



---

**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

**“CORRELACIÓN DE MODELOS DE RESISTIVIDAD CON  
PARÁMETROS GEOTÉCNICOS PARA LA OBTENCIÓN DE  
MODELOS REPRESENTATIVOS DEL CONJUNTO  
ESTRATIGRÁFICO EN LA CIUDAD DE PROGRESO,  
YUCATÁN”**

**T E S I S**

**PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**INGENIERO GEOFÍSICO**

**PRESENTA:**

**DANIEL VIVEROS OCAMPO**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**M.C. LUIS ENRIQUE GOMEZ CARREÑO**

**ASESOR INTERNO:**

**ING. ISAAC RAÚL SORIANO GARIBO**

**JUNIO 2019**



**CORRELACIÓN DE MODELOS DE RESISTIVIDAD CON PARÁMETROS GEOTÉCNICOS PARA LA OBTENCIÓN DE MODELOS REPRESENTATIVOS DEL CONJUNTO ESTRATIGRÁFICO EN LA CIUDAD DE PROGRESO, YUCATÁN**



**CORRELACIÓN DE MODELOS DE RESISTIVIDAD CON PARÁMETROS GEOTÉCNICOS PARA LA OBTENCIÓN DE MODELOS REPRESENTATIVOS DEL CONJUNTO ESTRATIGRÁFICO EN LA CIUDAD DE PROGRESO, YUCATÁN**



## AGRADECIMIENTOS

*Con la bendición de Dios he podido llegar hasta donde estoy hoy, gracias a la sabiduría, entendimiento y gracia que él derrama sobre mi día con día y a lo largo de estos 5 años, me fue posible la realización de este proyecto de investigación, con el cual doy un paso más en esta hermosa vida que me ha dado.*

*A mi madre:*

*A esa mujer que día con día me tiene en su pensamiento, se preocupa por mi bienestar, mi salud, mi alimentación, pero sobre todo por mí como ser humano. Gracias a ella soy un individuo puntual, comprometido al trabajo, sensible y sobre todo que ama a su familia por sobre cualquier cosa.*

*No alcanzan palabras para agradecer a mi madre, pues gracias a ella es que llegue a la vida. El camino fue difícil en principio, lleno de dudas, dolor, incertidumbre y aun así, con el corazón en la mano, me brindó su bendición y apoyo incondicional, que, hasta el día de hoy, ha sido un motor fundamental para salir adelante.*

*A mi padre:*

*A ese hombre trabajador, responsable, mi ejemplo a seguir, que día con día, mañana con mañana sale a trabajar para que a nuestra familia nunca le falte nada, siempre tan comprensivo, sereno, paciente, quien da lecciones y consejos basados en experiencia de vida y en lo que sus padres le inculcaron, gracias a él soy un hombre honesto, comprometido, respetuoso, caballero y sobre todo que conoce el camino de Dios.*

*Mi padre, siempre apoya mis planes y al mismo tiempo me brinda calma para tomar las cosas a su debido tiempo, me hace reflexionar sobre el porqué de las cosas y cómo es que un hombre lidia con esta vida.*

*A mi hermana:*



*A esa mujer independiente, capaz, que persigue sus sueños, el claro ejemplo de cuando no haces lo que te gusta debes luchar por tus sueños, gracias a ella mis metas son claras y concisas, gracias a ella sé que el camino es difícil, doloroso, pero siempre hay algo mejor esperando tras una nueva oportunidad. De ella aprendí que no hay que temer al futuro, sino enfrentarlo y hacer que suceda.*

*Una mujer noble, caritativa, que ama a su familia y hace todo por hacernos felices a pesar de la distancia. Siempre estaré orgulloso de ser su hermano menor, siempre apoyaré sus planes y me sentiré inspirado por su valentía, fuerza y su constante búsqueda de crecimiento.*

*A mi complemento, Diana:*

*A esa mujer que ha estado desde el principio de esta aventura, quien por azares del destino ha compartido conmigo este proceso de crecimiento, de cambio y me ha apoyado de una manera inimaginable. Gracias a su apoyo incondicional no tiré la toalla, pues este camino represento muchos retos y ella siempre estuvo ahí, a mi lado, apoyándome y dándome ánimos, alentándome a no rendirme, a dar lo mejor de mí y a comprometerme con el camino que yo elegí.*

