



UNIVERSIDAD DE SONORA

División de ciencias exactas y naturales
Departamento de geología

TESIS PROFESIONAL

Modelación de cavernas kársticas al sur de la
Ruta de los Cenotes, municipio de Puerto Morelos;
Quintana Roo

Para obtener el título de
Geólogo

Presenta:

Lucía Guadalupe Valenzuela Gastélum



Hermosillo, Sonora. Septiembre de 2018

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

Hermosillo, Sonora, 19 de junio de 2018

DRA. SILVIA MARTÍNEZ RETAMA
JEFA DEL DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
UNIVERSIDAD DE SONORA
Presente.-

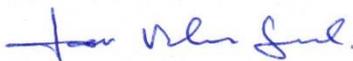
Por este conducto y de la manera más atenta, me permito someter a su consideración, para su aprobación el siguiente el tema de Tesis, intitulado:

“Modelación de cavernas kársticas al sur de la Ruta de los Cenotes, municipio de Puerto Morelos; Quintana Roo”

Esto es con el fin de que la alumna: **Lucía Guadalupe Valenzuela Gastélum** con **Expediente No. 213203476** pueda presentar su examen profesional, para la obtención de su título de Licenciatura en Geología.

Sin otro en particular y agradeciendo de antemano su atención al presente, quedamos de Usted.

ATENTAMENTE
“EL SABER DE MIS HIJOS HARA MI GRANDEZA”



M.C. Javier Valencia Saucedo
DIRECTOR DE TESIS

C.c.p. Interesado.
C.c.p. Archivo





"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología

Hermosillo, Sonora, 04 de julio, 2018

M.C. JAVIER VALENCIA SAUCEDA
DIRECTOR DE TESIS
P R E S E N T E.-

Por este conducto, le comunico que ha sido aprobado el tema de tesis propuesto por usted intitulado:

“MODELACIÓN DE CAVERNAS KÁRSTICAS AL SUR DE LA RUTA DE LOS CENOTES, MUNICIPIO DE PUERTO MORELOS; QUINTANA ROO”

Esto es con el fin de que la alumna: **Lucía Guadalupe Valenzuela Gastélum** con **Expediente No. 213203476**, pueda presentar su examen profesional, para la obtención de su título de Licenciatura en Geología. Así mismo les comunico que han sido asignados los siguientes Sinodales:

Presidente	Geol. Mariano Morales Montaña
Secretario	M.C. José Alfredo Ochoa Granillo
Vocal	M.C. Javier Valencia Saucedo

Sin otro en particular y agradeciendo de antemano su atención al presente, quedo de Usted.

A T E N T A M E N T E
“EL SABER DE MIS HIJOS HARA MI GRANDEZA”


DRA. SILVIA MARTÍNEZ RETAMA
JEFA DEL DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



C.c.p. Interesada
C.c.p. Archivo.



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología

NOMBRE DE LA TESIS:

**“MODELACIÓN DE CAVERNAS KÁRSTICAS AL SUR DE LA RUTA DE LOS
CENOTES, MUNICIPIO DE PUERTO MORELOS; QUINTANA ROO”**

NOMBRE DEL SUSTENTANTE:

LUCÍA GUADALUPE VALENZUELA GASTÉLUM

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuado, como requerimiento parcial para obtener el Título de Licenciatura en la Universidad de Sonora.

GEOL. MARIANO MORALES MONTAÑO

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuado, como requerimiento parcial para obtener el Título de Licenciatura en la Universidad de Sonora.

M.C. JOSÉ ALFREDO OCHOA GRANILLO

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuado, como requerimiento parcial para obtener el Título de Licenciatura en la Universidad de Sonora.

M.C. JAVIER VALENCIA SAUCEDA

ATENTAMENTE
“EL SABER DE MIS HIJOS HARÁ MI GRANDEZA”

DRA. SILVIA MARTÍNEZ RETAMA
JEFA DEL DEPARTAMENTO

de mis hijos
nara mi grandeza
**DEPARTAMENTO
DE GEOLOGIA**

C.c.p. Archivo.

El presente trabajo fue realizado con información obtenida de proyectos en colaboración y se utilizó con previa autorización.

Se agradece al Ing. Mario Humberto Vargas Landeros por la disposición para la presentación de los datos recopilados durante diciembre de 2017 en proyectos de sustentabilidad de la superficie en determinadas áreas de Quintana Roo, así como por las facilidades y apoyo brindado durante la adquisición de datos en campo.

Se agradece al Dr. Mario Rebolledo Vieyra por todos los conocimientos transmitidos durante las estancias de investigación, por su apoyo y por su disposición durante la recolección de muestras llevado a cabo durante el mes de julio de 2017.

Se agradece al M.C. Carlos Valencia Saucedo por tomarse el tiempo de compartir sus conocimientos de geoestadística durante los últimos meses y por ser una parte importante de este proyecto.

Dedicatoria

A mi familia

Lupita, Demetrio, Narda y Demi

Por su cariño y apoyo durante todos estos años

Agradecimientos

A la Universidad de Sonora por abrirme sus puertas durante estos 5 años, en sus espacios quedan los mejores recuerdos, risas, lagrimas, enojos y enseñanzas.

Al Departamento de Geología por brindarme las herramientas necesarias para el futuro profesional, así como a todas aquellas personas que siempre estuvieron para dar el apoyo necesario.

A Javier Valencia Saucedá, mi sensei, por creer en mí aún en los momentos en los que yo no lo hago, por todos los conocimientos que te has tomado el tiempo de compartir y principalmente por cada una de las enseñanzas de vida; porque cuando sea grande y tenga 24 quiero ser como tú... menos enojona.

A Carlos Valencia Saucedá, mi papá Carlitos, por enseñarme otras formas de ver la geología, por impulsarme siempre a hacer todo con las herramientas que tenga disponibles y por los sabios consejos; porque eres un ejemplo a seguir... especialmente en la metodología.

A Alba Lucina Martínez Haros, por enseñarme a ver la vida de forma sencilla, por todos tus consejos y risas; por alimentarme... cuando no hay sol.

A mis tíos Leonardo Valenzuela, Juan Gastelum y Moisés Leyva por estar pendientes de mí y por ayudarme cada que lo necesité.

A Adán Reynaldo, por tu amistad y por estar siempre, aunque sea para inducir a los malos vicios; porque eres el mejor gordi amigo.

A Raúl Antonio por tu amistad y apoyo, por aguantar mi mal genio y escuchar cada uno de mis dramas queen... siempre bien acompañados.

A Rafael, Angélica, Rubén, Leydi, René, Fátima y Roberto, por todos los momentos de risas que me compartieron, aunque cada uno tome un camino diferente los recuerdos quedaran.

A Benjamín y Jesús Alfredo, porque, aunque pase el tiempo siempre siguen estando ahí... aunque sea para pedir asesorías de física.

A Consultoría Geológica GV por permitir desarrollarme a su lado, porque gracias a ustedes se realizó este proyecto: Javier, Carlos, Raúl, Mike y Xime, somos un equipo... A mi compañera jurídica Sylvia y a mis compañeros de proyectos Albita, Gabriel, Sofia, y Arturo... que suave!!!

A María Fernanda por compartirme tu pasión por el mar y el buceo, por compartirme tu hogar durante los veranos; porque la fortuna favorece a los valientes!

A mis amigos cancenenses Aly, Nidia, Pablo y Víctor, por estar dispuestos siempre a ayudar, por su amistad.

Al equipo de buzos que me acompañaron y cuidaron siempre: Pepe, Toño, Rosy y Sergio.

A cada uno de mis familiares, amigos y compañeros que estuvieron presentes durante este tiempo, a todas las personas que de alguna forma se cruzaron en mi camino...

Gracias totales!

Índice

Resumen	1
1. Introducción	2
1.1. Antecedentes.....	3
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivos específicos.....	4
1.3. Ubicación y vías de acceso	4
2. Fisiografía	6
2.1. Localización y límites de la Península de Yucatán.....	6
2.2. Subregiones fisiográficas.....	6
3. Karst	12
4. Geología regional.....	16
4.1. Paleogeografía	16
4.2. Estratigrafía	17
4.2.1. Precámbrico - Paleozoico.....	17
4.2.2. Mesozoico	18
4.2.3. Cenozoico	19
4.3. Geología Estructural	20
5. Geología local	23
5.1. Geología superficial	23
5.2. Geología del subsuelo	24
6. Geofísica.....	27
6.1. Tomografía eléctrica resistiva	28
6.1.1. Ley de Ohm y resistividad	29
6.1.2. Resistividad aparente	30

6.1.3.	Arreglos de electrodos.....	34
6.1.4.	Resistividad de las rocas.....	38
6.2.	Mediciones de resistividad.....	39
6.2.1.	Equipo utilizado.....	40
6.2.2.	Adquisición de datos.....	42
6.2.3.	Inversión de datos.....	43
6.3.	Interpretación de datos.....	44
6.3.1.	Sección 1.....	46
6.3.2.	Sección 2.....	48
6.3.3.	Sección 3.....	50
7.	Geoestadística.....	52
7.1.	Conceptos básicos.....	53
7.2.	Simulación geoestadística.....	54
7.2.1.	Simulación secuencial de indicadores.....	55
7.3.	Análisis de datos.....	56
7.3.1.	Análisis estadístico.....	59
7.3.2.	Análisis variográfico.....	60
7.4.	Simulación de cavernas kársticas.....	60
7.4.1.	Simulación 1.....	61
7.4.2.	Simulación 2.....	63
7.4.3.	Simulación 3.....	65
8.	Resultados.....	67
9.	Conclusión y recomendaciones.....	70
	Anexo I.....	71
	Bibliografía.....	73

Planos

Plano 1. Localización del área de estudio.	5
Plano 2. Localización y límites de la Península de Yucatán.	7
Plano 3. Subprovincias fisiográficas de la Península de Yucatán.	11
Plano 4. Regiones kársticas a nivel mundial.	13
Plano 5. Geología de la Península de Yucatán.	22
Plano 6. Geología local del área de estudio	26
Plano 7. Ubicación de las Tomografías de Resistividad Eléctrica.	45
Plano 8. Puntos de vulnerabilidad en el subsuelo.	69

Tablas

Tabla 1. Factor geométrico de los arreglos electródicos más comunes.	35
Tabla 2. Resistividad de los diferentes materiales del subsuelo	38
Tabla 3. Resistividad de los materiales en la Península de Yucatán.	39
Tabla 4 Características de las secciones adquiridas.	44
Tabla 5. Codificación de unidades geoeléctricas.	56
Tabla 6. Características espaciales de los datos.	58
Tabla 7. Porcentaje y número de datos adquiridos.	59
Tabla 8. Caracterización de las Unidades Geoeléctricas	67
Tabla 9. Puntos de vulnerabilidad en el subsuelo.	68

Fotografías

Fotografía 1. Afloramientos del área de estudio	23
Fotografía 2. Muestras recolectadas Cenote Maravilla.	24
Fotografía 3. Muestras recolectadas Cenote Holbox.	25
Fotografía 4. Equipo utilizado.	40
Fotografía 5. Trabajo realizado en campo.	41
Fotografía 6. Adquisición de datos.	42
Fotografía 7. Curso de buceo en aguas abiertas.	71
Fotografía 8. Sitios de muestreo	72

Figuras

Figura 1. Elementos de un acuífero kárstico no confinado	15
Figura 2. Paleogeografía de la Península de Yucatán	17
Figura 3. Circuito eléctrico conformado por una batería y un resistor	29
Figura 4. Líneas de corriente y superficies equipotenciales	31
Figura 5. Medición de potencial en un punto M	32
Figura 6. Arreglo tetraédrico.....	33
Figura 7. Arreglo Wenner.....	36
Figura 8. Arreglo Dipolo-dipolo.....	37
Figura 9. Arreglo Schlumberger	37
Figura 10. Pseudosección obtenida con el arreglo de electrodos Wenner	43
Figura 11 Datos de resistividad obtenidos de la Sección General 1	47
Figura 12 Unidades geoelectricas obtenidas para la Seccion General 1	47
Figura 13 Datos de resistividad obtenidos de la Sección General 2	49
Figura 14 Unidades geoelectricas obtenidas para la Seccion General 2.....	49
Figura 16 Datos de resistividad obtenidos de la Sección General 3	51
Figura 15 Unidades geoelectricas obtenidas para la Seccion General 3.....	51
Figura 17. Ubicación 3D de las secciones de resistividad eléctrica	57
Figura 18. Vista en planta de las secciones de resistividad eléctrica.....	58
Figura 19. Grid del área de estudio	59
Figura 20. Histograma de los datos adquiridos de resistividad eléctrica.....	60
Figura 21. Vista en planta de simulación a 10 metros	61
Figura 22. Simulación de cavernas kársticas a 10 metros.....	62
Figura 23. Vista en planta de simulación a 25 metros	63
Figura 24. Simulación de cavernas kársticas a 25 metros.....	64
Figura 25. Vista en planta de simulación a 50 metros	65
Figura 26. Simulación de cavernas kársticas a 50 metros.....	66

Resumen

La Península de Yucatán ha desarrollado un extensivo sistema kárstico, esto como consecuencia de la gran acumulación de sedimentos calcáreos que ha tenido lugar desde el Cretácico. Dicho sistema en conjunto con los cambios del nivel mar han generado el desarrollo de un acuífero kárstico y junto con ello los sistemas de cavernas inundadas más grandes del planeta.

Desde el punto de vista ambiental e ingenieril, los ambientes kársticos son difíciles de explorar e interpretar debido al poco acceso que se tiene, además de que su complejidad impide predecir el desarrollo de los mismos.

El objetivo de este estudio es la aplicación métodos geofísicos y geoestadísticos para la modelación de cavernas kársticas al sur de la Ruta de los Cenotes en Puerto Morelos, Quintana Roo ajustadas a un modelo geológico conceptual previamente establecido.

Para el desarrollo del trabajo se utilizaron las Tomografías de Resistividad Eléctrica (TER's), las cuales emplean una fuente artificial de corriente y miden la diferencia de potencial eléctrico con lo cual se puede determinar la resistividad aparente del subsuelo. A partir del procesado de los datos se obtienen imágenes de resistividad del subsuelo y asumiendo que los materiales tienen valores de resistividad establecidos se puede hacer una interpretación geológica del mismo.

Por su parte la geoestadística hace referencia a la utilización de herramientas estadísticas y probabilísticas, tomando en cuenta las relaciones entre las observaciones disponibles considerando que están ubicadas en el espacio. Se utilizó la Simulación Secuencial de Indicadores (SISIM) la cual genera un modelo probabilístico de variables categóricas.

A partir de las técnicas geofísicas se determinaron tres unidades geoeléctricas para la zona de estudio y a partir de dicha interpretación se obtuvieron las modelaciones en 3D de las cavernas kársticas.

Con base al estudio se determinaron las zonas de mayor vulnerabilidad en el subsuelo con la finalidad de realizar posteriores análisis, esto para prevenir posibles incidentes de subsidencia de la superficie o colapsos.

1. Introducción

La Península de Yucatán corresponde a la parte emergida de una gran plataforma carbonatada y superficialmente cubre aproximadamente un área de 165,000 km², comprendiendo los estados de Yucatán, Campeche y Quintana Roo, así como algunas partes de Belice y Guatemala. Sus características geológicas y tectónicas le han permitido desarrollar uno de los sistemas kársticos más grandes y espectaculares, además de albergar el sistema de cuevas inundadas más largo del mundo (Gondwe *et al.*, 2010; Bauer *et al.*, 2011).

En el estado de Quintana Roo se ha desarrollado un complejo acuífero kárstico, dentro del cual los cenotes funcionan como portales hacia el sistema de cuevas siendo los más comunes en el estado aquellos que se forman por colapso.

Desde el punto de vista ambiental e ingenieril, los ambientes kársticos son uno de los sistemas más difíciles de explorar e interpretar debido a que es difícil llegar a acceder a estos sitios, además de que su complejidad impide predecir su desarrollo. Es por ello que se deben emplear métodos alternativos para su estudio, como lo son los geofísicos y geoestadísticos.

Las Tomografías Eléctricas Resistivas (TER's) permiten identificar los materiales y estructuras presentes con base a los cambios de resistividad de éstos, lo que permite tener una caracterización general del subsuelo. El objetivo de este trabajo es obtener datos de resistividad en seis secciones dentro del área de estudio y a partir de éstos determinar las unidades geoeléctricas del subsuelo.

Con los datos de resistividad que se obtengan y la técnica geoestadística de Simulación Secuencial de Indicadores (SISIM) se puede generar un modelo probabilístico con variables categóricas, el cual consiste en interpretar la distribución real a partir de una función aleatoria, todo esto con la finalidad de obtener un modelo tridimensional de las cavernas kársticas que se identifican por medio de las variaciones de resistividad en las secciones adquiridas, además de determinar los puntos de mayor vulnerabilidad dentro del área de estudio.

1.1. Antecedentes

Existen pocos trabajos realizados en el área de estudio, regionalmente la mayor parte de los estudios han sido realizados por Petróleos Mexicanos en su búsqueda de hidrocarburos durante la década de los 70's y por un programa de barrenación de la UNAM el cual se centra en el área de impacto del Cráter del Chicxulub.

Algunos de los estudios a los que se hace referencia en el presente trabajo se mencionan a continuación:

- López-Ramos en 1975, realizó una compilación de la información geológica obtenida de la perforación de pozos de PEMEX para establecer la columna geológica referente a la Plataforma de Yucatán.
- Lugo-Hubp en 1992, presentó un estudio de geomorfología regional en la Plataforma de Yucatán.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM) en el 2006, estableció los rasgos geológicos y estructurales más importantes en las cartas a 1:250,000 Cozumel F16-11 y 1:500,000 Campeche, Quintana Roo y Yucatán.
- Ravelo en el 2006, realizó una tesis de licenciatura en la cual aplicó métodos geofísicos para el estudio del acuífero de Puerto Morelos.
- Márquez en el 2008, realizó una tesis de licenciatura aplicando métodos geoeléctricos en la caleta de Xel Ha con la finalidad de identificar conductos que transportan agua desde el interior de la Península.
- Supper en el 2009, realizó un estudio geofísico en la Reserva de la Biósfera de Sian Ka'an.
- Bauer en el 2011, elaboró una revisión sobre el acuífero kárstico de la Península de Yucatán en México.
- Kambesis y Coke en el 2013, realizaron una recopilación general sobre el desarrollo del karst en Quintana Roo, México.
- Ochoa en el 2016, realizó una tesis de maestría aplicando métodos eléctricos en las cercanías del cenote Chac-Mool, Quintana Roo.
- Gastelú en el 2018, realizó una tesis de maestría en la cual utilizó los métodos geofísicos para determinar el espesor del acuífero en la parte Norte de Quintana Roo.

Actualmente sigue siendo poco conocido los procesos principales bajo los que se formó la Plataforma de Yucatán, así como el funcionamiento de sistema kárstico que se desarrolló.

1.2. Objetivo

Aplicar métodos geofísicos y geoestadísticos para la modelación de cavernas kársticas al sur de la Ruta de los Cenotes en Puerto Morelos, Quintana Roo.

1.2.1. Objetivos específicos

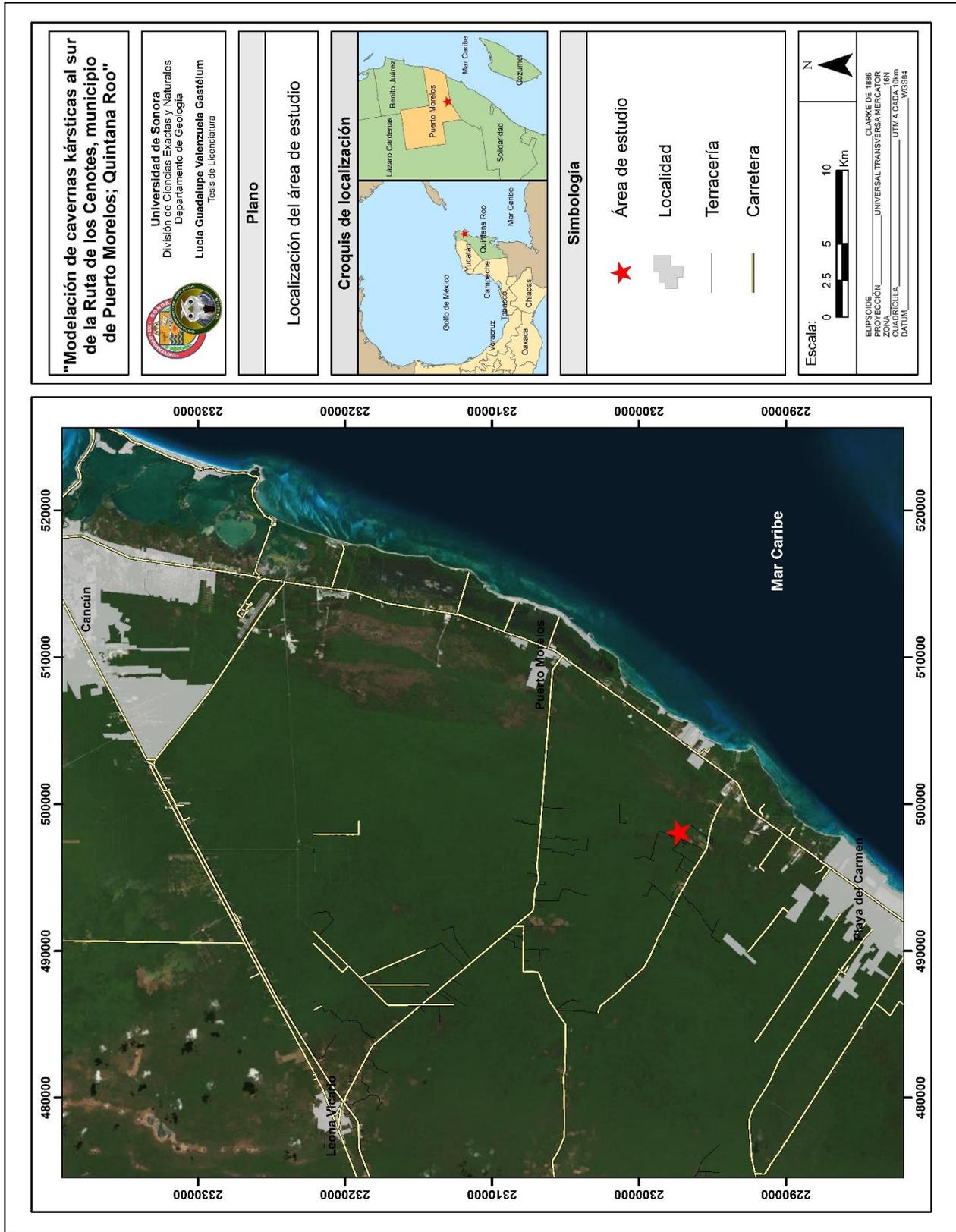
- Determinar un modelo geológico para el área de estudio.
- Ubicar las zonas ideales para realizar las secciones geofísicas.
- Adquirir datos geofísicos mediante tomografías de resistividad eléctrica.
- Realizar el proceso de inversión de los datos adquiridos para su interpretación.
- Determinar las unidades geoelectricas de la zona de estudio.
- Aplicar la técnica de Simulación Secuencial de Indicadores a los datos obtenidos.
- Realizar modelación en 3D de las cavernas kársticas.
- Determinar las zonas de mayor vulnerabilidad del subsuelo.

1.3. Ubicación y vías de acceso

El área de estudio se encuentra al norte del estado de Quintana Roo en el límite de los municipios de Puerto Morelos y Solidaridad, dentro de la carta topográfica de INEGI escala 1:50,000 Leona Vicario F16C59.

El área se sitúa al sur de la Ruta de los Cenotes, en las coordenadas Este 498,046.31 m y Norte 2,297,337.74 m en el sistema WGS84 16N (Plano 1).

La vía de acceso al área de estudio partiendo de la ciudad de Cancún es tomar la carretera Federal 302 con dirección a Playa del Carmen, en el kilómetro 50 se toma hacia el oeste una terracería por 5 km, en este punto se toma otra terracería hacia el norte por 2 km.



Plano 1. Localización del área de estudio

2. Fisiografía

2.1. Localización y límites de la Península de Yucatán

La Península de Yucatán se encuentra ubicada entre los paralelos 16°-22° norte y los meridianos 86°-91° oeste y comprende los estados de Yucatán, Quintana Roo y Campeche (Plano 2), así como la parte norte de Guatemala y Belice (López-Ramos, 1975).

