

# CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DEL ANTICLINAL TIN TIN: ASPECTOS SOBRE SU ESTILO DE DEFORMACIÓN Y SU RELACIÓN CON LA TECTÓNICA CENOZOICA DEL VALLE CALCHAQUÍ, PROVINCIA DE SALTA

Mariano HERNÁNDEZ<sup>1</sup>, Juan R. FRANZESE<sup>1</sup> y Gustavo D. VERGANI<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centro de Investigaciones Geológicas, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Universidad Nacional de La Plata, La Plata. Email: mhernandez@cig.museo.unlp.edu.ar

<sup>2</sup> Pluspetrol S.A., Buenos Aires.

## RESUMEN

Se presenta una descripción e interpretación de las estructuras de deformación en las diferentes posiciones estructurales (flanco, charnela) del anticlinal Tin Tin, un pliegue con núcleo de basamento formado durante la contracción cenozoica andina en el sector suroeste de la Cordillera Oriental del noroeste argentino. La gran mayoría de las estructuras son pliegues asociados a fallas inversas de bajo ángulo con transporte occidental que en conjunto afectan a todas las unidades del Grupo Salta, y producen un engrosamiento de la cobertura sedimentaria. La cinemática de las estructuras coincide con la del anticlinal principal (vergencia y transporte occidental) y en general presentan su misma orientación NNE-SSO. En menor medida se encuentran fallas de rumbo con alta inclinación y orientación oblicua a la del anticlinal. Las relaciones geométricas entre las estructuras en la cobertura sedimentaria indican una cronología que sugiere una deformación de piel fina relativamente previa al ascenso principal del núcleo de basamento (deformación de piel gruesa). Dicho de otra forma, la contracción inicial cenozoica comenzó con el acortamiento de la cobertura sedimentaria en forma previa a la actividad principal de las fallas del basamento. En términos generales, la deformación total representada en el anticlinal Tin Tin fue generada por la combinación de los procesos de *buckling* y *bending*.

**Palabras clave:** *Pliegues asociados a fallas, Anticlinal con núcleo de basamento, Grupo Salta, Formación Yacoraite, Cordillera Oriental*

## ABSTRACT

*Structural characterization of Tin Tin anticline: Aspects of its deformation style and its relationship with the Cenozoic tectonic of the Valle Calchaquí, Salta province, Argentina*

A description and interpretation of geological structures in different structural positions (flanks, hinge) of the Tin Tin anticline, a basement-cored fold formed during Cenozoic Andean contraction in the southwest sector of the Eastern Cordillera (northwestern Argentina), is presented. The majority of the structures are west-transported thrust fault-related folds which affect the Salta Group, producing the thickening of the sedimentary cover. The kinematic of these structures is synthetic with the Tin Tin anticline (west-vergence) and generally have the same NNE-SSW-strike. Minor strike-slip faults oblique to the anticlinal orientation were observed. The geometric relationship between the sedimentary cover and the basement suggests an initial event of thin-skinned deformation prior to the basement core uplift (thick-skinned deformation). In other words, the initial Cenozoic contraction began with the sedimentary cover shortening prior to the main activity of basement faults. Overall, the total deformation displayed in the anticlinal Tin Tin was generated by the combination of buckling and bending processes.

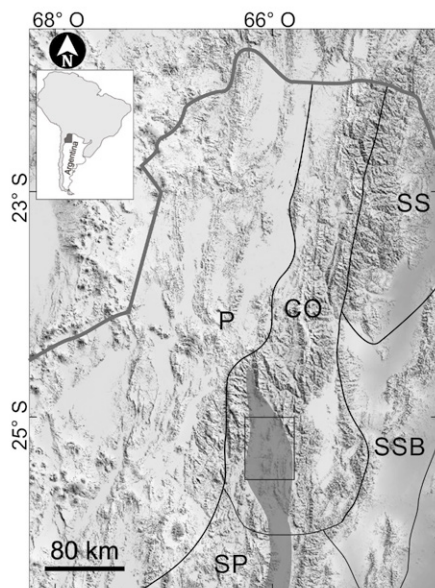
**Keywords:** *Fault-related folds, Basement-cored anticline, Salta Group, Yacoraite Formation, Eastern Cordillera*

## INTRODUCCIÓN

Los anticlinales asociados a fallas inversas son las estructuras típicas de los sistemas contraccionales de antepaís, y se encuentran enmarcados dentro de diferentes estilos estructurales, desde fajas plegadas y corridas de piel fina a fajas plegadas con bloques de basamento involucrado (Po-

blet y Lisle 2011). Muchos de estos sistemas estructurales contienen importantes acumulaciones de hidrocarburos en trampas anticlinales complejas, por lo que han sido objeto de numerosos estudios tanto en el ámbito de la industria del petróleo y gas como en el ámbito científico (McClay 2004, Poblet y Lisle 2011, Tavani *et al.* 2011, entre otros). Particularmente, son

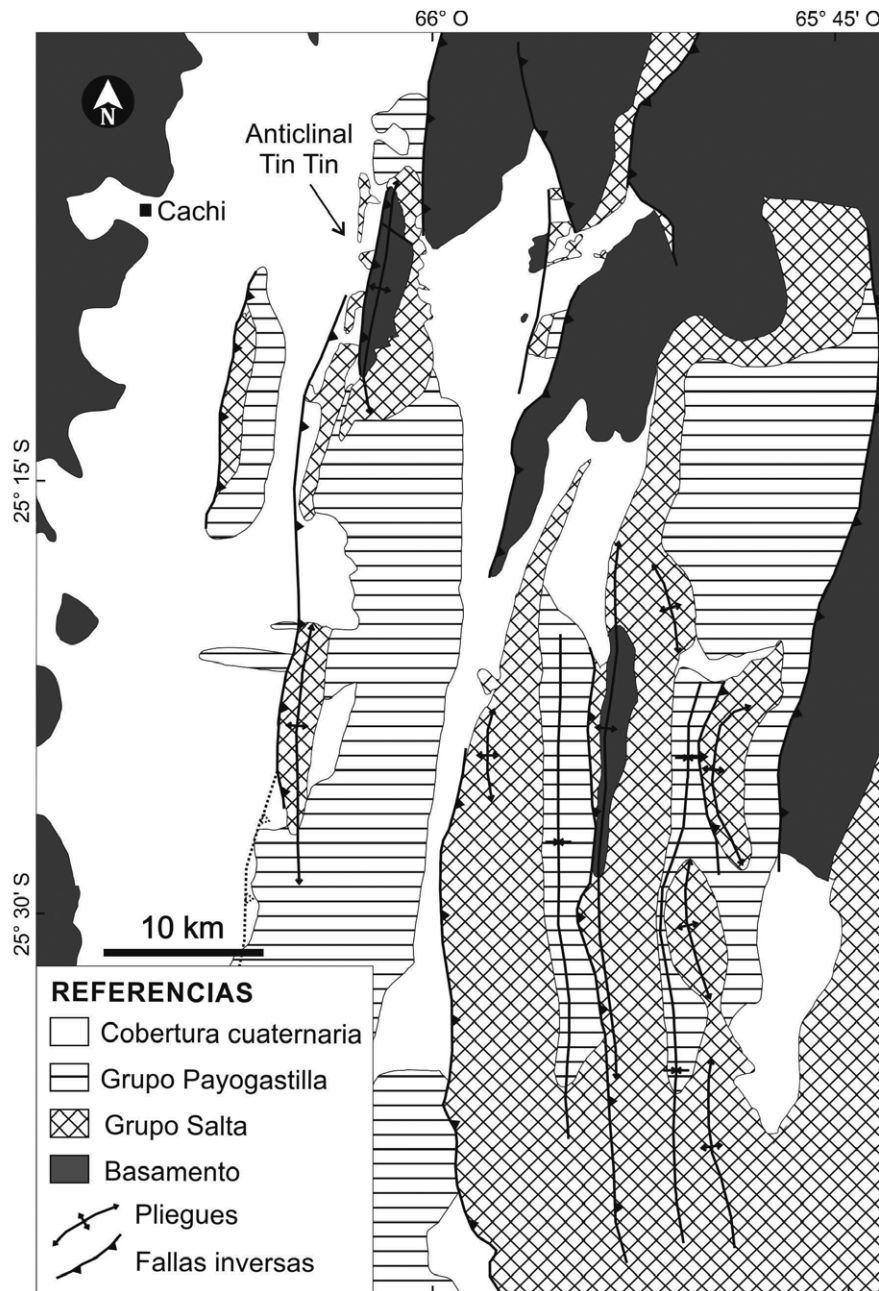
las estructuras internas de los anticlinales que conforman los reservorios las que le proporcionan propiedades fundamentales que pueden condicionar el transporte y acumulación de fluidos (Coward *et al.* 1998, Tavani *et al.* 2008, 2011). Es así que la completa descripción y análisis de las características estructurales de los anticlinales representa un estudio significativo



**Figura 1:** Ubicación de la zona de estudio (recuadro) en el marco de las provincias geológicas del NOA. P- Puna; CO- Cordillera Oriental; SS- Sierras Subandinas; SSB- Sistema de Santa Bárbara; SP- Sierras Pampeanas. El grisado muestra la extensión del Valle Calchaquí.

desde el punto de vista productivo y de la misma forma, permite interpretar la evolución de las estructuras principales dentro del contexto geológico-estructural regional, ligadas a la faja plegada y fallada (Ismat 2008, Tavani *et al.* 2006, 2008).

En este trabajo se examinan las características estructurales del anticlinal Tin Tin, un pliegue ubicado en el tramo septentrional de los Valles Calchaquíes del noroeste argentino (NOA; Fig. 1), con el fin de determinar su estilo de deformación y su relación con la tectónica andina cenozoica. Esta zona corresponde al sector suroeste de la Cordillera Oriental de Argentina y está caracterizada por rasgos estructurales fuertemente vinculados a la inversión tectónica acaecida durante el Cenozoico (Grier *et al.* 1991, Mon y Salfity 1995, Carrera *et al.* 2006, entre muchos otros). Esta provincia geológica está conformada por una extensa faja plegada y fallada de rumbo submeridional que involucra en su estructuración, a escala regional, distintas unidades fanerozoicas y un basamento heterogéneo (Ramos 1999). En la zona de estudio, la tectónica contraccional cenozoica expuso las uni-



**Figura 2:** Mapa geológico del área de estudio (Simplificado de Carrera y Muñoz 2013 y de Del Papa *et al.* 2013b).

dades correspondientes a la cuenca de rift cretácico-paleógena del Grupo Salta y a la cuenca de antepaís cenozoica del Grupo Payogastilla, en conjunto con grandes bloques de basamento (Fig. 2). Son abundantes los trabajos sobre la evolución tectónica de los Andes en el NOA, como así también sobre esta región sur de la Cordillera Oriental, abordados principalmente por estudios tectono-estratigráficos y sedimentológicos (Grier y Dallmeyer 1990,

Grier *et al.* 1991, Carrera *et al.* 2006, Carrera y Muñoz 2008, 2013, DeCelles *et al.* 2011, Carrapa *et al.* 2012, del Papa *et al.* 2013 a,b, Galli *et al.* 2014), termocronológicos (Deeken *et al.* 2006, Carrapa *et al.* 2011) y estructurales de escala zonal a regional (Allmendinger *et al.* 1983, Jordan *et al.* 1983, Mon *et al.* 2012, Payrola Bosio *et al.* 2012b, entre otros). Con el presente trabajo se pretende avanzar en el conocimiento sobre la evolución estructural de

los anticlinales en zonas de inversión tectónica y en particular para esta región del noroeste argentino, siendo el sector estudiado un área óptima debido a la calidad de sus afloramientos y accesos. A su vez, la escala de trabajo considerada y la estratigrafía involucrada en el anticlinal Tin Tin tienen implicancias desde el punto de vista productivo, ya que parte de las unidades estratigráficas deformadas están relacionadas a reservorios de hidrocarburos en otros sectores de la cuenca cretácica del NOA (Disalvo *et al.* 2002, Starck 2011, Grosso *et al.* 2013).

