



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO GEOFÍSICO E HIDROGEOLÓGICO PARA UN
BANCO DE MATERIALES, EN PLAYA DEL CARMEN
QUINTANA ROO, MÉXICO.**

**INFORME ESCRITO PARA TITULACIÓN POR OPCIÓN DE
TRABAJO PROFESIONAL**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERA GEÓLOGA**

P R E S E N T A

MARTHA KARINA RIVERA MEDINA

TUTOR

Dr. JOSE ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIÚ

MÉXICO D.F. CIUDAD UNIVERSITARIA, FEBRERO DE 2013.

GRACIAS...

A Dios, no tengo la menor duda que me amas, tan es así que me has permitido hasta este día la vida y la dicha de compartir con la gente que amo este logro.

A mis padres, Martha Irma y Saúl quienes me enseñaron lo que soy y me dieron la oportunidad de llegar hasta aquí, por sus desvelos, amor y apoyo, ustedes también son ingenieros geólogos, los amo.

Nizaguie y Saúl. Hermana tú empezaste con esto y aquí estoy para decirte que has sido un gran ejemplo, me gusta seguir jugando contigo a las “comaires”, te amo. Saúl, hermano no sé qué hubiera hecho sin tenerte, me hubiera quedado sin conocer la alegría de ser hermana mayor, gracias por estar conmigo en los juegos, tonterías y enojos por eso y más te amo.

Abuelitos, tías y primos por regalarme la dicha de ser mi familia, ustedes también forman parte de esta historia.

Gustavo, por ser esa persona especial que en todo momento me ha brindado su apoyo, amistad y amor incondicional, esto también es para ti. Te amo.

A mi familia por elección: Ale, Nash, Trufo, Darío, Jorge, Luis y Angie, sin ustedes las prácticas, clases, problemas, exámenes, trabajos, fiestas, lágrimas y enojos jamás hubieran tenido el mismo sentido, sin duda aprendí de ustedes y con ustedes, los quiero y por el resto de mi vida también.

A mis petroleras favoritas, Diana y Paulina, las encontré en el mejor momento de mi vida, las quiero amigas.

Madison, Brenda, Isabel, Nayeli y Tanya mis amigas de toda la vida, tantos años y siguen a mi lado, está de más decirles cuanto las quiero.

A mis compañeros de generación, geólogos, petroleros, geofísicos, civiles etc. no cambio por nada los años a su lado, será interesante encontrarnos afuera, dejan una gran huella en mi corazón.

Al Dr. Luis Ernesto Marín Stillman por darme esa gran oportunidad que cambio mi vida, te reitero una vez más toda mi gratitud, ayuda y respeto.

Al Dr. José Antonio Hernández Espriú por darme las bases de hidrogeología, así como por su tiempo y consejos en la culminación de este trabajo.

Al M.C Enrique González Torres, por su disposición y ayuda para que este día se hiciera posible.

Al Ing. Carlos Jiménez, M.C Alejandro Ruvalcaba, Ing. Carolina Reyes, Ing. Mario Balcázar y Gerardo Arroyo por su amistad y apoyo en esta gran experiencia.

A mis profesores, por sus enseñanzas y consejos. No queda duda porque la Universidad es la mejor de México, a cada uno de ustedes mi gratitud, cariño y respeto por siempre.

A mi alma mater, la gloriosa Universidad Nacional Autónoma de México, es un orgullo ser parte de la Facultad de Ingeniería, con amor y compromiso por siempre Puma!

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	5
2. OBJETIVO GENERAL	5
3. OBJETIVOS PARTICULARES	5
4. LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO	6
5. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL	7
5.1. Geomorfología	7
5.2. Geología	9
5.3. Estratigrafía	11
5.4. Geología estructural	12
6. HIDROGEOLOGÍA REGIONAL	13
6.1. Interfase agua dulce-agua salada.....	15
6.2. Unidades hidrogeológicas	17
6.3. Comportamiento de niveles de agua subterránea	20
7. METODOLOGÍA	21
7.1. Geofísica	21
7.1.1. Antecedentes	21
7.1.2. Metodología	21
7.1.3. Sondeo electromagnético en el dominio del tiempo (TEM)	22
7.1.4. Electromagnético en el dominio de la frecuencia.....	22
7.1.5. Desarrollo	22
7.1.6. Método electromagnético en el dominio de la frecuencia.....	25
7.2. Censo de pozos y estructuras kársticas (dolinas)	26
7.3. Nivelación topográfica	29
7.4. Red de flujo	30
7.5. Pruebas Slug.....	30
7.6. Muestreo de agua subterránea	31
8. RESULTADOS	32
8.1. Sondeo electromagnético en el dominio del tiempo (TEM)	32
8.1.1. Lago 1.....	33
8.1.1.1. Perfil L1-1	33
8.1.1.2. Perfil L1-2	34
8.1.2. Lago 2.....	35
8.1.2.1. Perfil L2-1	35
8.1.2.2. Perfil L2-2	36

8.1.3.	Lago 3.....	37
8.1.3.1.	Perfil L3-1	37
8.1.3.2.	Perfil L3-2	38
8.1.4.	Lago 4.....	38
8.1.4.1.	Perfil L4-1	38
8.1.4.2.	Perfil L4-2	39
8.1.5.	Lago 5.....	40
8.1.5.1.	Perfil L5-1	40
8.1.6.	Lago 6.....	40
8.1.6.1.	Perfil L6-1	40
8.1.6.2.	Perfil L6-2	41
8.2.	Método electromagnético en el dominio de la frecuencia (GEM)	42
8.2.1.	Área 1	42
8.2.1.1.	Frecuencia 330 Hz.....	42
8.2.1.2.	Frecuencia 930 Hz.....	43
8.2.1.3.	Frecuencia 2,790 Hz.....	44
8.2.1.4.	Frecuencia 8,190 Hz.....	44
8.2.2.	Área 2	45
8.2.2.1.	Frecuencia 330 Hz.....	45
8.2.2.2.	Frecuencia 930 Hz.....	46
8.2.2.3.	Frecuencia 2790 Hz.....	47
8.2.2.4.	Frecuencia 8190 Hz.....	47
8.3.	Parámetros hidráulicos del acuífero	48
8.4.	Muestreo de aguas subterráneas	50
8.5.	Red de flujo	51
9.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	52
10.	BIBLIOGRAFÍA	60
	ANEXO	63

1. INTRODUCCIÓN

En el “Estudio geofísico e hidrogeológico en el banco de materiales de Agregados y Bloques del Carmen S.A de C.V, Playa del Carmen Quintana Roo”.se determinaron las características principales del agua subterránea para la zona de estudio, así como una caracterización mediante exploración geofísica.

El presente informe, muestra los resultados de los trabajos de campo realizados del 10 al 24 de octubre de 2012, con el fin de desarrollar las bases para la interpretación de resultados y conocer las características físicas del subsuelo que ayuden a determinar la factibilidad de profundizar la explotación del banco de materiales para posteriormente tomar decisiones durante la construcción de seis lagos artificiales.

2. OBJETIVO GENERAL

Conocer mediante un estudio geofísico y el análisis hidrogeológico las características del subsuelo para determinar la factibilidad de explotación de roca caliza por debajo del nivel freático en un banco de materiales en Playa del Carmen, Quintana Roo.

3. OBJETIVOS PARTICULARES

Para realizar las demandas descritas con anterioridad se consideran realizar los siguientes objetivos particulares:

- Realizar un estudio geofísico.
- Determinar las condiciones hidrogeológicas.
- Analizar las características de las unidades geológicas.
- Determinar la dirección de flujo de agua subterránea.
- Caracterización hidrogeológica.

4. LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO

El banco de materiales de caliza se encuentra en Playa del Carmen, perteneciente al Estado de Quintana Roo, particularmente en el municipio Solidaridad sobre la carretera Chetumal- Cancún localizado en la porción norte del Estado mencionado. La zona de estudio limita al norte con el estado de Yucatán y con los municipios de Lázaro Cárdenas y Benito Juárez, al este con el Mar Caribe y el municipio de Cozumel, al sur con el Mar Caribe y el municipio de Felipe Carrillo Puerto y al oeste con el municipio de Felipe Carrillo Puerto y el estado de Yucatán (Figura 1).

Es importante destacar que dentro de la zona de estudio y posterior a la excavación se tiene considerado la construcción de seis lagos artificiales, la futura ubicación de los mismos fue proporcionada por el cliente y se muestra en la figura 2.



Figura 1. Ubicación de la zona de estudio

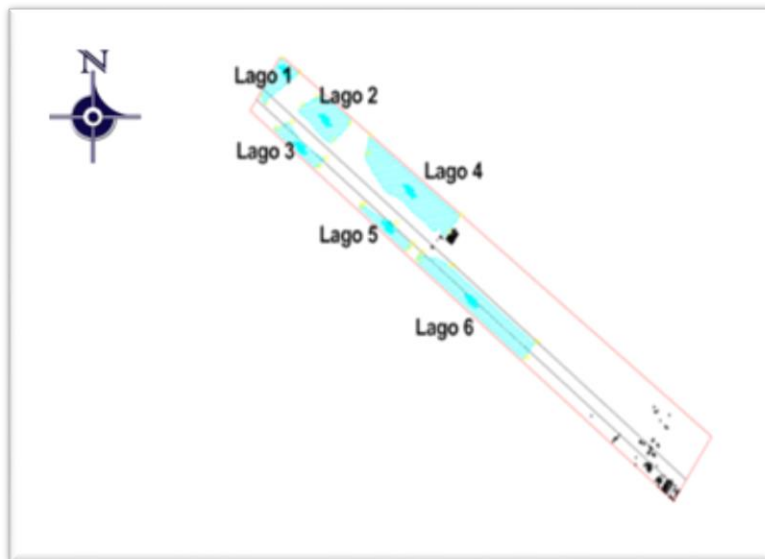


Figura 2. Ubicación de los lagos dentro de la zona de estudio

5. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

5.1. Geomorfología

La península de Yucatán se divide en cuatro provincias geomorfológicas: 1) zona costera, 2) planicie interior, 3) colinas y valles y 4) cuencas escalonadas. Los rasgos morfológicos de la península de Yucatán tienen una orientación NNE y SSW.

El desarrollo geomorfológico de esta región se inicia durante el Terciario Superior con la formación de una planicie calcárea que ha sido modelada por una intensa disolución (Figura 3). Así la región se caracteriza por la presencia de rasgos de disolución como son dolinas, la acumulación de arcillas de descalcificación y un relieve uniforme.

Durante el Cuaternario, esta planicie se modificó por la formación de pantanos y lagunas, así como por la acumulación de abundantes depósitos de litoral. Por las características que presenta el área, se puede ubicar en una etapa geomorfológica correspondiente a la madurez.

El paisaje kárstico en la zona de estudio es una manifestación de los procesos de disolución que han actuado sobre la roca caliza por efecto de la erosión química, cuyo agente principal es la elevada precipitación pluvial y la acidez implícita en ella.

El poder de dilución que posee el agua pluvial sobre la roca caliza puede originar una gran variedad de cavidades que difieren en dimensiones, formas y profundidades, las cuales en su conjunto determinan el paisaje kárstico.

El análisis de la geomorfología kárstica conjuntamente con el conocimiento de la geología estructural de una región, puede contribuir a obtener una clara concepción de la hidrogeología kárstica de un acuífero, es decir, puede facilitar a entender la dirección preferencial del flujo subterráneo.

La zona de estudio se ubica sobre una planicie de origen tectónico. Las máximas elevaciones topográficas son inferiores a los 25 metros sobre el nivel del mar hacia la zona de costa.

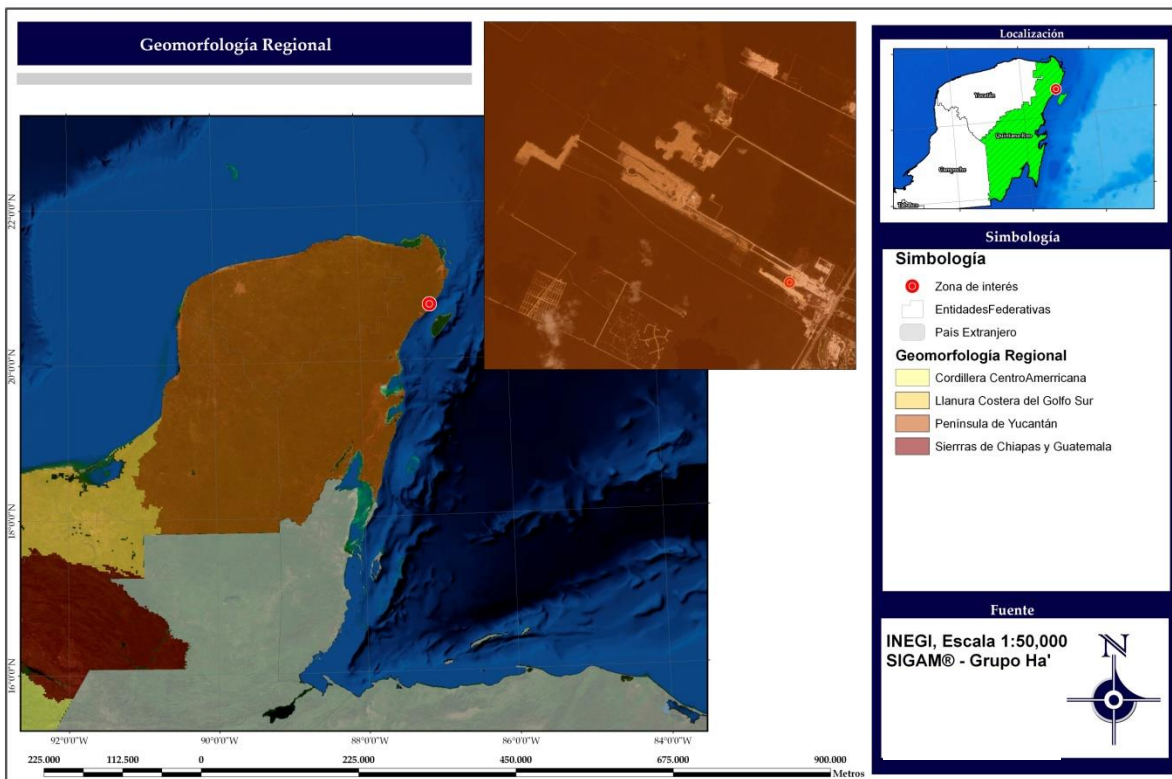


Figura 3. Geomorfología regional de la Península de Yucatán

5.2. Geología

La península de Yucatán cubre un área aproximada de 165,000 km² (Peter Bauer, 2010). Está constituida por sedimentos calcáreos de origen marino del periodo Terciario y Reciente (Butterlin y Bonet, 1960). Las rocas más antiguas se localizan al sur del estado de Yucatán y corresponden a rocas del Paleoceno-Eoceno que se encuentran dolomitizadas y silicificadas presentando una coloración clara y con delgadas intercalaciones de margas y yeso, dentro de las que se incluyen a las evaporitas de la Formación Icaiché constituidas por yeso, anhidrita y halita que son ricas en sulfatos y cloruro de sodio.

Las rocas más jóvenes, coquinas, calizas y depósitos de litoral areno-arcilloso afloran en la franja costera. Las rocas presentan una disposición prácticamente horizontal excepto en las inmediaciones del río Hondo donde se encuentran plegadas, y en la porción meridional la continuidad de los estratos es interrumpida por fallas normales que dan al terreno una configuración escalonada. Las fallas tienen longitud de varios kilómetros y se manifiestan en escarpes con desnivel de 10 a 100 m; en alguna de ellas se han originado fosas gradualmente convertidas en pantanos, lagos y lagunas siendo la mayor de ellas la Laguna de Bacalar. Los principales ejes estructurales presentan una orientación ONO-ESE y NNE-SSO que se asocian con la Sierra de Ticul, Yuc y el Sistema Bacalar-Río Hondo (Figura 4). Las calizas que ocupan una mayor área y que tienen mejores características para conducir y almacenar agua, son las del Eoceno y Mio-Plioceno las cuales están relacionadas con el Miembro Pisté de la Formación Chichén Itzá y la Formación Carrillo Puerto respectivamente.

Las dolinas son manifestaciones kársticas típicas de esta parte del país. Varían en diámetro desde unos cuantos metros hasta más de 100 m formados por la acción vertical de la disolución y paso del agua hacia niveles profundos del nivel estático durante los períodos glaciales, y revelan que las calizas han estado sujetas a una significativa disolución vertical.

En la costa occidental de Celestún, Yucatán, Isla del Carmen y Campeche existen calizas que afloran o se encuentran a poca profundidad excepto en sitios como Ciudad del Carmen y Campeche donde el espesor de suelos arenosos calcáreos es importante. En términos generales, puede considerarse que se trata de una zona extensa casi totalmente inundada, cubierta parcialmente por manglares donde existen

suelos arenosos y limosos sueltos con áreas pantanosas de reducido espesor que yacen sobre la plataforma calcárea. En la ciudad de Campeche, a diferencia de otras ciudades y sitios de la Península, se distinguen cuatro zonas principales que se caracterizan por diferentes tipos de rocas y suelos denominadas como zonas rocosas y relleno. Debajo de la zona de rellenos se encuentra una delgada capa de roca caliza y enseguida el sabca de compacidad variable e incluso en estado suelto. El acalché se identifica como una arcilla de alta plasticidad que es susceptible a experimentar cambios volumétricos al variar el contenido de agua de la misma. En la costa norte de la Península, desde su extremo poniente en Celestún, Yucatán, hasta Cabo Catoche, Quintana Roo, existe un cordón litoral angosto producto de acarreo marino separado de tierra firme por ciénagas, marismas y lagunas pantanosas de agua salobre. Estas áreas de agua están sujetas a los efectos de las mareas lo que se observa en algunas partes de la costa oriental, tal como en zonas localizadas entre Cabo Catoche y Cancún, así como Tulum y Chetumal, la Isla de Cancún es una barra costera de formación reciente. La configuración típica de esta zona nororiental de la Península, está representada por sucesivas dunas de arena endurecida que descansan sobre calizas de la plataforma continental, existiendo entre ellas lagunas y pantanos en los que tiene lugar un proceso de precipitación de sedimentos de origen animal y vegetal. Sobre estas dunas cementadas, el viento ha acumulado una faja de arena de 11km de longitud, 400 m de ancho y 12 m de espesor, conocida como Isla Cancún pero que en realidad constituye un cordón litoral. Frente a la playa la plataforma calcárea se prolonga hasta 1.5km con una profundidad de 10 m, descendiendo después bruscamente a lo profundo del Mar Caribe. Los cordones litorales mencionados están constituidos por una subestructura de antiguas dunas. Bajo estas formaciones arenosas se encuentra un horizonte de roca caliza que corresponde a la prolongación de la plataforma hacia el fondo marino. Esta condición se observa a lo largo de toda la costa de la Península.