En la parte norte y noreste, el talud continental del Banco de Campeche forma una frontera natural de la región. Al este también se tiene un talud continental delimitando el área, el cual desciende hacia el Mar del Caribe. El límite en la parte sur está dado por el Arco de la Libertad y en la porción oeste está delimitada por las planicies costeras del Golfo de México en el suroeste de Campeche y la porción este de Tabasco.

2.2. Subregiones fisiográficas

La Península de Yucatán consiste desde el punto de vista geológico, en una plataforma con potentes estratos, principalmente de rocas carbonatadas, reconocidas en superficie claramente como una secuencia que va desde el Paleógeno hasta el Cuaternario (Lugo-Hubp *et al.*, 1992).

La plataforma de Yucatán es una de las estructuras geológicas y geomorfológicas más jóvenes del territorio mexicano. Esta provincia fisiográfica carece de contrastes topográficos, así como de una red fluvial, siendo el escurrimiento mayormente subterráneo y por lo tanto ha dado origen a un gran sistema kárstico.

El desarrollo del karst resulta importante desde el punto de vista paleoclimático, pues tiene una estrecha relación con la actividad climática, como glaciaciones y con la actividad tectónica del periodo Cuaternario (neotectónica).

Esta extensa plataforma carbonatada puede ser dividida en distintas regiones fisiográficas, cada una exhibiendo topografías características de zonas kársticas; estando estas muy relacionadas a las variaciones regionales en litología, estructura y profundidad del nivel freático (Plano 3).

"Modelación de cavernas kársticas al sur de la Ruta de los Cenotes, municipio de Puerto Morelos; Quintana Roo"

Universidad de Sonora
División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología
Lucía Guadalupe Valenzuela Gastélum
Tesis de Licenciatura



Plano

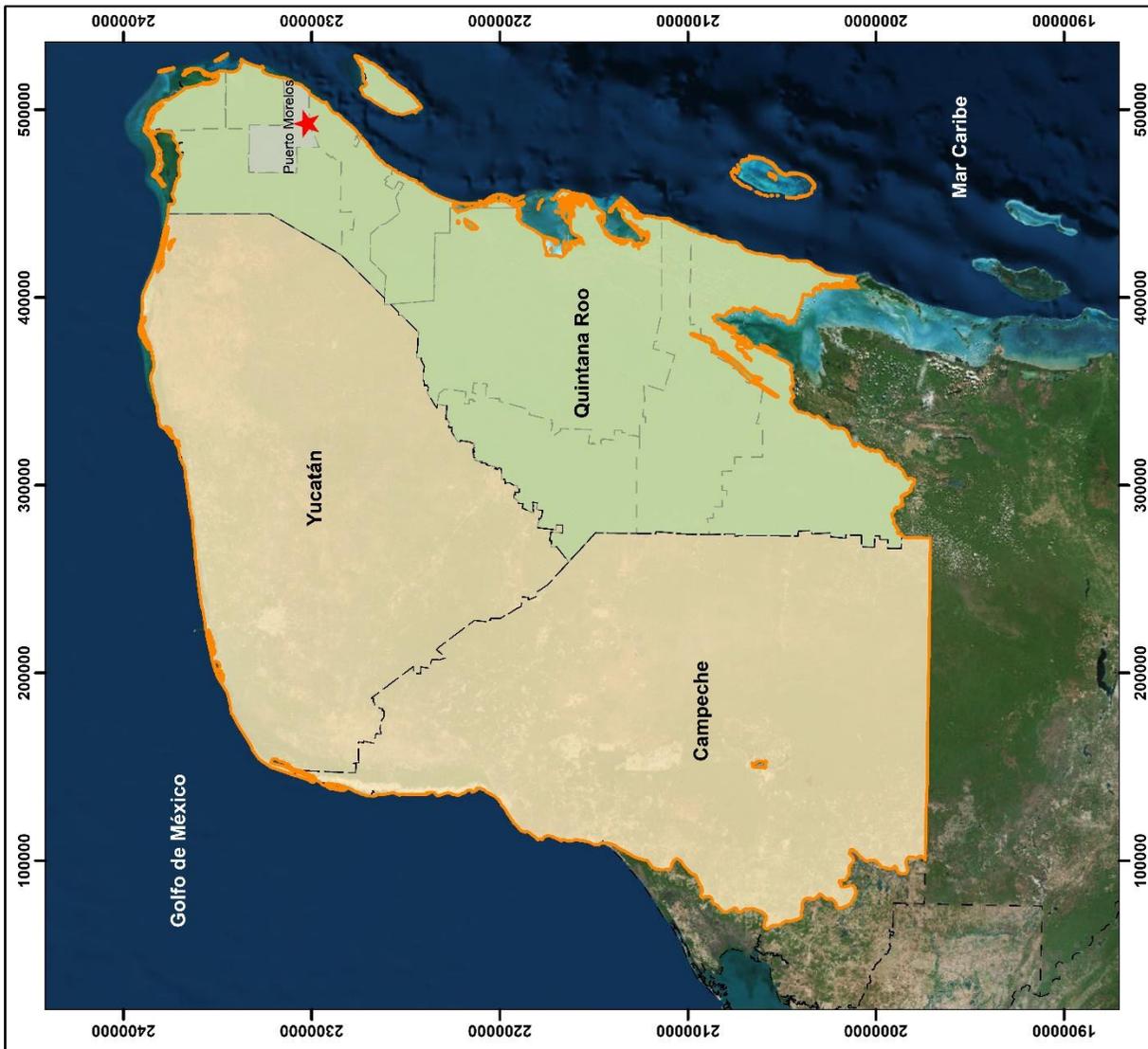
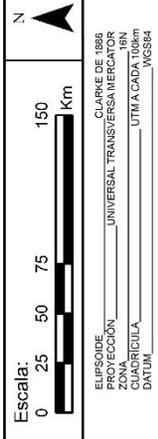
Localización y límites de la Península de Yucatán

Croquis de localización



Simbología

- ★ Área de estudio
- Península de Yucatán
- Quintana Roo
- Puerto Morelos
- Límite Península de Yucatán
- Límite estatal
- Límite municipal



Plano 2 Localización y límites de la Península de Yucatán (INEGI, 2001)

Planicie kárstica del Norte

La parte norte de la península de Yucatán es una planicie costera caracterizada por un relieve de pendiente muy baja la cual se extiende una distancia de 150 km, elevándose desde la Sierrita de Ticul hasta el Golfo de México (López-Ramos, 1975).

Su característica principal es una densa red de cenotes los cuales proveen un drenaje subsuperficial muy eficiente como resultado de la ausencia completa de corrientes superficiales (Marshall, 2007). En esta porción de la Península se tiene un extenso sistema de cavernas interconectadas (cerca de 130 km de longitud), las cuales se formaron debido a la agresiva disolución de las rocas durante una regresión del nivel del mar a finales del Pleistoceno.

En la parte noroeste de la planicie de Yucatán se extiende una prominente alineación semicircular de cenotes de aproximadamente 180 km de diámetro. Este rasgo, conocido como el Anillo de Cenotes, representa una banda concéntrica de alta permeabilidad que sobreyace a la estructura de impacto del Chicxulub (Marshall, 2007).

Sierrita de Ticul

La Sierrita de Ticul consiste en dos crestas con una elevación de entre 50 y 100 metros separadas por un valle con un rumbo preferencial NW-SE y una extensión de 110 km. Este relieve es resultado de un fallamiento normal el cual ha sido probablemente esporádico desde el Cretácico Tardío (López-Ramos, 1975; Weidie, 1985).

Las formas kársticas se limitan a una gran cantidad de cavernas, que van desde tiros verticales pequeños con estrechas galerías hasta grandes salones freáticos, con más de 50 metros de diámetro y 20 de altura, conectados entre sí por reducidas galerías (Lugo-Hubp *et al.* 1992).

Planicie kárstica del sur

Las planicies kársticas del sur cubren la mayor parte del estado de Campeche al sur del escarpe de Ticul. Este extenso altiplano está caracterizado por un terreno

kárstico irregular dentro del cual algunas de las depresiones albergan corrientes superficiales efímeras y contienen sedimentos aluviales. Estas cuencas se inundan durante la temporada de lluvias, pues en esta región el drenaje del karst es muy ineficiente (Marshall, 2007).

En esta región se tienen una serie de colinas redondeadas con elevaciones de entre 100 y 300 metros con valles de hasta 5 km de ancho. En la zona de mayor amplitud son comunes los cauces de arroyos temporales con extremos ciegos en sumideros profundos, en los cuales el nivel freático se encuentra a una profundidad de hasta 100 metros (Lugo-Hubp *et al.*, 1992).

Karst del Peten y tierras bajas

La región del Peten de Guatemala y algunas porciones adyacentes del noroeste de Belice corresponde a terrenos kársticos más heterogéneos y accidentados formados a partir de secuencias carbonatadas más antiguas al Cretácico - Paleógeno. La diversidad de geoformas kársticas en esta región es controlada por las variaciones locales en la litología y estructura de la roca carbonada.

La meseta kárstica (450 m de elevación) situada al noreste del Petén exhibe un paisaje montañoso con un relieve local con varios cientos de metros. El drenaje está pobremente desarrollado y existe una gran cantidad de dolinas que alimentan una intensa red de cavernas (Marshall, 2007).

En la parte este del Petén se tiene una abrupta topografía marcada por escarpes controlados por las fallas normales presentes en la región. Mientras que la porción oeste es una vasta planicie aluvial cubierta por humedales y lagos.

Planicie costera del este

Las partes bajas de las líneas de costa de la Plataforma de Yucatán están caracterizadas por amplias lagunas, manglares y humedales estacionalmente inundadas. En la costa este de la Península se tienen lagunas costeras y planicies controladas por una serie de fallas N-NE las cuales permiten tener una serie de estructuras similares a las sierras y valles, todo esto como resultado de la deformación a lo largo del límite transformante de la Placa del Caribe (Isphording, 1975; Weidie, 1985).

Las descargas de agua a lo largo de la costa este de la Península de Yucatán se concentra a lo largo de las fallas N-NE anteriormente mencionadas, así mismo esta condición estructural permite tener una alineación a los cenotes y lagunas. La mezcla del agua subterránea y el agua salada en la costa da como resultado una gran disolución kárstica, produciendo una red de fracturas y cavernas por disolución que se extiende hacia el interior de la península (Marshall, 2007).

"Modelación de cavernas kársticas al sur de la Ruta de los Cenotes, municipio de Puerto Morelos; Quintana Roo"

Universidad de Sonora
División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología
Lucía Guadalupe Valenzuela Gastélum
Tesis de Licenciatura



Plano

Subprovincias fisiográficas de la Península de Yucatán

Croquis de localización



Simbología

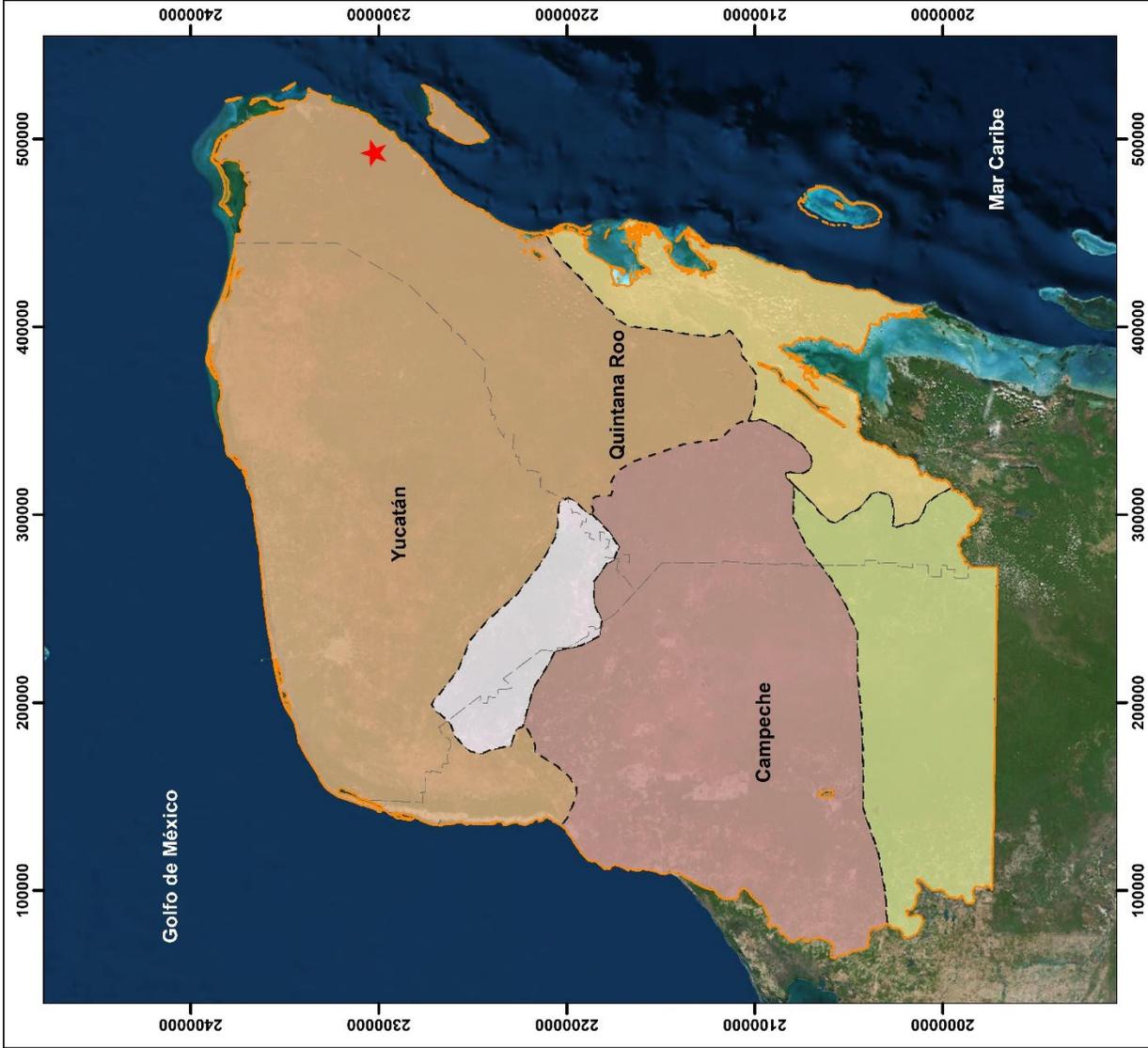
Subprovincias Fisiográficas

- Karst del Petén y tierras bajas
- Planicie costera del este
- Planicie kárstica del norte
- Planicie kárstica del sur
- Sierrita de Ticul

- Límite Península de Yucatán
- Límite estatal
- Área de estudio



ELIPSOIDE: CLARKE DE 1886
PROYECCION: UNIVERSAL TRANSVERSA MERCATOR
QUADRICULA: UTM A CADA 1000m
DATUM: WGS84



Plano 3. Subprovincias fisiográficas de la Península de Yucatán (CONABIO, 2012; Marshall, 2007)

3. Karst

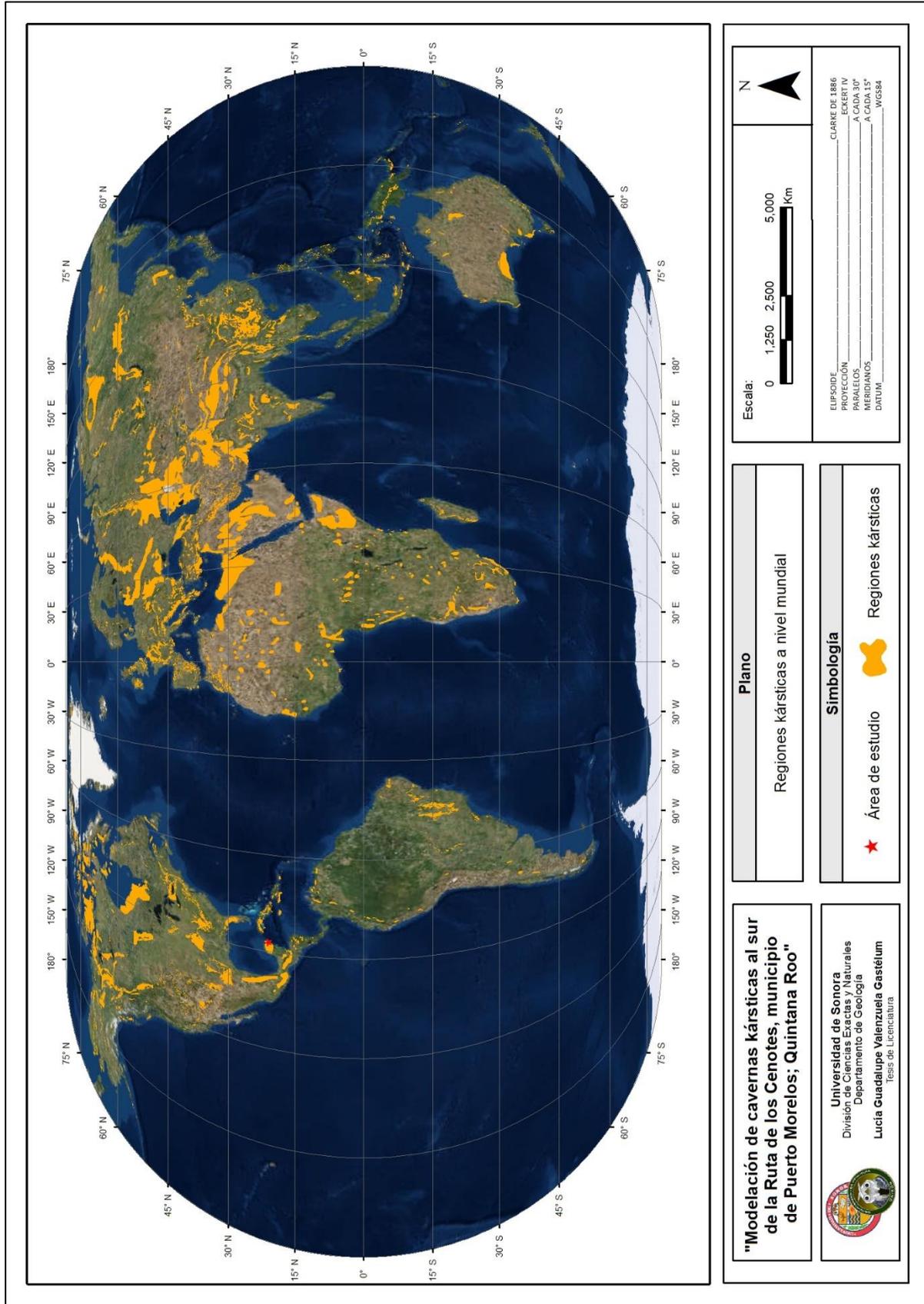
El término karst es utilizado para describir un especial estilo del terreno, el cual incluye cavernas y extensivos sistemas de agua subterránea los cuales se desarrollan en rocas solubles como lo son las calizas, dolomías y evaporitas. Según Ford y Williams (2007) el 20 % de las rocas de la superficie y subsuelo sin cobertura de hielo en el planeta son potencialmente kársticas, sin embargo, solo entre el 10 y 15 % ha desarrollado un sistema kárstico (Plano 4).

En la Península de Yucatán se han desarrollado una gran cantidad de formas kársticas como los son dolinas y elaboradas redes de cavernas, siendo las dolinas la principal característica y son conocidas regionalmente como cenotes (Marshall, 2007; Lugo-Hupp *et al.*, 1992). La palabra cenote proviene del vocablo maya d'zenot, que significa “caverna con depósito de agua” e incluye cualquier manifestación kárstica que alcance el nivel freático (Beddows, 2007).

Las calizas son las principales rocas de los sistemas kársticos. La naturaleza y el ambiente de depositación determinan la mayoría de las características de éstas como lo son la pureza, textura, espesor de las capas, entre otras.

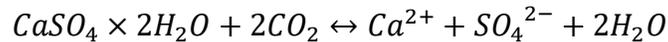
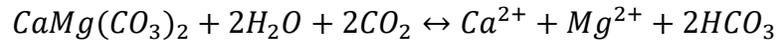
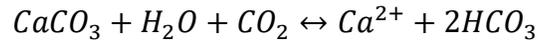
Existen dos formas de karstificación: mecánica y química. La mecánica usualmente inicia con los flujos superficiales y necesita de las fisuras y fracturas o las capas de sedimentación para continuar el proceso en el interior de la roca. Este tipo de karstificación causa la expansión incluso de las microfracturas y en la escala del tiempo geológico llega a formar redes de cavernas, sin embargo, este proceso siempre sucede a la par de los procesos químicos (Stevanovic, 2015).

La karstificación química es el proceso de disolución de la roca, los minerales carbonatados son uno de los más reactivos en la superficie terrestre. La concentración de dióxido de carbono incrementa la solubilidad. El CO₂ está presente en el aire, en el suelo (por actividad biológica) y en las profundidades (asciende en fluidos junto con otros gases a través de fallas activas) y junto con el clima llevan a cabo el proceso de karstificación (Bakalowicz, 2005; Stevanovic, 2015).



Plano 4. Regiones kársticas a nivel mundial (University of Auckland, 2013)

La disolución de la calcita, la dolomita y el yeso se expresa en las siguientes ecuaciones:



El proceso de karstificación es muy rápido con respecto al tiempo geológico. Bakalowicz (2005) afirma que, en pocos miles de años, generalmente menos de 50,000 se requieren para desarrollar un sistema kárstico.

Los sistemas kársticos son comúnmente relacionados a la formación de acuíferos kársticos, y pueden tener los siguientes elementos dentro de su estructura (Figura 1):

- Exokarst: es la parte superficial del karst, sus características permiten la recarga del acuífero mientras que algunas otras lo impiden. Incluye al suelo, mayoritariamente escaso y a las dolinas, las cuales permiten la colección de agua.
- Epikarst: su función principal es la recarga y descarga del acuífero. Usualmente esta zona tiene entre 3 y 10 metros de profundidad, es la parte más somera de la zona vadosa y puede estar parcialmente saturada.
- Zona vadosa: es la zona de transición del acuífero kárstico. La circulación del agua en esta zona es mayormente vertical.
- Zona saturada: representa la capa principal del acuífero y su espesor depende de varios factores como recarga, permeabilidad, almacenamiento, posición de los puntos de descarga, entre otros. El agua fluye a través de los sistemas interconectados de fracturas, fisuras y cavidades de distintos tamaños.
- Base del karst: se refiere al fondo del acuífero, se pueden tener algunas formas kársticas como cavernas sin embargo ya no se encuentra interconectadas.

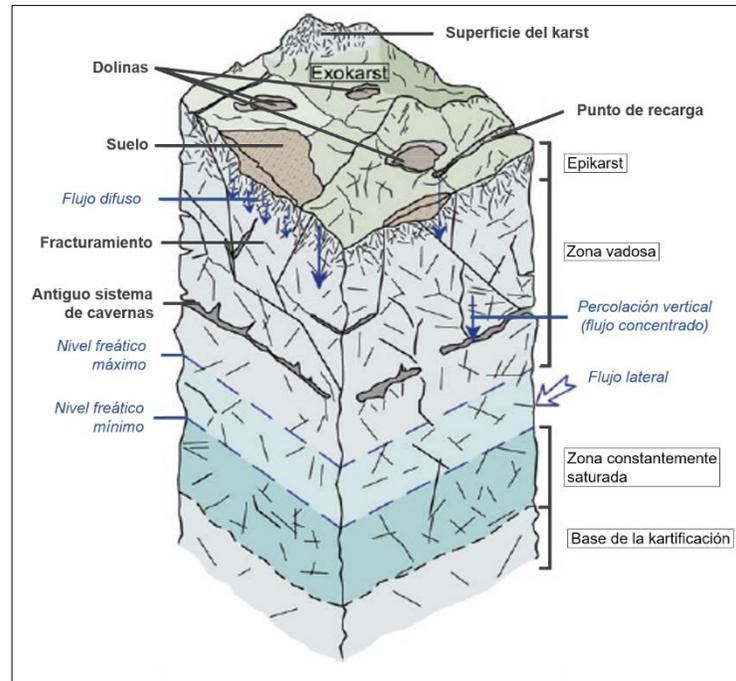


Figura 1. Elementos de un acuífero kárstico no confinado (Stevanovic, 2015)

En el caso de la Península de Yucatán, la plataforma se ha mantenido inactiva desde el Pleistoceno tardío (Weidie, 1985) por lo que las grandes variaciones del nivel del mar han sido atribuidas a las glaciaciones. El desarrollo del karst en esta zona ha sido en dos etapas: una antigua, que corresponde al Paleógeno la cual se desarrolló en una superficie elevada con formas propias de clima tropical, mientras que la segunda etapa corresponde a una planicie con elevaciones entre 25 y 30 metros sobre el nivel del mar y las formas kársticas fueron originadas por un ascenso gradual de las aguas subterráneas de entre 20 y 100 metros.