### UBICACIÓN Y MARCO GEOLÓGICO DEL ÁREA DE ESTUDIO

El anticlinal Tin Tin se ubica en el sector medio del Valle Calchaquí (suroeste de la provincia de Salta; Fig. 2). Las coordenadas geográficas de su cota máxima son 25° 08' 18" de latitud Sur y 66° 01' 42" de longitud Oeste. Esta zona se caracteriza estructuralmente por pliegues asociados a fallas inversas con rumbos meridionales, al igual que la dirección elongada del valle (Fig. 1). La zona presenta extensos afloramientos de basamento ya que forma parte del borde suroeste de la dorsal Salto-Jujeña, un alto estructural que actuó durante la etapa de *sinrift* de la cuenca extensional cretácica (Mon y Salfity 1995). Este basamento de edad neoproterozoica-cámbrica temprana es litológicamente metasedimentario y en la zona se lo conoce como Formación Puncoviscana (Mon y Salfity 1995). Sobre esta unidad basal se apoyan sucesiones sedimentarias con edades que abarcan desde el Cretácico hasta el Cenozoico superior y corresponden a diferentes episodios tectónicos que estructuraron la región. Estos episodios se enmarcan dentro de dos grandes procesos: un régimen extensional que instauró la cuenca de *rift* del Grupo Salta (Cretácico Inferior-Eoceno inferior) en gran parte del noroeste argentino (Mon y Salfity 1995), y un posterior régimen contraccional que reactivó e invirtió la cuenca de *rift* e instaló la actual cuenca de antepaís, cuyos depósitos están bien

preservados en los Valles Calchaquíes y son conocidos zonalmente como Grupo Payogastilla (Díaz y Malizzia 1983), de edad Eoceno medio a Plio-Pleistoceno (Hongn *et al.* 2007, del Papa *et al.* 2013b). En la figura 3 se muestra la columna estratigráfica zonal con las subdivisiones principales. Una de las unidades del Grupo Salta, la Formación Yacoraite del Subgrupo Balbuena (Moreno 1970, Salfity y Marquillas 1981, Marquillas *et al.* 2005), reviste particular interés debido a que está relacionada con la generación y acumulación de hidrocarburos en sectores más orientales de la cuenca cretácica (Disalvo *et al.* 2002, Starck 2011, Grosso *et al.* 2013) y por registrar estratigráficamente la transición entre el Cretácico y el Paleógeno (Marquillas *et al.* 2003, 2007).

### METODOLOGÍA

La caracterización geológica de campo constó del mapeo de las unidades estratigráficas (a nivel de subgrupo en general y a nivel de formación cuando fue requerido) que conforman el anticlinal Tin Tin, con énfasis en el Grupo Salta. Se midió la orientación de las capas en todos los sectores del cerro, abarcando diferentes posiciones estructurales (flanco, charnela, cresta). Los pliegues internos se caracterizaron a partir de la medición de sus flancos. Sus dimensiones (longitudes de onda) se determinaron con imágenes satelitales de alta resolución (50 cm de pixel), una vez que las estructuras se mapearon y delimitaron. Los datos se analizaron con técnicas estereográficas para determinar sus características geométricas (con redes equiangulares para datos planares y equiareales para datos lineares; Marshak y Mitra 1988). Otro elemento utilizado para su descripción fue su ángulo interflanco (Fleuty 1964). Las fallas se caracterizaron, a todas las escalas de trabajo, a través de la medición de planos dentro de la zona de falla, como así también de las lineaciones contenidas (minerales, estrías). Las trazas de las fallas se mapearon conectando diferentes puntos de afloramiento (ubicados con GPS), con ayuda de la interpretación

		CUAT		NEÓGENO		PALEÓGENO		CRETÁCICO		NEO-CÁMB	
		PLEIST		PLIO		OLIG		SUP			
				MIOC		EOC		INF			
								SALTA			
								Pi			
								Ba			
								SB			
<b>Valle Calchaquí</b>											
Depósitos aluviales											
PAYOGASTILLA											
Antepaís											
San Felipe											
Palo Pintado											
Angastaco											
Quebrada de los Colorados											
Postrift											
Lumbrera Maíz Gordo Mealla											
Yacoraite Lecho											
Sinrift											
Los Blanquitos											
Las Curtiembres											
La Yesera											
Pre-rift											
Puncoviscana											

Figura 3: Columna estratigráfica correspondiente a la zona de estudio.

de imágenes satelitales. Para complementar la descripción, se realizaron observaciones sobre la geometría general de las fallas, su relación angular con respecto a la estratificación y las características de las rocas dentro de la zona de falla. Para la orientación de los elementos geológicos y geométricos de las estructuras, la notación utilizada en este trabajo es dirección de inclinación e inclinación para planos, y orientación y buzamiento para líneas.

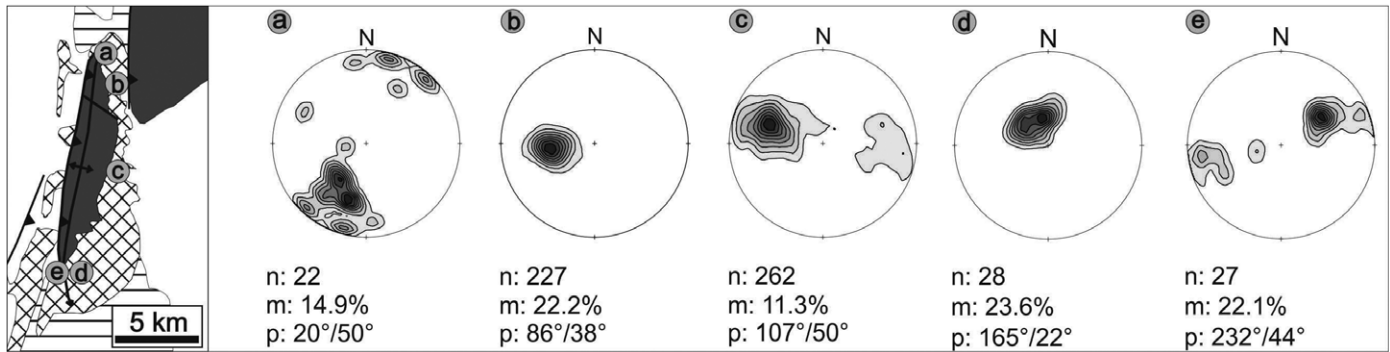
### ANTICLINAL TIN TIN

El cerro Tin Tin es un bloque de basamento levantado por la falla inversa Tin Tin (Vergani y Starck 1989, Carrera y Mu-



Figura 4: Mapa geológico del cerro Tin Tin.

ñoiz 2013, del Papa *et al.* 2013b) que lo flanquea por su vertiente occidental (Fig. 4). Este bloque levantado, junto con la cobertura sedimentaria plegada suprayacente, conforma el anticlinal Tin Tin, un pliegue de orientación NNE-SSO con doble inmersión, que es atravesado en su sector norte por una falla de cinemática indeterminada, con rumbo NO-SE y que desplaza horizontalmente la cobertura sedimentaria (Fig. 4). Las dimensiones del cerro (considerando el basamento y el Grupo Salta), son 13 km en dirección NNE-SSO y un ancho en dirección E-O que varía entre 3,5 km en su parte sur y casi 2 km en su extremo norte (Fig. 4). Este tipo de plegamiento puede ser clasificado como un pliegue forzado (*forced fold, drape fold*), siguiendo la definición de Stearns (1978) que los define como aquellos pliegues en los cuales su orientación y forma final son dominadas por la forma del miembro forzante inferior. En este caso, el ascenso del bloque de basamento (núcleo del anticlinal) hace que la cobertura sedimentaria se adapte (se pliegue) y adquiera su forma y geometría general. Algunas características geométricas del anticlinal Tin Tin pueden ser determinadas en su extremo de inmersión sur, donde la estructura cuenta con ambos flancos y una charnela de geometría redondeada. Su flanco frontal inclina desde  $35^\circ$  hacia el O-SO hasta capas volcadas (Fig. 5e). El flanco dorsal (en este sector sur) presenta inclinaciones variables, promediando los  $22^\circ$  hacia el E, SE y S (Fig. 5d). Los cálculos realizados sobre los datos anteriores arrojan una orientación de  $162^\circ/19^\circ$  para el eje de pliegue y de  $73^\circ/75^\circ$  para su superficie axial. En el resto del flanco dorsal la orientación de las capas varía según el sector. El sector norte del cerro presenta un promedio de  $86^\circ/38^\circ$  (Fig. 5b), con excepción del extremo de inmersión norte donde las capas se curvan debido a la terminación del basamento, presentando un promedio de  $20^\circ/50^\circ$  (Fig. 5a). En el sector central del cerro, la orientación promedio de las capas es  $107^\circ/50^\circ$  (Fig. 5c). Aquí las capas presentan mayor inclinación que en el sector norte, incluso con dominios de ca-



**Figura 5:** Representación polar de la estratificación en el anticlinal Tin Tin, visualizada en diagramas de contornos (red estereográfica equiareal, hemisferio inferior). Las capas, medidas en distintos sectores (a-e), corresponden a todas las unidades aflorantes del Grupo Salta en el anticlinal (ver su ubicación y sus referencias geológicas en la figura 2). n: cantidad de datos; m: densidad máxima; p: plano de estratificación promedio.

pas volcados producto de estructuras importantes dentro del flanco.

### Estratigrafía en el anticlinal Tin Tin

El núcleo de basamento del anticlinal (Formación Puncoviscana) está constituido por una secuencia alternante de pelitas, grauvacas y areniscas, deformadas y afectadas por metamorfismo de grado bajo (Mon y Salfity 1995). Sobre éste se apoyan y pliegan las secuencias sedimentarias correspondientes a los Grupos Salta y Payogastilla, aunque solo el Grupo Salta representa la expresión topográfica del cerro. Esta cobertura sedimentaria se preserva casi en su totalidad en la vertiente oriental y en el extremo sur del cerro (Fig. 4). En la vertiente occidental del cerro, la falla Tin Tin hace que el basamento sobrecorra a las sedimentitas del *postrift*, que afloran aisladamente en el bloque piso de la falla (Fig. 4). Debido al enfoque particular sobre la estructuración en el Grupo Salta, a continuación se describirá brevemente la estratigrafía de este grupo en el cerro Tin Tin (descripción basada en Monaldi 2001), haciendo hincapié sobre algunas formaciones. El Grupo Salta (Fig. 3) se subdivide en los Subgrupos Pírgua (*sinrift*), Balbuena (*postrift* temprano) y Santa Bárbara (*postrift* tardío).