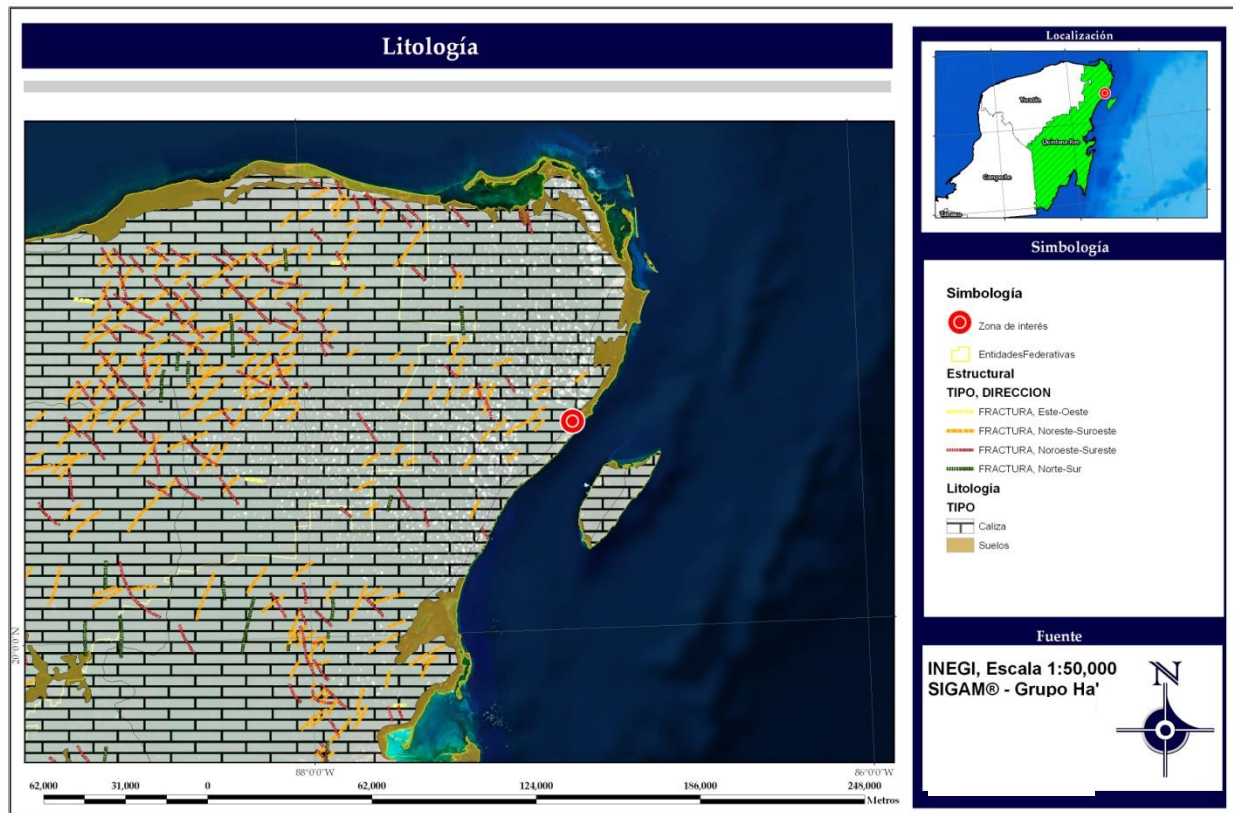


Figura 4. Geología regional de la Península de Yucatán

5.3. Estratigrafía

La Península de Yucatán ha tenido una evolución geológica compleja, ha jugado un papel importante en el origen del Golfo de México y en el desarrollo de la geología del Caribe. Se caracteriza por un basamento metamórfico de edad paleozoica sobre el cual ha evolucionado una secuencia sedimentaria de más de 3,000 m de espesor depositada desde el Jurásico hasta el Reciente. El ciclo sedimentario comienza con un depósito de rocas Jurásicas de origen continental con intercalaciones volcánicas proveniente de un basamento paleozoico.

Durante el Cretácico se formaron cuencas de circulación restringida generando condiciones propicias para el desarrollo de sedimentación evaporítica. En el Cretácico Superior se manifestaron cambios en la sedimentación; por un lado la porción central comenzó a emerger hasta quedar expuesta. Los materiales asociados con este evento son margas y horizontes de bentonita en áreas alejadas de las

antiguas costas, dolomías, areniscas y derrames andesíticos en las zonas poco profundas. En el Terciario y Cuaternario se presentaron facies de plataforma somera en ambientes de supra marea generados por la continua oscilación del nivel del mar (CNA, 1997).

5.4. Geología estructural

En la Península de Yucatán los principales ejes estructurales presentan una orientación NW-SE y NE-SW los cuales están asociados con la Sierra de Ticul y el Sistema Bacalar-Río Hondo respectivamente. Este último explica la extensión hacia el norte de las formaciones eocénicas hasta la región de Dzitás en donde el eje anticlinal de dirección NE-SW se hunde progresivamente.

La zona central de Yucatán denota un relieve topográfico ondulado como consecuencia de la orogénesis del Eoceno Superior, donde además el fracturamiento y la disolución del agua han permitido la formación de cavernas por colapso que dan testimonio, entre otras, las grutas de Lol-Tún y Calcehtok. Así mismo, el fracturamiento producido por las orogénesis antes mencionada generó una serie de bahías someras en la costa; los cerros y valles parecen deberse a la acción del intemperismo químico (Villasuso P. y Méndez R, 1996).

Se establecen los siguientes sistemas de fracturas:

- **Orientación NE-SW:** es la que se presenta con más intensidad en la zona (Figura 4). Muestra mayor densidad hacia la porción oriental y disminuye hacia el poniente. Su manifestación principal es mediante formas kársticas como dolinas y uvalas, así como llanuras de inundación de formas similares y paralelas a la línea de costa, las cuales presentan dimensiones muy variables hasta 60 Km. de longitud. Este sistema se puede observar físicamente en la población de El Tintal asociado a una gran depresión.
- **Orientación NW-SE:** este sistema de fracturamiento se presenta distribuido principalmente en la porción occidental, específicamente en los alrededores de las poblaciones

Nuevo Xcán, Tres Reyes y Punta Laguna; así como también en la zona de Cobá. Este sistema se manifiesta en el Km. 65.3 de la carretera Cobá-Nuevo Xcán en las calizas de la Formación Carrillo Puerto, como fracturas con dimensiones que van desde 1 a 20 cm de abertura con bandas de calcita (CaCO_3) en sus paredes y rellenos de fragmentos de caliza y fósiles moderadamente conservados en sus partes centrales. Así mismo, es notable un alto grado de disolución asociado a estas estructuras. Se manifiesta superficialmente a través de alineamientos de cenotes, lagunas y algunas depresiones con dimensiones de hasta 20 Km de longitud.

6. HIDROGEOLOGÍA REGIONAL

El estado de Quintana Roo está comprendido por las regiones hidrológicas RH-32 y RH-33. La primera denominada como Yucatán se conforma por dos cuencas que abarcan la superficie de los estados de Yucatán (69.01%), Campeche (10.34%) y Quintana Roo (20.65%); este último comprende los municipios de Benito Juárez, Cozumel, Solidaridad, Islas Mujeres y Lázaro Cárdenas. La segunda región, denominada como Quintana Roo, incluye a las superficies de los estados de Yucatán (12.70%), Campeche (16.95%) y Quintana Roo (70.35%); este último comprende los municipios de Othón P. Blanco, Felipe Carrillo Puerto y José Ma. Morelos.

El acuífero Península de Yucatán (Figura 5), está formado por calizas de características variadas y depósitos de litoral con un espesor máximo de 400 m, el espesor saturado de agua dulce crece tierra adentro, es menor de 30 m en una faja de 20Km. de ancho a partir de las costas y de 30 a 50 m en el resto de las llanuras. En las partes altas alcanza profundidades mayores a los 100 m (Villasuso Pino M. y Méndez Ramos R., 1996). La porosidad y permeabilidad primaria del acuífero dependen de su litología. Sus valores son altos en los estratos constituidos por conchas y esqueletos de organismos y en lugares donde ha habido disolución de la roca. A escala estatal, se trata de un acuífero libre, heterogéneo y anisotrópico de tipo kárstico que está dominado por un flujo turbulento.

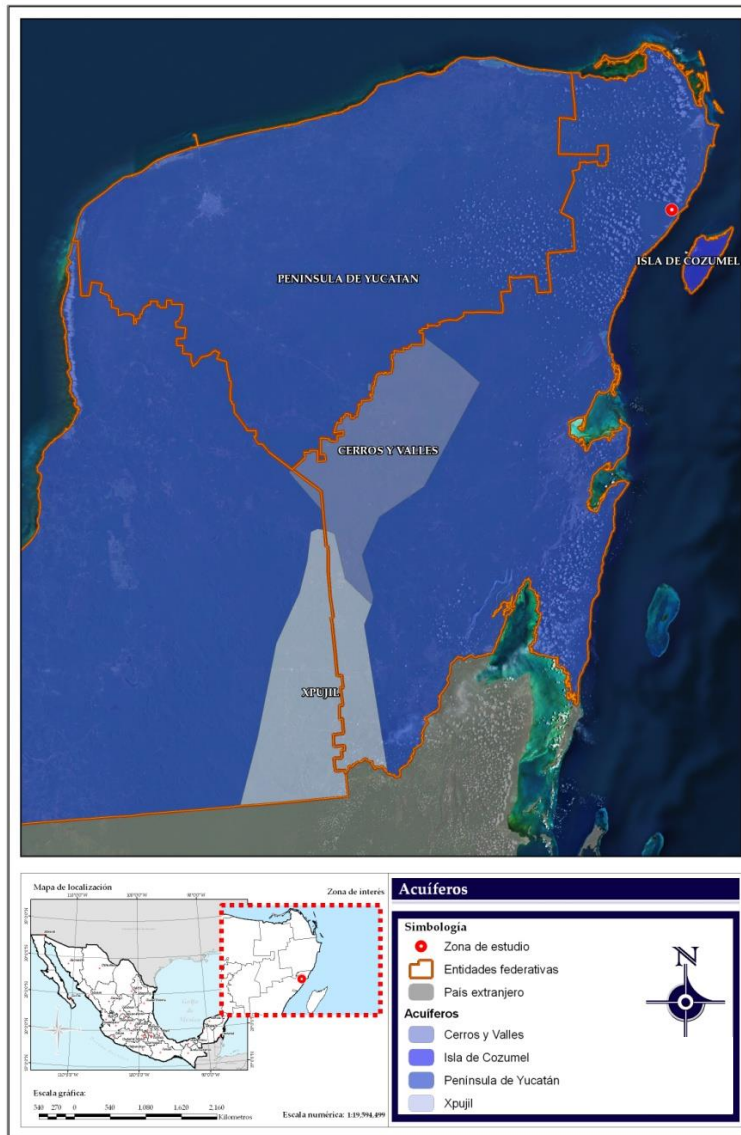


Figura 5. Acuífero Península de Yucatán (SIGAM®)

La Península de Yucatán carece de corrientes superficiales importantes, principalmente en la porción norte y en el sur; sólo se manifiesta un drenaje incipiente que desaparece en resumideros o cuerpos de agua superficial. Así, gran parte de la precipitación pluvial se evapotranspira y el resto se infiltra al acuífero a través de fracturas, oquedades y conductos kársticos; una vez dentro del sistema acuífero, el agua sigue diferentes trayectorias de flujo controladas por el desarrollo o evolución de los karst.

Las regiones de mayor karsticidad se presentan en el sur de la Península donde se encuentran los sedimentos más antiguos que corresponden al Paleoceno-Eoceno (CNA, 1997).

El agua subterránea en la Península se mueve de las zonas de mayor precipitación hacia la costa, donde se realiza la descarga natural del acuífero a través de una serie de manantiales a lo largo de la misma, alimentando a los esteros y lagunas costeras que incluso llegan a producir descargas de agua dulce dentro del mar.

La génesis y desarrollo de la karstificación está relacionada con las fluctuaciones eustáticas del nivel medio del mar durante las últimas glaciaciones. Los cambios del nivel base del flujo generaron diferentes zonas de karstificación y propiciaron un mayor desarrollo del karst en los materiales más antiguos y hacia los niveles más profundos.

En general, puede establecerse que el acuífero de la Península de Yucatán se divide verticalmente en tres partes; la zona de agua dulce, resultado de la infiltración del agua de lluvia (incluye la zona no saturada), la cual descansa sobre la zona de agua salobre, llamada también zona de mezcla o interfase salina, y la zona de agua salada a profundidad (Back W. y Hanshaw B., 1980). Hacia las costas, esta última zona está compuesta por agua oceánica. A lo largo del cuerpo de agua dulce y a diferentes profundidades, se presentan cambios repentinos en la concentración salina, los cuales se deben a la gran movilidad del agua dentro del acuífero a través de las grandes cavidades kársticas que generan trayectorias de flujo preferencial.

6.1. Interfase agua dulce-agua salada

En los acuíferos que se encuentran en las islas, penínsulas y otros terrenos continentales cercanos al mar, existen lentes de agua dulce que flotan sobre agua salada. Esto es debido a una estratificación que se da por el diferencial en las densidades del agua conocida como “intrusión salina”. Típicamente, se considera que la densidad del agua dulce es de 1.000 g/cm^3 y que la densidad del agua de mar es de 1.025 g/cm^3 (Fig.6).

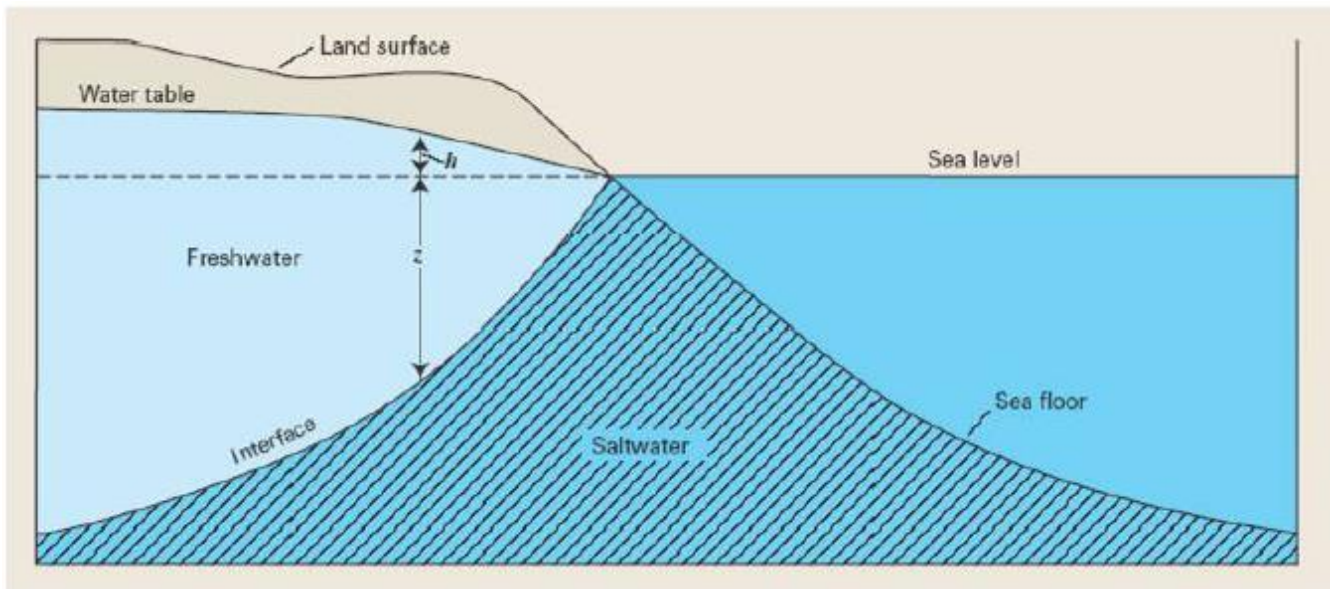


Figura 6. Posición teórica de interfaz agua dulce-agua salada (Domenico y Schwartz 1998)

En la figura anterior el frente del agua dulce empuja al agua salada. En este caso la interfase, o zona de mezcla, se muestra como línea cuando en realidad es una zona más amplia.

El espesor de dicho lente, varía de acuerdo a las condiciones hidrogeológicas, climáticas, variación de las mareas, y tipo de esfuerzo(s) a los que esté sometido el sistema natural. La relación de Ghyben-Herzberg (citado en Freeze y Cherry, 1979) es un modelo conceptual sencillo que permite explicar cómo se da la estratificación del agua dulce y salada.

Existen varias suposiciones importantes en el modelo de Ghyben-Herzberg incluyendo las siguientes: 1) la ausencia de gradientes verticales; 2) la zona que separa al agua dulce del agua salada es una línea abrupta; 3) no hay zona de descarga. Estas suposiciones son menos válidas conforme uno se acerca a la costa, ya que en esta zona existe una componente de flujo vertical importante, particularmente en zonas con topografía abrupta, existe una amplia zona de dispersión o mezcla, y existe una zona de descarga de agua dulce al mar. La zona de dispersión es el área en la cual se mezcla el agua dulce del acuífero

con el agua salada proveniente del mar. En muchos casos, se hace la suposición que la separación entre el agua dulce y el agua de mar es una separación abrupta, pero en realidad, en vista de que estas dos aguas son miscibles, se conoce como la zona de dispersión o zona de mezcla.

La zona de dispersión puede variar desde pocos metros en ambientes poco perturbados como en los cenotes que se encuentran decenas de kilómetros tierra adentro, a decenas de metros en zonas con grandes variaciones de mareas y de gran perturbación por actividades antropogénicas como el bombeo intermitente de pozos (Kohout y Klein, 1967).

6.2. Unidades hidrogeológicas

Dentro de la regionalización administrativa actual, la Península de Yucatán está definida como la Región Hidrológica XII, que comprende en su totalidad los estados de Quintana Roo, Yucatán y el estado de Campeche exceptuando el municipio de Palizada.

Se considera a la Península de Yucatán como una unidad regional denominada “Acuífero Península de Yucatán”, conformada por las siguientes unidades hidrogeológicas: seis ubicadas en Quintana Roo: Cerros y Valles, Cuencas Escalonadas, Planicie Interior, Costas Bajas, Costera e Isla de Cozumel, tres en Campeche: Cerros y Valles, Costera y Xpujil y las cuatro restantes en Yucatán: Costera, Círculo de Cenotes, Planicie Interior y Cerros y Valles (Figura 7).