Según Neuman y Rahbek (2007) se pueden reconocer dos tipos de cenotes; cenotes tipo fosa y cenotes por colapso. Siendo los primeros los más comunes en la mayoría de las áreas de la península, especialmente en el área del Anillo de Cenotes, sin embargo, en el área de Quintana Roo se tiene una gran cantidad de cenotes por colapso, los cuales son formados por el derrumbe mecánico del techo de sistemas de cuevas someras inundadas al perder el soporte por la disminución del nivel de agua (Beddows 2007).

4. Geología regional

4.1. Paleogeografía

La geología del Precámbrico y el Paleozoico es poco conocida, gran parte de la península tenía un carácter de cratón (Figura 2-A) y se mantuvo emergida hasta el Triásico - Jurásico, dejando como evidencia la secuencia de Lechos Rojos (Figura 2-B y C).

Durante el Cretácico Inferior se desarrolla un mar en el sur de la península dejando como evidencia el régimen evap

orítico que caracteriza al Cretácico Medio y Superior (Figura 2-D).

En el Cretácico Superior y parte del Terciario, en la porción norte de la península se depositaron calizas margosas, las cuales pueden sugerir una profundización de los mares en esta dirección o la presencia de alguna fuente terrígena relativamente cercana de materiales arcillosos.

Durante el Cenozoico la plataforma se mantiene sumergida a poca profundidad presentando pequeñas transgresiones y regresiones, dejando predominantemente secuencias de calizas. Los sedimentos marinos del Oligoceno desaparecieron probablemente por la erosión debajo de la Formación Carrillo-Puerto (Plioceno-Mioceno) la cual sobreyace discordantemente las rocas del Eoceno y Oligoceno en grandes áreas de la península (Figura 2-E).

La forma actual de la Península se tuvo a finales del Plioceno (Figura 2-F) y continuó durante el Cuaternario a pesar de que aún se están desarrollando grandes arrecifes al norte del Banco de Campeche. La sedimentación en esta región es principalmente calcárea debido a que la falta de drenaje superficial en la Península limita la entrada de material terrígeno (López-Ramos, 1975).

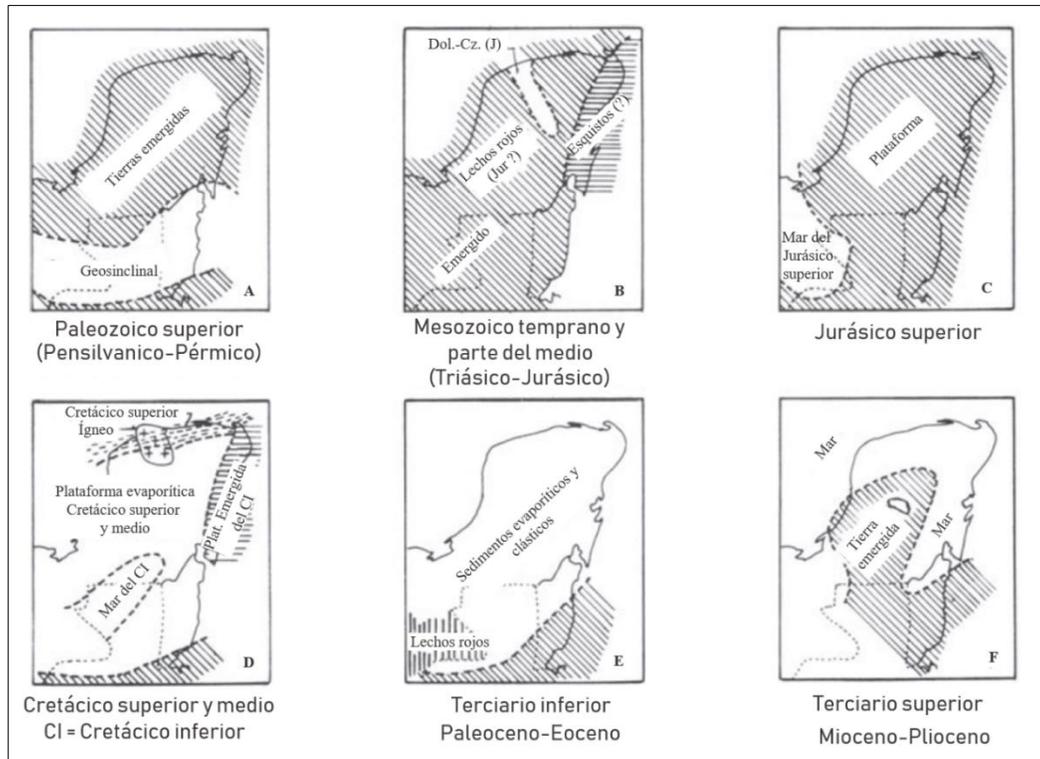


Figura 2. Paleogeografía de la Península de Yucatán en diferentes intervalos desde el Paleozoico hasta el Terciario (López-Ramos, 1975)

4.2. Estratigrafía

Los estudios estratigráficos en la Península de Yucatán son pocos debido a la escasez de afloramientos en superficie que permitan observar las sucesiones estratigráficas. La mayoría de los estudios geológicos utilizados para este trabajo provienen de datos observados en las perforaciones realizadas por PEMEX y la UNAM.

Las secuencias de rocas del subsuelo de la plataforma en su mayoría no se encuentran deformadas, en general los estratos mantienen una tendencia horizontal. A continuación, se describen las unidades litológicas presentes en la Península de Yucatán de las más antiguas a las más recientes.

4.2.1. Precámbrico - Paleozoico

No se han reportado rocas Precámbricas en la Plataforma de Yucatán, solo muy pocas perforaciones han llegado a lo que es el basamento, usualmente sedimentos o metasedimentos del Paleozoico (Weidie, 1985). La información sobre este es

realmente pobre, la información que se ha logrado recabar indica varias litologías, así como distintas edades para diferentes lugares. Según López-Ramos (1975) en las perforaciones se han observado esquistos, granitos, cuarcitas y rocas volcánicas, sin embargo, no es posible generar un mapa de la distribución general de las mismas.

En la parte norte de la península, PEMEX recuperó muestras de riolitas a 3,200 metros de profundidad, la cual se encuentra en forma de esquistos de cuarzo y cloritas. Hacia el noreste de la península (pozo Yucatán-4), se encontró el basamento a más profundidad, siendo este una metacuarcita color gris-café con alto grado de intemperismo, lo que indica un tiempo de exposición antes de ser sepultada bajo los sedimentos correspondientes a los lechos rojos. En la parte sur de la península, se han recuperado muestras correspondientes a esquistos y granitos a profundidades mayores a los 2,000 metros.

4.2.2. Mesozoico

En la base del Mesozoico se tiene una secuencia de lechos rojos, de la cual no existe una evidencia directa de la edad, sin embargo, aparecen entre el basamento Paleozoico y las rocas del Cretácico. López-Ramos (1975) las considera de edad Triásico - Jurásico. En la porción norte de la península de Yucatán, esta secuencia se encuentra sobreyacida por evaporitas del Cretácico y es suprayacida por las rocas del basamento. Las secuencias de lechos rojos están conformadas por conglomerados, areniscas y lutitas principalmente y ocasionalmente se les asocian facies de anhidritas y dolomías, el rango de colores de las muestras varía desde el blanco hasta el café rojizo. Esta facie es de interés debido a que sugiere una pequeña transgresión durante el Triásico - Jurásico (López-Ramos, 1975; Weidie, 1985).

El Cretácico fue el inicio de una depositación extensiva de carbonatos y evaporitas que ha continuado hasta la actualidad. La secuencia correspondiente al Cretácico Inferior consiste en anhidrita, bentonita, tufa pelítica y calizas. Debido a los cambios litológicos se subdivide la secuencia, en la parte inferior contiene importantes secuencias de calizas y piroclastos, mientras que la parte superior contiene predominantemente anhidrita de color blanco crema con tonos café claro

con algunas intercalaciones de las capas de bentonita (López-Ramos, 1975). El Cretácico Superior consiste en calizas con intercalaciones de anhidrita (Evaporitas de Yucatán) y la presencia de calizas dolomitizadas con horizontes de lutita y limolita.

Cerca de la ciudad de Mérida tienen registros de flujos de andesita a una profundidad mayor a los 1,000 metros, los cuales cubren una gran cantidad de área y probablemente corresponden a flujos andesíticos del Cretácico (López-Ramos, 1975).

A finales del Cretácico se tuvo el impacto de un meteorito, dejando en la parte noroeste de la península el Cráter del Chicxulub y originando una secuencia de brecha. Esta fue separada en dos unidades, una secuencia superior rica en clastos del basamento, vidrios del impacto y fragmentos fundidos y una secuencia inferior rica en calizas, dolomías y clastos de evaporitas. El contacto de los carbonatos del Terciario con las brechas de impacto marca el límite K/T (Rebolledo, 2000).

4.2.3. Cenozoico

Las secuencias correspondientes al Paleógeno y Neógeno según López-Ramos (1975), fueron descritas en base a los núcleos recuperados del pozo Chicxulub-1, además de la carta Geológico-Minera de los estados de Campeche, Yucatán y Quintana Roo (SGM, 2007).

Es importante destacar que las secuencias correspondientes al Cenozoico son las que se pueden encontrar aflorando en la Península de Yucatán (Plano 5).

El Paleoceno corresponde a la Formación Icaiché, la cual es constituida por sedimentos en gran parte de color claro y calizas de grano fino intercaladas con yeso y ocasionalmente con lutitas grises (TpaCz-Y), sus límites con el Eoceno y el Cretácico están muy bien definidos. Cubriendo concordantemente se tiene a la Formación Chichén-Itzá, la cual corresponde a la secuencia del Eoceno y se conforma por calizas de color blanco a gris claro intercaladas con margas plásticas y calizas de color gris oscuro (TeCz-Mg), se tiene una gran abundancia fósil lo que permite delimitar el Eoceno Inferior, Medio y Superior.

En el Oligoceno la secuencia está conformada por calizas de color blanco, gris y crema con intercalaciones de arcilla en los mismos colores (ToCz-Co), esta

secuencia se encuentra distribuida en una porción muy restringida en la parte centro norte de la península.

En el Mioceno se tiene a las Formación Estero Franco, la cual se conforma por calizas y dolomías (TmCz-Do) que cambian de facies lateralmente a las calizas (TmCz) de la Formación Bacalar. Sobreyaciendo a ambas formaciones se tiene a la Formación Carrillo-Puerto representa la secuencia del Mioceno-Plioceno, la cual consiste en calizas de color blanco a crema con intercalaciones de arcillas y boundstone comúnmente llamada coquina (TmplCz-Cq). Las rocas contienen abundante y bien preservada microfauna, la cual sugiere un ambiente moderadamente profundo.

La secuencia del Pleistoceno-Holoceno se encuentra en las partes marginales alrededor de la península de Yucatán. En el Pleistoceno se tiene depósitos de arenisca poco consolidada, constituida en su mayoría por fragmentos de gasterópodos, pelecípodos, ostras y calcita (Qpt(?)Ar), principalmente se observan en el margen oriental de la carta.

En el Holoceno se tiene distintos tipos de depósitos. Se tienen en algunas porciones calizas de edad reciente (QhoCz). Los depósitos lacustres, están constituidos por arcilla, lodo calcáreo, arena y limo de color negro con altos contenidos de materia orgánica (Qhola). Se tiene también, los depósitos palustres (Qhopa), los cuales se conforman de limo y arcilla mezclados con materia orgánica. Los depósitos de litoral hacen referencia a arena blanca constituida principalmente por fragmentos angulosos a subangulosos de ostras, bivalvos y gasterópodos (Qholi) y depósitos aluviales (Qhoal) formado por limos y arcillas.

4.3. Geología Estructural

Las zonas más notables a escala regional de fracturamientos son el Anillo de Cenotes, la línea de falla de la Sierrita de Ticul, la zona de fractura Holbox, la zona del bloque de falla Río Hondo y la zona de falla La Libertad.

El Anillo de Cenotes es una estructura de escala regional, la cual posiblemente conduce agua subterránea más eficientemente que en los alrededores (Marín, 1990). Las posibles causas de la alta permeabilidad presentada en esta región son

el fallamiento asociado a la compactación de las diferentes litologías dentro de esta cuenca sedimentaria (Perry *et al.*, 1995).

El escarpe con rumbo NE ubicado en la porción norte de la Sierrita de Ticul fue interpretado como un fallamiento normal por Weidie en 1985. El desplazamiento total de la falla es desconocido, pero parece ser que hay un decremento hacia el sureste. Los movimientos a lo largo de la falla probablemente ocurrieron durante el Cretácico Tardío-Terciario Temprano.

La zona de fractura Holbox fue descrita primeramente por Weidie (1982) como un lineamiento de origen desconocido. La zona se define por una serie de depresiones lineares. Debido a la falta de trabajo de campo detallado y la ausencia de datos es imposible definir la naturaleza y origen de esta zona de fractura (Weidie, 1985).

La zona de falla Río Hondo presenta una dirección NE 25° SW con echados que varían entre los 50°-89° NW y tiene una longitud de 75 km. Es una continuación de un extensivo sistema de fallamiento de cuencas y valles en el Mar Caribe en las costas del sur de la Península de Yucatán, extendiéndose en las partes al sur de Quintana Roo y Belice (Weidie 1985). Este sistema de fallas se tiene como producto de distintos eventos tectónicos durante el Cretácico Tardío al Plioceno (Lara, 1993).

"Modelación de cavernas kársticas al sur de la Ruta de los Cenotes, municipio de Puerto Morelos; Quintana Roo"

Universidad de Sonora
División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología
Lucía Guadalupe Valenzuela Gastélum
Tesis de Licenciatura



Plano

Geología de la Península de Yucatán

Croquis de localización



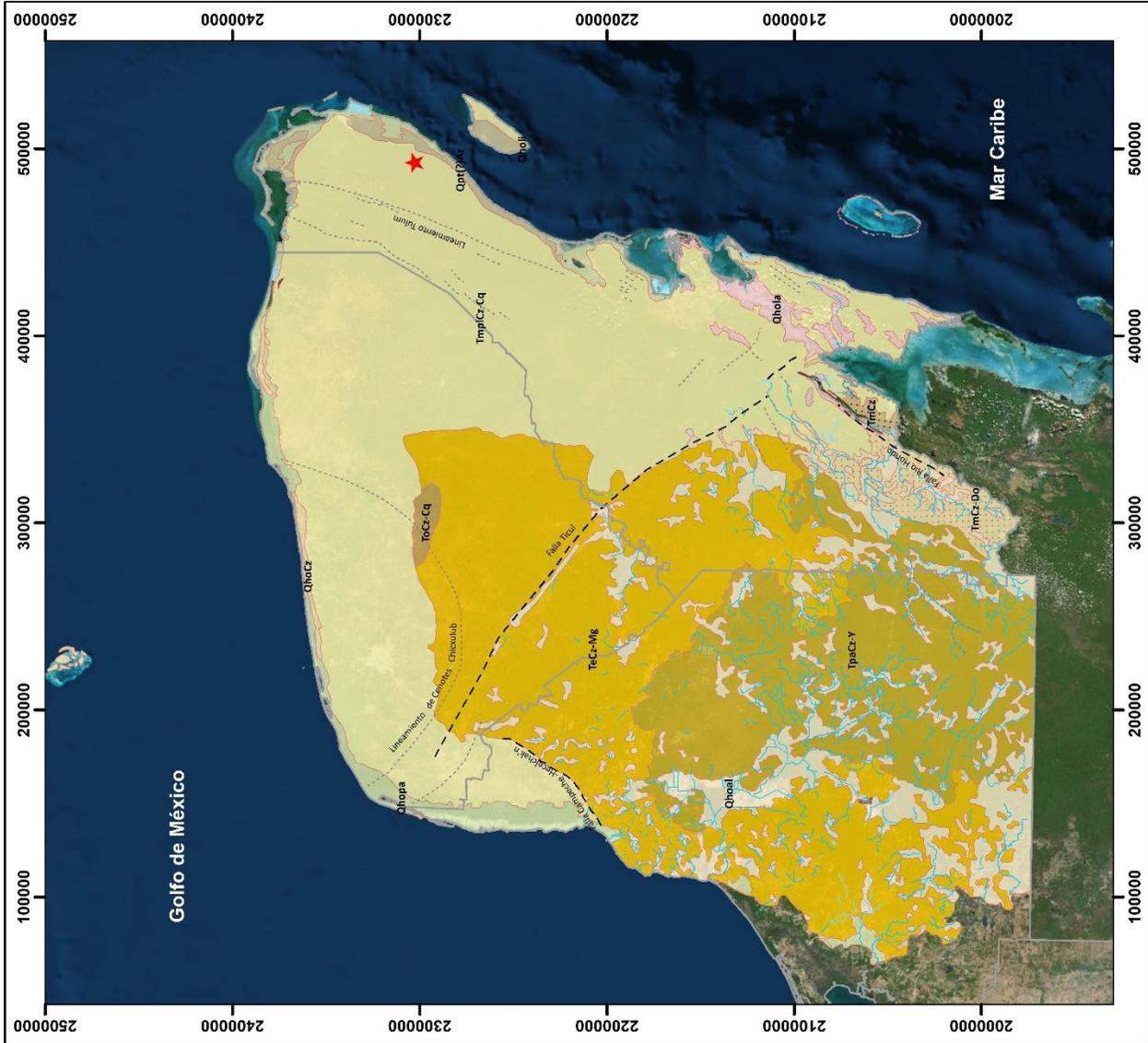
Simbología

Litología		Elementos estructurales	
Cuaternario	Terciario	Plioceno	Falla normal
Holoceno	Aluvión	Caliza-Coquina	Lineamiento
Mioceno	Lacustre	Caliza-Dolomita	Contacto geológico
Pleistoceno	Palustre	Caliza	
Arenisca	Litoral	Oligoceno	Otros elementos
	Caliza	Caliza-Coquina	Cuerpos de agua
		Eoceno	Red fluvial
		Caliza-Marga	Límite estatal
		Paleoceno	Área de estudio
		Caliza-Yeso	

Escala: 0 25 50 100 Km

N

ELIPSOIDE: CLARKE DE 1886
PROYECCIÓN: UNIVERSAL TRANSVERSA MERCATOR
DATUM: UTM A CADA 100 KM
UTM A CADA 100 KM
DATUM: WGS84



Plano 5. Geología de la Península de Yucatán (SGM, 2007)

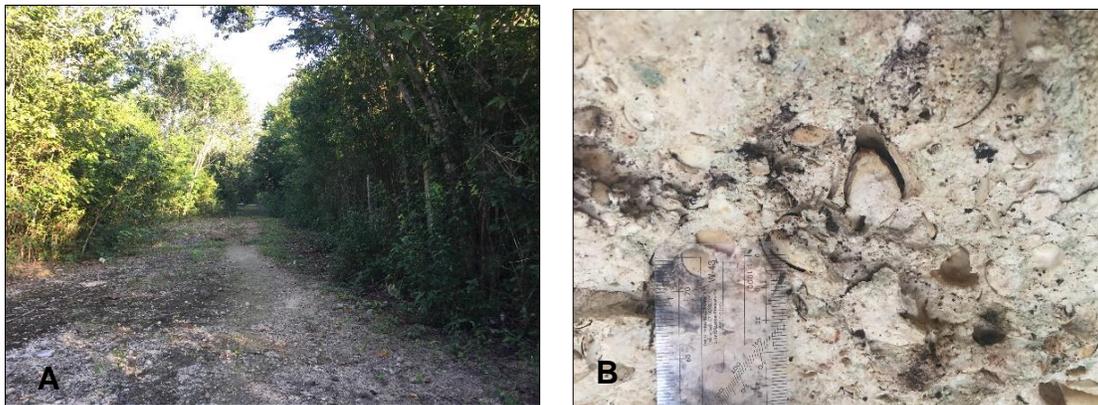
5. Geología local

5.1. Geología superficial

El área de estudio presenta la misma secuencia litológica de la Península de Yucatán, la cual en su mayor parte corresponde a un potente paquete carbonatado que se ha ido formando desde el Mesozoico. Las rocas que afloran en las cercanías del área de estudio corresponden a edades del Terciario al Reciente (Plano 6).

La unidad más antigua corresponde a la Formación Carrillo-Puerto (TmplCz-Cq), la cual está constituida por una secuencia de calizas coquinoideas de edad Mioceno-Plioceno (SGM, 2006). Los espesores de esta formación varían de entre 10 y 200 metros, disminuyendo conforme se avanza hacia la costa de Quintana Roo y está constituido por calizas fosilíferas en la base con una variación hacia calizas compactas y calizas arenosas hacia la cima (CONANP, 2011). Es esta característica la que le permite desarrollar fácilmente conductos de disolución.

El área de estudio se encuentra ubicada dentro de la unidad anterior y solo se tiene afloramientos de calizas fosilíferas con cavidades visibles en superficie, así como zonas cubiertas por caliche (Fotografía 1).



Fotografía 1. Afloramientos del área de estudio A) Cobertura de caliche B) Calizas fosilíferas

En zonas adyacentes al área de estudio y cubriendo a la unidad anterior se tienen depósitos cuaternarios de arenisca poco consolidada (Qpt(?)Ar), constituida principalmente por fragmentos de gasterópodos, pelecípodos, ostras y calcita de edad Pleistoceno, siendo esta ubicada en el margen este del continente (SGM,

2006). En la localidad de Puerto Morelos se puede observar una cantera que expone esta unidad.

Finalmente se tienen los depósitos de litoral (Qholi), los cuales corresponden a arenas blancas compuestas de fragmentos angulosos a subangulosos de ostras, bivalvos y gasterópodos a lo largo de toda la franja costera del Mar Caribe (SGM, 2006).

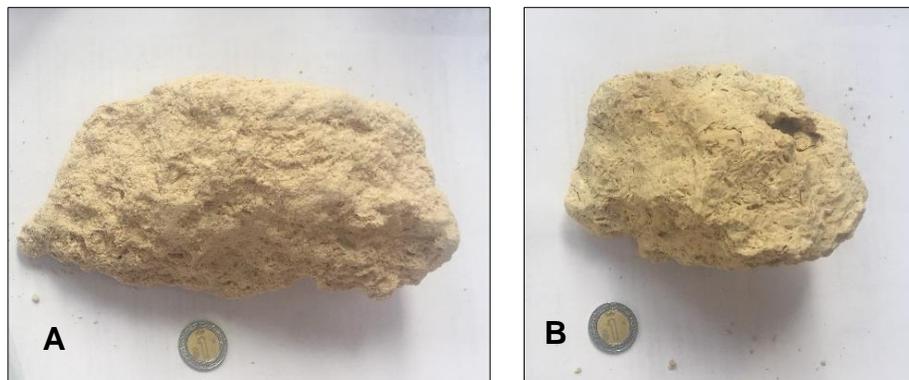
5.2. Geología del subsuelo

Como parte fundamental del estudio se realizó un modelo geológico del subsuelo a partir de información bibliográfica y de un muestreo realizado en cenotes cercanos al área de estudio.

Se recolectaron muestras en 3 sitios de hasta 30 metros de profundidad pues dadas las condiciones se utilizó equipo de buceo para la misma por lo que se tenían límites de tiempo y profundidad (Anexo I).

En la base del muestreo a los 30 metros, se observan calcarenitas de color crema muy claro, con lupa se puede observar un tamaño de grano que varía de medio a grueso, de clasificación media y restos de organismos mayormente fracturados, el espesor de la capa es de entre 5 y 10 metros (Fotografía 2-A).