**Subgrupo Pírgua:** El Subgrupo Pírgua aflora principalmente en el sureste del anticlinal (flanco dorsal oriental), y está representado por areniscas conglomerádicas y conglomerados, con clastos de metamor-

fitas, cuarcitas y cuarzo. En su tercio inferior se intercalan areniscas finas y pelitas. El conjunto tiene tonalidades parduscas y su espesor total en el cerro Tin Tin es de 145 metros (Monaldi 2001). Durante los trabajos de campo se observó una disminución del espesor hacia el norte del cerro, como así también la ausencia de las intercalaciones de sedimentos finos en su tercio inferior.

**Subgrupo Balbuena:** Está formado por areniscas blanquecinas en su parte inferior (Formación Lecho), areniscas y calizas amarillentas (Formación Yacoraite). La Formación Lecho se conforma principalmente de areniscas calcáreas blanquecinas y verdosas, cuarzosas, granodecreciente de base a techo. Intercalan niveles conglomerádicos con clastos de granitos y pegmatitas (Moreno 1970). En el suroeste del cerro Tin Tin su espesor es de 35 metros (Monaldi 2001). La Formación Yacoraite consiste en calizas arenosas, calizas oolíticas y areniscas calcáreas y cuarzosas, de tonos gris blanquecino y gris amarillento, en estratos finos a medianos. En distintos niveles de la secuencia se intercalan calizas estromatolíticas y niveles de conglomerados finos de cuarzo. Hacia el techo la unidad contiene restos de gasterópodos. En el cerro Tin Tin, esta formación está conformada casi totalmente por areniscas calcáreas y cuarzosas, compactas, bien estratificadas, de color amarillento, con finas intercalaciones de bancos estromatolíticos y calizas oolíticas, y por delgados bancos de luti-

tas grises y verdosas (Monaldi 2001). En alternancia se encuentran además calizas bien estratificadas con ondulas (Moreno 1970). Según datos publicados, el espesor de la Formación Yacoraite en el cerro Tin Tin es de 57 metros en su sector sureste (Monaldi, 2001). Los autores midieron un espesor aflorante de 83 metros en el sector medio del cerro y de 90 metros en su sector norte.

Es importante destacar que las descripciones del Subgrupo Pírgua y de la Formación Lecho corresponden al sector suroeste del cerro Tin Tin (Monaldi 2001). Según nuestras observaciones, las descripciones de estas unidades no pueden extrapolarse hacia el norte del cerro. En el sector central y norte del cerro ya no se encuentran las granulometrías finas basales (mencionadas previamente para el Subgrupo Pírgua) y la secuencia sedimentaria por debajo de la Formación Yacoraite está conformada por rocas silicoclásticas de granulometría media a gruesa, con coloraciones pardas (sin variaciones importantes en su color). Dado que no es posible asignar esta secuencia sedimentaria a una unidad específica (Subgrupo Pírgua o Formación Lecho), la secuencia sedimentaria por debajo de la Formación Yacoraite, para los sectores central y norte del cerro, se denominará informalmente como "Grupo Salta indiferenciado".

**Subgrupo Santa Bárbara:** La sucesión sedimentaria es dominada por areniscas finas y limolitas rojizas y lutitas verdosas, con presencia de areniscas conglomerádicas

y conglomerados (Marquillas *et al.* 2005, Monaldi 2001). En el suroeste del cerro Tin Tin su espesor total es de 554 metros (Monaldi 2001).

### **Estructuración del núcleo de basamento del anticlinal Tin Tin**

El núcleo de basamento presenta estructuras de deformación de diversas escalas, incluyendo diaclasas y venas de centímetros de longitud, pliegues de decenas de metros de magnitud y fallas de kilómetros de longitud (Hernández y Franzese 2015). Las fallas son inversas y sintéticas con la falla Tin Tin, con 2 a 3 km de longitud de traza. Dos fallas importantes fueron mapeadas sobre la vertiente oriental del cerro (Fig. 4). Los pliegues internos del basamento, de flancos rectos y charnelas agudas, muestran en cambio una orientación transversal (aproximadamente E-O) al anticlinal (Willner 1990, Hernández y Franzese 2015). Sus longitudes de onda pueden alcanzar los 150 metros (Hernández y Franzese 2015). Con respecto a las diaclasas y venas, estas fracturas no muestran una orientación preferencial y afectan homogéneamente al basamento (Hernández y Franzese 2015).

### **Estructuración de la cobertura sedimentaria (Grupo Salta) del anticlinal Tin Tin: Sector norte del cerro**

*Pliegues asociados a fallas inversas:* Los pliegues más importantes de la zona afectan a la sucesión sedimentaria superior de la Formación Yacoraite e inferior del Subgrupo Santa Bárbara (Fig. 6a). El conjunto de pliegues mapeados sobre el Subgrupo Santa Bárbara se constituye de anticlinales y sinclinales suaves a abiertos (según su ángulo interflanco; Fleuty 1964). Sus ejes son N-S a NNO-SSE y buzanan hasta 20° hacia el sur y norte (Fig. 6b). Sus superficies axiales son mayormente verticales y sus trazas axiales sinuosas, con longitudes que superan el kilómetro en algunos pliegues. Las longitudes de onda de estos pliegues varían entre 60 y 100 metros. Dentro de la Formación Yacoraite, los pliegues presentan ejes agrupados en tres direcciones (Fig. 6c). Los pliegues con ejes subhorizonta-

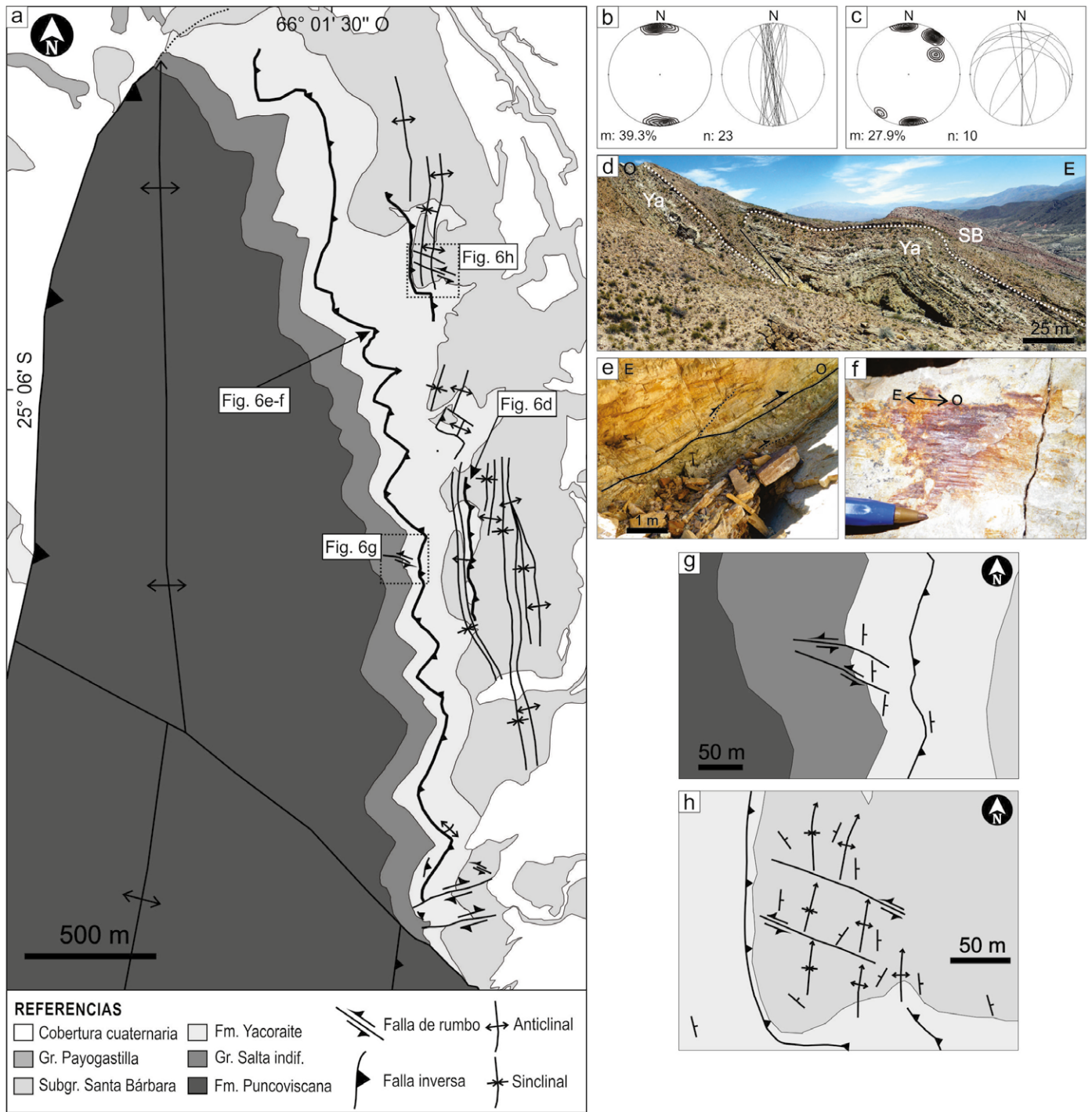
les y orientación N-S son similares a los del Subgrupo Santa Bárbara, tanto en dimensiones como en geometría. Los otros dos grupos de pliegues muestran ejes con buzamiento en dirección NNE a NE (promedio 34°/12°) y NE a ENE (promedio 54°/34°), respectivamente. Estos pliegues son cerrados a abiertos, con longitudes de onda que oscilan entre 30 y 70 metros, superficies axiales con múltiples direcciones de inclinación, y trazas que no superan los 50 metros de longitud. Estos pliegues que afectan a la sucesión sedimentaria superior de la Formación Yacoraite e inferior del Subgrupo Santa Bárbara se relacionan a una falla inversa de bajo ángulo que despega en la sección superior de la Formación Yacoraite (Fig. 6a y 6d). Esta estructura aflora en diferentes sitios a lo largo del cerro, con rumbo aproximado N-S y con traza de falla de dos kilómetros de longitud (se considera como una única estructura aflorando en forma discontinua). La relación angular entre las capas a un lado y otro de la falla (piso y techo) sugiere una geometría del tipo plano basal-rampa colgante para el anticlinal colgante (Suppe 1983).

