

Estructuras tectónicas en un valle árido y su potencial hídrico subterráneo, San Juan

Aixa I. RODRÍGUEZ¹, Raúl E. OCAÑA², Graciela M. SUVIREZ², Flavia LEIVA¹ y Myriam P. MARTÍNEZ¹

¹Instituto Geofísico y Sismológico Volponi, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan-Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, San Juan. Email: aixarodriguez@conicet.gov.ar; mariaflavialeiva@gmail.com; patricia.signos@gmail.com

² Centro de Investigaciones de la Geósfera y la Biósfera, Departamentos de Geología y Biología, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan-Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, San Juan.

Email: emma_geol@hotmail.com; graciela_suvires@yahoo.com.ar

Editor: Fenando Hongn

RESUMEN

El presente estudio se realizó en el valle de Tulum, ubicado en la provincia de San Juan, centro-oeste argentino. La región es árida y alberga la mayor población de la provincia, por lo que la demanda de recursos hídricos resulta muy alta. El trabajo se efectuó en el sector proximal y medio del abanico aluvial del río San Juan, dentro de la cuenca de antepaís fragmentado, donde se desarrolla una gran cuenca de agua subterránea. Se reconocieron dos estructuras con posibilidades de reservas hídricas a partir del análisis de: a) mapa de anomalías gravimétricas residuales, b) los modelos de densidad generados, c) la interpretación de cortes geológicos y d) análisis geomorfológico. La primera estructura está ubicada en la subcuenca Tulum Superior, se vincula a una anomalía gravimétrica positiva y corresponde a un alto de basamento neógeno elevado por fallas. La segunda corresponde a una estructura sinclinal desarrollada en el frente de deformación de Precordillera Oriental. Ambas estructuras constituyen nuevas zonas de exploración con potencial hídrico para esta región árida.

Palabras clave: Recursos hídricos, región desértica, geofísica, modelado

ABSTRACT

Tectonic structures in an arid valley and its water resource potential, San Juan.

The present study was made on the Tulum valley, located in San Juan province, central-western Argentina. In this particularly arid region, both surficial and ground water are highly demanded resources due to their scarcity. The study was made on the proximal and middle sectors of the San Juan River alluvial fan, within the broken foreland basin, where a large groundwater basin is developed. Two tectonic structures were recognized. The structures were determined through the analysis of a) a map of residual gravimetric anomaly b) the density-model obtained, c) the interpretation of geological sections and d) geomorphologic analyses. The first structure is located in the sub-basin Tulum Upper and it was determined through the analysis of gravimetric residual anomalies. It is linked to a positive gravimetric anomaly and it corresponds to a high of neogene basement elevated by faults. The second structure corresponds to a synclinal developed on the front of deformation of the Eastern Precordillera. Both structures constitute new exploration zones with water potential for this arid region. Knowledge of the structural features in a broken foreland basin constitutes a useful tool for locating and delimiting new exploration areas for groundwater resources.

Keywords: Water resources, arid region, geophysics, modeling.

INTRODUCCIÓN

El valle de Tulum se encuentra en el centro-oeste de Argentina, en un ambiente climático de extrema aridez dentro de la provincia de San Juan. La población de su capital es de 629.530 habitantes (INDEC

2010). Este valle se encuentra ubicado en una cuenca de antepaís fragmentado, localizada entre la provincia geológica de Precordillera Oriental (Ortiz y Zambrano 1981) y Sierras Pampeanas Occidentales (Caminos 1979), en el frente de deformación activa de los Andes Centrales (Fig. 1).

La cuenca debe su configuración estructural principal a la geometría plana de la placa de Nazca en su subducción debajo de la placa Sudamericana (Jordan *et al.* 1983, Jordan y Allmendinger 1986, Smalley *et al.* 1993, Ramos *et al.* 2002, Ramos y Folguera 2009). Si bien se registra una tectónica

pre-neógena, los movimientos andinos neógenos y cuaternarios imprimieron en el valle de Tulum su actual configuración morfológica y estructural. Predomina un tectonismo compresivo, con plegamiento y fallamiento, del que existen indicaciones desde el Mioceno en la cordillera andina, Precordillera y las Sierras Pampeanas (Zambrano y Suvires 2008) y un posterior suavizado por procesos de erosión y acumulación (Rocca 1969).

En la cuenca de antepaís fragmentado los sedimentos son depositados en cuencas de flexión espacialmente limitadas y generados por la carga que ejercen los bloques de basamento elevados (Fig. 1c). Las fallas inversas levantan bloques que generan el aislamiento de las cuencas de cabecera de los sistemas fluviales aguas abajo, lo que lleva a la acumulación de sedimentos detrás de las cadenas montañosas en ascenso (Strecker *et al.* 2012).

La cuenca del Tulum está rellena por sedimentitas neógenas y sedimentos cuaternarios. Se desarrollan extensas geoformas tales como el abanico aluvial del río San Juan, que contiene una cuenca de agua subterránea con 3.700 km² de extensión (Rocca 1969, Suvires *et al.* 2000). El presente estudio se realizó en el sector proximal y medio del abanico mencionado. El territorio de San Juan está en su mayor parte incluida en la diagonal árida Sudamericana (Fig. 1b), franja de escasas lluvias que atraviesa sesgadamente el continente y es una zona de interferencia entre los regímenes de precipitación tropical y extratropical el Monzón de verano sudamericano (De Martonne 1935). Los recursos hídricos son altamente requeridos debido a su escasez, la demanda creciente de agua por el aumento poblacional y el desarrollo económico y social.

Existen fallas relativamente modernas que seccionan a la base impermeable pliocena de las cuencas y a sedimentos más jóvenes afectando total o parcialmente el movimiento del agua (Rocca 1969). Las más importantes son el sistema de fallas de Tulum y la falla de Ullum-Zonda (Rocca 1969, Zambrano y Suvires 2008).

En este contexto se realizaron análisis geomorfológicos y gravimétricos, con el fin de detectar nuevas estructuras tectónicas en subsuelo vinculadas a la posibilidad de almacenamiento hídrico. Los resultados

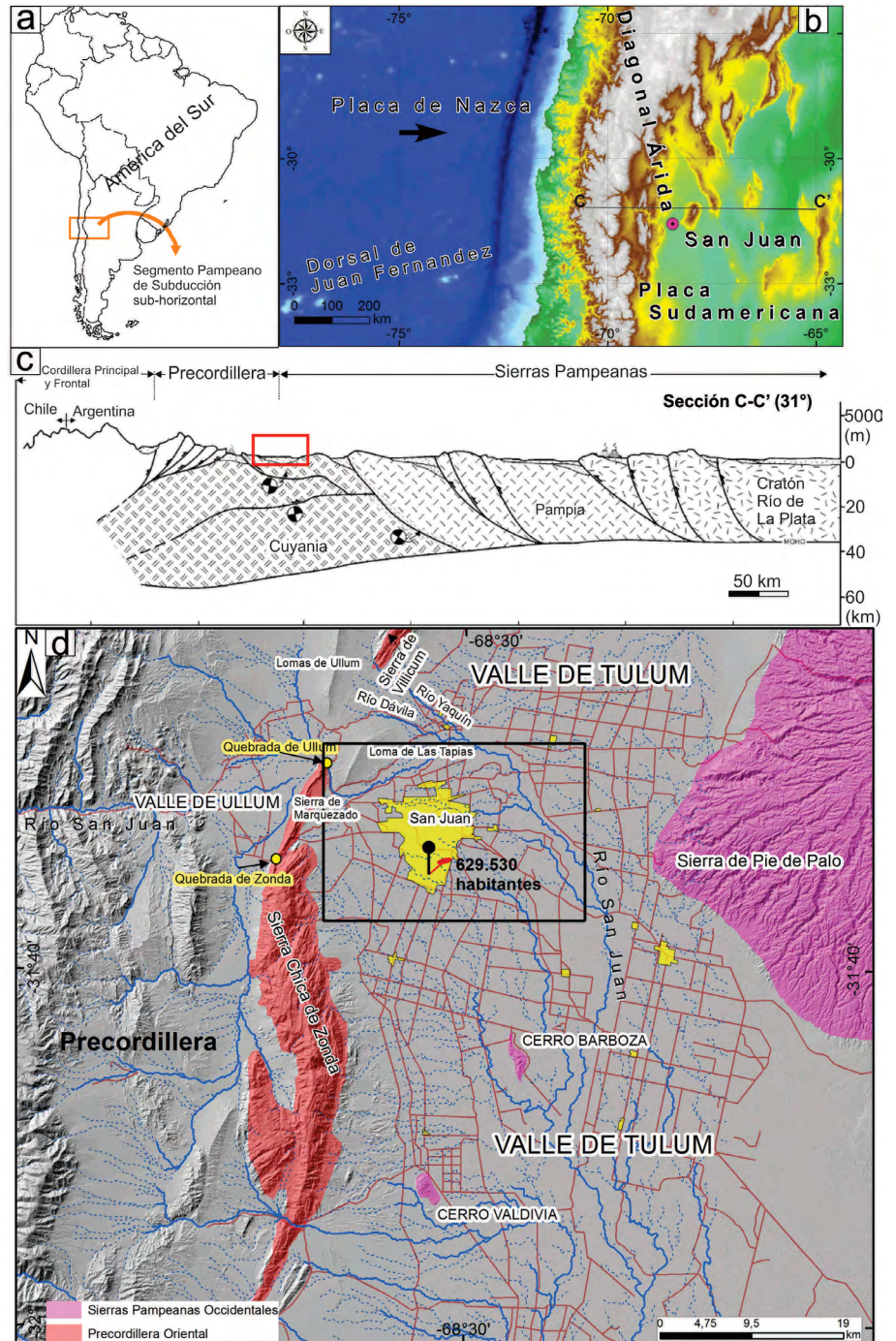


Figura 1. a) Recuadro naranja, ubicación del segmento de subducción subhorizontal en el que se encuentra el área estudiada; b) Modelo digital de elevación mostrando el relieve y el contexto geotectónico donde está inserto el valle de Tulum. El círculo rosado señala la ubicación de la ciudad de San Juan. Se localiza la diagonal árida ubicada entre los 25° y 35° de Latitud sur. La línea C-C' muestra la posición del perfil estructural regional expuesto en c; c) Perfil estructural regional de Ramos *et al.* (2002) a los 31° de Latitud sur. Se muestra la fragmentación característica del antepaís; d) Ubicación del área de estudio (recuadro negro) dentro del valle de Tulum. Al oeste se observa la sierra Chica de Zonda, sierra de Marquezado y sierra de Villicum correspondientes a la provincia geológica de Precordillera Oriental y hacia el este la sierra Pie de Palo, los cerros Valdivia y Barboza, pertenecientes a Sierras Pampeanas Occidentales. El sistema de drenaje está comprendido principalmente por el río San Juan y arroyos menores. En amarillo se indica la región donde se concentran las principales poblaciones y el número de habitantes, su importancia radica en la fuerte demanda de recursos hídricos.

obtenidos muestran la existencia de un bloque estructural elevado neógeno en la subcuenca de Tulum Superior y una estructura

sinclinal en la subcuenca de Loma de Las Tapias, las que podrían ser favorables para almacenamiento de agua subterránea.

MARCO GEOMORFOLÓGICO-HIDROGEOLÓGICO

El abanico aluvial del río San Juan (Fig. 2) se formó en el Pleistoceno tardío cuando el río San Juan drenaba por la quebrada de Zonda hacia el valle de Tulum (Suvires *et al.* 2000). En ese momento el río depositó su carga aluvional dando lugar al abanico y a depósitos correlativos. De aquí que las características de los suelos del abanico, reflejadas en la permeabilidad, texturas, drenaje y otros, se deben a las condiciones originales del proceso fluvial que intervino en su depositación, y que dista mucho de los procesos actuales, especialmente en cuanto a intensidad y dirección se refiere. Este extenso abanico aluvial presenta depósitos gruesos (gravas, arenas e intercalaciones lenticulares de arenas y limos). La superficie abarcada es superior

a 700 km² y se extiende en forma radial divergente, desde la quebrada de Zonda hacia el este, norte y sur, desde los 750 a los 600 m s.n.m. Su longitud es cercana a 19 km y su ancho máximo es de aproximadamente 30 km (Fig. 2), la pendiente no supera el 3,5% (Suvires *et al.* 2000). En las cercanías a la quebrada de Zonda está constituido por gravas gruesas y gravillas con intercalaciones de arena, mientras que en las partes distales los depósitos disminuyen de tamaño siendo gravas finas y arenas con intercalaciones de limos. Dentro del abanico se encuentran niveles de terrazas del antiguo cauce del río San Juan que se prolongan aguas abajo de la salida de la Quebrada de Zonda. Los dos niveles de terrazas se encuentran a 4 y 2 m por debajo de la superficie del abanico y están integradas por sedimentos finos, de textura franco-limo-arcillosa y se extienden con dirección O-ESE (Suvires 2004).