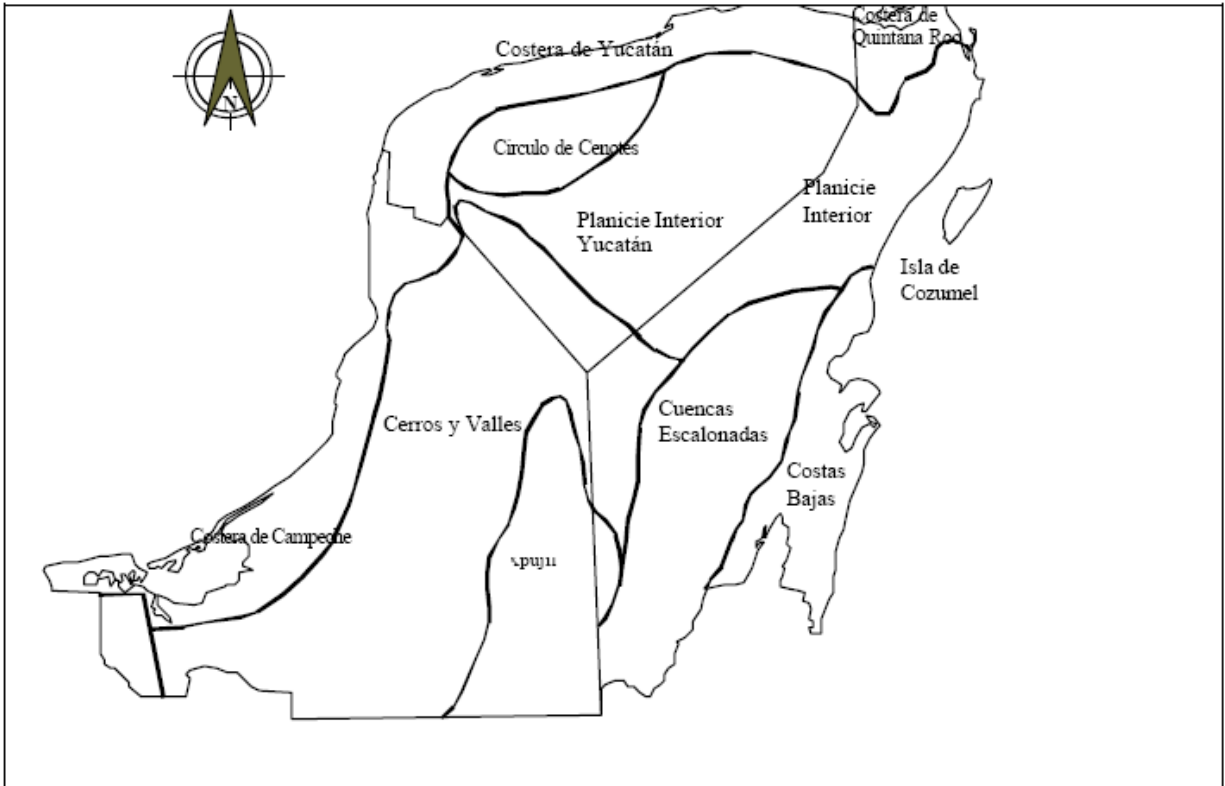


Figura 7. Ubicación de las unidades hidrogeológicas de la Península de Yucatán (CONAGUA, 2009)

A continuación una descripción de las unidades hidrogeológicas en el estado de Quintana Roo:

➤ **Cerros y Valles:** Esta zona se encuentra al suroeste del estado en los municipios Othón P. Blanco, José María Morelos y Felipe Carrillo Puerto, y continúa en los estados de Campeche y Yucatán; representa 16.3% de la superficie estatal. Por su mayor elevación y relieve es la más compleja, está conformada por rocas calizas y dolomías del Paleoceno y Eoceno con alto grado de fracturamiento y disolución, presenta lomeríos alineados, una altura que va de 60 a 70 metros y en ocasiones rebasa los 200 metros sobre el nivel del mar (msnm). El acuífero en esta zona es libre y el agua que se extrae es para abastecimiento público y uso agropecuario. La dirección del flujo subterráneo de agua es hacia el este y norte; el acuífero tiene un espesor medio de 80 m, que disminuye en la misma dirección que el flujo; su profundidad es de 50 a 100 metros.

El agua es de buena calidad, pero en la parte suroeste se encuentran calizas con intercalaciones de margas y yesos pertenecientes a la formación Icaiché, que le dan un sabor amargo y no apto para el consumo humano.

➤ **Cuencas Escalonadas:** Zona hidrogeológica ubicada al sureste del estado, abarca desde el norte de la Bahía del Espíritu Santo hasta los límites con el país de Belice, su superficie comprende 15.1% del estado; colinda al norte con la planicie interior, al este con el mar Caribe y la zona Costas bajas, al sur con Belice y con las Costas bajas y al oeste con la zona Cerros y valles. En esta zona se encuentran los municipios Othón P. Blanco, Felipe Carrillo Puerto y Solidaridad. Está conformada por rocas calizas de un color blanco del Paleoceno, Mioceno (formación Estero Franco) y Terciario superior, con finas láminas de yeso llamadas localmente “sascab”. Un sistema de fallas en dirección noreste-suroeste ocasiona una gran fractura y una serie de escalones orientados hacia esa misma dirección, además, las rocas tienen una gran disolución, que es característica de las calizas. En esta zona, el acuífero también es de tipo libre y el agua extraída se destina para agua potable, usos agropecuarios y servicios, y se considera un acuífero subexplotado. El flujo del agua subterránea se dirige hacia el este, tiene una profundidad promedio de entre 20 y 50 m, aunque cerca de las costas es hasta de un metro, el espesor medio del acuífero es de 50 metros. El agua extraída es de buena calidad, sin embargo existen fuentes contaminantes, como las industrias y las actividades agrícolas, también influyen el uso de agroquímicos y las descargas domésticas clandestinas.

➤ **Planicie interior:** Esta zona se encuentra al norte del Estado, en los municipios de José María Morelos, Felipe Carrillo Puerto, Solidaridad, Lázaro Cárdenas, Benito Juárez e Isla Mujeres con una extensión que equivale a 41.1 % de la superficie estatal. Colinda al norte con la zona Costas bajas, al este con el mar Caribe y Costas bajas, al sur con las zonas Cuencas escalonadas, Cerros y valles, y al oeste continúa en el estado de Yucatán.

Está formada por rocas calizas de origen marino pertenecientes a la formación Felipe Carrillo Puerto de edad Mioceno superior-plioceno, también se encuentran rocas del Terciario superior. Las calizas presentan gran fracturamiento, alta disolución y permeabilidad, por lo que constituye un buen acuífero. El acuífero es libre y se encuentra sobre explotado; la dirección del flujo del agua subterránea es hacia el este en su parte media, al oeste cerca de Yucatán y al norte en los municipios de Lázaro Cárdenas e Isla Mujeres. Tiene una profundidad de 20 a 50 metros hacia su interior y disminuye a menos de un metro en las costas; su espesor medio es de 19 metros. El agua es de buena calidad, excepto en las costas, donde los sólidos disueltos muchas veces rebasan las 4 000 partes por millón.

➤ **Costas bajas:** Se localiza en los alrededores de las bahías de Chetumal, Espíritu Santo y Ascensión, también comprende el área de costa de Playa del Carmen hasta Cancún y la costa norte del estado; colinda al sur con las Cuencas escalonadas y al norte con la Planicie interior. Abarca 27.1 % de la superficie del estado. Está compuesta por calizas del Mioceno, Terciario superior y del Cuaternario; incluye depósitos recientes sin consolidar, tales como arenas de playa. Estas zonas son de alta permeabilidad, lo que se manifiesta en la formación de una delgada capa de agua dulce sobre la salada. Hay un acuífero libre que sirve para la extracción de agua para uso doméstico y se encuentra en condición de equilibrio; su flujo va en dirección a las costas y bahías, y tiene una profundidad de cinco a diez metros. Es la zona más crítica del estado, ya que presenta las condiciones más adversas del medio acuífero, como la alta permeabilidad de las calizas y el delgado espesor del agua dulce.

➤ **Isla de Cozumel:** En Quintana Roo los problemas relacionados con el agua subterránea son principalmente de calidad y no de cantidad, debido a la contaminación por sustancias químicas o por microorganismos a causa de la actividad humana, así como debido a la interferencia en la circulación natural del flujo por el bombeo de las aguas subterráneas. El acuífero de Quintana Roo es altamente vulnerable a la contaminación, debido al gran fracturamiento del suelo y la abundancia de oquedades en las rocas, su alta conductividad hidráulica, el escaso espesor de los suelos y de la zona no saturada propician la casi inmediata respuesta del medio hidrogeológico al agente externo (aguas residuales, agroquímicos, afluentes industriales y materia orgánica); el acuífero es susceptible a la degradación por la intrusión salina provocada por cualquier variación en las condiciones de flujo del agua.

6.3. Comportamiento de niveles de agua subterránea

La información relacionada con la profundidad del nivel estático en los estudios de la CNA, a nivel central y estatal es escasa. Por otro lado, no hay una red regional de pozos pilotos que permita conocer regionalmente la evolución de los niveles, sólo localmente en las zonas de máxima concentración de pozos se conoce el comportamiento de los niveles, sin embargo en tales zonas no se reportan modificaciones substanciales.

Derivado de lo anterior, el INEGI (2000) en sus estudios de campo en toda la Península de Yucatán establece que las menores profundidades se ubican en la Región Costera, siendo estas por lo general menores a 10 metros. Hacia la zona del Círculo de Cenotes y Cuencas Escalonadas los niveles del agua se encuentran entre 10 y 20 metros de profundidad.

En la Planicie Interior el agua se encuentra entre los 20 y 30 metros y hacia la zona de transición con la Zona de Cerros y Valles las profundidades son mayores a los 30 m llegando hasta los 50 m.

Por su parte en la Zona de Cerros y Valles se ubican las profundidades mayores, se han reportado cerca de los 200 m, aunque por lo general varían entre 70 y 150 metros. En esta zona se encuentran acuíferos colgados cuyos niveles son poco profundos pues se reportan entre 5 y 20 metros, se diferencian del acuífero profundo porque su agua es de reciente infiltración y presenta poca salinidad

7. METODOLOGÍA

7.1. Geofísica

7.1.1. Antecedentes

En la zona de estudio, se realizó el levantamiento de 210 sondeos Transitorios Electromagnéticos (TEM's) para caracterizar litológicamente las partes más profundas del subsuelo, y dos líneas con equipo GEM multifrecuencia para caracterizar las partes más someras. Para ambos casos se contempló una profundidad máxima de investigación de 50 m y 15 m respectivamente.

7.1.2. Metodología

Los métodos geofísicos empleados fueron el método en el dominio del tiempo que sirvió para tener una idea regional de la zona de estudio, y calibrar la información obtenida con el método en el dominio de las frecuencias, el cual se utilizó para hacer un análisis más a detalle en ciertas zonas de interés.

El uso de al menos dos métodos geofísicos para este tipo de investigaciones es lo más recomendable para así correlacionar la información obtenida entre ellos y tener una mayor certidumbre sobre el modelo propuesto.

7.1.3. Sondeo electromagnético en el dominio del tiempo (TEM)

El TEM se basa en el principio físico de inducción y detección, generado a partir del campo magnético e inducido por la intensidad del campo eléctrico del subsuelo. La respuesta del medio depende de la conductividad eléctrica, permeabilidad magnética y la intensidad de la señal.

Para conocer la distribución de la resistividad a diferentes profundidades se realizaron caminamientos sobre dos áreas propuestas con base en los resultados de los TEMs y las observaciones realizadas en campo, se identificaron dos áreas; en una se hicieron 17 líneas con longitud de 150 m y separación de 10 m; y la otra de 19 líneas con las mismas características.

7.1.4. Electromagnético en el dominio de la frecuencia

Es un sensor que tiene un arreglo geométrico definido que permite la adquisición de datos a diferentes frecuencias al mismo tiempo, dependiendo de la profundidad del sondeo.

En este trabajo se emplearon las frecuencias de 330; 930; 2,790 y 8190 Hz. Para la definición de la profundidad de investigación se apoyó de los resultados de los TEMS.

7.1.5. Desarrollo

Se realizaron 210 sondeos localizados en seis zonas (lagos artificiales) distribuyéndose de manera que se pudiera caracterizar la mayor área posible dentro de la zona de estudio, la distribución de los sondeos se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Distribución de puntos en la exploración con TEMS

Sitio	Número de sondeos
Lago 1 (L1)	21
Lago 2 (L2)	48
Lago 3 (L3)	16
Lago 4 (L4)	48
Lago 5 (L5)	10
Lago 6 (L6)	67
Total	210

La denominación de cada sondeo se refiere al nombre del lago donde se realizó según el plano proporcionado por el cliente y al número de sondeo en cada lago.

Con base en la ejecución de los sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo se identificó la electro estratigrafía del subsuelo a una profundidad de investigación del orden de los 30 m. En las Figuras 8, 9 y 10 se muestran las imágenes de satélite y la ubicación de los sondeos.

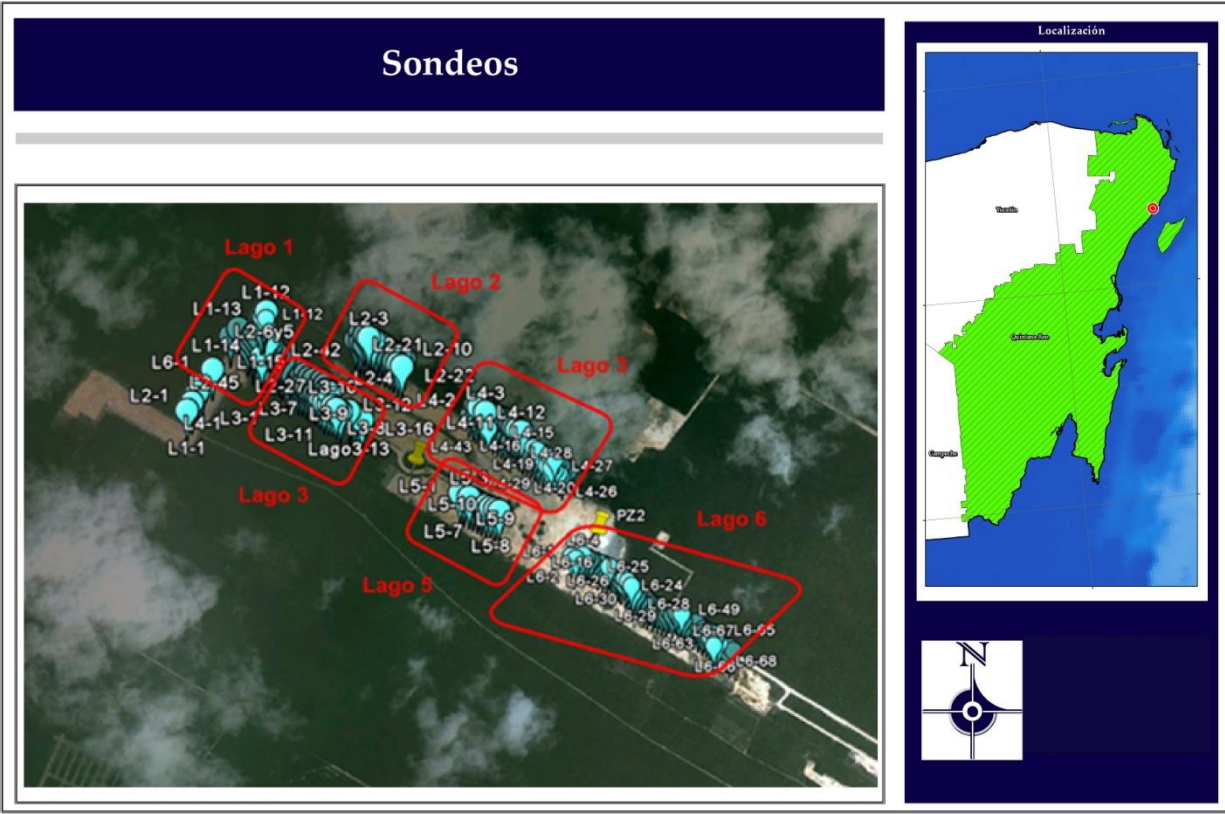


Figura. 8. Ubicación de los sondeos (Google Earth 2012)

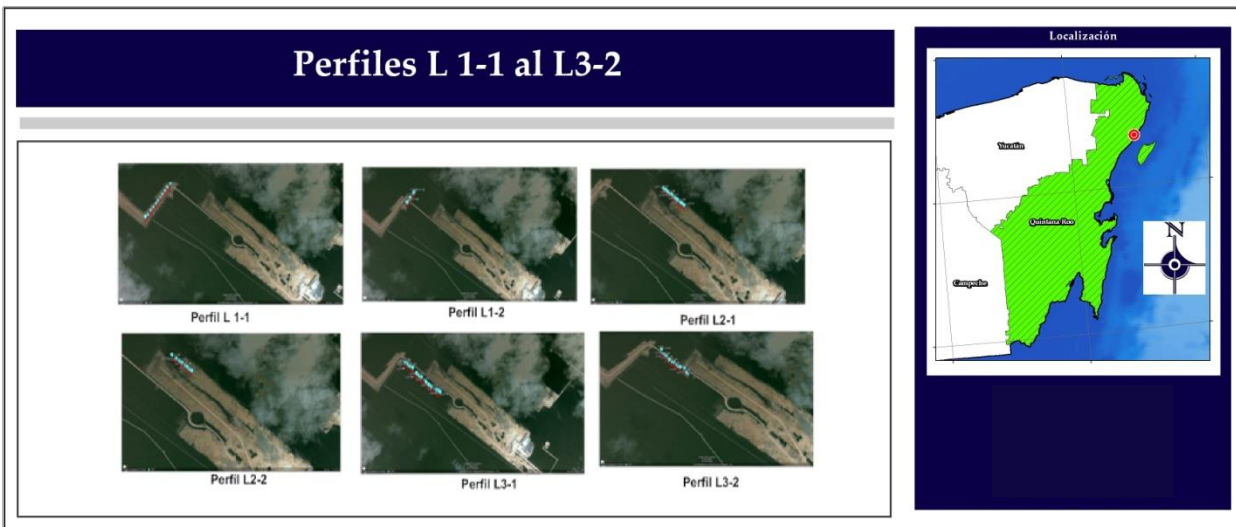


Figura 9. Ubicación de perfiles

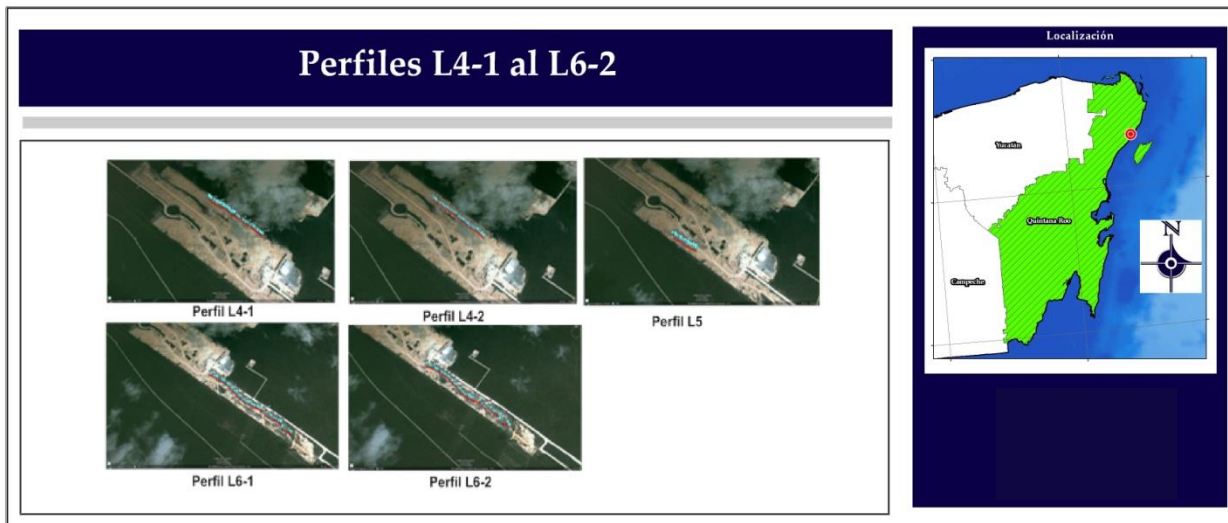


Figura 10. Ubicación de perfiles

7.1.6. Método electromagnético en el dominio de la frecuencia

Con base en el levantamiento regional del método de sondeo electromagnético en el dominio del tiempo y observaciones de campo se decidió orientar de esa manera los polígonos tratando de abarcar mayor área posible y ver si el comportamiento de las zonas de posibles cavernas continuaba hacia esa dirección y aplicando la técnica de sondeo electromagnético en el dominio de la frecuencia, se hizo un barrido en dos áreas (Figura 11) aplicando diferentes frecuencias para penetrar el subsuelo a diferentes profundidades.