En la sección media de la Formación Yacoraite (Fig. 6a) se observaron evidencias de fallamiento consistentes en una zona de brechamiento con reducción de tamaño de grano y de aspecto sedoso, de aproximadamente 1 metro de espesor (Fig. 6e), y estrías con dirección N92° (Fig. 6f). En su mejor sitio de exposición, donde se observaron las evidencias mencionadas, la estructura es paralela a la estratificación local de orientación 86°/45° (geometría de tipo plano basal-plano colgante, Suppe 1983), lo que dificulta su reconocimiento en imágenes satelitales o a distancia. Las fallas y pliegues de escala decimétrica observadas dentro de esta zona de brechamiento indican un fallamiento inverso con transporte hacia el oeste. En otros afloramientos, ubicados en la sección media (con respecto al espesor aflorante) de la Formación Yacoraite (Fig. 6a) se observaron evidencias de contracción a diferentes escalas, desde capas de material fino replegadas (pelitas y arena fina) con yeso involucrado, hasta una

zona de falla (orientación 84°/64) de escala de decenas de metros, con pliegues de arrastre asociados. Las descripciones y mediciones sugieren la existencia de una falla inversa de bajo ángulo con respecto a la estratificación, ubicada en la sección media del perfil de la Formación Yacoraite, que recorre gran parte del flanco dorsal en el sector norte del cerro por aproximadamente 3 kilómetros (según se puede inferir a partir del análisis de imágenes satelitales) y que engrosa por repetición el espesor de la unidad. Esta falla inversa de bajo ángulo con respecto a la estratificación presenta pocos pliegues asociados, de menor escala que los correspondientes a la falla inversa ubicada en la sección superior de la Formación Yacoraite (Fig. 6d). *Fallas con desplazamiento de rumbo:* Mayormente, estas fallas tienen un rumbo ESE-ONO (N120° aproximadamente) y desplazan sinistralmente otras estructuras como pliegues (Fig. 6h) y/o contactos entre unidades (Fig. 6g). Las fallas de rumbo sinestrales (ESE-ONO) son subverticales o con alta inclinación al SO, con desplazamientos de 10 a 20 metros. Las trazas tienen una longitud aproximada de 100 metros, distanciadas entre 30 y 45 metros (medido perpendicularmente a las fallas). Se observó que el bloque sur de algunas fallas desciende levemente, indicando una pequeña componente normal en su movimiento. Un estriado de rake 26° E medido sobre un plano de orientación 210/83° confirma la observación anterior. Solo dos fallas con desplazamiento de rumbo dextral fueron identificadas, distanciadas por unos 120 metros entre sí y con rumbos E-O a ENE-OSO (sector SE del mapa de la figura 6). Estas presentan una inclinación media a alta hacia el SSE, con planos de orientación 162°/45 y 181°/59° (con estriado de rake 29° O). Los desplazamientos oscilan entre 20 y 40 metros y la longitud de sus trazas de falla alcanza los 280 metros.

### **Estructuración de la cobertura sedimentaria (Grupo Salta) del anticlinal Tin Tin: Sector central del cerro**

*Pliegues:* La figura 7a muestra el mapa de la sección central del cerro Tin Tin, donde

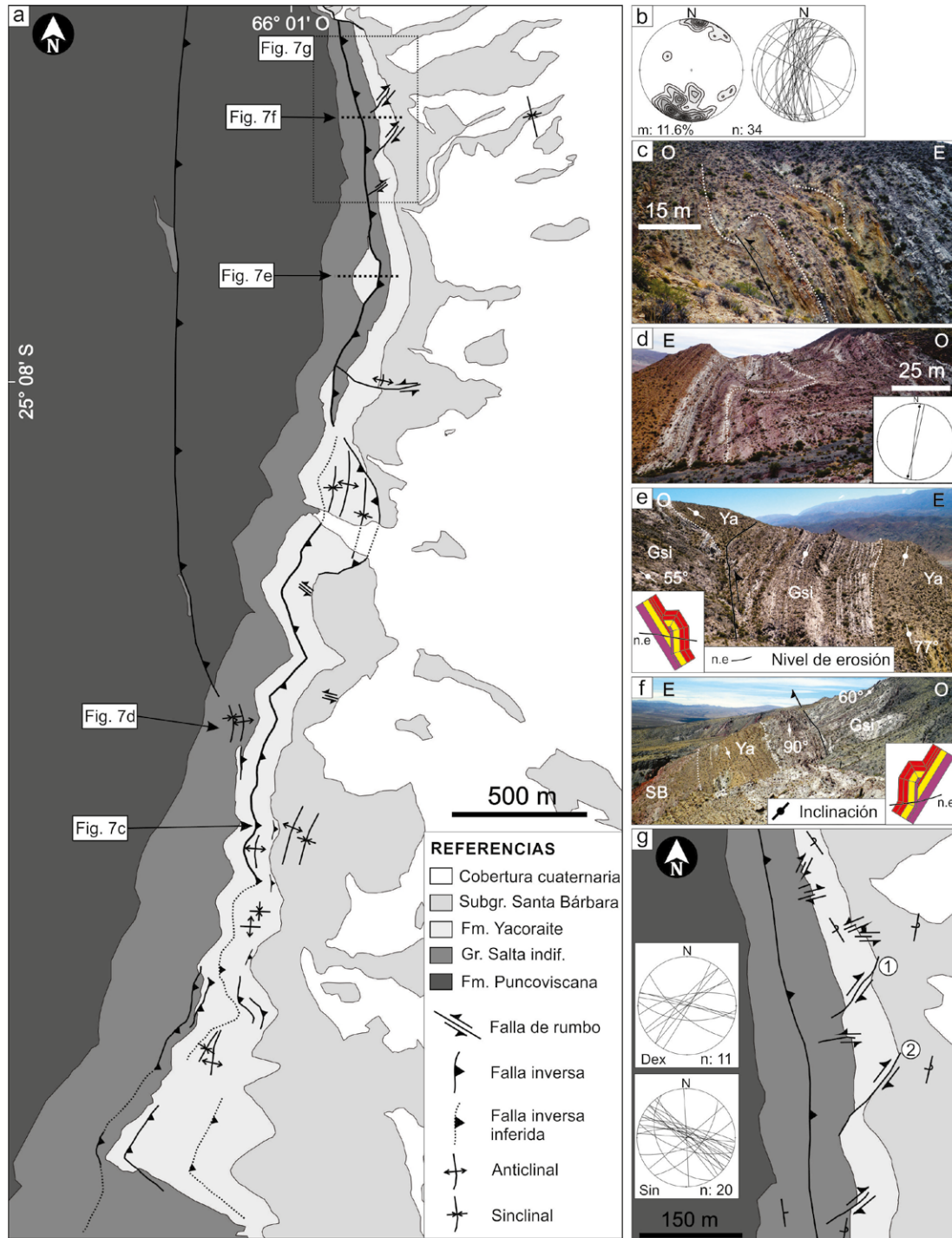


**Figura 6:** a) Mapa geológico de detalle del sector norte del cerro Tin Tin; b) Pliegues en Subgrupo Santa Bárbara: diagrama de contornos de ejes de pliegues (red equiareal, hemisferio inferior; m: valor de porcentaje máximo) y planos axiales en diagrama ciclográfico (red equiangular, hemisferio inferior). n: cantidad de datos; c) Pliegues en Formación Yacoraite: diagrama de contornos de ejes de pliegues (red equiareal, hemisferio inferior; m: valor de porcentaje máximo) y planos axiales en diagrama ciclográfico (red equiangular, hemisferio inferior). n: cantidad de datos; d) Plegamiento asociado a falla inversa ubicada en los niveles superiores de la Formación Yacoraite. Ya: Fm. Yacoraite; SB: Subgrupo Santa Bárbara; e) Falla afectando a la Formación Yacoraite, subparalela a la estratificación local, ubicada en la sección media de su espesor aflorante; f) Estrias de falla con dirección E-O; g) Sub-mapa mostrando fallas de rumbo sinestrales desplazando la base de la Formación Yacoraite; h) Sub-mapa mostrando fallas de rumbo sinestrales desplazando pliegues que afectan la sección inferior del Subgrupo Santa Bárbara.

se pueden ver pliegues que afectan a distintas unidades del Grupo Salta. La mayoría de los pliegues se encuentra en la sección

media a superior de la Formación Yacoraite. Los ejes calculados buzan principalmente hacia el SO, con concentra-

ciones importantes en las orientaciones 205°/13° y 189°/7° (Fig. 7b). Son pliegues suaves, cerrados, hasta apretados, con



**Figura 7:** a) Mapa geológico de detalle del sector central del cerro Tin Tin; b) Pliegues en Formación Yacoraite: diagrama de contornos de ejes de pliegues (red equiareal, hemisferio inferior; m: valor de porcentaje máximo) y planos axiales en diagrama ciclográfico (red equiangular, hemisferio inferior, n: cantidad de datos); c) Fallamiento inverso en la sección media de la Formación Yacoraite; d) Pliegues en el Grupo Salta indiferenciado. El diagrama estereográfico correspondiente (red equiangular, hemisferio inferior, n: cantidad de datos) muestra sus superficies axiales y ejes de los pliegues. Cabe destacar que los datos fueron tomados en capas de un sector puntual de los pliegues. Las observaciones indican que las trazas axiales cambian de NNE a NO; e) Falla inversa con nivel de despegue en el Grupo Salta indiferenciado. Este último está en contacto por falla con las capas basales de la Formación Yacoraite. El dibujo esquemático muestra la relación geométrica (interpretada) entre dominios de inclinación a partir de la exposición dada por el nivel de erosión; f) Falla inversa con nivel de despegue en el Grupo Salta indiferenciado. La falla limita distintos dominios de inclinación dentro de la misma unidad. El dibujo esquemático muestra la relación geométrica (interpretada) entre dominios de inclinación a partir de la exposición dada por el nivel de erosión (Notar que en las figuras esquemáticas, los colores violeta, amarillo y rojo corresponden al Grupo Salta indiferenciado, Formación Yacoraite y Subgrupo Santa Bárbara, respectivamente); g) Sub-mapa donde se destacan las fallas de rumbo. Como se menciona en el texto, el grupo de fallas de rumbo ESE-ONO presenta dimensiones que, dada la escala del mapa, no son adecuadamente mapeables. La figura también muestra los diagramas estereográficos de las fallas de rumbo sinestrales (sin) y dextrales (dex) (red equiangular, hemisferio inferior, n: cantidad de datos).



planos axiales de rumbo N-S a NE-SO y alta inclinación en la mayoría de los casos (Fig. 7b). Sus longitudes de onda oscilan entre 15 y 40 metros, excepcionalmente 70 metros, con trazas axiales que no superan los 20 metros de longitud. Presentan vergencia occidental, aunque se encuentran algunos con vergencia opuesta. Los escasos pliegues del Subgrupo Santa Bárbara son suaves a abiertos, con longitudes de onda de 50 a 70 metros y trazas axiales que alcanzan los 350 metros de longitud. Los pliegues de estos dos subgrupos están asociados a fallas inversas con niveles de despegue con posiciones similares a los del sector norte del cerro (sección superior de la Formación Yacoraite; Fig. 6d). Afectando a la secuencia sedimentaria correspondiente al Grupo Salta indiferenciado se mapeó un conjunto de pliegues con ejes subhorizontales de rumbo NNE-SSO, superficies axiales verticales, trazas axiales que alcanzan los 90 metros de longitud y longitud de onda de aproximadamente 120 metros (Fig. 7d). Estos pliegues son los únicos registrados en esta unidad informal para este sector del cerro, y se asocian espacialmente a una falla inversa dentro del basamento, y se infiere (dada la complejidad estructural) que son producidos para acomodar y transmitir la deformación desde la falla hacia la cobertura sedimentaria (Fig. 7a y 7d).

*Fallas inversas:* La estructura más conspicua del sector central del anticlinal Tin Tin es una falla inversa que recorre gran parte del flanco dorsal y repite estructuralmente parte de la secuencia sedimentaria denominada como Grupo Salta indiferenciado y la base de la Formación Yacoraite (Figs. 7a, 7e y 7f). La dirección de transporte de la falla es hacia el oeste y su nivel de despegue se ubica en el Grupo Salta indiferenciado, cerca de la base de la Formación Yacoraite. Su traza es sinuosa y sigue el rumbo NNE de la estratificación por aproximadamente 1,5 kilómetros. Esta estructura se caracteriza por poner en contacto por falla al Grupo Salta indiferenciado con la Formación Yacoraite con diferentes ángulos de inclinación (Fig. 7e). En la figura 7f se observa la misma falla con diferente nivel de erosión,

donde se exponen distintos dominios de inclinación del Grupo Salta indiferenciado. La orientación promedio de las capas en el bloque basal de la falla es  $102^{\circ}/62^{\circ}$ , mientras que en el bloque colgante las capas se encuentran con muy alta inclinación hacia el este, subverticales o volcadas (orientación promedio:  $100^{\circ}/80^{\circ}$ ).