Estudios hidrogeológicos demuestran la extensión de una gran cuenca de agua subterránea en el valle de Tulum, que se divide en subcuencas separadas por barreras hidrogeológicas (Rocca 1969, Agie 1968, Joukl 1970, Lohn 1970, Lloret y Suvires 2006, entre otros). Tres de esas subcuencas denominadas Loma de Las Tapias, Tulum Superior y Villicum (Rocca 1969) se muestran en la figura 3a. La principal fuente de recarga para la cuenca hidrogeológica es el río San Juan. Las formaciones consideradas como no acuíferas que constituyen su base o basamento impermeable son de edad precámbrica, paleozoica y neógena. Mientras que el relleno aluvial portador de agua es cuaternario o plio-pleistoceno (Lohn 1970). En el abanico aluvial del río San Juan existe un acuífero único, que en gran parte se comporta como libre (Fig. 3b). En éste la profundidad de explotación varía entre los

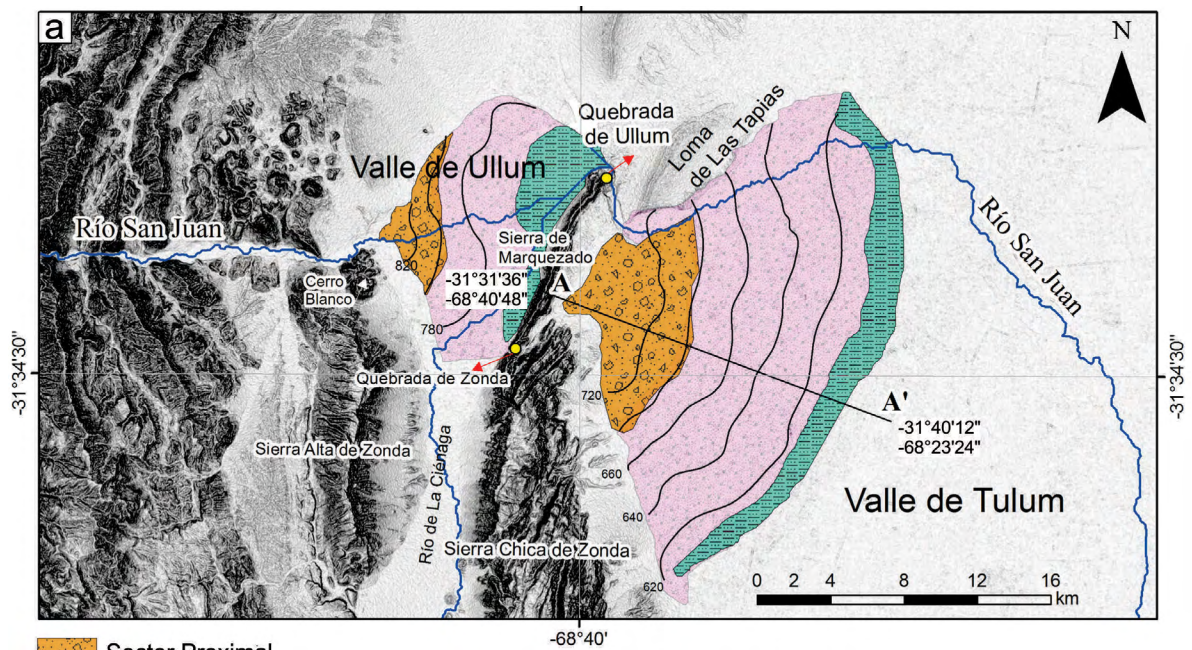
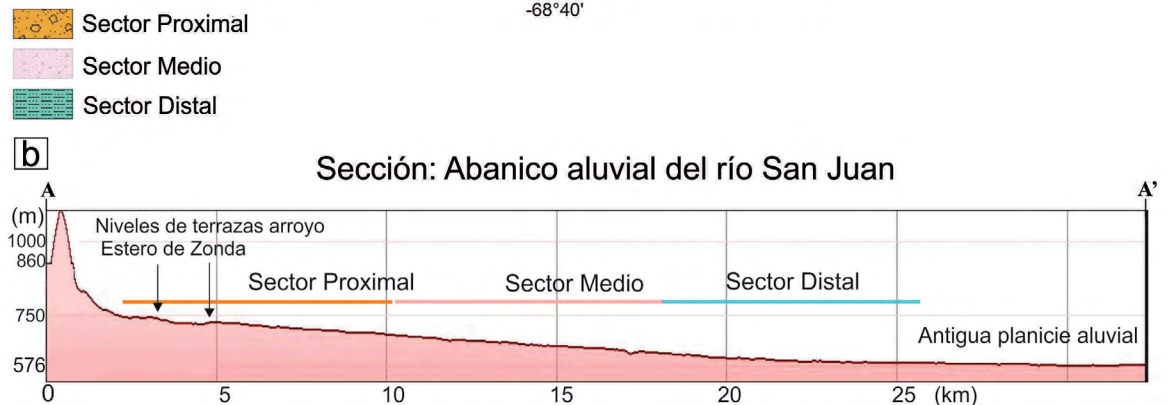


Figura 2. a) Geomorfología de los grandes abanicos aluviales del río San Juan en los valles de Zonda y de Tulum (modificado de Suvires 2014), la traza A-A' corresponde a la sección abanico aluvial del río San Juan; b) Perfil Longitudinal oeste-este (A-A') obtenido de Google Earth. Se muestran los tres sectores del abanico aluvial, elevación y la pendiente.



30 y 170 m con caudales comprendidos entre 100 y 200 m³/h (Lohn 1970). Hacia el este el acuífero se divide por la presencia de capas impermeables o semipermeables (acuicludos superior e inferior) en dos acuíferos confinados y semiconfinados, designados como superior e inferior para

el caso de la subcuenca Tulum Superior con profundidades de explotación hasta 400 m (Rocca 1969, Lohn 1970) (Fig. 3b). En la cuenca de agua subterránea el espesor del relleno cuaternario varía desde unas decenas de metros en la zona proximal del abanico, mientras que en la zona

distal, al este de la ciudad de San Juan, sobrepasa los 700 m pudiendo llegar a 1000 m (Agie 1968). Puede estimarse en no menos de 300 m el espesor medio de sedimentos saturados. En la parte proximal el agua subterránea está a unos 90 m de profundidad, disminuyendo su profundi-

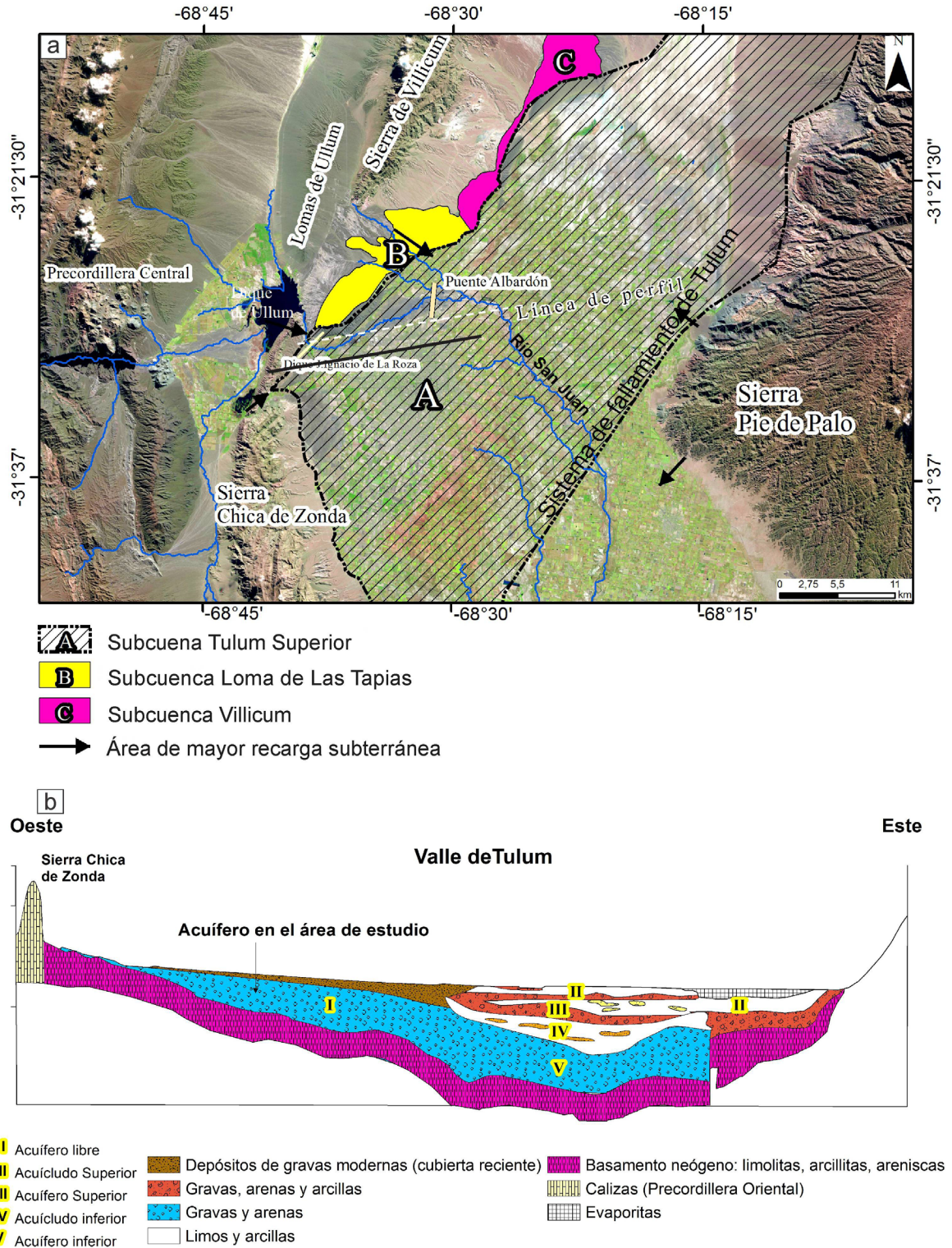


Figura 3. a) subcuencas de agua subterránea en el valle de Tulum, las flechas indican las zonas de mayor recarga de agua hacia la cuenca de agua subterránea; b) perfil esquemático del acuífero único debajo del abanico aluvial del río San Juan (modificado de Rocca 1969). El área de estudio implica el acuífero libre I.

dad hacia la parte distal del mismo, alcanzando unos 10 m. La infiltración profunda de agua hacia el acuífero libre se produce en la planicie de inundación y en el cauce actual del río San Juan (Fig. 4). En este tramo la dirección de flujo en el abanico es predominantemente hacia el sureste (Lohn 1970, Zambrano 1986). El volumen calculado de agua subterránea almacenada en la zona de recarga (con una porosidad del 18%) sería $11576,07 \times 10^6 \text{ m}^3$ en una superficie de $150,5 \text{ km}^2$ (Agie 1968). La subcuenca Loma de Las Tapias (Fig. 3) tiene un acuífero integrado por conglomerados de edad plio-pleistocena y por sus redepositos. La Formación aflorante se denomina Loma de Las Tapias, de edad neógena y está subdividida en tres miembros: Miembro inferior "La Colmena", Miembro medio "Arenisca Albardón" y Miembro superior "El Chilote" (Groeber y Tapia 1926, Serafini *et al.* 1985). El Miembro superior recibe también el nombre de Formación Mogna, es el término conocido en todo el ambiente de Precordillera para identificar la secuencia pefítica ubicada en el techo del Terciario y es equivalente a Conglomerado El Chilote (Rodríguez 2004). El Miembro La Colmena es un conglomerado basal con clastos angulosos de caliza y pedernal cementados, sobre él se apoyan arcillas rojas de espesor variable. El Miembro Arenisca Albardón está compuesto por areniscas conglomerádicas tobáceas, alternadas con areniscas finas a gruesas, intercaladas con bancos de conglomerados. El Miembro El Chilote está conformado por potentes bancos de conglomerados y areniscas intercalados. En subsuelo la formación acuífera de Loma de Las Tapias corresponde a la Formación Mogna, la cual está representada por conglomerados poco cementados, con material intersticial arenoso grueso, fino y en parte limoso. Otra formación acuífera importante es el relleno aluvial cuaternario dejado por cursos fluviales del río San Juan. El basamento lo constituyen también sedimentitas neógenas de carácter impermeable.