*Diana, has sido un pilar en esta trayectoria, gracias por la motivación día a día, gracias por el apoyo, gracias por la comprensión, gracias por enseñarme a soñar en grande pero sobre todo gracias por tanto amor.*

*A mi tía Aracely:*

*A esa gran mujer que representa en mi vida un ejemplo a seguir.*

*De mi tía aprendí a luchar por lo que quiero, a trabajar duro y ser constante, a disfrutar cada momento de la vida, a ser feliz haciendo lo que más te gusta, a tener buen contacto con la gente y disfrutar los momentos con familia y amigos.*

*Gracias por tu apoyo incondicional, tía, por siempre alentarme y darme ánimos de seguir adelante, luchando por este y todos mis sueños.*



*A mi tío José Francisco:*

*A ese hombre que me transmitió no solo buenos gustos musicales, sino el hábito de la lectura, el buen desempeño en el tenis. Gracias tío por la enseñanza de siempre estar en busca de más y más conocimiento, de continuar preparándome y llegar lejos en el ámbito profesional.*

*A mis abuelas:*

*2EPD. Abuelita María Luisa.*

*A esas dos grandes mujeres que son un gran ejemplo de vida, pues encontraron la manera de sacar adelante una familia numerosa, porque a pesar de las adversidades no se rindieron, porque ambas ponían a su familia antes que a sí mismas, gracias a ellas conozco la fortaleza verdadera de salir adelante.*

*A la familia Viveros:*

*Gracias a todos y cada uno de ustedes por darme buenos ánimos, por apoyarme y mostrar interés en mi carrera profesional, en mi vida personal y sobre todo en mi vida espiritual, gracias por las buenas enseñanzas y compartir conmigo la palabra de Dios.*

*A la familia Ocampo:*

*Gracias a ustedes, familia, por formar parte importante de mi vida, por transmitirme sus buenos deseos hacia mi persona y mi desempeño profesional, por alentarme siempre cuando estoy de visita, por recibirme en sus hogares con los brazos abiertos. Todos me han brindado un gran apoyo, que por mínimo que parezca, no lo es, sus palabras, sus buenos deseos, sus bendiciones siguen y seguirán conmigo toda mi vida.*

*A la familia Cárdenas Garibay:*



*Gracias por ser parte de la familia, por brindar su confianza y su amistad por tantos años, por siempre estar pendientes de mí, por apoyarme y darme ánimos en todo momento de este camino y de la vida, gracias por todo, ustedes son parte de mi familia.*

*A mis amigos:*

*Gracias por formar parte del largo camino que sin ustedes habría sido aún más difícil y sobre todo aburrido, gracias por sacarme una carcajada, un buen momento, gracias por todo, amigos.*

*A mi asesor, Luis Enrique:*

*Gracias por aceptar la responsabilidad de formar parte de este proyecto de investigación, por brindarme su apoyo cuando apenas lo conocía, por transmitir sus conocimientos de la mejor manera, por su humildad y buena vibra.*

*A mi asesor, Isaac Raúl:*

*Gracias por aceptar desde el momento que le planteé el desarrollo del proyecto, puesto que con su conocimiento pude encaminar este proyecto de investigación.*

*A mis maestros:*

*Gracias a todos y cada uno de los docentes que me transmitieron su vasto conocimiento en las aulas, porque sin ustedes esto no habría sido posible, gracias por su constante trabajo y compromiso con el conocimiento.*

*A SIGSA:*

*Por permitirme ser parte de su cuerpo de trabajo y apoyar en un proyecto de alta importancia.*

*A L&R Cia. Ingeniería Geotécnica:*

*Por permitirme desarrollar habilidades y conocimientos encaminados a la vida laboral.*



**CORRELACIÓN DE MODELOS DE RESISTIVIDAD CON PARÁMETROS GEOTÉCNICOS PARA LA OBTENCIÓN DE MODELOS REPRESENTATIVOS DEL CONJUNTO ESTRATIGRÁFICO EN LA CIUDAD DE PROGRESO, YUCATÁN**



## ÍNDICE

### Resumen/Abstract

### CAPITULO I: INTRODUCCIÓN AL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

1.1	Introducción	17
1.2	Formulación del problema	18
1.3	Justificación de la investigación	19
1.4	Objetivos	19
	1.4.1 Objetivo general	19
	1.4.2 Objetivos específicos	20
1.5	Marco teórico	20
1.6	Hipótesis	23