Dentro de la Formación Yacoraite, aproximadamente en la sección media de su espesor aflorante, se observaron zonas de fallas con pliegues asociados (Fig. 7a y 7c) en diferentes sitios del sector central del anticlinal. De forma similar a lo que ocurre en el sector norte del anticlinal (falla inversa ubicada en una posición estratigráfica similar, Fig. 6), las observaciones sugieren la presencia de una falla inversa que repite estructuralmente la parte superior de la secuencia sedimentaria de la Formación Yacoraite. Esta falla tiene una traza de unos 2 km de longitud si se unen los distintos sitios donde se realizaron las observaciones (Fig. 7a).

Otras fallas inversas de bajo ángulo con respecto a la estratificación y vergencia occidental repiten la base de la Formación Yacoraite (Fig. 7a, sector sur del mapa). Sus trazas muestran un rumbo NNE-SSO, con 200 a 300 metros de longitud.

*Fallas con desplazamiento de rumbo:* Son estructuras de alta inclinación y se las encuentra tanto con cinemática dextral como sinistral. Estas estructuras son especialmente reconocibles en imágenes satelitales y en el campo porque desplazan el techo o la base de la Formación Yacoraite, un contacto con alto contraste de coloraciones con las unidades supra e infrayacentes. En el mapa de detalle de la figura 7g se pueden observar mayormente fallas de rumbo dextrales ya que en general presentan mayores dimensiones que las fallas de rumbo sinestrales.

Las fallas sinestrales tienen un rumbo ESE-ONO a NO-SE, con una orientación media de los planos de  $29^{\circ}/83^{\circ}$  (Fig. 7g). Sus trazas alcanzan los 50 metros de longitud y muestran desplazamientos de 1 a 10 metros.

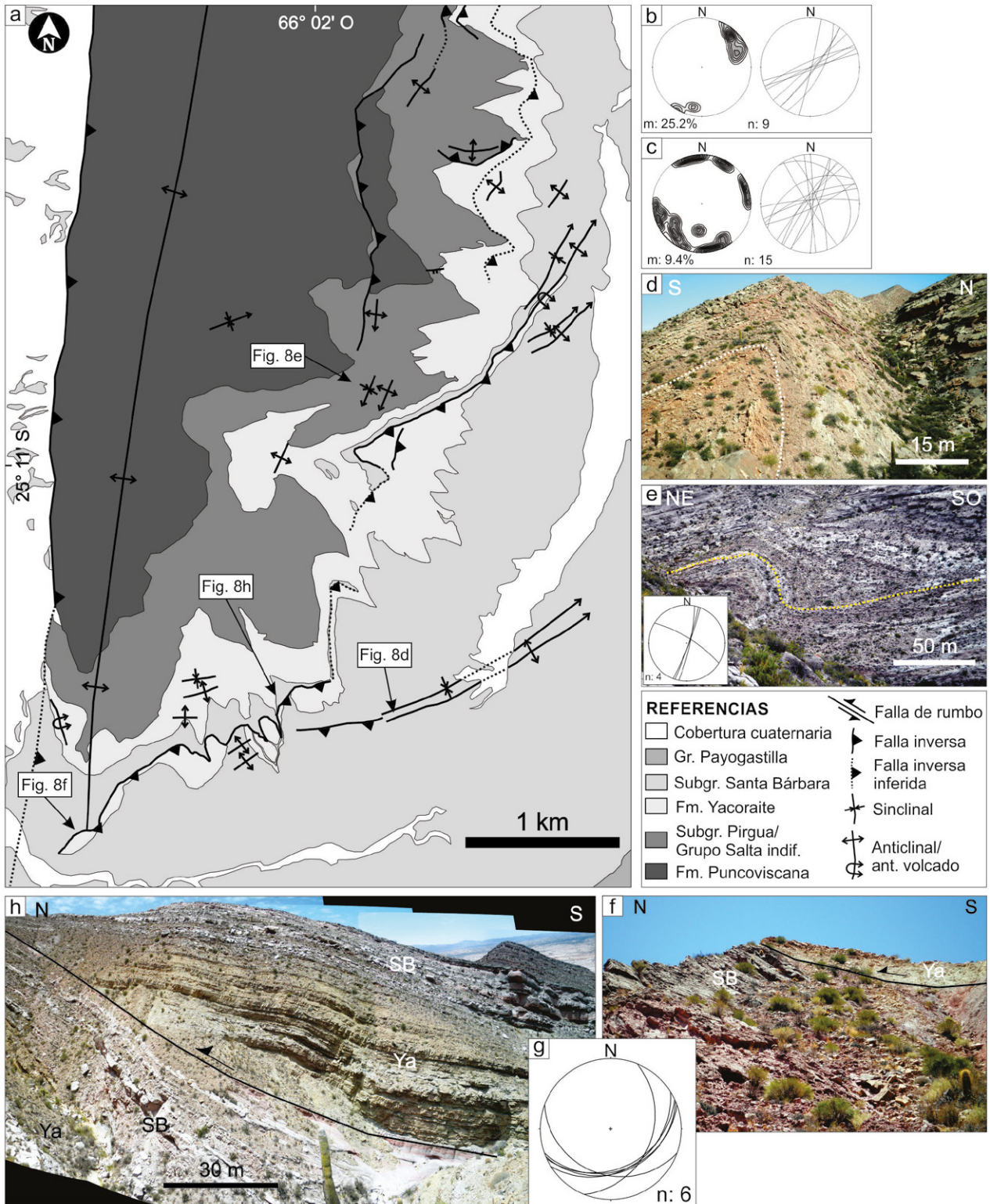
Las fallas dextrales presentan dos grupos de orientaciones: NE-SO y ESE-ONO (Fig. 7g). La fallas de rumbo ESE-ONO,

al igual que las fallas sinestrales de similar orientación, comparten las mismas características que éstas en cuanto a sus dimensiones (longitud de sus trazas) y magnitud de desplazamiento. Las fallas con rumbo NE-SO poseen, en general, mayores dimensiones que las sinestrales (Fig. 7g). Tres de éstas afectan a toda la Formación Yacoraite produciendo una discontinuidad significativa en su afloramiento (por ejemplo, las marcadas como 1 y 2 en el mapa de la Figura 7g). En imágenes satelitales, sus trazas pueden seguirse por longitudes de hasta 130 metros, aunque mediciones de capas desplazadas sobre el terreno arrojaron valores entre 10 y 65 metros. Todos los planos medidos son de alta inclinación a subverticales, con una orientación promedio de  $328^{\circ}/80^{\circ}$ .

#### **Estructura de la cobertura sedimentaria (Grupo Salta) del anticlinal Tin Tin: Sector sur del cerro (inmersión sur del anticlinal)**

El sector de inmersión sur comprende el tercio inferior del cerro Tin Tin, donde el basamento se hunde por debajo de la cobertura sedimentaria (Fig. 8). En este sector se pueden observar las estructuras correspondientes a tres posiciones estructurales: flanco frontal (occidental), zona de charnela y flanco dorsal (oriental).

*Pliegues:* Se registraron pliegues en distintos sitios del sector sur, afectando a distintas unidades del Grupo Salta (Fig. 8a). En el Subgrupo Santa Bárbara los pliegues se ubican principalmente sobre el flanco dorsal y afectan la sección basal del subgrupo. Son anticlinales y sinclinales suaves a abiertos con rumbos NE-SO a ENE-OSO (Fig. 8b), generalmente asimétricos y vergentes hacia el NO y NNO (Fig. 8d). Más específicamente, la orientación de los pliegues cambia de  $N37^{\circ}$  en el norte a  $N70^{\circ}$  hacia el sur. Sus planos axiales son subverticales, con trazas de 550 y 850 metros de longitud, hasta un máximo mapeado de 1500 metros. Los ejes presentan una inmersión general al NE, con un aumento en el buzamiento en la parte sur del sector. La longitud de onda de estas estructuras varía entre 220 y 280 m en los pliegues suaves, disminu-



**Figura 8:** a) Mapa geológico de detalle del sector sur del cerro Tin Tin (inmersión sur del anticlinal); b) Diagrama de contornos (ejes de pliegues; red equiareal, hemisferio inferior) y ciclográfico (planos axiales; red equiangular, hemisferio inferior) de pliegues en el Subgrupo Santa Bárbara; c) Diagrama de contornos (ejes de pliegues; red equiareal, hemisferio inferior) y ciclográfico (planos axiales; red equiangular, hemisferio inferior) de pliegues en la Formación Yacoraite; d) Anticlinal en el Subgrupo Santa Bárbara con vergencia hacia el NO; e) Pliegues NNE-SSO en el Subgrupo Pirgua. El diagrama estereográfico (red equiangular, hemisferio inferior) muestra los planos axiales de los cuatro pliegues medidos en el sector sur; f) Diferencia angular entre el bloque techo y piso de la falla. Orientación de Ya (Fm. Yacoraite),  $201^{\circ}/24^{\circ}$ ; Orientación de SB (Santa Bárbara),  $250^{\circ}/42^{\circ}$ . Notar los  $50^{\circ}$  de diferencia en Azimut entre ambos bloques, como así también su diferencia en inclinación; g) Diagrama estereográfico (red equiangular, hemisferio inferior) con datos del plano de falla; h) Fotografía panorámica de la falla inversa. La escala gráfica sirve para el sector central de la imagen.

yendo a menos de 100 m en los pliegues abiertos. La mayoría de los pliegues medidos representan las terminaciones laterales de fallas inversas de bajo ángulo.

La Formación Yacoraite presenta mayor cantidad de pliegues en relación a otras unidades y éstos se ubican tanto en el flanco dorsal como en el frontal. La orientación de los ejes de pliegues es NE-SO en el flanco dorsal, E-O a ENE-OSO en la zona de charnela y NO-SE en el flanco frontal (Fig. 8c). El buzamiento de los ejes es bajo a medio y las superficies axiales presentan alta inclinación (Fig. 8c). Son pliegues suaves a abiertos, con longitud de onda que varía entre 20 y 40 m, excepcionalmente 70 metros. Con menor frecuencia, en ambos flancos del anticlinal se midieron pliegues con sus ejes orientados en forma perpendicular a la estratificación local. Estos son de pequeña escala, de 10 a 15 metros de longitud de onda, suaves a abiertos, con planos axiales de alta inclinación.

En el Subgrupo Pírgua (o Grupo Salta indiferenciado, hacia el norte del mapa; Fig. 8a) se midieron escasos pliegues, ubicados en el flanco dorsal del anticlinal. Tres de ellos presentan orientaciones bien definidas NNE-SSO con sus ejes buzando hacia el SSO (promedio de  $188^{\circ}/14^{\circ}$ ). Un cuarto pliegue se orienta en forma perpendicular a los anteriores (Fig. 8a, sector superior del mapa). Los pliegues son suaves a abiertos, con alta inclinación de sus planos axiales. La longitud de sus trazas alcanza la centena de metros, con dimensiones de entre 90 y 130 m en longitud de onda. El pliegue transversal, de dirección ESE-ONO, es asimétrico y con vergencia hacia el sur, y se asocia a una falla inversa de alto ángulo que coloca al Subgrupo Pírgua en contacto con el Subgrupo Balbuena. Se pudo estimar una longitud de onda de alrededor de 100 metros.