MARCO ESTRUCTURAL

En el área de estudio la deformación tectónica cuaternaria se concentra principal-

mente a lo largo del Plioceno-Pleistoceno de Precordillera Oriental. Esta morfoestructura exhibe una falla de empuje principal hacia el oeste, el corrimiento Villicum-Zonda-Pedernal. La mayoría de la deformación cuaternaria se desarrolla en los piedemontes, con rasgos rectilíneos y fallas paralelas que coinciden con los planos de estratificación, y se explican por el mecanismo de flexo-deslizamiento (Costa *et al.* 1999, Krugh y Meigs 2001). Las fallas de La Laja, Marquezado, La Rinconada, Los Berros y fallas de Cerro Salinas (Bastías *et al.* 1984, 1990, Martos 1987) son las estructuras más significativas que muestran este estilo de deformación (Costa *et al.* 2006).

En el valle de Tulum la actividad tectónica está representada principalmente por el sistema de fallas de Tulum. Este sistema con una dirección predominante NNE-SSO fue definido a partir de sondeos eléctricos verticales, con perforaciones y fotointerpretación para la identificación de lineamientos superficiales (Zambrano y Suvires 2008). Se trata de fallas inversas casi verticales (Zambrano y Suvires 2008) que limitan los bloques fragmentados del antepaís, los cuales generan cuencas flexurales (Rodríguez *et al.* 2016). Los bloques tectónicos levantados por fallas inversas afectan a los depósitos superficiales como los campos de dunas que se localizan por encima de los bloques elevados o las paleociénagas que se localizaban en los depocentros (Rodríguez *et al.* 2017). Además, generan un control en los recursos hídricos superficiales (Rodríguez *et al.* 2018) y subterráneos (Rocca 1969). Ruiz *et al.* (2011) delimitan por gradientes de gravedad y magnetismo la existencia de estructuras tectónicas de basamento regionales que atraviesan el valle de Tulum, como el lineamiento Barboza-Médanos Grandes (Perucca y Ruiz 2014) con dirección SE-NO, es decir perpendicular al rumbo principal del sistema de fallas del Tulum. Leiva *et al.* (2017) delimitan con estudios geodésicos una estructura principal del basamento cristalino, de dirección NNE-SSO, que une el este de la sierra de Villicum (falla de La Laja) con la Sierra Chica de Zonda, la que podría estar relacionada con la falla maestra que reactivó la falla de La Laja en 1944, se trata de una falla principal ciega con vergencia oriental

que afecta al basamento cristalino de la Precordillera y transmite la deformación a los estratos neógenos, flexionándolos y provocando deformación en las estructuras sub-superficiales.

METODOLOGÍA

Se realizó un análisis geomorfológico mediante interpretación de imágenes satelitales Sentinel-2 (Landviewer EOS) y Landsat 8 (Earth Explorer USGS) trabajadas en sistemas de información geográfica como Qgis y ArcGis (Cuadro 1). La clasificación geomorfológica efectuada se presenta en el cuadro 2.

Los datos gravimétricos fueron obtenidos de la base de datos del Instituto Geofísico Sismológico Volponi (IGSV). Su procesamiento permitió la generación del mapa de anomalías gravimétricas de Bouguer (AB). El cálculo de anomalías de gravedad se efectuó mediante las clásicas expresiones siguiendo lo manifestado por Hinze *et al.* (2005). Para la reducción de Aire Libre se consideró un gradiente normal de $0,3086 \text{ mGal/m}$. En tanto que para la reducción de Bouguer se asume una densidad de $\sigma = 2,67 \text{ g/cm}^3$. A la Anomalía de Bouguer así obtenida, se le aplicó la reducción topográfica. Ésta se evaluó dentro de la zona de Hayford, con segmentos circulares de terreno hasta 167 km de diámetro. Para ello se usó el modelo digital de terreno (SRTM30) a través del módulo Terrain Corrections del sistema Oasis Montaj® software, implementado por Phillips (2007), utilizando los métodos desarrollados por Nagy (1966) y Kane (1962). Este mapa de anomalías de Bouguer con corrección topográfica contiene distintos efectos gravimétricos producidos por estructuras de carácter regional más el efecto gravimétrico debido a estructuras geológicas de carácter local. Para relacionar las anomalías gravimétricas con la geomorfología fue necesario descontar del mapa de anomalía de Bouguer el efecto gravimétrico producido por las estructuras regionales. Una forma de obtener el efecto gravimétrico regional es prolongar el campo potencial a una altura determinada sobre la superficie de medición (Pacino e Introcaso 1987). El método empleado se basa en la ecuación de Dirichlet (Dean 1958). En el campo po-

tencial prolongado se atenúan las anomalías de corta longitud de onda suavizando el efecto gravimétrico de cuerpos más superficiales, de forma tal, que solo queda el efecto regional del campo gravitatorio. Siguiendo este método de separación de anomalías gravimétricas se utilizó el filtro de prolongación ascendente a diferentes alturas. En base a bibliografía de trabajos gravimétricos anteriores realizados en la zona (Robles *et al.* 1991, Azeglio y Araujo 1995) se eligió una altura $h=10$ km. La prolongación analítica ascendente consiste en calcular el campo potencial a una altura h constante sobre la superficie de medición (Dean 1958, Introcaso 1997). Es en realidad una transformación del campo potencial medido sobre una superficie ubicada a una altura mayor sobre la fuente. La separación de anomalías se realizó aplicando la expresión:

AB = Anomalía Regional + Anomalía residual (Introcaso 1997).

El efecto regional se descontó del mapa de anomalía de Bouguer alcanzando las anomalías residuales de Bouguer. Finalmente, a estas últimas se le aplicó un realce con el método de la primera derivada vertical, el cual acentúa los contrastes de densidad cercanos a la superficie mediante la amplificación de la componente de alta frecuencia del espectro. El procesamiento se realizó utilizando el software Oasis Montaj de Geosoft®. Se realizó la inversión gravimétrica 2D en un perfil I-I' generado en dirección oeste-este transversal al alto gravimétrico. Para ello se utilizó el programa GM-SYS, que utiliza los programas SAKI del USGS (Webring 1985). Para el modelo de inversión gravimétrica 2D se utilizaron densidades medias de dos pozos de exploración en el valle de Tulum y Matagusanos (YPF) siguiendo el criterio de Perucca y Ruiz (2014). Se trabajó con mapas de curvas de profundidad del basamento impermeable neógeno para las cuencas de Tulum Superior (Agie 1968) y para la subcuenca Loma de Las Tapias con cortes geológicos de Belvideri (1989) realizados a partir de perfiles de isorresistividad aparente que se relaciona con los cambios litológicos, perfiles de pozos y fotointerpretación.

Las isolíneas de profundidad del Neógeno en el valle de Tulum de Agie (1968) fueron obtenidas de un levantamiento geofísico

detallado con el método de sondeo eléctrico de resistividad correlacionado con perfiles geológicos y eléctricos realizados por el autor. Así el mismo pudo definir la base impermeable de las cuencas de agua subterránea y el espesor del relleno cuaternario portador del agua. Cabe destacar que la base impermeable de la cuenca de agua subterránea corresponde a la formación neógena compuesta por limolitas y arcilitas.

En la subcuenca Loma de Las Tapias la profundidad del Neógeno impermeable se obtuvo a partir de cambios en la resistividad del relleno aluvial y la base impermeable de la cuenca de agua subterránea de acuerdo con Belvideri (1989). Las curvas

se digitalizaron y permitieron generar modelos 3D. Para ambas cuencas se analizaron datos hidroquímicos realizados por Lohn (1970) y finalmente se elaboró un mapa con nuevas estructuras tectónicas con potencial hídrico en las dos subcuencas analizadas.

RESULTADOS

Geomorfología

Los procesos dominantes responsables de las geoformas del área son los fluviales y aluviales, ambos asociados al río San Juan. La clasificación geomorfológica se realizó teniendo en cuenta las grandes

CUADRO 1. Descripción de imágenes satelitales utilizadas para el mapeo geomorfológico.

Imagen satelital o Modelo digital de elevación empleado	Fecha	Características			Obs
		Bandas o combinación de bandas	Tamaño de pixel	Proceso realizado	
Sentinel 2B S2B_tile_20170630_19JEF_0 Ángulo: 28.97° nubosidad: 3.26% Fuente :EOS DATA ANALYTICS	30/06/2017	Tierra/Agua (B11-B8-B4) R8, SWIR1, R	20 m/pixel 20 m/pixel 10 m/pixel	Combinación y remuestreo	1
	30/06/2017	Color Natural (04-03-02) R-G-B	10 m/pixel	Combinación de bandas	2
Landsat 8 LC82320822014066LGN00 (OLI_TIRS) Fuente: U.S. Geological Survey	07/03/2014	B1-B2-B3-B4- B5-B6-B7-B8- B9-B10-B11	30 m/pixel	Combinación de bandas completo Resalto de histograma imagen Linear al 2% Transformación "Tasseled cap" :Humedad	3
Sentinel 2B Norte-S2A_ MSIL1C_20170725T142751_ N0205_R053_ T19HEE_20170725T143854. SUR-S2A_ MSIL1C_20170725T142751_ N0205_R053_ T19JEF_20170725T143854. Fuente: EOS DATA ANALYTICS	25/07/2017	Color Natural (04-03-02) R-G-B	10x10 m para las bandas usadas (RGB)	Unión y mosaico de imágenes satelitales	2

La última columna (Obs) se referencia como sigue: 1- Esta combinación de bandas es adecuada para saber la tierra tiene agua. En esta imagen con falso color, la tierra aparece sombreada de naranja y verde; el hielo, en un vibrante color magenta, y el agua aparece en sombras azuladas. 2- En esta combinación el aspecto del suelo tiene un color similar al del sistema visual humano. Esta combinación de bandas ofrece la máxima penetración de agua y una información superior batimétrica y de sedimentos. Es útil para los estudios urbanos. 3- La transformación Tasseled Cap (Kauth y Thomas 1976) consiste en una transformación lineal usando coeficientes empíricos, que genera una imagen resultante compuesta por tres nuevas bandas relacionadas con la humedad (*wetness*), el brillo (*brightness*) y el verdor (*greenness*). Humedad: se relaciona con el contenido de humedad en la vegetación y en el suelo. Se vincula con el infrarrojo medio, en donde se manifiesta con claridad la absorción del agua.

unidades morfogénicas y subunidades (Cuadro 2). Finalmente, se asignó el comportamiento hidrogeológico de cada subunidad. En la figura 4 se muestra la dirección del flujo subterráneo desde el río San Juan, en la subcuenca de Tulum Superior. En la subcuenca Loma de Las Tapias la dirección de flujo es al principio O-E y luego SO-NE (Rocca 1969).

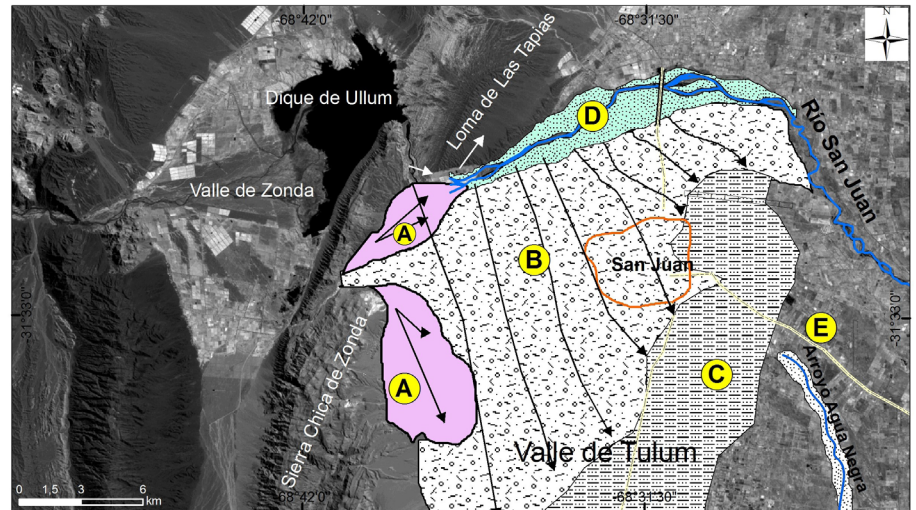
La figura 5 muestra el mapa geomorfológico con las unidades relacionadas al proceso fluvial. La unidad morfogénica reconocida como cauce fluvial del río San Juan se comporta como la zona de mayor recarga del acuífero subterráneo.