### CAPITULO II: ÁREA DE ESTUDIO

2.1	Localización	24
	2.1.1 Clima	25
	2.1.2 Vías de comunicación	27
2.2	Geología del sitio	28
	2.2.1 Litología	30
	2.2.2 Geomorfología	32
	2.2.3 Hidrogeología	34

### CAPITULO III: EXPLORACIÓN GEOFÍSICA

3.1	Prospección eléctrica	36
	3.1.1 Antecedentes	36
	3.1.2 Fundamentos del método	37



3.1.3 Propiedad resistiva/conductiva de las rocas	39
3.1.4 Instrumentación y tipos de arreglo	40
3.1.5 Aplicaciones	42
3.1.6 Tomografía eléctrica/ Implementación del método	43
3.1.6.1 Sección 1	44
3.1.6.2 Sección 2	45
3.1.6.3 Sección 3	45
3.1.7 Procesado de datos	46
3.1.8 Interpretación y resultados	50
3.1.8.1 Sección 1	50
3.1.8.2 Sección 2	52
3.1.8.3 Sección 3	54
<b>CAPITULO IV: EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA</b>	
4.1 Geotecnia	57
4.1.1 Fundamentos del Sondeo de Penetración Estándar (SPT)	57
4.1.2 Parámetros geotécnicos	58
4.1.2.1 Capacidad de carga admisible	58
4.1.3 Aplicaciones	61
4.1.4 Instrumentación y ejecución del ensayo	61
4.1.5 Implementación del método	66
4.1.6 Análisis de datos y resultados	69
<b>CAPITULO V: CORRELACIÓN DE RESULTADOS</b>	
5.1 Análisis de resultados independientes de cada método	72



5.1.1 Modelo de resistividades	72
5.1.2 Parámetros geotécnicos	74
5.2 Correlación de métodos y resultados	76
5.3 Confirmación de hipótesis	82
<b>CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	
6.1 Conclusiones	84
6.2 Recomendaciones	86
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	
<b>ANEXOS</b>	
Anexos generales	91
Anexo fotográfico	95



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resistividad de los materiales. (Gasulla, 1999).

Tabla 2. Coordenadas y profundidad de los sondeos realizados.

Tabla 3. Asignación de valores de material y sus propiedades.

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del municipio de Progreso, al N-O de la península de Yucatán. (García-Gil, G. & Graniel, E., Sin fecha)

Figura 2. Localización del área de estudio al sur de la ciudad de Progreso, al norte de la comunidad Framboyanes. (Fotografía recuperada de: Google earth)

Figura 3. Mapa de climas en la República Mexicana, área de estudio situada dentro de la marca color azul. (Recuperado de: <http://www.mapademexico.com.mx/mapa-de-climas-de-mexico>)

Figura 4. Principales vías de comunicación en el municipio de Progreso. (SCT, 2017)

Figura 5. Localización de la región costera noroccidental del estado de Yucatán. (Batllori, E., et al, 2005)

Figura 6. Unidades geográficas funcionales de la zona costera noroccidental del estado de Yucatán. (Batllori, E., et al, 2005)

Figura 7. Carta geológico-minera Tizimín F16-7 Yucatán (INEGI, 2006).

Figura 8. Porción de la carta geológica F16-7 correspondiente al sitio de interés. (INEGI, 2006)

Figura 9. Diagrama de karstificación de la roca. (Velilla, J. & Cáncer, P., 2010)

Figura 10. Provincias fisiográficas de la península de Yucatán.

Figura 11. Red de cenotes del estado de Yucatán.

Figura 12. Diagrama del arreglo multielectrónico. (Knödel, 2007)

Figura 13. Arreglo Wenner.

Figura 14. Arreglo Wenner-Schlumberger.

Figura 15. Arreglo dipolo-dipolo.

Figura 16. Sección 1 (Dirección preferencial S-N).

Figura 17. Sección 2 (Dirección preferencial E-O).