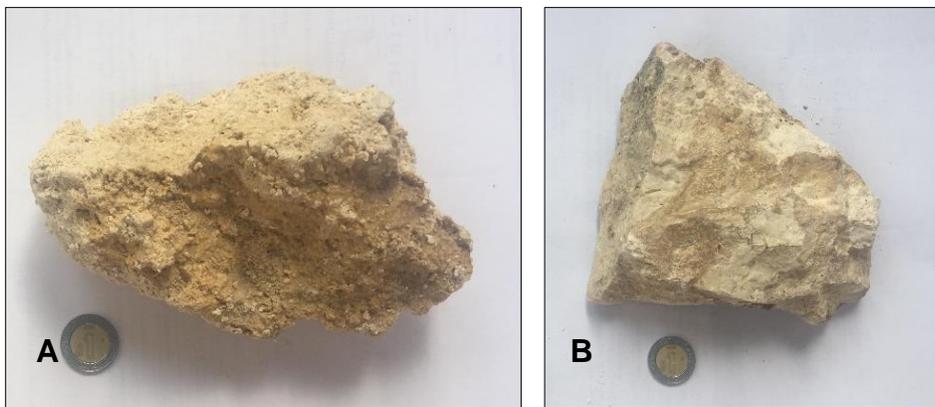
Sobre las calcarenitas se tiene una transición hacia una caliza fosilífera de color crema con tonalidades amarillas, se observan los moldes de los restos de organismos que han sido disueltos. La capa tiene aproximadamente entre 5 y 9 metros de espesor y su contacto superior no se encuentra bien definido (Fotografía 2-B).



Fotografía 2. Muestras recolectadas A) Cenote Maravilla a 32 metros de profundidad B) Cenote Maravilla a 27 metros de profundidad

Sobre la capa anterior se observa nuevamente una transición hacia las calcarenitas, estas son de color crema variando de tonalidades café hacia casi blanco, los granos son de tamaños que varía de chicos a medianos y hay una gran abundancia de restos fósiles, entre ellos bivalvos y gasterópodos. Esta capa se extiende hasta los 15 metros en profundidad aproximadamente (Fotografía 3-A).

Se observa la transición hacia calizas fosilíferas nuevamente con alto grado de recristalización y la presencia de bivalvos, gasterópodos y corales. El color varía de café a crema. Esta capa se extiende hasta la superficie (Fotografía 3-B).



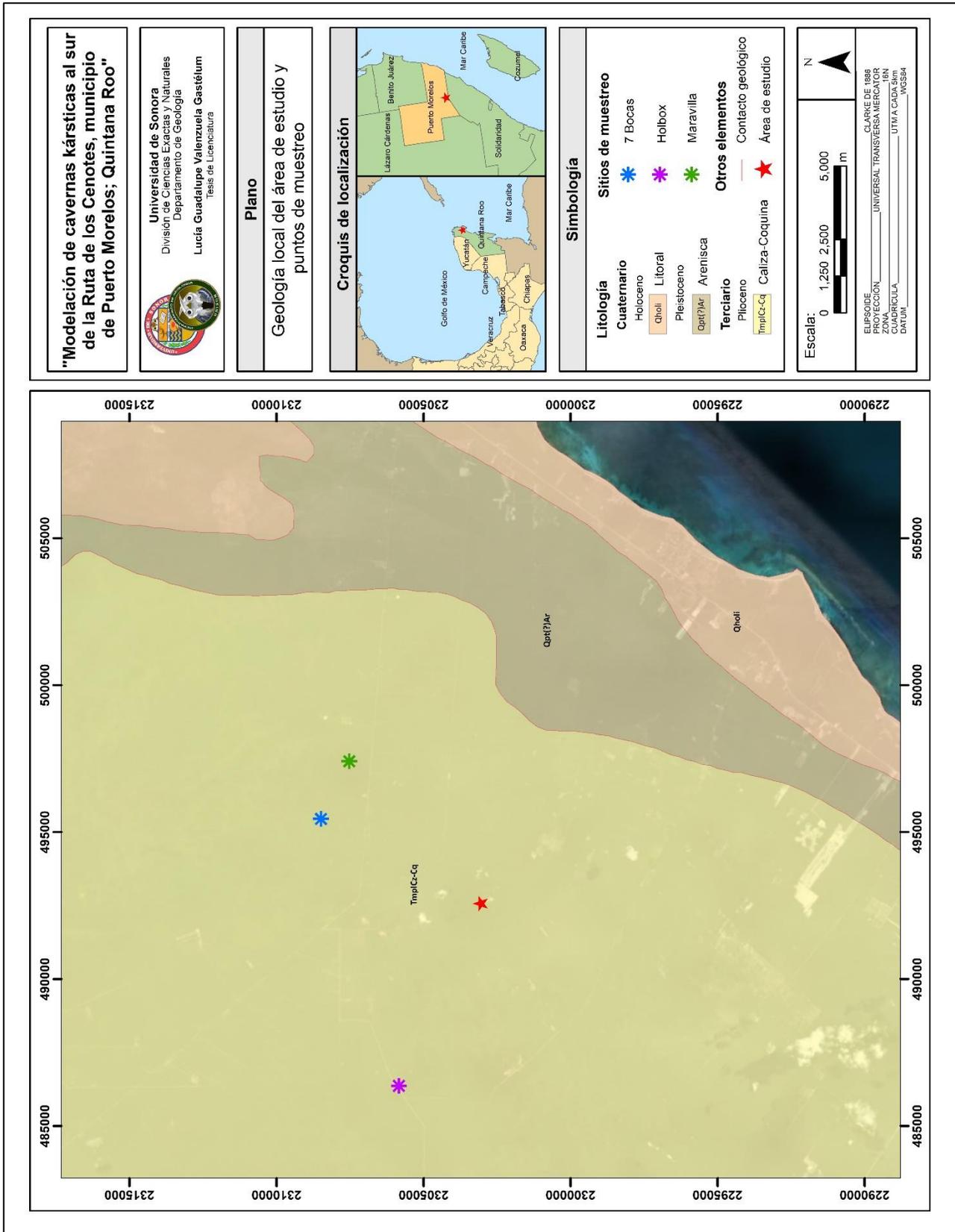
Fotografía 3. Muestras recolectadas A) Cenote Holbox a 17 metros de profundidad B) Cenote Holbox en superficie

Con base a la bibliografía recolectada y a las observaciones de campo, se puede determinar que en el área se tiene una intercalación entre calcarenitas y calizas fosilíferas asociadas a los cambios del nivel del mar.

En las calizas de superficie se tienen cavidades vacías debido a la disolución de las mismas rocas las cuales facilitan la infiltración del agua superficial.

Por otra parte, las siguientes transiciones hacia calcarenitas y calizas arrecifales corresponden a la parte saturada del acuífero debido a sus características de porosidad y permeabilidad.

Es en la última capa, a partir de los 20 metros es donde se observa la apertura de las cavidades inundadas de agua y el desarrollo de los conductos que enlazan los sistemas de cavernas kársticas.



Plano 6. Geología local del área de estudio (SGM, 2006)

6. Geofísica

La geofísica aplica los principios físicos de los materiales para el estudio de la tierra. Los métodos geofísicos se utilizan para caracterizar las variaciones de los parámetros físicos de las formaciones del subsuelo. Las mediciones geofísicas producen grupos de datos en los cuales se miden diversos parámetros, cada uno relacionado a una o más propiedades físicas del subsuelo y a su distribución espacial (Chalikakis *et al.*, 2011; Putiska *et al.*, 2012).

La prospección geofísica es de gran utilidad para investigar las zonas a las cuales el ser humano no tiene acceso, a través de las propiedades físicas de las rocas. Sin embargo, es importante recalcar que toda la información recabada a partir de estos métodos es de carácter indirecto, pues nunca se tendrá una muestra de roca como tal. Por el contrario, la información es numérica y se le debe dar su interpretación geológica para que esta sea realmente útil.

Los métodos geofísicos se subdividen en aquellos que usan los campos naturales de la tierra y en los que requieren introducir en el subsuelo una fuente de energía artificial.

Los métodos de campo natural utilizan los campos gravitacionales, magnéticos, eléctricos y electromagnéticos de la tierra, estos buscan perturbaciones locales de los mismos que pueden ser causadas por características geológicas conocidas y de interés económico.

Por otra parte, los métodos de fuente artificial generan campos eléctricos o electromagnéticos locales que pueden ser utilizados de forma análoga a los campos naturales, o en su caso, la generación de ondas sísmicas, de las cuales la velocidad de propagación y la ruta de transmisión a través del subsuelo son mapeadas para proveer información acerca de la distribución de los límites geológicos a profundidad.

Generalmente, los métodos que utilizan los campos naturales pueden generar información de las propiedades a mayor profundidad y son más fáciles de utilizar que los métodos de fuentes artificiales. Sin embargo, estos últimos son capaces de producir información del subsuelo más detallada y con mejor resolución (Kearey, 2002).

6.1. Tomografía eléctrica resistiva

Las técnicas de campo que utilizan resistividad se han desarrollado considerablemente durante los últimos 50 años. Grandes avances se han hecho en el desarrollo de la teoría de la resistividad, esto como una necesidad para entender las propiedades eléctricas de las rocas. Para tener una buena medición es primordial contar con instrumentación confiable y afortunadamente, se ha logrado tener un buen progreso en el desarrollo de equipos (Sumner, 1984).

Los métodos de resistividad emplean una fuente artificial de corriente, la cual es introducida en la tierra a través de electrodos. La medición de la diferencia de potencial eléctrico en la vecindad del flujo de corriente, así como también la corriente inyectada, hacen posible determinar la resistividad aparente del subsuelo (Telford *et al.*, 1990).

La base de las tomografía eléctrica resistiva o TER's, está en que se asume que las entidades tales como minerales, roca sólida, sedimentos, estructuras vacías o rellenas de agua, tienen valores de resistividad detectables y contrastantes en relación con el medio que lo enajena (Panek *et al.*, 2010).

Los TER's se han utilizado por varias décadas como una herramienta muy efectiva para investigaciones en el área de hidrogeología, minería y geotecnia, así como más recientemente para problemas ambientales (Loke, 1999). Este método es especialmente el preferido para la caracterización de terrenos kársticos. (Zhou, 2008).

Una de las ventajas de utilizar este método es que te permite obtener una imagen de resistividad en dos dimensiones conforme a las heterogeneidades del subsuelo además de ser más económica que otras técnicas y consume menos tiempo.

Como todo método, la utilización de TER's también tiene sus desventajas. Parte de su metodología requiere un contacto directo con el subsuelo, por lo que para lograrlo se deben clavar estacas en el mismo. En los casos donde las áreas de estudio se encuentran cubiertas por concreto o asfalto o simplemente se tiene la roca sana expuesta en superficie es realmente complicado realizar las mediciones. Otra desventaja es que la resolución vertical del procesado de datos decrece con la profundidad.

6.1.1. Ley de Ohm y resistividad

Georg Simon Ohm durante 1827 derivó una relación empírica entre la resistencia (R) de un resistor de un circuito en serie simple (Figura 3), la corriente que pasa a través del resistor (I) y su correspondiente cambio de potencial (ΔV).

$$\Delta V = RI \quad \text{ecuación 1}$$

Utilizando la Ley de Ohm, el valor de la resistencia (R) puede ser fácilmente calculado al introducir los valores de voltaje (ΔV) y corriente (I). Estos dos valores se tienen porque pueden ser medidos (Muchaidze, 2008; Ewusi, 2006).

El concepto del TER´s está basado en esta relación empírica, asumiendo que el resistor en el circuito es la tierra.

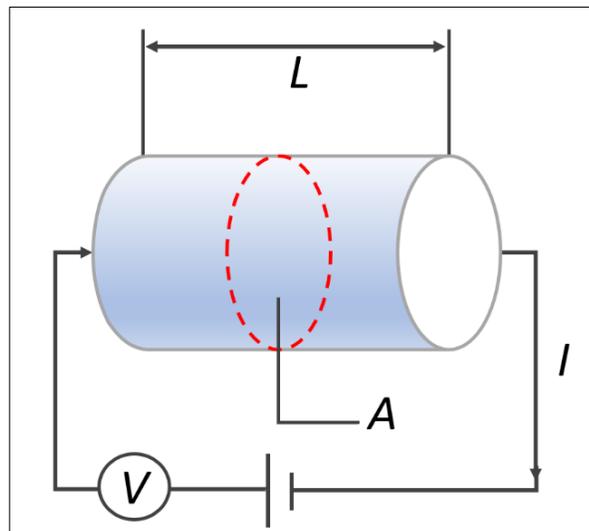


Figura 3. Circuito eléctrico conformado por una batería y un resistor

La resistencia (R) también puede ser determinada como función de la geometría del resistor y la resistividad del cuerpo (ρ).

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad \text{ecuación 2}$$

Esta ecuación nos muestra que la magnitud de la resistencia se ve afectada por la longitud (L) y el área de sección transversal (A) del cuerpo a través del cual fluye la corriente eléctrica (resistor). El factor que determina la facilidad con la que la corriente eléctrica fluye a través del medio se conoce como resistividad (ρ).

Si esta ecuación se reacomoda, se puede expresar la resistividad como:

$$\rho = \frac{RA}{L} \quad \text{ecuación 3}$$

La resistividad eléctrica de cualquier material es la resistencia entre las caras opuestas de un cubo unitario de material. La resistividad es un parámetro interno de los materiales y describe que tan fácil puede un material transmitir la corriente eléctrica (Muchaidze, 2008).

Los altos valores de resistividad implican que el material es muy resistente al flujo de electricidad asociándose mayormente a rocas ígneas o muy compactas, por otra parte, los valores muy bajos muestran que el material puede transmitir la corriente eléctrica muy fácilmente y se refiere a rocas sedimentarias y puede variar según su capacidad de almacenar fluidos (Ewusi, 2006).

6.1.2. Resistividad aparente

Se le denomina resistividad aparente a la resistividad medida en un medio heterogéneo a partir de un arreglo tetraédrico.

Estimar la resistividad aparente de la tierra es relativamente simple si se asume lo siguiente:

- La tierra es uniforme y homogénea, por lo que posee resistividad constante.
- La tierra es un resistor hemisférico en un circuito simple que consiste en una batería y dos electrodos (fuente y receptor) insertados en el suelo.

Cuando la corriente es introducida al subsuelo, esta es obligada a moverse hacia afuera a partir del electrodo fuente. Dado que se asumió que la tierra es homogénea la corriente se extiende en todas las direcciones a partir del electrodo, y en cierto momento del tiempo, la corriente se moverá a través de la zona hemisférica (Figura 4). El área de dicha zona puede ser determinada con la siguiente relación:

$$A = 2\pi d^2 \quad \text{ecuación 4}$$

Donde d es la distancia desde el electrodo fuente al punto del hemisferio en la superficie.

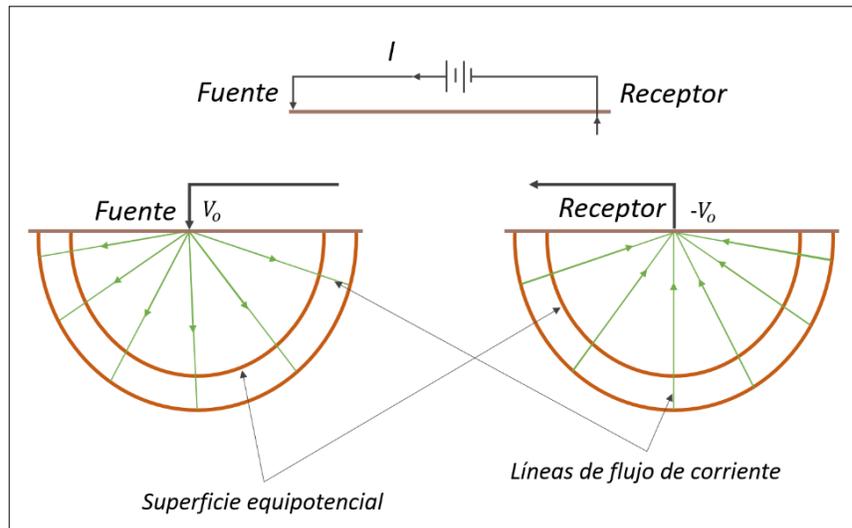


Figura 4. Líneas de corriente y superficies equipotenciales

Si se sustituye la ecuación 4 en la ecuación 3 se obtiene una expresión que define la resistencia del medio en un punto separado de la fuente por una distancia d :

$$R = \frac{\rho}{2\pi d} \quad \text{ecuación 5}$$

La diferencia de potencial que resulta del flujo de corriente a través un resistor hemisférico puede ser determinada al combinar la Ley de Ohm (ecuación 1) y la ecuación 5:

$$V = \frac{I\rho}{2\pi d} = V_0 - V_d$$

Donde v_0 es el potencial en el electrodo fuente y v_d es el potencial en la superficie del hemisferio con radio d (Muchaidze, 2008).

Con esta ecuación se demuestra que la diferencia de potencial entre la fuente y cualquier punto de la superficie equipotencial tiene el mismo valor numérico.

Como se muestra en la Figura 5, cuando se tienen dos electrodos separados por una distancia finita, el potencial en cualquier punto M separado por una distancia del electrodo fuente, y la distancia desde el electrodo receptor se puede determinar como la suma de las contribuciones del potencial desde los electrodos fuente y receptor para el punto M. (Robinson *et al.*, 1998).

$$V = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right)$$

Esta ecuación puede ser empleada para calcular el potencial punto por punto alrededor de la tierra. Al graficar esos puntos y relacionarlos se puede obtener la superficie equipotencial.

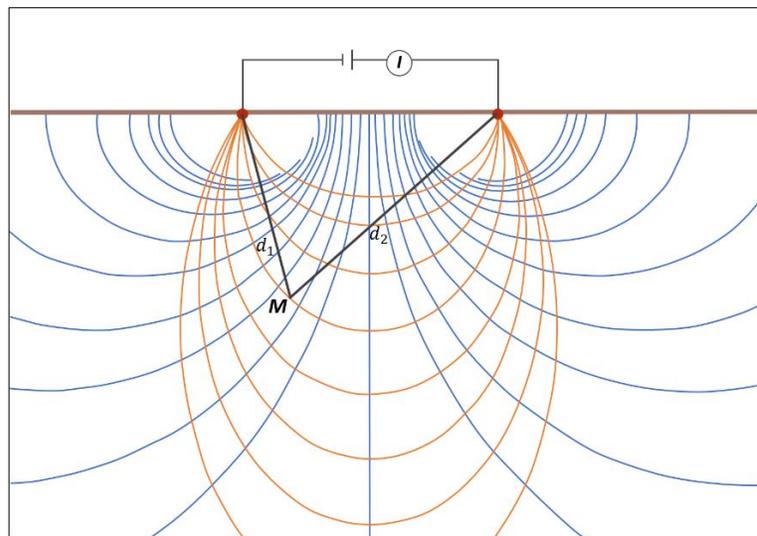


Figura 5. Medición de potencial en un punto M

Para adquirir los datos de un TER en el campo, se utiliza un arreglo de cuatro electrodos (Figura 6). Dos de esos electrodos tienen la función de inyectar la corriente en el subsuelo y se les denomina electrodos de corriente (A, B). Los otros

dos electrodos tienen la función de medir la diferencia de potencial y se conocen como electrodos de potencial (M, N).

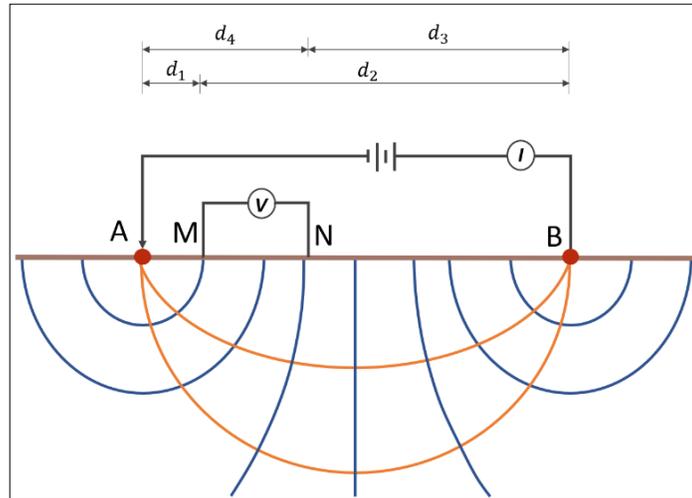


Figura 6. Arreglo tetraédrico

El asumir que el medio a través del cual la corriente fluye es homogéneo, provee de un valor constante de resistividad, sin importar donde estén colocados los electrodos de potencial.

Tomando en cuenta la geometría de la configuración de electrodos, el potencial eléctrico en el punto M puede determinarse con la siguiente ecuación:

$$V_M = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right)$$

Mientras que el potencial en el punto N se puede calcular a partir de la ecuación:

$$V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{d_3} - \frac{1}{d_4} \right)$$

Entonces, el gradiente del potencial (V_{MN}) entre esos dos puntos es:

$$V_{MN} = V_M - V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} + \frac{1}{d_3} - \frac{1}{d_4} \right)$$

Realmente, los materiales del subsuelo poseen diferentes características físicas y asumir que la resistividad es homogénea no es completamente razonable. Debido a eso, es que la resistividad que se mide en el campo es un promedio de los valores de resistividad entre las dos superficies equipotenciales y se le denomina resistividad aparente (ρ_a):

$$\rho_a = K \frac{V_{MN}}{I}$$

Donde K es el factor geométrico y depende del arreglo de electrodos que se utilice:

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_3} + \frac{1}{d_4}}$$

6.1.3. Arreglos de electrodos

Los sistemas multi-electródicos han sido utilizados en gran medida durante las últimas décadas. El tener un gran número de electrodos sujetos al suelo y unidos mediante un cable, incrementa las capacidades de la investigación y ahorra tiempo de trabajo. El uso de estos sistemas multi-electródicos permite la generación de modelos de resistividad en dos dimensiones.

Existen distintos arreglos electródicos, cada uno con características y objetivos distintos, sin embargo, los más utilizados son Wenner, Schlumberger y dipolo-dipolo.

La profundidad de investigación es determinada por varios parámetros como son: el tipo de arreglo de electrodos utilizado, el largo de la sección y los parámetros físicos de los materiales del subsuelo dentro del área de interés (Robinson *et al.*, 1988).

La geometría del arreglo electródico depende de la profundidad que se quiere obtener, el tiempo que se tiene para la adquisición de datos y la resolución espacial requerida. Cada una de las configuraciones tiene ventajas y desventajas específicas, basadas en la profundidad de investigación y la resolución horizontal. (Metwaly *et al.*, 2013)

Cuando se utilizan los sistemas multi-electródicos, el espacio entre los electrodos depende de la distancia entre los electrodos de corriente y potencial regida por la configuración de electrodos utilizada, así mismo, esta distancia es controlada automáticamente por el equipo de resistividad.

Como se mencionó anteriormente, los datos obtenidos en campo son de resistividad aparente y se utiliza un factor geométrico dependiendo del tipo de arreglo utilizado (Tabla 1).

Tipo de arreglo	Factor geométrico
Wenner	$2\pi a$
Dipolo-dipolo	$\pi n(n + 1)(n + 2)a$
Schlumberger	$\pi n(n + 1)a$

Tabla 1. Factor geométrico de los arreglos electródicos más comunes (Loke, 1999)

6.1.3.1. Arreglo Wenner

Este tipo de arreglo requiere una base de datos más pequeña que los demás tipos para construir la pseudosección. Los cuatro electrodos son equidistantes a una distancia a según convenga más para el estudio (Figura 7).

Este arreglo tiene la mayor sensibilidad en la vertical debajo del centro del arreglo y eso le permite tener buena detección de estructuras horizontales. Su profundidad de investigación es moderada en comparación con los otros dos tipos de arreglos.

Horizontalmente su cobertura es pobre, pues al ir incrementado la apertura de los electrodos esta se reduce, sin embargo, es el arreglo que tiene la señal más fuerte por lo que es muy útil para sitios donde hay gran interferencia al momento de adquirir los datos.