**Fallas inversas:** Una estructura de gran escala se destaca en el flanco dorsal del sector sur del cerro Tin Tin (Fig. 8a). Esta es una falla inversa de bajo ángulo con transporte hacia el NO que sobrecorre y repite la sección estratigráfica superior de la Formación Yacoraite por sobre la sección inferior del Subgrupo Santa Bárbara. A

grandes rasgos, la traza (discontinua) de la falla presenta una extensión aproximada de 5 km en dirección  $N40^{\circ}$  (NE-SO), con inclinación al SE. En sus afloramientos más septentrionales, la orientación del plano de falla es  $106^{\circ}/31^{\circ}$ . Hacia el norte la falla continúa lateralmente con pliegues volcados y apretados de vergencia occidental (Fig. 8a). En su tramo sur, la traza de la falla cambia a un rumbo ENE-OSO (aproximadamente  $N60^{\circ}$ ). Aquí, el plano de falla medido en seis sitios diferentes arroja una orientación resultante  $154^{\circ}/29^{\circ}$  (Fig. 8g). El bloque colgante de esta falla contiene muchos de los pliegues descriptos que indican, junto con la orientación de la falla, contracción hacia el NO. Esta falla muestra diferentes relaciones angulares entre las capas del bloque basal y colgante a lo largo de su traza. En varios sitios, la falla muestra un paralelismo con la estratificación, y haciendo una analogía con el modelo de pliegues por flexión de falla de Suppe (1983), se infiere una relación del tipo plano basal-plano colgante. En las cercanías de la charnela del anticlinal Tin Tin, donde la estratificación presenta alta inclinación, la falla corta (secuencia abajo) la estratigrafía separando dos dominios (bloque piso y techo) con diferente orientación (Fig. 8f). En la figura 8h se puede ver como las capas del bloque colgante caen contra la falla con bajo ángulo. De acuerdo con el modelo de Suppe (1983), se puede inferir un arreglo del tipo plano basal-rampa colgante, que a su vez estaría relacionado con ángulo de corte menor a  $30^{\circ}$  (Suppe 1983).

## DISCUSIÓN

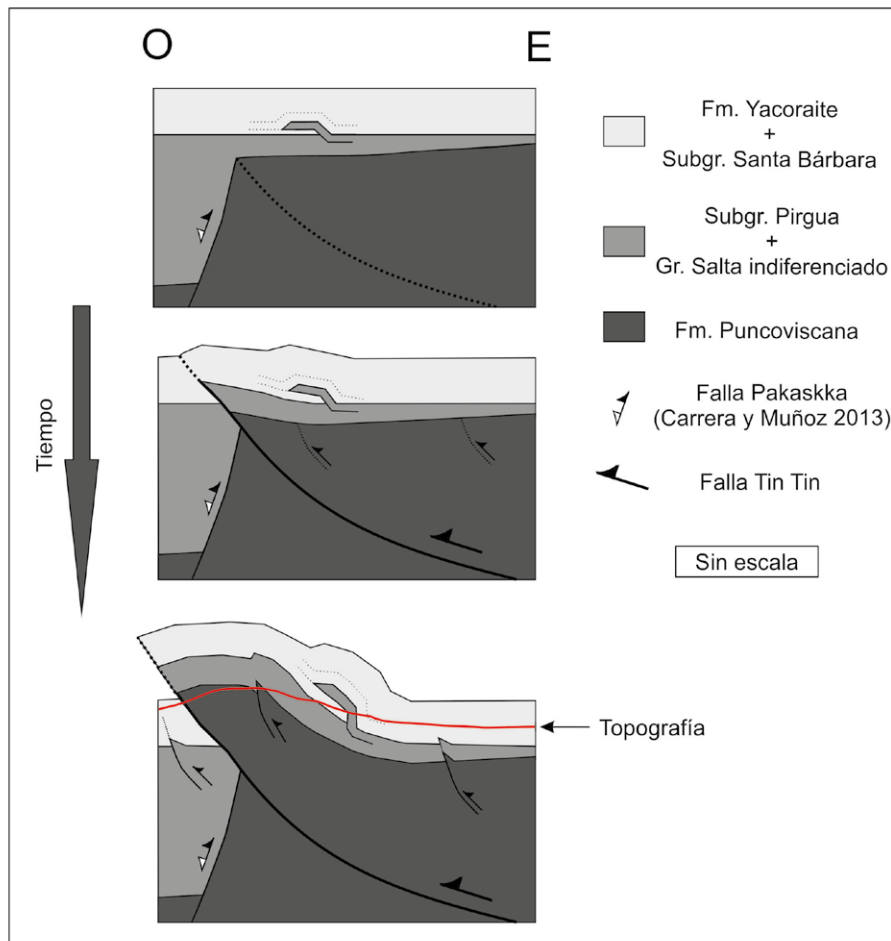
Los anticlinales presentan estructuras internas de diferentes escalas que forman parte de su evolución y en general describen los procesos de deformación que dieron lugar a la estructura principal (Gutiérrez-Alonso y Gross 1999). Los flancos del anticlinal Tin Tin (principalmente el dorsal) presentan numerosos pliegues y fallas de diversas escalas, con geometría y orientación consistentes con el rumbo NNE-SSO del anticlinal principal. En sitios específicos del anticlinal ocurren, en menor

medida, estructuras oblicuas y transversales al rumbo del anticlinal principal.

Las estructuras presentes en los flancos muestran correspondencia con la orientación y cinemática del anticlinal Tin Tin (vergenza y transporte occidental), lo que sugiere una formación contemporánea dentro del mismo campo de esfuerzos (Tavernelli 1997, Guiton *et al.* 2003, Ismat 2008), correspondiente a la contracción andina cenozoica. Los pliegues y fallas con orientación aproximada NNE-SSO se asocian genéticamente y se distribuyen a lo largo de todo el anticlinal. Las fallas dominantes son inversas y de bajo ángulo de corte, por lo que generan amplios anticlinales colgantes (Suppe 1983).

Los pliegues descriptos para la base del subgrupo Santa Bárbara en el sector norte del cerro difieren levemente con la geometría general (Fig. 6a). Para estos pliegues, que bien se pueden asociar a fallas inversas, se infiere que presentan una componente de despegue que produce que las trazas axiales muestren escaso espaciamiento. Este nivel o zona de despegue puede estar asociado a un aumento relativo de material fino hacia el techo de la Formación Yacoraite, que podría considerarse como un equivalente litológico a la Formación Tunal para este sector de la cuenca del Grupo Salta. La ubicación de estos pliegues coincide con el solapamiento entre la Falla Tin Tin y la falla inversa ubicada inmediatamente al este (falla Los Cardones en Carrera y Muñoz 2013; Figs. 2 y 4). Esta última sobrecorre el basamento por sobre las unidades superiores del *posrift* (Subgrupo Santa Bárbara) e inferiores del antepaís (Grupo Payogastilla). Esta configuración implica que las unidades sedimentarias ya estaban plegadas (es decir, formando el anticlinal Tin Tin) al momento del fallamiento en el basamento al este del anticlinal Tin Tin.

El anticlinal Tin Tin presenta la mayor deformación en su sector central, en coincidencia con la zona donde las fallas presentan su máximo desplazamiento (Walsh y Watterson 1988, Kim y Sanderson 2005). Este sector central contiene fallas inversas de bajo ángulo dentro del basamento y en la cobertura sedimentaria (Figs. 4 y 7a).



**Figura 9:** Diagrama esquemático de la evolución del anticlinal Tin Tin (Latitud: 25° 07' 45" S). El esquema muestra tres estadios a través del tiempo (relativo), con deformación de piel fina al principio y una posterior actividad de las fallas de basamento. La Falla Pakaskka está basada en las figuras 7a y 7b de Carrera y Muñoz (2013).

La cobertura presenta dominios de inclinación verticales a volcados (bloque techo) en contacto por falla (inversa, vertical) con dominios de alta inclinación hacia el este (bloque piso; Fig. 7a). Dada la diferencia angular entre el bloque piso y techo de la falla (aproximadamente de 30°; Figs. 7e y 7f), y las observaciones sobre las fallas inversas con anticlinales amplios en otros sectores del cerro (Figs. 6d y 6e), se infiere que los actuales dominios de inclinación verticales a volcados rotaron en sentido horario desde su posición original (es decir, cuando las capas del bloque piso presentaban muy bajo ángulo de inclinación). De esta forma, el fallamiento inverso en la cobertura sedimentaria se habría formado con un ángulo de corte normal para las fallas inversas (30° aproximadamente). La causa de la rotación se atribuye al levantamiento

del basamento por el accionar de fallas inversas (falla Tin Tin y fallas inversas dentro del basamento; Fig. 4 y 7a). Estas observaciones permiten sugerir que antes del levantamiento principal de los bloques de basamento de la zona (que originan los anticlinales principales), ya había una estructuración en la cobertura sedimentaria con fallas inversas y pliegues asociados. Esto permitiría describir una evolución en la estructuración del anticlinal Tin Tin (Fig. 9), con una etapa inicial donde predomina la estructuración en la cobertura sedimentaria, con baja o nula actividad de la falla Tin Tin o de fallas menores dentro del basamento, y una etapa posterior donde se produce el levantamiento principal de los bloques de basamento. Aunque se conoce que la actividad de la falla Tin Tin comenzó al principio de la contracción andina (Hongn *et*

*al.* 2011), es posible que la estructuración de la cobertura sedimentaria haya jugado un rol importante en el acortamiento inicial de la zona, previamente a los periodos de máxima actividad de las fallas de basamento. La relación entre la deformación de piel fina y piel gruesa ha sido estudiada en muchas fajas plegadas del país, a diferentes escalas, con resultados que indican que la deformación de piel fina precede a la deformación de piel gruesa (por ejemplo, Cristallini y Ramos 2000).

Las fallas y pliegues en el sector sur del cerro (flanco dorsal y frontal en la inmersión sur del anticlinal) desvían su rumbo conforme el basamento se hunde por debajo de la cobertura sedimentaria, mostrando una convergencia en el transporte estructural hacia el núcleo. Esta desviación puede ser interpretada como una perturbación local de la trayectoria de esfuerzos generada por la terminación de la falla, donde el basamento acuñado puede actuar como una rampa oblicua para este sector, generando una geometría no cilíndrica en la cobertura sedimentaria (Aprotia 1995, Aprotia y Wilkerson 2002, Fischer y Wilkerson 2000, Fischer y Christiansen 2004, Shackleton y Cooke 2007). También sería posible pensar que las estructuras se formaron con un rumbo general NNE-SSO (como el del anticlinal Tin Tin) y que fueron posteriormente plegadas. Esta hipótesis se descarta debido a la observación de que la dirección de las óndulas presentes en algunas capas de Formación Yacoraite no muestran el mismo ángulo de desviación (por plegamiento) que las estructuras oblicuas. Por lo tanto, la observación apunta a que las estructuras desviadas no fueron plegadas posteriormente sino que se originaron con rumbo oblicuo al del anticlinal Tin Tin.

La falla inversa más evidente del sector sur (Figs. 8a, f y h) muestra un vector de contracción hacia el NO y dadas las diferencias angulares expuestas entre el bloque basal y colgante, se infiere que la falla se activó cuando las capas ya se encontraban plegadas, es decir, que el proceso de fallamiento ocurrió en un estadio avanzado en la evolución del anticlinal Tin

Tin. Dado que no se observan estructuras similares (u otras evidencias de contracción hacia el NO) a lo largo del anticlinal, se infiere un carácter local para la formación de esta falla. A modo general se puede decir que los extremos de la falla y anticlinal Tin Tin pueden generar patrones de deformación en la cobertura sedimentaria que no coinciden con los observados en los sectores centrales del anticlinal. Estos patrones son generalmente atribuidos a procesos locales que ocurren en las terminaciones de estructuras como pliegues y fallas (Fischer y Christiansen 2004).