- Figura 18. Sección 3 (Dirección preferencial N-S)
- Figura 19. Modelo de resistividad en la sección 1.
- Figura 20. Sección estratigráfica correspondiente a los valores de resistividad en la sección 1.
- Figura 21. Modelo de resistividad en la sección 2.
- Figura 22. Sección estratigráfica correspondiente a los valores de resistividad en la sección 2.
- Figura 23. Modelo de resistividad en la sección 3.
- Figura 24. Sección estratigráfica correspondiente a los valores de resistividad en la sección 3.
- Figura 25. Modelo mecánico de la balanza de Khristianovich.
- Figura 26. Correspondencia de un cimienta con la balanza de Khristianovich.
- Figura 27. Equipo de perforación con tubo partido.
- Figura 28. Tubo partido con dimensiones convencionales (pueden variar).
- Figura 29. Equipo de perforación en el cual el martinete se mantiene en su máxima elevación previo a ser accionado.
- Figura 30. Descenso del martinete y contacto con el suelo.
- Figura 31. Plano arquitectónico que muestra la ubicación de los sondeos realizados (en rojo).
- Figura 32. Distribución de los sondeos en el predio de interés.
- Figura 33. Muestras de roca extraídas durante la ejecución de los sondeos.
- Figura 34. Distribución de SPT con asignación de valores de resistividad según el tipo de roca.
- Figura 35. Perfil 1 dividido segmentos para su posterior evaluación.
- Figura 36. Perfil 2 dividido en segmentos para su posterior evaluación.
- Figura 37. Perfil 3 dividido en segmentos para su posterior evaluación.
- Figura 38. Modelación numérica simplificada (Gómez, L. E., et al. 2018).
- Figura 39. Distribución de esfuerzos verticales provocados por una zapata corrida en un medio homogéneo.
- Figura 40. Perfil 1 con representación de los sondeos geotécnicos.



Figura 41. . Perfil 1 (Se muestra dentro del componente rojo las zonas a considerar debido al carácter karstificado de las rocas, mientras que dentro del componente verde se muestra la zona competente, cuyos valores de capacidad de carga son mayores).

Figura 42. Perfil 2 con representación de sondeos geotécnicos.

Figura 43. Tendido de sondeos geofísicos.

Figura 44. Perfil 2 (Se muestra dentro del componente rojo las zonas a considerar debido al carácter karstificado de las rocas, mientras que dentro del componente verde se muestra la zona competente, cuyos valores de capacidad de carga son mayores).

Figura 45. Perfil 3 con representación de sondeos geotécnicos.

Figura 46. Perfil 3 (Se muestra dentro del componente rojo las zonas a considerar debido al carácter karstificado de las rocas, mientras que dentro del componente verde se muestra la zona competente, cuyos valores de capacidad de carga son mayores).



## RESUMEN

El presente trabajo se realiza con la finalidad analizar parámetros geotécnicos del suelo, así como las propiedades físicas de este, lo cual permite brindar a los proyectos de ingeniería civil las consideraciones pertinentes para la puesta en marcha de un proyecto, evaluando el comportamiento del terreno mediante la correlación de los parámetros previamente mencionados.

La geotecnia y la geofísica, respectivamente, son las ciencias que permiten obtener dichos resultados, ya que por sí solas, estas ciencias son capaces de realizar análisis del comportamiento del suelo, sin embargo, mediante la correlación de ambas se contará con una visión amplificada de las múltiples situaciones que pueden suscitarse en el desarrollo de proyectos ingenieriles hoy en día.

La evaluación del área de interés consiste en una labor obligatoria previa al desarrollo de una obra civil, a fin de conocer las principales características que presenta el terreno y así poder determinar la factibilidad de realizar el proyecto en un área determinada, por ello, es de especial interés la aplicación de métodos indirectos (Geofísica), los cuales presentan el beneficio de optimizar tiempo y costo.

La geotecnia ha permitido a los ingenieros desarrollar obras extraordinarias a lo largo del tiempo, las cuales han sido excelentes trabajos. Sin embargo, existen algunas otras obras que no han podido subsistir de la misma manera, ya que la dinámica del planeta tierra es muy cambiante e inoportuna, es por ello que mediante la correlación entre ciencias (Geofísica-Geotecnia), la obras a realizar serán capaces de incrementar el factor de seguridad ante cualquier situación diferente para la cual fue diseñada, situaciones tales como la excitación sísmica del terreno en el cual fue realizada la obra, capacidad de carga máxima superada debido a actividad humana, fenómenos naturales que impliquen la modificación de características del terreno (aire, lluvia, etc.).