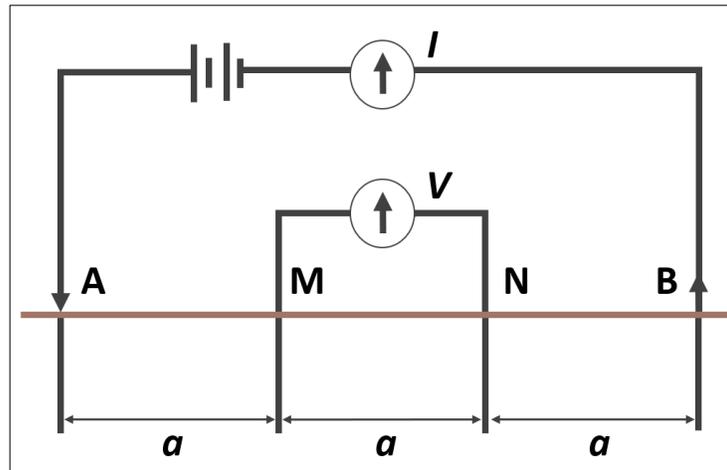


Figura 7. Arreglo Wenner

6.1.3.2. Arreglo Dipolo-Dipolo

Para este tipo de arreglo los electrodos de potencial y los de corriente se sitúan en lados opuestos de la línea, manteniendo la misma distancia a entre los dos pares de electrodos la cual se va modificando conforme avanza el sondeo, así como también va incrementando la distancia entre los dipolos en base al factor n (Figura 8).

La zona donde este arreglo tiene la mayor sensibilidad es entre los electrodos de cada dipolo y debido a que es muy sensible a cambios horizontales de resistividad es bueno para el mapeo de estructuras verticales. En comparación con el Arreglo Wenner tiene una menor profundidad de investigación, sin embargo, tiene una mayor cobertura horizontal.

Para los casos donde n corresponde a valores muy grandes tiene una baja intensidad de la señal por lo que es necesario tener un muy buen equipo de resistividad para contrarrestar las interferencias.

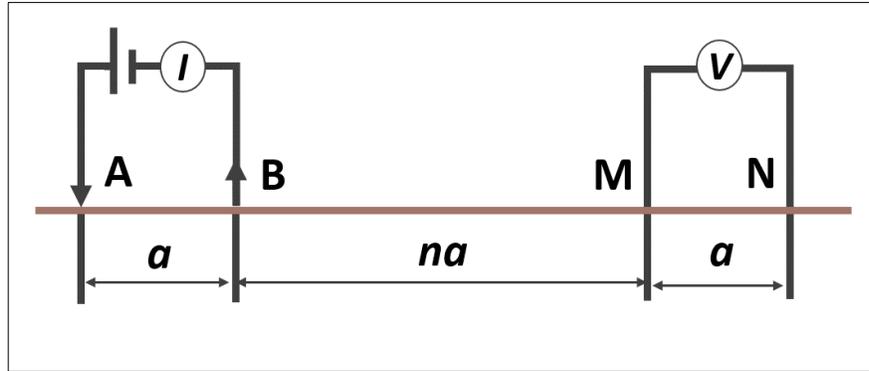


Figura 8. Arreglo Dipolo-dipolo

6.1.3.3. Arreglo Schlumberger

Para este arreglo los electrodos se sitúan linealmente, sin embargo, la distancia entre los electrodos de potencial es mucho menor que la de los electrodos de corriente (Figura 9).

Este arreglo tiene la mayor sensibilidad a los cambios de resistividad debajo de los electrodos de potencial y sensible tanto a estructuras verticales como horizontales. Tanto la profundidad de investigación como la cobertura horizontal son mayores a la del Arreglo Wenner. La intensidad de la señal que maneja es moderada.

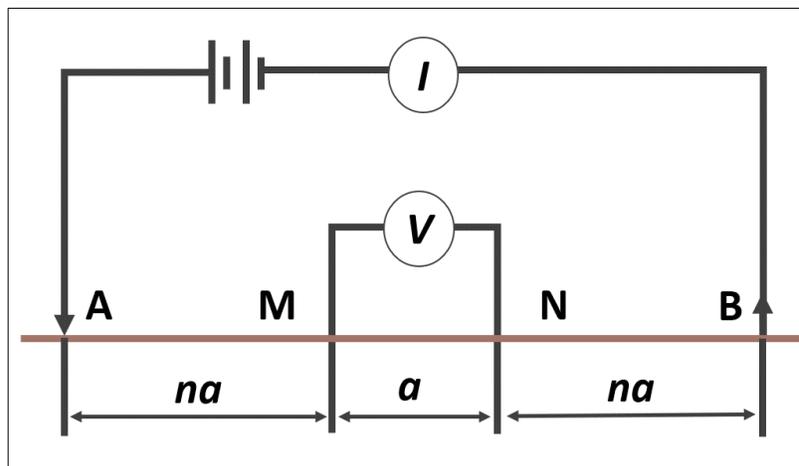


Figura 9. Arreglo Schlumberger

6.1.4. Resistividad de las rocas

Las variaciones resistivas del subsuelo están dadas en gran medida en función de la litología y es relacionada a varios parámetros geológicos, como lo son el contenido de minerales y fluidos, la porosidad y el grado de saturación de agua de la roca. (Telford *et al.*, 1990; Loke, 1999).

Como se puede apreciar en la Tabla 2, la mayoría de los materiales pueden tener valores de resistividad en rangos muy amplios. Estos valores se mueven en función de las condiciones a las que se encuentre el material, como el grado de fracturamiento, el grado de saturación, el tipo de fluidos presentes, así como su cómo su composición mineralógica.

Material	Resistividad ($\Omega.m$)
Granito	$10^2 - 10^6$
Diorita	$10^4 - 10^5$
Gabro	$10^3 - 10^6$
Andesita	$10^2 - 10^4$
Basalto	$10 - 10^7$
Peridotita	$10^2 - 10^3$
Arenisca	$1 - 10^8$
Caliza	$50 - 10^7$
Dolomita	$10^2 - 10^4$
Arena	$1 - 10^3$
Arcilla	$1 - 10^2$

Tabla 2. Resistividad de los diferentes materiales del subsuelo (Robinson *et al.*, 1988)

En el caso de las calizas se pueden tener variaciones de distintas órdenes de magnitud, por lo que como se mencionó anteriormente, con base a las condiciones a las cuales estén sometidas se pueden tener diferentes valores como se muestra en la Tabla 3, los cuales corresponden a valores típicos de una zona kárstica. Este es un claro ejemplo de cómo las condiciones a las cuales se someta la roca pueden variar considerablemente los valores de resistividad.

Material	Resistividad ($\Omega.m$)
Caliza compacta	> 1000
Caliza masiva con pequeñas cavernas	300 – 1000
Caliza saturada con agua dulce	20 – 100
Caliza saturada con agua salada	< 10
Agua dulce	1 – 20
Agua salada	< 1

Tabla 3. Resistividad de los materiales presentes en la Península de Yucatán (Orellana, 1972; Supper *et al.*, 2009)

6.2. Mediciones de resistividad

Para realizar la medición de resistividad, se debe transmitir una corriente a través de un par de electrodos mientras que la diferencia de potencial creado en el subsuelo derivado de la circulación de dicha corriente es medida con otro par de electrodos. El incremento de la distancia entre ambos pares de electrodos permite incrementar la profundidad de investigación.

Es importante mencionar que previo a la toma de datos se deben realizar trabajos de logística, como lo son ubicar las vías de acceso al área de estudio y principalmente conocer tanto el entorno geológico del área como las estructuras que se pretenden identificar con el estudio. Como se mencionó anteriormente, de estos factores dependerán las características de las secciones que se van a realizar, como la orientación y longitud de las mismas, el espaciamiento de los electrodos y la configuración electródica que se utilizará.

En el área de estudios se realizaron seis tomografías eléctricas resistivas utilizando el arreglo tetraédrico Wenner mediante cadenas compuestas de 80 electrodos inteligentes separados equidistantemente cinco metros cada uno, teniendo un total de 400 metros por sección.

Posteriormente con los datos que se obtuvieron se realizó el proceso de inversión, esto es con el fin de obtener el modelo de resistividad real del subsuelo y con ello determinar los materiales y estructuras presentes.

6.2.1. Equipo utilizado

Los TER's requieren de introducir corriente eléctrica en el subsuelo mediante electrodos en contacto con el suelo por medio de estacas y las mediciones son realizadas por un equipo de resistividad.

El equipo que se utilizó se compone de los siguientes elementos (Fotografía 4):

- Resistímetro de alta precisión, el cual es un instrumento de corriente alterna con frecuencias seleccionables entre 0.26 y 30 Hz.
- 80 electrodos inteligentes los cuales se encargan de inyectar la corriente al subsuelo, estos se encuentran unidos mediante un cable.
- 80 estacas de acero, estas tienen la función de permitir el contacto del electrodo con el suelo.
- Planta generadora de electricidad, su función es proporcionar una fuente energía al resistímetro.



Fotografía 4. Equipo utilizado A) Cadenas de electrodos B) Resistímetro C) Estacas de acero D) Planta de electricidad E) Computadora

Una vez que se identificó el área con las mejores características para realizar el levantamiento de datos, se colocaron las cadenas de electrodos y en la posición de cada electrodo se clavó una estaca en el suelo donde se conectan el electrodo (Fotografía 5).



Fotografía 5. Trabajo realizado en campo A) Ubicación de zonas para realizar las secciones B) Colocación de estacas C) Electrodo en contacto con el suelo mediante estacas

Las cadenas de electrodos son conectadas al resistímetro, el cual se encarga de controlar los electrodos que inyectan corriente y los que miden el potencial. Este es conectado a su vez, a una computadora la cual permite configurar las características del sondeo, también muestra las resistividades observadas cuando se está realizando la medición y finalmente permite guardar los datos obtenidos para el proceso posterior (Fotografía 6).



Fotografía 6. Adquisición de datos A) Resistímetro y software utilizado para la adquisición de datos B) Proceso de adquisición de datos

6.2.2. Adquisición de datos

Una vez que se tiene conectado todo el equipo, se configuran los parámetros necesarios para iniciar la toma de datos, entre ellos la cantidad de electrodos que se van a utilizar, la numeración de los electrodos, el espaciado inicial y la configuración eléctrica, en este caso se utilizó el arreglo Wenner.

Posteriormente, se realiza una prueba para asegurar que todos los electrodos tengan un buen contacto con el suelo. Cada electrodo mide la resistencia que tiene en contacto con el suelo, los datos que se obtienen se utilizan al momento de la inversión para ajustar las resistividades observadas. Idealmente los electrodos deben tener resistencias menores a los 3000 Ω .

Si todos los electrodos están dentro del rango de resistencia tolerable con el subsuelo, se procede a realizar el levantamiento de datos. La duración de éste depende de la longitud de la sección y el tipo de arreglo utilizado, pues éstos determinan la cantidad de mediciones que se deben llevar a cabo (Figura 10).

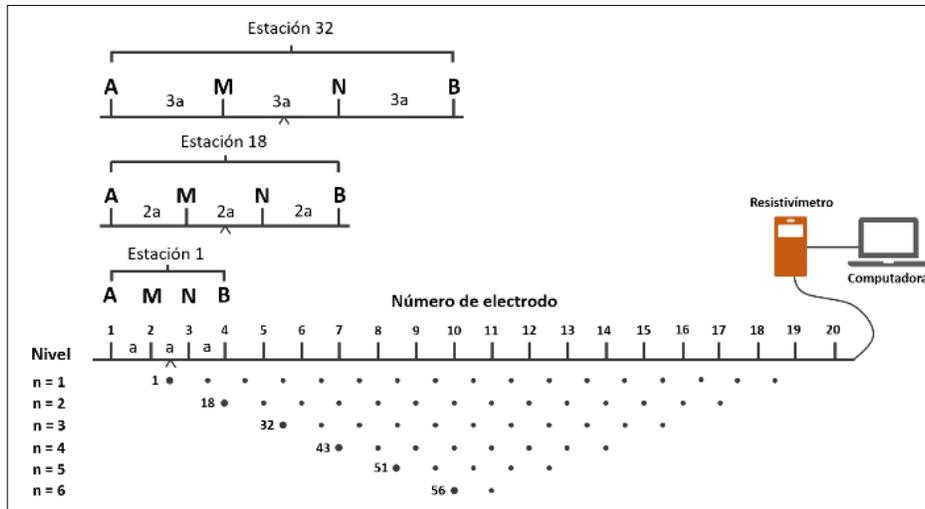


Figura 10. Pseudosección obtenida con el arreglo de electrodos Wenner

6.2.3. Inversión de datos

Los datos adquiridos deben ser convertidos en modelos de resistividad para poder hacer las interpretaciones del subsuelo. Este modelo es una representación matemática idealizada de una sección de la tierra (Loke, 2004).

Para hacer este procesado se utilizó un software especializado, el cual utiliza el método basado en celdas, donde los parámetros del modelo son los valores de resistividad del modelo de bloques, mientras que los datos son los valores de resistividad aparente medidos (Loke, 1999).

El programa también utiliza una serie de iteraciones, a partir de un modelo inicial este trata de encontrar un modelo en el cual los valores de resistividad aparente sean lo más cercano a los valores medidos en campo.

El procesado de datos consiste en lo siguiente:

- Identificar las anomalías que se tengan en los datos, valores muy altos o muy bajos (negativos).
- Remover las anomalías identificadas, esto con la finalidad de tener menos error al momento de hacer la inversión de datos.
- Ajuste de topografía.
- Realiza la inversión para obtener el perfil de resistividad.
- Adecuar los atributos de la sección conforme las necesidades del estudio.

Cuando se tienen los perfiles de resistividad, se puede realizar la interpretación, para ello se utilizan los rangos de resistividad ideales para la zona de estudio, en este caso para rocas calcáreas.

6.3. Interpretación de datos

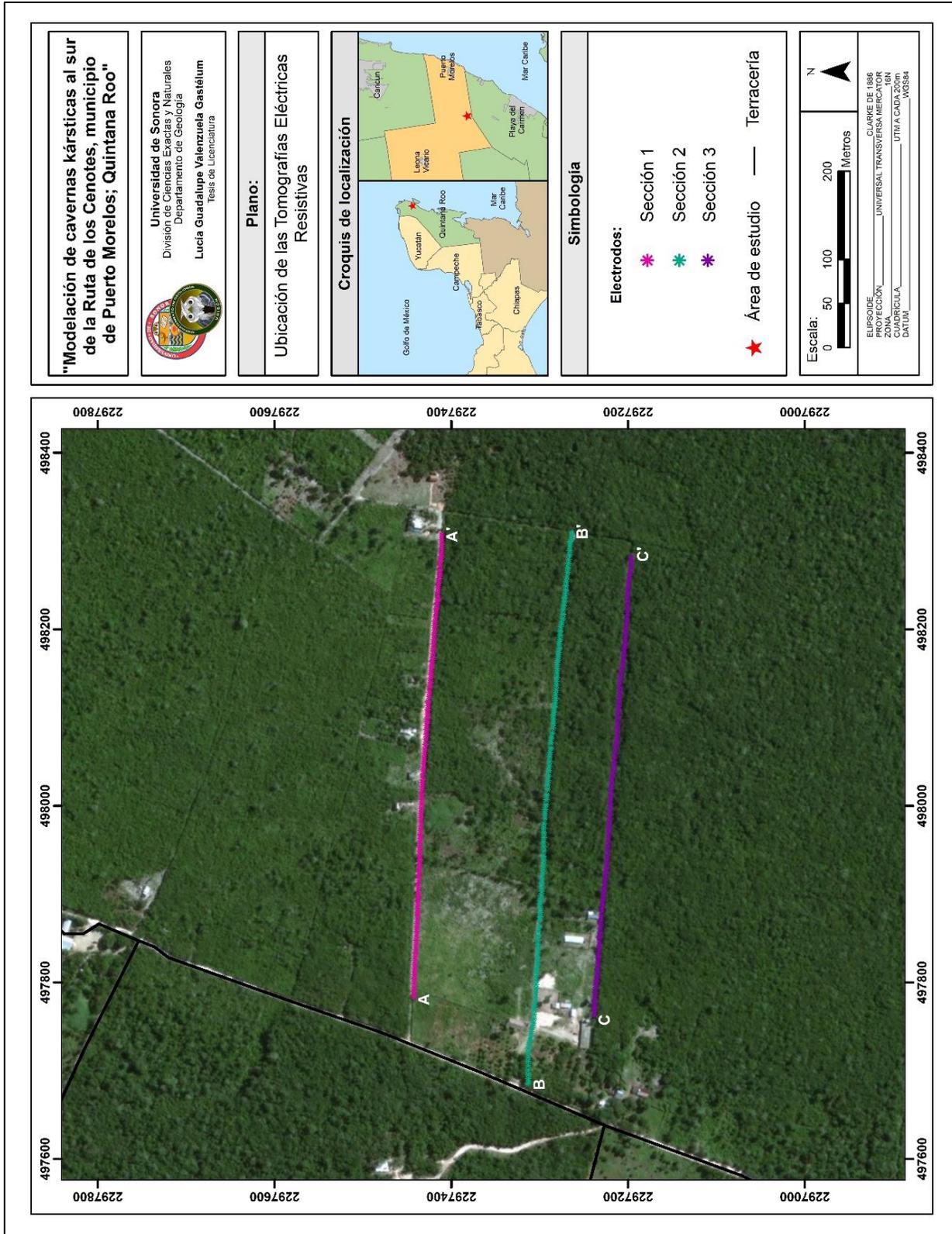
Con los datos obtenidos se integraron 3 secciones (Plano 7), en la Tabla 4 se especifican sus características y posteriormente se describen las interpretaciones.

Se debe considerar que los sondeos son un aporte para la caracterización del área de estudio y complementan la información obtenida previamente.

Sección	Distancia	Electrodos	Rumbo	Punto de inicio*
1	550 m	110	85° SE	497784.21 E, 2297442.57 N Alt. 10 msnm
2	635 m	127	85° SE	497686.13 E, 2297313.13 N Alt. 10 msnm
3	550 m	110	85° SE	497762.82 E, 2297236.62 N Alt. 10 msnm

*(Sistema UTM WGS84 16N)

Tabla 4. Características de las secciones adquiridas



Plano 7. Ubicación de las Tomografías de Resistividad Eléctrica

6.3.1. Sección 1

En la Sección General 1 se tiene una profundidad de investigación máxima en la parte central del sondeo de 70 metros aproximadamente (Figura 11) y se puede separar en tres unidades geoeléctricas importantes de materiales dependiendo de su respuesta a las resistividades (Figura 12).

La Unidad Geoeléctrica U1 se encuentra a lo largo de toda la superficie del terreno sobre la línea de sección, teniendo una profundidad promedio aparente de 10 metros. En el modelo de inversión esta unidad presenta resistividades mayores a 350 ohm.m correspondiendo a calizas masivas con la presencia de pequeñas cavernas de disolución.

La Unidad Geoeléctrica U2 se presenta subyaciendo en contacto irregular a la Unidad Geoeléctrica U1, así mismo presenta inclusiones de la Unidad Geoeléctrica U3. Esta unidad se encuentra a lo largo de toda la línea de sección, apareciendo a una profundidad promedio aparente de 10 metros y extendiéndose hasta la máxima profundidad de investigación. Las resistividades de la unidad varían entre 50 y 400 ohm.m, correspondiendo a calizas saturadas de fluidos inmersos en el fracturamiento y/o disolución de la roca y siendo un factor importante el grado de salinidad del fluido, así como, el grado de fracturamiento de la misma roca.

La Unidad Geoeléctrica U3 se encuentra dentro de la Unidad Geoeléctrica U2 en los intervalos de 140 -195 metros, 230 - 285 metros, 320 - 380 metros y 410 - 440 metros sobre la línea del sondeo a una profundidad promedio aparente de 30 metros. Esta unidad presenta anomalías de muy bajos resistivos con máximos de 5 ohm.m, los cuales corresponden a posibles áreas de cavernas de disolución inundadas de agua dulce - salobre.

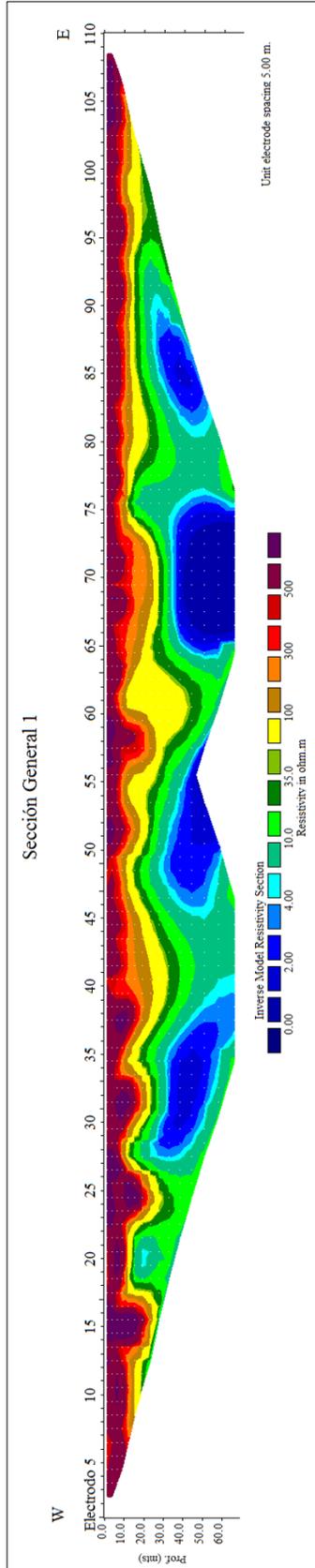


Figura 11. Datos de resistividad obtenidos después de la inversión de datos de la Sección General 1

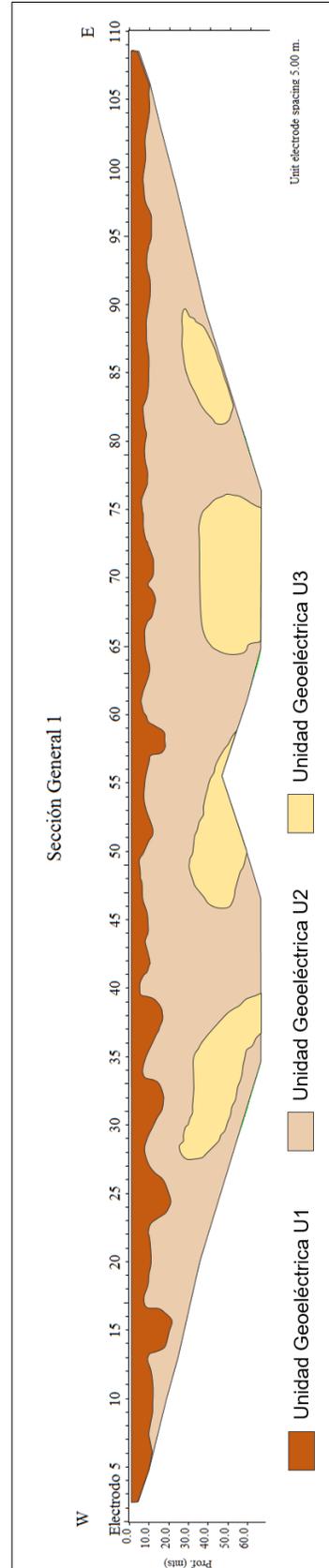


Figura 12. Unidades geoelectrónicas obtenidas para la Sección General 1

6.3.2. Sección 2

En la Sección General 2 se tiene una profundidad de investigación máxima en la parte central del sondeo de 70 metros aproximadamente (Figura 13) y se puede separar en tres unidades geoeléctricas importantes de materiales dependiendo de su respuesta a las resistividades (Figura 14).

La Unidad Geoeléctrica U1 se encuentra a lo largo de los 635 metros de la línea de sección, apreciándose en superficie y con un espesor promedio de 10 metros. En el modelo de inversión esta unidad presenta resistividades mayores a 350 ohm.m, correspondiendo a calizas masivas con la presencia de pequeñas cavernas de disolución.

La Unidad Geoeléctrica U2 se encuentra debajo de la Unidad Geoeléctrica U1 con inclusiones de la Unidad Geoeléctrica U3. Esta unidad se encuentra a lo largo de toda la línea de sección, apareciendo a una profundidad promedio aparente de 10 metros, extendiéndose verticalmente hasta la máxima profundidad de investigación. Las resistividades de la unidad varían entre 50 y 400 ohm.m, correspondiendo a calizas saturadas de fluidos inmersos en el fracturamiento y/o disolución de la roca y siendo un factor importante el grado de salinidad del fluido, así como, el grado de fracturamiento de la misma roca.

