



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN JUAN

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Departamento de Geología

Trabajo Final de Licenciatura

**“APTITUD HIDROGEOLÓGICA DEL SECTOR CENTRO-SUR DE
LA CUENCA SUBTERRÁNEA DEL VALLE DE TULUM, PROVINCIA
DE SAN JUAN, ARGENTINA”**

NUÑEZ GUEVARA ENZO OSCAR

Director: Lic. Salvioli Leandro

San Juan, 2025

Agradecimientos

En primer lugar, deseo expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a mis padres, Mabel y Oscar, quienes siempre confiaron en mí y me brindaron su apoyo. Todo lo que soy y todo lo que pretendo ser, se lo debo a ustedes. Los amo.

Agradezco a la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de San Juan por brindarme las herramientas y el espacio para mi formación, como persona y profesional. Extiendo mi gratitud a cada uno de mis profesores, quienes con dedicación transmitieron sus conocimientos y motivación, tratándome siempre como a un colega en formación.

Quiero reconocer y agradecer a mi director Leandro Salvioli, Gerardo Cabrera, Fernanda Careli, Rubén Gianni y Rolando Linieras por compartir generosamente sus experiencias.

Gracias familia. Abuela —te amo con toda mi alma—, hermanos, primos, tías y tíos, quienes siempre me han apoyado y acompañado. En especial Beto, quien lo considero como mi hermano mayor, ejemplo y gran amigo.

También agradezco profundamente a mis hermanos del corazón, Osvaldo, Fernando, Grillo, Ulises, José, Luis, Majó, Maxi, Pony y Cuki, por los momentos compartidos, las largas horas de estudio, las risas y la confianza.

Gracias a mi compañera de vida, Ailén, por ser mi sostén en los momentos más difíciles y mi compañera en los más felices. Si no fueras el amor de mi vida, podría decir que me equivoqué de vida y no de amor.

Desde lo más profundo de mi corazón, un beso enorme al cielo. Este título es para ustedes, Yaya y Abuelo, los voy amar y extrañar para siempre.

INDICE

1. Introducción	1
1.1 Motivo y objetivos.....	1
1.2 Ubicación.....	2
1.3 Metodología de trabajo.....	3
1.4 Marco geológico.....	5
1.5 Antecedentes	7
2. Generalidades del Valle de Tulum	8
2.1 Fisiografía.....	8
2.2 Clima	11
2.3 Hidrografía	12
2.4 Geomorfología.....	15
2.5 Estructuras	18
3. Geología	21
3.1 Geología Regional.....	21
3.2 Geología del subsuelo	29
4. Hidrogeología.....	32
4.1 Límites de la Cuenca subterránea del Tulum	32
4.1 Acuíferos Tulum.....	34
5. Marco teórico	37
6. Evaluación hidrogeológica del área de estudio.....	45
6.1 Descripción e interpretación del perfil hidrogeológico	45
6.1.1 Morfología estructural del subsuelo	52
6.2 Ensayos de bombeo	54
7. DISCUSIONES.....	58
8. CONCLUSIONES	59
9. RECOMENDACIONES	61
10. Bibliografía	62
11. Anexos.....	71

1. Introducción

1.1 Motivo y objetivos

Motivo

Cumplimentar con el requisito vigente en el plan de estudio actual que exige la realización del Trabajo Final de Licenciatura, correspondiente a la carrera de Ciencias Geológicas de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, de la Universidad Nacional de San Juan para obtener el título de Licenciado en Ciencias Geológicas.

Objetivo general

Colaborar con el Instituto Nacional del Agua - Subgerencia del Centro Regional de Agua Subterránea de la provincia de San Juan (INA-SCRAS) en la confección de una sección hidrogeológica representativa de la cuenca subterránea del Valle de Tulum, mediante interpretación y reinterpretación de sondeos eléctricos verticales, con el objetivo de identificar y caracterizar las unidades hidrogeológicas, y definir la geometría de la cuenca. De manera complementaria, se ejecutaron ensayos de bombeo para estimar los parámetros fundamentales de la unidad acuífera.

Esta contribución se encuentra enmarcada dentro del proyecto denominado “*Estimación de Reservas Totales de Agua Subterránea de la Provincia de San Juan, Etapa I: Valle de Ullúm-Zonda y Tulum*”, firmada entre el Ministerio de Obras y Servicios públicos de la provincia de San Juan e INA-SCRAS.

Objetivos específicos

- Reconocer y representar, la unidad acuífera y el basamento hidrogeológico de la Cuenca Subterránea del Valle de Tulum.
- Identificar e interpretar las estructuras geológicas que condicionan la morfología del subsuelo.
- Identificar el sitio económicamente óptimo para la explotación del recurso.
- Estimar y evaluar la capacidad de almacenamiento y transmisión de agua subterránea de los acuíferos del área de estudio.

1.2 Ubicación

El Valle de Tulum se localiza en el sector suroriental de la provincia de San Juan. Se encuentra limitado por la Sierra de Pie de Palo y Médanos Grandes al este, y por las Sierras de Pedernal, Chica de Zonda y Villicum al oeste. Hacia el norte limita con el Alto de Mogna, y al sur con el límite interprovincial San Juan-Mendoza.

El área de estudio corresponde al sector centro-sur del Valle de Tulum (Figura 1). Abraca una superficie de 442 km², entre la Sierra Chica de Zonda y Sierra de Pie Palo, al norte del Cerro Barboza, y comprende los departamentos de Pocito, Rawson, 9 de Julio y Caucete. Sus coordenadas son las siguientes:

1. 6505908 N; 2535972 E
2. 6496031 N; 2532750 E
3. 6500100 N; 2577438 E
4. 6489881 N; 2576809 E

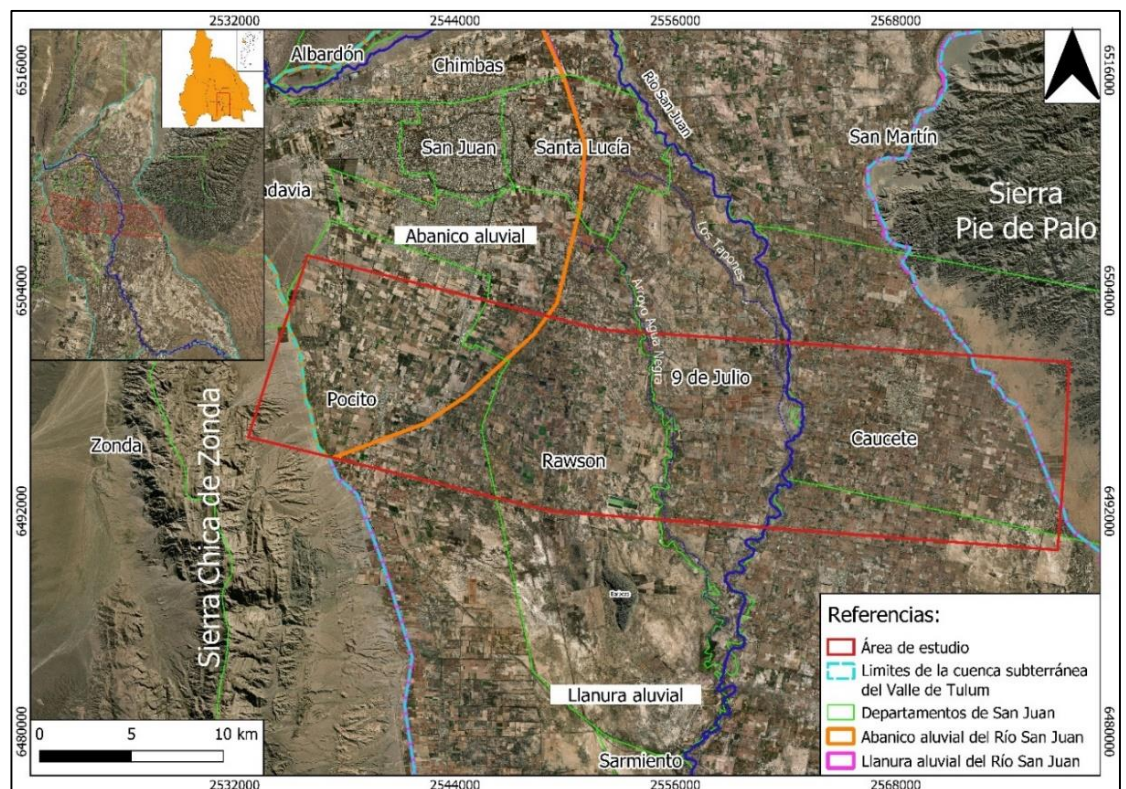


Figura 1: Representación del área de estudio

1.3 Metodología de trabajo

La metodología aplicada en esta investigación combinó un exhaustivo trabajo de gabinete con recopilación de antecedentes e interpretación de datos y trabajo de campo con ensayos de bombeo, para cumplir con el motivo y objetivos propuestos. A continuación, se detallan los procedimientos:

Trabajo de gabinete

Se realizó la búsqueda y recopilación bibliográfica del Valle de Tulum: fisiografía, clima, hidrografía, geomorfología, geología estructural, geología regional y local, e hidrogeología, con el fin de comprender sus características generales y definir el área de estudio. Se consultó, principalmente, los trabajos hidrogeológicos de Wetten (1989), Lloret (2000), Rodríguez (2019), y en particular, Rocca (1969) y Zambrano *et al.* (1998); se modificaron figuras mediante el proceso de digitalización del programa Qgis 3.16.16.

Se utilizó el Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina, Hoja 3169-IV San Juan (Cardó *et al.*, 2000) y Geología Regional (Camino, 1999) para reconocer y describir las formaciones geológicas de la zona de trabajo y áreas adyacentes; se elaboró un mapa geológico en escala 1:350,000, adaptado a los fines de esta investigación, mediante el *software* Qgis 3.16.16. Como así también, se confeccionó un mapa base, en escala 1:200,000, para representar la ubicación de la zona de estudio, los departamentos involucrados y las unidades geomorfológicas principales.

Luego, se compiló información de todos los sondeos eléctricos verticales (SEV) realizados en el área de trabajo, desde año 1969 hasta la actualidad; los datos reunidos, fueron aportados por el Instituto Nacional del Agua-Subgerencia del Centro Regional de Agua Subterránea de la Provincia de San Juan (INA-SCRAS). Con base en esta investigación, se trazó la línea geoelectrica A sobre los departamentos Pocito, Rawson, 9 de Julio y Caucete en dirección oeste-este, de modo que integre la mayor cantidad de SEV de la zona; los sondeos incluidos en esta línea, se georreferenciaron en el programa Qgis 3.16.16 con sus coordenadas correspondientes.

A partir de la línea geoelectrica definida, se construyó una sección topográfica de forma manual, mediante la cota de los sondeos (en metros sobre el nivel del mar) y la distancia entre estos (generalmente, no superan los 500 metros); se utilizó, escala horizontal de 1:25.000 y vertical de 1:10.000.

Consecutivamente, se realizó la interpretación y reinterpretación de los SEV de la línea geoelectrica A. Los datos, intensidad de corriente (I), diferencial de potencial (ΔV), disposición geométrica del dispositivo electrodico ($AB/2$) y resistividad aparente (ρ_a), se procesaron en el *software* ResixPlus V 5.0, que grafica la curva de resistividad y permite identificar, en forma indirecta, las electrocapas del subsuelo.

Los valores de resistividad aparente y profundidad de los sondeos, se correlacionaron entre sí para establecer la continuidad lateral de las electrocapas y elaborar la sección geoelectrica de la zona de trabajo; con el objeto de facilitar la lectura del corte, se apela la utilización del concepto de “Unidad Hidrogeológica (UH)”, entendiéndose por tal a la unidad del subsuelo identificada por una electrocapa, que puede coincidir o no con una unidad geológica.

Finalmente, se interpretaron las características litológicas de las electrocapas y se construyó el corte geológico. Para ello, se recurrió al conocimiento geológico local y se efectuó un estudio exhaustivo de los trabajos de Rocca (1969), Astier (1975) y Arias *et al.* (2012), quienes documentan los rangos típicos de resistividad aparente asociados a las distintas capas del subsuelo; los valores propuestos por estos autores, se compararon y se correlacionaron entre sí, con el fin de unificarlos para elaborar una tabla que permite interpretar la composición litológica de las electrocapas identificadas en el área de estudio. Al detectar e identificar el nivel de agua subterránea y/o la unidad acuífera se obtuvo el perfil hidrogeológico, el cual se digitalizó mediante el programa AutoCAD 2025.

La sección hidrogeológica A-A` es un corte representativo de la cuenca subterránea del Valle de Tulum que permite exhibir las características hidrogeológicas de la zona de trabajo: n-unidades, litología y edad, extensión y espesor, profundidades de las unidades, nivel freático o piezométrico, morfología de la base impermeable, unidad hidrogeológica principal, espesor de la zona saturada, estructuras geológicas, geometría de la cuenca, entre otras.

Trabajo de campo

Durante los meses de septiembre, octubre y noviembre del año 2024, se realizaron cuatro ensayos de bombeo sobre captaciones verticales, para obtener y evaluar las propiedades fundamentales de la unidad acuífera. Se efectuaron dos ensayos de caudal constante en los departamentos Pocito (acuífero libre) y Caucete (acuífero confiado), y dos escalonados en el departamento Rawson sobre el acuífero semiconfinado y confinado; sobre los dos primeros, se trabajó con el pozo de bombeo y un pozo de observación, mientras que en los últimos ensayo sólo se monitoreó el pozo principal.

Previo a cada ensayo, se midió el nivel estático y se registraron las coordenadas de los pozos, para establecer la línea base hidrogeológica y las distancias entre el pozo de bombeo y el pozo de observación; para ello se utilizó, una cinta piezométrica con sensor acústico y GPS Garmin. Además, se consultaron las características hidráulicas del diseño técnico de cada captación: diámetro, caudal, disponibilidad de caudalímetro y caudal de la bomba, diseño de la perforación, profundidad del filtro, profundidad de la bomba, etc.

Durante las pruebas hidráulicas, el descenso progresivo del nivel de agua, tanto en el pozo principal y como en el pozo de observación, se registró con tiempos preestablecidos. Los ensayos de caudal constante se extendieron por 8 horas hasta alcanzar el régimen permanente, por lo que se consideran como de corta duración. En cambio, el ensayo realizado en el departamento Rawson, inició con un caudal bajo durante 70 minutos, seguido de dos escalones de caudal creciente de 50 minutos; para esta última prueba, se acopló un medidor de caudal y válvula exclusiva para el control de flujo.

Posteriormente, en gabinete, los datos obtenidos de descenso vs tiempo se procesaron en el *software* AquiferTest que aplica los modelos matemáticos de Theis (1935) y Jacob-Cooper (1945), para evaluar la transmisividad y coeficiente de almacenamiento de los acuíferos. Los resultados se ajustaron según interpretación hidrogeológica, y se caracterizó la capacidad de la unidad acuífera para transmitir, ceder y almacenar agua subterránea.

1.4 Marco geológico

La zona de trabajo se localiza entre las provincias geológicas de Precordillera y Sierras Pampeanas Occidentales, región centro-oeste de Argentina (Ramos, 1999). La primera unidad, se ubica al oeste del Valle de Tulum y se distribuye a lo largo de 400 km en dirección norte-sur con un ancho de 66 km, por lo que abarca el sur de la provincia de La Rioja, centro de la provincia de San Juan y norte de la provincia de Mendoza (Bordonaro, 2003). Debido a sus características estratigráficas y estructurales, se divide en tres subunidades: Precordillera Occidental, Central y Oriental (Ortiz y Zambrano, 1981), donde esta última se encuentra representada por el cordón Pedernal-Chica de Zonda-Villicum; corresponde una faja plegada y corrida donde las estructuras cortan pero no exponen al basamento, por lo tanto es de tipo piel gruesa con vergencia occidental (Ortiz y Zambrano, 1981; Allmendinger *et al.*, 1990).

El basamento de Precordillera se conoce en forma indirecta a través de xenolitos transportados por erupciones volcánicas miocenas (Leveratto, 1968); se tratan de metamorfitas

de bajo y medio a alto grado asignadas al Grenvilliano (Key *et al.*, 1996). Estas rocas están expuestas en la Sierras de Pie de Palo, Cerros de Barboza y Valdivia, y continúan por el subsuelo del Valle de Tulum (Ramos, 1999). A su vez, se correlacionan con las rocas de la Sierra de Umango y Maz en La Rioja (Varela *et al.*, 1996), Bloque de San Rafael en Mendoza (Cingolani y Varela, 1999), Bloque de Las Mahuítas en La Pampa (Sato *et al.*, 1999) y sector norte del Macizo Norpatagónico en Río Negro (Ramos *et al.*, 1998), por lo que permiten delimitar el terreno de Cuyania, microcontinente lauréntico propuesto por Ramos *et al.* (1996).

Por encima de las rocas grenvillianas aflora la secuencia paleozoica de Precordillera Oriental, donde las sedimentitas más antiguas se exponen solo en el Cerro Totorá, al oeste de Guandacol-provincia de La Rioja, y corresponden a evaporitas y estratos rojos del Cámbrico Inferior Tardío (Vaccari, 1988). Luego, en discordancia, se apoyan las facies carbonática de plataformas asignadas al intervalo Cámbrico Inferior Tardío-Ordovícico Inferior (Bordonaro, 2003), y expuestas a lo largo de las Sierras de Pedernal, Chica de Zonda y Villicum. Sobre estas últimas unidades se encuentran lutitas negras, material terrígeno y glacigenitas que representan el Ordovícico Medio-Ordovícico Superior de Precordillera Oriental (Bordonaro, 1999). A continuación siguen depósitos olistostrómicos del Silurodevónico, que afloran en forma saltuaria y bien expuesta en la Sierra de Villicum, y en discordancia erosiva se ubican sobre rocas ordovícicas en la Sierra Chica de Zonda y Cerro Pedernal (Peralta, 1984, 1993). Por último, aparecen depósitos carboníferos-pérmicos de origen continental correspondientes a sedimentitas fluviales, glaciarios y fluvio-eólicos, que se apoyan en este sector mediante discordancia angular (Carlos, 1999).

No se conocen unidades mesozoicas ni paleógenas, hasta el mioceno inferior inclusive. Esto indica que no hubo sedimentación durante ese lapso, o bien, el depósito fue eliminado por erosión (Rocca, 1969).

Las sedimentitas neógenas son de carácter sinorogénicas, ya que representan el paulatino levantamiento y apilamiento de Precordillera en forma sincrónica con la expansión del volcanismo de arco hacia el este (Jordan *et al.*, 1983; Kay *et al.*, 1987); corresponden a limonitas y arcilitas del Mioceno Tardío, y conglomerados polimíctico del Pliopleistoceno.

Finalmente, la secuencia se completa con los sedimentos cuaternarios (Zambrano y Suvires, 2008), tales como depósitos coluviales, aluviales, eólicos y evaporíticos. Los primeros están constituidos por fanglomerados gruesos que se distribuyen en las bajadas de los cordones montañosos, y los segundos se tratan de materiales transportados por el Río San Juan. Los

depósitos eólicos comprenden campos de dunas como los Médanos Grande, y entre los depósitos evaporíticos se destaca el Campo del Jumeal constituido por sedimentos salinos, limos y arenas finas (Cardó *et al.*, 2000).

Por otro lado, la provincia geológica de Sierra Pampeanas Occidentales está representada por la Sierra de Pie de Palo, que ocupa el sector nororiental de la provincia de San Juan (Caminos, 1999); está conformada por mármoles, esquistos carbonáticos, cuarcitas, y anfibolitas y gneises que representan la mayor extensión (Ramos, 1999). Estructuralmente, corresponde a un sistema de montañas en bloques, limitado por fallas inversas de alto ángulo y con vergencia occidental (Costa *et al.*, 2000).

1.5 Antecedentes

Son varios los estudios de investigación referidos al Valle de Tulum, ya sean geológicos, hidrológicos, hidrogeológicos, agrícola, etc. En la Provincia de San Juan, se destacan los trabajos realizados por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), el Instituto Nacional del Agua-Subgerencia del Centro Regional de Agua Subterránea (INA-SCRAS), Departamento Hidráulico y Minería, y la Universidad Nacional de San Juan (UNSJ).

Para evaluar la aptitud hidrogeológica de la zona de estudio, se compilaron antecedentes relevantes con el fin de comprender las características generales del Valle de Tulum. En primer lugar, se consultaron trabajos de licenciatura con enfoque hidrogeológicos, tales como “*Estudio hidrogeológico para abastecimiento de agua potable a la localidad de el Rincón-Caucete-Provincia de San Juan*” (Wetten, 1989), “*Hidrogeología del Sector Central del Valle de Tulum*” (Lloret, 2000) y “*Geología del cuaternario y geofísica aplicada al diagnóstico ambiental-territorial en el Valle de Tulum*” (Rodríguez, 2019).

Entre los antecedentes más significativos se destaca “*Geología de los valles de Tulum y Ullúm-Zonda*” (Rocca, 1969), que describe las características hidrogeológicas de las cuencas y subcuencas a partir de perfiles hidrogeológicos, elaborados mediante sondeos eléctricos de resistividad; su trabajo, es el primer capítulo del estudio integral de los recursos hídricos subterráneos en los valle Ullúm-Zonda y Tulum. En el Valle de Tulum, el autor documentó la existencia de una falla subterránea significativa que divide la cuenca subterránea del Tulum en dos subcuencas: Tulum Superior y Tulum Inferior, las cuales presentan diferencias hidrogeológicas significativas. También menciona la morfología e importancia de la base

impermeable y las particularidades del relleno cuaternario, con la formación de acuicludos y acuíferos.

Otro antecedente importante es el trabajo realizado por Zambrano *et al.* (1998), quienes elaboraron el mapa hidrogeológico de la provincia de San Juan. En este mapa se representan los conocimientos de los recursos hídricos, en particular, los subterráneos: unidades acuíferas y no acuíferas, cuencas hidrogeológicas principales, características hidroquímicas, zonas de recarga y descarga, dirección del flujo del agua subterránea. Además, se destaca cortes hidrogeológicos realizados mediante información geofísica y perforaciones, que representan la granulometría de los sedimentos que rellenan las cuencas, los espesores de las unidades acuíferas, la geometría de la base hidrogeológica y el nivel de agua subterránea.

Para comprender la geología estructural del valle, se consultaron los trabajos de Zambrano y Suvires (2008), que definen el “Sistema de Fallas de Tulum” dominado por fallas inversas, Zambrano (1986), que describe el estilo estructural como basamento delimitados por fallas de alto ángulo y rumbo paralelo a Precordillera Oriental, y Zambrano y Suvires (1987), que mencionan la presencia de cuatro familias estructurales.

2. Generalidades del Valle de Tulum

2.1 Fisiografía

De acuerdo a Rocca (1969), se reconocen cinco unidades fisiográficas en el Valle de Tulum (Figura 2.1):

- 1) Montañas: corresponden a los principales elementos positivos que bordean el valle. Al oeste, se encuentra las Sierras de Pedernal, Chica de Zonda y Villicum caracterizada por carbonatos marinos, y al este, el complejo ígneo-metamórfico de la Sierra Pie de Palo. La Sierra de Pedernal se localiza al suroeste del Valle de Tulum, entre la quebrada Río de Los Pozos y quebrada Río del Agua (Perucca *et al.*, 2012); en dirección suroeste-noreste presenta 18 km de longitud, altura máxima de 2000 msnm y se encuentra atravesada por la quebrada del Río Acequión. Forma parte del sur de la Precordillera Oriental y se encuentra conformada por rocas paleozoicas, sedimentitas neógenas y una cubierta de sedimentos cuaternarios (Mestre y Heredia, 2014).

Las Sierras Chica de Zonda y Villicum se ubican al oeste y noroeste respectivamente, y separan el Valle de Tulum del Valle Ullúm-Zonda y Matagusano; están constituidas, principalmente,

por calizas y dolomías correspondientes al Paleozoico inferior. La Sierra Chica de Zonda alcanza una altitud máxima de 2200 msnm de altura máxima y se extiende 67 km en dirección norte-sur, desde la quebrada Río del Agua hasta la quebrada de Ullúm; además, es atravesada por la quebrada de Zonda y la quebrada de La Flecha. Por su parte, la Sierra de Villicum alcanza una altitud máxima de 1600 msnm, posee 43,5 km en dirección suroeste-noreste, y se extiende desde la quebrada de Ullúm hasta el Alto de Mogna.