## ABSTRACT

Present work pretend to analyze soil's geotechnical parameters and physic proprieties of it, which allow to give proper considerations to civil engineer projects, evaluating soil's behavior through previous mentioned parameters correlation. Geotechnical engineering and Geophysics, respectively, are sciences that allow to obtain certain results, being that none of them by it selves can make a full analysis of soil's behavior, so both results correlation (Geophysics-Geotechnical engineering) can increase vision of multiple situations that could happen during engineer projects development.

Pre evaluation of interest site must be a required labor previous a project starts up, in order to know main characteristics of the piece of land where the project will exist, and in that way stablish the project development feasibility in previous defined area. Therefore, the application of indirect methods (Geophysics) is so important because of the advantage of reduce costs and time execution.

Geotechnical engineering has allowed to engineers to develop amazing works along the time, which have been functioning well. However, there is some others that cannot subsist in the same way because of the earth's geodynamic, therefore, through sciences correlation (Geophysics-Geotechnical engineering) future projects will increase and maintain security in the face of any extraordinary situation for which it was designed, situations like: load resistance overpassed due to human activity, natural phenomena that involves soil's characteristics changes (wind, rain, etc.).



## CAPITULO I: INTRODUCCIÓN AL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

### 1.1 INTRODUCCIÓN

Las actuales obras de ingeniería requieren de un nivel de análisis más complejo, puesto que cada detalle en cuanto a las propiedades de los suelos se refiere, representa un factor fundamental en la evaluación de pre-factibilidad y planeación de una obra. Por ello, la necesidad de desarrollar investigación en torno a las propiedades del medio en el que se va a desarrollar una obra, ha sido acrecentada por su carácter indispensable en estas, para lo cual, se continúa implementando las metodologías más acertadas de la ingeniería geotécnica. Estas metodologías han mostrado ser bastante apegadas a los resultados escudriñados en la ingeniería, por lo que a lo largo de los años han pasado a ser parte del día a día en la evaluación de suelos.

Si bien es cierto que la ingeniería geotécnica brinda resultados de alta validez, también hay que mencionar los puntos en los que esta rama de la ingeniería no es capaz de brindar un panorama completo de la situación estratigráfica del medio. La principal razón de lo anterior dicho, es debido a que la exploración geotécnica se extiende de manera vertical a través del medio, mas no de manera horizontal, pasando así por alto detalles en la disposición estratigráfica del subsuelo, teniendo así que recurrir a consideraciones que se alejan de la realidad o contemplando correlaciones de sondeos que no se apegan al perfil estratigráfico del sitio de interés.

Por esta razón, la idea de llevar a cabo una correlación de parámetros ha sido plasmada en el presente proyecto de investigación, puesto que mediante la aplicación adecuada de ambas ciencias, el ingeniero tendrá un sustento aún mayor a lo ya contemplado durante el desarrollo ingenieril hoy en día. Este sustento está basado en la descripción completa del perfil estratigráfico con sus respectivas propiedades tanto físicas como geotécnicas, lo que brindará al diseño de cimentaciones una distribución a detalle de las capacidades de carga a lo largo de las diferentes litofacies. Estas consideraciones se apegan lo más posible a la



realidad de acuerdo a los resultados obtenidos de la aplicación de esta investigación.

## 1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El acelerado crecimiento poblacional ha traído consigo una urbanización exorbitante, por lo que la actual comunidad ingenieril se encuentra en auge en cuanto a proyectos de desarrollo se refiere. Con ello, aumenta la responsabilidad de desarrollar mejores proyectos que satisfagan la demanda que esto ejerce, a fin de prevenir y evitar situaciones que amenacen la seguridad de la sociedad, quien gozará del producto final de dichos proyectos.

Si bien existen diversos factores que determinan el buen o mal funcionamiento de las estructuras, el tipo de suelo en el que estas son llevadas a cabo representa un factor condicionante de la estabilidad de las obras, así como posibles situaciones de riesgo que deben considerarse al desarrollar un proyecto de construcción. Por ello la importancia de una investigación previa, puesto que nos permitirá conocer y prever cualquier situación que suponga un obstáculo para el desarrollo del proyecto, con lo cual es posible disminuir costos y ahorrar tiempo al conocer los posibles escenarios del área de interés una vez comenzada la obra.