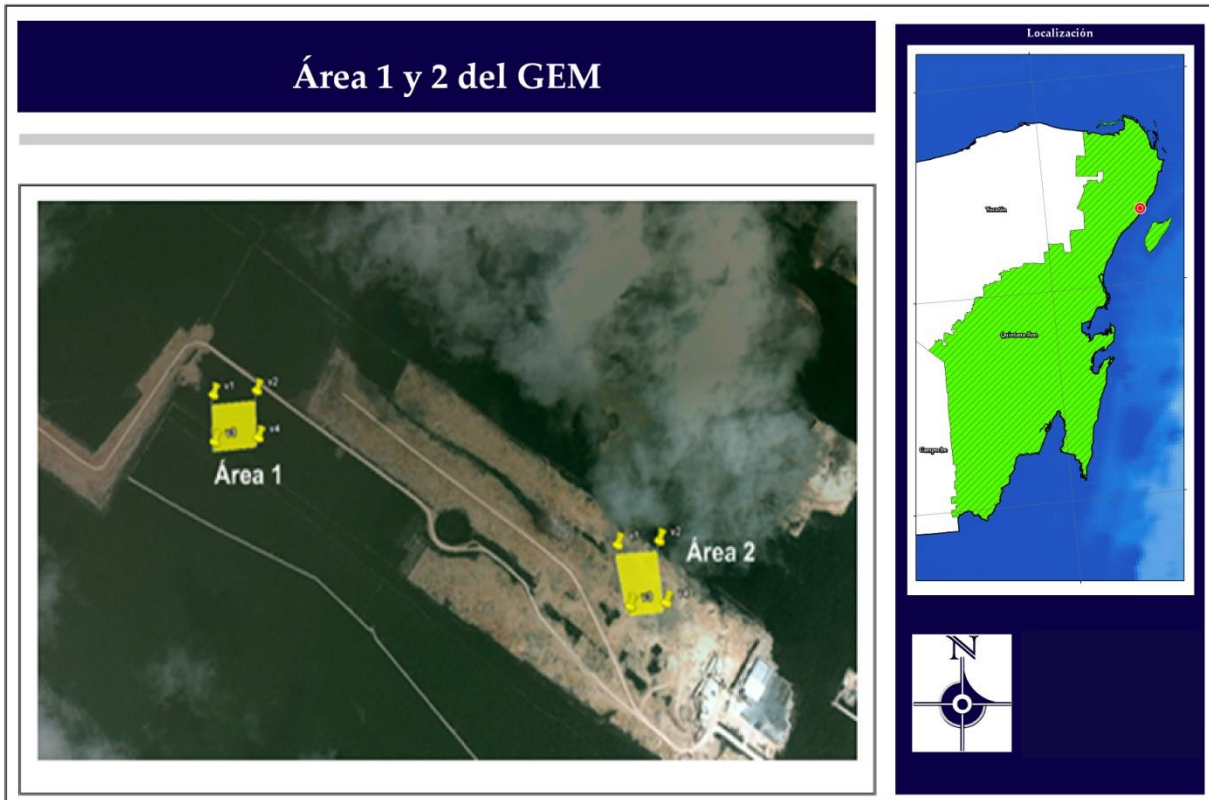


Figura 11. Polígonos donde se realizó la exploración electromagnética en el dominio de la frecuencia

7.2. Censo de pozos y estructuras kársticas (dolinas)

Durante el trabajo de campo se censaron dos pozos y el reconocimiento de estructuras kársticas, esto con el fin de procesar los datos de la nivelación topográfica (Figura 12).

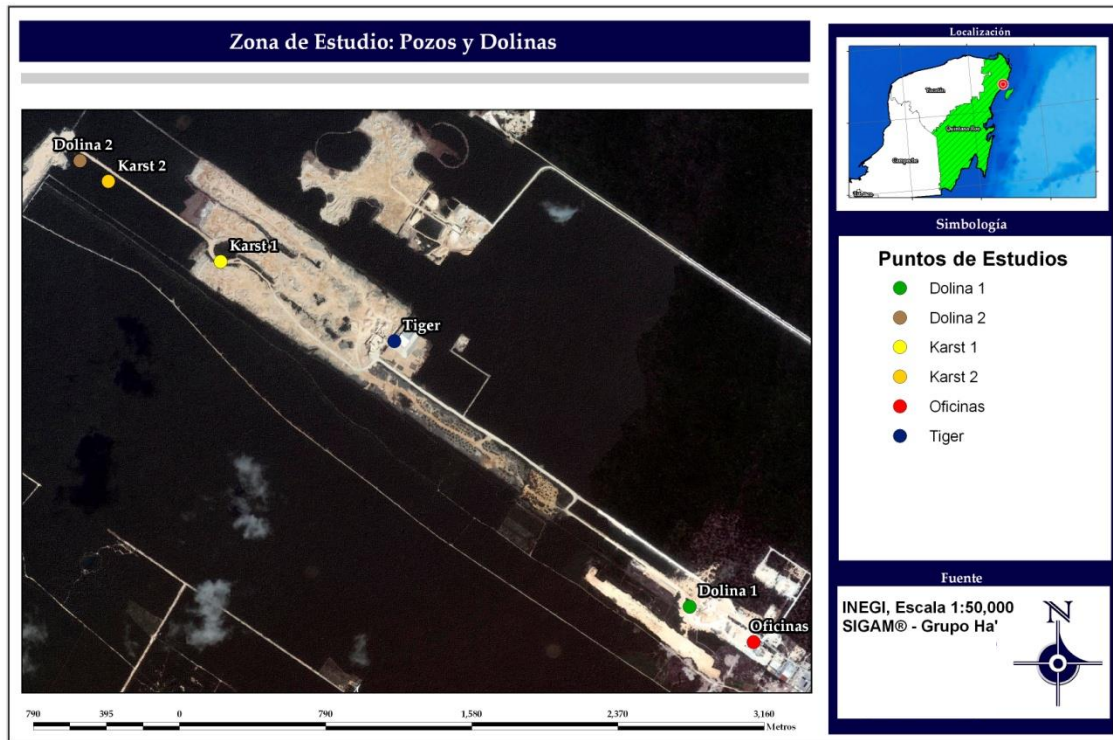


Figura 12. Ubicación de los puntos censados

En la tabla 2 se muestran los diámetros y profundidades de las estructuras kársticas censadas en la zona de estudio.

Tabla 2 Estructuras geológicas censadas

Nombre	Diámetro (m)	Prof. Del agua (m)
Dolina 1	14	2
Dolina 2	29	1.8
Karst 1	86.3	1.5
Karst 2	35.1	1

La información de los pozos censados se presenta a continuación (Figuras 13 y 14):

Fecha:	20-oct-12				
Localidad:	Playa del Carmen				
Municipio:	Solidaridad				
Coordenadas:				N.E (m):	8.37
X	496765			Diámetro de descarga	2 1/2"
Y	2,289,199.00			Caudal (lps):	4
Z	10m			Tipo de aprovechamiento:	Pozo
Profundidad:	12 m			Uso del agua:	Industrial
Diametro de la perforación	6"				
Tubería:	Acero				
Lisa:	3"				
Ranurada:	9"				
Altura del brocal:	33 cm				
Tipo de bomba:	sumergible				

The diagram illustrates the well's structure. It shows a vertical borehole with a diameter of 6 inches and a total depth of 12 meters. A casing is installed within the borehole, extending to a depth of 23 meters. The casing is composed of two parts: a 3-meter section of smooth pipe (Tubería lisa 3 [m]) and a 20-meter section of slotted pipe (Tubería ranurada 23 [m]). The casing diameters are indicated as 4 inches for the upper section and 3 inches for the lower section. A dashed line represents the water table level, which is located at a depth of approximately 10 meters from the surface. The well is used for industrial purposes and is equipped with a submersible pump.

Figura13. Características del pozo ubicado en las oficinas de la planta.

Fecha:	20-oct-12								
Localidad:	Playa del Carmen								
Municipio:	Solidaridad								
Coordenadas:							N.E (m):	7.3	
X	494897						Diámetro de descarga	No disponible	
Y	2290891						Caudal (lps):	No disponible	
Z	10m						Tipo de aprovechamiento:	Pozo	
Profundidad:	12 m						Uso del agua:	Industrial	
Diametro de la perforación	12"								
Tubería:	No disponible								
Lisa:	No disponible								
Ranurada:	No disponible								
Altura del brocal:	26 cm								
Tipo de bomba:	sumergible								

El diagrama muestra un pozo vertical con una perforación de 12 metros de profundidad, indicada por una línea vertical con una etiqueta 'Perforación 12 [m]'. El diámetro exterior de la perforación es de 12 pulgadas, y el diámetro interior es de 10 pulgadas. La altura del brocal (parte superior del pozo) es de 26 cm. El pozo está representado por un cilindro con un patrón de puntos, y una línea horizontal superior indica el nivel del terreno.

Figura 14. Características del pozo "Tiger" ubicado en la zona de procesos de la planta.

Para el caso de la medición del nivel estático de cada pozo, se utilizó una sonda eléctrica marca Solist graduada al milímetro.

7.3. Nivelación topográfica

Para la nivelación de los pozos y dolinas se utilizó un nivel marca LEICA y dos estadales de cuatro metros de altura de la misma marca con precisión al milímetro. La nivelación se realizó haciendo secciones verticales. Esta se inició centrando y nivelando el aparato en uno de los puntos determinados

como línea de “inicio”. Una vez en posición se inició con la lectura visual del nivel a los estadales (uno delante y otro detrás del nivel), comenzando desde las oficinas al “pozo de las oficinas”, continuando con la dolina 1, pozo “tiger”, karts 1 y dolina 2. Los datos de nivelación se utilizaron para la generación de la red de flujo subterráneo.

7.4. Red de flujo

Para la generación de la red de flujo subterráneo, se utilizó el valor de la cota relativa de cada una de las dolinas y pozos de bombeo ubicados dentro de la zona de estudio, así como los niveles estáticos con los cuales se obtuvieron los valores de las cargas hidráulicas. Los mismos fueron procesados en *Surfer* para obtener curvas de igual elevación. Finalmente se generó un mapa de vectores perpendiculares a las curvas y con ellos identificar la dirección de flujo preferencial del agua subterránea.

7.5. Pruebas Slug

Las pruebas *slug* (Figura 15) han sido utilizadas a lo largo de los años para estimar de manera rápida las propiedades hidráulicas de un acuífero (Weight, 2001).

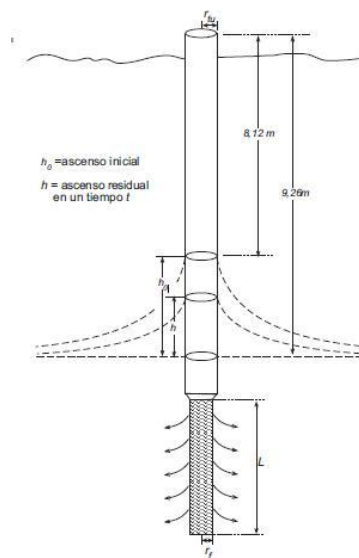


Figura 15. Esquema de funcionamiento de una prueba tipo slug

Con el fin de conocer los parámetros hidráulicos en la zona de estudio, se realizaron dos pruebas tipo *slug*. Durante las pruebas se inyectó un volumen 10 m³ a un caudal de 4 lps en cada pozo (Oficinas y “Tiger”); las lecturas de la variación del nivel piezométrico se tomaron con un transductor de presión marca Global Water modelo WL16. Este consta de un sensor con diafragma de silicio el cual se introdujo en los pozos y un cable USB que se conectó a una laptop para registrarlos en el software Global Logger. Posteriormente se graficaron en Excel para obtener los valores de conductividad hidráulica de la zona.

El método para procesar los datos obtenidos en campo es el de Hvorslev (1951), en el cual se genera un ascenso inicial (h_0) y se miden los niveles en función del tiempo. La permeabilidad del terreno viene dada por la siguiente ecuación:

$$K = \frac{r_c^2 \ln \frac{1}{2\psi} + \left(1 + \left(\frac{1}{2\psi}\right)^2\right)^{1/2}}{2bt_0}$$

Donde:

1. K= Permeabilidad [m/d]
2. r_c = Radio de entubación [m]
3. b= Longitud de la tubería ranurada [m]
4. $\psi = \frac{\sqrt{Kz/Kr}}{b/rc}$ [adim]
5. Kz/Kr = Componente vertical de la conductividad hidráulica [adim]
6. t_0 = Tiempo en el que aún perdura el ascenso instantáneo inicial [seg]

7.6. Muestreo de agua subterránea

Con la finalidad de determinar la composición química del agua así como clasificar el tipo de familia a la que pertenece, se evaluó la calidad química de la misma. Durante la visita a campo se recolectaron muestras en los pozos de bombeo, así como en las dolinas aledañas.

Las muestras fueron etiquetadas con material resistente al agua y tinta indeleble para posteriormente colocarlas en una hielera que las mantuviera a 4°C, retardando la acción de microorganismos.

Las muestras fueron enviadas a un laboratorio certificado por la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA) para determinar concentraciones de iones principales (Ca, Mg, Na y K, alcalinidad), sulfatos y cloruros.

En cada sondeo se tomaron tres muestras; dos en envase de polipropileno de 100 ml para hacer el análisis de (Ca, Mg, Na y K) a los cuales se les añadieron 3 gotas de HNO₃ (ácido nítrico) como conservador y una tercera en un envase de polipropileno de 200 ml para hacer un análisis de alcalinidad.

Los resultados de laboratorio se procesaron mediante el software AquaChem 5.1, el cual muestra los resultados en diagramas Piper, que son utilizados para representar la proporción de tres componentes en la composición de un conjunto o de una sustancia.

8. RESULTADOS

8.1. Sondeo electromagnético en el dominio del tiempo (TEM)

Se realizaron once perfiles en total en la zona de estudio. Se tomaron como referencia los sitios donde se está proyectando la construcción de los seis lagos que el cliente requiere. Se realizaron dos perfiles por cada lago con excepción del Lago 5 donde sólo se realizó un perfil.

Los valores de resistividad que se obtuvieron del procesado de los modelos unidimensionales varían de menores de 1 a más de 150 Ohm-m. Para el caso que nos ocupa los valores se agruparon en cuatro rangos (Tabla 3).

Tabla 3. Unidades geoelectricas

Unidad geoelectrica	Resistividad (Ohm-m)	Espesor (m)	Características
A	>1.0	No determinado	Unidad de muy baja resistividad se ubica en la parte más profunda de los perfiles. El contacto se ubica a diferente profundidad. La litología es una caliza de tipo coquina con alta permeabilidad y salinidad alta.
B	1 - 5	2 - 10	Unidad de resistividad baja, se ubica sobre la unidad A, con espesor y posición en profundidad variable. Se asocia a la misma caliza pero con fluido de menor salinidad que la unidad anterior (zona de transición entre el agua dulce y agua con mayor salinidad).
C	5 -30	4 -11	Unidad de resistividad media, se localiza como capa superficial, en algunos puntos encajona a la unidad D. Se asocia a la caliza con mayor compacidad y saturada con agua dulce.
D	30 a 150	4 - 15	Unidad de alta resistividad, se presenta en forma de cuerpos con diferentes dimensiones. En algunas partes se localiza como capa superficial. Se asocia a la caliza con un grado de porosidad o fracturamiento menor que las unidades anteriores.

8.1.1. Lago 1

8.1.1.1. Perfil L1-1

Se realizó en el Lago 1, en la zona más hacia el NW del área de estudio. Está integrado por once sondeos (L1-1 a L1-11), con una longitud de 550 m y una dirección preferencial SW-NE. Se identifican cuatro contrastes de resistividad los cuales están definidos en la Tabla 3.

Los valores más altos (unidad D) se presentan en superficie con un espesor del orden de los 10 m, es una roca caliza (coquina con poca disolución). Entre los sondeos L1-6 a L1-8, los valores de resistividad disminuyen considerablemente (Unidad A), se asocia a la posible presencia de la misma caliza pero con mayor disolución, o bien una caverna con agua de mayor salinidad (Figura 16).

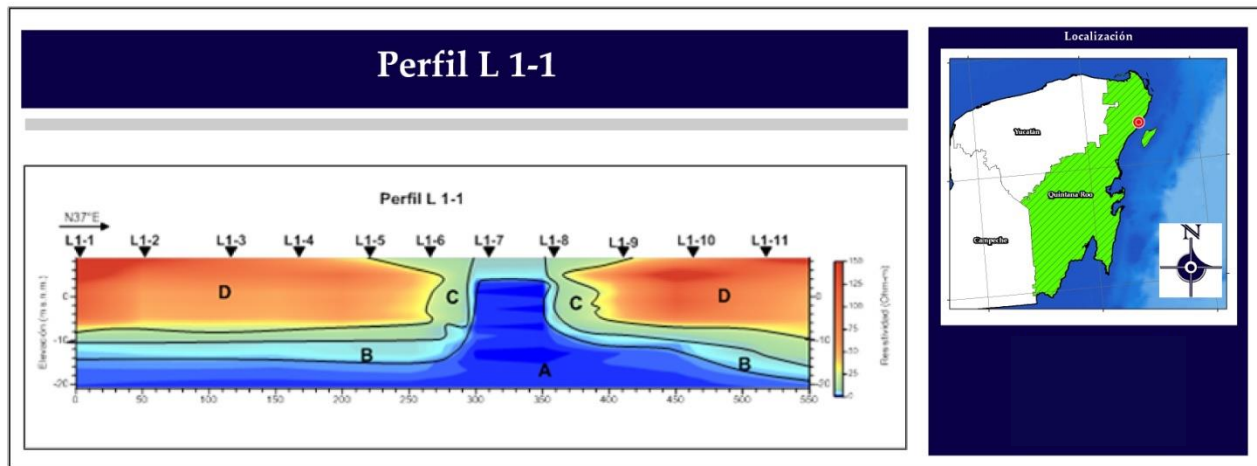


Figura 16. Perfil L1-1.

8.1.1.2. Perfil L1-2

Este perfil se realizó en la zona del Lago 1. Está integrado por diez sondeos (L1-12 a L1-21) con la misma dirección preferencial SW-NW, con una longitud de 200 m y, desplazada 120 m, al oriente del perfil anterior (Figura 17).

Hay que mencionar que el sondeo L19 se ubica a 120 m al oriente del sondeo L1-9. Se identifican las mismas unidades geoelectricas. El cuerpo de alta resistividad se correlaciona con el cuerpo que se ubica en la parte derecha del perfil L1-1. Este cuerpo presenta un espesor del orden de los 10 m. En este perfil se identifican dos cuerpos de baja resistividad (unidades B y C), asociados a una caliza con mayor disolución o fluido de mejor calidad que la unidad D. El cuerpo que se identifica en la parte izquierda del perfil se asocia con el cuerpo de muy baja resistividad que se presenta en el perfil L1-1. Esto implica una continuidad eléctrica en la zona donde se localizan los sondeos L1-7, L1-8 (perfil L1-1) y (L1-20, L1-19, L1- 21 y L1-18).

Hay que mencionar que la posición del nivel del agua subterránea se ubica muy cercana a la superficie, del orden de los 2 m.