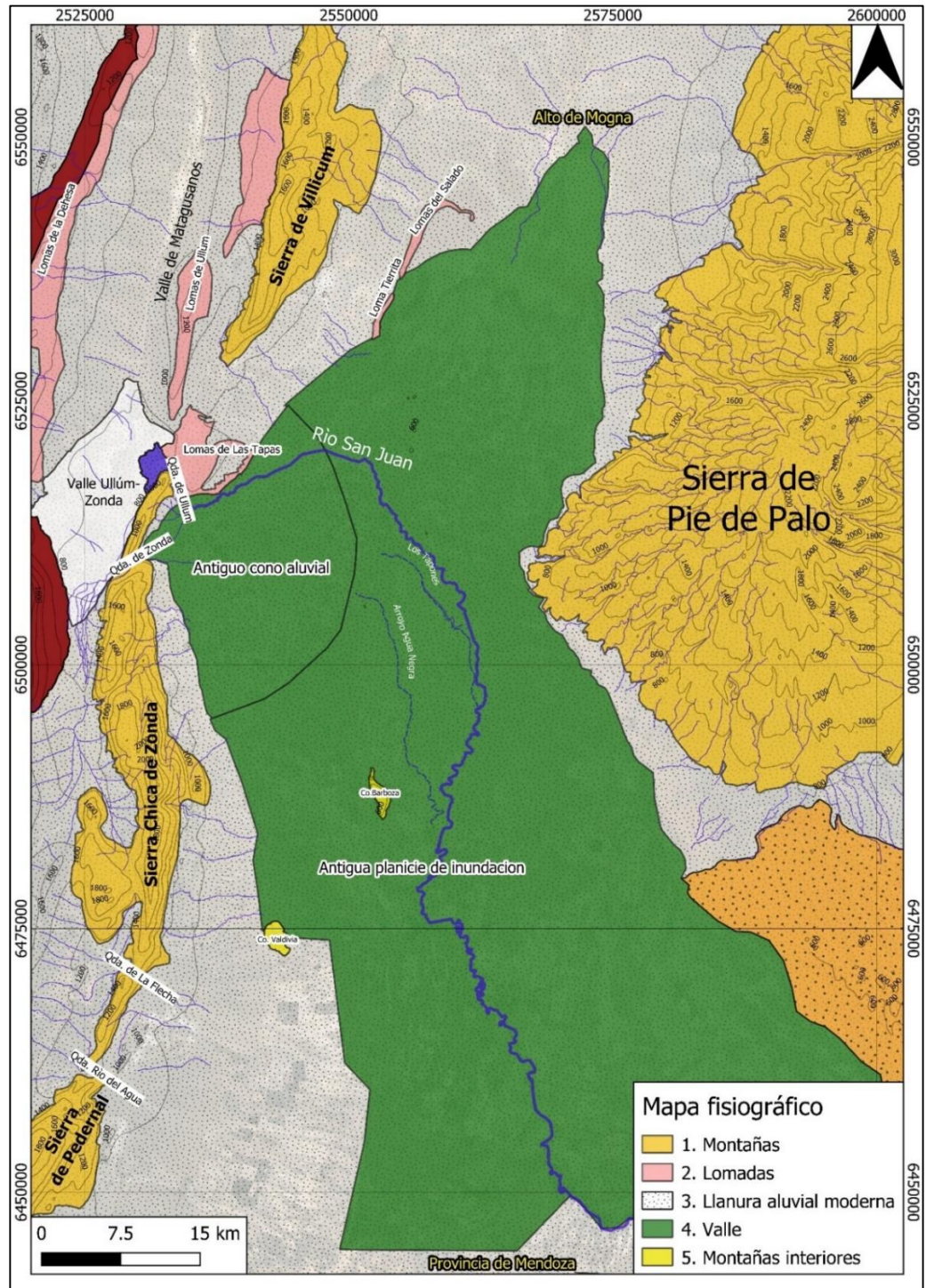


Figura 2.1: Mapa fisiográfico del Valle de Tulum, modificado de Rocca (1969).

La Sierra de Pie de Palo está constituida por rocas ígneas y metamórficas de edad Precámbrica, y presenta, sedimentitas neógenas y sedimentos cuaternarios en sus bordes. La parte más elevada se localiza en su parte media con 3165 msnm y su forma es elíptica, con eje mayor en dirección suroeste-noreste; tiene 80 km de longitud y 35 km de ancho. Además al sur se destaca los Médanos Grandes, depósitos eólicos que alcanzan alturas de 750 metros.

2) Lomadas: se localizan al norte de la Sierra Chica de Zonda, y en ambos lados de la Sierra de Villicum. Se describen como cordones bajos, alargados y angostos, constituidas por sedimentitas neógenas. Entre ellas se destacan: Loma del Salado con 900 msnm, Loma de La Tierrita, Lomas de La Tapias con 800 msnm y Loma de Ullúm con 1200 msnm.

3) Llanuras aluviales pedemontanas: se tratan de los niveles pedemontanos que descienden desde los principales elementos positivos hacia el Valle de Tulum. Comprende dos grupos:

- a. Llanura aluvial antigua: antiguos remanentes de llanura aluvial elevada por tectonismo, por lo que ocupan zonas topográficas altas. Se encuentran en ambos lados de la Sierra de Villicum, al este de la Sierra Chica de Zonda y sobre el faldeo occidental de la Sierra de Pie de Palo. Está constituida por una delgada cubierta de grava antigua, dispuestas sobre sedimentitas de edad neógena; debido a sus dimensiones, no es posible su representación en el mapa de la figura 2.
- b. Llanura aluvial moderna: corresponde al acarreo reciente, y por lo tanto, ocupa zonas topográficas bajas. Se trata de gravas y arenas cuaternaria arrastrada por los cursos fluviales. Están presentes en el pie occidental de la Sierra de Pie de Palo y ambos lados del cordón Pedernal-Chica de Zonda-Villicum.

4) Valle: representa el Valle de Tulum, una zona tectónicamente deprimida. Tiene forma de franja alargada en dirección norte-sur, con longitud de 100 km y ancho que varía entre 5 km al norte y 50 km al sur, por lo que abarca una superficie de 3300 km² aproximadamente. Se divide en dos subunidades:

- a. Antiguo cono aluvial del Río San Juan: se encuentra constituido por sedimentos cuaternarios que ocupan el centro-oeste del valle, en forma triangular y con extremo apical en la boca de la quebrada de Zonda donde dominan materiales gruesos (incluso bloques), mientras que hacia el extremo distal se presentan materiales finos, y granulometrías intermedias en la parte central. Presenta una superficie de 300 km²,

longitud media de 19 km y pendiente media de 7,2 m/km. El extremo apical, posee cota de 750 msnm y el distal cotas entre 600 - 610 msnm.

- b. Antigua planicie de inundación del Río San Juan: está compuesta por arenas finas, limos y arcillas cuaternarias, que ocupan un área de 3000 km². Su pendiente desciende suavemente hacia el sureste y coincide con la pendiente regional, 1,25 m/km. Está surcada por el Río San Juan, que actualmente margina su antiguo cono aluvial por el norte (al pie de Lomas de las Tapias) desde la quebrada de Ullúm, y finaliza al sur, en la Laguna de Guanacache.

5) Montañas interiores: se tratan de los Cerros de Valdivia, Barboza y Salinas, con 800 msnm, 600 msnm y 790 msnm respectivamente. Están conformadas por rocas metamórficas de edad Precámbrica y tienen forma alargada con 5 km de longitud y 1,5 km de ancho aproximadamente.

2.2 Clima

El clima de un lugar está definido por la temperatura, humedad, viento, precipitaciones, etc., que describen el tiempo meteorológico de ese sitio. Es decir, el clima de una región es el resultado de un conjunto de condiciones atmosféricas que se presentan típicamente en ella a lo largo de los años (Pereyra, 1996); a su vez, se encuentra íntimamente relacionado con la topografía, y controla el tipo suelo y la vegetación.

Poblete *et al.* (1989) aplicaron la clasificación climática de Köppen *et al.* (1936), basada en temperaturas medias y precipitaciones mensuales, para determinar el régimen climático de la Provincia de San Juan. Estos autores, definieron que el Valle de Tulum presenta un clima seco de tipo desértico o árido según la clasificación de Thornthwaite (1946), ya que la evapotranspiración excede la precipitación media anual (Pereyra, 1993); existe una marcada deficiencia hídrica, y en consecuencia, no hay cursos de agua permanente alimentados por las precipitaciones (el Río San Juan, principal fuente hídrica del valle, es de origen nivo-glacial).

La temperatura media anual del Valle de Tulum es de 17,2 °C, donde la máxima media del mes más cálido (enero) es de 34,6°C y la mínima media es de 19 °C. El mes más frío es julio, y alcanza una temperatura mínima media de 0,8 °C y la máxima media es de 16 °C (Pereyra, 1993).

La evapotranspiración potencial media es 1500 mm/año, la precipitación media anual es de 92,7 mm, y la humedad relativa promedio es de 54% (Pereyra, 1995); las precipitaciones son cortas y torrenciales (Salinas, 2004) y el 85% ocurre en verano.

Además, el clima del valle se encuentra controlado por el levantamiento cenozoico de los Andes y por la gran Diagonal Árida Sudamericana. El primer factor actúa como barrera orográfica que imposibilita la llegada directa de masas húmedas (Ehlers y Poulsen, 2009), mientras que el segundo, representa una franja de escasa lluvias que atraviesan sesgadamente el continente sudamericano, desde el norte de Perú hasta la costa patagónica (Terrizzano *et al.*, 2017).

El Viento Zonda es característico del área de estudio, suele desarrollarse entre mayo y noviembre, y se destaca por su extrema sequedad y altas temperaturas. Este fenómeno se origina en el Pacífico como masa de aire húmedo y fresco, que asciende sobre la Cordillera de los Andes; allí la humedad se condensa, genera nubes y precipita en forma nieve y lluvia. Al traspasar la cadena montañosa, aumenta adiabáticamente la temperatura en 1°C cada 100 metros de desnivel dando lugar al viento de 30°C (o más) y una disminución de la humedad ambiente hasta un 5%. Posteriormente se presenta el viento sur, el cual se caracteriza por ser fresco y húmedo (Lloret, 2000).

2.3 Hidrografía

El curso principal del Valle de Tulum es el Río San Juan, que atraviesa el sector central de norte a sur y abastece a los valles de Ullúm-Zonda y Tulum. Este río conforma la Cuenca Hidrográfica del Río San Juan (Figura 2.2), la cual se extiende desde el paralelo 30°31' S hasta el límite con Mendoza (Lloret, 2000), entre Cordillera de los Andes y Sierra Pie de Palo; abarca una superficie de 38.462 km² (Subsecretaría de Recursos Hídricos, 2002) y ocupa el sector suroccidental de la Provincia de San Juan y un pequeño sector del norte de Mendoza (Lupano, 2008).

El Río San Juan nace en el lugar llamado Las Juntas al norte del departamento Calingasta, debido a la confluencia entre Ríos de Los Patos y Castaño; estos son colectores de una importante red de afluentes que tiene sus cabeceras en las altas cumbres cordilleranas (Lupano, 2008). El Río de Los Patos aporta alrededor del 80 % al caudal anual medio del Río San Juan, mientras que el 20% restante proviene del Río Castaño (Hong, 1969).

Es de origen nivo-glacial cordillerano, de caudal permanente, y variablemente estacional y anual (Lloret, 2000); en diciembre del año 1919, se registró un caudal medio de 669,3 m³/s (máximo absoluto) y para el mismo mes del año '68, se obtuvo un valor de 13,6 m³/s (mínimo absoluto). Los máximos caudales se producen entre noviembre y febrero, y el resto del año el flujo disminuye sustancialmente según las condiciones reinantes en la cuenca superior (Wetten, 1989). El deshielo de glaciares y el factor nieve son muy importante para la hidrología de San Juan (Peyric, 2017); las precipitaciones nivales, generalmente, comienza en abril y se extiende hasta septiembre, pero el mes de agosto es el periodo que registra las mayores precipitaciones. Toda la nieve acumulada funde durante los meses de verano y aporta el 55 % anual (Hong, 1969).

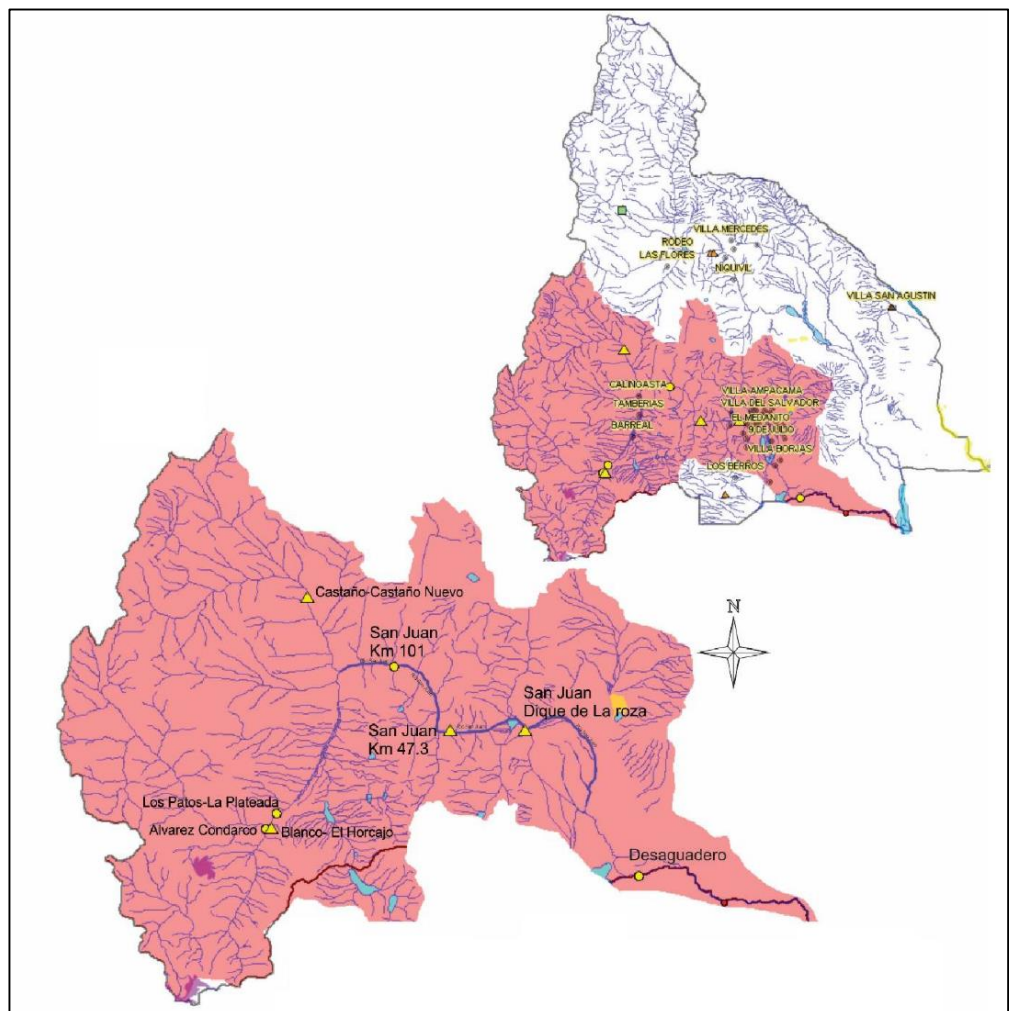


Figura 2.2: Sistema hidrográfico de la Cuenca del Río San Juan, modificado de Rodríguez (2019).

Sin embargo, el caudal del Río San Juan no es suficiente como para satisfacer la necesidad de agua para la ciudad de San Juan, por lo que se construyeron obras hidroeléctricas (Figura

2.3). Las obras realizadas sobre el mencionado río son (Lloret, 2000; Montenegro, 2019): Dique Caracoles (565 hm³), Punta Negra (500 hm³), Embalse de Ullúm (440 de hm³), Dique nivelador-derivador José Ignacio de la Roza y Dique Partidor San Emiliano, desde donde el agua se distribuye a través de redes de riego para consumo y uso agrícola. Además, actualmente, se está desarrollando el dique Tambolar, que una vez concluido se convertirá en el complejo hidroeléctrico con el mayor volumen de embalse (605 hm³).

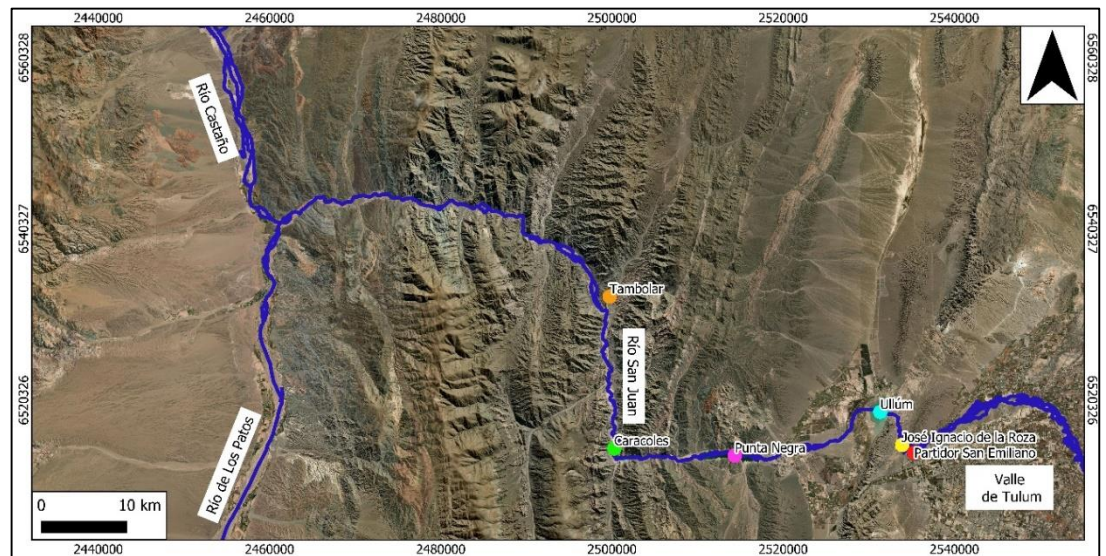


Figura 2.3: Embalses hidroeléctricos de la provincia de San Juan

El sistema de regadío es completamente artificial con canales o acequias de cemento; este sistema, nace a partir del Dique Partidor San Emiliano donde el agua se distribuye por tres canales: Canal Norte, que abastece las zonas norte y este del valle, Canal Benavides, destinado al abastecimiento de la zona urbana, y el Canal Céspedes, que provee agua a la zona sur.

Desde La Juntas, el Río San Juan ingresa en el ámbito de Precordillera, fluye de oeste a este y se desvía hacia el sur (debido al control estructural de Sierra Dehesa) hasta llegar al dique de Caracoles (Lloret, 2000; Lupano, 2008); recibe aportes de los Ríos Uruguay y Saso, que drenan agua en forma esporádica en verano. Al salir de los Caracoles, el agua se dirige hacia el dique Punta Negra para luego ingresar al Valle Ullúm-Zonda, donde se ramifica en varios brazos y direcciones dentro de una amplia planicie aluvial hasta llegar al Embalse de Ullúm y desembocar en el Valle de Tulum (Dique José Ignacio de la Rosa y Partidor San Emiliano); desde Las Juntas hasta San Emiliano, el Río San Juan, tiene una longitud de 250 km aproximadamente (Hong, 1969). Finalmente, el río atraviesa el Valle de Tulum desde el norte

y continúa hacia el sureste para desembocar en la Laguna de Guanacache (límite entre San Juan, Mendoza y San Luis).

Sobre el Río Los Patos se ubican dos estaciones de mediciones: Álvarez Condarco y La Plateada, mientras que el Río Castaño tiene la estación Castaño Nuevo. Sobre el Río San Juan, se encuentra la estación km 47,3 cuyas mediciones indican el caudal total para el Valle Ullúm-Zonda, y la estación La Puntilla (Dique José Ignacio de La Roza), afora el caudal total que ingresa al Valle de Tulum (Hong, 1969).

Otros cursos de agua que se sitúan en el Valle de Tulum son los arroyos de Agua Negra y Los Tapones, los cuales son considerados como antiguos cauces del Río San Juan; tiene carácter temporarios, reciben agua de desagüe y de drenaje natural (descarga freática) o artificial (drenes) en diferentes épocas del año. También existen cursos temporarios, de menor importancia, localizados alrededor de los cordones montañosos; se tratan de ríos y arroyos que dan lugar a pequeñas aguadas de las que se abastecen animales y ciertas comunidades (Wetten, 1989).

Aportes del Río San Juan ingresan al subsuelo del Valle de Tulum, a través de los depósitos cuaternarios permeables, y constituyen la cuenca hidrogeológica (Rocca, 1969; Zambrano *et al.* 1998; Zambrano y Suvires, 2008). Es decir, la cuenca de agua subterránea del valle esta recargada por el mencionado río, principalmente, en el ápice del antiguo cono aluvial del Río San Juan (o abanico aluvial) y cauce actual, y en menor medida, por medio de la antigua planicie de inundación del Río San Juan (o llanura aluvial) e infiltración de los excesos de riego (Lloret, 2000).

2.4 Geomorfología

Aparicio (1966) distinguió dentro de la provincia de San Juan dos tipos de relieves, los cuales denominó "positivo" y "negativo" (Suvires, 1996); los primeros corresponden a los cordones montañosos elevados en dirección norte-sur y los segundos, se refiere a las zonas bajas depresivas y elongadas en sentido meridional. Es decir, el relieve del territorio sanjuanino presenta dos grandes diferencias, por un lado aquellos elevados-montañosos que representan afloramientos rocosos precuaternarios y por otro lado, los relieves bajos (valles y piedemontes) que bordean a los anteriores y están dominados por depósitos cuaternarios (Suvires y Luna, 2008). Por lo tanto, el Valle de Tulum es un relieve de tipo negativo, ya que se trata de una

depresión de origen tectónica rodeada por los elementos positivos de Precordillera Oriental y Sierra Pie de Palo.

El Valle de Tulum se encuentra relleno por materiales aluviales y fluviales cuaternarios aportados, principalmente, por el Río San Juan; estos sedimentos forman el abanico y la planicie, que se ubican sobre rocas neógenas, paleozoicas y/o precámbricas (Rocca, 1969; Zambrano, 1986; Lloret y Suvires, 2006); están ocupados por la ciudad capital de la provincia y departamentos adyacentes.

Suvires *et al.* (1999) destacan tres dominios (Figura 2.4):

1. Ambiente montañoso:

Corresponde a Precordillera Oriental, representada por el cordón estructural de las Sierras de Pedernal, Chica de Zonda y Villicum, y Sierra Pie de Palo, que forma parte de las Sierras Pampeanas Occidentales (Caminos, 1999)

Precordillera Oriental presenta un importante control estructural con fallas y pliegues; es una faja plegada y corrida, de tipo piel gruesa, con vergencia occidental, que da lugar al corrimiento Pedernal-Zonda-Villicum de rumbo NNE-SSO (Ortiz y Zambrano, 1981; Allmendinger *et al.*, 1990). En cambio, Sierra Pie de Palo, constituye un gran bloque delimitado por importantes fallas inversas de alto ángulo.

También se presentan relieves positivos menores como Lomas de Las Tapias, Lomas de Ullúm, entre otras, y los Cerros Barboza y Valdivia. Las primeras se describen como cordones bajos, alargados y angostos (Rocca, 1969), y las últimas unidades, son bloques estructurales elevados integrados, que junto con la Sierra Pie de Palo pertenecen al Sistema de Sierras Pampeanas Occidentales; a su vez, están rodeados por bloques, rodados, y gravas de edad neógena (Suvires y Luna, 2008).

2. Ambiente planizado:

Se encuentra limitado entre los cordones montañosos principales, es decir, corresponde la zona de transición del Valle de Tulum. Está integrado, principalmente, por el abanico y la planicie aluvial del Río San Juan.

El antiguo cono aluvial tiene su extremo apical en la quebrada de Zonda, donde dominan bloques y gravas gruesas, y hacia la parte distal el material dominante es arenas finas, arcillas y limos (Rocca, 1969); en el sector central del abanico, se presentan gravas medianas a finas y

arenas gruesas a medianas, que originan una zona de excelente infiltración de agua. Está constituido por ígneas, vulcanitas y sedimentitas dentro de una matriz arenosa (Suvires y Luna, 2008).

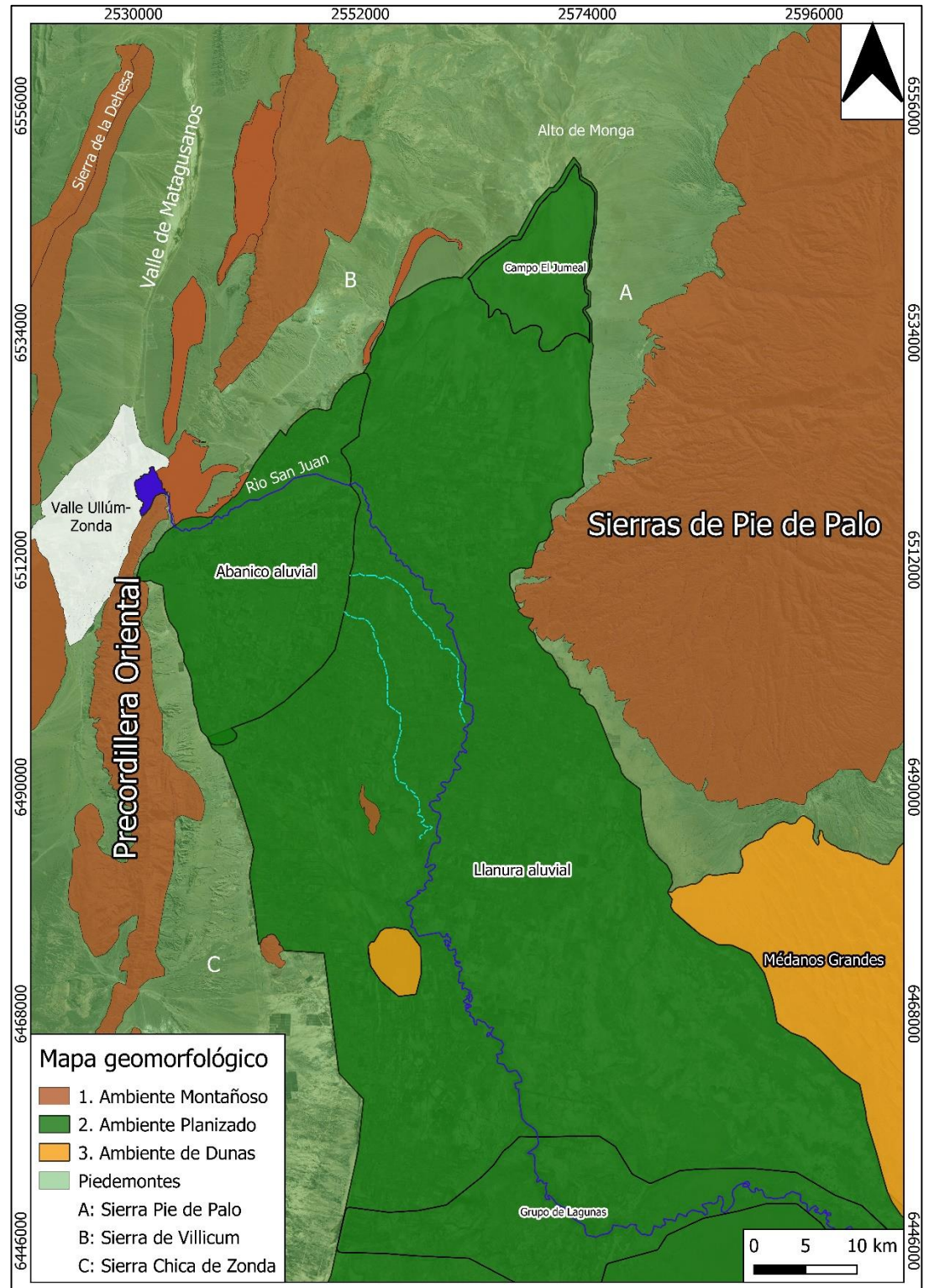


Figura 2.4: Mapa Geomorfológico del Valle de Tulum, modificado de Suvires y Luna (2008).