La Unidad Geoeléctrica U3 se presenta dentro de la Unidad Geoeléctrica U2 en los intervalos de 130 - 220 metros, 370 - 435 metros y 495 - 530 metros sobre la línea del sondeo a una profundidad aparente de 35 metros y en el intervalo de los 280 a los 300 metros sobre la línea de sección, se observa somerizando a una profundidad aparente de 20 metros. La unidad presenta anomalías de muy bajos resistivos con máximos de 5 ohm.m, los cuales corresponden a posibles áreas de cavernas de disolución inundadas de agua dulce - salobre.

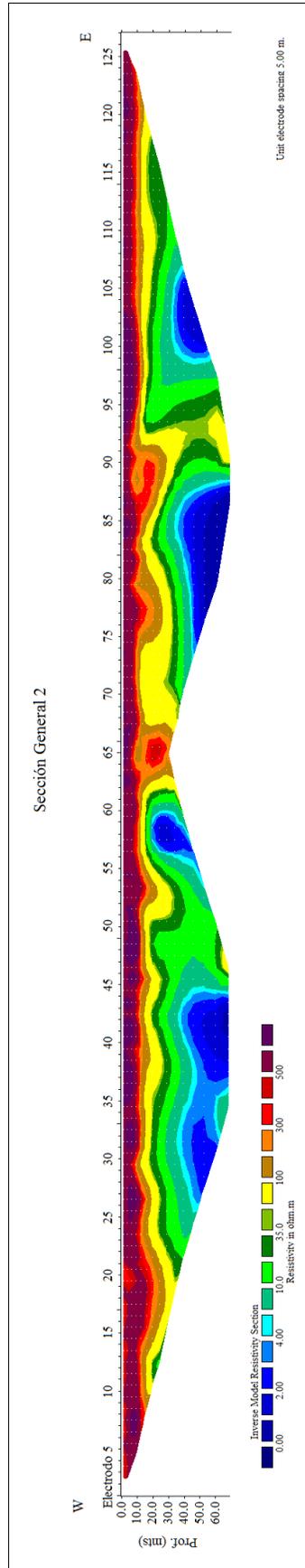


Figura 13. Datos de resistividad obtenidos después de la inversión de datos de la Sección General 2

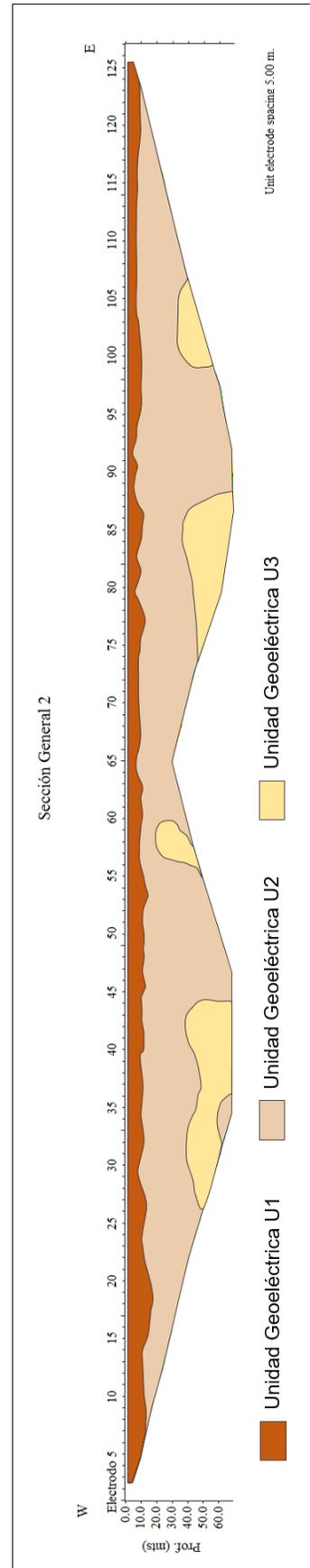


Figura 14. Unidades geoelectrónicas obtenidas para la Sección General 2

6.3.3. Sección 3

En la Sección General 3 se tiene una profundidad de investigación máxima en la parte central del sondeo de 70 metros aproximadamente (Figura 15) y se puede separar en tres unidades geoelectricas importantes de materiales dependiendo de su respuesta a las resistividades (Figura 16).

La Unidad Geoelectrica U1 se observa en superficie a lo largo de toda la línea del sondeo, teniendo un espesor promedio de 10 metros. En el modelo de inversión esta unidad presenta resistividades mayores a 350 ohm.m, correspondiendo a calizas masivas con la presencia de pequeñas cavernas de disolución.

La Unidad Geoelectrica U2 se observa subyaciendo a la Unidad Geoelectrica U1 con inclusiones de la Unidad Geoelectrica U3. Esta unidad se extiende horizontalmente a lo largo de toda la línea de sección y verticalmente aparece desde una profundidad promedio aparente de 10 metros hasta la máxima profundidad de investigación. Las resistividades de la unidad varían entre 50 y 400 ohm.m, correspondiendo a calizas saturadas de fluidos inmersos en el fracturamiento y/o disolución de la roca y siendo un factor importante el grado de salinidad del fluido, así como, el grado de fracturamiento de la misma roca.

La Unidad Geoelectrica U3 se presenta dentro de la Unidad Geoelectrica U2 en los intervalos de 120 - 200 metros, 270 - 295 metros, 305 - 370 metros y 450 -470 metros sobre la línea del sondeo a una profundidad aparente de 30 metros. Esta unidad presenta anomalías de muy bajos resistivos con máximos de 5 ohm.m los cuales corresponden a posibles áreas de cavernas de disolución inundadas de agua dulce - salobre.

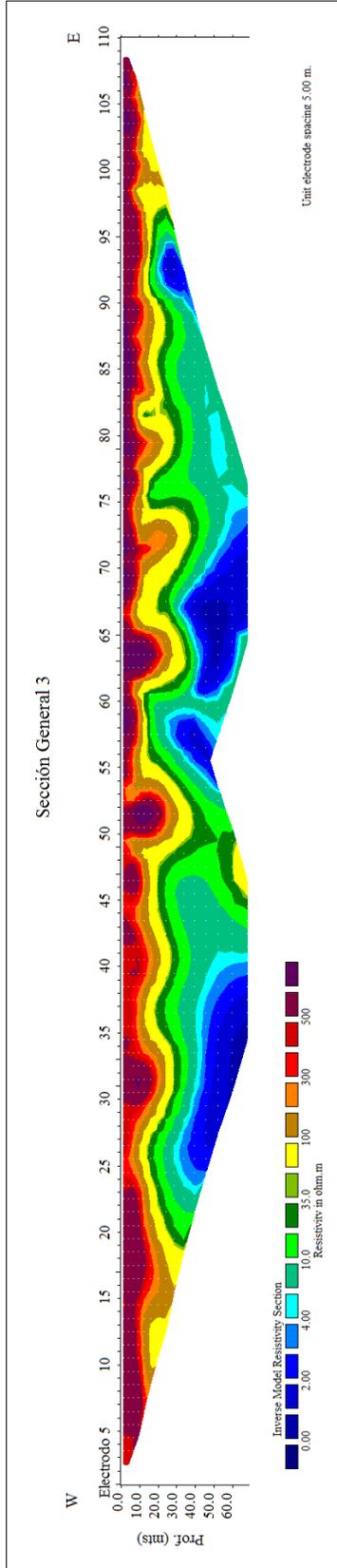


Figura 15. Datos de resistividad obtenidos después de la inversión de datos de la Sección General 3

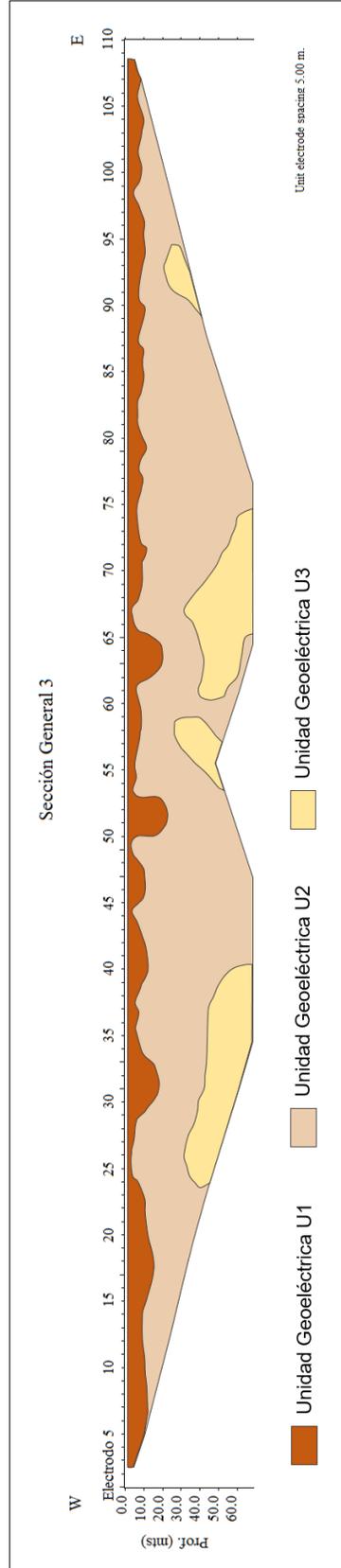


Figura 16. Unidades geoelectrónicas obtenidas para la Sección General 3

7. Geoestadística

En los años 60, Matheron definió el término geoestadística, siendo así reconocido como el padre de dicha disciplina. Matheron se encargó de formalizar y generalizar matemáticamente el conjunto de técnicas desarrolladas por D. G. Krige en 1941 que explotaban la correlación espacial para hacer predicciones en la evaluación de reservas de las minas de oro en Sudáfrica (Díaz-Viera, 2002).

La geoestadística corresponde a una rama de la estadística aplicada a fenómenos regionalizados, es decir que se desarrollan en el espacio o tiempo, y su objetivo es analizar las relaciones espaciales entre los datos disponibles y los diferentes volúmenes a estudiar (Caceres, 2010).

El prefijo “geo” hace referencia a las ciencias de la tierra, pues ha sido esta la disciplina en la cual se ha desarrollado principalmente. Por su parte “estadística” se refiere a la utilización de herramientas estadísticas y probabilísticas, busca tomar en cuenta las relaciones entre las observaciones disponibles considerando que están ubicadas en el espacio (Emery, 2013).

La geoestadística se ubica dentro de la estadística espacial, la cual se refiere la reunión de un conjunto de metodologías apropiadas para el análisis de datos que corresponden a la medición de variables aleatorias en diversos sitios (puntos del espacio o agregaciones espaciales) de una región (Giraldo, 2002).

Una de las características principales de la geoestadística es el uso de variogramas de técnicas relacionadas para cuantificar y modelar la correlación espacial de la estructura. También incluye algunas otras técnicas como el kriging, el cual utiliza modelos de correlación espacial (Díaz-Viera, 2002).

La geoestadística ha sido ampliamente aplicada en diversas ramas de las ciencias y las ingenierías, como: petróleo, minería, geofísica, hidrogeología, medio ambiente, estudios forestales, salud pública, ingeniería civil, procesamiento de imágenes, cartografía, ciencias de materiales, meteorología, edafología, entre otras.

Dentro de su aplicación se tiene la exploración de los procesos de variación espacial, el análisis de información completa obtenida por percepción remota u otra fuente, para determinar muestreos eficientes, así como para estimar los valores en sitios no muestreados.

7.1. Conceptos básicos

Es importante conocer algunos conceptos básicos de geoestadística para comprender los procesos que se llevan a cabo durante el procesado de datos para generar una simulación.

Los conceptos que se mencionan a continuación se describen en base a Emery (2002), Caceres (2010) y Valencia (2016).

Variable aleatoria (VA)

Variable que puede tomar una serie de posibles valores de acuerdo a su distribución de probabilidad.

Variable regionalizada (VR)

Se denota $z(x)$ a la variable distribuida en el espacio de manera tal que presenta una estructura espacial de correlación. Matemáticamente equivale a decir que es una variable aleatoria z definida en un punto en del espacio x , donde en el caso más general x es un punto en el espacio tridimensional.

Variables discretas o categóricas

Permiten codificar un conjunto de dominios que subdividen el espacio o representar variables con un número limitado de valores.

Campo (D)

Es la región del espacio donde tiene lugar el fenómeno regionalizado o hasta donde tiene sentido estudiarlo. Es usual trabajar en una porción del campo denominada Dominio.

Soporte

Corresponde al volumen sobre el cual se define la variable regionalizada. Para aplicar las técnicas de cambio de soporte, es necesario que el valor de la VR en un volumen corresponda a la media de los valores puntuales dentro del volumen.

Función aleatoria (FA)

Los modelos geoestadísticos consideran el valor $z(x)$ de la variable regionalizada en un sitio x del campo D como una realización de una variable aleatoria $Z(x)$. Cuando x recorre D , se obtiene un conjunto de variables aleatorias $Z = \{Z(x), x \in D\}$ que constituye una función aleatoria. Así pues, la variable regionalizada $z = \{z(x), x \in D\}$ es una realización de la función aleatoria Z .

Distribución espacial

Consideremos una función aleatoria $Z = \{Z(x), x \in D\}$ y una serie de sitios $\{x_1, \dots, x_k\}$ en D . El grupo de variables aleatorias $\{Z(x_1), \dots, Z(x_k)\}$ está caracterizado por una función de distribución multivariable que depende de k argumentos:

$$F_{x_1, \dots, x_k}(z_1, \dots, z_k) = \text{Prob}\{Z(x_1) < z_1, \dots, Z(x_k) < z_k\} \forall z_1, \dots, z_k \in \mathbb{R}.$$

El conjunto de funciones de distribución, para todos los enteros k y todas las elecciones posibles de $\{x_1, \dots, x_k\}$ en D , constituye la distribución espacial de la función aleatoria.

7.2. Simulación geoestadística

Las simulaciones geoestadísticas corresponden a un conjunto de metodologías que pretenden generar diferentes escenarios de una potencial realidad, a partir de cierto nivel de información disponible (Caceres, 2010).

Debido a que no se puede tener conocimiento exacto de la realidad in situ y la información disponible en muchos casos esta usualmente muy fragmentada y se limita a muy pocos puntos muestrales, las estimaciones obtenidas a partir de dicha información se vuelven demasiado imprecisa por lo que se utiliza la simulación.

Una simulación o modelo numérico consiste en construir una variable regionalizada que es similar a aquella que se estudia, es decir que reproduce su continuidad espacial y también coincide con los valores medidos en los sitios con datos (Emery, 2002).

La simulación no condicional busca construir realizaciones de la función aleatoria que representa la variable regionalizada, pero no toma en cuenta los valores de los

datos. Por otra parte, la simulación condicional restituye los valores medidos en los sitios con datos, teniendo así una simulación realista.

Las simulaciones de variables continuas como lo son las leyes minerales, se utilizan ampliamente para generar modelos de depósitos minerales, y el principal método que se utiliza para simular es el modelo multigaussiano.

La simulación de variables categóricas por su parte, surge cuando se tiene la necesidad de caracterizar unidades geológicas. Los dos principales métodos de simulación son el método de gaussiana truncada y la simulación secuencial de indicadores.

7.2.1. Simulación secuencial de indicadores

Este método fue desarrollado por Alabert (1987b) y Journel (1989), ellos propusieron utilizar la estimación mediante el kriging simple del indicador la cual preserva la media y la covarianza de la FA que comparado con el método de condicionamiento estándar tiene la ventaja de producir simulaciones binarias que reproducen el histograma de la FA (Díaz-Viera, 2002).

El algoritmo de simulación secuencial indicador captura la variabilidad espacial de las características categóricas por medio de un conjunto de variogramas indicador, esto quiere decir que, para crear los modelos, se eligen los variogramas que representen en mayor proporción las variables discretas, las cuales pueden ser el tipo de roca, el tipo de suelo, las categorías de calidad del macizo rocoso o las unidades geoeléctricas (Portilla *et al.*, 2017).

El método secuencial indicador permite mezclar fácilmente datos duros con datos suaves y es un algoritmo muy eficiente, sin embargo, su principal dificultad reside en los problemas de relación de orden del kriging de los indicadores además de que la calidad de la simulación es sensible al tamaño de la vecindad empleada por el kriging (Díaz-Viera, 2002).

7.2.1.1. Kriging de indicadores

El kriging es un término que se utiliza para designar al mejor estimador lineal insesgado y se basa en una transformación de la variable original Z en una variable de distribución Gaussiana (Emery, 2002; Díaz-Viera, 2002).

Uno de los principales propósitos de utilizar la variable indicador es para estimar la función de probabilidad acumulativa a partir de combinaciones lineales de la función indicador. Esta es la proporción exacta de valores menores que el valor de corte de una variable situada en un área A (Díaz-Viera, 2002).

El valor estimado mediante el kriging indicador representa la probabilidad de que el valor estimado de la función aleatoria sea menor que el valor de corte $\{Z(x) \leq z_c\}$. Se genera un mapa por cada valor de corte, en donde se muestran las regiones con diferente probabilidad de ocurrencia para dicho valor de corte.

7.3. Análisis de datos

Para caracterizar la variabilidad espacial de las variables categóricas se utilizará el método de indicadores, es decir la presencia o ausencia de la unidad geoeléctrica de importancia en este estudio. Este método permite estimar la distribución espacial de dicha unidad.

Considerando a K como las distintas unidades geoeléctricas y siendo estas mutuamente excluyentes, solo una categoría puede existir en una ubicación en particular.

$$i(\mathbf{u}; K) = \begin{cases} 1, & \text{si } K \text{ existe en } \mathbf{u} \\ 0, & \text{si } K \text{ no existe en } \mathbf{u} \end{cases}$$

Los datos adquiridos registran coordenadas en X, Y y Z y cada uno está asociado a una unidad geoeléctrica. En la Tabla 5 se presenta la codificación de la base de datos.

Código	Unidad Geoeléctrica
UG 1	Caliza masiva con cavernas
UG 2	Caliza fracturada saturada de fluidos
UG 3	Cavernas kársticas inundadas

Tabla 5. Codificación de unidades geoeléctricas

Una vez que se tienen categorizados los datos se procede a realizar un análisis exploratorio, el cual es un conjunto de técnicas estadísticas y gráficas con las cuales

se pretende entender las características y el comportamiento de los datos que se están estudiando.

El análisis siempre es de las etapas iniciales de cualquier simulación, pues con ello se verifica la consistencia de los datos, mediante el análisis de su distribución global, la determinación de datos atípicos o aberrantes, registros duplicados, entre otros.

El análisis de los datos tiene como objetivo determinar la cantidad, calidad y ubicación de los datos existentes y anticipar posibles dificultades que puedan surgir en la etapa de estimación local.

La base de datos cuenta con 3,883 datos adquiridos, correspondientes a tres secciones de resistividad eléctrica (Figuras 17 y 18).

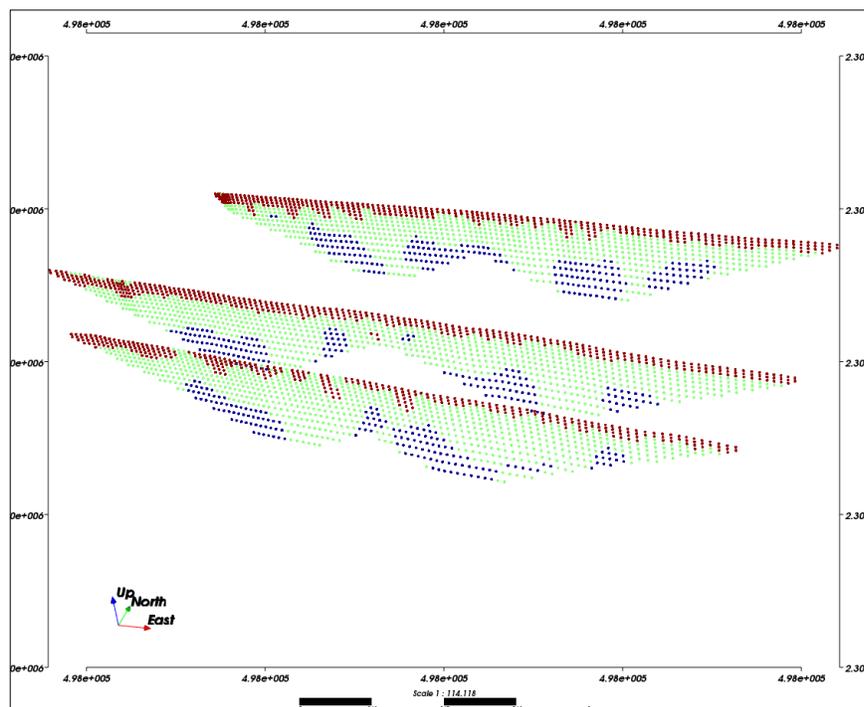


Figura 17. Ubicación 3D de las secciones de resistividad eléctrica con vista al NW

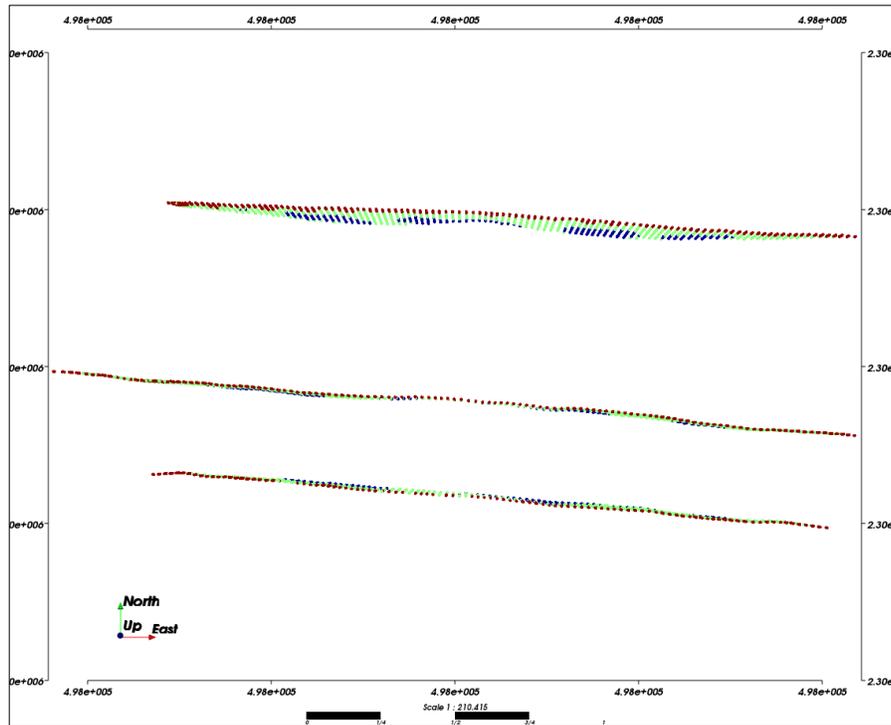


Figura 18. Vista en planta de las secciones de resistividad eléctrica adquiridas

En la Tabla 6 se muestran las características espaciales de los datos y del grid que se utilizó para realizar la simulación, esto con el fin de estandarizar todos los resultados obtenidos (Figura 19).

Dirección	Coordenadas al origen*	Celdas**
X	497,680.00	650
Y	2,297,120.00	380
Z	-65	90

* Sistema WGS84 R16N **La dimensión de las celdas en metros es de (1, 1, 1)

Tabla 6. Características espaciales de los datos

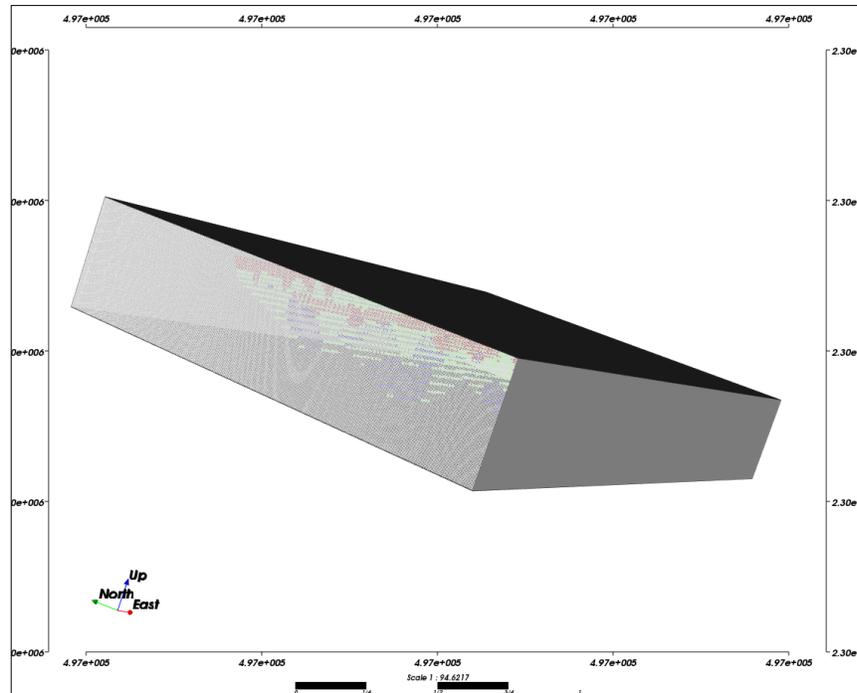


Figura 19. Grid del área de estudio

7.3.1. Análisis estadístico

El análisis estadístico es un estudio preliminar que sirve para detectar datos aberrantes, duplicados o inconsistencias en el código de las unidades geoelectricas, los cuales pudiesen afectar el trabajo posterior.