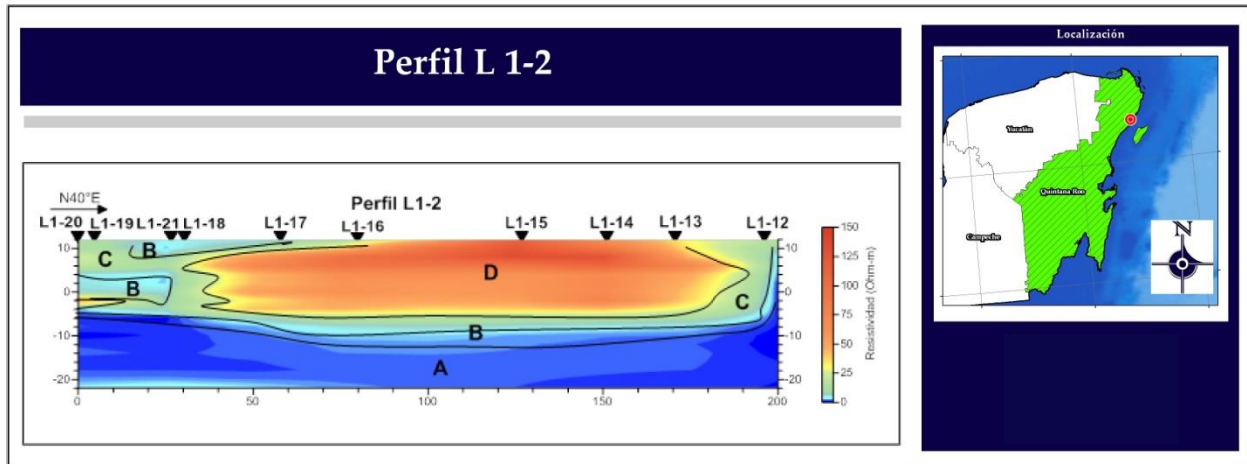


Figura 17. Perfil L1-2.

8.1.2. Lago 2

8.1.2.1. Perfil L2-1

Se realizó en la ubicación del Lago 2 en la zona más hacia el NE del área de estudio. Está integrado por once sondeos (L2-1 a L2-11), con una longitud de 300 m y una dirección preferencial NW-SE (Figura 18). Los valores más altos (unidad D) se presentan en superficie L2-1 o inmersos en la unidad C (L2-6, L2-7, L2-9 y L2-10), se asocian a la caliza con poca porosidad o poco diluida. La unidad C con espesor de 10 a 1 m, se localiza como capa superficial en el perfil, salvo en el sondeo L2-1, Su espesor menor se ubica en los sondeos L2-3, L2-4 y L2-8, pudieran asociarse a la presencia de cavernas. La unidad B presenta un espesor no mayor de los 3 m. La unidad A se observa a profundidades de 6 a 10 m. Se identifica que el cuerpo de alta resistividad (C y D) a profundidad varía su posición en el subsuelo.

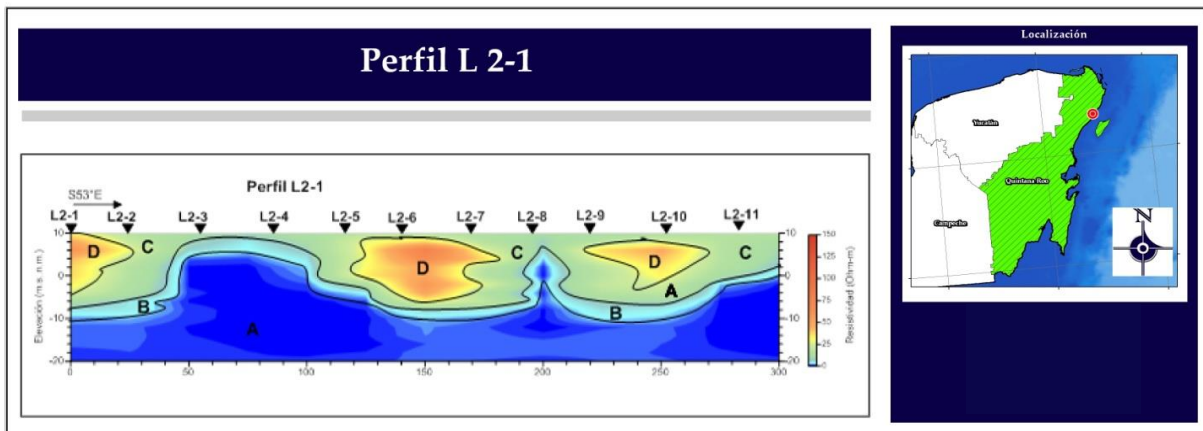


Figura 18. Perfil L2-1.

8.1.2.2. Perfil L2-2

Se realizó en la ubicación del Lago 2, paralelo al perfil L2-1, separado 60 m, integrado por once sondeos (L2-12 a L2-22) con una longitud de 300 m y una dirección preferencial NW-SE (Figura 19). Se identifican las mismas unidades geoelectricas. La D, inmersa en la unidad C, con diferentes dimensiones, la mayor se identifica en los sondeos L2-18 a L2-21, con espesor de hasta 12 m. La unidad A se presenta a diferente profundidad, la menor en el sondeo L2-22, a 3 m de profanidad, entre los sondeos L2-12 a L2-17 se ubica entre los 9 y 11 m. Se representan algunas zonas puntuales donde su espesor es menor, L2-13 y L2-15.

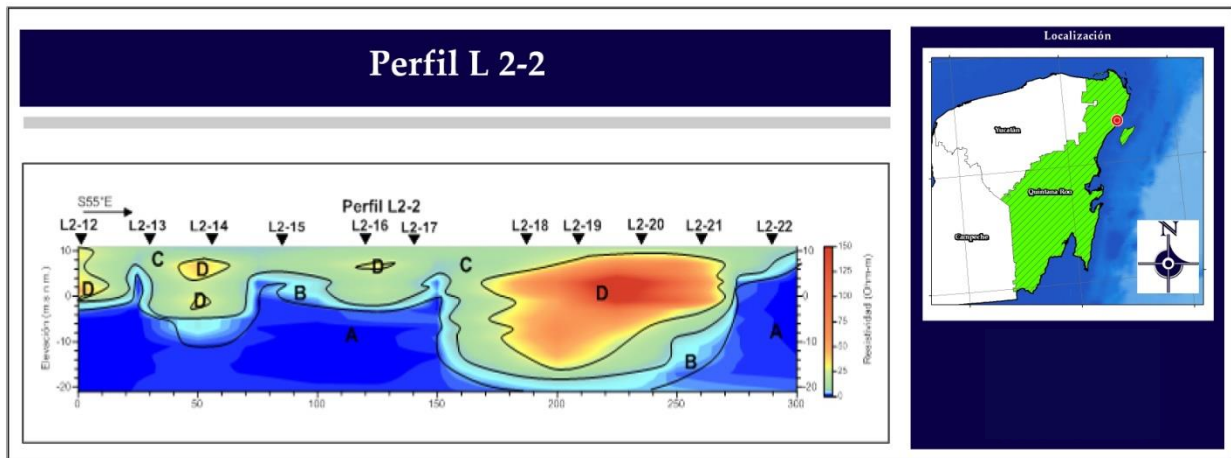


Figura 19. Perfil L2-2.

La correlación entre los dos perfiles indica que el cuerpo de alta resistividad que se presenta entre los sondeos L2-18 a L2-21 perfil L2-2 y L2-9 a L2-11, perfil L2-1 es el mismo. El cuerpo de baja resistividad que se identifica en el sondeo L2-8 se asocia con el cuerpo de baja resistividad que se localiza entre los sondeos L2-17 y L2-18. El cuerpo de resistividad alta que se identifica entre los sondeos L2-5 a L2-7 (perfil L2-1) y sondeo L2-16 y L2-17, es el mismo, La zona de baja resistividad que se identifica en los sondeos L2-3 y L2-4, se correlaciona con el cuerpo que se identifica en el

sondeo L2-15. Lo anterior implica que las zonas de baja resistividad en esta zona presentan una dirección preferencial SW-NE.

8.1.3. Lago 3

8.1.3.1. Perfil L3-1

Está integrado por 28 sondeos (L1-21, L1-20, L2-43, L2-44, L2-45, L2-46, L2, 47, L2-48, L2-23, L2-24, L2-25, L2-26 y del L3-1 al L3-16), con una longitud de 760 m y una dirección preferencial NW-SE (Figura 20). Se identifican las mismas unidades geoelectricas que en los otros lagos. La unidad D se observa en superficie con un espesor de 10 a 20 m,

la unidad A se identifica a una profundidad entre los 10 y 12 m; salvo en la zona donde se presenta el cuerpo de mayor resistividad antes descrito. La unidad B se presenta de los sondeos L2-48 a L3-7, se infiere que en esta zona el nivel del agua se presenta muy somero, lo cual se corroboró con la presencia de agua casi al nivel del terreno, debajo del sondeo L3-3 se observó en campo presencia de cavidades con el agua casi a nivel de suelo.

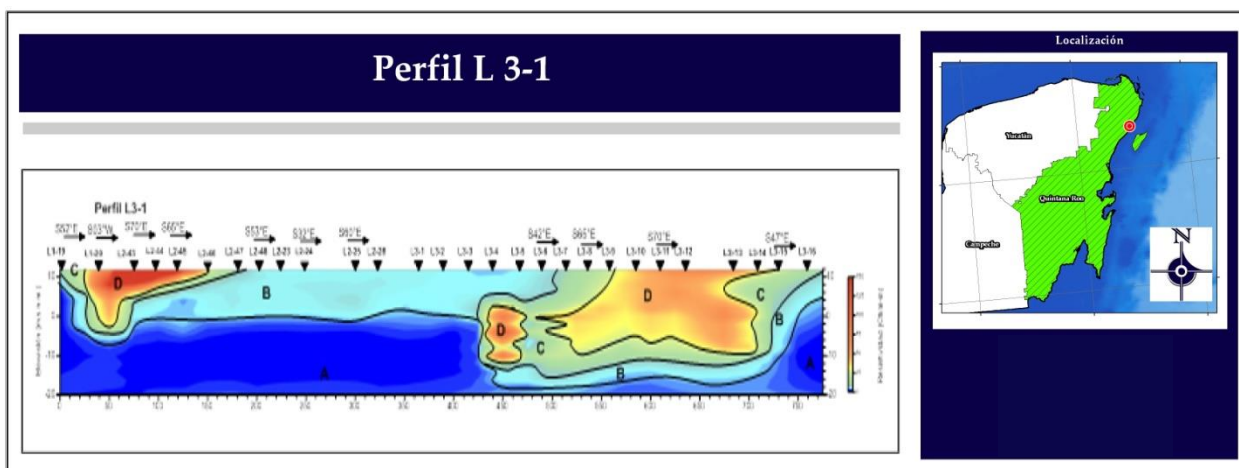


Figura 20. Perfil L3-1.

8.1.3.2. Perfil L3-2

Está integrado por 16 sondeos (L2-27 al L2-42 y L1-17), con una longitud de 540 m y una dirección preferencial NW-SE (Figura 21). Este perfil es paralelo al anterior y prácticamente el mismo comportamiento. La zona de alta resistividad que se identifica en la parte izquierda L1-17 se correlaciona con los sondeos L2-43 a L2-46 del perfil L3-1. La zona de baja resistividad, Unidad B, es paralela y de la misma longitud y espesor que la que se identifica en el perfil L3-1. No se identifica la zona de alta resistividad en la parte derecha del perfil porque no se realizaron sondeos en esa parte del perfil.

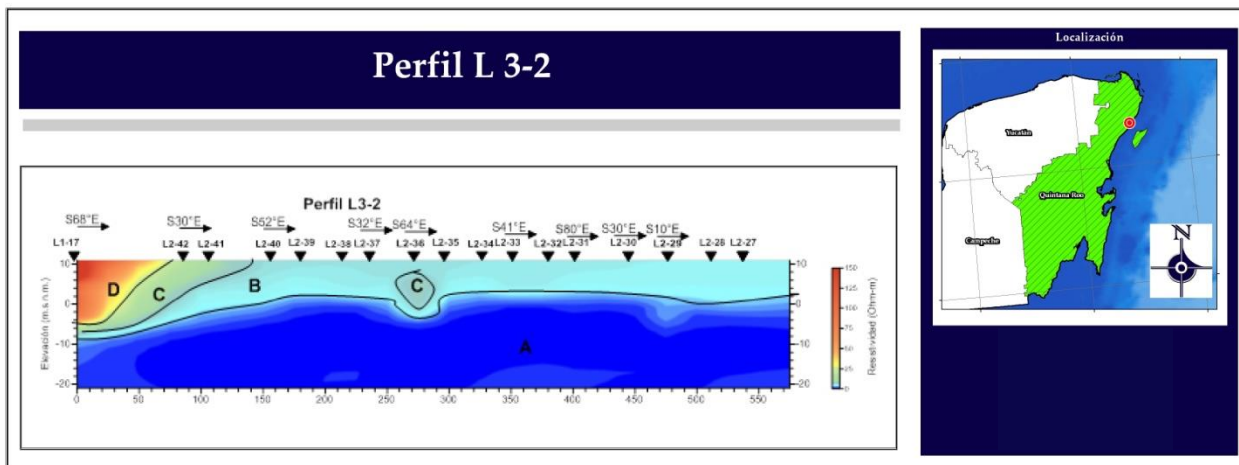


Figura 21. Perfil L3-2.

8.1.4. Lago 4

8.1.4.1. Perfil L4-1

Está integrado por 24 sondeos (L4-1 al L4-24), con una longitud de 600 m y una dirección preferencial NW-SE. (Figura 22). Se identifican las mismas unidades geoelectricas que en los otros lagos. La unidad D se observa en superficie con un espesor de 9 m, en el sondeo L4-23 y L4-24: Se presenta en bloques aislados a largo de todo el perfil, se aprecia zonas de baja resistividad entre estos cuerpos que se asocian a la posible disolución de la caliza en los sondeos L4-5, L4-10, L4-14 y de L4-17 a L4-20, El espesor de la caliza, asociado a la unidad C es del orden de los 15 m.

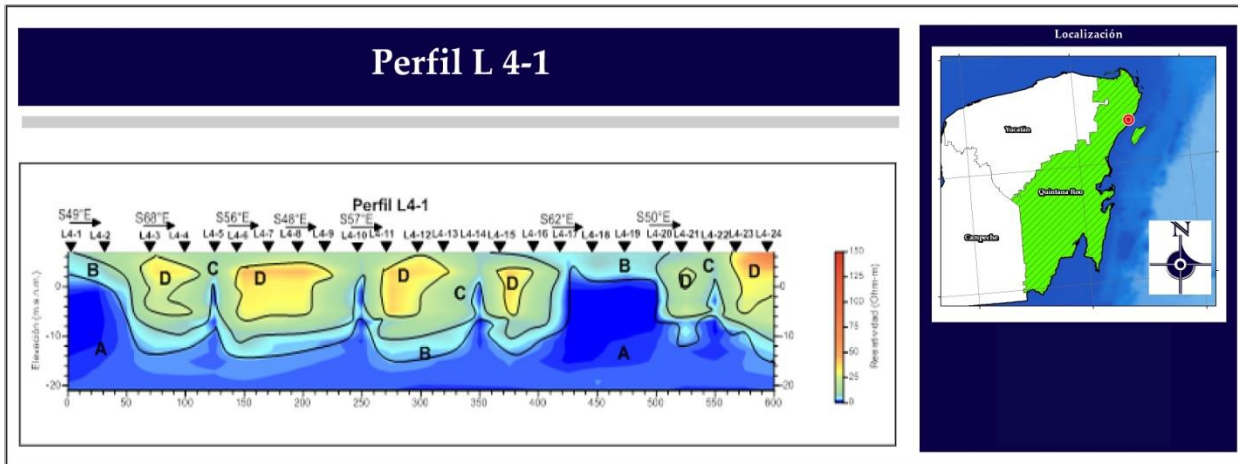


Figura 22. Perfil L4-1.

8.1.4.2. Perfil L4-2

Está integrado por 24 sondeos (L4-25 al L4-48), con una longitud de 620 m y una dirección preferencial NW-SE(Figura 23). Es paralelo al perfil L4-2 separado 50 m, se observa un comportamiento distinto a pesar de la cercanía con el perfil L4-1 pero las unidades se conservan; la unidad D con un espesor de hasta unos 10 m y continua debajo de los sondeos L4-25 al L4-35.

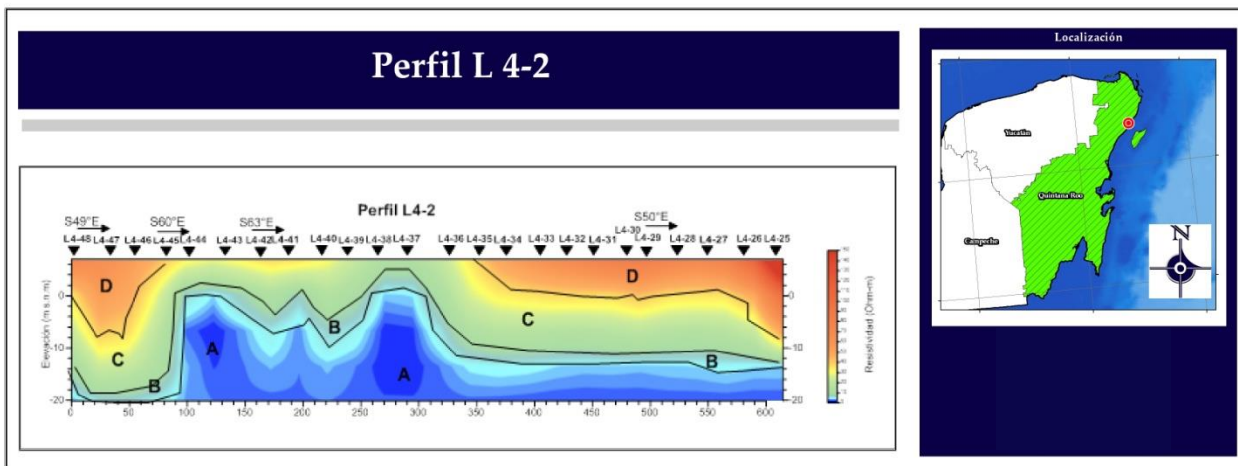


Figura 23. Perfil L4-2.

8.1.5. Lago 5

8.1.5.1. Perfil L5-1

Está integrado por diez sondeos (L5-1 al L5-10), con una longitud de 235m y una dirección preferencial NW-SE (Figura 24). Se identifican las mismas unidades geoelectricas que en los otros lagos. La unidad D se observa en superficie con un espesor de 1 m, en el sondeo L5-9 a L5-10, se profundiza en los sondeos L5-67 y L5-8. Se presenta un cuerpo aislado en los sondeos L5-3 y L5-4. La unidad A se presenta más somera en los sondeos L5-2, L5-5 y L5-6.