La planicie aluvial cubre la mayor parte del valle, desde la zona donde se unen las bajadas pedemontanas de las Sierras de Villicum y Pie de Palo (Alto de Mogna) hasta el límite con Mendoza (Rodríguez, 2019); está dominada por depósitos finos como arenas finas, arcillas, limos y sales (Suvires y Luna, 2008). Estos depósitos están cubiertos por sedimentos eólicos, que forman pequeños campos de dunas; por lo que, Zambrano y Suvires (1987), mencionan una planicie mixta, fluvio-eólica.

Además, en esta planicie, se presenta el ambiente fluvial del actual Río San Juan, cuyo cauce experimentó múltiples desplazamientos durante el Cuaternario. Estos cambios, se reconocen por numerosos paleocauces, tales como los arroyos Los Tapones y Agua Negra (Suvires y Luna, 2008).

En este ambiente, existen dos niveles de base regionales: A- Campo El Jumeal al norte, un barreal constituido por sedimentos finos, y B- Grupo de Lagunas del Rosario, Hechuna, la Balsita y de Guanacache al sur, que corresponde a sectores bajos y deprimidos donde drenan el Río San Juan (Suvires y Luna, 2008). También se destacan los piedemontes de la Sierra Pie de Palo, Sierra Chica de Zonda y Villicum, los cuales se formaron debido a los arroyos que descienden desde las laderas.

3. Ambiente de dunas:

Representado por los Médanos Grandes ubicados al sur de la Sierra de Pie de Palo; son depósitos de arena, de tamaño variable entre fina a media, generados por vientos provenientes del sur (Suvires y Luna, 2008). Estos depósitos cubren gran parte de la superficie del terreno, contiene un espesor de arena que superaran los 100 metros y abarca una superficie de 2400 km² (Tripaldi, 2002).

2.5 Estructuras

En el Valle de Tulum existen fallas que se observan en superficie y/o en imágenes satelitales, y otras que no son tan visibles, y por lo cual se reconocen mediante métodos directos (cambios morfológicos, rupturas de pendientes, variaciones de espesores) o indirectos (sondeos geoelectricos, pruebas sísmicas, etc.). Estas fracturas se generaron en diferentes épocas, y prácticamente, se agrupan en Precuatnarias y Cuaternarias; estas últimas, controlan el movimiento del agua subterránea (Rocca, 1969).

Las estructuras del valle se describen mediante el “Sistema de Fallas de Tulum” definido por Zambrano y Suvires (2008); estos autores, mencionan importantes fallas inversas (casi verticales) con rumbo NNE-SSO y buzante hacia el SSE, que limitan bloques elevados y hundidos, y los cuales intervienen en el movimiento de los recursos hídricos superficiales y subterráneos (Rodríguez *et al.*, 2018).

Rocca (1969), menciona la existencia de una falla subterránea cuaternaria denominada Falla de Tulum; fractura de tipo inversa, que se extiende desde la Sierra Pie de Palo hasta el Cerro Valdivia con dirección NE-SO y buzante al sureste (84 Km de longitud). Esta importante estructura, divide la cuenca hidrogeológica del Valle de Tulum en dos subcuencas: Subcuenca de Tulum superior y Subcuenca de Tulum inferior, donde el bloque suroriental se encuentra elevado.

Zambrano (1986), describe que el estilo estructural del Valle de Tulum es de bloque de basamento delimitados por fallas de alto ángulo y con rumbo paralelo a Precordillera Oriental; la presencia de numerosas fracturas generan condiciones de confinamiento, mezcla de diferentes aguas subterráneas (tanto vertical como lateralmente), incrementos en la porosidad y permeabilidad, y áreas tectónicamente hundidas con rellenos de espesores diferentes.

Zambrano y Suvires (1987), mediante sondeos geoeléctricos y perfiles de subsuelo reconocieron las siguientes familias estructurales:

1-Rumbo NNO-SSE: fallas inversas, de alto ángulo, y paralelas a las fallas que limitan por el oeste a los Cerros de Barboza y Valdivia (Comínguez y Ramos, 1991; Costa *et al.* 2000).

2-Rumbo NNE-SSO: fallas inversas y de alto ángulo, paralelas a las fallas que limitan por el oeste la Sierra de Pie de Palo y algunas que afloran en la Sierra Chica de Zonda.

3-Rumbo ENE-OSO: normales o de desplazamiento de rumbo, y se disponen transversalmente a las primeras.

4-Rumbo ONO-ESE: son fallas normales y transversales a las segundas.

Mediante la recopilación de datos de sondeos geoeléctricos, perfiles litológicos y geofísicos, y pozos agua, Zambrano y Suvires (2008) definieron la existencia de un pilar tectónico segmentado por numerosas fallas transversales y oblicuas al rumbo de las mismas (Figura 2.5); la presencia de estas fractura, también está indicada por resultados de relevamientos gravimétricos, y procesamiento de líneas sísmicas (Comínguez y Ramos 1991; Vergés *et al.* 2007, Costa *et al.* 2000, Ramos *et al.*, 2002; Meigs, 2006)

El Sistema de Fallas de Tulum está conformado por una sucesión de bloques tectónicos, altos y bajos, de 5 a 10 km de ancho, entre 5 y 20 km de largo, y alineados (principalmente) en dirección NNE-SSO; la segmentación de este sistema origina cambios bruscos en el espesor del relleno cuaternario en cortas distancias (los bloques hundidos presentan mayor material).

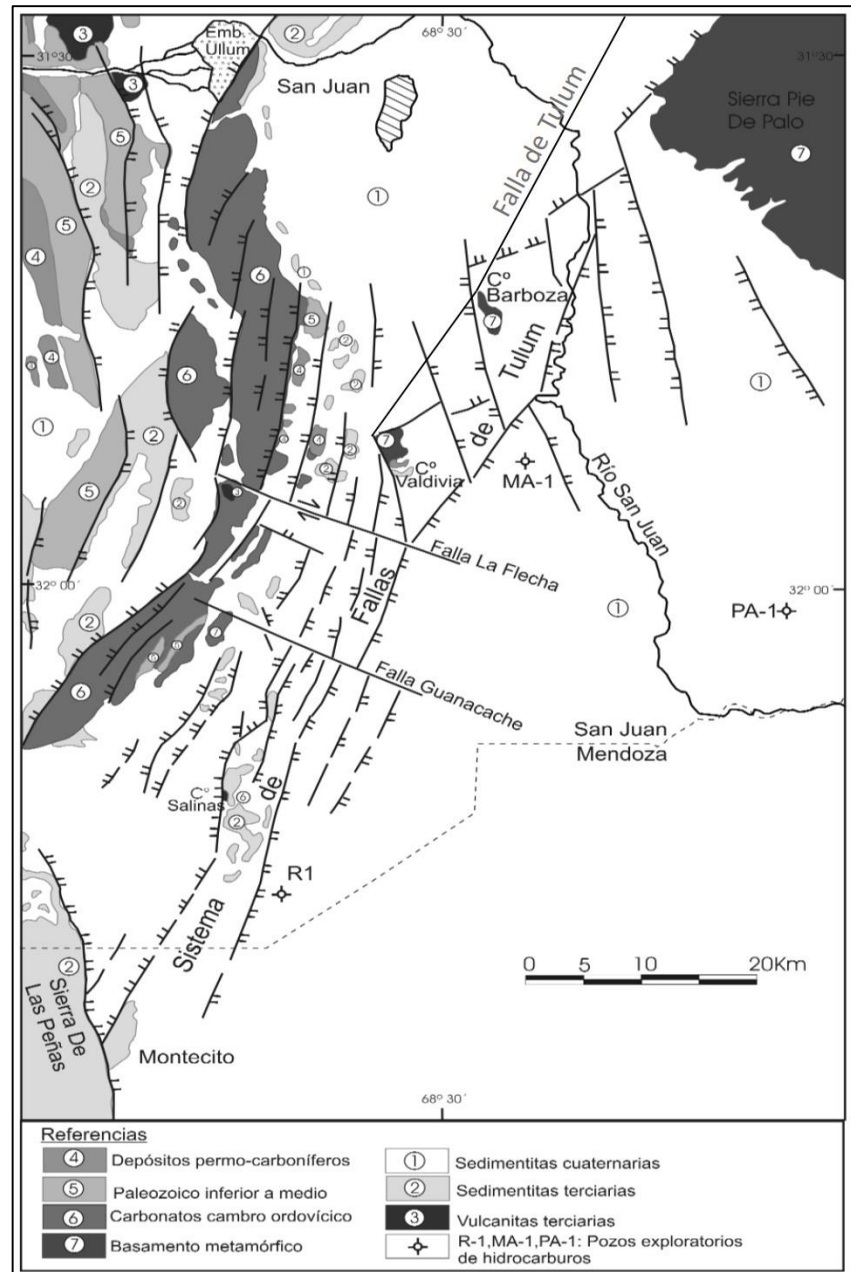


Figura 2.5: Sistema de fallas de Tulum, modificado de Zambrano y Suvires (2008) y Rocca (1969).

Las fallas que limitan a los bloques son de carácter inversas (mayormente), paralelas o subparalelas a Precordillera Oriental (Zambrano y Suvires, 2008); generadas por el tectonismo compresivo del Mioceno que afectó a la región. Las fallas transversales como La Flecha y

Guanacache, son directas debido a su relación con la dirección de los esfuerzos compresivos (Rossa *et al.*, 1986).

Dichas estructuras se formaron por reactivación de fallas preexistentes; el sistema de fallamiento del valle muestra tectonismo extensional antes del Paleógeno-Neógeno, sin embargo, el tectonismo del Pleistoceno tardío-Holoceno temprano cambió el tipo de normales a inversas (Zambrano y Suvires, 2008).

La deformación neotectónica se observa en los bordes del Valle de Tulum, como en los piedemontes de Precordillera Oriental y Sierra de Pie de Palo, tales como Fallas de La Laja, Marquesado, La Rinconada, Los Berros y fallas de Cerro Salinas (Bastías *et al.*, 1984, Martos, 1987); estructuras significativas que demuestran este estilo de deformación.

3. Geología

3.1 Geología Regional

El área de estudio ocupa el sector centro-sur del Valle de Tulum, el cual está limitado por las provincias geológicas de Precordillera y Sierras Pampeanas Occidentales (Figura 3.1).

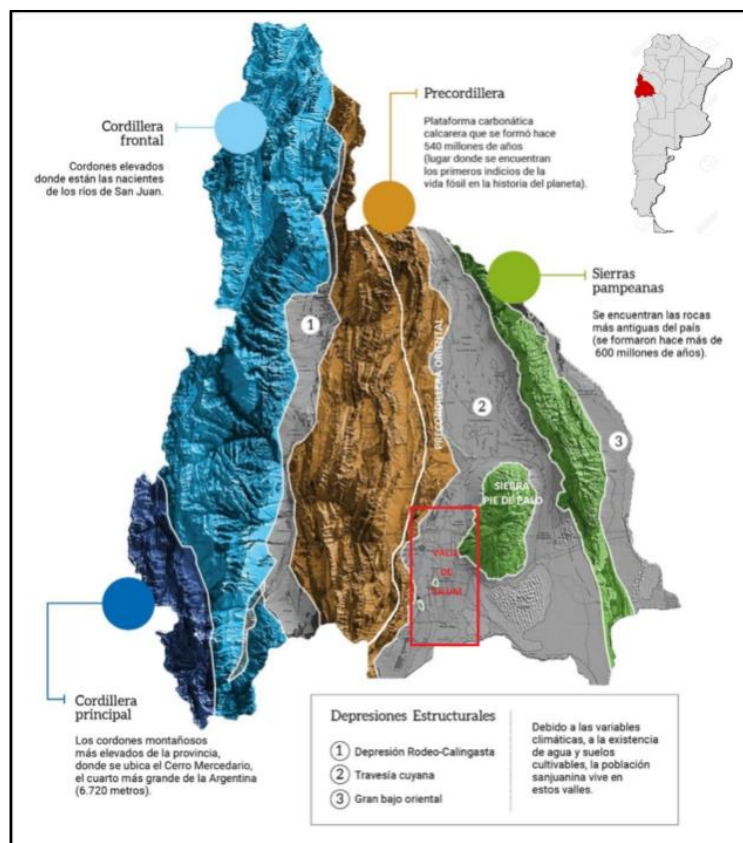


Figura 3.1: Provincias geológicas y depresiones de la Provincia de San Juan (Pellegrinuzzi, 2023).

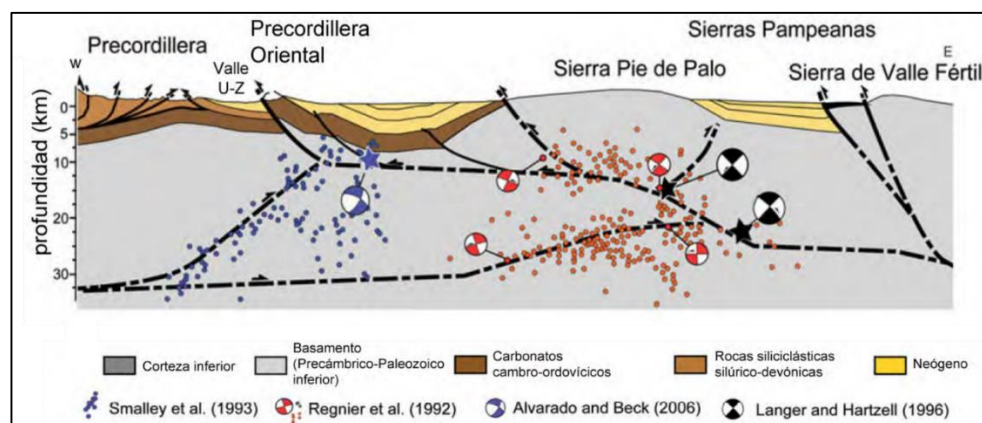


Figura 3.3: Sección transversal cortical de Precordillera Oriental y Sierras Pampeanas. Modelo de Siame et al. (2015) basado en Von Gosen (1992).

Con el fin de reconocer las unidades geológicas del Valle de Tulum, se utilizó el Programa Nacional de Cartas Geológicas (Cardó *et al.*, 2000) y Geología Regional Argentina (Caminos, 1999); se elaboró un mapa geológico, en escala 1:350,00, adaptado a los fines de esta investigación (Anexo 1).

3.1.1 Estratigrafía

Precámbrico:

1. Basamento

Aflora en la Sierra Pie de Palo, y en los Cerros de Barboza y Valdivia; está compuesto por metamorfitas grenvillianas de bajo y medio a alto grado (Key *et al.*, 1996) y migmatitas con metamorfismo Ordovícico. Las rocas afectadas por metamorfismo de bajo grado (facies de esquistos verdes) comprenden mármoles, esquistos carbonaticos, cuarcitas y esquistos derivados de metarenitas cuarzosas. Mientras que la asociación de medio a alto grado (facies de anfibolitas almandínicas) presentan la mayor extensión y comprenden esquistos, anfibolitas y gneises (Ramos, 1999). La composición de los intrusivos varía desde gabros tholeíticos a tonalitas y granodioritas asociadas a subducción (Caminos, 1999).

Cámbrico:

Afloran en las Sierras de Pedernal-Chica de Zonda-Villicum, y están representas por el Grupo Marquesado.

2. Grupo Marquesado:

Formación La Laja

Se encuentra integrada por cuatro miembros: El Estero, Soldano, Rivadavia y Juan Pobre (Baldis y Bordonaro, 1981), los cuales totalizan entre 800 metros y 1.200 metros de espesor de calizas, calizas arcillosas y margas. Abarca edades desde el Cámbrico Inferior Tardío hasta el Cámbrico Medio (Bordonaro, 2003), dada la presencia de biozonas de trilobites homologadas con las de la plataforma norteamericana (Laurentia) tales como las Zonas de *Olenellus*, *Plagiura-Poliella*, *Albertella*, *Glossopleura* y *Ehmaniella*, y *Bolaspidella* (Bordonaro, 1986).

Formación Zonda

Comprende 350 metros de calizas dolomíticas y dolomías, con estructuras sedimentarias de poca profundidad (grietas de desecación, bird eyes, etc.). Es asignada al Cámbrico Superior Temprano (Bordonaro, 1980).

Formación La Flecha

Posee una potencia promedio de 500 metros y se caracteriza por una alternancia cíclica de calizas y dolomías con chert (Armella, 1994) La edad se halla dentro del Cámbrico Superior Medio-Cámbrico Superior Tardío, debido a la presencia de trilobites (Keller *et al.*, 1993).

Formación La Silla

Está integrada por casi 400 metros de calizas macizas con intercalaciones de dolomías biolaminadas (Bordonaro, 2003). Su edad es Cámbrico Superior Tardío-Ordovícica Inferior Temprano debido a la presencia de trilobites: *Plethopeltisobtusus* del límite Cámbrico-Tremadociano perteneciente a la Zona de *Missisquoia* y conodontes de la Zona de *Cordilodus intermedius* del Tremadociano, hasta la Zona de *Paltodusdeltifier* del Tremadociano superior (Keller y Bordonaro, 1993).

Ordovícico:

3. Formación San Juan

Está conformada por un espesor de 400 metros (promedio) de calizas macizas, calizas lajosas y margas (Beresi y Bordonaro, 1984) con fauna de trilobites, braquiópodos, crinoideos, esponjas y arrecifes estromatopóridos (Keller y Bordonaro, 1993). Estas rocas corresponden a

la última unidad carbonática de margen pasivo, son asignadas al Ordovícico inferior tardío y afloran a lo largo de Precordillera Oriental (Sarmiento, 1986; Vaccari, 1993).

4. Formación Gualcamayo

Estratigráficamente, se ubica sobre la Formación San Juan y se expone al norte de la Sierra de Villicum; se compone de lutitas negras que marcan el fin de la sedimentación de margen pasivo (Baldis y Beresi, 1981; Beresi, 1990 y Astini, 1994). Presenta 32 m de espesor y en la base de la Formación, aparece la Zona de *Paraglossograptustentaculatus* del Ordovícico medio temprano.

5. Grupo Trapiche:

Formación La Cantera

Constituye la unidad inferior del Grupo Trapiche (Cardó *et al.*, 2000) e inicia con conglomerados intercalados con pelitas negras (que se apoya en discordancia erosiva sobre la Formación anterior) seguido de areniscas y pelitas turbidíticas con bloques de caliza redepositados; se expone en la Sierra de Villicum y comprende 120 metros de espesor.

Su edad es Ordovícico medio tardío, debido a la presencia de graptolitos de la Zona de *Hustedograptus teretiusculus* en los niveles basales y de *Nemagraptus gracilis* en los términos cuspidales (Peralta, 1993).

Formación Don Braulio

Constituye la unidad superior del Grupo Trapiche (Cardó *et al.*, 2000). Se trata de diamictitas basales, seguido de fangolitas, y lutitas y areniscas ferríferas vinculadas a la glaciación Hirnantiana; totalizan 30 m de espesor. Se expone en la Sierra de Villicum y su edad corresponde al intervalo Ordovícico Superior-Silúrico inferior debido a la presencia de *Dalmanitina sudamericana*, *Eohomalonotus sp.* (Baldis y Blasco, 1975), braquiópodos (Levy y Nullo, 1974), fauna de Hirnantia (Benedetto, 1986), *Glyptograptus persculptus* (Peralta y Baldis, 1990) y *Atavograptus atavus* (Peralta, 1986).

Silúrico-Devónico:

Estas rocas afloran en forma saltuaria a lo largo del borde este de Precordillera Oriental; en la Sierra de Villicum (Peralta, 1984 y 1993), el silúrico está representado por la parte superior de la Formación Don Braulio y por la Formación Rinconada, las cuales sobreyacen concordantemente a los depósitos del Ordovícico y están por debajo de sedimentitas neógenas

que la cubren en discordancia angular. En cambio, a lo largo de las Sierras Pedernal y Chica de Zonda, el silúrico solo está representado por la Formación Rinconada, que yace en discordancia erosiva sobre las calizas ordovícicas de la Formación San Juan y está cubierta en discordancia angular por depósitos carboníferos (Keidel, 1938; Braccacini, 1946; Heim, 1948; Amos 1954 y Harrington, 1971).

6. Formación Rinconada

Mélange sedimentario u olistostroma, compuesto por olistolitos calcáreos ordovícicos (Formación San Juan) inmersos en una fina matriz pelítica-areniscosa (Amos, 1954; Borrello, 1969). Peralta y Uliarte (1986), señalaron 600 m de espesor.

Keidel (1938) y Cuerda (1982), mencionan edad silúrica para esta unidad, con base en *Monograptus argentinus*. A su vez, Amos y Fernández (1977), registran el hallazgo de *Leptocoelia nuñezi* del devónico inferior, por lo cual esta unidad presenta este rango de edad.

Carbonífero:

Estas rocas afloran en el faldeo oriental de la Sierra Pedernal y Chica de Zonda, y están representadas por la Formación Jejenes.

7. Formación Jejenes

Está integrada por tres miembros: a. El Inferior, compuesto por una unidad conglomerádica con clastos de calizas e intercalaciones de areniscas. b. Intermedio, constituido por areniscas y c. Miembro conglomerádico con intercalaciones de psamitas y pelitas de probable origen glacial (Bercowski *et al.*, 1991); esta secuencia se apoya en discordancia angular, sobre las Formaciones de San Juan y La Rinconada. Se le asigna la edad de Carbonífero inferior por la Zona de *Nothorhacopteris-Botrychiopsis-Gingophyllum* (NBG). Además, por semejanzas litológicas, se la puede comparar con las unidades de la Cuenca Paganzo.

8. Traquitas La Flecha

Bajo esta denominación se agrupan una serie de vulcanitas de edad incierta, que se encuentran al sur de la Sierra Chica de Zonda, en la quebrada de La Flecha (Rossa *et al.*, 1986); se tratan de traquitas con fenocristales de sanidina en una pasta formada por minerales félsicos fuertemente teñidos por limonita.

Neógeno:

Las sedimentitas neógenas son de carácter sinorogénico, pues están asociadas con el levantamiento y apilamiento de Precordillera durante el Mioplioceno, en forma sincrónica con la expansión del volcanismo de arco hacia el este (Jordan *et al.*, 1983 y Key *et al.*, 1987).

9. Formación Lomas de Las Tapias

Se encuentra alrededor del Valle de Tulum y posee una edad de $7 \pm 0,8$ Ma (Mioceno Superior) obtenida en tobas por método de trazas de fisión (Bercowski *et al.*, 1987).

Serafini *et al.* (1986), reconocieron tres miembros: Miembro inferior “Limonita La Colmena”, Miembro intermedio “Areniscas Albardón” y Miembro superior “El Chilote”. El primero está constituido por 263 metros de conglomerado brechoso basal seguido de limolitas intercaladas con areniscas finas a medianas. El segundo consiste en 1.350 metros de areniscas conglomerádicas (en parte tobáceas) y alternancia de areniscas-limolitas. El último miembro, está compuesto por potentes bancos de conglomerados con clastos de vulcanitas, carbonatos y grauvacas, con intercalaciones de areniscas que totalizan 570 metros de espesor.

10. Formación Mogna

Sus depósitos se ubican al norte del Valle de Tulum y comprende entre 400-600 metros de conglomerados poco cementado con abundantes clastos de riolitas y otras vulcanitas provenientes del Grupo Choiyoi de Cordillera Frontal. Localmente, se interponen con areniscas de grano grueso y sabulitas.

Estudios magnetoestratigráficos han permitido establecer, para la base y el techo de esta unidad, una edad de 3,6 y 1,2 Ma (Milana, 1990a y 1990b) respectivamente (Pliopleistoceno).

Cuaternario:

Las unidades cuaternarias del Valle de Tulum están representadas por: depósitos aterrazados, depósitos aterrazados y caliche, lacustres, evaporíticos, eólicos, coluviales y aluviales.

11. Depósitos aterrazados

Afloran al norte del valle y constituyen los piedemontes más antiguos, los cuales están constituidos por fanglomerados de variada litología fuertemente condicionados por la

procedencia local. Estos depósitos preservan niveles topográficos variables, que en algunos casos alcanzan hasta 15 o 20 metros de altura (Cardó *et al.*, 2000)

No hay criterios para establecer su edad, pero debido a su posición subhorizontal, en aparente discordancia angular sobre la Formación Mogna (Pliopleistoceno), se le asignan una edad pleistocena.