Estructuras tectónicas y posibles zonas con almacenamiento hídrico

Se presentan a continuación dos estructuras tectónicas en las subcuencas Tulum Superior y Loma de Las Tapias. Ambas relacionadas a la posibilidad de un mayor almacenamiento hídrico. Para cada estructura se asocian valores hidroquímicos o de salinidad y profundidad del basamento de la subcuenca. Esta información fue adquirida de diferentes trabajos como se indicó anteriormente en la metodología, realizados en la zona con fines diversos (Rocca 1969, Agie 1968, Belvideri 1989, Serafini *et al.* 1985, Luna 1988, Lohn 1970, Albero *et al.* 1989 y Joukl 1970). Los autores mencionados otorgan datos geológicos e hidrogeológicos a través de mapas, perfiles geológicos, descripciones de campo y tablas. Dicha información fue integrada en este estudio, en una base de datos única que luego se filtró para cada subcuenca para lograr una interpretación completa de cada estructura.

Alto estructural en la subcuenca Tulum Superior:

En la figura 6a se observa un modelo digital de elevación y en triángulos las estaciones de medición de la gravedad de la base de datos del IGSV. La figura 6b muestra un mapa de anomalías residuales utilizando el método de prolongación ascendente a 10 km. En la figura 6c se aplicó un realce de anomalías con el método de la primera derivada vertical y se asocia a la figura la escala vertical de colores con el valor respectivo. Los colores fríos son los bajos gravimétricos (sector 1 al este de la figura), en el centro hay una zona



- A** Relictos del sector proximal del abanico aluvial del río San Juan. Sin uso antrópico
- B** Sector Medio del abanico aluvial del río San Juan
- C** Sector Distal del abanico aluvial del río San Juan
- D** Cauce y Llanura de inundación del río San Juan
- E** Planicie aluvial antigua del río San Juan
- > Flujo de agua subterránea

Figura 4. Unidades morfogénicas asociadas al abanico aluvial del río San Juan. Las flechas blancas indican dirección del flujo de agua subterránea para Loma de Las Tapias y en flechas negras para el valle de Tulum.

CUADRO 2. Clasificación Geomorfológica y comportamiento hidrogeológico de la unidad

Unidad Morfogénica	Subunidades	Comportamiento Hidrogeológico
Río San Juan	1-Cauce fluvial	Área de mayor recarga
	2-Llanura de inundación	
	3-Paleocanales	
	4-Áreas de interfluvios	
	5-Niveles de antiguas terrazas del río San Juan	
Abanico aluvial del río San Juan	Área de transición entre la zona distal del abanico aluvial y la planicie de inundación del río San Juan	Recarga Transporte y flujo de agua subterránea Descarga
	A-Relictos del sector proximal	
	B-Sector Medio	
	C-Sector Distal	Acuífero libre

de anomalías gravimétricas altas resaltadas en tonalidades rosadas-rojizas (2) y al oeste pasan a colores más fríos con bajos valores (3), para terminar nuevamente al oeste con valores gravimétricos altos (4). Se superponen a la figura las curvas isonómalas. La anomalía gravimétrica posi-

tiva (2) está ubicada debajo del abanico aluvial del río San Juan, en la denominada subcuenca Tulum Superior. Tiene una forma aproximadamente elongada en sentido N-S. Este alto gravimétrico se asociaría a un alto estructural neógeno que genera al este y al oeste del mismo dos sectores

tectónicamente deprimidos. Se realizó un perfil I-I' atravesando de oeste a este el alto gravimétrico (Fig. 6d). Allí se comparan la anomalía de Bouguer residual (prolongación ascendente a $h=10$ km), la derivada vertical de primer orden y la curva de topografía. La curva de anomalía residual gravimétrica muestra una anomalía positiva. La derivada vertical resalta la presencia de un alto gravimétrico positivo. Mientras que la curva negra, correspondiente a la topografía (Fig. 6c).

Salinidad. Los valores de salinidad provienen de estudios de Lonh (1970). Se trabajó con las curvas de salinidad del sector proximal y medio del abanico del río San Juan, digitalizadas y georeferenciadas, se muestran en las figuras 7a y b. La salinidad varía desde un mínimo de 310 mg/l (en cercanías al río San Juan) hasta valores superiores a los 750 mg/l.

La zona de mayor infiltración coincide con la curva de 600 mg/l. En la figura 7a es posible definir dos áreas. Las curvas cercanas al río San Juan con valores de salinidad de 300 mg/l, luego siguiendo el sentido de flujo subterráneo hacia el SE (Fig. 4) el agua aumenta la salinidad llegando a la curva de salinidad 750 mg/l (líneas rosadas), valor que se mantiene hacia el este con otra línea de valor 750 mg/l, y luego disminuye a valores de 300 mg/l en el centro del valle (línea azul). Se observó que el alto detectado por gravimetría se ubica exactamente entre las curvas 750 mg/l, que separan dos zonas de agua con mineralización más baja hacia el E y el NO (Figs. 7a y b).

Profundidad del basamento neógeno. El alto gravimétrico presenta una dirección aproximada N-S, perpendicular al esfuerzo compresivo regional (Baldis *et al.* 1979), y no tiene correspondencia directa con las curvas de profundidad del Neógeno de Agie (1968). No sucede lo mismo con el sistema de fallamiento de Tulum (Fig. 7d), donde las curvas se aprietan mostrando un gradiente y siguen la orientación de la estructura SO-NE. En el alto gravimétrico esta correspondencia podría no existir debido a que los datos utilizados para trazar las curvas en la zona del abanico estaban muy dispersos en ese sector y se siguió la tendencia topográfica para su trazado. A pesar de ello, es posible apreciar un cambio de gradiente en las

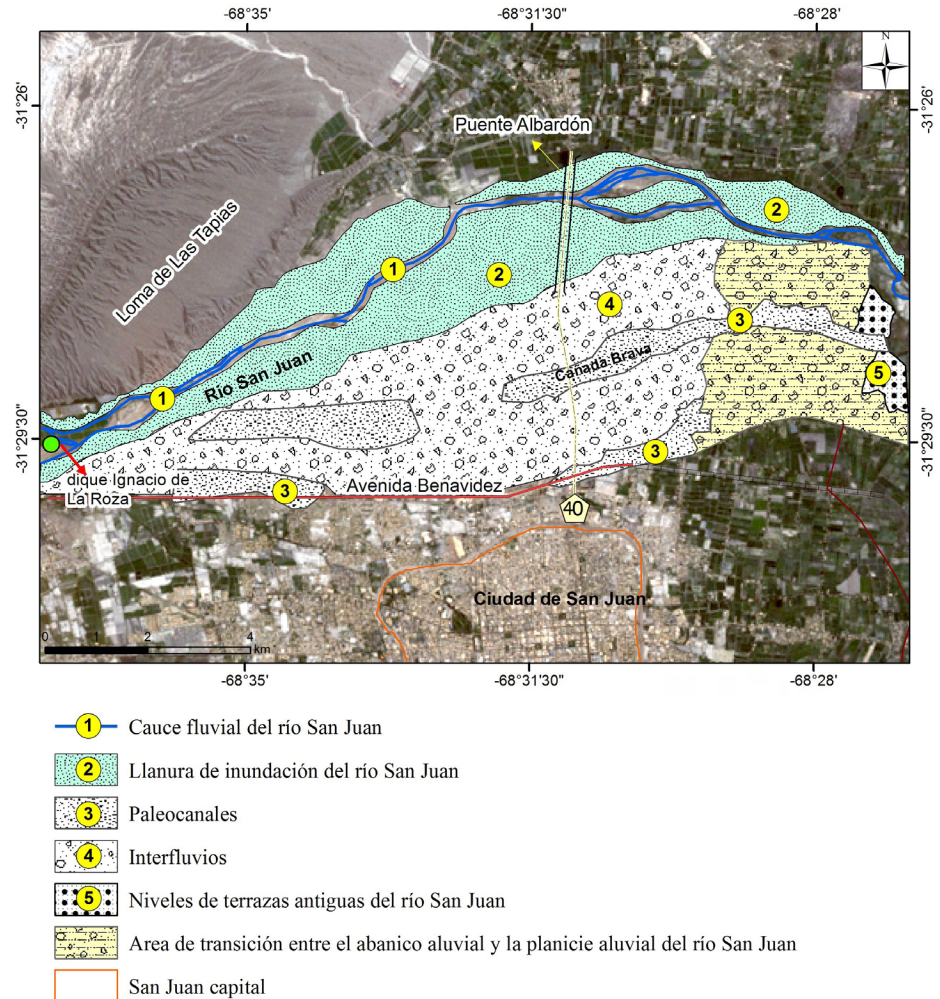


Figura 5. Principales unidades morfológicas en el sector de recarga del acuífero libre. Abarca el cauce y llanura de inundación actual del río San Juan, y sector norte del abanico aluvial.

curvas (400-500 y 600 m) donde está el límite oriental de dicho alto. (Fig. 7c y d).

Modelo de inversión gravimétrica 2D. En un perfil I-I' generado en dirección O-E transversal al alto gravimétrico se propone un modelo asociado a la anomalía residual. Se trabajó con los siguientes valores de densidades (D) tomadas en el sistema internacional. Para la cubierta cuaternaria $D=2,00$ g/cm³; para conglomerados y areniscas que conformarían la formación acuífera $D=2,47$ g/cm³; para el Neógeno impermeable de la cuenca $D=2,61$ g/cm³ y para el basamento $D=2,75$ g/cm³. Estas densidades surgen a partir de la densidad media de las formaciones en pozos de exploración de hidrocarburos YPF de los años 1961, 1984 y 1985 siguiendo el criterio de Perucca y Ruiz (2014). El modelo se apoya en criterios morfoestructurales observados en superficie como anomalías

en el drenaje, anomalías en las curvas de salinidad, paleocanales y cambios en el suelo; los cuales permitieron el trazado de lineamientos asociados a fallas. El modelo de la figura 8 muestra una asociación del alto gravimétrico a un alto neógeno a una profundidad aproximada de 450 metros.