En la Figura 20 se muestra el histograma que representa las frecuencias de ocurrencia de cada unidad geoelectrica. Este proceso consiste en dividir el rango de los valores en intervalos y visualizar la proporción de datos que caben dentro de cada intervalo.

En la Tabla 7 se muestran los códigos de cada unidad geoelectrica, así como los porcentajes y el número de datos adquiridos por unidad.

Código	%	Datos adquiridos
UG 1	14	543
UG 2	55	2136
UG 3	31	1204

Tabla 7. Porcentaje y número de datos adquiridos por unidad geoelectrica

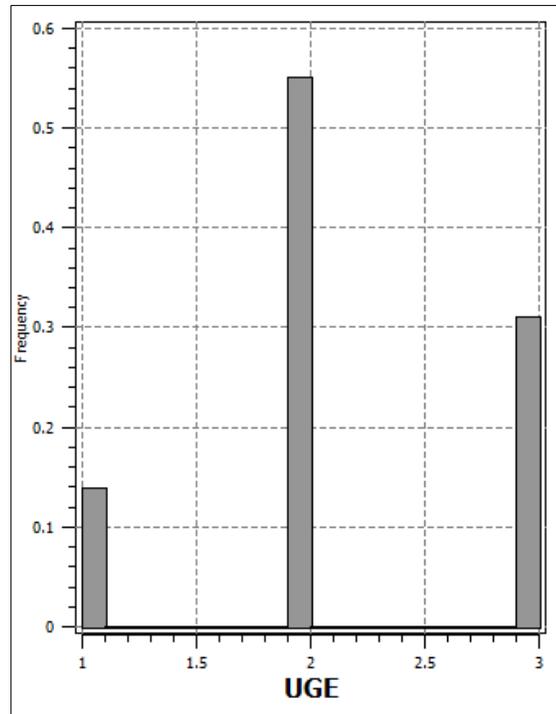


Figura 20. Histograma de los datos adquiridos de resistividad eléctrica

7.3.2. Análisis variográfico

Los mapas variográficos en todas las direcciones del espacio sirven para distinguir si existe anisotropía y posteriormente se puede calcular el modelo de variograma a lo largo de las direcciones principales de anisotropía.

Una vez obtenido el mapa variográfico para la unidad geoelectrica de importancia, se determina si tiene una dirección de anisotropía y en caso de ser así, se calculan las direcciones principales o de lo contrario se determinan omnidireccionales.

En el caso de este estudio, se decidió no realizar los variogramas debido a que en base al modelo geológico interpretado se tienen materiales con distribuciones muy homogéneas.

7.4. Simulación de cavernas kársticas

En la simulación se utilizó un software libre de geoestadística para el análisis y procesado de los datos y se aplicaron diferentes elipsoides de búsqueda hasta ajustar el modelo geológico conceptual de las cavernas kársticas a la simulación.

7.4.1. Simulación 1

En esta simulación se delimitó una interpolación a 10 metros a cada lado de las líneas de sección, las cuales representan una pequeña área de influencia. Se puede observar la simulación con muy buena delimitación de las cavernas kársticas, lo que permite considerar que se tiene más extensión de las cavernas hacia las otras líneas de sección.

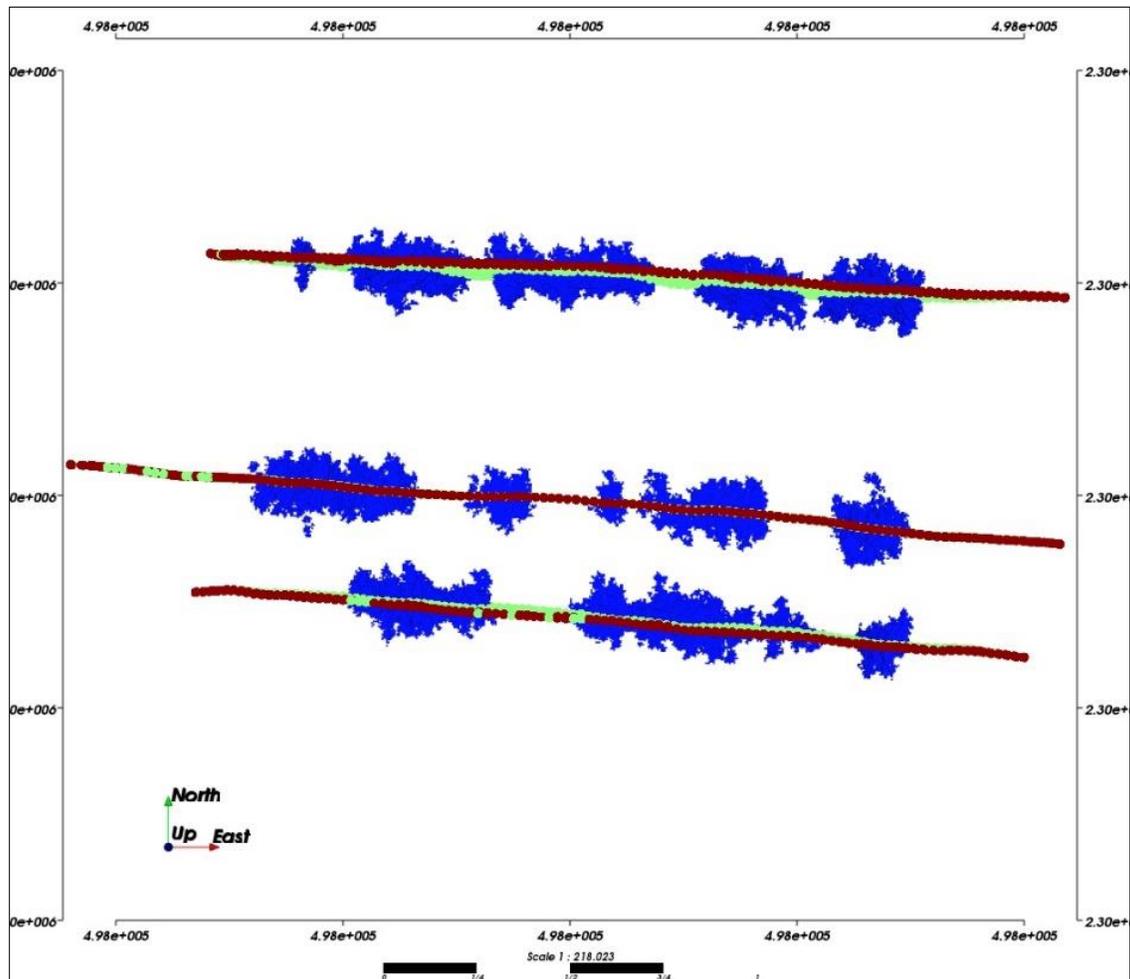


Figura 21. Vista en planta de simulación a 10 metros

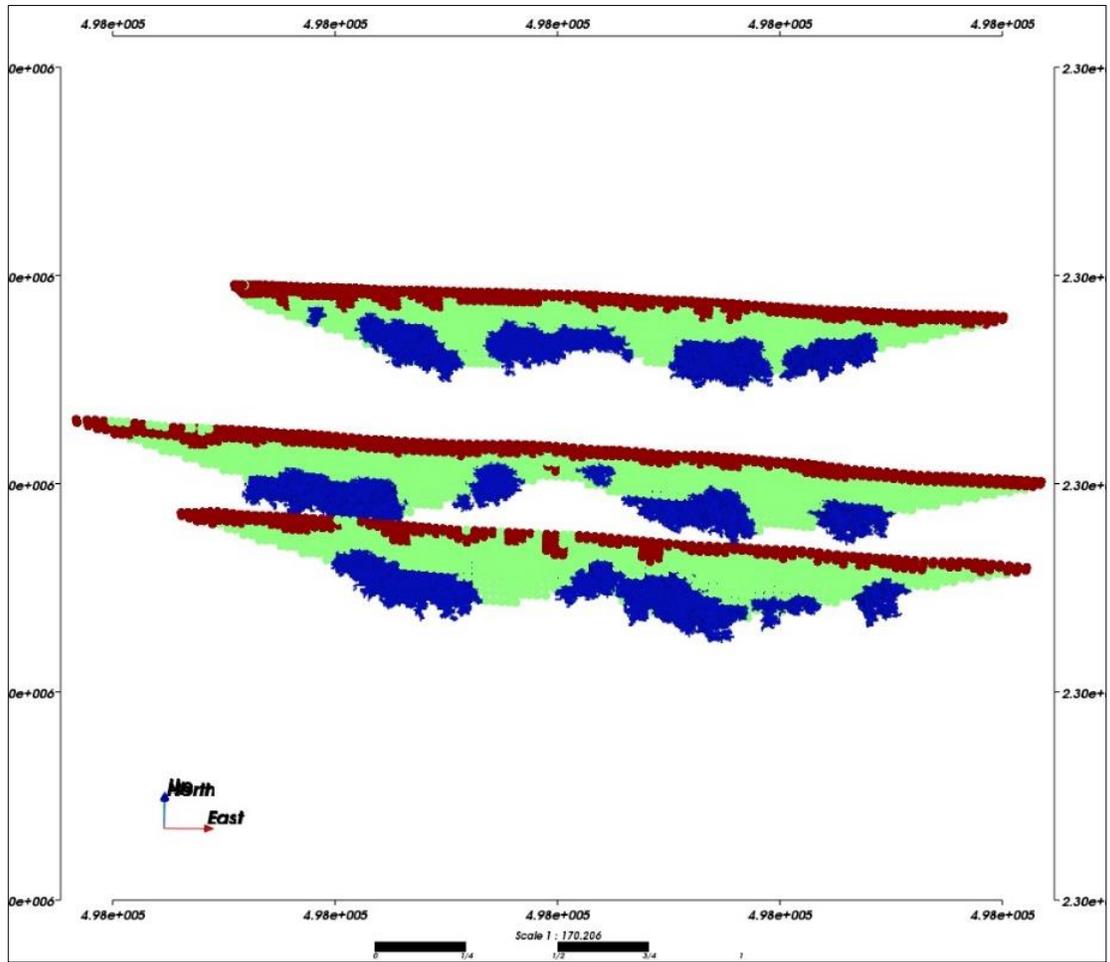


Figura 22. Simulación de cavernas kársticas a 10 metros con vista al norte

7.4.2. Simulación 2

Para el segundo elipsoide se utilizó una interpolación de 25 metros a los lados de las líneas de sección, mostrando un área de influencia conservadora de las cavernas kársticas. La simulación con esta área de influencia refuerza el modelo conceptual, ya que se tiene un correlación muy razonable y continua de la Unidad Geoelectrónica 3. Esta simulación es la más ajustada a la realidad.

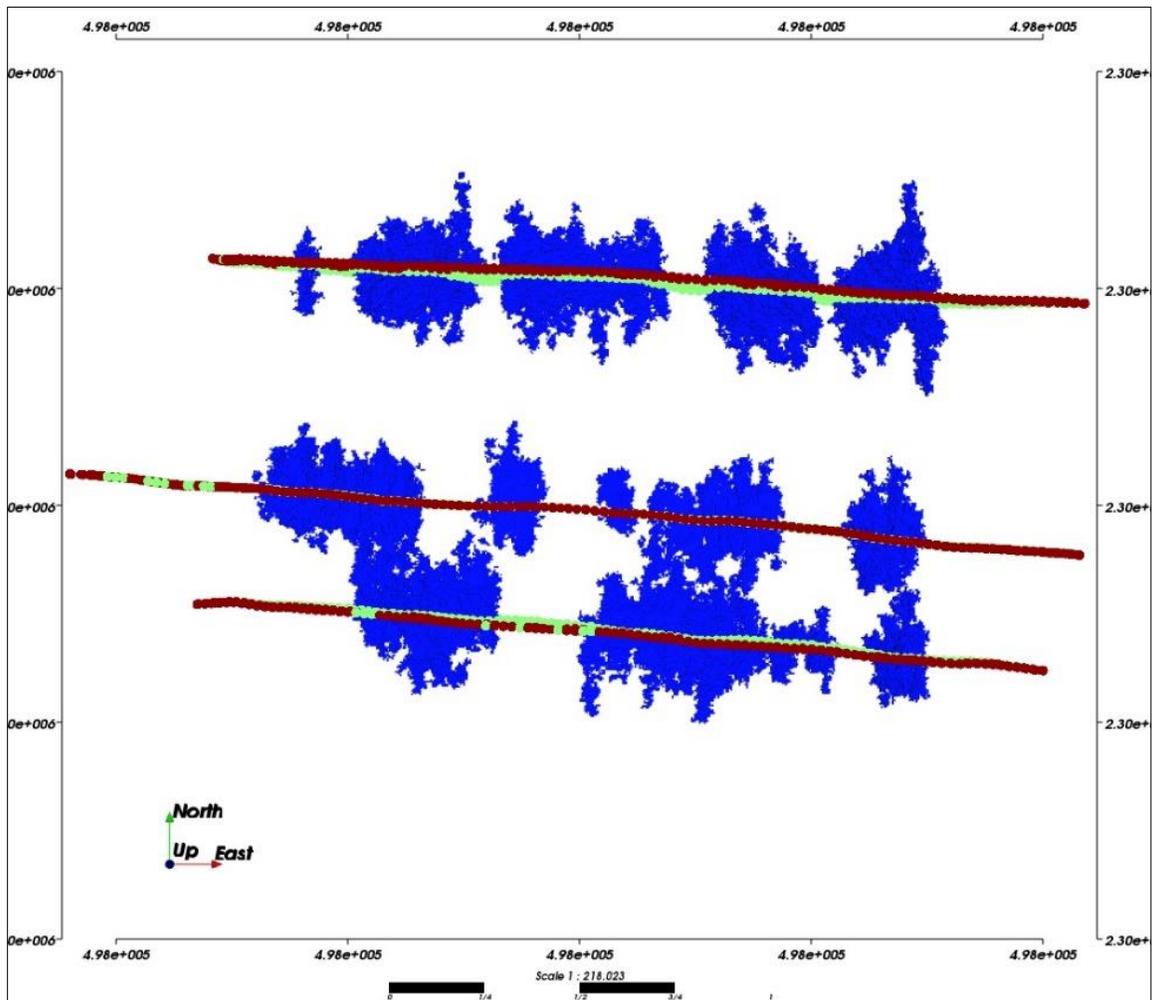


Figura 23. Vista en planta de simulación a 25 metros

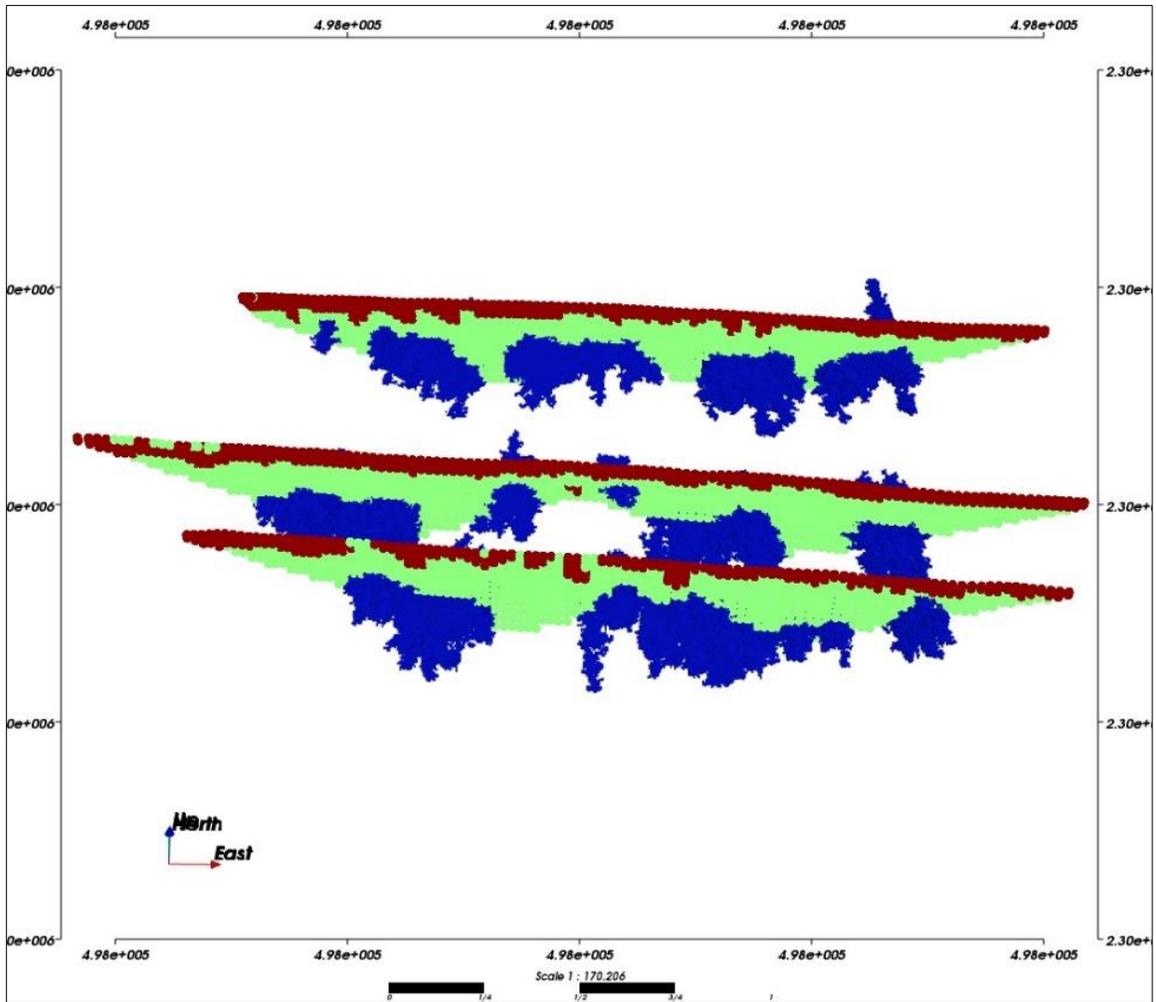


Figura 24. Simulación de cavernas kársticas a 25 metros con vista al norte

7.4.3. Simulación 3

Se realizó una tercera interpolación de 50 metros a cada lado de las secciones, esto para visualizar el comportamiento de las cavernas en longitudes mayores. Aunque la simulación es ambiciosa y geoméricamente lineal, se puede mantener dentro del modelo conceptual, sin embargo, dado el espaciamiento entre las secciones las probabilidades son menos favorables.

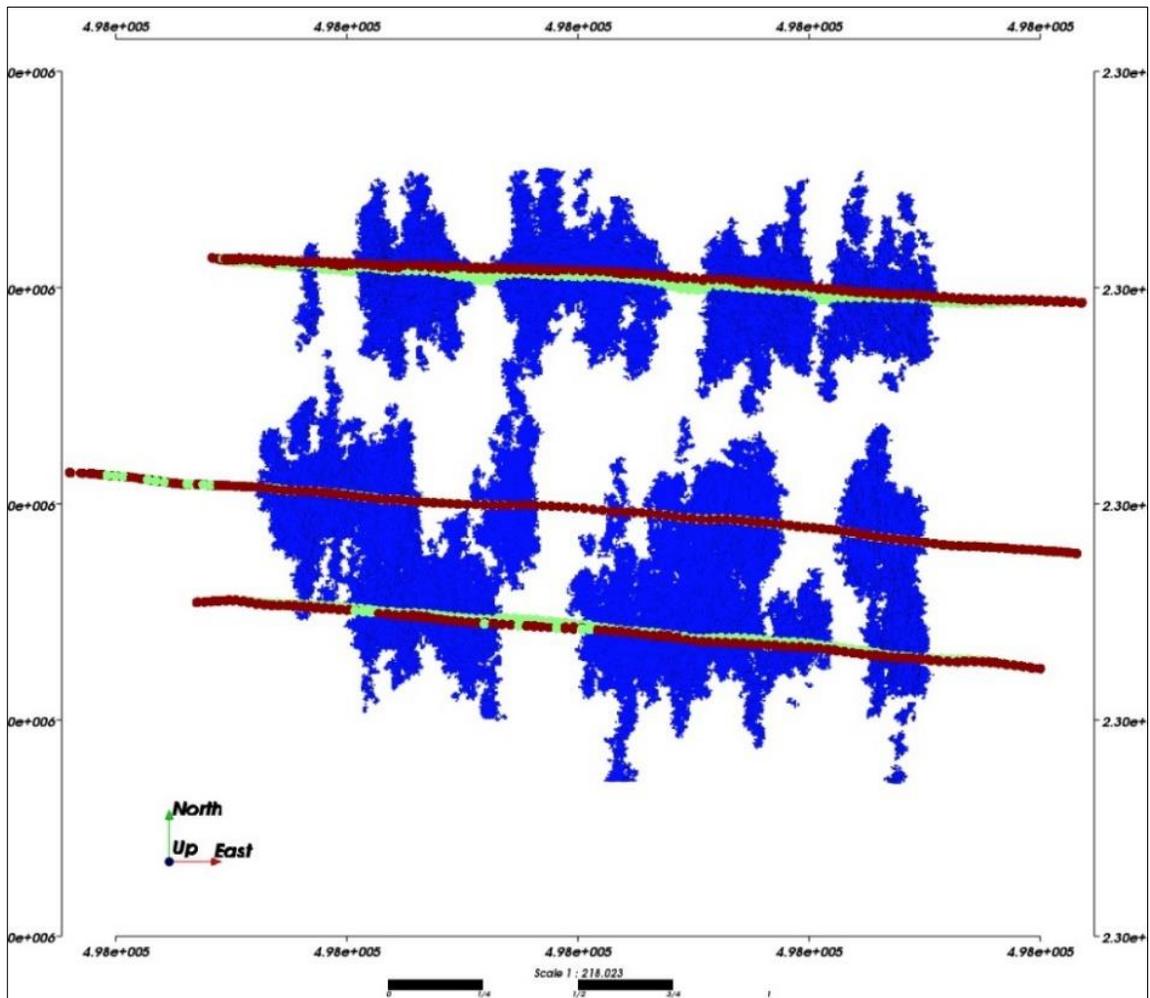


Figura 25. Vista en planta de simulación a 50 metros

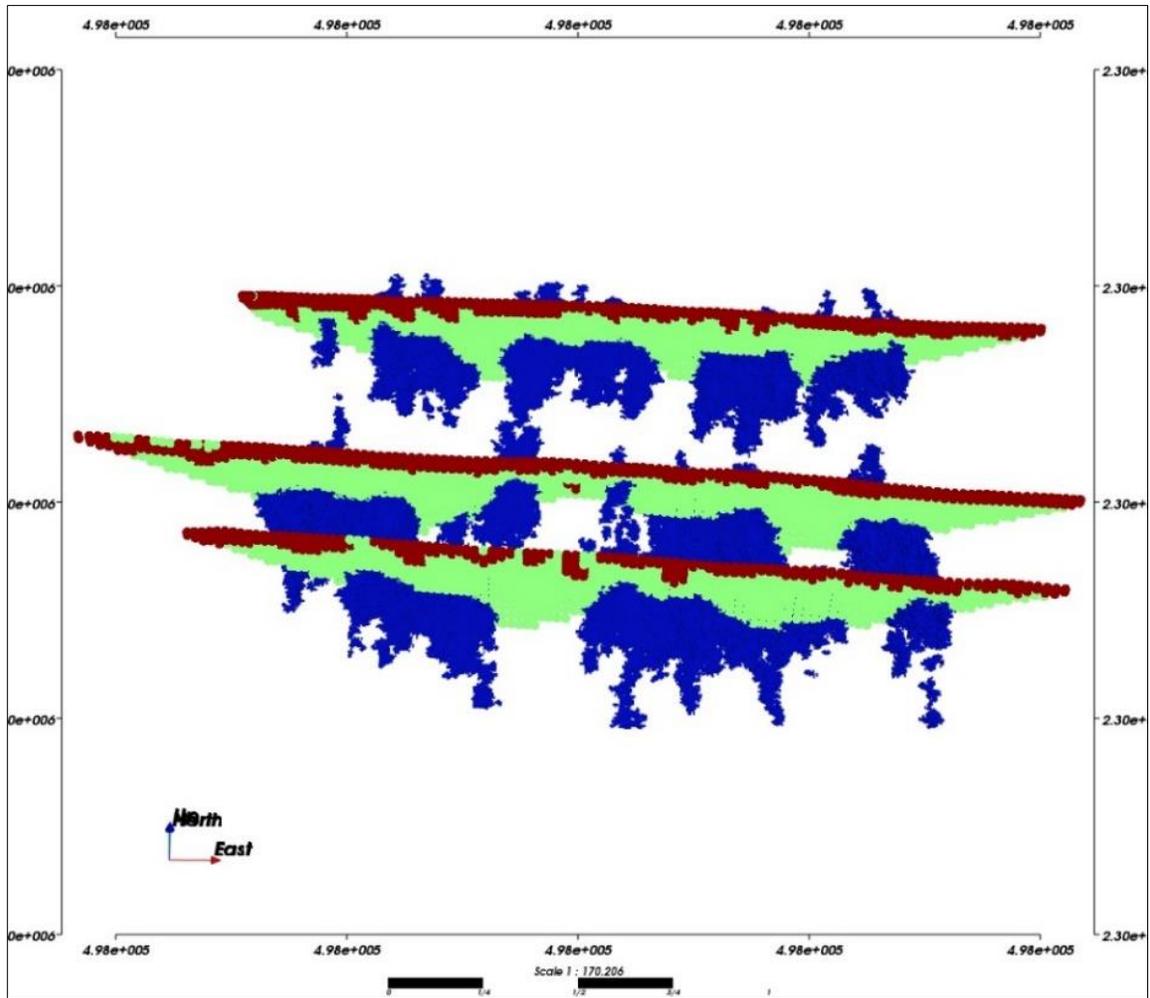


Figura 26. Simulación de cavernas kársticas a 50 metros con vista al norte

8. Resultados

Se realizó una correlación de las seis tomografías eléctricas resistivas con orientación preferencial oeste-este para obtener un total de tres secciones generales. Las líneas de sección general son el empate de dos sondeos de 400 metros de longitud cada uno, empalmados de acuerdo con las posibilidades del terreno.