12. Depósitos aterrazados y caliche

Se tratan de fanglomerados con abundantes clastos calcáreos que están cementados por material carbonático. La cementación se ve favorecida por la presencia de un activo fallamiento neotectónico, y que produce campos termales facilitando la precipitación de caliche; se conservan en la margen oriental de la Sierra de Villicum, a diferentes niveles topográficos. Además, en algunos sectores se forman cuerpos de Travertino (Cardó *et al.*, 2000).

13. Formación Valentín

Depósitos lacustres antiguos compuesto por fangolitas, de naturaleza friable y hasta 30 m de espesor. Estos depósitos han sido originados por el endicamiento temporario, producido en forma natural, del Río San Juan. Su génesis estaría controlada por los levantamientos intermitentes de la Sierra Chica de Zonda (efectos neotectónicos).

La edad mínima de los depósitos de las proximidades de Ullúm puede establecerse dadas las evidencias arqueológicas de asentamientos indígenas en aproximadamente 6.500 años de antigüedad (Uliarte *et al.*, 1990).

14. Depósitos evaporíticos

Se tratan de depósitos salinos junto con limos y arenas finas, las cuales conforman el Campo El Jumeal ubicado al norte del Valle de Tulum; han sido parcialmente ascendidos y se hallan en un avanzado proceso de disección (Cardó *et al.*, 2000).

15. Depósitos eólicos

Están representados por los Médanos Grandes ubicados al sur de la Sierra Pie de Palo; sedimentos arenosos parcialmente modificados por la acción aluvial, por lo que concentra limos y arcillas en las depresiones depositadas en barreales y lagunas temporarias. Son médanos fijos, que alcanzarían los 100 m de espesor (Regairaz *et al.*, 1987).

16. Depósitos coluviales

Estos depósitos conforman las bajadas actuales de los diferentes cordones montañosos, tanto de Precordillera Oriental como de Sierra Pie de Palo; se trata de conos de derrubios (también denominados taludes o conos de deyección) y abanicos coluviales generados por el sistema fluvial existentes en las quebradas (Cardó *et al.*, 2000).

La litología dominante es muy variada, textural y composicionalmente; se halla controlada por la litología local del área de procedencia, variando de fanglomerados gruesos en Sierra de Pie de Palo, y arenas, gravas y limos en Precordillera.

17. Depósitos aluviales

Su edad es Holocena y constituyen los depósitos del abanico y de la planicie generados por el Río San Juan; desde la quebrada de Zonda, estos sedimentos se expanden en un gran cono y se distribuyen sobre el Gran San Juan y departamentos adyacentes (Cardó *et al.*, 2000). Comprende materiales gruesos cerca del ápice del abanico aluvial y sedimentos finos hacia las partes distales, dejando en el centro granulometrías prácticamente intermedias (Rodríguez *et al.*, 2018). En cambio sobre la llanura, se presenta el dominio de materiales finos como arena fina, limos y arcilla.

Milana (1991), ha mostrado que las fracciones gruesas presentan procedencia exótica a Precordillera, dado que es común en los mismos la existencia de clastos de riolitas del Grupo Choyoi (Cordillera Frontal), lo que demuestra la naturaleza alóctona del avenamiento del Río San Juan. Aparecen clastos de grauvaca, riolitas, granitos, andesitas, conglomerados, brechas volcánicas, areniscas, arcosas, calizas, entre otras (Rocca, 1969).

3.2 Geología del subsuelo

Entre los años 1960 y 1962, la empresa Yacimientos Petrolíferos Fiscales (YPF) realizó perforaciones en el sector sur del Valle de Tulum, con el objetivo de evaluar un posible potencial de hidrocarburo y caracterizar el subsuelo desde el punto de vista geológico (Gianni, 2023).

El pozo PMA-1, ubicado en la localidad de Media Agua, alcanzó una profundidad total de 3,000 metros e identificó una potente secuencia de sedimentos cuaternarios y neógenos, apoyados sobre sedimentitas neopaleozicas y basamento precámbrico. En la Estación Punta de Agua del Ferrocarril General Belgrano, otra perforación alcanzó los 3,070 metros de profun-

Edades		Unidades	Litología	Comportamiento Hidrogeológico
Cuaternario	Holoceno	Unidad Cuaternaria	Gravas, arenas, limos y arcillas	Acuíferos más Importante
	Pleistoceno	Unidad Mogna	Conglomerados polimíctico	Acuífero
	Plioceno			
Neógeno	Mioceno tardío	Unidad Loma de Las Tapias	Limonitas, arcilitas, conglomerados y areniscas	Basamento Hidrogeológico
Paleozoico	Pérmico Carbonífero - Devónico Silúrico	Sedimentitas neopaleozoicas	Lutitas, areniscas y conglomerados	Basamento Resistivo
	Ordovícico - Cámbrico	Carbonatos	Calizas masivas, arcillosas, lajosas, margas, calizas dolomíticas, dolomías y dolomías con chert	
Precámbrico		Metamorfitas	Mármoles, esquistos carbonáticos, cuarcitas y esquistos derivados de metarenitas cuarzosas esquistos, anfibolitas y gneises	

Cuadro I: Unidades hidrogeológicas del Valle de Tulum según Rocca (1969)

didad sin llegar a la base de los terrenos neógenos, lo que evidencia el importante espesor de esta secuencia sedimentaria. De manera similar, el pozo Ramblón-1, perforó 3,076 metros sin atravesar completamente los depósitos neógenos. Sin embargo, el pozo Ramblón-2, alcanzó

una profundidad de 3,621 metros, y atravesó sedimentos cuaternarios, sedimentitas neógenas, carbonatos cambro-ordovícicos y basamento precámbrico (Gianni, 2023; Zambrano y Suvires, 2008).

Por su parte, el Instituto Nacional del Agua-Subgerencia del Centro Regional de Agua Subterránea (INA-SCRAS), llevó a cabo investigaciones sobre el fondo del Valle de Tulum mediante diferentes métodos geofísicos. Estos trabajos, no discriminan cada una de las unidades que integran la secuencia paleozoica, por lo que las electrocapas definidas por debajo de los terrenos neógenos los agrupó bajo el término de Basamento Cristalino (Gianni, 2023).

Por lo tanto, en función de los antecedentes provenientes de perforaciones profundas y estudios geofísicos, se infiere que el subsuelo del Valle de Tulum está conformado por una serie de unidades litoestratigráficas dispuestas en una potente columna sedimentaria. Estas unidades se agrupan en dos grandes categorías: Acuíferas y No Acuíferas (Cuadro I), de acuerdo a Rocca (1969) y Zambrano *et al.*, (1998).

A) No Acuíferas:

1. Unidad precámbrica: representa el basamento geológico del Valle de Tulum, compuesto por metamorfitas tales como esquistos, anfibolitas, gneises, entre otras. Aflora en la Sierra de Pie de Palo, Barboza y Valdivia.

2. Unidad paleozoica: constituida por carbonatos cámbricos-ordovícicos, sedimentitas silurodevónicas y carboníferas como conglomerados, areniscas, lutitas. Están expuestas a lo largo de Precordillera Oriental.

Estas unidades se tratan de cuerpos de rocas fuertemente consolidados, ya que sus espacios porales están obturados por cementación, compactación o recristalización. La permeabilidad es técnicamente nula (o muy baja) y los valores de resistividad aparente son muy altos, por lo que se agrupan como Basamento Resistivo (Zambrano y Torres, 1996).

3. Unidad Lomas de Las Tapias: es la más importante de este grupo debido a que conforma el basamento hidrogeológico que limita tanto lateralmente como en profundidad a la cuenca subterránea del Valle de Tulum (Rocca, 1969; Zambrano *et al.*, 1998). Es decir, se trata de la base impermeable formada por el dominio de limonitas y arcilitas, que afloran principalmente en la quebrada de Ullúm. Sin embargo, las capas superiores de esta unidad contienen agua mineralizada (Rocca, 1969; Zambrano *et al.*, 1998), y por ende, no es

absolutamente impermeable. Sus resistividades son muy bajas y es denominado también como Basamento Conductivo (Zambrano y Torres, 1996).

B) Acuíferas:

1. Unidad Mogna: según Rocca (1969), esta unidad plioleleistocena, se comporta como un acuífero debido a su granulometría y/o composición conglomerádica de superficie, pero de valor inferior al agua contenida en los sedimentos cuaternarios; la describe como base del relleno aluvial. Se expone al norte del Valle de Tulum.

2. Depósitos aluviales: conforman el relleno cuaternario del Valle de Tulum que contienen los principales acuíferos. Estos materiales están divididos en dos subunidades: sedimentos del cono aluvial y sedimentos de la planicie aluvial (Rocca, 1969; Zambrano *et al.*, 1998). La primera se desplaza en forma de abanico desde la quebrada de Zonda hacia el noreste, este y sureste, y se encuentra constituida por clastos de rocas sedimentarias, ígneas y vulcanitas gruesas que se concentran en el sector centro-proximal, y materiales finos hacia la zona distal; estos sedimentos presentan alta porosidad y permeabilidad, que permiten la excelente infiltración para contener el mejor acuífero de la cuenca subterránea. En cambio, la segunda subunidad, está formada por sedimentos de granulometría fina y su distribución en el subsuelo, tanto horizontal como vertical, es irregular debido a los cambios de cauce, caudal e inundaciones del Río San Juan durante el Cuaternario (Rocca, 1969); se compone de limos y arcillas que forman acuícludos, y gravas y arenas que originan acuíferos en condiciones confinantes.

4. Hidrogeología

4.1 Límites de la Cuenca subterránea del Tulum

La provincia de San Juan se caracteriza por presentar cordones montañosos alargados en dirección norte-sur, los cuales delimitan valles elongados en sentido meridional. Estas depresiones están rellanadas por depósitos cuaternarios permeables que se alimentan de cursos fluviales, y por ende, constituyen reservorios de agua subterránea (Zambrano *et al.*, 1998). El Río San Juan, luego de atravesar la provincia geológica de Precordillera, ingresa al Valle de Tulum, donde por infiltración de su caudal produce la recarga de los acuíferos del Tulum (Figura 4.1).

La cuenca hidrogeológica Tulum, es aquella donde se ponen en contacto sedimentitas neógenas y sedimentos cuaternarios con rocas del basamento cristalino o rocas eopaleozoicas (Gianni, 2023). Tiene como límite norte la depresión endorreica conocida como Campo El Jumeal, que épocas pasadas formó parte del Valle de Tulum; la segregación de El Jumeal comenzó a partir del crecimiento del abanico aluvial del Río San Juan durante el Cuaternario, por lo que se generó una barrera topográfica que aisló definitivamente ambos sectores (Gianni, 2023).

El borde oriental coincide con el plano axial de la Sierra Pie de Palo y de los Médanos Grandes, donde la red de drenaje muestra orientación hacia el sur-suroeste y hacia el este hasta la localidad del Encón.

El extremo sur se ubica sobre límite provincial entre San Juan y Mendoza, que corresponde a la zona de colisión entre el aporte subterráneo y de escorrentía del Valle de Tulum desde el norte y el aporte subterráneo del Río Tulumaya desde el sur; sobre este contacto, se genera la descarga de Tres Esquinas que provoca la aparición de la Laguna del Toro, que a su vez genera un curso que evacúa los excedentes de agua hacia la Laguna de Guanacache.

A partir de la Laguna de Guanacache la divisoria se define exclusivamente por características hidroquímicas del agua superficial y subterránea (Gianni, 2023); evidencias geológicas e imágenes satelitales señalan que el Río Mendoza, sufrió una migración levógira y dejó una paleo red de drenaje hasta el límite Mendoza-San Juan. Posteriormente, redireccionó su cauce hacia el sudeste y desembocó en el Río Desaguadero. Durante este recorrido, el Río Mendoza dejó una huella hidroquímica sobre el agua superficial y subterránea, como presencia de piedra pómez y arsénico, que no ocurre en el Río San Juan.

La porción del borde suroccidental está representada por criterio topográfico y análisis de la red de drenaje; la escorrentía superficial del abanico Río del Agua, alimenta tanto la cuenca del Río Tulumaya como la de Tulum, lo que sugiere la existencia de una divisoria superficial coincidente con la subterránea. Hacia el norte, el límite occidental de la cuenca hidrogeológica Tulum, está definido por la vertiente oriental de la Sierra Chica de Zonda, Sierra de Marquezado, Lomas de Ullúm y Sierra de Villicum (Gianni, 2023)

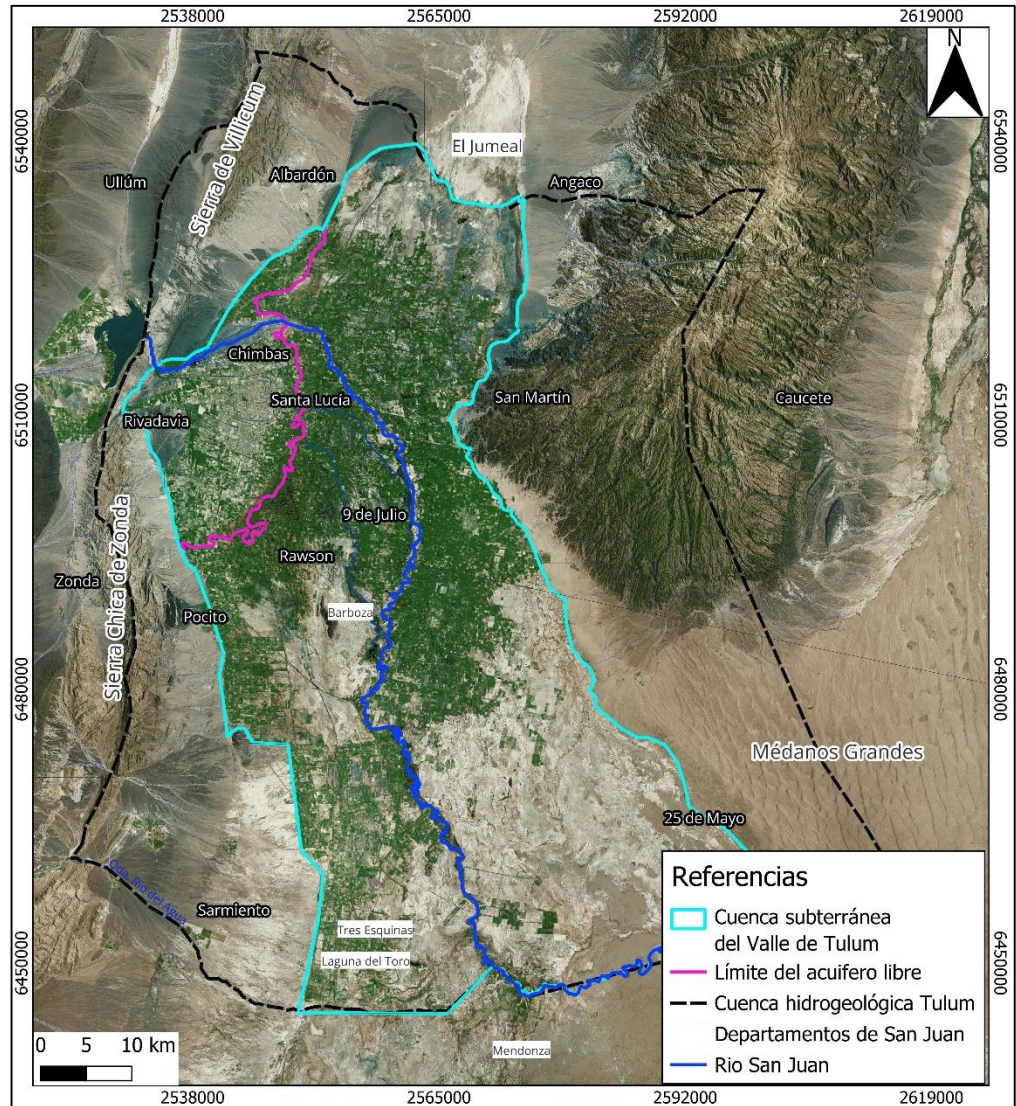


Figura 4.1: Límites de la Cuenca Acuíferos Tulum, modificado de Salvioli *et al.* 2024

En síntesis, los límites de los acuíferos del Tulum, coinciden con el borde norte y sur de la cuenca hidrogeológica. Mientras que los extremos oeste y este, están determinados por el contacto entre el Valle de Tulum y las llanuras pedemontanas de La Sierra Chica de Zonda y Sierra Pie de Palo; es aquella zona que señala el inicio de espesores sedimentarios saturados correspondientes a sectores con un importante almacenamiento de agua subterránea, sin descartar el flujo subterráneo propio de todo acuífero. Los sectores que exceden estos límites, se consideran como áreas de tránsito y aporte hídrico a los acuíferos (Gianni, 2023).

4.1 Acuíferos Tulum

El Valle de Tulum es una depresión rellena por sedimentitas miocenas que se comportan como basamento hidrogeológico, conglomerados polimícticos plioleistocenos, y sedimentos holocenos representados por los depósitos aluvio-fluviales del abanico y de la planicie del valle.

Estos últimos contienen agua subterránea, y por lo tanto, constituyen la unidad acuífera (Rocca, 1969; Zambrano et al. 1998), con un espesor promedio del relleno estimado en 651 metros (Salvioli *et al.*, 2024).

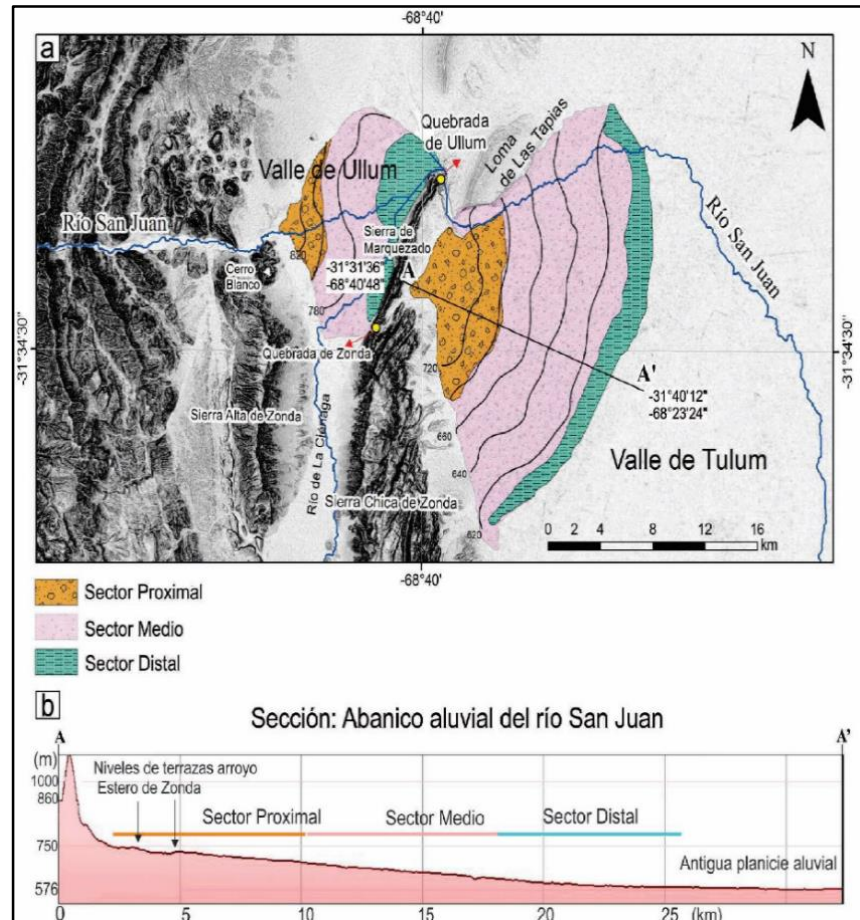


Figura 4.2: Geomorfología de los abanicos aluviales en los valles de Zonda y de Tulum (modificado de Suvires, 2014). La traza A-A' corresponde a la sección abanico, obtenido de (Rodríguez *et al.* 2018).

La recarga de la unidad acuífera se produce en el sector proximal del abanico y en la planicie a través de la infiltración del caudal del Río San Juan. La zona de descarga se localiza en el extremo distal del abanico, donde nacen los arroyos Los Tapones y Agua Negra (Lloret, 2000).

Rocca (1969), realizó secciones geoelectricas transversales y longitudinales sobre el Valle de Tulum con el fin de mostrar las características hidrogeológicas de la cuenca. Estos cortes permitieron identificar la Falla de Tulum, un lineamiento subterráneo de rumbo noreste-suroeste, que separa la cuenca subterránea del valle en dos sectores: bloque noroccidental hundido y bloque suroriental elevado, denominados Subcuenca de Tulum Superior y Subcuenca de Tulum Inferior respectivamente (Figura 4.3).

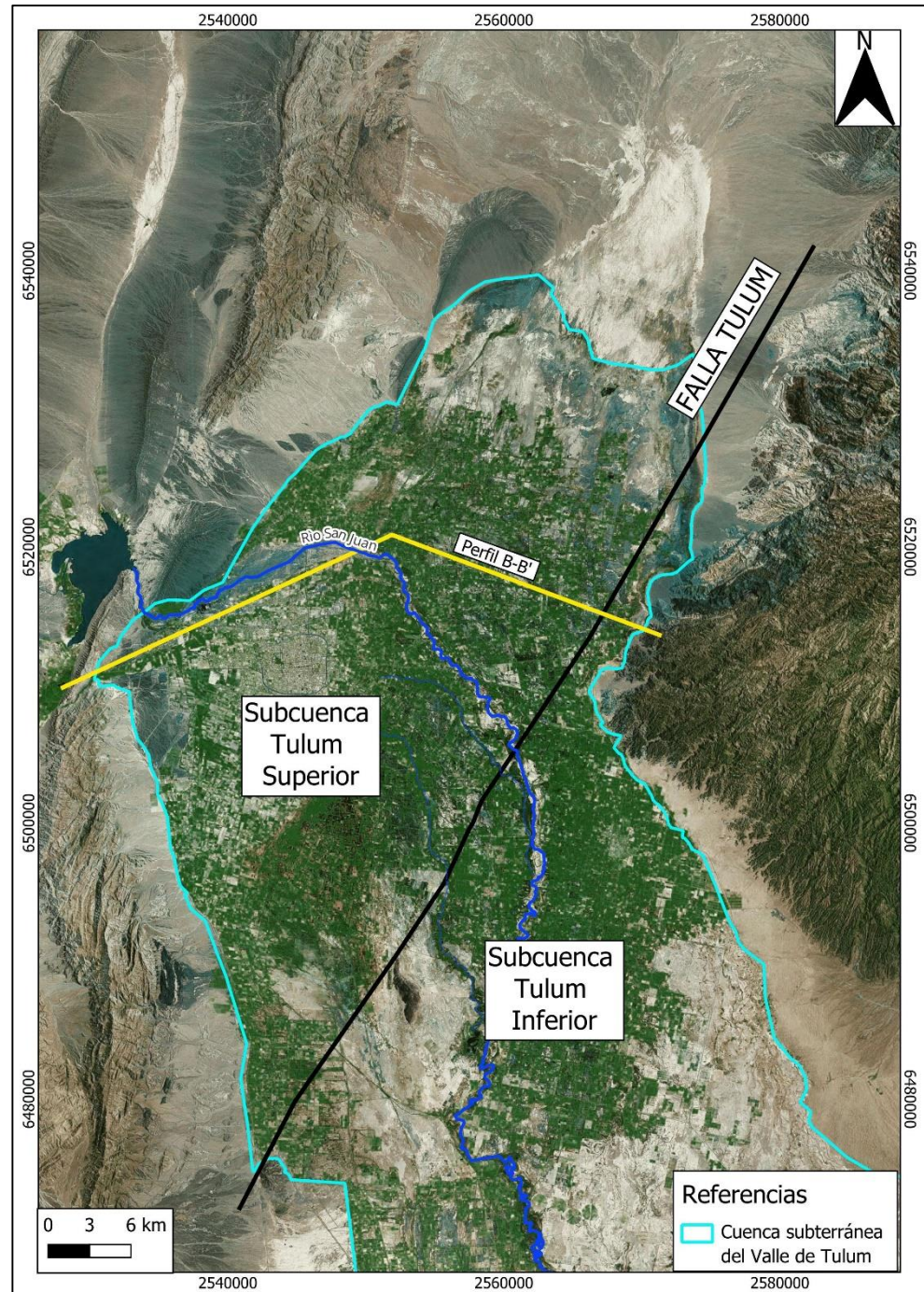


Figura 4.3: Falla subterránea de Tulum. Imagen satelital modificada de Rocca (1969)

La Subcuenca de Tulum Superior está compuesta por los depósitos del abanico que albergan el acuífero libre, y gran parte de la planicie con acuicludos y acuíferos confinados (Figura 4.4). Según Rocca (1969), el espesor de los depósitos cuaternarios varía desde unas decenas de metros en la zona proximal del abanico hasta aproximadamente 700 metros en la zona distal, y estimó como mínimo 300 metros del medio saturado. En este sector, el flujo del agua es radial: hacia el este y noreste en el norte, y hacia el sureste en el centro y sur.

5.1 Sección hidrogeológica y sondeo eléctrico vertical

Una sección o perfil hidrogeológico es una representación gráfica que muestra la distribución y disposición de las unidades en profundidad, interpretadas en función de su comportamiento frente a la presencia de agua subterránea. Se trata de un corte vertical del subsuelo que permite exhibir las características hidrogeológicas de un área: n-unidades, litología y edad, extensión y espesor, profundidades de las unidades, nivel freático o piezométrico, morfología de la base impermeable, unidad hidrogeológica principal, espesor de la zona saturada, estructuras geológicas, entre otras. En esta investigación, la sección se confeccionó a partir del análisis de los datos obtenidos de sondeos eléctricos verticales.