Características de alto estructural: el alto estructural podría llegar a interpretarse como un paleorelieve. Pero se registran algunas características que le imprimen un carácter tectónico reciente. En primer lugar, la sismicidad asociada a sus bordes registrada de la base de datos de estaciones locales de INPRES para la zona de estudio. Los sismos corresponden a diferentes fechas y profundidades. Se observa que el lado oeste del alto gravimétrico presenta sismos alineados N-S, de carácter superficial (12-14 km), mientras que los del límite este (también alineados siguien-

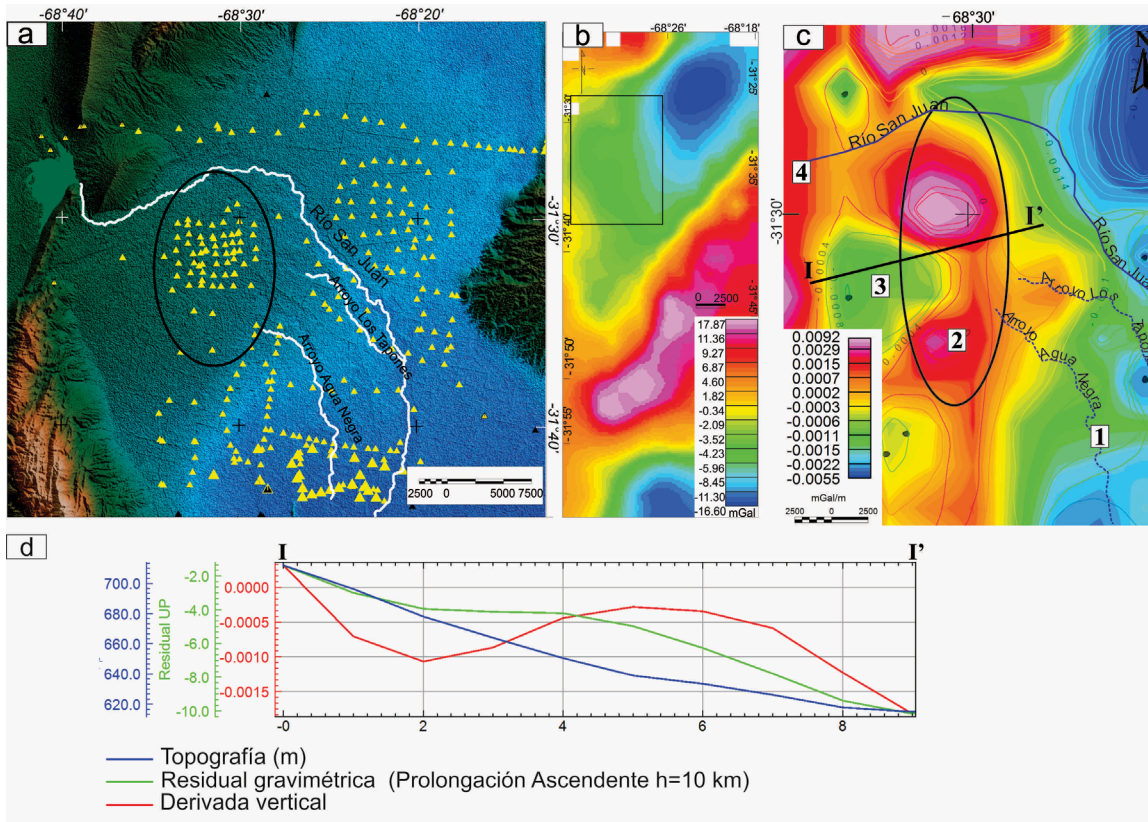


Figura 6. a) Puntos de estaciones de gravedad en el valle de Tulum, la elipse negra marca el área de estudio donde se encuentra el alto gravimétrico. En líneas blancas se muestra la posición actual del río San Juan que cruza la sierra por la quebrada de Ullum; b) Mapa de anomalías residuales por continuación ascendente a $h=10$ km, el recuadro marca la posición del sitio de interés que se ve con detalle en c; c) Derivada vertical de primer orden. La elipse marca el alto gravimétrico y las letras se describen en el texto; d) Perfil I-I' con línea de variación de la topografía (azul), la residual gravimétrica con el filtro de prolongación ascendente $h=10$ km (verde) y en rojo la primera derivada vertical aplicada a la residual gravimétrica.

do la anomalía N-S) presentan sismos superficiales (8-10 km) y otros a mayores profundidades (círculos negros Fig. 9). En segundo lugar, se mencionan variaciones en las características morfoestructurales en el límite oriental del alto gravimétrico. Es el caso de los niveles aterrazados de dos arroyos denominados Agua Negra y Los Taponos que nacen del límite oriental del alto gravimétrico, donde el acuífero libre se pone en contacto con el confinado. Además, desde este límite se registra la presencia de antiguas ciénagas en el valle de Tulum, asociadas a depocentros tectónicos de la cuenca. En tercer lugar, otra característica que indica el carácter tectónico de la estructura puede observarse en el río San Juan. En el valle de Zonda este río construyó un potente abanico con su cauce primigenio dirigido hacia el E y luego SE por la quebrada de Zonda, mientras que en la actualidad lo hace de oeste a este por la quebrada de Ullum. Se muestra que el sistema hídrico ha generado un giro en el cauce en un ángulo aproximado a 45° al norte (Ocaña *et al.* 2016). En el campo esto se comprueba por la presencia de paleocauces. Para el

valle de Tulum, estudios de Suvires *et al.* (2000), realizados sobre la planicie aluvial antigua del río San Juan revelan al sur del valle la presencia de capas de arena gruesa, localmente de gravas y gravillas arenosas, intercaladas en el material limoarcilloso o arenoso fino. Estas capas varían de espesor o se acúñan de un pozo a otro cercano. Por ello, se las interpreta como depósitos de canales fluviales. Tienen poco material fino en sus espacios porales, circunstancia que les confiere buena permeabilidad. Por lo tanto, se considera que las corrientes de agua que han depositado estas capas han sido permanentes y se trataría de antiguos cauces del río San Juan. En la figura 5 se indica la unidad 3 como paleocanales, ubicados al sur de la posición actual del río. La deformación tectónica, ya sea por la inclinación de bloques tectónicos o por el crecimiento de zonas plegadas, constituye una de las causas fundamentales de la migración de las corrientes fluviales (Alexander *et al.* 1994). El río San Juan, actualmente cruza la sierra Chica de Zonda por la quebrada de Ullum en dirección O-E, luego en la zona del alto gravimétrico sufre una

inflexión hacia el norte y vuelve a dirigirse hacia el SE (Fig. 6).

Estructura sinclinal en la subcuenca Loma de Las Tapias:

La segunda estructura tectónica analizada con posible potencial hídrico es un sinclinal de Precordillera Oriental que se encuentra en la subcuenca de agua subterránea de Loma de Las Tapias (Fig. 10). El sinclinal Loma de Las Tapias tiene su eje con dirección NE-SO. El flanco occidental, buzante al este, constituye el elemento orográfico más destacado del área (Serafini *et al.* 1985). Las formaciones geológicas aflorantes corresponden a los miembros Limolita La Colmena, Arenisca Albardón y Conglomerado El Chilote (Serafini *et al.* 1985) y una cubierta de sedimentos cuaternarios.

El sinclinal aflora al norte del río San Juan, mientras que al sur no se observa en superficie.

El flanco oriental aflorante está representado por facetas triangulares y el buzamiento es al oeste, en subsuelo este flanco está compuesto por sedimentitas pliocenas impermeables que actúan como barrera hidrogeológica (Rocca 1969). La

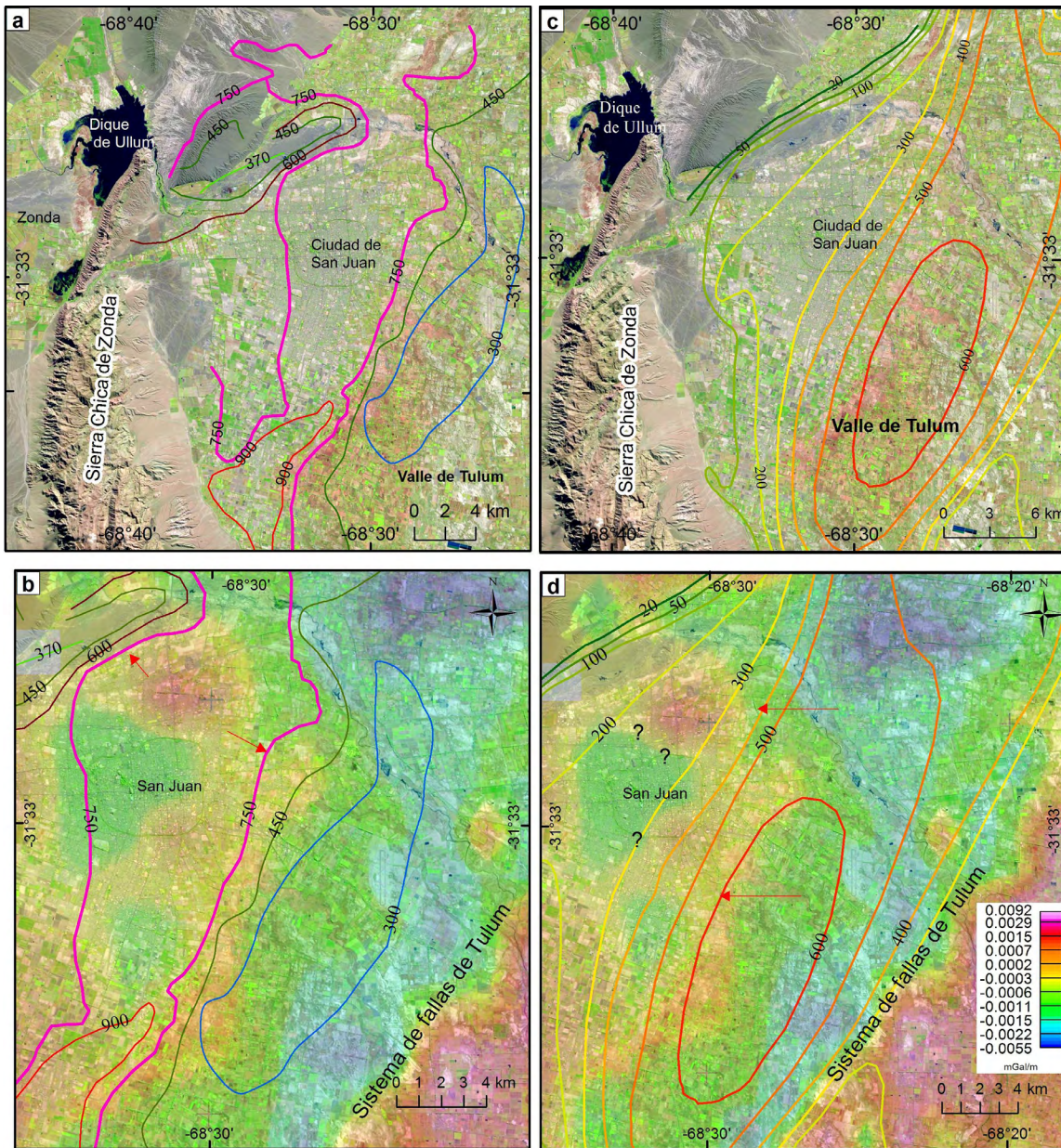


Figura 7. a) curvas de salinidad del agua del acuífero de Tulum Superior sobre una imagen satelital Sentinel-2 (modificado de Lohn 1970); b) Superposición entre el mapa de anomalías gravimétricas residuales con las curvas de salinidad. La flecha roja muestra en los bordes del alto los valores de salinidad más altos, en cambio, en el depocentro de la cuenca (valores gravimétricos azules) la salinidad se corresponde con la curva de 300 mg/l; c) Mapa de profundidad del basamento neógeno (Curvas georeferenciadas, tomado de Agie 1968); d) Superposición de las anomalías gravimétricas residuales con las líneas de igual profundidad de basamento. Las flechas indican las zonas donde las curvas se aprietan en el límite este del alto gravimétrico. Los signos de interrogación sobre el lado oeste cuestionan la no correspondencia de las curvas con el alto.

parte central está rellena por sedimentitas de Loma de Las Tapias y sedimentos cuaternarios (Serafini *et al.* 1985, Luna 1988). La recarga de la subcuenca proviene del río San Juan, penetrando el agua subterránea en los conglomerados permeables, en su interior el agua circula hacia el NE para ingresar posteriormente en la subcuenca de Villicum (Rocca 1969). El relleno sedimentario portador del agua está constituido por el conglomerado El Chilote y por rodados de gravas, gravillas y arenas propias del río San Juan de edad cuaternaria. Belvideri (1989) interpretó datos de sondeos eléctricos verticales, relaciones re-

sistividad-profundidad e información de pozos perforados para agua y obtuvo un mapa de curvas de profundidad del techo del basamento impermeable de la subcuenca. Los resultados fueron plasmados en numerosos cortes geológicos. En este trabajo se analizan dos cortes geológicos denominados por Belvideri como V-V' y VI-VI', ubicados en la parte sur del sinclinal (Fig. 10), donde la estructura no aflora y se encuentra cubierto por depósitos del abanico aluvial del río San Juan y cubiertas pedemontanas. Se llevó a cabo un proceso de digitalización de los cortes geológicos y de las curvas del techo de basamento impermeable. Esta

información pudo utilizarse para el mapeo geológico. Se generó un modelo 3D de la estructura que permitió entender su comportamiento hidrogeológico y el contexto tectónico donde se encuentra. Se destaca un importante proceso erosivo fluvial en el flanco sur-oriental, en donde el relieve intersecta al río San Juan. Los estudios de Serafini *et al.* (1985), Bercowski *et al.* (1986) y Luna (1988) demuestran que el relleno cuaternario originado por los depósitos del abanico aluvial del río San Juan es posterior al plegamiento (Fig. 10). El patrón de afloramiento en el sinclinal Loma de Las Tapias sugiere que el pliegue hunde hacia el SO, y se esperaría que el