Las estructuras oblicuas y subperpendiculares a la orientación del anticlinal Tin Tin fuera del los sectores de inmersión, ocurren con menor frecuencia y se interpretan como reactivaciones de estructuras previamente formadas, como ocurre comúnmente durante la evolución de sistemas estructurales, ante la imposibilidad de generar de nuevas estructuras para la acomodación del acortamiento o de la extensión (Sibson 1985, 1995, Letouzey *et al.* 1990, Holdsworth *et al.* 1997, Wilkins *et al.* 2001, Fischer y Christensen 2004, Sanz *et al.* 2008, entre otros). Las fallas con desplazamiento de rumbo dextral y sinistral que se encuentran principalmente en el sector norte y central del flanco dorsal, se interpretan como la reactivación de fracturas de mesoescala (diaclasas por ejemplo) preferencialmente orientadas, dada la frecuente presencia de estas mesoestructuras en el anticlinal Tin Tin y en otros anticlinales con estratigrafía similar ubicados en diferentes sectores de la cuenca (Grosso *et al.* 2013, Hernández y Franzese 2012, Likerman *et al.* 2011, entre otros). Estas estructuras se habrían formado posteriormente a las fallas inversas y pliegues, ya que fallan y desplazan pliegues y secuencias sedimentarias con diferentes dominios de inclinación (Guiton *et al.* 2003). Estas fallas con desplazamiento de rumbo se habrían activado cuando los mecanismos de fallamiento inverso y plegamiento dejaron de actuar (Guiton *et al.* 2003). Otras estructuras oblicuas, como el pliegue transversal de gran magnitud en el Subgrupo Pirgua (o Grupo Salta

indiferenciado, en el sector sur del cerro), se inferen como asociadas a reactivaciones de superficies de alto ángulo en el basamento.

Las características estructurales dentro del anticlinal Tin Tin indican que su deformación está relacionada al fenómeno de *buckling* (Price y Cosgrove 1990) dentro del marco de la contracción andina cenozoica, donde los responsables del fallamiento y plegamiento observado fueron esfuerzos subhorizontales con dirección general E-O a ESE-ONO (Daxberger y Riller 2015). Esto se contrapone al fenómeno de *bending* que caracterizaría a un pliegue forzado del estilo del anticlinal Tin Tin. Sin embargo, como ocurre en la mayoría de los pliegues naturales, ambos procesos se combinan y dan como resultado la configuración final de los anticlinales (Ismat 2008). En el caso del anticlinal Tin Tin, la cobertura sedimentaria se deforma internamente por *buckling* y su curvatura o plegamiento general (a la escala del anticlinal principal) se genera por *bending*. De esto se desprende, como se mencionó anteriormente, una cierta cronología relativa entre la deformación de la cobertura sedimentaria y la deformación posterior relacionada al basamento y su ascenso. En el marco de la inversión tectónica de la zona, comúnmente registrada por medio de discordancias angulares entre las diferentes unidades del antepaís asociadas los pliegues principales (Hongn *et al.* 2007, 2008, 2011, Payrola Bosio *et al.* 2012a), las estructuras menores también forman parte del proceso contraccional que conduce a la activación y reactivación (inversión) de fallas y la creación de relieve tectónico, aunque no registran evidencias estraigráficas importantes debido a su escala. Por último, y en términos de producción hidrocarburífera, el aumento en el espesor sedimentario observado en las unidades afectadas, principalmente en la Formación Yacoraite tiene implicancias en los estudios de interés petrolero. Extrapolando esta observación a los sectores productivos de la cuenca del Grupo Salta, resulta de particular interés el aumento de espesor de la Formación Yaco-

raite y la repetición de niveles dentro de la formación para el cálculo volumétrico de hidrocarburos en los yacimientos vinculados a esta unidad. Por otro lado, la presencia de anisotropías subparalelas a la estratificación (fallas inversas subhorizontales) constituye un parámetro a tener en cuenta, ya que las zonas de cataclasis y reducción de tamaño de grano podrían actuar como sello e impedir la migración vertical de fluidos (Yielding *et al.* 1997, Crawford 1998).

## CONCLUSIONES

El estudio de detalle del anticlinal Tin Tin permitió definir el estilo de deformación en sus distintas posiciones estructurales, principalmente el flanco dorsal y el extremo de inmersión sur del anticlinal. Las dos posiciones estructurales muestran similitudes en cuanto al tipo de estructuras de deformación (fallas inversas de bajo ángulo y pliegues asociados), escalas (dentro de un rango variable) y transporte tectónico. Las diferencias radican en las orientaciones de las estructuras: mientras que en un sector central del anticlinal las estructuras siguen el rumbo general del pliegue, en el extremo de inmersión sur el rumbo de las estructuras se desvía del rumbo general del anticlinal. Esto es atribuido a los procesos que ocurren en las terminaciones de pliegues (y fallas) y que generan patrones anómalos de deformación. Por otro lado, se propone una secuencia de eventos de deformación dentro del marco contraccional andino, donde se produce una estructuración inicial en la que predomina la deformación de la cobertura sedimentaria (piel fina: *buckling*) con una activación posterior de fallas en el basamento de la zona (*bending*). Por último, la escala de este tipo de estudios estructurales resultan importantes ya que son similares a las escalas de los reservorios de hidrocarburos, siendo la deformación frágil un factor importante en la migración y acumulación de fluidos.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a las auto-

ridades y guardaparques del Parque Nacional Los Cardones por su asistencia durante los trabajos de campo y a Pluspetrol S.A por su apoyo y colaboración en el desarrollo de la investigación. Se agradece a los revisores Fernando Hongn y Daniel Yagupsky, que con sus comentarios y sugerencias mejoraron la calidad de este manuscrito.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Allmendinger, R.W., Ramos, V.A., Jordan, T.E., Palma, M. y Isacks, B.L. 1983. Paleogeography and Andean structural geometry, northwest Argentina. *Tectonics* 2: 1-16.
- Apotria, T.G. 1995. Thrust sheet rotation and out-of-plane strains associated with oblique ramps: An example from the Wyoming salient U.S.A. *Journal of Structural Geology* 17: 647-662.
- Apotria, T. y Wilkerson, M.S. 2002. Seismic expression and kinematics of a fault-related fold termination: Rosario structure, Maracaibo Basin, Venezuela. *Journal of Structural Geology* 24: 671-687.
- Carrapa, B., Trimble, J.D. y Stockli, D.F. 2011. Patterns and timing of exhumation and deformation in the Eastern Cordillera of NW Argentina revealed by (U-Th)/He thermochronology. *Tectonics* 30: TC3003.
- Carrapa, B., Bywater-Reyes, S., DeCelles, P.G., Mortimer, E. y Gehrels, G.E. 2012. Late Eocene-Pliocene basin evolution in the Eastern Cordillera of northwestern Argentina (25°-26°S): regional implications for Andean orogenic wedge development. *Basin Research* 24: 249-268.
- Carrera, N., Muñoz, J.A., Sàbat, 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.
- Carrera, N. y Muñoz, J.A. 2008. Thrusting evolution in the southern Cordillera Oriental (northern Argentine Andes): Constraints from growth strata. *Tectonophysics* 459: 107-122.
- Carrera, N. y Muñoz, J.A. 2013. Thick-skinned tectonic style resulting from the inversion of previous structures in the southern Cordillera Oriental (NW Argentine Andes). En: Nemčok, M., Mora, A. y Cosgrove, J.W. (eds.), *Thick-Skin-Dominated Orogens: From Initial Inversion to Full Accretion*. Geological Society of London, Special Publications 377: 77-100, London.
- Coward, M.P., Daltaban, T.S. y Johnson, H. 1998. Structural geology in reservoir characterization. Geological Society of London, Special Publications 127, 272 p., London.
- Crawford, B.R. 1998. Experimental fault sealing: shear band permeability dependency on cataclastic fault gouge characteristics. En: Coward, M.P., Daltaban, T.S. y Johnson, H. (eds.), *Structural geology in reservoir characterization*. Geological Society of London, Special Publications 127: 27-47, London.
- Cristallini, E. y Ramos, V. 2000. Thick-skinned and thin-skinned thrusting in the La Ramada fold and thrust belt: crustal evolution of the High Andes of San Juan, Argentina (32°SL). *Tectonophysics* 317: 205-235.
- Daxberger, H. y Riller, U. 2015. Kinematics of Neogene to Recent upper-crustal deformation in the southern Central Andes (23°-28°S) inferred from fault-slip analysis: Evidence for gravitational spreading of the Puna Plateau. *Tectonophysics* 642: 16-28.
- DeCelles, P.G., Carrapa, B., Horton, B.K. y Gehrels, G.E. 2011. Cenozoic foreland basin system in the central Andes of northwestern Argentina: Implications for Andean geodynamics and modes of deformation. *Tectonics* 30: TC6013.
- Deeken, A., Sobel, E.R., Coutand, I., Haschke, M., Riller, U. y Strecker, M.R. 2006. Development of the southern Eastern Cordillera, NW Argentina, constrained by apatite fission track thermochronology: From early Cretaceous extension to middle Miocene shortening. *Tectonics* 25: TC6003.
- Del Papa, C.E., Hongn, F.D., Payrola Bosio, P.A., Powell, J., Deraco, V. y Herrera, C. 2013a. Relaciones estratigráficas de las formaciones Quebrada de los Colorados y Angastaco (Paleógeno-Neógeno), Valles Calchaquíes, Salta (Argentina): Significado en el análisis de la cuenca del Grupo Payogastilla. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis* 20: 51-64.
- Del Papa, C.E., Hongn, F.D., Powell, J., Payrola Bosio, P., Do Campo, M., Strecker, M.R., Petrinovic, I., Schmitt, A.K. y Pereyra, R. 2013b. Middle Eocene-Oligocene broken-foreland evolution in the Andean Calchaqui Valley, NW Argentina: insights from stratigraphic, structural and provenance studies. *Basin Research* 25: 574-593.
- Díaz, J. y Malizzia, D. 1983. Estudio Geológico y sedimentológico del Terciario Superior del Valle Calchaquí (departamento de San Carlos, Salta). *Boletín Sedimentológico* 2: 2-28.
- Disalvo, A., Rodríguez Schelotto, M.L., Gomez Omil, R., Hoffman, C., Benitez, J. y Hurtado, S. 2002. Los reservorios de la Formación Yacoraite. En: Schiuma, M., Hinterwimmer, G. y Vergani, G. (eds.), *Rocas reservorios de las cuencas productivas de la Argentina*. 5° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos: 717-738, Mar del Plata.
- Fischer, M.P. y Christensen, R.D. 2004. Insights into the growth of basement uplifts deduced from a study of fracture systems in the San Rafael monocline, east central Utah. *Tectonics* 23: TC1018.
- Fischer, M.P. y Wilkerson, M.S. 2000. Predicting the orientation of joints from fold shape: Results of pseudo-three-dimensional modeling and curvature analysis. *Geology* 28: 15-18.
- Fleuty, M.J. 1964. The description of folds. *Proceedings of the Geologists' Association* 75: 461-492.
- Galli, C.I., Coira, B., Alonso, R., Reynolds, J., Matteini, M. y Hauser, N. 2014. Tectonic controls on the evolution of the Andean Cenozoic foreland basin: Evidence from fluvial system variations in the Payogastilla Group, in the Calchaquí, Tonco and Amblayo Valleys, NW Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 52: 234-259.
- Grier, M.E. y Dallmeyer, R.D. 1990. Age of the Payogastilla Group: Implications for foreland basin development, NW Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 3: 269-278.
- 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.
- Grosso, S., López, R., Vergani, G. y O'leary, S. 2013. Reservorios carbonáticos naturalmente fracturados en el Yacimiento Caimancito (Formación Yacoraite), cuenca cretácica del noroeste Argentino. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 70: 53-69.
- Guiton, M.L.E., Sassi, W., Leroy, Y.M. y Gauthier, B.D.M. 2003. Mechanical constraints on the chronology of fracture activation in folded Devonian sandstone of the western Moroccan Anti-Atlas. *Journal of Structural Geology* 25: 1317-1330.