Un sondeo eléctrico vertical (SEV) es un método geoelectrico que permite identificar y delimitar, en forma indirecta, las capas del subsuelo mediante inyección de corriente eléctrica (Orellana, 1972); en términos generales, cuando la unidad geológica en profundidad es atravesada por el flujo de corriente es posible comprender los rasgos eléctricos que posee, como la resistividad.

La resistividad eléctrica es una propiedad física intrínseca de los materiales que expresa su capacidad para oponerse al paso de la corriente eléctrica; se mide en ohm por metro ($\Omega \cdot m$) y es inversa a la conductividad eléctrica (Orellana, 1972). Así, una unidad geológica con alta resistividad se comporta como una capa resistiva, que dificulta el flujo de corriente.

Por lo tanto, el SEV permite distinguir las diferentes unidades del subsuelo mediante inyección de corriente eléctrica y la medición de las resistividades que presenta cada una. El análisis de estos valores posibilita la caracterización indirecta de las propiedades hidrogeológicas de dichas unidades.

En la práctica, aplicar un sondeo eléctrico vertical requiere utilizar un equipamiento conformado por dos circuitos: uno de emisión y otro de recepción de corriente eléctrica. El primero está compuesto por una fuente de energía (p. ej., una batería), un amperímetro, y dos electrodos (clavos metálicos) encargados de inyectar corriente sobre el suelo. Mientras que el segundo circuito, está conformado por un milivoltímetro y dos electrodos que miden el diferencial de potencial generado por la corriente inducida (Paganini, 2019). Además, se debe adoptar una sistemática de trabajo, que se relaciona con la manera de posicionar los electrodos; la configuración más común es la de Schlumberger (1920).

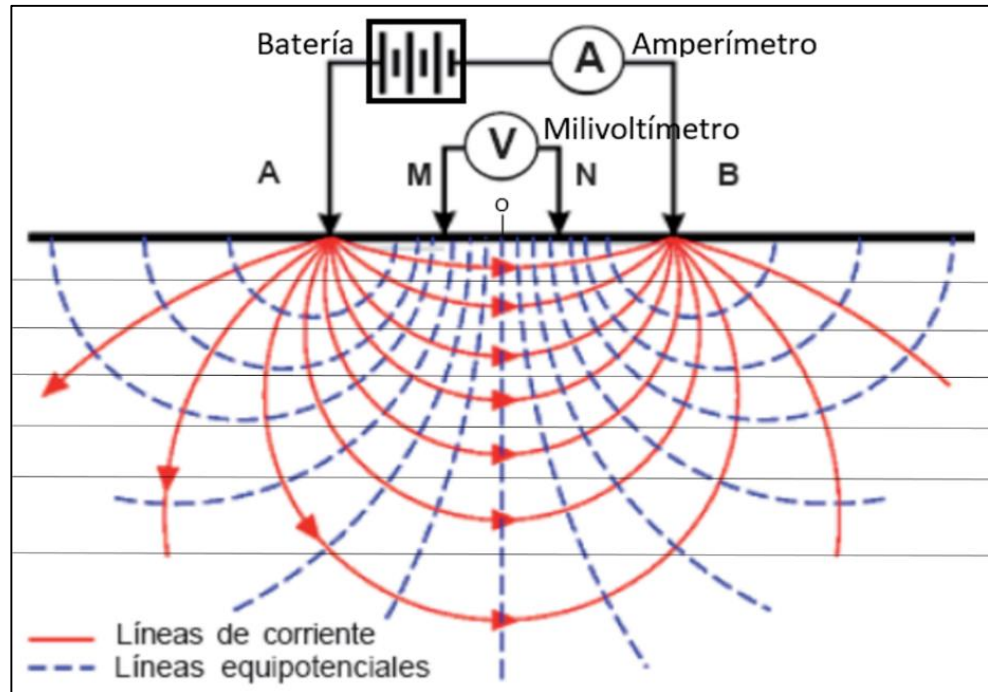


Figura 5.1: Dispositivo electródico de Schlumberger (1920). Líneas de corriente (en línea llena roja) y potencial (líneas de trazos azul) generadas en el SEV. Líneas llenas negras representan las diferentes capas del subsuelo, distinguidas por valores de resistividad diferentes, modificado de Nuñez *et al.* (2013).

Esta metodología consiste en colocar los 4 electrodos en forma lineal y simétrica respecto a un centro (0). Generalmente, se asigna con letra A y B los electrodos de corriente, y M y N los electrodos de potencial. Los electrodos M y N se encuentran en el centro del sistema y separados por una corta distancia entre sí, mientras que los electrodos A y B se disponen en los extremos de tal manera que la distancia de separación entre A-B es mayor a la distancia de separación entre M-N (Figura 5.1). Para reconocer unidades cada vez más profundas, se debe aumentar la separación de los electrodos de corriente; en algunos casos excepcionales, se separa también los electrodos de potencial y se realiza un empalme (Paganini, 2019).

Cuando el equipo de SEV inyecta corriente eléctrica sobre los electrodos correspondientes, se crean campos eléctricos (E) alrededor de cada uno. La corriente inyectada para ambos es de igual intensidad pero de signo opuesto, de modo que en el electrodo A se genera un campo eléctrico positivo (+E) y en B se presenta un campo eléctrico negativo (-E), por lo que las líneas del flujo eléctrico salen de A y entran en B, y atraviesan las capas del subsuelo de manera perpendicular a las líneas equipotenciales (Ramírez, 2023). Mediante este procedimiento, los electrodos M y N obtienen el diferencial de potencial (ΔV) que se genera debido a la corriente

eléctrica inducida (I). De esta manera, a partir de los valores de I y ΔV , la resistividad (ρ) se calcula a través de la siguiente ecuación (Orellana, 1972):

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \cdot K \quad \text{siendo } K = \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}$$

La variable K se denomina coeficiente geométrico del dispositivo electródico y su valor depende de la distancia entre los electrodos: AB/2 y MN. Sin embargo, la resistividad obtenida no representa la real, ya que condiciones de horizontalidad, homogeneidad e isotropía de las capas no suceden en la naturaleza (Paganini, 2019); el parámetro resultante se menciona como resistividad aparente (ρ_a).

El valor de la resistividad eléctrica aparente, depende de varios factores tales como litología, presencia o no de agua, el grado de saturación, la salinidad del fluido, etc., por lo que responde a un campo de variación (Sánchez, 2022). Generalmente, en materiales detríticos, la resistividad tiende a aumentar con el tamaño del grano; por ejemplo, una capa de grava seca presenta valores elevados, mientras que una capa de arcilla seca muestra resistividades bajas; estas mediciones se modifican si la unidad contiene agua, y si esta es dulce o salada. En cambio, las rocas compactas suelen presentar valores de resistividad muy altos, ya que se caracterizan como cuerpos fuertemente consolidados; si se encuentran fracturadas o alteradas, la resistividad aparente es menor (Astier, 1975). Es importante destacar, que estos rangos no son específicos, es decir, valores similares pueden corresponder a diferentes capas. Por esta razón, es fundamental considerar el contexto geológico local para una correcta interpretación de los datos geoelectrónicos.

La información obtenida mediante un SEV, como los datos aplicados (intensidad de corriente eléctrica y disposición de los electrodos) y los medidos (diferencial de potencial y resistividad aparente), se registran manualmente en una tabla de campo. Posteriormente, los datos se cargan en un *software* especializado que calcula y representa automáticamente la curva de resistividad aparente (Figura 5.2); los valores AB/2 y ρ_a , se analizan en un gráfico de escala logarítmica que permite elaborar la curva correspondiente. La interpretación de dicha curva, permite identificar y delimitar las distintas capas del subsuelo, denominadas electrocapas, que se caracterizan por sus valores de resistividad aparente y espesores (Paganini, 2019).

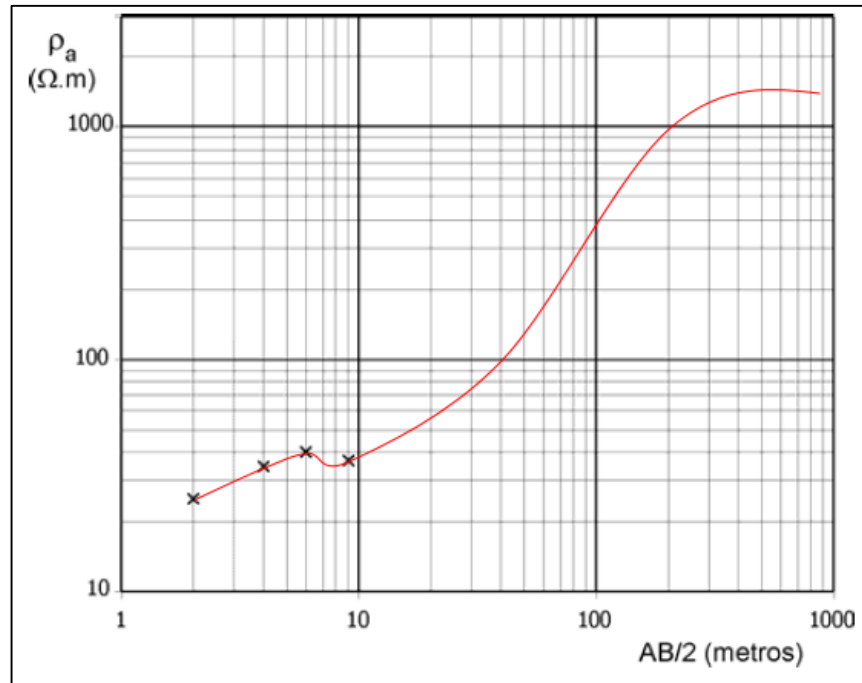


Figura 5.2: Curva de resistividad aparente (color rojo); representación de la intersección entre la distancia $AB/2$ y el valor de la resistividad aparente. Modificado de Sánchez (2022).

Por lo tanto, el trabajo de una campaña de SEV se divide en dos etapas (Orellana, 1972):

1. A través del análisis de la curva, se reconoce las electrocapas del subsuelo y se construye una sección geoelectrica, y 2. Se interpreta las características hidrogeológicas de las electrocapas, en función de los valores de resistividad y el conocimiento de la geología local, para elaborar un corte geológico (Figura 5.3). Al incorporar el nivel freático y/o la unidad acuífera, se obtiene la sección hidrogeológica.

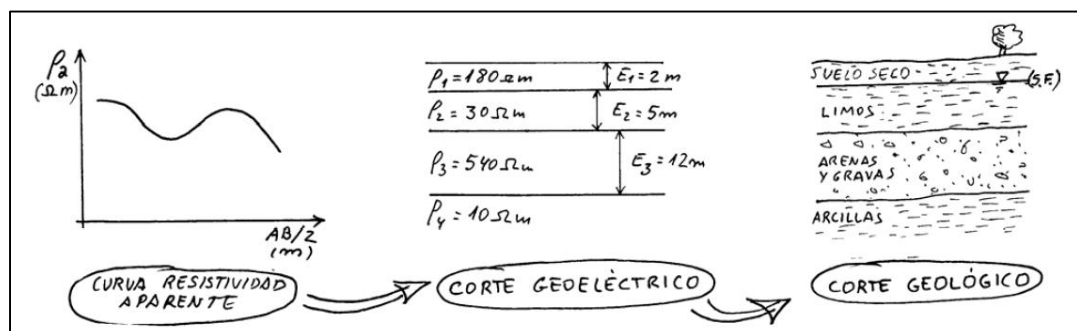


Figura 5.3: Representación de una sección geológica mediante la interpretación de la curva de resistividad y corte geoelectrico (Sanchez, 2022).

5.2 Ensayos de bombeo

Un ensayo de bombeo es una prueba hidráulica que permite obtener y evaluar los parámetros fundamentales del acuífero: permeabilidad, transmisividad, coeficiente de almacenamiento y porosidad efectiva. Para ello, se realiza una captación subterránea (vertical u horizontal) a caudal constante o variable (escalonado), y se mide el descenso del nivel de agua (freática o piezométrica) en función del tiempo, tanto en el pozo de bombeo (principal) como en pozos de observación adyacentes (Auge, 2005). Cabe señalar que, en algunos casos, un ensayo de bombeo a caudal variable no requiere de un pozo de observación.

En términos hidrogeológicos prácticos, la permeabilidad (K) y la transmisividad (T) son parámetros que indica la facilidad del acuífero para transmitir y ceder agua (Custodio y Llamas, 1983; Sánchez, 2022); en particular, la transmisividad representa la cantidad de agua que se mueve horizontalmente sobre la zona saturada, y se calcula como el producto entre el espesor del acuífero (b) y la permeabilidad ($T = k \cdot b$).

La porosidad efectiva (m_e) refleja cuánto volumen de agua libera el acuífero libre por vaciado de poros o gravedad (Custodio y Llamas, 1983; Sánchez, 2022). Mientras que el coeficiente de almacenamiento (S), representa la cantidad de agua que libera el acuífero confinado por descompresión, cuando la superficie piezométrica desciende un metro dentro de una columna de 1 m^2 de base.

Por lo tanto, es importante comprender las características hidrogeológicas de las unidades del subsuelo para interpretar correctamente los resultados de los ensayos de bombeo, ya que las formaciones geológicas presentan diferencias en cuanto a porosidad y permeabilidad, y por ende, condicionan la capacidad de almacenar, transmitir y liberar agua subterránea:

Se denomina acuífero a aquella formación geológica cuya litología permeable permite almacenar agua y transmitirla con facilidad, en cantidades económicamente explotable (Custodio y Llamas, 1983; Sánchez, 2022). A su vez, un acuífero puede comportarse como libre o confinado (Figura 5.4); en el acuífero libre, el límite superior coincide con el nivel freático y el agua que contiene se encuentra a presión atmosférica. Al contrario, un acuífero confinado se ubica entre capas impermeables, de modo que la zona saturada está sometida a una presión mayor a la atmosférica; debido a estas condiciones hidráulicas, cuando se realiza una captación, el agua subterránea asciende hasta alcanzar la superficie piezométrica, que se ubica por encima del techo del acuífero (Custodio y Llamas, 1983; Sánchez, 2022).

El término acuífero semiconfinado se utiliza para describir aquella formación geológica que se encuentra limitada por una capa semipermeable y otra impermeable (Custodio y Llamas, 1983; Sánchez, 2022); sus condiciones hidráulicas son similares al acuífero confinado.

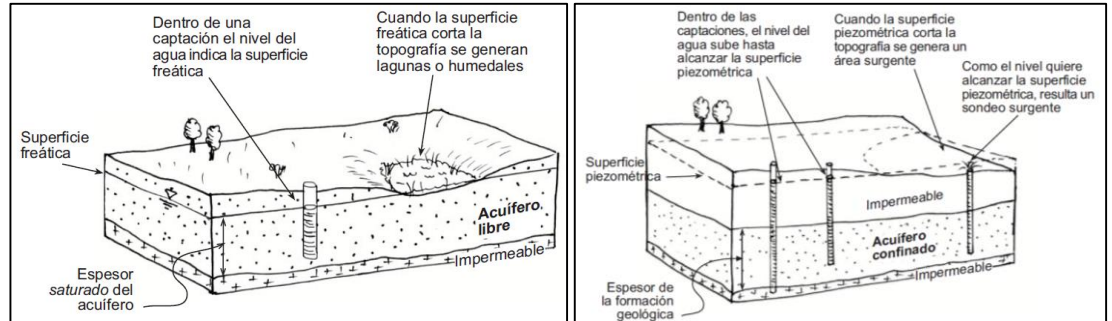


Figura 5.4: Acuífero libre y su nivel freático, y acuífero confinado su nivel piezométrico. Obtenido de Sánchez (2022)

En cambio, un acuícludo es una formación geológica de litología impermeable que contiene agua en cantidad apreciables pero no la transmite. Un acuitardo, es aquella formación geológica contiene agua subterránea económica, pero la transmite con dificultad (Custodio y Llamas, 1983; Sánchez, 2022). Mientras que, un acuífugo es la formación geológica que no puede contener agua ni transmitirla, debido a su permeabilidad nula (Custodio y Llamas, 1983; Sánchez, 2022).

Los rangos de transmisividad y coeficiente de almacenamiento para las distintas unidades son los siguientes (Tabla 1):

Tipo de Acuífero	Transmisividad (T) (m ² /d)	Clasificación	Coeficiente de Almacenamiento (S)	Clasificación
Libre	$T < 100$	Baja	0,05 – 0,03	Baja
	$100 \leq T \leq 1000$	Moderada		Moderada
	$T > 1000$	Alta		Alta
Confinado	$T < 10$	Muy baja	$10^{-3} - 10^{-5}$	Muy baja
	$10 \leq T \leq 100$	Baja		
	$T > 100$	Moderada a Alta		

Tabla 1: Rangos de transmisividad y coeficiente de almacenamiento para el medio intergranular de gravas y arenas (Iglesia, 2002, Custodio y Llamas, 1983)

Antes de comenzar un ensayo de bombeo, el nivel de agua subterránea es prácticamente horizontal. Sin embargo, al iniciar la prueba hidráulica, el agua del acuífero fluye radialmente hacia la bomba del pozo, por lo que el nivel freático o piezométrico adquiere la forma de un cono convexo denominado cono de descenso; este representa el abatimiento de agua en función del tiempo y refleja el comportamiento hidráulico de la unidad acuífera (Sánchez, 2022).

En una captación vertical, el agua del acuífero libre circula por la zona saturada y el espesor (h) disminuye progresivamente hacia la bomba. Por el contrario, en un acuífero confinado (o semiconfinado), de espesor constante (b), el flujo hacia la captación es horizontal y el cono se forma sobre el nivel piezométrico (Figura 5.5).

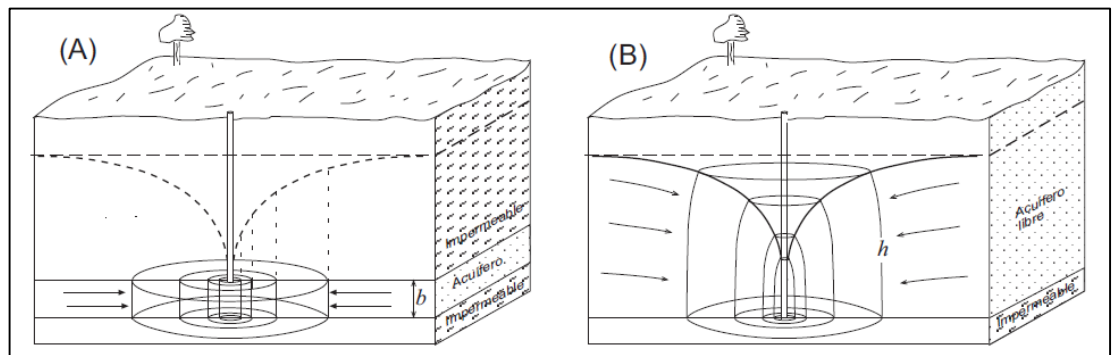


Figura 5.5: a) Cono de descensos en un acuífero confinado y b) Cono en un acuífero libre (tomado de Sánchez, 2022).

Durante la prueba hidráulica, el cono de descenso crece tanto en profundidad como en extensión a lo largo de un periodo denominado régimen variable. Posteriormente, luego de un cierto tiempo, la forma del cono se detiene debido a la estabilidad del descenso del nivel de agua y se alcanza el régimen permanente (o equilibrio técnico), el cual señala que el acuífero ya no aporta agua por vaciado de poros (acuífero libre) o por descompresión (acuífero confinado o semiconfinado) sino que solamente transmite agua radialmente hacia el pozo principal; la forma y tamaño del cono se mantiene, aunque continúe la captación (Sánchez, 2022).

De este modo, la depresión generada se controla a través de periodos de tiempo predefinidos hasta lograr el equilibrio técnico, es decir, lo que puede implicar un ensayo de corta o de larga duración (al menos 8 horas); los datos descenso-tiempo que se registran en el pozo principal y pozo adyacentes, como así también caudal del bombeo, nivel estático, entre otros, se evalúan en un software que generalmente utiliza los modelos matemáticos de Theis (1935) y Jacob (1945) para calcular los parámetros fundamentales del acuífero:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) ; u = \frac{r^2 \cdot S}{4Tt} \quad \text{Theis} \qquad s = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2.25 T t}{r^2 S} \quad \text{Jacob y Cooper}$$

Donde

Q : Caudal de bombeo (m³/h)

T : Transmisividad (m²/día)

S : Coeficiente de almacenamiento (adimensional), para acuíferos confinados= m_e (porosidad efectiva), para acuíferos libres

t : Tiempo transcurrido desde el comienzo del bombeo (min)

s : Descenso (m)

r : Distancia a la que se produce el descenso s (m)

$W(u)$: Función del pozo, cuyo valor aparece tabulado según Watson (1995).

El modelo de Theis se aplica principalmente en condiciones de régimen variable para acuíferos confinados o semiconfinados, mientras que el método de Jacob es una simplificación logarítmica de la solución de Theis, adecuada para el régimen permanente. Ambos métodos permiten estimar la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento para caracterizar el comportamiento hidráulico del acuífero frente a la explotación e interpretar la capacidad para almacenar, transmitir y ceder el agua subterránea, así como también estimar las reservas.

6. Evaluación hidrogeológica del área de estudio

6.1 Descripción e interpretación del perfil hidrogeológico

La sección hidrogeológica A-A` se extiende entre los carbonatos de Sierra Chica de Zonda y las metamorfitas de Sierra de Pie de Palo, con una longitud de 44 km y rumbo general oeste-este. Sobrepasa los límites de la cuenca subterránea del Valle de Tulum, alcanza las llanuras aluviales pedemontanas, y atraviesa el borde suroeste del abanico y gran parte de la planicie (Figura 6.1).

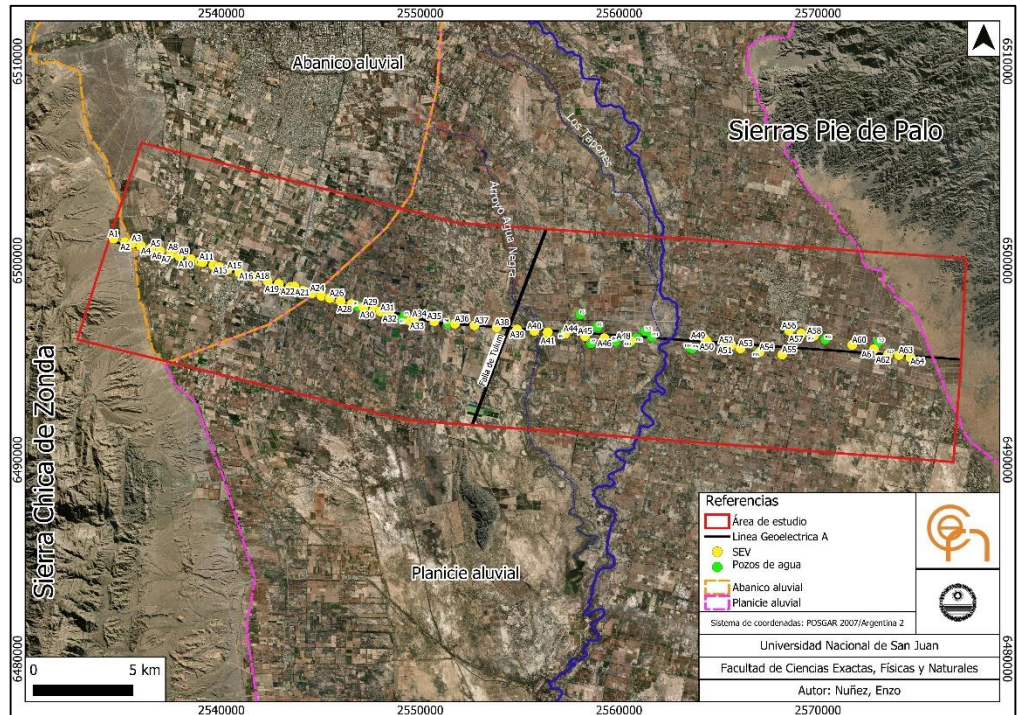


Figura 6.1: Sección hidrogeológica A-A' del área de estudio, elaborada con los SEV, pertenecientes a la línea geo eléctrica A y monitoreos adyacentes.

Para la construcción del perfil, se trabajó con 64 sondeos eléctricos verticales (Anexo 2) pertenecientes a la línea geoelectrica A, mediante el software ResixPlus V 5.0, que cuantifica las diferentes capas eléctricas del subsuelo mediante la determinación de su profundidad o espesor (en metros) y su resistividad (en ohm.metros); se incluyen 8 “sondeos gemelos” tales como A7-A8, A11-A12, A20-A21-A22, A33-A34, A41-A42, A43-A44, A49-A50 y A55-A56, debido a que presentan datos similares (resistividad y profundidad), mientras que los sondeos A1, A2, A37, A47 y A59 carecen de registro (Anexo 3). Además, se consultaron monitoreos adyacentes, realizados por INA-SCRAS, con el fin de verificar o contrastar el nivel de agua subterránea identificado por los sondeos.

El análisis de las curvas de resistividad de cada SEV permitió reconocer y delimitar las distintas electrocapas del subsuelo (Anexo 4 y 5), y elaborar el corte geoelectrico del área de estudio. La interpretación litológica de dichas electrocapas, se realizó con base en el conocimiento geológico local y mediante los rangos de resistividad documentados por Rocca (1969), Astier (1975) y Arias *et al.* (2012); los valores propuestos por estos autores, se compararon y se correlacionaron entre sí, para obtener la Tabla 2.