La última década ha representado un avance extraordinario en la ingeniería civil, así como también en las técnicas de evaluación de suelos, sin embargo, también se han cometido desafortunados errores que han generado pérdidas humanas y materiales, por lo que hoy en día se deben aprovechar todas las herramientas disponibles y no escatimar cuando se trata de una mejor calidad en las obras. Posteriormente se abordarán tópicos que guardan relación íntima con la mala ejecución de obras, a fin de ejemplificar situaciones donde se pudo haber obtenido mejores resultados y con ello evitar la ocurrencia de una contingencia.



### 1.3 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Actualmente, los proyectos relacionados a la ingeniería civil son uno de los mayores tópicos en lo que a desarrollo respecta, siendo la geotecnia y la hidráulica las ramas de la ingeniería que determinan el buen funcionamiento de dichas obras, así como su sustentabilidad a lo largo del tiempo. Sin embargo, la coexistencia de diferentes ciencias ha sido clave para el buen desarrollo de dichos proyectos, por lo cual a lo largo del tiempo se ha empleado la ingeniería geofísica como rama de apoyo, la cual aporta información que no es posible obtener directamente, disminuyendo así costos y brindando un mayor sustento a la puesta en marcha de una obra civil, así también proporcionar una mayor eficacia y certeza a los estudios previamente realizados.

Mediante la aplicación de ingeniería geotécnica en proyectos de ingeniería civil es posible obtener parámetros de resistencia del suelo en el cual se realizará la obra. A pesar de ello, el suelo forma parte de una dinámica que se encuentra en constante cambio, por lo cual la aplicación de métodos geofísicos permite correlacionar los parámetros de resistencia del suelo con las propiedades físicas del medio, el cual suele cambiar su configuración inicial y modificar sus condiciones bajo ciertos fenómenos ajenos a la obra, lo cual puede afectar directamente la relación suelo – estructura. Por ello es de suma importancia determinar la factibilidad de un proyecto de ingeniería civil en un área determinada, así como posibles rehabilitaciones que requiera esta y condiciones bajo las cuales se implementara la obra.

### 1.4 OBJETIVOS

#### 1.4.1 Objetivo general

Proporcionar información de valor al análisis y diseño de obras para el cálculo de capacidad de carga, mediante la evaluación de parámetros físicos, geológicos y mecánicos, producto de la exploración geofísica y geotécnica.



#### 1.4.2 Objetivos específicos

- Correlacionar las diferentes propiedades del suelo mediante la aplicación de métodos indirectos y adquisición de muestras mediante la aplicación de ingeniería geotécnica en proyectos de desarrollo, los cuales se basen en el modelo estratigráfico real del subsuelo, cuyas propiedades afectan al diseño de cimentaciones según se encuentren dispuestas en el terreno.
- Generar modelos conceptuales de distribución de unidades geotécnicas a partir de sus propiedades mecánicas, geológicas y físicas, que brinden al ingeniero una representación adecuada del subsuelo, proporcionando información de valor para el diseño de obras.

#### 1.5 MARCO TEÓRICO

Si bien es cierto que existen diversos factores por los cuales una obra de ingeniería presenta fallos, los rasgos estructurales son la principal causa de las afectaciones en dichas obras. Sin embargo, las propiedades geotécnicas de los suelos son un elemento crucial en el diseño de cimentaciones, las cuales se relacionan directamente mediante la interacción suelo – estructura.

A través del tiempo se han registrado diversas situaciones adversas en el desarrollo de obras de ingeniería civil, por lo que dentro del análisis geotécnico es necesario implementar diferentes métodos que permitan relacionar las propiedades geotécnicas, físicas y geológicas del sitio de interés, puesto que el no hacerlo o darle menos importancia de lo que realmente es, representa un gran riesgo que no se debe correr cuando de obras se trata, puesto que de por medio se encuentra la integridad de los usuarios de dichas obras. Dicho esto, se tiene conocimiento de situaciones en las que las condiciones del suelo fueron exploradas mediante métodos geotécnicos, los cuales no mostraron rasgos de importancia para la obra y culminaron en una obra dañada o destruida. Lo anterior mencionado representa un reto que ha sido expuesto a lo largo de los años en la ingeniería, y que, hoy en



día es necesario contemplar la ampliación de métodos a utilizar para obtener resultados de mayor calidad.