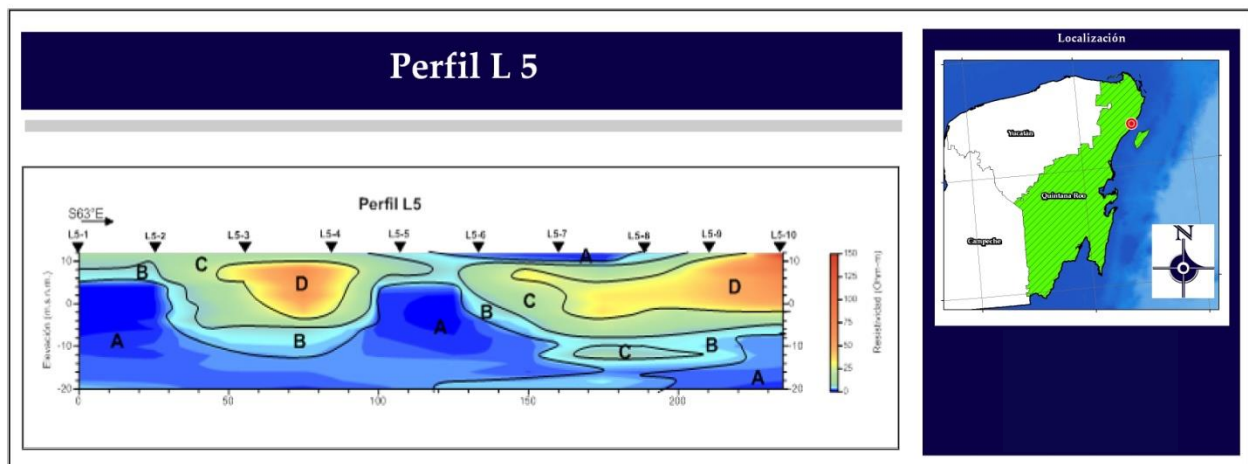


Figura 24. Perfil L5.

8.1.6. Lago 6

8.1.6.1. Perfil L6-1

Se realizó en la ubicación del Lago 6, más cercano a la línea de costa. Está integrado por 34 sondeos (L6-4, L6-5, L6-8, L6-9, L6-12, L6-13, L6-16, L6-17, L6-20, L6-21, L6-24, L6-25, L6-28, L6-29, L6-32, L6-33, L6-36, L6-37, L6-40, L6-41, L6-44, L6-45, L6-48, L6-49, L6-56, L6-57, L6-60, L6-61, L6-64, L6-65, L6-68, L6-69, L6-72, L6-73), con una longitud de 1,050m y una dirección preferencial NW-SE. (Figura 25).

La unidad A se presenta a diferente profundidad a 9 m y la más profunda a los 24 m. Se observan cuatro cuerpos de alta resistividad, asociados a las unidades geoelectricas C y D, el mayor se identifica entre los sondeos L6-4 a L6-20, es el de mayor espesor; otro entre los sondeos L6-29 a L6-37, otro de L6-48 a L6-57 y el último de L6-59 a L6-73. La unidad B se identifica cercana a la superficie en los sondeos L6-57 a L6-68; de L6-40 a L6-45 y de L6-20 a L6-28.

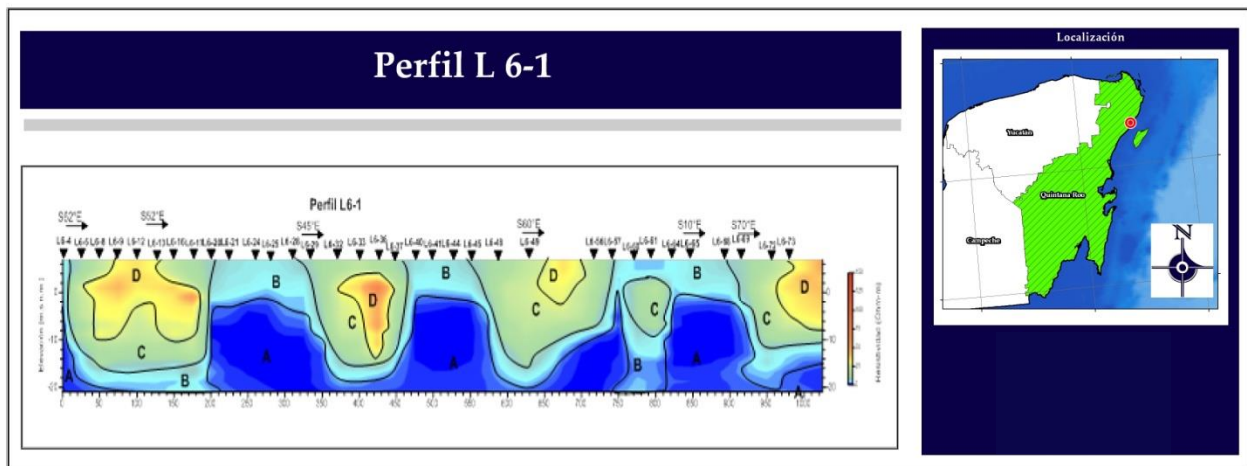


Figura 25. Perfil L6-1

8.1.6.2. Perfil L6-2

Se realizó paralelo al perfil L6-1 (Figura 26) integrado por 38 sondeos (L6-1, L6-2,L6-3, L6-6, L6-7, L6-10, L6-11, L6-14, L6-15,L6-18,L6-19,L6-22,L6-23,L6-26,L6-27,L6-30,L6-31,L6-34,L6-35,L6-38,L6-39,L6-42,L6-43,L6-46,L6-47,L6-50,L6-52,L6-53,L6-55,L6-58,L6-59,L6-62,L6-63,L6-67,L6-70,L6-71,L6-74), separado 50 m con una longitud de 1,050 m y una dirección preferencial NW-SE. Se identifican los mismos cuerpos que en el perfil anterior.

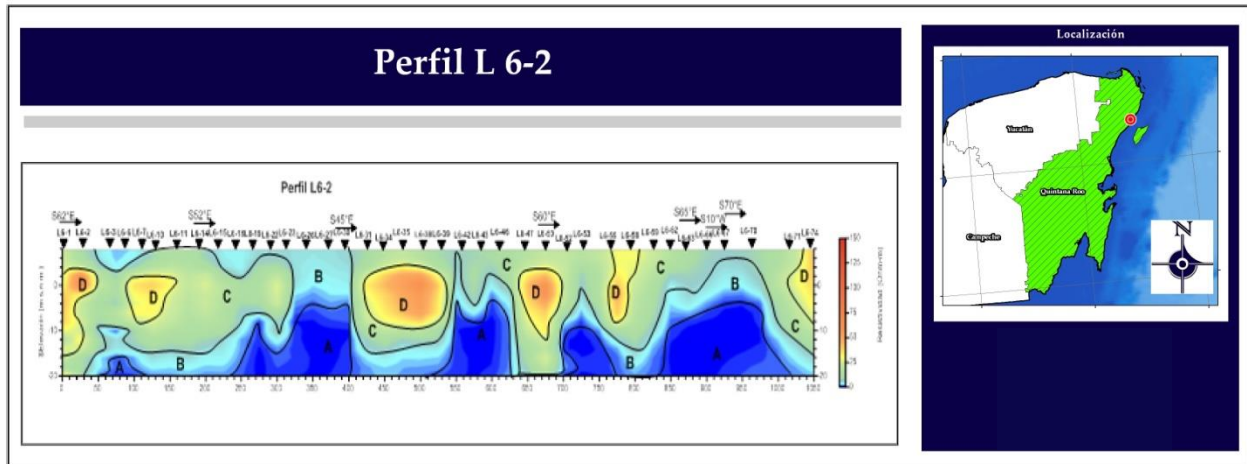


Figura 26. Perfil L6-2

8.2. Método electromagnético en el dominio de la frecuencia (GEM)

8.2.1. Área 1

Los mapas obtenidos se efectuaron en el área correspondiente al Lago 3 al poniente de los TEM (L2-48, L2-23 y L2-24) tratando de corroborar las observaciones de campo las cuales indicaban que en esa dirección se podían continuar la zona de posibles cavernas.

8.2.1.1. Frecuencia 330 Hz

La resistividad promedio obtenida es de 0.05 Ohm-m y la profundidad alcanzada de unos 20 m, se observan anomalías en algunas zonas con resistividades del orden de los 0.5 Ohm-m (Figura 27). Se infiere que la profundidad de investigación llegó a la zona con agua salobre

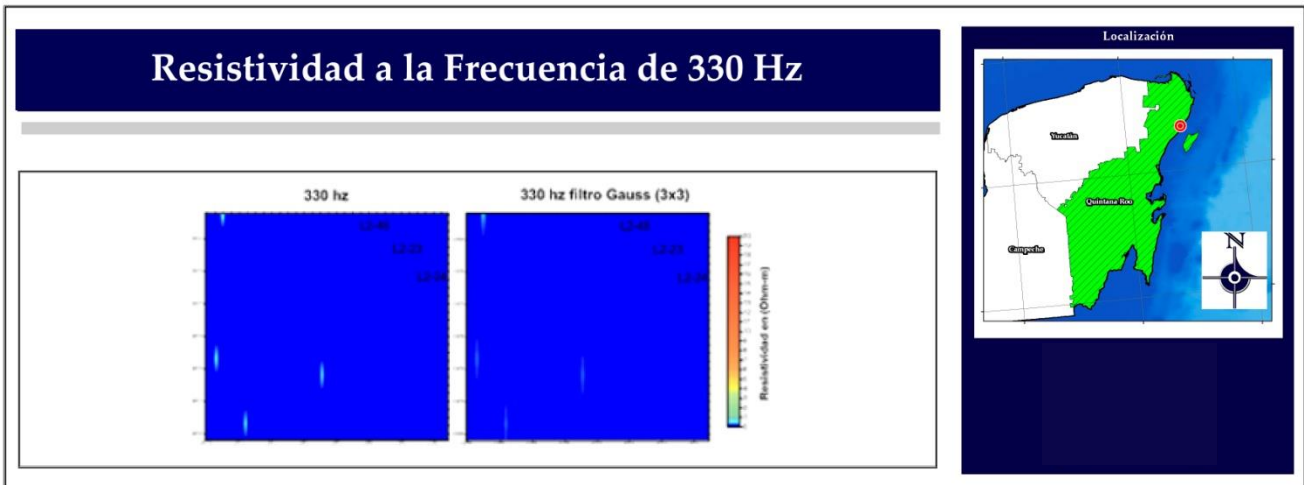


Figura 27. Distribución de la resistividad a la frecuencia de 330Hz a una profundidad de 20 m

8.2.1.2. Frecuencia 930 Hz

La resistividad varía entre 0.05 y 2.3 Ohm-m, la profundidad promedio a esta frecuencia fue de 10 m aproximadamente (Figura 28). Se identifican contrastes de resistividad, asociados a la presencia de agua salobre (valores de menor resistividad), los valores mayores se asocian a cuerpo de caliza con mayor compacidad o menos diluido.

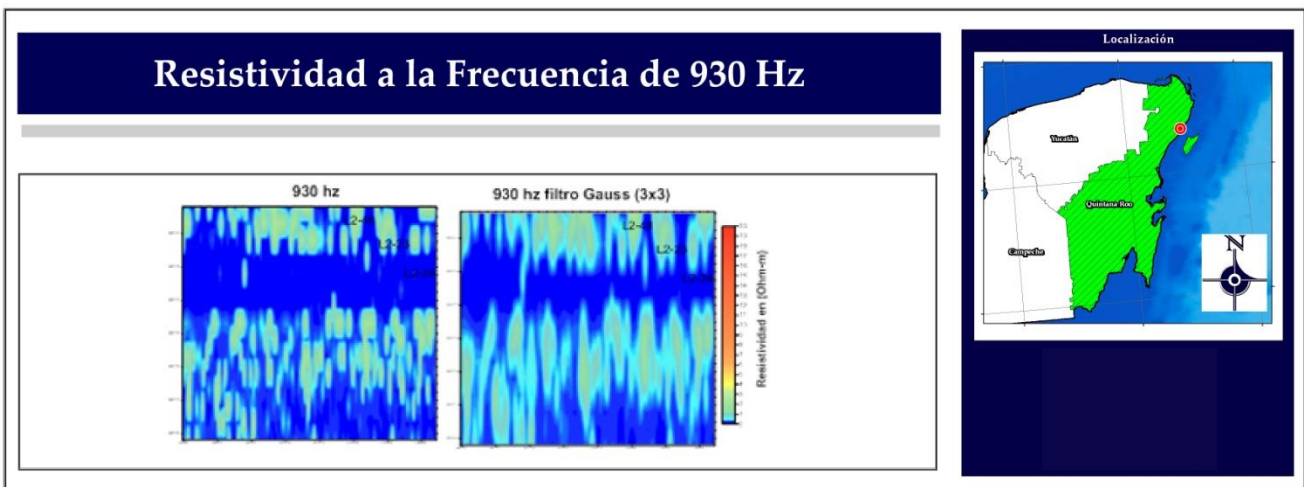


Figura 28. Distribución de la resistividad a la frecuencia de 930Hz a una profundidad de 10 m

8.2.1.3. Frecuencia 2,790 Hz

La resistividad varía entre 0.1 y 8 Ohm-m, la profundidad promedio con esta frecuencia fue de 8 m. (Figura 29). Se identifica una zona con valores de baja resistividad, asociados a una caliza diluida y con presencia de aguas de diferente salinidad, los menores a agua salobre y los mayores a agua de mejor calidad.

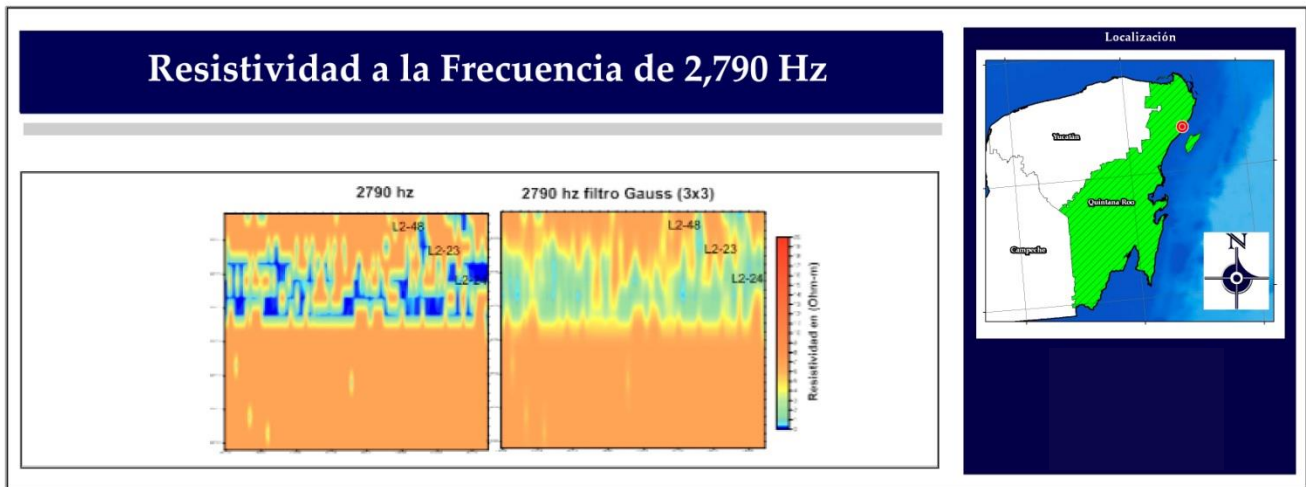


Figura 29. Distribución de la resistividad a la frecuencia de 2,790Hz a una profundidad de 8 m

8.2.1.4. Frecuencia 8,190 Hz

La resistividad medida varía entre 1 y 20 Ohm-m y la profundidad máxima en promedio alcanzada de 1 m (Figura 30). Se asocia a un cuerpo homogéneo, caliza fracturada o con vesículas de agua dulce.

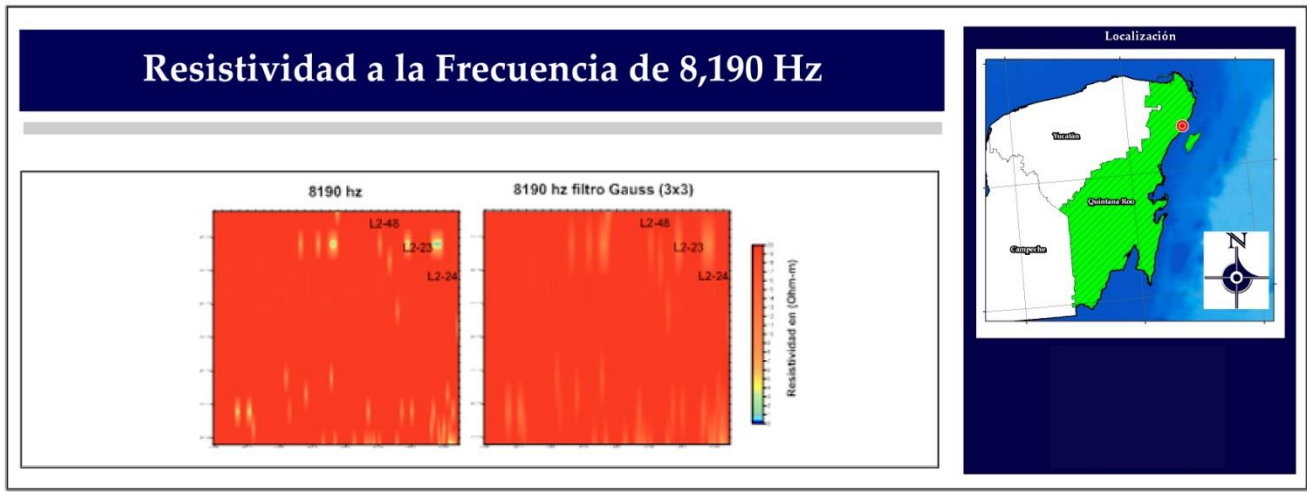


Figura 30. Distribución de la resistividad a la frecuencia de 8,190 Hz a una profundidad de 1 m

8.2.2. Área 2

Realizada en la zona del Lago 4, intersectada con los sondeos L4-16,L4-17,L4-35,L4-34,L4-33,L4-32,L4-31,L4-30 se buscó continuar con la zona de posibles cavernas identificadas y observadas en campo.

8.2.2.1. Frecuencia 330 Hz

La resistividad promedio observada es de 0.5 Ohm-m. La profundidad alcanzada a esta frecuencia es de 20 m (Figura 31). Por los valores de resistividad se infiere que la caliza presenta agua salobre.

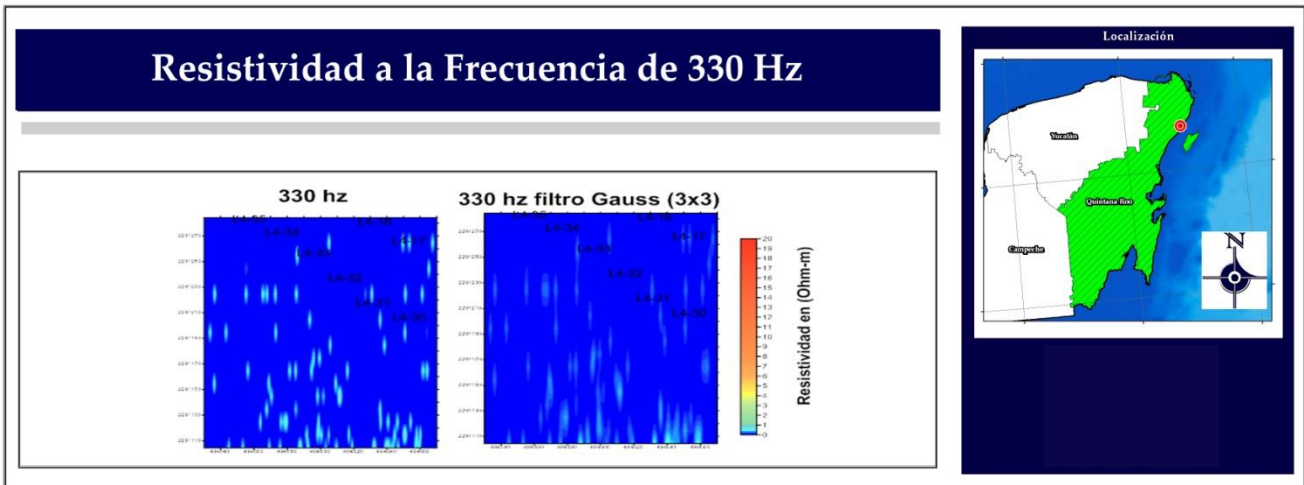


Figura 31. Distribución de la resistividad a la frecuencia de 330 Hz a una profundidad de 20 m

8.2.2.2. Frecuencia 930 Hz

Los valores de resistividad van de 0.1 a 2.3 Ohm-m y alcanzan una profundidad de 10 m (Figura 32). Por los valores que se identifican se infiere que a esta profundidad la caliza está saturada con agua de mejor calidad que en el intervalo anterior. Los valores de muy baja resistividad se asocian a la presencia de agua salobre posiblemente asociados también a la presencia de cavernas o caliza con alta disolución. Hacia la parte centro sur los valores de resistividad son homogéneos lo cual indica que las condiciones de la caliza son estables, no presentan cavernas o disolución.