Litología	Resistividades ($\Omega \cdot m$)
Grava seca	500 - 3,000
Grava y arena seca	1,000 - 10,000
Arena seca	400 - 700
Arena y limos seco	1 - 7
Limos secos	100 - 200
Limos y arcilla seca	7 - 20
Arcilla seca	2 - 40
Grava saturada con agua dulce	100 - 800
Grava y arena saturada con agua dulce	30 - 500
Arena saturada con agua dulce	100 - 200
Arena y limos saturada con agua dulce	20 - 200
Limos saturada con agua dulce	20 - 100
Limos y arcilla saturada con agua dulce	5 - 100
Arcilla saturada con agua dulce	5 - 20
Grava y arena con salada	1 - 5
Limos con agua salada	5 - 15
Arcilla con agua salada	1 - 10
Limonitas y arcilitas	3 - 12
Conglomerados saturados con agua	10 - 100
Conglomerado seco	100 - 600
Calizas	> 1,000
Rocas cristalinas	> 10,000

Tabla 2: Rangos de resistividades aparentes, comparados y correlacionados entre Rocca (1969), Astier (1975) y Arias *et al.* (2012), para interpretar la litología de las electrocapas en el área de estudio

De este modo, se reconocieron seis unidades hidrogeológicas (Anexo 10). El resumen de las características hidrogeológicas de estas unidades, se presentan en el Cuadro II.

La UH 1 es detectada entre los sondeos A39 y A64 a una profundidad que varía entre 300 metros en el borde oriental y 1000 metros en la parte central, con resistividades aparentes que comprenden el rango $26 \Omega \cdot m$ - $220 \Omega \cdot m$. Representa el basamento geológico del Valle de

Tulum constituido por las metamorfitas precámbricas, las cuales se exponen en la Sierra Pie de Palo, Cerros Barboza y Valdivia.

Desde el sondeo A3 hasta el sondeo A9 se identifica la UH 2, con resistividades entre $31 \Omega \cdot m$ - $92 \Omega \cdot m$ y profundidades que varía entre 103 metros el borde occidental y 667 metros. Se trata de los carbonatos cambro-ordovícicos, que se correlaciona con las rocas aflorantes en la Sierra Chica de Zonda.

La UH 3 presenta resistividades inferiores a $15 \Omega \cdot m$, y es detectada entre A5 y A60 a profundidades que varía entre 76 metros y 1,080 metros. Corresponde a la unidad hidrogeológica Loma de las Tapias, que se comporta como el basamento hidrogeológico de la cuenca subterránea del Valle de Tulum, dominada por limonitas y arcilitas miocenas; se registra un espesor mínimo de 163 metros y máximo de 415 metros.

Por encima se detecta la UH 4, cuya respuesta eléctrica percibe el rango $22 \Omega \cdot m$ - $334 \Omega \cdot m$. Es identificada desde el sondeo A18 hasta el A64, con profundidades que varía entre 228 metros y 559 metros, y comprende espesores entre 73 metros y 710 metros. Se trata de la unidad hidrogeológica Mogna de edad Pliopleistocena, conformada por conglomerados con escaso cemento.

La UH 5 se extiende a lo largo de la sección, con resistividades entre $16 \Omega \cdot m$ - $523 \Omega \cdot m$ y profundidades que varían entre 10 metros y 167 metros. Corresponde a los depósitos aluvio-fluviales del Cuaternario saturados con agua, es decir, constituye la unidad hidrogeológica principal de la cuenca subterránea del Valle de Tulum. Su espesor está determinado por el nivel freático y el techo de las unidades subyacentes, por lo que varía entre 26 metros y 500 metros.

Por último, entre la superficie del suelo y el nivel freático, se registra la UH 6 con resistividades aparentes entre $2 \Omega \cdot m$ y $3700 \Omega \cdot m$. Representa los depósitos aluvio-fluviales del Cuaternarios considerados técnicamente como insaturados, que se encuentran en toda la sección y su espesor varía entre 10 metros - 167 metros.

Se identificó la Falla de Tulum definida por Rocca (1969). Por lo tanto, la sección se divide en dos bloques: Tulum superior al oeste (A3-A38) y Tulum inferior al este (A39-A64).

Además, por otro lado, se observa que el nivel de agua subterránea es irregular, pero en términos generales se puede considerar prácticamente horizontal, ya que desde A3 hasta A38 su profundidad varía entre 15 metros y 156 metros (Tulum superior), y entre A39 y A64, varía entre 10 metros y 167 metros (Tulum inferior).

El espesor de las unidades más antiguas es indefinido, ya que la metodología utilizada para construir el corte geoelectrico no permite determinar el espesor de las últimas electrocapas; estas unidades se identificaron mediante datos multiparamétricos documentados en antecedentes, que mencionan las resistividades de estas rocas directamente sobre la superficie. La unidad carbonática es detectada únicamente en el lado occidental de Tulum superior, ya que desde A10 hasta A38 la profundidad de alcance de los sondeos no es suficiente para registrar la continuidad lateral de esta capa. Por su parte, el basamento metamórfico se encuentra a lo largo de Tulum inferior; algunos sondeos (A49-A50 y A58) no registran la presencia de esta unidad, pero mediante profundidades y valores de resistividad adyacentes se interpreta su continuidad.

El basamento hidrogeológico de la cuenca, se reconoció por valores bajos de resistividad aparente ($< 15 \Omega \cdot m$), ya que se considera como capa conductora al presentar agua mineralizada en sus niveles superiores (Rocca, 1969). Además, debido a la ausencia de la unidad carbonática, entre A10 y A38, no se logra registrar la variación total de su espesor.

La unidad hidrogeológica Mogna se infiere mediante el conocimiento en conjunto de la interpretación geoelectrica y referencias estratigráficas locales, ya que la formación geológica homónima se ubica entre la Formación Loma de Las Tapias y los depósitos cuaternarios; algunos valores de resistividades, permiten interpretar probables sectores con agua.

Por su parte, se reconoce el depósito cuaternario que constituye el relleno del abanico y de la planicie, con una gran variabilidad granulométrica; los materiales típicos del cono aluvial se extienden entre A3 y A24, mientras que los sedimentos de la planicie se desplazan desde A25 hasta el sondeo A64. Este relleno cuaternario, está dividido por el nivel de agua subterránea, por lo que se distinguen dos unidades: zona saturada (UH 5) y zona insaturada (UH 6).

La unidad hidrogeológica principal (UH 5), presenta los siguientes intervalos litológicos de acuerdo a distintos rangos de resistividad (Tabla 3):

Entre A3 y A29 los valores de resistividad oscilan desde $116 \Omega \cdot m$ hasta $523 \Omega \cdot m$, lo que permite interpretar un dominio de gravas gruesas con arenas; es decir, medio altamente permeable.

Desde A30 a A38, el rango $55 \Omega \cdot m$ - $81 \Omega \cdot m$ sugiere el dominio de arenas, posiblemente medianas a finas con gravas. Este intervalo representa un ambiente de permeabilidad moderadamente alta, inferior al tramo anterior.

Entre A39 y A58, las resistividades comprendidas entre $17 \Omega \cdot m$ y $63 \Omega \cdot m$ sugieren la presencia de gravas y arenas finas con limos y arcillas, lo que indica un entorno de permeabilidad media a baja, consistente con el sector de planicie aluvial del Río San Juan.

Desde A60 a A64, el rango $16 \Omega \cdot m$ - $23 \Omega \cdot m$, señala la presencia de limos y arcillas con arenas.

Intervalos litológicos de la unidad hidrogeológica principal		
Tramos entre sondeos	Resistividad ($\Omega \cdot m$)	Interpretación litológica
A3 - A29	116 - 523	Dominio de gravas gruesas, con arenas
A30 - A38	55 - 81	Arenas posiblemente medias a finas, con gravas
A39 - A58	17 y 63	Gravas y arenas finas, con limos y arcillas
A60 - A64	16 - 23	Presencia de limos y arcillas, con arenas

Tabla 3: Interpretación de los intervalos litológicos de la unidad hidrogeológica principal

Del mismo modo, el cuaternario insaturado presenta resistividades aparentes que ocupan un campo de variación muy alto, por lo que se interpretan distintos intervalos litológicos dentro de esta unidad (Tabla 4):

Desde A3 hasta A12 las respuestas eléctricas superan los $880 \Omega \cdot m$, lo que indica posiblemente la presencia dominante de gravas gruesas con arenas.

Entre A13 y A19, el rango $286 \Omega \cdot m$ - $720 \Omega \cdot m$, refleja una transición caracterizada por el dominio de arenas y gravas subordinadas.

Desde el sondeo A3 hasta el sondeo A19 se reconoce la parte central del abanico, constituida por gravas gruesas y arenas, que favorece la infiltración de agua y la formación del acuífero libre.

Desde A20 a A34, las resistividades entre $38 \Omega \cdot m$ y $75 \Omega \cdot m$, sugieren la presencia de granulometría intermedia a fina, tales como arenas finas con limos y arcillas.

Entre A35 y A60, las resistividades inferiores a $12 \Omega \cdot m$ indican el dominio de limos y arcillas, sedimentos de baja permeabilidad; a su vez, el tramo comprendido entre A35 y A38 se reconoce una porción salina, evidenciada tanto por los bajos valores de resistividad como por su expresión superficial en imágenes satelitales.

Unidades Hidro- geológicas	Unidades hidrogeológicas del sector centro-sur del Valle de Tulum						Comportamiento Hidro- geológico
	Litología	Edad	Espesor	Extensión	Profundidad	Resistividades aparentes	
UH 1	Metamorfitas	Precámbrico	Indefinido	Entre A39 - A64	Entre 300 y 1,000 metros	26 $\Omega \cdot m$ - 220 $\Omega \cdot m$	Basamento Cristalino
UH 2	Carbonatos	Cambro- Ordovícico	Indefinido	Desde A3 hasta A9	Entre 103 y 667 metros	31 $\Omega \cdot m$ - 92 $\Omega \cdot m$	
UH 3	Limonitas y arcilitas	Mioceno	Registrado: entre 163 metros y 415 metros	Entre A5 - A60	Desde 76 metros hasta 1,080 metros	< 15 $\Omega \cdot m$	Basamento Hidrogeológico
UH 4	Conglomerados polimícticos pocos cementados	Plio- pleistoceno	Entre 73 metros y 710 metros	Desde A18 hasta A64	Desde 228 metros hasta 559 metros	22 $\Omega \cdot m$ - 334 $\Omega \cdot m$	Acuitardo
UH 5	Materiales aluvio- fluviales saturados	Cuaternario	Desde 26 metros y 500 metros	Entre A3 - A64	Entre 10 metros y 167 metros	16 $\Omega \cdot m$ - 523 $\Omega \cdot m$	Unidad Hidrogeológica Principal
UH 6	Materiales aluvio- fluviales Insaturados		Entre 10 metros y 167 metros	Desde A3 hasta A64	Superficial	2 $\Omega \cdot m$ - 3700 $\Omega \cdot m$	Cuaternario insaturado

Cuadro II: Características hidrogeológicas del área de estudio.

Desde A61 hasta A64, las resistividades entre $54 \Omega \cdot m$ y $117 \Omega \cdot m$, sugieren la presencia de limos y arcillas con arenas y gravas debido a la proximidad al borde de cuenca.

Intervalos litológica del cuaternario insaturado		
Tramos entre sondeos	Resistividad ($\Omega \cdot m$)	Interpretación litológica
A3 - A12	> 880	Gravas gruesas con arenas.
A13 - A19	286 - 720	Dominio de arenas y gravas subordinadas.
A20 - A34	38 - 75	Arenas finas con limos y arcillas.
A35 - A60	< 12	Dominio de limos y arcillas
A35 - A38	2 - 12	Limos y arcillas salinas
A61 - A64	54 - 117	Presencia de limos y arcillas, con arenas y gravas

Tabla 4: Intervalos litológicos de la unidad hidrogeológica 6, cuaternario insaturado

Entre el sondeo A20 y A24 se representa la parte distal del abanico conformada mayoritariamente por arenas y limos, y a partir del sondeo A25 hasta A64, se reconoce la planicie aluvial, constituida por la secuencia de arenas finas, limos y arcillas; a su vez, se interpreta como estos materiales superficiales controlan las condiciones hidrogeológicas del subsuelo para formar acuíferos confinados.

6.1.1 Morfología estructural del subsuelo

Los sondeos eléctricos verticales identificaron cambios bruscos sobre las profundidades de las unidades más antiguas en cortas distancias (menos de 500 metros), por lo que se interpreta la existencia de fallas casi verticales que controlan la morfología de la unidad carbonática, base impermeable y basamento precámbrico, y que configuran el relleno de las unidades suprayacentes.

Entre el sondeo A38 y A39, se distingue como la Falla de Tulum que corta principalmente a las unidades hidrogeológicas de Lomas de las Tapias y Mogna. Se estima un rechazo de aproximadamente de 100 metros (Figura 6.2); se observa como la profundidad del techo de Mogna se eleva desde 410 metros a 300 metros, y del mismo modo, la profundidad del techo

de la base impermeable asciende desde 745 metros a 610 metros. Esta importante fractura subterránea, divide la sección en Tulum Superior e Inferior, con diferencias estructurales.

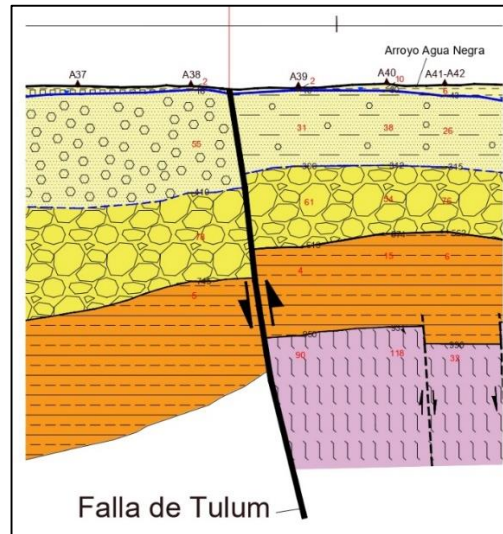


Figura 6.2: Falla de Tulum, que corta principalmente a las unidades hidrogeológicas de Lomas de las Tapias y Mogna

En Tulum Superior, la morfología de la Unidad Hidrogeológica 3 es irregular debido a la existencia de numerosas fallas y un pliegue. Las primeras estructuras generan una importante depresión entre el sondeo A12 y A15, que provoca el máximo espesor del cuaternario saturado con 500 metros sobre A14. Asimismo, la deformación causa el máximo espesor del relleno cuaternario con 565 metros sobre A17. Por su parte, la disposición de la unidad hidrogeológica Mogna se ajusta a un sinclinal hasta el sondeo A38, cuyo eje coincide con la máxima profundidad de la UH 3, 1,080 metros sobre A29 (Figura 6.3).

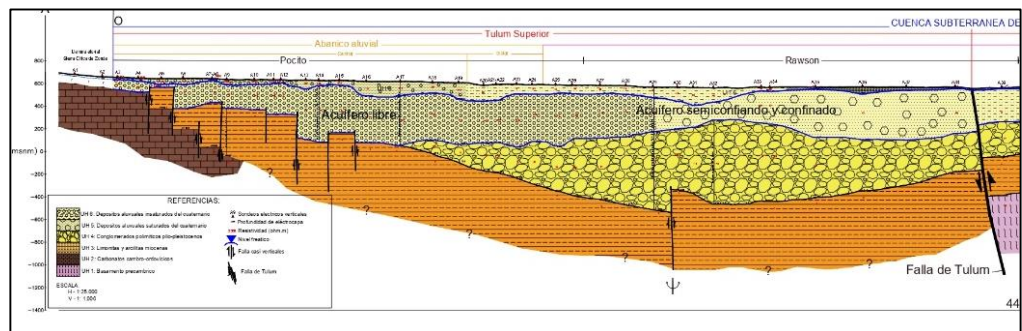


Figura 6.3: Sistema estructural de la Subcuenca de Tulum Superior

En Tulum Inferior, la unidad precámbrica también se encuentra afectada por las fallas casi verticales, lo que provoca continuos cambios de profundidades sobre su techo. Como consecuencia, el relleno de la UH 3 se ajusta a esta morfología con variaciones en su espesor.

Dicha unidad desaparece a partir del sondeo A60, y hacia el este, disminuye el espesor de la UH 4 debido a la aproximación del borde de cuenca (Figura 6.4).

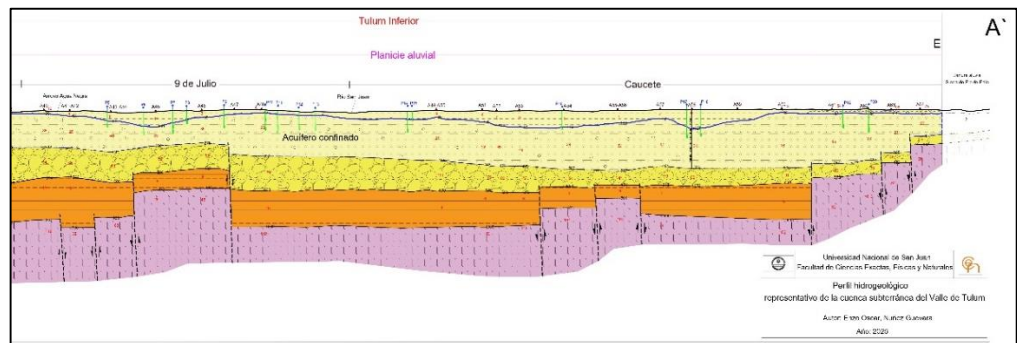


Figura 6.4: Sistema estructural de la Subcuenca de Tulum Inferior

6.2 Ensayos de bombeo

Durante los meses de agosto y octubre del año 2024 se realizaron los ensayos de bombeo a caudal constante en los departamentos Cauçete y Pocito respectivamente (Figura 6.5).

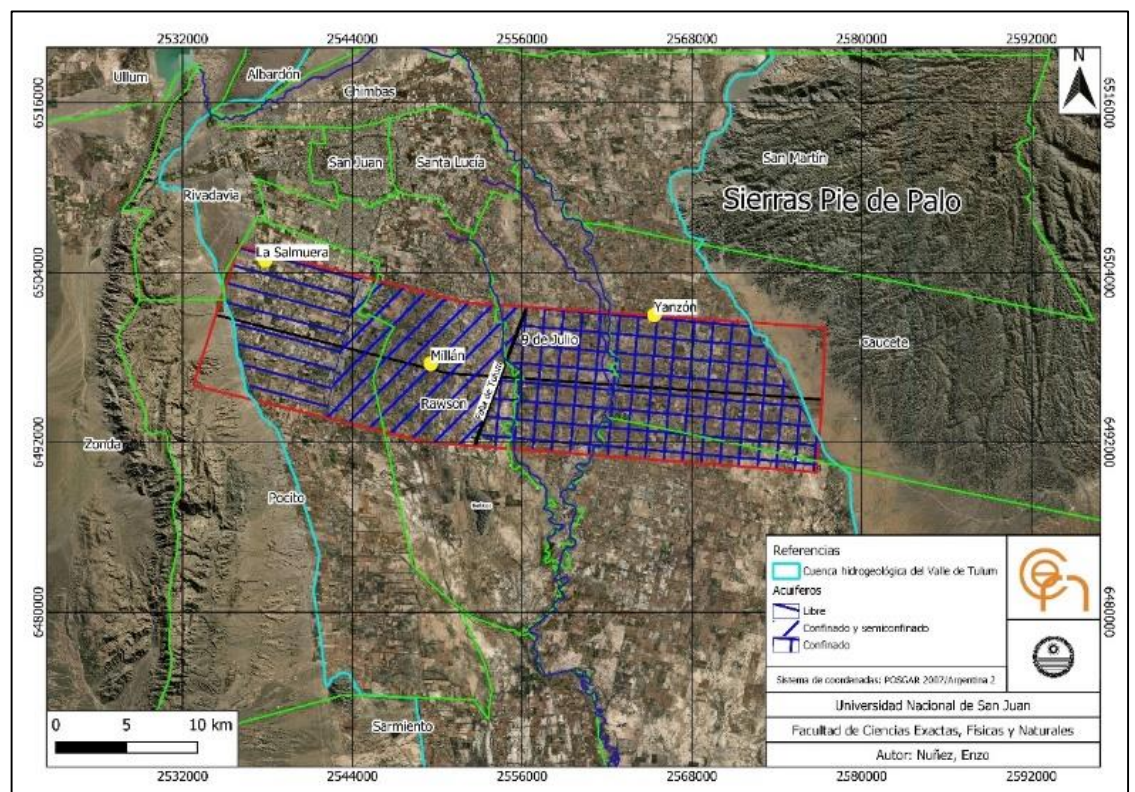


Figura 6.5: Ubicación de los ensayos de bombeos realizados sobre la zona de trabajo

Ensayo 1: Bodega Yanzón, departamento de Cauce.

La primera prueba hidráulica se realizó sobre el acuífero confinado de Tulum inferior (Anexo 7); el ensayo se extendió durante 8 horas para alcanzar el régimen permanente, tanto en el pozo principal (6.500.995 N; 2.565.338 E) como en el pozo de observación (6.501.177 N; 2.565.032 E).

La captación principal tiene una profundidad total de 170 metros, y un filtro único de 10" y 30 metros de longitud (entre 140 y 170 metros) con 1,5 mm de apertura. Mientras que el pozo de observación, situado a 300 metros de distancia, posee una profundidad total de 172 metros y las características de diseño técnico, son similares al pozo de bombeo.

Previo al inicio del bombeo se registraron los niveles estáticos mediante una cinta piezométrica con sensor acústico (Figura 6.6) y se registraron las coordenadas de los pozos utilizando un GPS Garmin. La línea de base hidrogeológica en el pozo principal es de 34,20 metros y 37,10 metros en el pozo de observación. Durante la prueba hidráulica se trabajó con un caudal constante de 165 m³/h (165,000 litros/hora), y como consecuencia, el nivel de base del pozo principal descendió progresivamente hasta alcanzar el equilibrio técnico a los 43,21 metros, con lo cual se registró un descenso total de 9,01 metros. Mientras que en el pozo de observación, el nivel descendió apenas 0,21 metros.



Figura 6.6: Cinta piezométrica con sensor acústico

El análisis de los datos, procesados en el *software* AquiferTest, indicó una transmisividad (T) entre 4000 y 4700 m²/día y un coeficiente de almacenamiento (S) de 0.028. Estos valores indican que el acuífero posee alta capacidad para transmitir y liberar cantidades significativa de

agua con descensos piezométricos bajos. Sin embargo, el coeficiente de almacenamiento obtenido es muy alto para este tipo de acuífero, lo que surge recarga lateral debido a la proximidad del Río San Juan o la presencia de un paleocauce.

Ensayo 2: La Salmuera, departamento de Pocito.

El segundo ensayo se llevó a cabo sobre el acuífero libre de Tulum superior (Anexo 8); la prueba se extendió durante 5 horas (300 minutos) para alcanzar el régimen permanente, sobre el pozo principal (6504860 N; 2537831 E) y en el pozo de observación (6504991 N; 2537307 E), situado a 540 metros de distancia.

El pozo de bombeo tiene una profundidad total de 99 metros, y está equipado con un filtro de 10" y 10 metros de longitud (entre los 83 y 93 metros), y 2 mm de abertura. El pozo de observación, posee una profundidad total de 99 metros, filtro único entre 85 y 96 metros, y ranura de 2 mm.

Antes de comenzar con el ensayo de bombeo (Figura 6.7), se monitoreó la línea de base hidrogeológica: 83,47 metros en el pozo principal y 88,01 metros en el pozo de observación. Durante la prueba hidráulica se mantuvo un caudal constante de 136 m³/h (165,000 litros/hora), y como consecuencia, el desnivel de agua del pozo principal alcanzó 89,51 metros. Mientras que en el pozo de observación, el nivel de descenso es de 1,5 metros.



Figura 6.7: Ensayo de bombeo en La Salmuera

El análisis de los datos señala una transmisividad (T) de 1440 m²/día y coeficiente de almacenamiento (S) igual a 0.051. Estos valores indican que el acuífero tiene buena capacidad

para ceder y almacenar agua, coherentes con un sistema sedimentario aluvial bien desarrollado, caracterizado por facies de alta permeabilidad, típicas del abanico aluvial del Río San Juan.

Ensayo 3: Finca Millán, departamento de Rawson.

A principios de noviembre del año 2024, se realizaron dos ensayos escalonados en el departamento de Rawson (Anexo 9): sobre el acuífero confinado (6.497.711 N; 2.549.628 E) y semiconfinado (6.497.572 N; 2.549.538 E). Se trabajó únicamente con el pozo principal.

El pozo de bombeo, en el acuífero confinado, tiene una profundidad total de 54 metros y un filtro ubicado entre el metro 37 y 52, con ranura de 2 mm. Mientras que la captación del acuífero semiconfinado, tiene una profundidad de 130 metros, y un filtro único de 30 metros de longitud (entre 99 y 129 metros) con ranura de abertura de 2 mm.

Antes de iniciar la prueba hidráulica, se midió la línea base hidrogeológica y se obtuvo: 5,20 metros en el acuífero confinado y 5,25 metros en el semiconfinado.

Durante el ensayo sobre el acuífero confinado, el descenso del nivel piezométrico fue progresivo y marcado por tres etapas de caudales. En la primera fase, con un caudal de 120 m³/h, el nivel descendió hasta estabilizarse a los 8,58 metros. Luego, al aumentar el caudal a 180 m³/h, el descenso continuó hasta alcanzar los 11,98 metros, y finalmente, con un caudal de 295 m³/h, el nivel bajó hasta estabilizarse en 14,08 metros; por lo que se registra un descenso total de 8,83 metros en tres horas de bombeo.

Sobre el acuífero semiconfinado, la primera fase de 80 m³/h registró un descenso del nivel piezómetro hasta estabilizarse a los 9,53 metros de profundidad. Posteriormente, al incrementar el caudal a 120 m³/h, el descenso continuó hasta los 14,10 metros, y por último, con caudal de 183 m³/h, el nivel bajó hasta estabilizarse en 21,72 metros; es decir, se alcanzó un descenso total de 16,52 metros.

