la Sierra de Guayaos, provincia de Salta, Argentina, Características geológicas e implicancias tectónicas. X Congr. Geol. Arg., Actas, I, 64-67.
- Llambías, J.E., Sato, A.M., Tomsic, J., 1985. Geología y características químicas del stock terciario del Nevado de Acay y vulcanitas asociadas. *Rev. Asoc. Geol. Arg.*, 40 (3-4), 158-176.
- Méndez, V., Navarini, A., Plaza, D., Vieira, O., 1973. Faja eruptiva de la Puna Oriental. V Congr. Geol. Arg., Actas, IV, 89-100.
- Mon, R., 1979. Esquema Tectónico de los Andes del Norte Argentino. *Rev. Asoc. Geol. Arg.*, 34(1), 53-60.
- Moreno, J., 1970. Estratigrafía y paleogeografía del Cretácico Superior en la cuenca del norte argentino, con especial mención a los Subgrupos Balbuena y Santa Bárbara. *Rev. Asoc. Geol. Arg.*, 25(1), 9-44.
- Olson, S. F., Gilzean, N., 1987. Regional Geology of the Nevado Quevar Area. BHP Minerals & Co., Argentina, Informe inédito, 244 pp.
- Omarini, R.H., 1983. Caracterización litológica, diferenciación y génesis de la Formación Puncoviscana entre el Valle de Lerma y la Faja Eruptiva de la Puna. Tesis doctoral, Universidad Nacional de Salta. 286 pp.
- Petrinovic, I.A., 1994. Vulcanismo Cenozoico asociado al lineamiento Calama-Olapato-El Toro en el tramo comprendido entre San Antonio de los Cobres y Olapato, provincia de Salta, Argentina. Tesis doctoral. Universidad Nacional de Salta. 174 pp.
- Petrinovic, I.A., Mitjavila, J., Viramonte, J.G., Martí, J., Becchio, R., Arnosio, M., Colombo, F., 1999. Geoquímica y Geocronología de secuencias volcánicas neógenas de Trasarco, en el extremo Oriental de la Cadena Volcánica Transversal del Quevar, Noroeste de Argentina. *Acta Geologica Hispanica*, 34, 255-272.
- Petrinovic, I.A., Viramonte, J., 1997. Some south central andes caldera characteristics. IAVCEI, Abstracts, I, 48.
- Salfity, J.A., 1985. Lineamientos Transversales al rumbo andino en el noroeste argentino. IV Congr. Geol. Chile, Actas, II, 119-137.
- Schwab, K., 1973. Die stratigraphie in der Umgebung des Salar de Cauchari (NW Argentinien). *Geotekt. Forsch.*, 43, 12-34.
- Schwab, K., 1980. Carta Geológica-económica. Hoja 5b, Salar de Cauchari. Servicio Geológico Nacional Argentina.
- Smith, R.L., Bailey, R.A., 1968. Resurgent cauldrons. In: R.R. Coats et al. (eds.). *Studies in Volcanology*, Geol. Soc. Am. Mem., 116, 613-662.
- Sparks, R.S.J., Walker, G.P.L., 1973. The ground surge deposit: a third type of pyroclastic rock. *Nature Phys. Sci.*, 241, 4-62.
- Turner, J.C., 1959. Estratigrafía del cordón de Escaya y la Sierra de Rinconada, Jujuy. *Rev. Asoc. Geol. Arg.*, 1, 15-39.
- Turner, J.C., 1964. Descripción geológica de la Hoja 7c. Nevado de Cachi (provincia de Salta). Dirección nacional de Geología y Minería, Boletín 99, 78 pp.
- Vilela, C.R., 1969. Descripción geológica de la Hoja 6c, San Antonio de los Cobres (Salta y Jujuy). Servicio Geológico Nacional, Buenos Aires.
- Viramonte, J.G., Galliski, M.A., Saavedra, V.A., Aparicio, A., García-Cacho, G.L., Escorza, C.M., 1984a. El finivulcanismo básico de la depresión de Arizaro, provincia de Salta. IX Cong. Geol. Arg., Actas, 3, 234-251.
- Wholetz, K.H., McGetchin, T.R., Sandford, M.T., Jones, E.M., 1984. Hydrodynamic aspects of caldera-forming eruptions: numerical models. *Jour. Geoph. Res.*, 89 (B10), 8269-8287.
- Zappettini, E., 1989. Geología y Metalogénesis de la región comprendida entre las localidades de Santa Ana y Cobres. Provincias de Jujuy y Salta. República Argentina. Tesis doctoral. Universidad de Buenos Aires. 180 pp.