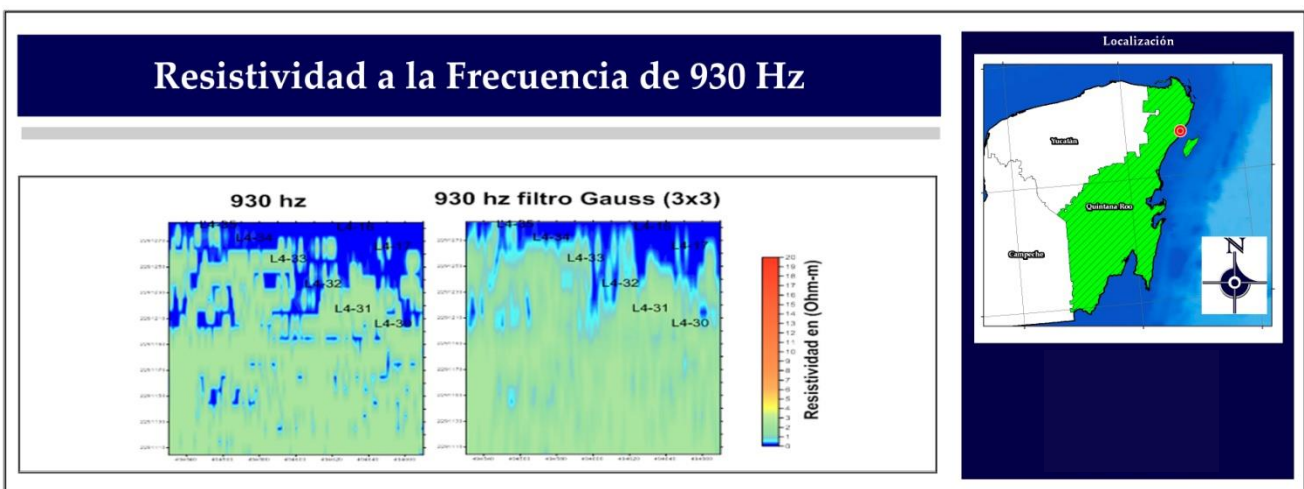


Figura 32. Distribución de la resistividad a la frecuencia de 930 Hz a una profundidad de 10 m.

8.2.2.3. Frecuencia 2790 Hz

Las frecuencias varían desde 0.5 a 7 Ohm-m y la profundidad alcanzada es de unos 8 m (Figura 33). Tiene un comportamiento similar al mapa anterior, las zonas con disolución o mayor salinidad del agua se reducen.

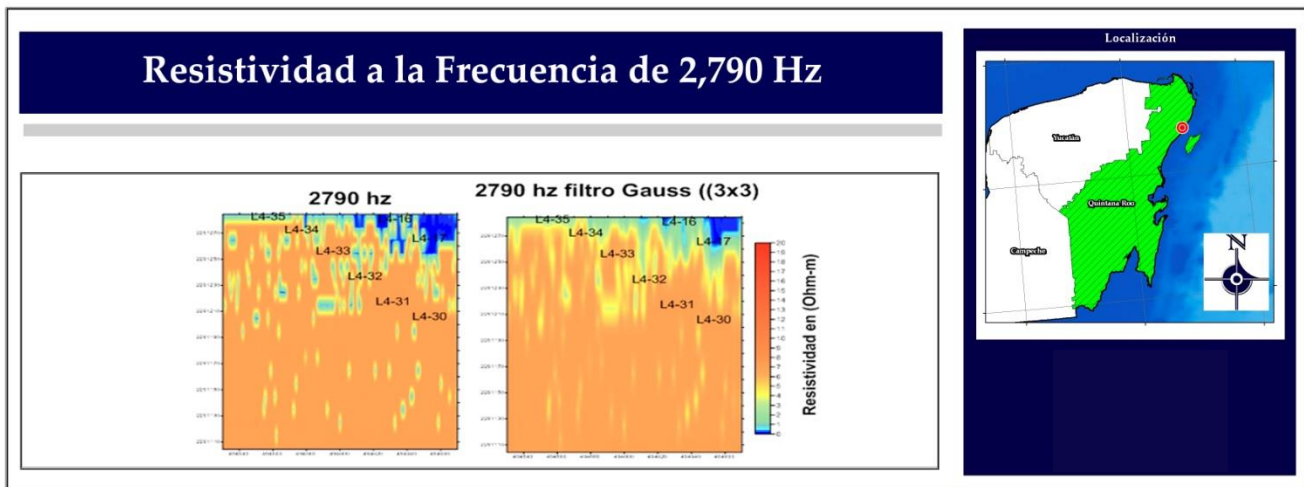


Figura 33. Distribución de la resistividad a la frecuencia de 2790 Hz a una profundidad de 8 m

8.2.2.4. Frecuencia 8190 Hz

Se observa una imagen heterogénea con valores de 0.5 a 20 Ohm-m con una profundidad de penetración aproximada de 1 m (Figura 34). Se presentan zonas con disolución que pueden asociarse a zonas de pequeñas fracturas cercanas a la superficie no caracterizadas con el método en el dominio del tiempo.

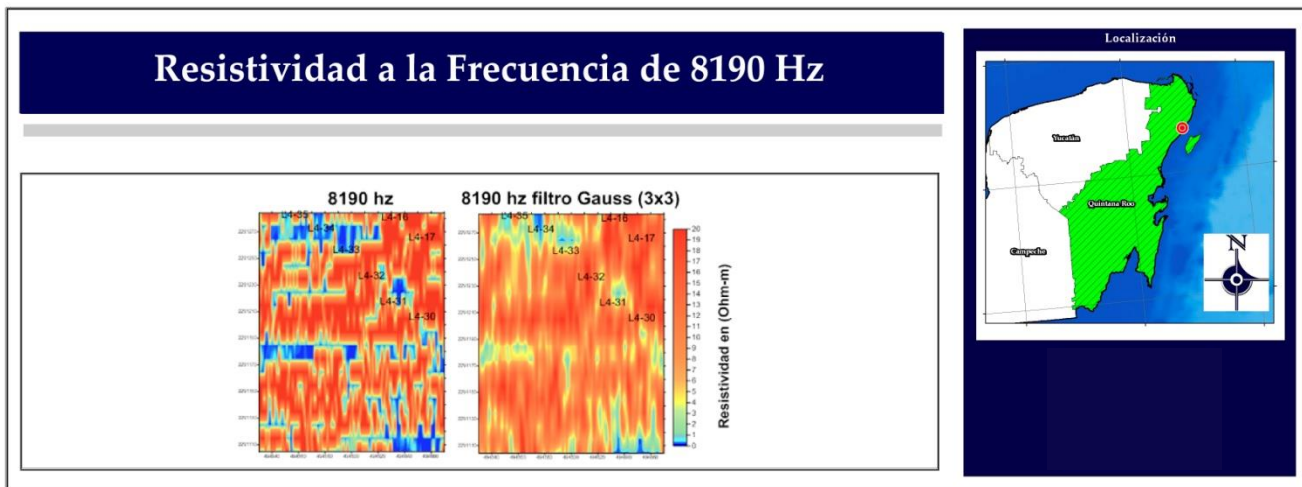


Figura 34. Distribución de la resistividad a la frecuencia de 8190 Hz a una profundidad de 1 m

8.3. Parámetros hidráulicos del acuífero

Durante las pruebas Slug se inyectó un volumen 10 m^3 a un caudal de 4 lps en cada pozo (oficinas y tiger), los datos fueron procesados y posteriormente graficados, sin embargo los resultados de la prueba en el pozo “tiger” no fueron representativos para obtener los parámetros hidráulicos, ya que aunque se realizó la prueba, debido a la naturaleza kárstica de la zona de estudio y al diámetro del pozo, no fue posible lograr una buena variación en las cargas hidráulicas del pozo.

La gráfica que muestra la prueba slug en el pozo “oficinas” se muestra a continuación (Figura 35):

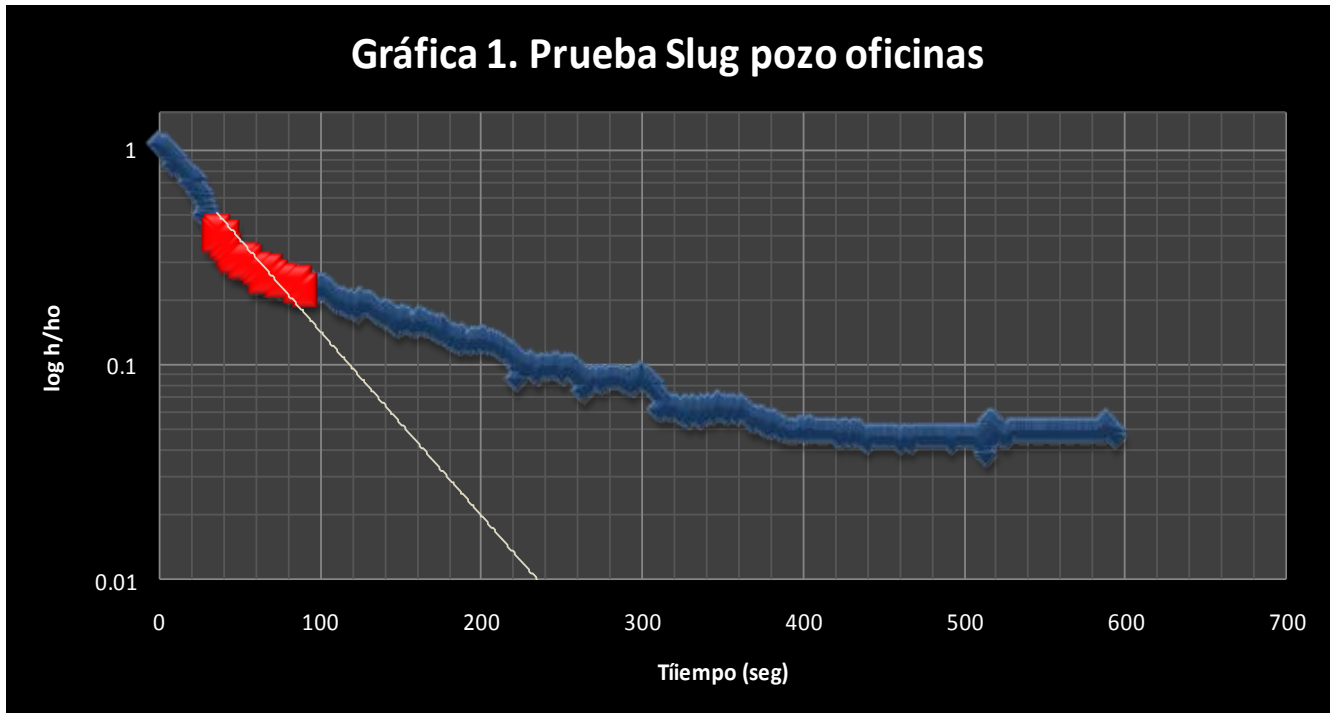


Figura 35. Gráfica de la prueba tipo slug en el pozo “Oficinas”.

Una vez obtenida la gráfica se obtiene el valor t_0 generando una línea de tendencia de la gráfica hasta que se interseca con el eje de las “x”, el método utilizado fue el Hvorslev (1951).

$$K = \frac{(0.1016) \text{ [m]} \ln \frac{1}{2(0.0029)} + \left(1 + \left(\frac{1}{2(0.0029)}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}}}{2(5.50\text{[m]})(230 \text{ [s]})} = 2.34e^{-4} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$$

$$K = 20.25 \left[\frac{\text{m}}{\text{d}}\right]$$

De acuerdo a datos bibliográficos, se presentan algunos valores de conductividad hidráulica reportada por diferentes autores (Tabla 4) donde de acuerdo a las pruebas *slug* realizadas en campo, se puede constatar que la conductividad hidráulica obtenida de 20.25 [m/d] en la zona de estudio se encuentra en los rangos de valores de conductividades hidráulicas para calizas karstificadas reportadas en la literatura.

Tabla 4. Valores estimados de conductividad (m/d).

		Domenico	Smith & W	Freeze	Fetter	Sanders
Rocas Sedimentarias	Calizas carstificadas	0,1 a 2000	0,05 a 0,5	0,1 a 1000		0,1 a 10^7
	Calizas, dolomías	10^{-4} a 0,5	0,001 a 0,5	10^{-4} a 1		10^{-4} a 1
	Areniscas	$3 \cdot 10^{-5}$ a 0,5	10^{-5} a 1	10^{-5} a 1		
	Argilitas (siltstone)	10^{-6} a 0,001				
	Pizarras sedimentarias (Shale) intactas	10^{-8} a $2 \cdot 10^{-4}$	10^{-8} a 10^{-4}	10^{-4} a 10^{-3}		10^{-4} a 10^{-8}
	Pizarras sed. (Shale) fracturadas/alteradas		10^{-4} a 1			

8.4. Muestreo de aguas subterráneas

Los resultados arrojados por el laboratorio certificado por la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA) fueron procesados en AquaChem 5.1, los valores para los iones principales (Ca, Mg, Na y K, alcalinidad), sulfatos y cloruros, se muestran en el siguiente diagrama de Piper. (Figura 36)

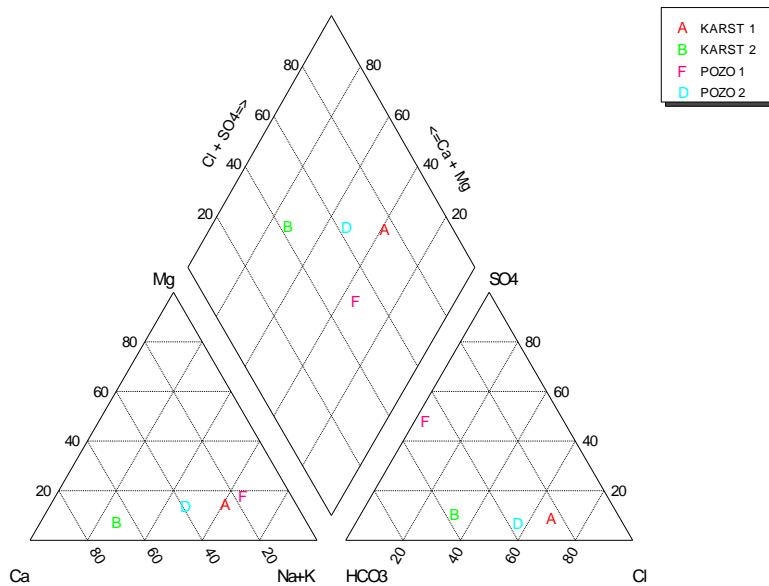


Figura 36. Diagrama de Piper de las muestras

Con los resultados anteriores se clasifican dos familias de agua en la zona de estudio, la primera familia clorurada-sódica que corresponde a los muestreos de los pozos Oficinas y Tiger así como del karst 1 y una segunda familia del tipo bicarbonatada-sódica correspondiente al karst 2.

8.5. Red de flujo

En la figura 37, se muestra la dirección de flujo local de la zona de interés. La misma se generó a partir de las cargas hidráulicas de cada uno de los pozos y dolinas. La dirección de flujo preferencial es NW-SE que concuerda con la dirección de flujo regional. Las cargas hidráulicas están en un rango entre 1.96 y 2.52 m.

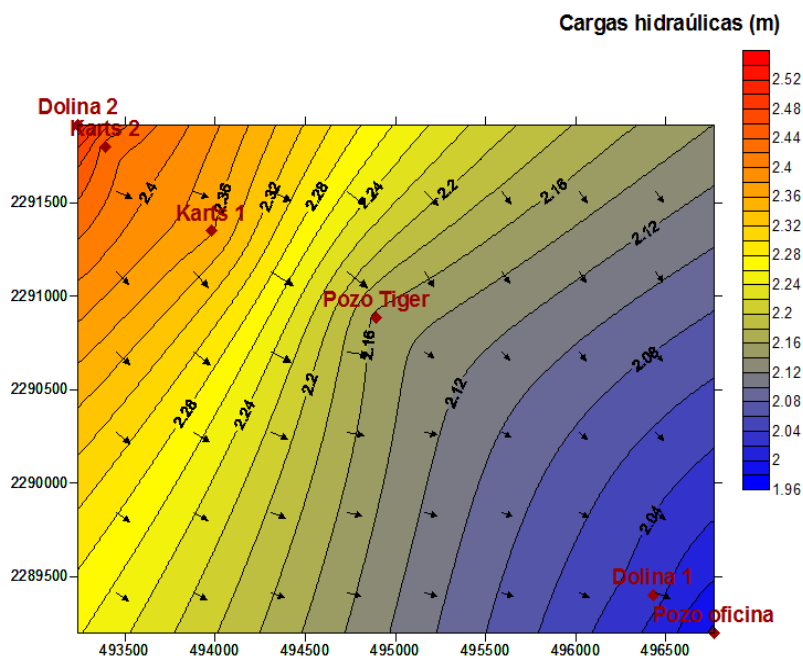


Figura 37. Dirección de flujo local en la zona de estudio

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El tipo de roca en la zona estudiada es una caliza de tipo coquina, la cual es una roca con alto contenido de fósiles y alta porosidad secundaria originada por la disolución del carbonato de calcio contenido en la roca.

- Las variaciones de resistividad identificadas se asocian a la salinidad del agua que fluye en los poros de la roca. Los valores más bajos, menores de 1 Ohm-m (menos resistiva) se asocian a agua salada, la cual se correlaciona con el dato de la muestra de agua que se localiza en pozo Oficinas (Pozo 1).

En las áreas estudiadas se identifica un horizonte de muy baja resistividad asociada a agua salada, a una profundidad promedio de los 20 m, aunque en algunas zonas en particular se llega a presentar a menor profundidad como en los sondeos L1-6,L1-7,L1-8,L3-1,L3-2,L3-3,L2-3,L2-4,L2-8,L2-48,L2-23,L2-24,L2-25,L2-26,L2-28,L2-27,L4-18,L4-19,L4-20,L6-25,L6-24,L6-40-L6-41,L6-44,L6-64,L6-65,L6-26,L6-27.