Los análisis de estos datos, mediante los modelos de Theis y Jacob-Cooper, mostraron grandes diferencias, sobre todo cuando se comparan con el marco hidrogeológico de la zona. Es decir, no hay coincidencia entre los resultados de transmisividad y coeficiente de almacenamiento, lo que dificultó obtener estimaciones confiables.

Estas discrepancias pueden explicarse por varias causas: incorrecta variabilidad del caudal aplicado, posibles errores en la mediciones descenso-tiempo, u obstrucción del filtro debido a la presencia de gravas colmatadas.

Por lo tanto, para cumplir el objetivo de contribuir con el INA-SCRAS, en la estimación de las reservas totales de la unidad acuífera del Valle de Tulum, se consideraron las evaluaciones del acuífero libre del departamento Pocito y el confinado en el departamento Caucete.

7. DISCUSIONES

El presente trabajo tuvo como objetivo principal, identificar y caracterizar las unidades hidrogeológicas del sector centro-sur del Valle de Tulum, mediante la interpretación y reinterpretación de sondeos eléctricos verticales y la confección de una sección hidrogeológica representativa del subsuelo.

Se reconocieron seis unidades hidrogeológicas: depósitos cuaternarios insaturados, depósitos cuaternarios saturados, unidad hidrogeológica Mogna y base impermeable Lomas de Las Tapias, sobre los carbonatos cambro-ordovícicos de la Sierra Chica de Zonda y el basamento metamórfico Grenvilliano de la Sierra Pie de Palo.

De acuerdo a Rocca (1969), la Formación Mogna es definida como una unidad acuífera de valor inferior respecto a los sedimentos cuaternarios saturados. En tanto, Gianni (2023) le asignó un espesor promedio de aproximadamente 400 metros, y en casos puntuales, de hasta 640 metros. Además, se discute la ubicación del límite entre la Formación Mogna y la unidad acuífera.

En el presente trabajo se propone considerar a la unidad hidrogeológica Mogna como acuitardo, ya que se encuentra entre la capa superior permeable, saturada con agua subterránea, y el basamento hidrogeológico Lomas de las Tapias. Su composición conglomerádica le confiere la capacidad de almacenar agua pero el cemento intergranular que posee genera una permeabilidad técnicamente baja, que limita la capacidad de ceder agua de manera económica. Sin embargo, en casos excepcionales, como zonas donde el recurso subterráneo es escaso, esta unidad podría considerarse como acuífero.

Además, este trabajo no solo propone el contacto con la unidad acuífera sino que también se estima un espesor máximo de 710 metros detectado por el sondeo A32 en el departamento Rawson. No obstante, la ausencia de perforaciones que alcance este probable acuitardo, implica incertidumbre sobre el comportamiento hidrogeológico e hidráulico.

Cabe destacar que la interpretación mediante los SEV presenta cierta ambigüedad, ya que la resistividad eléctrica no depende únicamente de la litología, sino también de factores como el porcentaje de saturación de agua, grado de salinidad del agua, entre otras. Además, las interpretaciones realizadas carecen de perfiles litológicos profundos que permitan verificar con certeza la presencia de todas las unidades hidrogeológicas propuestas.

8. CONCLUSIONES

Mediante la interpretación y reinterpretación de sondeos eléctricos verticales (SEV), se confeccionó la sección hidrogeológica A-A' con el objetivo de identificar y caracterizar las unidades hidrogeológicas de la cuenca subterránea del Valle de Tulum. El análisis de las curvas de resistividades aparentes de los SEV, permitió reconocer 6 unidades hidrogeológicas y un sistema estructural dominado por fallas.

Se detectó el basamento geológico que aflora en Sierra Pie de Palo, por cual se presentan rocas metamórficas de edad grenvilliana en el subsuelo, como así también los carbonatos que se correlacionan con las rocas expuestas en la Sierra Chica de Zonda. Las resistividades aparentes de ambas unidades hidrogeológicas, son generalmente muy altas debido a que se caracterizan como cuerpos rocosos compactos. Sin embargo, los sondeos de la sección revelan valores bajos (Cuadro II), por lo que se interpreta que estas unidades se encuentran intensamente fracturadas, con posibles espacios rellenos de material fino y/o presencia de agua mineralizada.

La base impermeable de la cuenca está representada por la unidad hidrogeológica Loma de Las Tapias, identificada a profundidades que varían entre 76 metros y 1,080 metros. Esta unidad, compuesta principalmente por limonitas y arcilitas, contiene agua mineralizada (Rocca, 1969) y por ende los sondeos detectan esta unidad mediante valores bajos de resistividad, correspondientes a una electrocapa conductiva. Su espesor total no se logra determinar de forma completa a lo largo de la sección, debido a la falta de datos subyacentes entre los sondeos A10 y A38. No obstante, en Tulum superior A9 registra un espesor máximo de 415 metros (Figura 6.3), y en Tulum inferior, el par A43-A44 identifica 400 metros de espesor máximo (Figura 6.4).

La unidad hidrogeológica Mogna probablemente actué como acuitardo, ya que se encuentra intercalada entre la unidad acuífera y la base impermeable. Es decir, su composición

conglomerádica permite almacenar agua pero el cemento que posee genera una permeabilidad técnicamente baja, que limita la capacidad de ceder agua de manera eficiente. En zonas donde el recurso subterráneo es escaso, esta unidad puede considerarse como acuífero económico; el sondeo A32 detecta el máximo espesor con 710 metros, en el departamento Rawson.

Se logró identificar la unidad hidrogeológica principal a lo largo de toda la sección, compuesta por diferentes intervalos litológicos (Tabla 3). Entre los sondeos A3 y A19, se presentan gravas y arenas gruesas que contienen el acuífero libre del sector occidental del departamento Pocito. Hacia el este de la sección, se reconocen arenas gruesas con gravas entre A20 y A38, las cuales dan lugar a los acuíferos semiconfinado y confinado del sector oriental de Pocito y departamento Rawson. En los departamentos 9 de julio y Caucete, se identificaron depósitos de arenas con limos y arcillas, entre A39 y A64, que albergan el acuífero confinado.

Debido a las diferentes características hidrogeológicas del área de estudio, se determinaron distintas zonas saturadas (Anexo 6): entre 26 metros y 500 metros en el acuífero libre, desde 165 metros hasta 465 metros sobre los acuíferos semiconfinado y confinado, y entre 191 metros y 474 metros en el acuífero confinado. Por lo tanto, el sector económicamente óptimo para la explotación del recurso hídrico subterráneo, corresponde al tramo comprendido entre los sondeos A12 y A15, ubicado en el departamento Pocito, ya que el espesor del acuífero libre alcanza su máximo de 500 metros sobre el sondeo A14.

Por su parte, la variación granulometría de los depósitos cuaternario insaturado controla las condiciones hidrogeológicas de la unidad acuífera (Tabla 4). Se reconoce la parte central del abanico aluvial con materiales gruesos y permeables, que favorecen la infiltración del agua y la formación del acuífero libre. Como así también, se identifica la parte distal del abanico y la extensa planicie aluvial, constituida por el dominio de sedimentos finos impermeables, que ocasionan las condiciones de confinamiento.

Por lo tanto, la sección hidrogeológica permitió representar como la depresión del Valle de Tulum se encuentra rellena por los depósitos detríticos insaturados y la unidad acuífera del Cuaternario, sobre el probable acuitardo de Mogna del Plioceno y la base impermeable de Lomas de Las Tapias de edad miocena. Además de los carbonatos cambro-ordovícico de la Sierra Chica de Zonda y el basamento metamórfico grenvilliano de la Sierra Pie de Palo (Anexo 10).

Con respecto al marco estructural del subsuelo, se reconoce el Sistema de Fallas de Tulum definido por Zambrano y Suvires (2008); es decir, fallas precuaternarias de buzamiento alto, que afectan a las unidades más antiguas y delimitan bloques elevados y hundidos, lo que originó cambios bruscos en los espesores de las unidades suprayacentes. A su vez, se detectó la Falla inversa de Tulum definida por Rocca (1969), en el centro de la zona de trabajo. Esta fractura, eleva el basamento geológico de Tulum inferior y corta las unidades hidrogeológicas de Lomas de Las Tapias y Mogna (Figura 6.2), con 100 metros de aproximadamente rechazo.

Por otro lado, mediante los ensayos de bombeo, se interpretó que el acuífero libre de Tulum superior presenta alta capacidad para transmitir, ceder y almacenar agua subterránea; es decir, condiciones hidrogeológicas favorables para la explotación. Mientras que el acuífero confinado de Tulum inferior, también posee alta capacidad para ceder y liberar cantidades significativas de agua, pero mayores a las expectativas; posiblemente, se presenta una recarga lateral influenciada por la cercanía del Río San Juan o un antiguo cauce.

El análisis de los resultados de los ensayos de bombeo, junto con la descripción e interpretación de las unidades hidrogeológicas mediante la sección, contribuyeron significativamente a la estimación de las reservas totales del recurso subterráneo y a la definición geométrica de la cuenca hidrogeológica de Tulum, dentro del proyecto “Estimación de Reservas Totales de Agua Subterránea de la Provincia de San Juan, Etapa I: Valle Ullúm-Zonda y Tulum.” elaborado entre el Instituto Nacional del Agua - Subgerencia del Centro Regional de Agua Subterránea (INA-SCRAS), y Ministerio de obras y Servicios públicos.

9. RECOMENDACIONES

Se propone recopilar y realizar nuevos sondeos eléctricos verticales, para construir secciones hidrogeológicas en el sector norte y sur del área de estudio, con el fin de ampliar y delimitar con mayor precisión la morfología de las unidades, y completar con más detalle la geometría de la cuenca subterránea.

A su vez, se recomienda, en la medida de lo posible, completar la información hidrogeológica del sector-centro sur y de las futuras secciones en los extremos norte y sur, con perforaciones que alcancen la unidad hidrogeológica Mogna, o bien, estudios sísmicos de alta resolución.

10. Bibliografía

- Allmendinger, R., Figueroa, D., Snyder, D., Beer, J., Mpodozis, C. e Isacks, B. (1990). Acortamiento del antepaís y balance cortical en los Andes a los 30° de latitud sur. *Tectonics*, IX (4), 789–809.
- Amos, A. (1954). Estructura de las formaciones paleozoicas de la Rinconada, pie oriental de la Sierra Chica de Zonda, San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, IX (1), 5–38. Buenos Aires.
- Amos, A. y Fernández, J. (1977). Estructura del Cerro Bola al noreste de la quebrada de La Flecha, San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, XXXI (4), 241–247.
- Aparicio, E. (1966). Rasgos geomorfológicos de la Provincia de San Juan. *Actas de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, VIII (3). San Juan: Actividad Cuyana de Ingeniería.
- Arias, D., Echeverri, R. y Hoyos, P. (2012). Relaciones geoelectricas en la exploración geotécnica. *Ciencias de la Tierra*, (31), 39–50.
- Armella, C. (1994). Ciclos trombolíticos-estromatolíticos de la secuencia límite Cámbrico–Ordovícico, cuenca de la Precordillera Oriental, oeste de Argentina. En J. Bertrand-Sarfati y C. Monty (Eds.), *Estromatolitos fanerozoicos* (Vol. 2, pp. 421–441). Países Bajos: Kluwer Academic Publishers.
- Astier, J. (1975). *Geofísica aplicada a la hidrogeología*. Madrid: Paraninfo.
- Astini, R. (1994). Las megaturbiditas de la Formación Trapiche (Ordovícico superior de la Precordillera), procesos sedimentarios y marco geológico. *Actas de la V Reunión Argentina de Sedimentología*, I, 107–112. San Miguel de Tucumán.
- Augé, M. (2005). *Perforaciones hidrogeológicas*. Inédito.
- Baldis, B. y Blasco, G. (1975). Primeros trilobites Ashgillianos del Ordovícico sudamericano. *Actas del I Congreso Geológico Argentino – Paleontología y Bioestratigrafía*, I, 33–48.
- Baldis, B. y Beresi, M. (1981). Biofacies de culminación del ciclo deposicional calcáreo del Arenigiano en el oeste de Argentina. *Actas del II Congreso Latinoamericano de Paleontología*, I, 11–18. Brasil.

- Baldis, B. y Blasco, G (1975). Primeros trilobites Ashgillianos del Ordovícico sudamericano. *Actas I. Geológica Argentina. Paleontología Bioestratigrafía.*, I: 33–48.
- Baldis, B. y Chebli, G. (1969). Estructura profunda del área central de la Precordillera sanjuanina. *Actas IV Jornada Geológica Argentina I*: 47–65, San Juan.
- Baldis, B., Beresi, M., Bordonaro, O. y Vaca, A. (1982). Síntesis evolutiva de la Precordillera argentina. *Actas del V Congreso Latinoamericano de Geología*, IV, 339–445.
- Baldis, B. y Bordonaro, O. (1981). Evolución de facies carbonáticas en la cuenca cámbrica de la Precordillera de San Juan. *Actas del VIII Congreso Geológico Argentino*, II, 385–397. San Luis.
- Bastías, H., Weidmann, N. y Pérez, M. (1984). Dos zonas de fallamiento Plio-Cuaternario en la Precordillera de San Juan. *Actas del IX Congreso Geológico Argentino*, II (9), 329–341.
- Bordonaro, O. (1986). Bioestratigrafía del Cámbrico Inferior de San Juan. *IV Congreso Argentino de Paleontología y Bioestratigrafía. Mendoza, Argentina. Actas*, 1, 19-27.
- Bordonaro, O. (2003). Evolución paleoambiental y paleogeográfica de la cuenca cámbrica de la Precordillera argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 58(3), 329-346.
- Carlos, L. (1999). Carbonífero y Pérmico de las Sierras Pampeanas, Famatina, Precordillera, Cordillera Frontal y Bloque de San Rafael. *Instituto de Geología y Recursos Minerales. Geología Argentina, Anales* 29(12), 261–318.
- Cingolani, C. y Varela, R. (1999). El Bloque de San Rafael, Mendoza (Argentina): Edad isotópica Rb-Sr de las rocas del basamento. *II Simposio Sudamericano de Geología Isotópica, Anales del SEGEMAR*, XXXIV, 23–26
- Comínguez, A., y Ramos, V. (1991). La estructura profunda entre Precordillera y Sierras Pampeanas de la Argentina: Evidencias de la sísmica de reflexión. *Revista Geológica de Chile*, 18(1), 3–14.
- Jacob, C. y Cooper, H. (1946). Un método gráfico generalizado para evaluar constantes de formación y resumir la historia de un campo de pozos. *Transactions of the American Geophysical Unión*, XXVII, 526–534.

- Costa, C., Machette, M., Dart, R., Bastias, H., Paredes, J., Perucca, L., Tello, G. E., y Haller, K. (2000). Mapa y base de datos de fallas y pliegues cuaternarios en Argentina. Informe de archivo abierto 00-0108, Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), 76 p.
- Cristallini, E., y Ramos, V. (2000). Corrimientos de piel gruesa y piel delgada en la faja plegada y corrida de La Ramada: evolución cortical de los Andes Altos de San Juan, Argentina (32° S). *Tectonophysics*, 317(3–4), 205–235.
- Cuerda, A. (1982). Graptolitos del Silúrico inferior en la Formación Rinconada, Precordillera de San Juan, Argentina. *Ameghiniana*, XVIII (3–4), 241–247.
- Custodio, E., y Llamas, M. (1983). Hidrología subterránea.
- Dalla Salda, L., y Varela, R. (1982). La estructura del basamento del tercio sur de la Sierra de Pie de Palo, Provincia de San Juan, Argentina. 5° Congreso Latinoamericano de Geología, Actas I, 451–468.
- Dalla Salda, L., y Varela, R. (1984). El metamorfismo en el tercio sur de la Sierra de Pie de Palo, San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, XXXIX (1–2), 68–93
- Ehlers, T. y Poulsen, C. (2009). Influencia del levantamiento andino en el clima y las estimaciones de paleoaltimetría. *Earth and Planetary Science Letters*, 281(3–4), 238–248
- Gianni, R., y Patricia, L. (2023). Estimación de las reservas totales de agua subterránea en las cuencas de los Valles de Tulum y Ullúm – Zonda. Provincia de San Juan. Informe de Avance N° 1. Instituto Nacional del Agua. Centro Regional de Agua Subterránea.
- Harrington, H. (1971). Hoja Geológica 22c «Romblón», Provincias de Mendoza y San Juan. Boletín 114, Dirección Nacional de Geología y Minería, 87 pp
- Heim, A. (1948). Observaciones tectónicas en La Rinconada, Precordillera de San Juan. *Boletín de la Dirección de Minas y Geología*, 64
- Heim, A. (1952). Estudios tectónicos en la Precordillera de San Juan, Los Ríos San Juan, Jáchal y Huaco. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, VII, 11–70.
- Hong, I. (1969). Plan de Agua Subterránea. República Argentina. Hidrología del Valle de Tulum, San Juan: Consejo Federal de Inversiones, PNUD.
- Jordan, T. E., Isacks, B., Ramos, V. A., y Allmendinger, R. W. (1983). Formación de montañas en los Andes Centrales. *Episodes*, III, 20–26.

- Kay, S., MaksaeV, V., Moscoso, R., Mpodozis, C., Nasi, C., y Gordillo, C. (1987). Magmatismo andino terciario en Chile y Argentina entre los 28°S y 33°S: correlación de la química magmática con una zona de subducción que cambia. *Journal of South American Earth Sciences*, I (1), 21–38.
- Kay, S., Orrell, S., y Abbruzzi, J. (1996). Evidencia isotópica de Nd-Pb en circón y roca completa para una edad Grenville y un origen Laurentiano en el terreno de la Precordillera de Argentina. *Journal of Geology*, CIV, 637–648.
- Keidel, J. (1938). Sobre los muros de Gondwana en Argentina. *Geologische Rundschau*, XXX (2), 148–249.
- Keller, M., y Bordonaro, O. (1993). Arrecifes de estromatopóridos en el Ordovícico inferior del oeste argentino y sus implicaciones paleogeográficas. *Revista Española de Paleontología*, VIII (2), 165–169.
- Keller, M., Cañas, F., Lehnert, O., y Vaccari, E. (1994). El Cámbrico superior y el Ordovícico inferior de la Precordillera (oeste de Argentina): algunas reconsideraciones estratigráficas. *Newsletters in Stratigraphy*, XXXI, 115–132.
- Keller, M., Eberlein, S., y Lehnert, O. (1993). Sedimentología de carbonatos del Ordovícico medio en la Precordillera argentina: evidencias de cambios regionales en el nivel relativo del mar. *Geologische Rundschau*, LXXXII, 362–377.
- Köppen, W., y Geiger, R. (1936). El sistema geográfico de los climas. En W. Köppen y R. Geiger (Eds.), *Manual de climatología* (Vol. I, Parte C, pp. 1–44). Berlín: Gebrüder Borntraeger.
- Leveratto, M. (1968). Geología de la zona al oeste de Ullúm-Zonda, borde oriental de la Precordillera de San Juan, eruptividad subvolcánica y estructura. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, XXIII (2), 129–157.
- Levy, R. y Nullo, F. (1974). La fauna del Ordovícico (Ashgilliano) de Villicum, San Juan, *Ameghiniana*, XI (2), 173–194.
- Lloret, G. (2000). Hidrogeología del sector central del Valle de Tulum. Trabajo Final de Licenciatura, Universidad Nacional de San Juan, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. San Juan.

- Lloret, G. y Suvires, G. M. (2006). Cuenca de agua subterránea del Valle de Tulum, San Juan, Argentina: Un análisis morfohidrogeológico de su sector central, San Juan, Argentina. *Revista Sudamericana de Ciencias de la Tierra*, XXI (3), 267–275.
- Lupano, C. (2008). Cuenca del Río San Juan. Obtenido de https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/54_nueva.pdf
- Martínez, M. (2008). Manifestaciones geomorfológicas y geofísicas de una estructura geológica profunda al sur de la Sierra de Pie de Palo, Sierras. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, LXIII (2), 264–271.
- Martos, L. (1987). Evidencias de movimientos neotectónicos en una terraza de edad Holocena, La Rinconada, San Juan. 10º Congreso Geológico Argentino, Actas, I, 263–265. San Miguel de Tucumán.
- Meigs, A. (2006). Replegamiento de mantos de corrimiento de piel delgada por fallas inversas activas con participación del basamento en la Precordillera oriental del oeste argentino. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, LXI (4), 589–603.
- Mestre, A. y Heredia, S. (2014). El Paleozoico Inferior del borde oriental de la Sierra de Pedernal-Cienaguita, Precordillera Oriental. *Serie Correlación Geológica*, XXX (1), 5–12.
- Milana, J. (1990a). Facies y paleohidrología de conglomerados aluviales plio-pleistocenos (San Juan, Argentina): evidencias de fases climáticas en los Andes a los 31° Sur. 2º Simposio sobre el Terciario de Chile, Actas, 215–224. Santiago.
- Milana, J. (1990b). Secuencias sedimentarias aluviales, subsidencia y tectonismo en la cuenca de antepaís andina de la provincia de San Juan, Argentina. 2º Simposio sobre el Terciario de Chile, Actas, 205–214. Santiago.
- Milana, J. (1991). Sedimentología y magnetoestratigrafía de formaciones cenozoicas en el área de Mogna y su inserción en el marco tectosedimentario de la Precordillera Oriental. Tesis Doctoral (inédito), Universidad Nacional de San Juan.
- Montenegro, M. (2019). Diques de San Juan: monumentales obras de ingeniería que aseguran agua y energía. Obtenido de <https://sisanjuan.gob.ar/interes-general/2019-10-03/17803-diques-de-san-juan-monumentales-obras-de-ingenieria-que-aseguran-agua-y-energia>

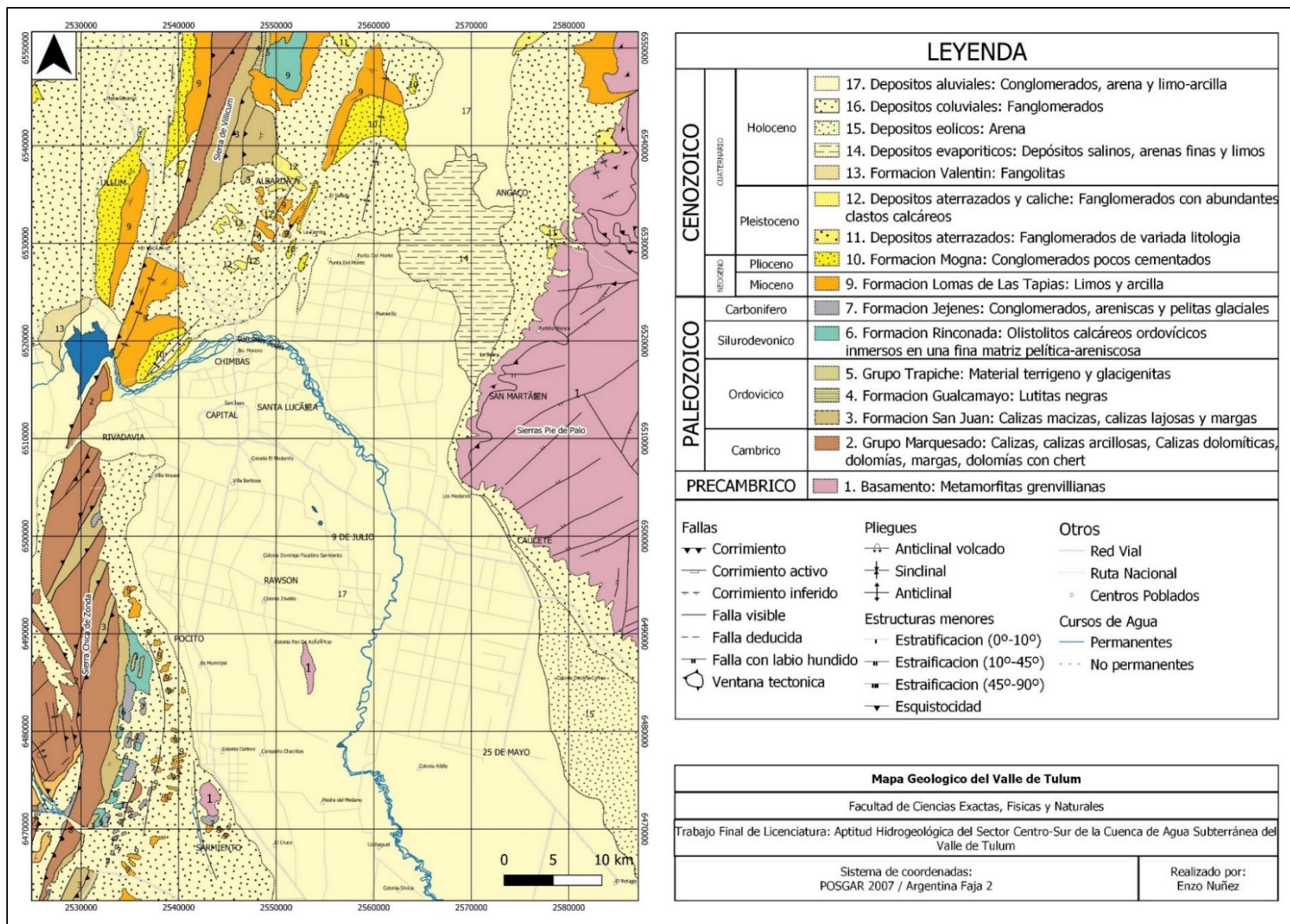
- Núñez, E., Ruiz, M., Chuk, D. y Rossini, B. (2013). Determinación de perfiles de humedad en suelos homogéneos a través de un método geoelectrico. *Ciencia del Suelo*, XXXI (2), 271–277.
- Orellana, E. (1972). Prospección geoelectrica en corriente continua.
- Ortiz, A. y Zambrano, J. (1981). La provincia geológica Precordillera Oriental 8° Congreso Geológico Argentino, Actas, III, 59–74. San Luis.
- Paganini, G. (2019). Evaluación de resultados de Sondeos Eléctricos Verticales en la prospección de agua subterránea en la provincia de Neuquén, Argentina.
- Pellegrinuzzi, A. (2023). San Juan, un rompecabezas de 4 piezas geológicas, único en el país. Huarpe.
- Peralta, S. (1986). Graptolitos del Llandoveryano inferior en el Paleozoico inferior clástico del pie oriental de la Sierra de Villicum, Precordillera Oriental de San Juan. 1° Jornada Geología de Precordillera, Actas, I, 134–156.
- Peralta, S. (1993a). Estratigrafía y consideraciones paleoambientales de los depósitos marino-clásticos eopaleozoicos de la Precordillera Oriental de San Juan. 12° Congreso Geológico Argentino, Actas, I, 128–137.
- Peralta, S. H. (1984). Ludlowiano en la Precordillera Oriental sanjuanina. 9° Congreso Geológico Argentino, Actas, IV, 296–304.
- Peralta, S. y Baldi, B. (1990). *Glyptograptus persculptus* en la Formación Don Braulio (Ashgilliano tardío - Llandoveryano temprano), Precordillera Oriental de San. 5° Congreso Argentino de Paleontología y Bioestratigrafía, Actas, I, 67–72.
- Peralta, S. y Uliarte, E. R. (1986). Estructura de la Formación Rinconada (Eopaleozoico) en su localidad tipo, Precordillera de San Juan. Asociación Geológica Argentina, Serie A, Monografías y Reuniones, II, 247–252.
- Pereyra, B. (1993). Clima de San Juan. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan. San Juan.
- Pereyra, B. (1995). Clima del Valle de Tulum. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan. San Juan. Inédito.