- Gutiérrez-Alonso, G. y Gross, M.R. 1999. Structures and mechanisms associated with development of a fold in the Cantabrian Zone thrust belt, NW Spain. *Journal of Structural Geology* 21: 653-670.
- Hernández M. y Franzese J.R. 2012. Análisis de la fracturación en el anticlinal del Tintín, Valles Valchaquíes, provincia de Salta. 15° Reunión de Tectónica, Actas: 68-69, San Juan.
- Hernández, M. y Franzese, J.R. 2015. Caracterización estructural del basamento (Fm. Puncovicana) en la zona de Valles Calchaquíes, provincia de Salta. 16° Reunión de Tectónica, Actas: 34-35, General Roca.
- Holdsworth, R.E., Butler, C.A. y Roberts, A.M. 1997. The recognition of reactivation during continental deformation. *Journal of the Geological Society* 154: 73-78.
- Hongn, F., del Papa, C., Powell, J., Petrino- vic, I.A. y Mon, R. 2007. Middle Eocene deformation and sedimentation in the Puna- Eastern Cordillera transition (23°-26°S): Control by preexisting heterogeneities on the pattern of initial Andean shortening. *Geology* 35: 271-274.
- Hongn, F.D., del Papa, C.E., Powell, J., Petrino- vic, I.A. y Mon, R. 2008. Discordancias en el cerro Tin Tin (Salta): claves para interpretar la evolución tectónica cenozoica en el noroeste argentino. 17° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 26-27, Jujuy.
- Hongn, F.D., del Papa, C.E., Powell, J., Payrola Bosio, P., Petrino- vic, I.A. y Mon, R. 2011. Fragmented Paleogene foreland basin in the Valles Calchaquíes, NW of Argentina. En: Salfity, J.A. y Marquillas, R.A. (eds.), *Cenozoic Geology of the Central Andes of Argentina*. SCS Publisher: 189-209, Salta.
- Ismat, Z. 2008. Folding kinematics expressed in fracture patterns: An example from the Anti- Atlas fold belt, Morocco. *Journal of Structural Geology* 30: 1396-1404.
- Jordan, T.E., Isacks, B.L., Allmendinger, R.W., Brewer, J.A., Ramos, V.A. y Ando, C.J. 1983. Andean tectonics related to geometry of sub- ducted Nazca plate. *Geological Society of America Bulletin* 94: 341-361.
- Kim, Y.S. y Sanderson, D.J. 2005. The relationship between displacement and length of faults: a review. *Earth-Science Reviews* 68: 317-334.
- Letouzey, J., Werner, P. y Marty, A. 1990. Fault reactivation and structural inversion. *Bac- karc and intraplate compressive deforma- tions*. Example of the eastern Sunda shelf (Indonesia). *Tectonophysics* 183: 341-362.
- Likerman, J., Cristallini, E. y Selles Martínez, J. 2011. Estudio de fracturas asociado al sistema de plegamiento en la localidad de tres cruces, provincia de Jujuy. 19° Congreso Geológico Argentino, Actas: 790-791, Neuquén.
- Marquillas, R., del Papa, C., Sabino, I. y Here- dia, J. 2003. Prospección del límite K/T en la cuenca del Noroeste, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 58: 271-274.
- Marquillas, R.A., del Papa, C. y Sabino, I.F. 2005. Sedimentary aspects and paleoenvironmen- tal evolution of a rift basin: Salta Group (Cre- taceous-Paleogene), northwestern Argenti- na. *International Journal of Earth Sciences* 94: 94-113.
- Marquillas, R., Sabino, I., Nobrega Sial, A., del Pa- pa, C., Ferreira, V. y Matthews, S. 2007. Carbon and oxygen isotopes of Maastrichtian-Danian shallow marine carbonates: Yacoraite For- mation, northwestern Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 23: 304-320.
- Marshak, S. y Mitra, G. 1988. *Basic Methods of Structural Geology*. Prentice-Hall. 253 p., New Jersey.
- McClay, K.R. 2004. Thrust tectonics and hydro- carbon systems; Introduction. En: McClay K.R. (ed.), *Thrust tectonics and hydrocarbon systems*. AAPG Memoir 82: ix-xx, Tulsa.
- Mon, R. y Salfity, J.A. 1995. Tectonic Evolution of the Andes of Northern Argentina. En: Tankard, A.J., Suarez Soruco, R. y Welsin, H.J. (eds), *Petroleum Basins of South America*. AAPG Memoir 62: 269-283, Tulsa.
- Mon, R., Gutiérrez, A.A., Sabat, F. y Iaffa, D. 2012. A Miocene Continental Basin associa- ted with the back thrusting of the Eastern Sierras Pampeanas in the Santa Maria Valley, Northwestern Argentina. *Italian Journal of Geosciences* 131: 123-135.
- Monaldi, C.R., 2001. Cretácico - Paleógeno. En: Hongn, F.D. y Seggiaro, R.E. (eds.) *Hoja Geo- lógica 2566-III, Cachi*. Provincias de Salta y Catamarca. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Ar- gentino, Boletín 248: 20-23, Buenos Aires.
- Moreno, J.A. 1970. Estratigrafía y Paleogeogra- fía del Cretácico Superior en la cuenca del Noroeste argentino, con especial mención de los Subgrupos Balbuena y Santa Bárbara. *Revista de la Asociación Geológica Argenti- na* 25: 9-44.
- Payrola Bosio, P.A., del Papa, C.E., Hongn, F.D. y Aramayo, A. 2012a. La discordancia ecena en el valle del Tonco-valles Calchaquíes: Con- figuración de las cuencas del Antepaís andi- no. 13° Reunión Argentina de Sedimentolo- gía, Actas: 161-162, Salta.
- Payrola Bosio, P.A., Hongn, F., Cristallini, E., Garcia, V. y del Papa, C. 2012b. Andean oblique folds in the Cordillera Oriental - Northwestern Argentina: insights from analogue models. *Journal of Structural Geology* 42: 194-211.
- Poblet, J. y Lisle, R.J. 2011. Kinematic evolution and structural styles of fold-and-thrust belts. En: Poblet, J. y Lisle, R.J. (eds.), *Kinematic Evolution and Structural Styles of Fold-and- Thrust Belts*. Geological Society of London, Special Publications 349: 1-24, London.
- Price, N.J. y Cosgrove, J.W. 1990. *Analysis of Geological Structures*. Cambridge Universi- ty Press, 520 p., Cambridge.
- Ramos, V.A. 1999. Las provincias geológicas del territorio argentino. En: Caminos, R. (ed.), *Geología Argentina*. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Anales 29: 41-96, Buenos Aires.
- Salfity, J.A. y Marquillas, R.A. 1981. Las unida- des estratigráficas cretácicas del norte de la Argentina. En: Volkheimer, W. y Musacchio, E. (eds.), *Cuencas Sedimentarias del Jurási- co y Cretácico de América del Sur* 1: 303-317, Buenos Aires.
- Sanz, P.F., Pollard, D.D., Allwardt, P.F. y Bor- ja, R.I. 2008. Mechanical models of fracture reactivation and slip on bedding surfaces during folding of the asymmetric anticline at Sheep Mountain, Wyoming. *Journal of Struc- tural Geology* 30: 1177-1191.
- Shackleton, J.R. y Cooke, M.L. 2007. Is plane strain a valid assumption in non-cylindrical fault-cored folds? *Journal of Structural Geo- logy* 29: 1229-1240.
- Sibson, R.H. 1985. A note on fault reactivation. *Journal of Structural Geology* 7: 751-754.
- Sibson, R.H. 1995. Selective fault reactivation during basin inversion: potential for fluid re- distribution through fault-valve action. En: Buchanan, J.G. y Buchanan, P.G. (eds.), *Basin inversion*. Geological Society of London, Special Publications 88: 3-19, London.
- Starck, D. 2011. Cuenca cretácica-paleógena del noroeste argentino. 8° Congreso de Explora- ción y Desarrollo de Hidrocarburos, Simp- sio Cuencas Argentinas: Visión Actual, Ac-

- tas: 407-453, Mar del Plata.
- Stearns, D.W. 1978. Faulting and forced folding in the Rocky Mountains foreland. En: Matthews III, V. (ed.), *Laramide Folding Associated with Basement Block Faulting in the Western United States*. Geological Society of America Memoirs 151: 1-38, Boulder.
- Suppe, J. 1983. Geometry and kinematics of fault-bend folding. *American Journal of Science* 283: 684-721.
- Tavani, S., Storti, F., Fernández, O., Muñoz, J.A. y Salvini, F. 2006. 3-D deformation pattern analysis and evolution of the Añiscló anticline, southern Pyrenees. *Journal of Structural Geology* 28: 695-712.
- Tavani, S., Storti, F., Salvini, F. y Toscano, C. 2008. Stratigraphic versus structural control on the deformation pattern associated with the evolution of the Mt. Catria anticline, Italy. *Journal of Structural Geology* 30: 664-681.
- Tavani, S., Storti, F., Soleimany, B., Fallah, M., Muñoz, J.A. y Gambini, R. 2011. Geometry, kinematics and fracture pattern of the Bangestan anticline, Zagros, SW Iran. *Geological Magazine* 148: 964-979.
- Tavarnelli, E. 1997. Structural evolution of a foreland fold-and-thrust belt: the Umbria-Marche Apennines, Italy. *Journal of Structural Geology* 19: 523-534.
- Vergani, G. y Starck, D. 1989. Aspectos estructurales del Valle de Lerma, al sur de la ciudad de Salta. *Boletín de Informaciones Petroleras, Tercera Epoca*, 20: 2-9.
- Walsh, J.J. y Watterson, J. 1988. Analysis of the relationship between displacements and dimensions of faults. *Journal of Structural Geology* 10: 237-247.
- Wilkins, S.J., Gross, M.R., Wacker, M., Eyal, Y. y Engelder, T. 2001. Faulted joints: kinematics, displacement-length scaling relations and criteria for their identification. *Journal of Structural Geology* 23: 315-327.
- Willner A.P. 1990. División tectometamórfica del Basamento del Noroeste Argentino. En: Aceñolaza, F., Miller, H. y Toselli, A.J. (eds.), *El Ciclo Pampeano en el Noroeste Argentino. Serie de Correlación Geológica* 4: 113-159, Tucumán.
- Yielding, G., Freeman, B. y Needham D.T. 1997. Quantitative Fault Seal Prediction. *AAPG Bulletin* 81: 897-917.

Recibido: 2 de noviembre de 2015  
Aceptado: 26 de mayo de 2016