- Es notable la influencia del mar en la zona estudiada debido a la naturaleza geológica e hidrogeológica del medio, se comprueba que en el terreno que ocupa la zona de estudio, el mar tiene una gran influencia sobre la descarga del agua continental, es importante aclarar que esto es totalmente natural y no tiene nada que ver por contaminación por bombeo como en otros casos.
- Con los perfiles geofísicos mostrados se concluye que las unidades geoeléctricas “C” y “D” están saturadas con agua dulce y cuentan con un espesor general aproximado de 10 metros, la unidad geoeléctrica “B” se considera la interface salina (agua salobre) tiene un espesor que varía de acuerdo a la zona de 2 a 10 metros, y finalmente la unidad geoeléctrica “A” se considera como la unidad saturada con agua salada debido a su baja resistividad, con un espesor no determinado pero que se percibe a una profundidad que oscila de los 18 a 20 metros

- Conforme a los resultados de los análisis químicos de agua subterránea se aprecian dos familias de agua dentro de la zona de estudio clasificadas como clorurada-sódica y bicarbonatada-sódica. Haciendo una relación de los perfiles L4-1, L3-1, L6-2, (sondeos L4-23, L3-14, L3-15, L6-3) con los resultados del muestreo de aguas subterránea, se concluye que el agua del pozo Oficinas, pozo Tiger y karst 1, corresponden a la misma familia de agua (clorurada sódica), la unidad geoelectrica "C" que corresponde a agua dulce, mientras que el karst 2 pertenece a la familia bicarbonatada-sódica.
- Se sugiere realizar una excavación a 6 m en el sondeo L1-7 para verificar la calidad del agua o bien la presencia de una posible caverna
- Se propone realizar cuatro nidos piezométricos a una profundidad de 20 m a lo largo del predio, con 3 tubos de PVC a las profundidades de 8, 10 y 20 m con el fin monitorear los diferentes tipos de agua (dulce, salobre y salada) una vez explotada la caliza y con ello asegurar que durante el proceso de explotación, no haya alteración en la calidad del lente de agua dulce.

De acuerdo a los perfiles geofísicos y a los resultados de la química del agua, las zonas que se proponen para realizar los nidos piezométricos son las siguientes:

- ✓ Entre el pozo Oficinas y Tiger.
 - ✓ Entre Tiger y Karst 1
 - ✓ Karst 2
 - ✓ En la zona norte del predio
- Mediante la interpretación de los resultados obtenidos en el estudio geofísico, hidrogeológico e hidrogeoquímico, se propone una profundidad máxima de explotación de 8 m, para no alterar el sistema agua salobre-salada con el lente de agua dulce y con ello evitar una posible degradación de la calidad de dicho lente, sin embargo debido a las irregularidades geológicas del terreno, hay zonas en donde las unidades "C y D" (saturadas con agua dulce) presentan un mayor espesor permitiendo que la excavación pueda sobrepasar los 8 m iniciales. Estas zonas se encuentran distribuidas y se describen a continuación:

Perfil L 1-1

Para el perfil L 1-1 se proponen dos zonas para profundizar más de 8 m. La primera zona lo constituyen los sondeos L 1-1 al L 1-6 con una profundidad máxima de excavación de 10 m (Tabla 5) y la segunda zona conformada por los sondeos L 1-8 al L 1-11 se puede tener una profundidad máxima de excavación de 12 m (Tabla 6). En la figura 38 se muestran las dos zonas de excavación para el perfil mencionado.

Tabla 5. Ubicación de los sondeos para el perfil L 1-1

Sondeo	X (UTM)	Y (UTM)	Prof. De Excavación (m)
L1-1	492815.22	2291626.19	10
L1-2	492847.25	2291665.62	10
L1-3	492878.66	2291715.84	10
L1-4	492912.74	2291750.35	10
L1-5	492941.29	2291793.68	10
L1-6	492970.37	2291828.64	10

Tabla 6. Ubicación de los sondeos para el perfil L 1-1

Sondeo	X (UTM)	Y (UTM)	Prof. De Excavación (m)
L1-8	493023.88	2291904.13	10
L1-9	493057.75	2291945.14	10
L1-10	493082.21	2291990.15	10
L1-11	493126.68	2292028.69	10

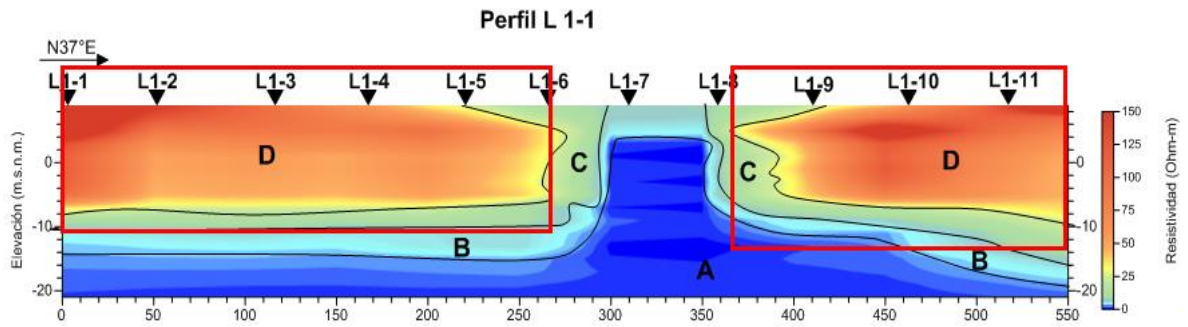


Figura 38. Ubicación de las excavaciones propuestas para el perfil L 1-1

PERFIL L 2-2

Para este sector se consideró una zona de excavación de aproximadamente 1 km de longitud con una profundidad máxima del orden de los 15 m. La ubicación y los sondeos correspondientes se muestran en la figura 39 y tabla 7.

Tabla 7. Ubicación de los sondeos para el perfil L 2-2

Sondeo	X (UTM)	Y (UTM)	Prof. De Excavación (m)
L2-18	493883.46	2291802.04	12
L2-19	493900.66	2291787.15	12
L2-20	493922.88	2291772.06	12
L2-21	493942.35	2291756.97	12

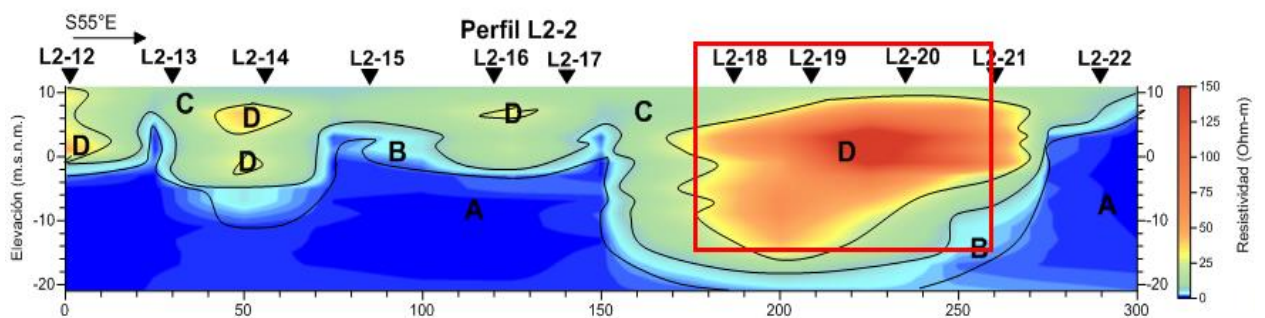


Figura 39. Ubicación de la excavación propuesta para el perfil L 2-2

PERFIL L 3-1

Se propone una longitud de 2 km con profundidad de excavación de 12 m, la ubicación de la zona se muestra en la figura 40 y tabla 8.

Tabla 8. Ubicación de los sondeos para el perfil L 3-1

Sondeo	X (UTM)	Y (UTM)	Prof. De Excavación (m)
L3-7	493521.02	2291610.72	11
L3-8	493537.95	2291592.5	11
L3-9	493560.27	2291580.68	11
L3-10	493579.71	2291568.17	11
L3-11	493597.06	2291551.42	11
L3-12	493617.49	2291536.58	11
L3-13	493666.47	2291514.6	11
L3-14	493689.08	2291508.17	11

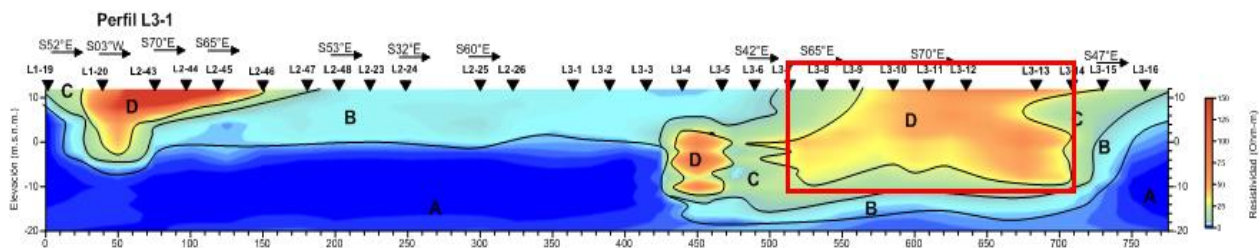


Figura 40. Ubicación de la excavación propuesta para el perfil L 3-1

PERFIL L 4-2

Se tienen dos zonas dentro del perfil para profundizar más de 8 m, la primera abarca los sondeos L 4-45 al L4-48 (Tabla 9) con aproximadamente 1 km y el segundo del L 4-25 al L 4-36 (Tabla 10) con 2.5 km de longitud aproximadamente. La figura 41 muestra las zonas propuestas.

Tabla 9. Ubicación de los sondeos para el perfil L 4-2

Sondeo	X (UTM)	Y (UTM)	Prof. De Excavación (m)
L4-45	494344.71	2291441.3	16
L4-46	494326.63	2291461.02	16
L4-47	494313.81	2291476.3	16
L4-48	494292.73	2291496.27	16

Tabla 10. Ubicación de los sondeos para el perfil L 4-2

Sondeo	X (UTM)	Y (UTM)	Prof. De Excavación (m)
L4-25	494747.93	2291123.43	12
L4-26	494733.33	2291143.34	12
L4-27	494713.59	2291162.34	12
L4-28	494697.26	2291178.04	12
L4-29	494676	2291190.67	12
L4-30	494653.71	2291201.59	12
L4-31	494631.98	2291213.12	12
L4-32	494615.34	2291232.49	12
L4-33	494596.31	2291251.98	12
L4-34	494577.56	2291268.19	12
L4-35	494557.57	2291278.34	12
L4-36	494538.61	2291295.62	12

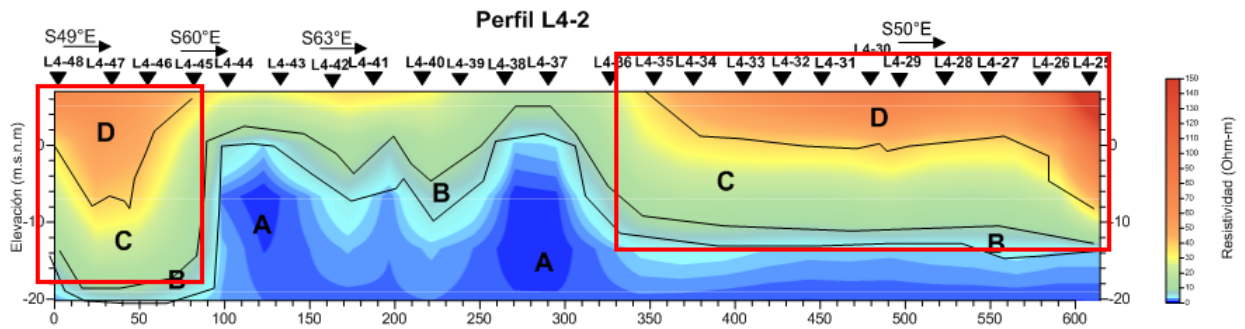


Figura 41. Ubicación de la excavación propuesta para el perfil L 4-2

PERFIL L 6-2

Se ubica una zona donde se puede profundizar a 14 m (sondeos L 6-1 al L 6-22) , se consideran 3 km de longitud aproximadamente (Tabla 11)(Figura 42).

Tabla 11. Ubicación de los sondeos para el perfil L 6-2

Sondeo	X (UTM)	Y (UTM)	Prof. De Excavación (m)
L6-1	494754.76	2290706.83	14
L6-2	494778.39	2290690.65	14
L6-3	494804.78	2290683.23	14
L6-4	494817.9	2290706.33	14
L6-5	494837.64	2290693.33	14
L6-6	494826.35	2290670.9	14
L6-7	494848.12	2290660.07	14
L6-8	494858	2290680.11	14
L6-9	494878.71	2290670.76	14
L6-10	494867.89	2290650.01	14
L6-11	494888.65	2290632.86	14
L6-12	494902.54	2290654.89	14
L6-13	494925.98	2290644.72	14
L6-14	494912.77	2290623.66	14
L6-15	494932.67	2290610.45	14
L6-16	494949.28	2290630.37	14
L6-17	494967.15	2290613.94	14
L6-18	494954.12	2290593.17	14
L6-19	494968.32	2290577.99	14
L6-20	494983.61	2290596.72	14
L6-21	495001.92	2290585.54	14
L6-22	494989.3	2290561.57	14

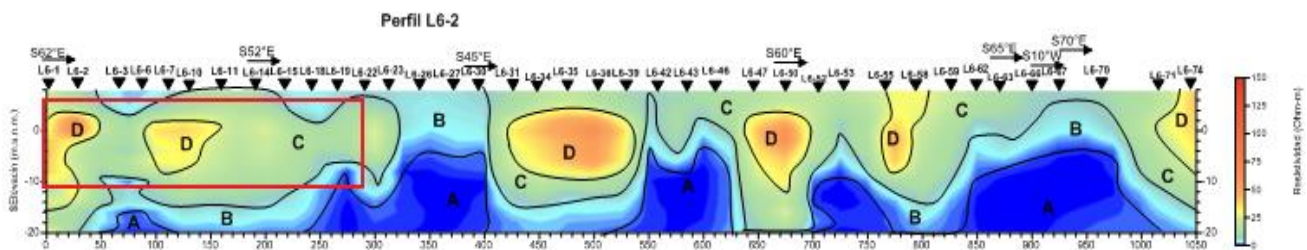


Figura 42. Ubicación de la excavación propuesta para el perfil L 6-2

- Una vez concluida la etapa de extracción del material, en la zona en donde se contruyan los lagos artificiales, el flujo de agua subterránea no se verá afectado pues sólo se dejara al descubierto la zona por la extracción de la caliza, de ninguna manera se pondrán barreras que interfieran con la dirección de flujo. El movimiento de agua subterránea se deduce que sigue el

patrón estructural predominante partiendo de las zonas con mayor altura piezométrica a menor altura (nivel del mar).

- La construcción de las lagunas no ocasiona ningún riesgo de contaminación para los vecinos ya que no habrá extracción de agua o sobre bombeo donde las interfaces puedan mezclarse.

10. BIBLIOGRAFÍA

Aparicio F. (1997). "Fundamentos de hidrología de superficie". 1era edición Limusa.

Back, W., Hanshaw B. 1974. Hydrogeochemistry of the Northern Yucatan Península, México. Ed. Field Seminar on Water and Carbonate Rocks of the Yucatan Peninsula, México: New Orleans Geological Society Guide Book, field trip 2, of America.

Bonet, F., J. Butterlin, J. (1963). Las Formaciones Cenozoicas de la Parte Mexicana de la Península de Yucatán. Revista Ingeniería Hidráulica de México, 1er. Trimestre 1993, Publicación del Instituto de Geología. México.

Comisión Nacional del Agua. (1997). Diagnóstico para la Región XII, Península de Yucatán. Tomo I y II. Informe Final. Sistemas Hidráulicos y Ambientales SA de CV.

Comisión Nacional del Agua (2001), Actualización Geohidrológica del Acuífero de la Zona Norte del Estado de Quintana Roo.

Domenico, P.A., y F.W. Schwartz, Physical and Chemical Hydrogeology, 2a edición, John Wiley and Sons, Nueva York, Nueva York, USA, 576 p.

Fetter, C.W. (1999). Contaminant Hydrogeology. 2da edición. Prentice Hall.

GEM-2 Manual (2004), Geophex, Ltd.

Geophex. www.geophex.com (2011), artículos relacionados con la calibración, cálculo de la profundidad de investigación.

- Ghyben-Herzberg (1992), Moore H. Yolanda, Ronald K. Stoessell, and Dale H. Easley. "Fresh_ Water/ Sea-Water Relationship Within a Ground-Water Flow System, Northeastern Coast of the Yucatan Peninsula". *Ground Water* Vol.30, No.3, mayo-june 1992.
- Huang, H. Won, I.J (2000), Conductivity and susceptibility mapping using broadband electromagnetic sensor, *JEE*, Vol. 5, Issue 4. Pp 31-41
- Huffman GJ, Adler RF, Bolvin DT, Gu GJ, Nelkin EJ, Bowman KP, Hong y, Stocker EF, Wolff DB (2007) The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *J Hydrometeorol* 8(1):38–55
- Kohout, F.A. y H. Klein, (1967), Effect of pulse recharge on the zone of diffusion in the Biscayne aquifer, International Association of Scientific Hydrogeology Symposium, Haifa, Israel, pub. 72, p. 252-270
- Medrano W (2011). Levantamiento de recursos hídricos. Diciembre.
- Norma Oficial Mexicana, (NOM-011-CNA-2000). Conservación del recurso agua que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales.
- Murat, H. (1998). "Water balance and water quality in the Curuksu basin, western Turkey". *Hydrogeology Journal*, 7.
- Pozo, C., Armijo Canto, N. y Calmé, S.(2011). Riqueza Biológica de Quintana Roo. Un análisis para su conservación, Tomo I. El Colegio de la Frontera Sur (Ecosur), Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio), Gobierno del Estado de Quintana Roo y Programa de Pequeñas Donaciones (ppd). México, D. F.
- Servicio Meteorológico Nacional, Estaciones climatológicas del Estado de Quintana Roo y Yucatán (1990-2009)

Servicio Geológico Mexicano (2012), Carta Geológica Minera Cozumel F16-11

UADY, Facultad de Ingeniería (2001), Ampliación de la red piezométrica en la región costera norte del estado de Quintana Roo, 2da Parte.

Villasuso Pino M. y Méndez Ramos R. (1996) “Modelo Conceptual de la Península de Yucatán”; International Institute for Applied Analysis; Centro de Investigación y Estudios Avanzados- Unidad Mérida, Yucatán; Proyecto Población, Desarrollo y Medio Ambiente.

**ANEXO
FOTOGRAFICO**



Foto 1. Vista de la parte norte del banco de material



Foto 2. Vista que muestra el espesor explotado



Foto 3. Encharcamientos en la parte norte del banco de material



Foto 4. Planta de proceso "Tiger"



Foto 5. Punto de partida de la nivelación topográfica



Foto 7. Nivelación topográfica en el “karst 1”



Foto 8. Nivelación topográfica en el “karst 2”.



Foto 9. Caliza arrecifal



Foto 10. Karst al costado oeste de la “dolina 2”



Foto 11. Prueba tiposlug en el pozo “Tiger”



Foto 12. Inyección de agua en el pozo “Tiger”



Fig. 14. Medición del nivel estático en el pozo “oficinas”.



Foto 15. Dolina 1



Foto 16. Dolina 2



Foto 17. Vista de la dolina 2.



Foto 18. Karst 1



Foto 19. Karst en la parte norte de la planta



Foto 20. Profundidad del karst al norte de la planta