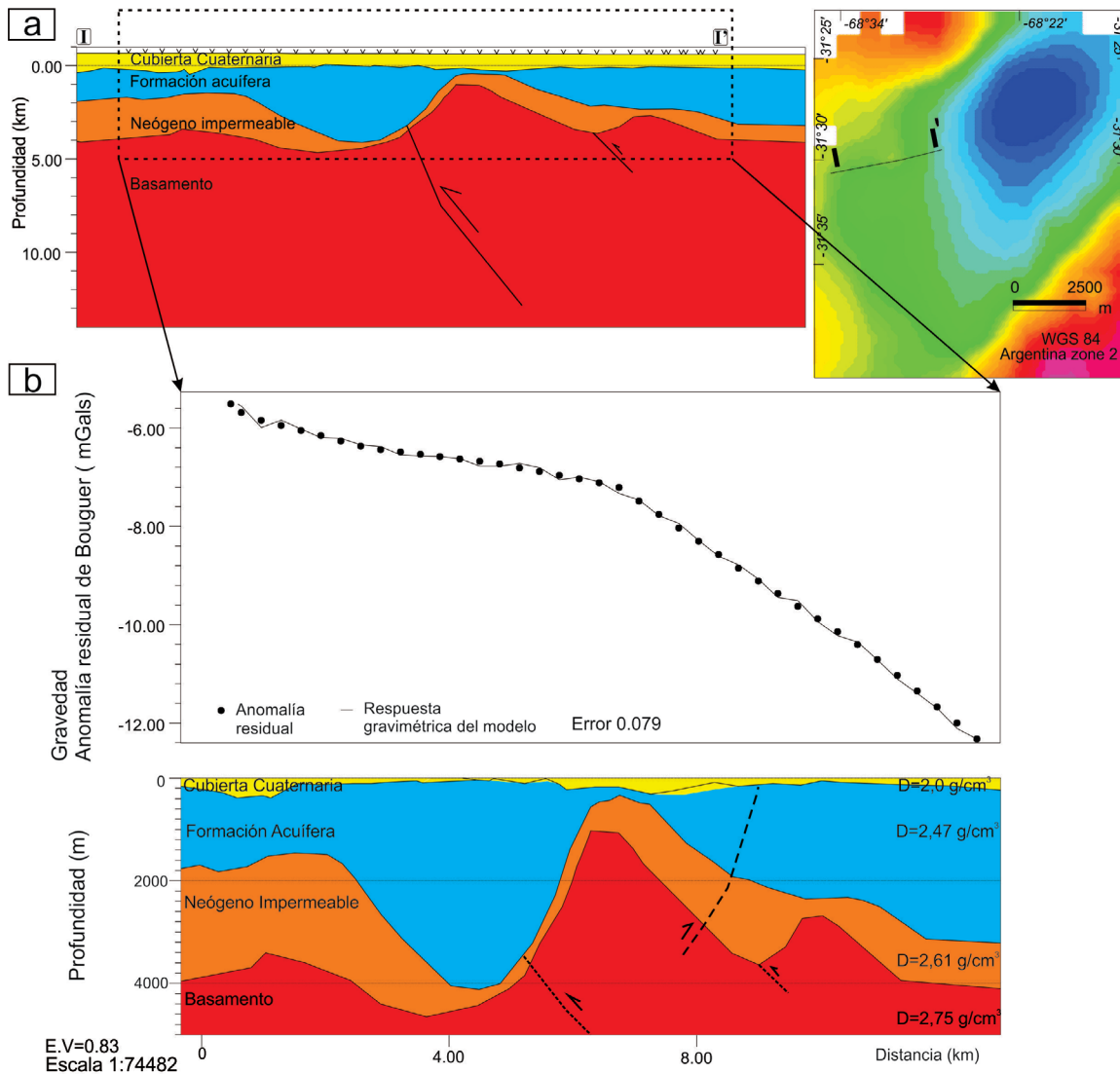


Figura 8. a) Ubicación del perfil modelado I-I' y modelo de densidades resultado de la inversión gravimétrica. El recuadro negro indica la ubicación del modelo con escala exagerada que se muestra abajo; b) Anomalia residual: en línea llena, anomalía observada, en línea de puntos anomalía calculada. Abajo modelo geológico-geofísico exagerado verticalmente con el objeto de mostrar el posible comportamiento de las capas más superficiales de interés. Se marcan probables fallas asociadas al alto estructural. También puede observarse que inmediatamente al oeste del alto estructural una zona con potencial hídrico subterráneo.

agua se infiltre en esta dirección. Sin embargo, el gradiente de curvas isofreáticas de Rocca (1969) indica que el sentido de circulación se realiza desde el río San Juan hacia el este y luego al norte dentro del sinclinal. Probablemente exista también influencia del aporte desde la quebrada de Zonda (Fig. 4), el cual tiene una dirección SO-NE hacia el río San Juan. La anomalía podría deberse a un control tectónico posterior a la formación del sinclinal, el cual habría generado el basculamiento hacia el norte de toda la zona. Esta tendencia se repite en otros sectores de la cuenca, como ocurriría en el alto de Mogna (Zambrano y Suvires 2005, Suvires *et al.* 1998) y en el valle de Zonda (Ocaña *et al.* 2016).

Hidroquímica. La hidroquímica del agua en esta subcuenca tomada de Lohn

(1970) y Belvideri (1989) (Fig. 10a) indica aguas sulfatadas-bicarbonatadas cálcicas (1) cuando ingresa desde el SO aportada por el río San Juan, cambiando hacia el NE por circulación en sedimentos neógenos con aportes de sales, aumentando su porcentaje en sodio y sulfatos, pasando a sulfatada cálcica (2).

Profundidad del basamento neógeno. El sinclinal de Loma de Las Tapias posee el basamento impermeable neógeno a diferentes profundidades desde los flancos al eje del sinclinal, variando entre 10 m a más de 200 m de acuerdo con sondeos geoelectrónicos (Agie 1968, Rocca 1969, Belvideri 1989) (Figs. 10a y b). En el flanco este del sinclinal las sedimentitas neógenas se encuentran a 8 m, luego hacia el SE aumenta su profundidad constituyendo parte de la subcuenca Tulum Superior. El

límite de la subcuenca Loma de Las Tapias con la Tulum Superior coincide con el trazado de una falla normal en el flanco este del sinclinal. Se considera que la estructura sinclinal continúa en subsuelo hacia el SO, aunque en superficie el afloramiento se interrumpe en la intersección con el cauce fluvial del río San Juan.

DISCUSIÓN

El alto estructural interpretado en el sector medio del abanico aluvial del río San Juan podría también interpretarse como un paleorelieve. Pero se registran algunas características que le imprimen un carácter tectónico reciente y son principalmente: a) la sismicidad asociada a fallas en sus bordes y b) anomalías en el sistema hidro-

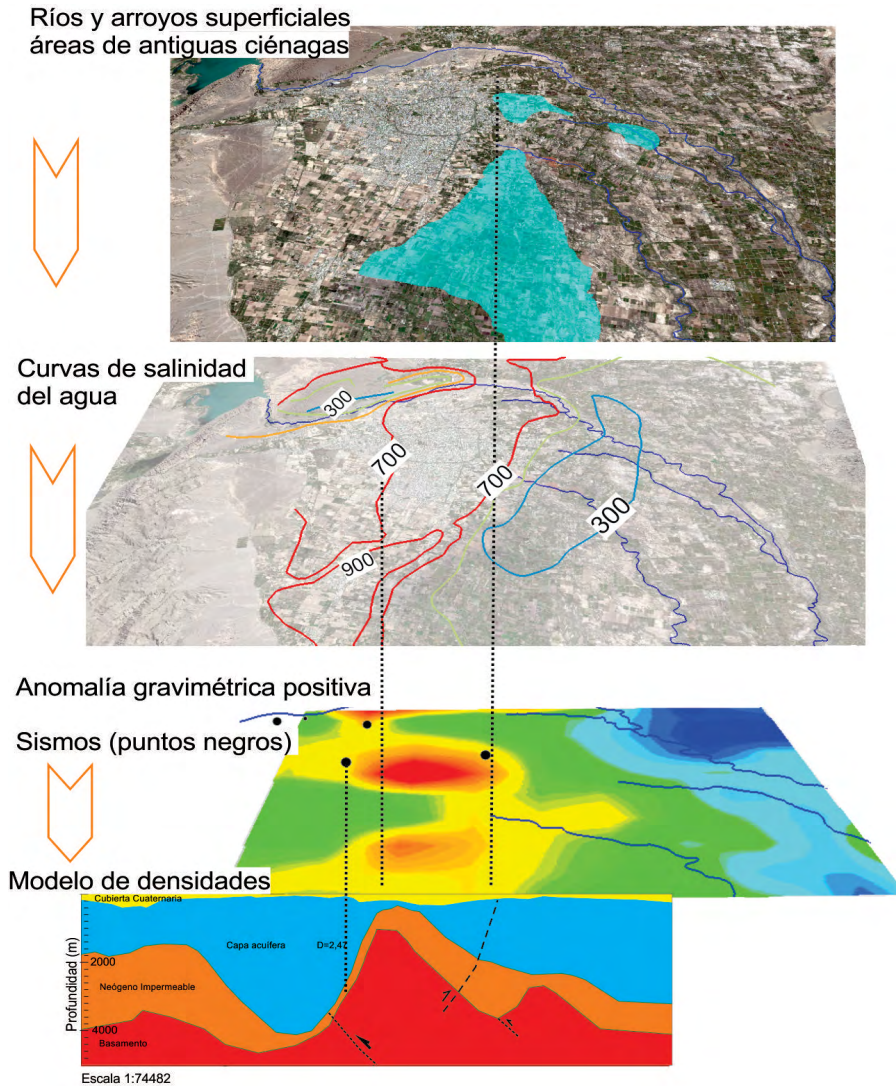


Figura 9. Esquema de capas de información utilizadas para el modelo 2D que caracterizan al alto tectónico.

lógico, migración lateral del río San Juan y la historia tectónica del entorno.

En los cortes geológicos de Belvideri (1989) se aprecia la presencia de una falla normal en el flanco este del sinclinal Loma de Las Tapias. El modelo 3D realizado en este trabajo permite observar que la falla se encuentra limitando el flanco elevado del bloque este en descenso constituyendo la subcuenca Tulum Superior. Lo contrario sucede al norte del río Yakin (Fig. 1) donde las fallas son inversas, como la falla de La Laja y es el bloque oriental el que eleva.

Belvideri (1989) propuso que se trataría de una falla rotacional con el eje ubicado al norte del río San Juan. Los sismos encontrados para el área (Fig. 11) se alinean con la falla tanto en su parte inversa como en la normal. Pero hay una zona

que suponemos podría corresponderse con el eje de la falla rotacional, que fue estudiada por Leiva *et al.* (2015) a través de mediciones precisas de gravedad empleando gravímetros geodésicos. Los autores encuentran un área con rumbo E-O relacionada con el río San Juan, entre la Sierra de Villicum y el SO de la Sierra de Pie de Palo, con un importante cambio de gradiente gravimétrico en el año 2009. Se registraron aumentos de g en todas las estaciones ubicadas al norte y disminución de la gravedad en las estaciones del sur del río. En esta subregión la actividad sísmica es escasa en ese periodo. Los patrones reconocidos coinciden con la posible falla rotacional que cruza el flanco este del sinclinal, con comportamiento normal al sur del río Yakin y de tipo inverso al norte. Se sugiere estudiar con mayor

profundidad esta zona debido al potencial sísmico para la región. Para este trabajo la presencia de esta falla no solo actúa como barrera hidrogeológica para la subcuenca Loma de Las Tapias, sino también parece intervenir en el descenso de la subcuenca Tulum Superior y el potencial hídrico de la subcuenca Villicum.