En todos los casos se observó la Unidad Geoeléctrica 1 de forma superficial con aproximadamente 10 metros de profundidad, la cual corresponde a materiales consolidados masivos con anomalías resistivas muy altas, las cuales son indicativas de cavernas de disolución dentro de la misma.

Subyaciendo a la unidad anterior, se tiene la Unidad Geoeléctrica 2 la cual se observa homogéneamente hasta la profundidad de investigación total y está compuesta por materiales sedimentarios químicos saturados gradualmente de fluidos tanto en su porosidad como fracturamiento.

Dentro de la Unidad Geoeléctrica 2 se caracterizó la Unidad Geoeléctrica 3 la cual se asocia a posibles cavernas kársticas inundadas por agua dulce-salobre. Esta unidad se observa en todas las secciones a una profundidad aparente de 35 metros aproximadamente.

Conforme a las interpretaciones anteriores se caracterizaron los rangos de resistividad de las Unidades Geoeléctricas presentes en la zona de estudio los cuales se muestran en la Tabla 8.

UG	Descripción	Resistividad ($\Omega.m$)
UG 1	Calizas masivas con cavernas de disolución	> 350
UG 2	Caliza fracturada con saturación de fluidos	50 - 400
UG 3	Cavernas de disolución inundadas	< 5

Tabla 8. Caracterización de las Unidades Geoeléctricas de la zona de estudio

Con la simulación realizada se pueden observar como las cavernas tienen un área de influencia hacia los lados de las secciones con cierto grado de coincidencia

lineal entre las 3 líneas y permiten tener un panorama general de su distribución en el área de estudio.

Con base al estudio realizado, se determinaron los puntos contenidos en la Tabla 9 para posteriores estudios, como lo es el corroborar la sustentabilidad y resistencia de la superficie. Estos corresponden a las zonas de anomalía determinadas tanto en las secciones como en los modelos tridimensionales y se identifican como las zonas de mayor vulnerabilidad (Plano 8).

Punto	X (m)*	Y (m)*
A	497,847.94	2,297,436.64
B	498,099.86	2,297,415.74
C	497,741.78	2,297,277.85
D	497,964.63	2,297,295.72
E	497,846.31	2,297,235.73
F	498,054.93	2,297,217.27

*Sistema UTM WGS84 R16N

Tabla 9. Puntos de vulnerabilidad en el subsuelo

"Modelación de cavernas kársticas al sur de la Ruta de los Cenotes, municipio de Puerto Morelos; Quintana Roo"

Universidad de Sonora
División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología
Lucía Guadalupe Valenzuela Gastélum
Tesis de Licenciatura



Plano:

Ubicación de los puntos de vulnerabilidad en el subsuelo

Croquis de localización

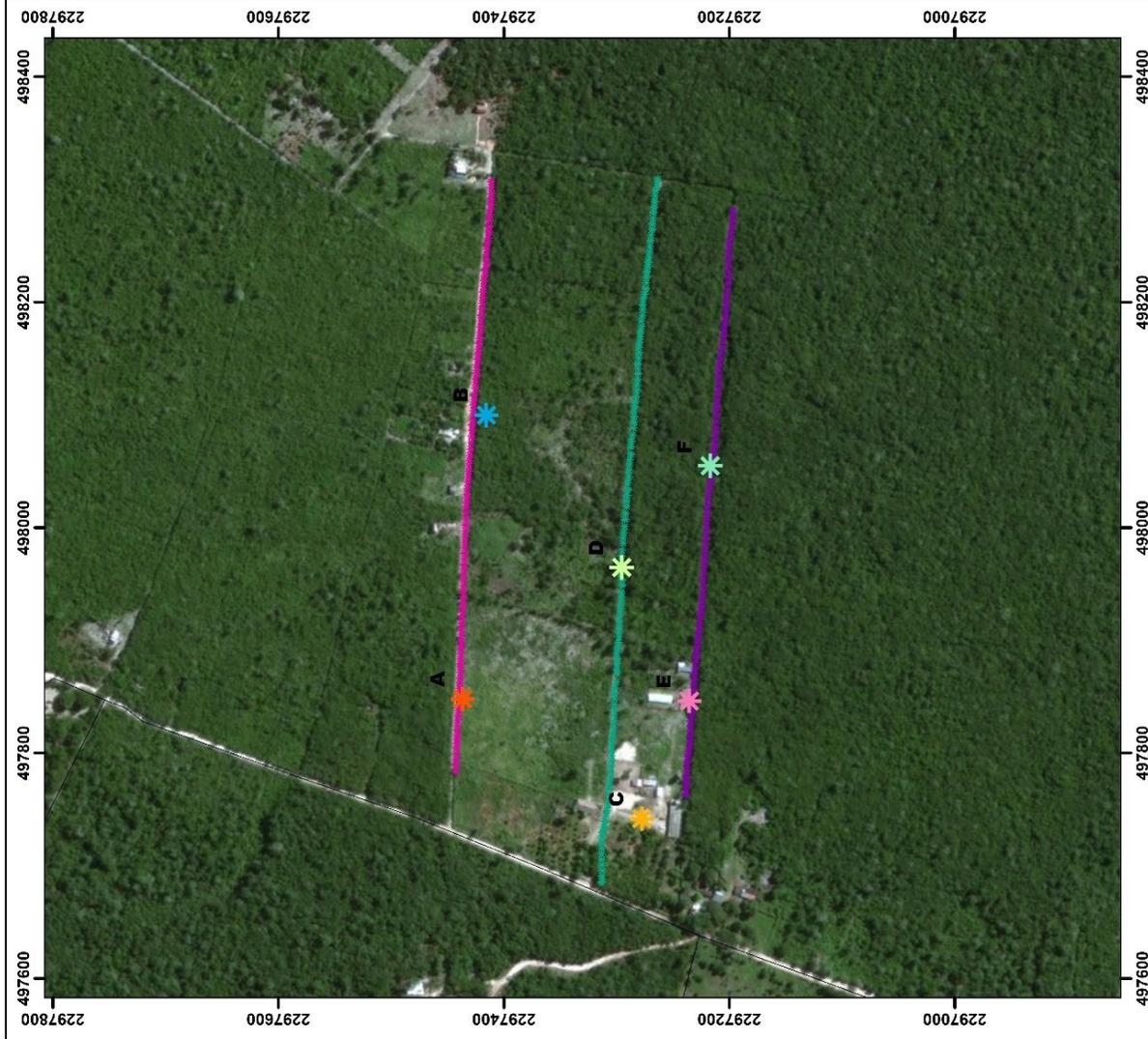


Simbología

- Electrodos:**
- Sección 1 (orange star)
 - Sección 2 (blue star)
 - Sección 3 (yellow star)
- Puntos de vulnerabilidad:**
- A (green star)
 - B (pink star)
 - C (yellow star)
 - D (light green star)
 - E (purple star)
 - F (light blue star)
- Área de estudio (red star) — Terracería (grey line)



ELIPSOIDE: CLARKE DE 1886
PROYECCIÓN: UNIVERSAL TRANSVERSA MERCATOR
ZONA: CUADRICULA UTM A CADA 200m
DATUM: WGS84



Plano 8. Puntos de vulnerabilidad en el subsuelo

9. Conclusión y recomendaciones

Como parte de este estudio se ubicaron las zonas ideales para realizar seis secciones geofísicas y se adquirieron datos de resistividad mediante tomografías eléctricas resistivas.

Se realizó el procesado de los datos adquiridos y se determinaron las unidades geoelectricas de la zona de estudio, con base a los datos de resistividad que se tienen para los materiales del subsuelo de la Península de Yucatán.

Se aplicó la técnica geoestadística de Simulación Secuencial de Indicadores a los datos obtenidos mediante la utilización de un software libre y con esto se realizó una modelación en 3D de las cavernas kársticas.

Con base al estudio se determinaron las zonas de mayor vulnerabilidad en el subsuelo dentro del área de estudio.

Se recomienda como estudios posteriores en zonas similares de investigación, realizar mecánica de suelos en áreas catalogadas como vulnerables con el fin de prevenir posibles incidentes de subsidencia de la superficie o colapsos.

Del mismo modo, es recomendable que en las áreas donde se observen anomalías representativas (bajas o altas), se realicen tomografías eléctricas resistivas a mayor detalle, es decir con menor espaciamiento entre los electrodos de corriente y potencial, así como mayados más cerrados o densos para obtener imágenes más precisas de dichas áreas y poder definir con mayor precisión los límites de las mismas geoméricamente hablando.

Anexo I

Debido a las condiciones geológicas presentes en la península de Yucatán se deben implementar técnicas para la investigación del subsuelo, en este caso para un reconocimiento litológico del mismo.

Se utilizó la técnica del buceo científico, la cual es una herramienta muy útil para la investigación de ambiente con acceso restringido. Una de sus ventajas es que permite estudiar, coleccionar y llevar a cabo experimentos en ambientes donde no cualquier persona puede tener acceso (Caramanna, 2013).

En ambientes como cavernas o lagos con accesos restringidos o difíciles se debe tener la capacidad de identificar y ubicar los riesgos presentes. Estos pueden estar relacionados a condiciones ambientales como visibilidad, la presencia de obstrucciones o aguas contaminadas; por otra parte también puede deberse específicamente al uso de herramientas para la recolección de datos.

Previo al muestreo, se realizó un curso de buceo en aguas abiertas, con el fin de aprender a utilizar el equipo básico y los conocimientos generales de buceo (Fotografía 7).



Fotografía 7. Curso de buceo en aguas abiertas A) Teoría B) Práctica

El equipo básico consta de dos partes esenciales, el equipo personal conformado por: visor, snorkel, aletas, traje de neopreno, lastre y computadora de buceo y por otra parte está el equipo autónomo de respiración, el cual consta de: regulador, chaleco compensador de flotabilidad y tanque de aire.

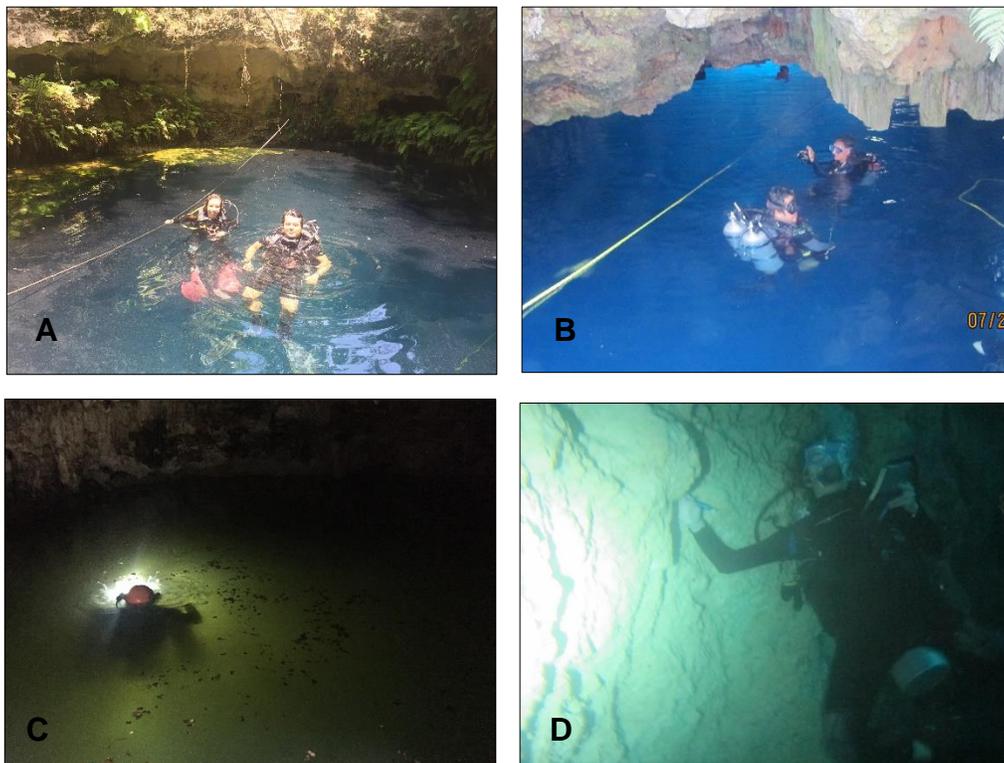
Adicionalmente se requirieron herramientas para la toma de muestras como los son marros, cinceles, bolsas para muestras y tablas para buceo.

Para la recolección de muestras se utilizaron bolsas marcadas con claves previamente, esto debido a que bajo el agua no se podrían o sería muy complicado señalar las muestras.

Se seleccionaron tres sitios para la recolección de muestras basados en las características de cada uno, como lo son la profundidad adecuada y la apertura de la caverna (Fotografía 8-A, B, C).

Cada buceo tuvo una profundidad máxima de 30 metros y a partir de ahí se tomaron muestras cada tres metros o en lugares donde se tuvieran cambios muy evidentes en litologías (Fotografía 8-D).

Para cada muestra se tomaban los datos de profundidad y de las características que se pudieran apreciar. Al finalizar se midió el nivel del agua en el sitio para poder realizar la corrección de las profundidades.



Fotografía 8. Sitios de muestreo A) Cenote Maravilla B) Cenote 7 Bocas C) Cenote Holbox D) Buceo del Cenote 7 Bocas

Bibliografía

- Bakalowicz, M. (2005).** "Karst groundwater: a challenge for new resources". Hydrogeology Journal, 13, p.148-160.
- Bauer-Gottwein, P., Gondwe, B., Charvet, G., Rebolledo-Vieyra, M., & Merediz-Alonso, G. (2011).** "The Yucatan Peninsula karst aquifer, Mexico". Hydrogeology Journal, 19, p. 507-524.
- Beddows, P., Blanchon, P., Escobar, E., & Torres-Talamante, O. (2007).** "Los cenotes de la Península de Yucatán". Arqueología mexicana (83), p. 32-35.
- Caceres, A. (2010).** "Simulación conjunta de unidades geológicas y leyes de cobre en el sector sur-sur del depósito Río Blanco-Los Bronces". Chile: Universidad de Chile.
- Caramanna, G., Kekalainen, P., Leinikki, J., & Maroto-Valer, M. (2012).** "Scientific diving techniques in restricted overhead environments". International Journal of the Society for Underwater Technology, 31(1), p. 13-19.
- Chalikakis, K., Plagnes, V., Guerin, R., Valois, R., & Bosch, F. (2011).** "Contribution of geophysical methods to karst-system exploration: an overview". Hydrogeology Journal, 19, p. 1169-1180.
- CONABIO. (2013).** "Provincias fisiográficas de México".
- CONANP. (2011).** "Estudio para la caracterización y diagnóstico de humedales en Puerto Morelos".
- Díaz-Viera, M. (2002).** "Geoestadística aplicada". México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Emery, X. (2013).** "Geoestadística". Chile: Universidad de Chile.
- Ewusi, A. (2006).** "Groundwater exploration and management using geophysics: northern region of Ghana". Germany: Brandenburg Technical University of Cottbus.
- Ford, D., & Williams, P. (2007).** "Karst hydrogeology and geomorphology". England: John Wiley & Sons.
- Gastelú, M. (2018).** "Determinación de la conductividad hidráulica del acuífero costero en el Norte de Quintana Roo". México: Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.
- Giraldo, R. (2002).** "Introducción a la geoestadística". Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Gondwe, B., Lerer, S., Stisen, S., Marin, L., Rebolledo-Vieyra, M., Merediz-Alonso, G., & Bauer-Gottwein, P. (2010).** "Hydrogeology of the south-eastern Yucatan

- Peninsula: new insights from water level measurements, geochemistry, geophysics and remote sensing*". Journal of Hydrogeology, 389, p. 1-17.
- Isphording, W. (1975).** *"The physical geology of Yucatan"*. Transactions of the Gulf Coast Association of geological, 25, p. 231-262.
- Kambesis, P., & Coke, J. (2013).** *"Overview if the controls on eogenetic cave and karst development in Quintana Roo, Mexico"*. En Coastal karst landforms, USA: Springer Science, p. 347-373.
- Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. (2002).** *"An introduction to geophysical exploration"* (Tercera ed.). USA: Blackwell Science.
- Lara, M. (1993).** *"Divergent wrench faulting in the Belize Southern Lagoon: implications for Tertiary Caribbean plate movements and quaternary reef distribution"*. American Association of Petroleum Geologists, 53(4), p. 1041-1063.
- Loke, M. (1999).** *"Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies"*.
- Loke, M. (2004).** *"Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys"*.
- López-Ramos, E. (1975).** *"Geological summary of the Yucatan Peninsula"*. En The Gulf of Mexico and the Caribbean. USA: Plenum Press, p. 257-282.
- Lugo-Hubp, J., Aceves-Quesada, J., & Espinasa-Pereña, R. (1992).** *"Rasgos geomorfológicos mayores de la Península de Yucatán"*. Universidad Nacional Autónoma de México, 10(2), p. 143-150.
- Marin, L. (1990).** *"Field investigations and numerical simulation of ground-water flow in the karstic aquifer of northwestern Yucatan, Mexico"*. USA: North Illinions University.
- Márquez, L. (2008).** *"Exploración geofísica aplicando métodos geoeléctricos en la zona de la caleta de Xel-Ha, Quintana Roo"*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Marshall, J. (2007).** *"The geomorphology and physiographic provinces of Central America"*. En Central America: geology, resources and hazards. Taylor & Francis, p. 75-122.
- Metwaly, M., & AlFouzan, F. (2013).** *"Application of 2-D geoelectrical resistivity tomography for subsurface cavity detection in the eastern part of Saudi Arabia"*. Geoscience Frontiers, p. 469-476.
- Muchaidze, I. (2008).** *"Imaging in karst terrain using electrical resistivity"*. USA: Missouri University of Science and Technology.
- Neuman, B., & Rahbek, M. (2007).** *"Modeling the groundwater catchment of the Sian Ka'an reserve, Quintana Roo"*. Association for Mexican Cave Studies (18).

- Ochoa, L. (2016).** "Inversión e interpretación 2D y 3D de datos de resistividad eléctrica en el cenote Chac-Mool, Quintana Roo". México: Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.
- Orellana, E. (1972).** "Prospección geoelectrica en corriente continua". Madrid: Paraninfo.
- Panek, T., Margieleski, W., Taborik, P., Urban, J., Hradecky, J., & Szura, C. (2010).** "Gravitationally induced caves and other discontinuities detected by 2-d electrical resistivity tomography: case studies from the Polish Flysch Carpathians". *Geomorphology*, 123, p. 165-180.
- Perry, E., Marin, L., McClain, J., & Velazquez, G. (1995).** "The Ring of Cenotes (sinkholes) northwest Yucatan, Mexico: its hydrogeologic characteristics and association with the Chicxulub Impact Crater". *Geology*, 23, 17-20.
- Portilla, C., Baque, R., Álvarez, A., Vera, O., Malavé, C., Reyes, B., Erazo, R. (2017).** "Simulación de facies mediante un modelo geoestadístico integrado para el desarrollo de un campo petrolero ecuatoriano". *Revista Científica y tecnológica UPSE*, 4(1), p. 146-156.
- Putiska, R., Nikolaj, M., Dostal, I., & Kusnirak, D. (2012).** "Determination of cavities using electrical resistivity tomography". *Contributions to geophysics and geodesy*, 42(2), p. 201-211.
- Ravelo, J. (2006).** "Exploración geofísica del acuífero de Puerto Morelos, Quintana Roo". México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Rebolledo-Vieyra, M., Urrutia-Fucugauchi, J., Marin, L., Trejo-Garcia, A., Sharpton, V., & Soler-Arechalde, A. (2000).** "UNAM scientific shallow-drilling program of the Chicxulub impact crater". *International geology review*, 42, p. 928-940.
- Robinson, E., & Coruh, C. (1988).** "Basic exploration geophysics". USA: Virginia Polymeric Institute and State University.
- SGM. (2006).** "Carta geológico-minera Cozumel F16-11".
- SGM. (2007).** "Carta geológico-minera de los estados de Campeche, Quintana Roo y Yucatán".
- Stevanovic, Z. (2015).** "Karst aquifers: characterization and engineering". Serbia: Springer.
- Sumner, J. (1984).** "Principles of induced polarization for geophysical exploration". (Primera ed., Vol. 5). USA: Elsevier Science.
- Supper, R., Motschka, K., Ahl, A., Bauer-Gottwein, P., Bauer-Gottwein, P., Gondwe, B., Kinzelbach, W. (2009).** "Spatial mapping of submerged cave systems by means of airborne electromagnetics: an emerging technology to support protection of

- endangered karst aquifers*". European Association of Geoscientists & Engineers, p. 613-627.
- Telford, W., Geldart, L., & Sheriff, R. (1990).** *"Applied geophysics"* (Segunda ed.). England: Cambridge University Press.
- University of Auckland. (2013).** *"World map of carbonate rock out-crops"*. New Zealand: School of environment.
- Valencia, C. (2016).** *"Modelación geoestadística de unidades geológicas. Caso Área Palmarejo, Chihuahua"*. México: Universidad de Sonora.
- Weidie, A. (1982).** *"Lineaments of the Yucatan Peninsula and fractures of the central Quintana Roo coast: road log and supplement to 1978 guidebook"*. Geological Society of America Annual Meeting field trip, 10, p. 21-25.
- Weidie, A. (1985).** *"Geology of Yucatan Platform"*. Geology and hydrogeology of the Yucatan and Quaternary geology of northeastern Yucatan Peninsula, p. 1-19.
- Zhou, X. (2008).** *"Determination of aquifer parameters based on measurements of tidal effects on a coastal aquifer near Beihai, China"*. Hydrological Processes, 22(16), p. 3176-3180.