- Pereyra, B. (1996). Clima de la provincia de San Juan. Catálogo de recursos humanos e información relacionada con la temática ambiental de la región andina argentina. Obtenido de <https://www.mendoza-conicet.gob.ar/ladyot/catalogo/cdandes/cap11.htm>
- Perucca, L., Audemard, F., Pantano, A., Vargas, H., Ávila, C. y Onorato, M. (2012). Vergencias opuestas cuaternarias en el área de Acequión, Precordillera de San Juan.
- Peyric, A. (2017). Manejo del recurso de agua, dinámica natural, disponibilidad, explotación y demanda para el consumo humano en el Gran San Juan - San Juan, Argentina.
- Poblete, R. (1989). Los mesoclimas de San Juan - Primera parte. Informe Técnico N° 11, Centro de Investigaciones de San Juan, Universidad Nacional de San Juan.
- Ramírez, B. (2023). Caracterización geoelectrica 1D y 2D por medio de la aplicación de sondeos eléctricos verticales y tomografías eléctricas de la cantera Denise al noreste de San Antonio de los Cobres, provincia de Salta.
- Ramos, V. (1999). Las provincias geológicas del territorio argentino. *Geología Argentina*, XXIX (3), 41–96.
- Ramos, V. (1988). Tectónica del Proterozoico tardío y Paleozoico temprano: una historia colisional del sur de América del Sur. *Episodes*, XI (3), 168–174.
- Ramos, V., Jordan, T., Allmendinger, R., Mpodozis, C., Kay, S., Cortés, J. y Palma, M. (1986). Terrenos paleozoicos de los Andes centrales argentino-chilenos. *Tectónica*, V (6), 855–880.
- Ramos, V., Vujovich, G., Cardó, R., Pérez, L., Pelichotti, R., Godeas, M., y Chernicoff, C. (2000). Hoja Geológica 3169-IV San Juan. Buenos Aires: Servicio Geológico Minero Argentino.
- Regairaz, A., Suvires, G. M. y Simon, W. (1987). Síntesis geomorfológica de la provincia de San Juan. *Actas X° Congreso Geológico Argentino*, III, 330–344. San Miguel de Tucumán.
- Rocca, J. (1969). Geología de los valles de Tulum y Ullúm-Zonda. Provincia de San Juan.
- Rodríguez, A., Ocaña, R., Suvires, G., Leiva, M. y Martínez, M. (2018). Estructuras tectónicas en un valle árido y su potencial hídrico subterráneo, San Juan.
- Rodríguez, A. (2019). Geología del cuaternario y geofísica aplicada al diagnóstico ambiental-territorial en el valle de Tulum, provincia de San Juan, Argentina. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de San Juan, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

- Rossa, N., Uliarte, E. y Vaca, A. (1986). Magmatismo traquítico en la Precordillera Oriental. Actas I Jornadas sobre Geología de Precordillera (San Juan, 1985). Asociación Geológica Argentina, Serie A - Monografía y Reuniones, II, 337–341, Buenos Aires.
- Salinas, C. (2004). Geografía de los peligros ambientales en el ángulo noroeste del departamento Rawson. Tesis de Licenciatura, Departamento de Geografía, FFHA, UNSJ. San Juan.
- Salvioli, L., Luna, P., Carelli, F., Cabrera, G., Gianni, R. y Linares, R. (2024). Estimación de las reservas totales de agua subterránea en las cuencas de los valles de Tulum y Ullúm-Zonda, provincia de San Juan. Informe técnico. Convenio INA - Ministerio de Infraestructura, Agua y Energía de la Provincia de San Juan.
- Sanchez, J. (2022). Departamento de geología, Universidad de Salamanca. España. Obtenido de <https://hidrologia.usal.es/bibliografia.html>
- Sarmiento, G. (1986). La biozona de *Amorphognathus variabilis*–*Eoplacognathus pseudoplanus* (Conodonta), Llanvirniano inferior, en el flanco oriental de la Sierra de Villicum. Actas I Jornadas de Geología de Precordillera, 119–123.
- Sato, A., Tickyj, H., Llambías, E. y Sato, K. (1999). Restricciones de edad Rb-Sr, Sm-Nd y K-Ar del plutón grenvilliano Las Matras, Argentina central. Actas II Simposio Sudamericano de Geología Isotópica, 122–126. Córdoba: SEGEMAR.
- Schlumberger, C. (1920). Estudio sobre la prospección eléctrica del subsuelo.
- Serafini, R. L., Bustos, N. R. y Contreras, V. H. (1986). Geología de la Formación Lomas de las Tapias (nov. nom.). Asociación Geológica Argentina, Serie A - Monografías y Reuniones, II, 77–82, Buenos Aires.
- Subsecretaría de Recursos Hídricos (2002). Atlas digital de los recursos hídricos superficiales de la República Argentina. Buenos Aires. Obtenido de https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/54_nueva.pdf
- Suvires, G. (1996). Geomorfología de la provincia de San Juan. En Catálogo de recursos humanos e información relacionada con la temática ambiental en la región andina Argentina. Obtenido de <https://www.mendoza-conicet.gob.ar/ladyot/catalogo/cdandes/cap11.htm>

- Suvires, G. (2014). El paradigma de los megabancones paraglaciares de la cuenca del río San Juan, Andes Centrales, Argentina. *J. South Am. Earth Sci.*, LV, 166–172.
- Terrizzano, C., Morabito, E., Christl, M., Likerman, J., Tobal, J., Yamin, M. y Zech, R. (2017). Forzamiento climático y tectónico en los conos aluviales del sur de los Andes Centrales.
- Theis, C. (1935). La relación entre el descenso de la superficie piezométrica y la tasa y duración de descarga de un pozo utilizando el almacenamiento de agua subterránea.
- Thornthwaite, C. (1946). Un enfoque hacia una clasificación racional del clima.
- Uliarte, E., Bastías, H., Paredes, J., Sánchez, A., Bastías, J., Ruzycski, L. y Perucca, L. (1990). Neotectónica de la provincia de San Juan. En XI Congreso Geológico Argentino, Relatorio de Geología y Recursos Naturales de la Provincia de San Juan.
- Vaccari, E. (1988). Primer hallazgo de trilobites del Cámbrico Inferior en la provincia de La Rioja (Precordillera septentrional). *Revista Asociación Geológica Argentina.*, XLIII (4), 558–561.
- Vaccari, E. (1993). El género *Annamitella* Mansuy 1920 en el Ordovícico de la Precordillera. *Ameghiniana*, XXX (4), 395–405.
- Wetten, A. (1989). Estudio hidrogeológico para abastecimiento de agua potable a la localidad del Rincón–Caucete–Provincia de San Juan. Trabajo Final de Licenciatura, Universidad Nacional de San Juan, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- Zambrano, J. y Suvires, G. (2008). Actualización en el límite entre las Sierras Pampeanas occidentales y la Precordillera Oriental, en la provincia de San Juan. *Revista Asociación Geológica Argentina*, LXIII (1), 110–116.
- Zambrano, J., Rodríguez, J., Torres, C., Damiani, O., Furlotti, F., Guimaraes, R., Rodríguez, R. y Meritello, N. (1998). Mapa hidrogeológico de la provincia de San Juan. Síntesis informativa y bibliográfica. Instituto Nacional del Agua – Subgerencia del Centro Regional de Agua Subterránea (INA-SCRAS).

11. Anexos



Anexo 1: Mapa geológico del Valle de Tulum

ID SEV	Coordenadas		COTA
	Este	Norte	
A1	2534580	6501101	682
A2	2535160	6500926	665
A3	2535491	6500852	652
A4	2535956	6500733	653
A5	2536450	6500604	648
A6	2536922	6500483	645
A7	2537457	6500327	641
A8	2537565	6500428	648
A9	2537881	6500217	637
A10	2538468	6500071	635
A11	2538900	6499945	631
A12	2539044	6499913	632
A13	2539599	6499763	633
A14	2539868	6499677	629
A15	2540312	6499557	624
A16	2540890	6499401	623
A17	2541641	6499164	620
A18	2542324	6498979	614
A19	2542889	6498822	610
A20	2543453	6498664	605
A21	2543709	6498589	601
A22	2543681	6498689	602
A23	2544113	6498482	603
A24	2544562	6498366	600
A25	2545022	6498229	597
A26	2545451	6498112	597
A27	2545997	6497962	598
A28	2546548	6497813	592
A29	2547132	6497664	585
A30	2547681	6497526	586
A31	2548002	6497446	583
A32	2548458	6497330	583

ID SEV	Coordenadas		COTA
	Este	Norte	
A33	2549484	6496967	582
A34	2549693	6497068	583
A35	2550710	6496956	581
A36	2551750	6496832	582
A37	2552729	6496746	578
A38	2553847	6496642	579
A39	2554875	6496535	579
A40	2555741	6496459	578
A41	2556413	6496215	580
A42	2556414	6496398	580
A43	2557296	6496322	579
A44	2557296	6496322	579
A45	2558290	6496210	580
A46	2559262	6496093	579
A47			
A48	2560574	6495955	582
A49	2564325	6496045	576
A50	2564407	6495936	578
A51	2565322	6495753	576
A52	2565642	6495754	576
A53	2566105	6495588	575
A54	2567069	6495406	578
A55	2568203	6495277	576
A56	2568546	6496484	580
A57	2569168	6496327	574
A58	2569813	6496222	576
A59			
A60	2571731	6495769	574
A61	2572818	6495548	576
A62	2573535	6495272	572
A63	2574075	6495252	569
A64	2574656	6495131	571

Anexo 2: Coordenadas de los SEV Sistema de coordenadas POSGAR 2007/Argentina Faja 2

ID SEV	VALORES DE RESISTIVIDADES APARENTES ($\Omega.m$)					
	UH 6	UH 5	UH 4	UH 3	UH 2	UH 1
A1						
A2						
A3	3200	421			42	
A4	2600	523			31	
A5	3700	336		11	61	
A6	1107	128		1	74	
A7	3662	183		7	92	
A8	3660	185		8	90	
A9	3500	150		8	50	
A10	880	216		11		
A11	1214	190		12		
A12	1212	188		14		
A13	482	131		1		
A14	286	127		1		
A15	720	164		15		
A16	728	175		8		
A17	616	207		9		
A18	557	226	40	2		
A19	425	272	22	4		
A20	38	228	65	7		
A21	41	227	63	6		
A22	40	229	66	8		
A23	75	240	53			
A24	53	370	43			
A25	44	192	83	2		
A26	44	198	90			
A27	50	157	54	3		
A28	70	116				
A29	51	256	42	5		
A30	49	76	334	3		
A31	49	81	115			
A32	46	72	126	2		

ID SEV	VALORES DE RESISTIVIDADES APARENTES ($\Omega.m$)					
	UH 6	UH 5	UH 4	UH 3	UH 2	UH 1
A33	53	62	146	1		
A34	55	62	148	2		
A35	10	63	120			
A36	12	48	117	6		
A37						
A38	2	55	78	5		
A39	2	31	61	4		90
A40	10	38	54	15		118
A41	6	26	76	6		32
A42	6	26	76	6		32
A43	11	40	89	8		63
A44	11	40	89	8		63
A45	11	35	52	8		26
A46	3	35	55	9		45
A47						
A48	4	23	62	10		142
A49	7	21	111	3		
A50	8	21	111	4		
A51	4	22	79	6		82
A52	5	63	83	6		220
A53	5	41	76	6		111
A54	5	39	64	4		184
A55	7	32	59	8		190
A56	7	32	59	9		190
A57	4	17	79	7		45
A58	9	31	63			
A59						
A60	3	18	91	6		182
A61	54	16	52			52
A62	117	23	35			113
A63	98	23	45			67
A64	73	22	51			50

MIN	2	16	22	1	31	26
MAX	3700	523	334	15	92	220

Anexo 3: Resistividades aparentes de las electrocapas del sector centro-sur del Valle de Tulum

ID SEV	PROFUNDIDADES (m)							
	Nivel de Agua	Base de la UH 5	Techo de la UH 4	Base de la UH 4	Techo de la UH 3	Base de la UH 3	Techo de la UH 2	Techo de la UH 1
A1								
A2								
A3	19	103					103	
A4	23	124					124	
A5	50	76			76	254	254	
A6	56	265			265	435	435	
A7	15	210			210	590	590	
A8	17	212			212	596	596	
A9	44	252			252	667	667	
A10	40	260			260			
A11	30	302			302			
A12	30	302			302			
A13	73	522			522			
A14	43	543			543			
A15	40	460			460			
A16	126	538			538			
A17	120	565			565			
A18	94	500	500	625	625			
A19	143	542	542	700	700			
A20	138	510	510	750	750			
A21	140	510	510	773	773			
A22	140	508	508	773	773			
A23	85	550	550	825	825			
A24	81	500	500	875	875			
A25	75	538	538	930	930			
A26	76	474	474	975	975			
A27	74	465	465	1000	1000			
A28	76	450	450	1045	1045			
A29	94	400	400	1080	1080			
A30	120	372	372	900	900			
A31	156	350	350	921	921			
A32	125	290	290	1000	1000			

ID SEV	PROFUNDIDADES (m)							
	Nivel de Agua	Base de la UH 5	Techo de la UH 4	Base de la UH 4	Techo de la UH 3	Base de la UH 3	Techo de la UH 2	Techo de la UH 1
A33	33	322	322	1000	1000			
A34	33	322	322	1000	1000			
A35	18	443	443	970	970			
A36	64	465	465	915	915			
A37								
A38	16	410	410	745	745			
A39	10	300	300	610	610	950		950
A40	30	312	312	574	574	931		931
A41	43	315	315	562	562	900		900
A42	43	315	315	562	562	900		900
A43	80	340	340	600	600	1000		1000
A44	80	340	340	600	600	1000		1000
A45	130	400	400	580	580	870		870
A46	56	275	275	492	492	761		761
A47								
A48	27	397	397	693	693	910		910
A49	60	428	428	690	690	912		912
A50	60	428	428	690	690	912		912
A51	80	466	466	615	615	1000		1000
A52	122	512	512	620	620	1000		1000
A53	140	534	534	625	625	973		973
A54	140	553	553	650	650	925		925
A55	113	517	517	638	638	801		801
A56	113	517	517	638	638	801		801
A57	77	484	484	642	642	900		900
A58	167	559	559	652	652	927		927
A59								
A60	26	500	500	630	630	943		943
A61	33	457	457	575				575
A62	42	435	435	555				555
A63	26	365	365	452				452
A64	37	228	228	300				300

MIN	10	76	228	300	76	254	103	300
MAX	167	565	559	1080	1080	1000	667	1000

Anexo 4: Profundidades de las electrocapas

ID SEV	ESPESORES (m)			
	UH 6	UH 5	UH 4	UH 3
A1				
A2				
A3		84		
A4	23	101		
A5	50	26		
A6	56	209		
A7	15	195		
A8	17	195		
A9	44	208		
A10	40	220		
A11	30	272		
A12	30	272		
A13	73	449		
A14	43	500		
A15	40	420		
A16	126	412		
A17	120	445		
A18	94	406	125	
A19	143	399	158	
A20	138	372	240	
A21	140	370	263	
A22	140	368	265	
A23	85	465	275	
A24	81	419	375	
A25	75	463	392	
A26	76	398	501	
A27	74	391	535	
A28	76	374	595	
A29	94	306	680	
A30	120	252	528	
A31	156	194	571	
A32	125	165	710	

ID SEV	ESPESORES (m)			
	UH 6	UH 5	UH 4	UH 3
A33	33	289	678	
A34	33	289	678	
A35	18	425	527	
A36	64	401	450	
A37				
A38	16	394	335	
A39	10	290	310	340
A40	30	282	262	357
A41	43	272	248	338
A42	43	272	248	338
A43	80	260	260	400
A44	80	260	260	400
A45	130	270	180	290
A46	56	219	217	269
A47				
A48	27	370	296	217
A49	60	368	263	222
A50	60	368	263	222
A51	80	386	149	385
A52	122	390	108	380
A53	140	394	91	348
A54	140	413	98	275
A55	113	404	122	163
A56	113	404	122	163
A57	77	407	159	258
A58	167	392	94	275
A59				
A60	26	474	130	313
A61	33	424	118	
A62	42	393	120	
A63	26	339	87	
A64	37	191	73	

MIN	10	26	73	163
MAX	167	500	710	400

Anexo 5: Espesores de las electrocapas

ID SEV	ESPEORES DE LAS ZONAS SATURADAS		
	ACUÍFERO LIBRE	ACUÍFERO SEMICONFINADO Y CONFINADO	ACUÍFERO CONFINADO
A1			
A2			
A3	84		
A4	101		
A5	26		
A6	209		
A7	195		
A8	195		
A9	208		
A10	220		
A11	272		
A12	272		
A13	449		
A14	500		
A15	420		
A16	412		
A17	445		
A18	406		
A19	399		
A20		372	
A21		370	
A22		368	
A23		465	
A24		419	
A25		463	
A26		398	
A27		391	
A28		374	
A29		306	
A30		252	
A31		194	
A32		165	

ID SEV	ESPEORES DE LAS ZONAS SATURADAS		
	ACUÍFERO LIBRE	ACUÍFERO SEMICONFINADO Y CONFINADO	ACUÍFERO CONFINADO
A33		289	
A34		289	
A35		425	
A36		401	
A37			
A38		394	
A39			290
A40			282
A41			272
A42			272
A43			260
A44			260
A45			270
A46			219
A47			
A48			370
A49			368
A50			368
A51			386
A52			390
A53			394
A54			413
A55			404
A56			404
A57			407
A58			392
A59			
A60			474
A61			424
A62			393
A63			339
A64			191

MIN	26	165	191
MAX	500	465	474

Anexo 6: Espesores de las distintas zonas saturadas de la unidad acuífera

Ensayo de Bombeo		
Sector centro-sur del Valle de Tulum		
Departamento	Caucete	
Ubicación	Bodega Yanzón	
Acuífero confinado		
Pozo principal		
Coordenadas		6500995 N 2565338 E
Nivel estatico (m)		34.2
Caudal	Constante	165
Tiempo (min)	Descenso (m)	h (m)
0.3	1.5	35.7
1	0.21	35.91
3	0.59	36.5
5	1.8	38.3
7	0	38.3
10	0.21	38.51
15	1.11	39.62
20	0.89	40.51
30	1.31	41.82
40	0.49	42.31
60	0.74	43.05
90	0.13	43.18
120	0.02	43.2
150	0.01	43.21
240	0	43.21
300	0	43.21
360	0	43.21
420	0	43.21
480	0	43.21
Tiempo total		8 horas
Descenso total		9.01

Ensayo de Bombeo		
Sector centro-sur del Valle de Tulum		
Departamento	Caucete	
Ubicación	Bodega Yanzón	
Acuífero confinado		
Pozo de observación		
Coordenadas		6501177 N 2565032 E
Nivel estático (m)		37.1
Caudal	Constante	165
Tiempo (min)	Descenso (m)	h (m)
0.3	0	37.1
1	0	37.1
3	0	37.1
5	0	37.1
7	0	37.1
10	0	37.1
15	0.05	37.15
20	0.01	37.16
30	0.02	37.18
40	0.04	37.22
60	0.03	37.25
90	0.03	37.28
120	0.01	37.29
150	0.02	37.31
240	0	37.31
300	0	37.31
360	0	37.31
420	0	37.31
480	0	37.31
Tiempo total		8 horas
Descenso total		0.21

Anexo 7: Ensayo de bombeo 1, Finca Yanzón

Ensayo de Bombeo		
Sector centro-sur del Valle de Tulum		
Departamento	Pocito	
Ubicación	Finca La Salmuera	
Acuífero libre		
Pozo principal		
Coordenadas		6504860 N 2537831 E
Nivel estático (m)		83.47
Caudal	Constante	136
Tiempo (min)	Descenso (m)	h (m)
0.3	2.9	86.37
1	0.06	86.43
3	0.25	86.68
5	0.07	86.75
7	0.18	86.93
10	0.11	87.04
15	0.24	87.28
20	0.19	87.47
30	0.42	87.89
40	0.04	87.93
60	0.06	87.99
90	0.02	88.01
120	0.18	88.19
150	1.26	89.45
240	0.06	89.51
300	0	89.51
360	0	89.51
420	0	89.51
480	0	89.51
Tiempo total		8 horas
Descenso total		6.04

Ensayo de Bombeo		
Sector centro-sur del Valle de Tulum		
Departamento	Pocito	
Ubicación	Finca La Salmuera	
Acuífero libre		
Pozo observación		
Coordenadas		6504991 N 2537307 E
Nivel estático (m)		88.01
Caudal	Constante	136
Tiempo (min)	Descenso (m)	h (m)
0.3	0	88.01
1	-1.58	86.43
3	0.25	86.68
5	0.07	86.75
7	0.18	86.93
10	0.11	87.04
15	0.24	87.28
20	0.19	87.47
30	0.42	87.89
40	0.04	87.93
60	0.06	87.99
90	0.02	88.01
120	0	88.01
150	1.44	89.45
180	0.06	89.51
240	0	89.51
300	0	89.51
360	0	89.51
480	0	89.51
Tiempo total		8 horas
Descenso total		1.5

Anexo 8: Ensayo de bombeo 2, Finca La Salmuera

Ensayo de Bombeo		
Sector centro-sur del Valle de Tulum		
Departamento	Rawson	
Ubicación	Finca Millán	
Acuífero confinado		
Coordenadas	6497711 N	
	2549628 E	
Nivel estatico (m)	5.25	
Caudal (Q)	Variable	
Q inicial (m3/h)	120	
Tiempo (min)	Descenso (m)	h (m)
1	2.05	7.3
2	0.08	7.38
3	0.14	7.52
5	-1.95	5.57
7	2.02	7.59
10	0.04	7.63
15	0.18	7.81
20	0.08	7.89
25	0.12	8.01
30	0.51	8.52
45	0.06	8.58
60	0	8.58
70	0	8.58
Caudal 2 (m3/h)	180	
75	1.43	10.01
76	0.1	10.11
77	0.12	10.23
78	0.58	10.81
80	0.17	10.98
83	0.32	11.3
90	0.29	11.59
95	0.04	11.63
100	0.35	11.98
115	0	11.98
120	0	11.98
Caudal 2 (m3/h)	295	
121	2.01	13.99
122	14.01	14.01
123	0.04	14.03
125	0.04	14.05
130	0.04	14.07
135	0.02	14.07
140	0.01	14.08
150	0.01	14.08
170	0	14.08
Tiempo total		3 horas
Descenso total		8.83

Ensayo de Bombeo		
Sector centro-sur del Valle de Tulum		
Departamento	Rawson	
Ubicación	Finca Millán	
Acuífero semiconfinado		
Coordenadas	6497572 N	
	2549538 E	
Nivel estatico (m)	5.2	
Caudal	Variable	
Q (m3/h) inicial	80	
Tiempo (min)	Descenso (m)	h (m)
1	3.1	8.3
2	0.59	8.89
3	0.03	8.92
5	0.04	8.96
7	0.03	8.99
10	0.13	9.12
15	0.1	9.22
20	0.07	9.29
25	0.14	9.43
30	0.08	9.51
45	0.02	9.53
60	0	9.53
70	0	9.53
Caudal 2 (m3/h)	120	
75	2.59	12.12
76	0.2	12.32
77	0.29	12.61
78	0.27	12.88
80	0.13	13.01
83	0.62	13.63
90	0.25	13.88
95	0.04	13.92
100	0.18	14.1
115	0	14.1
120	0	14.1
Caudal 2 (m3/h)	183	
121	5.1	19.2
122	19.99	19.99
123	1.11	20.31
125	0.64	20.63
130	0.7	21.01
135	0.8	21.43
140	0.7	21.71
150	0.29	21.72
170	0.01	21.72
Tiempo total		3 horas
Descenso total		16.52

Anexo 9: Ensayo de bombeo 3, Finca Millán