CONCLUSIONES

Los estudios realizados permitieron generar un mapa con dos estructuras importantes en el sector proximal y medio del abanico del río San Juan, el sinclinal Loma de Las Tapias y el bloque estructural neógeno elevado. Ambos se ubican contiguos al área principal de recarga del acuífero subterráneo, y poseen como base del acuífero formaciones impermeables del neógeno. La figura 11 muestra las dos estructuras: la primera sobre la base del mapa de anomalías residuales de Bouguer, un alto gravimétrico, en la subcuenca de agua subterránea Tulum Superior. Este se correspondería con un bloque de basamento neógeno elevado, en un contexto tectónico de antepaís fragmentado moderno de los Andes Centrales. Puede notarse, como los sismos se asocian a las fallas. Estas estructuras actuarían como barreras hidrogeológicas. Su ubicación queda evidenciada por un cambio en la salinidad del agua subterránea, pasando de 300 y 400 mg/l a valores de 750 mg/l en sus bordes. Esto se podría explicar porque en el trayecto del agua, al encontrarse con el alto estructural neógeno arcilloso, recibe mayores aportes de sales. Las curvas de profundidad de basamento neógeno muestran un cambio de gradiente en el límite este del alto gravimétrico. La sismicidad asociada y evidencias morfoestructurales en superficie como anomalías en el drenaje y migración de canales le da un carácter tectónico activo a la estructura. El modelo propuesto indica fallas inversas en ambos lados del alto estructural. Esta estructura elevada genera al oeste un área con mayor posibilidad de almacenamiento hídrico debido a la elevación del basamento impermeable a unos 480 m, pudiendo actuar como un obstáculo en la dirección del flujo de agua subterránea y por ende, aumentando las posibilidades

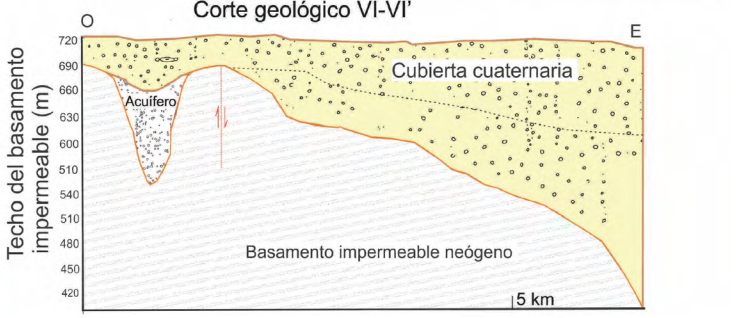
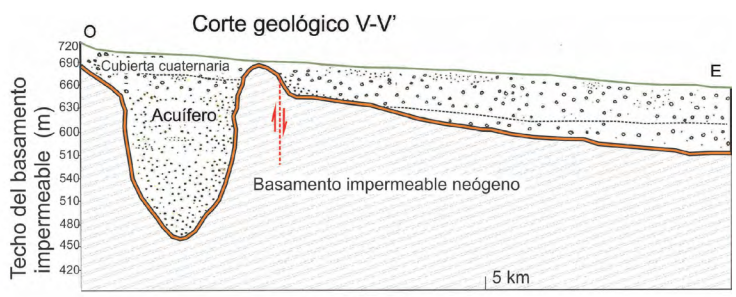
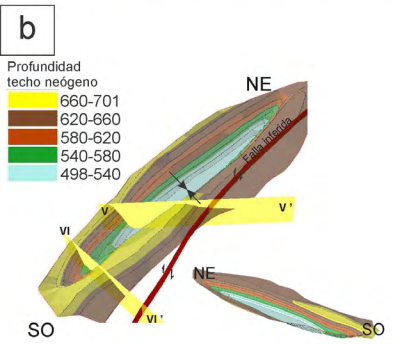
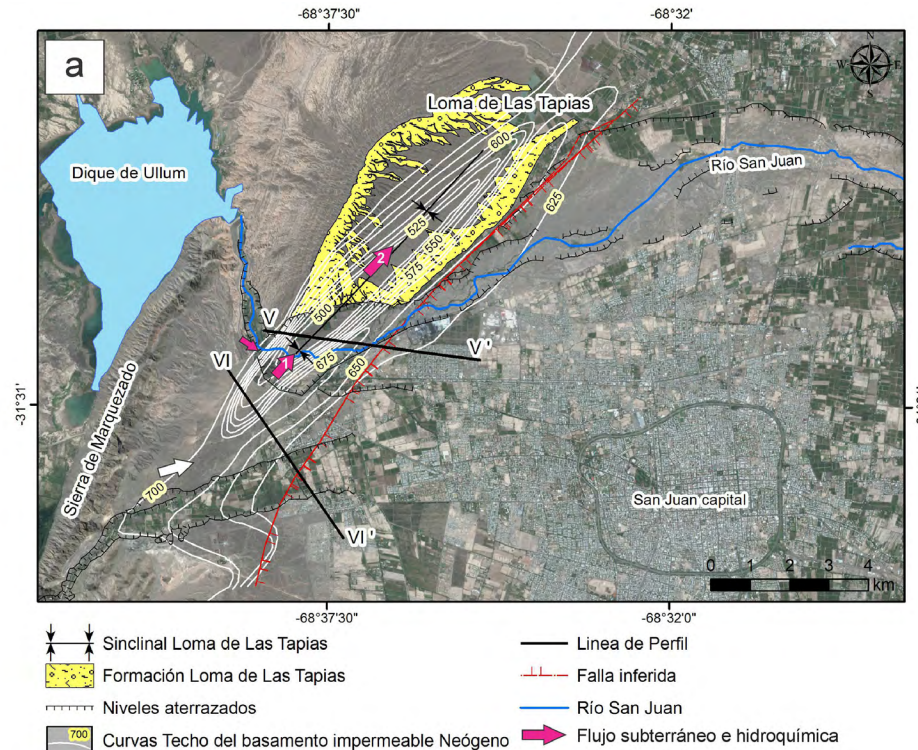


Figura 10. a) Mapa geológico del sinclinal Loma de Las Tapias. Las flechas 1 y 2 indican la dirección de flujo de agua subterránea y la hidroquímica del agua a medida que circula por la subcuenca del Sinclinal Loma de Las Tapias. Flecha 1 son aguas sulfatadas-bicarbonatadas cálcicas y flecha 2 son aguas sulfatadas cálcica y sódica; b) Las líneas de perfil corresponden a dos cortes geológicos de Belvideri (1989) donde se observa la disminución de la profundidad del sinclinal hacia el sur donde también se hace más estrecho (VI-VI') comparado con el norte (V-V'): Se muestra un modelo 3D del sinclinal obtenido a partir del procesamiento las curvas de iso-profundidad del basamento impermeable.

de encontrar una pequeña depresión de agua subterránea, económicamente explotable. La segunda estructura corresponde a un pliegue sinclinal perteneciente a la faja plegada y corrida de Precordillera Oriental (Fig. 11). El mismo constituye la subcuenca de Loma de Las Tapias. El área de máxima recarga del acuífero se ubicaría aguas abajo del dique José Ignacio

de la Roza, donde el río San Juan drena con dirección O-E para luego desviarse hacia el NE. La subcuenca de Loma de Las Tapias se encuentra en la zona de mayor recarga hídrica. Finalmente se advierte que a partir del estudio gravimétrico y de diferentes aportes geológicos sobre la cuenca subterránea que el conocimiento estructural constituye una herramienta importante para

determinar nuevos sitios de exploración de recursos hídricos, ya que como pudo comprobarse en este aporte las estructuras tectónicas podrían generar reservorios de agua.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los revisores Dr. José

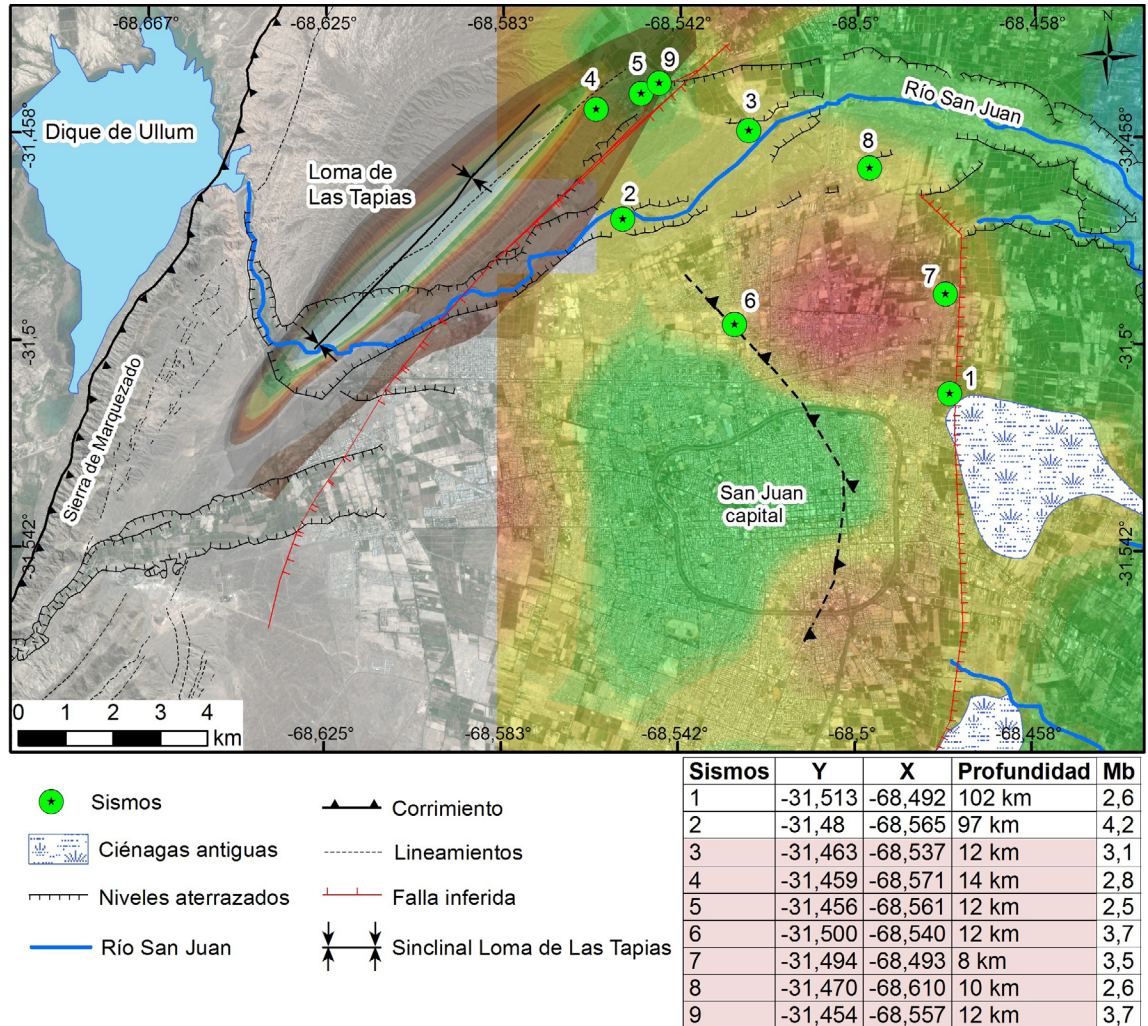


Figura 11. Estructuras tectónicas con potencial hídrico en las subcuencas de agua subterránea Loma de Las Tapias y Tulum Superior. Se marcan las estructuras como un bloque levantado afectado por fallas inversas, y la estructura sinclinal también con el flanco este fallado. Los sismos de las estaciones sismológicas locales INPRES (2017) se identifican con un número, en la tabla se muestran los datos de profundidad y magnitud asociados al evento señalado.

Mescua y a un revisor anónimo, quienes contribuyeron significativamente a la mejora de este trabajo. Los autores también agradecen el apoyo de los proyectos: PIO (N° 150-201501-00039-CO) Geofísica aplicada a la zonación de los recursos geotérmicos (San Juan), PDTs (Código E1021) Exploración de recursos geotermales en San Juan y a CONICET por el financiamiento de la beca.

REFERENCIAS

Agie, J. 1968. Almacenamiento de agua subterránea en las cuencas de Tulum y Ullum-Zonda. Plan de Agua subterránea. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Consejo Federal de inversiones, 26 p., San Juan.

Albero, M., Levín, M., Panarello, H., Garda, E. y Lohn, P. 1989. Estudio isotópico de los acuíferos de los valles de Tulum y Ullum-Zonda. Estudios de hidrología isotópica en América

Latina, Organismo Internacional de Energía Atómica, 11 p., Viena.

Alexander, J., Bridge, J., Leeder, M., Collier, R. y Gawthorpe, R. 1994. Holocene meander-belt evolution in an active extensional basin, southwestern Montana. *Journal of Sedimentary Research* 64: 542-559.

Azeglio, E. y Araujo, M. 1993. Relevamiento Gravimétrico del valle de Tulum, San Juan Argentina. 3° International Congress of the Brazilian Geophysical Society, Actas 2: 776-781, Río de Janeiro.

Baldis, B., Uliarte, E. y Vaca, A. 1979. Análisis estructural de la comarca sísmica de San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 34: 249-310.

Bastías, H., Weidmann, N. y Pérez, M. 1984. Dos zonas de fallamiento Pliocuaternario en la Precordillera de San Juan. 9° Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 329-341, San Carlos de Bariloche.

Bastías, H., Uliarte, E., Paredes, J., Sanchez, A., Bastías, J., Ruzicki, L. y Perucca, L.

1990. Neotectónica de la provincia de San Juan. 11° Congreso Geológico Argentino, Relatorio: 228-244, San Juan.

Belvideri, I. 1989. La falla de La Laja y su influencia en la hidrología del borde noroccidental de la Cuenca del valle Tulum. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional de San Juan (inédita), 70 p., San Juan.

Bercowski, F., Berenstein, L., Johnson, N. y Naeser, C. 1986. Sedimentología, Magnetostratigrafía y edad Isotópica del Terciario de Lomas de Las Tapias, provincia de San Juan. 1° Reunión Argentina de Sedimentología, Resúmenes expandidos: 169-172, La Plata.

Caminos, R. 1979. Sierras Pampeanas Noroccidentales. Salta, Tucumán, Catamarca, La Rioja y San Juan. En: Turner, J.C.M. (ed.) Segundo Simposio de Geología Regional Argentina. Academia Nacional de Ciencias: 225-291, Córdoba.

Costa, C., Rockwell, T., Paredes, J. y Gardini, C. 1999. Quaternary deformations and

- seismic hazard at the Andean orogenic front (31°-33°, Argentina): a paleoseismological perspective. 4^o International Symposium on Andean Geodynamics, Proceedings: 187-191, Paris.
- Costa, C., Audemard, F., Bezerra, F., Lavenu, A., Machette, M. y París, G. 2006. An overview of the main Quaternary deformation of South America. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 61: 461-479.
- Dean, W. 1958. Frequency analysis for gravity and magnetic interpretation. *Geophysics* 23: 97-122.
- De Martonne, E. 1935. Problèmes des régions arides sud-américaines. *Annales de Géographie* 44: 1-27.
- Earth Explorer, 2017. Landsat-8, US Geological Service. En Línea <http://earthexplorer.usgs.gov/>
- EOS Data Analytics. 2017. Sentinel-2. En Línea <https://eos.com/landviewer/>
- Groeber, P. y Tapia, A. 1926. Condiciones geológicas de la Quebrada de Ullún en relación con un proyectado dique de embalse (Provincia de San Juan). *Publicación de la Dirección General de Minas* 25 y 26: 5-25.
- Hinze, W., Aiken, C., Brozena, J., Coakley, B., Dater, D., Flanagan, G., Forsberg, R., Hildenbrand, T., Keller, R., Kellogg, J., Kucks, R., Li, X., Mainville, A., Morin, R., Pilkinton, M., Plouff, D., Ravat, D., Roman, D., Urrita-Fucugauchi, J., Véronneau, M., Webring, M. y Winester, D. 2005. New Standards for Reducing Gravity Data: The North American Gravity Database. *Geophysics* 70: J25-J32.
- Instituto Nacional de Estadística y Censos (INDEC). 2010. En línea http://www.indec.gov.ar/censos_provinciales.
- Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES). 2017. Listado de terremotos históricos, catálogo San Juan. En línea: www.inpres.gov.ar
- Introcaso, A. 1997. Isostatic systems and tectonic mechanisms present in Argentina. *Geoacta* 22: 1-19.
- Jordan, T., Isacks, B., Allmendinger, R., Brewer, J., Ramos, V. y Ando, C. 1983. Andean tectonics related to geometry of subducted Nazca plate. *Geological Study of America Bulletin* 94: 341-361.
- Jordan, T. y Allmendinger, R. 1986. The Sierras Pampeanas of Argentina: A modern analogue of rocky mountain foreland deformation. *American Journal of Science* 286: 737-764.
- Joukl, M. 1970. Estudio geoquímico del agua subterránea en el valle de Tulum. Plan de Agua subterránea. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Consejo Federal de Inversiones, 77 p., San Juan.
- Kane, M. 1962. A comprehensive system of terrain corrections using a digital computer. *Geophysics* 27: 455-462.
- Kauth, R. y Thomas, G. 1976. The tasselled cap-a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. *Laboratory for Applications of Remote Sensing (LARS) Symposia, Proceedings* 159: 41-51, Indiana.
- Krugh, W. y Meigs, A. 2001. Secondary deformation associated with active basement involved folding; Late Quaternary flexural-slip faulting and kink-band migration, Sierra de Villicum, San Juan, Argentina. *Geological Society of America Annual Meeting, Abstracts with Programs* 33: 393, Massachusetts.
- Leiva, F., Ruiz, F., Sisterna, J., Cara, E., Acosta, G. y Taillant, J. 2015. Cambios temporales de la gravedad (g4D) relacionados con sismos de magnitud moderada en el frente de deformación de San Juan. *GeoActa* 40:10-24.
- Leiva, F., Ruiz, F., Gianni, G. y Acosta, G. 2017. Identificación de estructuras de basamento en el antepaís de los Andes Centrales relacionado con la falla de La Laja que originó el sismo del 1944 en la provincia de San Juan. 20° Congreso Geológico Argentino, Actas 13: 94-95, San Miguel de Tucumán.
- Lloret, G. y Suvires, G. 2006. Groundwater basin of the Tulum valley, San Juan, Argentina: A morphohydrogeologic analysis of its central sector. *Journal of South American Earth Sciences* 21: 267-275.
- Lohn, P. 1970. Hidrogeoquímica en los valles de Tulum y Ullum-Zonda, provincia de San Juan. Estudio de la salinidad del agua subterránea y superficial. Plan de Agua subterránea. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Consejo Federal de Inversiones, 70 p., San Juan.
- Luna N. 1988. Evaluación estructural neotectónica de Lomas de Las Tapias, provincia de San Juan. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional de San Juan (inérita). 88 p., San Juan.
- Martos, L. 1987. Evidencias de movimientos neotectónicos en una terraza de edad Holocena, La Rinconada, San Juan. 10° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 263-265, San Miguel de Tucumán.
- Nagy, D. 1966. The gravitational attraction of a right rectangular prism. *Geophysics* 31: 362-371.
- Ocaña, R., Suvires, G. y Flores, D. 2016. Evolución del relieve de un frente montañoso y respuesta del sistema erosivo fluvial ante el forzamiento causado por la actividad tectónica (Andes centrales, provincia de San Juan, Argentina). *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 33: 329-341.
- Ortiz, A. y Zambrano, J. 1981. La provincia geológica de Precordillera Oriental. 8° Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 59-74, San Luis.
- Pacino, M. e Introcaso, A. 1987. Regional anomaly determination using the upwards-continuation method. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata* 29: 113-122.
- Perucca, L. y Ruiz, F. 2014. New data on neotectonic contractional structures in Precordillera, south of Río de La Flecha: Structural setting from gravity and magnetic data. *San Juan, Argentina. Journal of South American Earth Sciences* 50: 1-11.
- Phillips, J. 2007. Geosoft eXecutables (GX's) developed by the US Geological Survey, version 2.0, with notes on GX development from Fortran code. US Geological Survey, 111 p.
- Ramos, V., Cristallini, E. y Perez, D. 2002. The Pampean flat-slab of the central Andes. *Journal of South American Earth Sciences* 15: 59-78.
- Ramos, V. y Folguera A. 2009. Andean flat-slab subduction through time. *Geological Society of London, Special Publications* 327: 31-54.
- Robles, A., Sisterna, J., Miranda, S., Imhof, A., Ruiz, F. y Guell, A. 1991. Estudio gravimétrico del valle de Tulum y definiciones estructurales entre el Sistema Pampeano Occidental y la Precordillera Oriental. Informe, Universidad Nacional de San Juan (inérito), 47 p., San Juan.
- Rocca, J. 1969. Geología de los valles de Tulum, Ullum y Zonda. Plan de Agua subterránea. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Consejo Federal de Inversiones, 180 p., San Juan.
- Rodríguez, D. 2004. Estudio sedimentológico y estratigráfico del Neógeno superior de Lomas de las Tapias, con el fin de interpretar la evolución del antiguo río San Juan. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional de San Juan (inérita), 108 p., San Juan.
- Rodríguez, A., Christiansen, R., Suvires, G., Lince Klinger, F. y Martínez, P. 2016. Struc-

- tural features of the Southern Tulum fault System, western central Argentina, through gravimetric data and geomorphologic analyses. *Journal of South American Earth Sciences* 72: 159-168.
- Rodríguez, A., Martínez, P., Burgos, L. y Miranda, G. 2017. Acción Antrópica, cambio climático y tectónica: implicancias en la supervivencia de paleociénagas en el valle de Tulum, provincia de San Juan, Argentina. 20° Congreso Geológico Argentino, Actas 7: 140-146, San Miguel de Tucumán.
- Rodríguez, A., Martínez, P. y Suvires, G. 2018. Water resource distribution and tectonics in the Tulum valley, Western Central Argentina. *International Journal of Hydrology* 2: 55-59.
- Ruiz, F., Introcaso, A., Nacif, S., Leiva, F., Gimenez, M., Martínez, P. y Laplagne, A. 2011. Cambios de gravedad de origen tectónico en la transición entre Sierras Pampeanas Occidentales y la Precordillera sanjuanina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 68: 595-605.
- Serafini, R., Bustos, N. y Contreras, V. 1985. Geología de la Formación Loma de Las Tapias, Quebrada de Ullum, Provincia de San Juan. 1° Jornadas sobre Geología de Precordillera. Asociación Geológica Argentina, Monografías y reuniones N°2, Serie A: 77-82, Buenos Aires.
- Smalley, Jr., Pujol, R., Regnier, J., Chiu, M., Chatelain, J., Isacks, B., Araujo, M. y Puebla, N. 1993. Basement seismicity beneath the Andean Precordillera thin skinned thrust belt and implications for crustal and lithospheric behavior. *Tectonics* 12: 3-76.
- Strecker, M., Hilley, G., Bookhagen, B. y Sobel, E. 2012. Structural, geomorphic, and depositional characteristics of contiguous and broken foreland basins: examples from the eastern flanks of the central Andes in Bolivia and NW Argentina. En: Busby, C. and Azor, A. (eds.) *Tectonics of Sedimentary Basins: Recent Advances*: 508-521, Oxford.
- Suvires, G. 2004. Distribución de los suelos en función del relieve y de la neotectónica en la región sureste de la provincia de San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 59: 376-384.
- Suvires, G. 2014. The paradigm of paraglacial megafans of the San Juan river basin, Central Andes, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 55: 166-172.
- Suvires, G., Zambrano, J., Oviedo, M., Martos, L. y Pereyra, B. 1998. Carta geomorfológica aplicada del sector norte del valle de Tulum. Informe, Universidad Nacional de San Juan (inédito), 87 p., San Juan.
- Suvires, G., Pereyra, B., Zambrano, J. y Oviedo, M. 2000. Rasgos geomorfológicos regionales de la provincia de San Juan. Síntesis del Cuaternario de la provincia de San Juan. Fundación Universidad Nacional de San Juan, 35 p., San Juan.
- Webring, M. 1985. SAKI: A Fortran program for generalized linear inversion of gravity and magnetic profiles. US Geological Survey
- Zambrano, J. 1986. El límite oriental de la Precordillera en el valle de Tulum. 1° Jornadas sobre Geología de Precordillera. Asociación Geológica Argentina, Monografías y reuniones N°2, Serie A: 348-353, Buenos Aires.
- Zambrano, J. y Suvires, G. 2005. Aporte a la Geología del Alto de Mogna, al norte de la depresión del Tulum, provincia de San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 60: 425-427.
- Zambrano, J., Suvires, G. 2008. Actualización en el límite entre Sierras Pampeanas Occidentales y Precordillera Oriental, en la provincia de San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 63: 110-116.

Recibido: 13 de febrero, 2018

Aceptado: 31 de mayo, 2018