### **Edificio space en Medellín, Colombia.**

*“Los problemas constructivos se atribuyen a la presencia de aguas subterráneas y acuíferos en profundidad en suelos que presentan poca estabilidad en dichas condiciones, circunstancias que fueron identificadas en la exploración de campo realizada por la Universidad. Al respecto no se encontraron advertencias o recomendaciones en los estudios sobre la posibilidad de problemas constructivos asociados a la presencia de aguas subterráneas y suelos inestables. A pesar de lo anterior no se considera que los asentamientos sean una causa principal del colapso.”* (Universidad de los Andes, 2014).

### **Recinto residencial y comercial en Oran, Algeria.**

*“Mientras se preparaba para las plataformas base en los sectores 4 y 6, una cavidad de tamaño considerable fue descubierta en los límites de la base a pesar del hecho que fueron realizados diversos ensayos geotécnicos en el área. Este descubrimiento, que no fue observado en ninguno de los ensayos geotécnicos, requirió de una investigación adecuada del subsuelo para cualquier otro tipo de fuente de peligro geológico que pudiera existir en el área.*

*Los resultados de la investigación combinada revelaron una red de cavidades en forma de panal en el subsuelo. Los modelos geofísicos del subsuelo mostraron que las dimensiones de las cavidades variaban de unos cuantos centímetros a unos cuantos metros.”* (United Arab Emirates University & University of Science and Technology Houari Boumediene, 2015)

### **Área residencial en Al Ain.**

*“Parte de un área residencial fue construida en sobre un antiguo y no notificado vertedero. Las villas en el área que fueron construidas tomando en consideración los resultados geotécnicos de un número de pozos perforados en la región.*



*Después de unos años, debido a la naturaleza del vertedero, los asentamientos del terreno y las aguas de riego, comenzaron a aparecer en ciertas villas grietas, desviaciones de muros e inclinaciones. Estudios geofísicos fueron realizados en el área. Los resultados mostraron la extensión y profundidades del vertedero. La comparación de resultados geotécnicos y geofísicos muestra una clara ventaja de los métodos geofísicos, ya que los detalles de morfología del vertedero pueden observarse. Gracias a esto, cierto número de villas fueron demolidas en el sitio afectado” (United Arab Emirates University & University of Science and Technology Houari Boumediene, 2015)*

### **Mezquita Sheikah Salam en Al Ain**

*“Después de repetidos problemas en la estructura de la mezquita y antes de su tercera reconstrucción, se decidió ejecutar una tomografía geofísica eléctrica de resistividad cross-hole a una profundidad de 30 metros para investigar las condiciones del subsuelo y para especificar la fuente de los peligros del sitio.*

*La mayoría de las perforaciones en el sitio que fueron realizadas a una profundidad de 10 metros no indicaron la presencia de una cavidad o la fuente del peligro. Sin embargo, cuando una perforación fue solicitada a una profundidad de 30 metros; se encontró una caída libre de 9.8 metros, comenzando a una profundidad de 14.5 metros.*

*Los resultados de la tomografía de resistividad eléctrica cross-hole mostró las dimensiones y extensión de la cavidad debajo del sitio”. (United Arab Emirates University & University of Science and Technology Houari Boumediene, 2015).*

Por si solas, ambas técnicas (Geofísica-Geotecnia) arrojan resultados de gran utilidad, pero que es necesario complementar con datos adicionales. Por un lado, la geofísica permite obtener la disposición espacial de los materiales contenidos en el subsuelo, así como sus propiedades físicas tal como la conductividad, magnetismo, etc. Pero esto no permite determinar la capacidad de carga de los materiales allí encontrados, ya que al únicamente conocer de qué material se trata, los valores no



son 100% comprobables. Por otro lado, la geotecnia dentro de su análisis directo le permite conocer propiedades mecánicas que representan una guía para conocer qué tipo de obra es posible llevar a cabo o no en el sitio de interés, pero que al mismo tiempo, no importando la cantidad de ensayos que se lleven a cabo, esto no le permitirá conocer la disposición espacial de los materiales, puesto que los ensayos se realizan en un punto estático a profundidad, además de que a mayor área los costos se elevarían considerablemente. Ahora bien, puesto que los métodos geofísicos consisten en pruebas no destructivas, han demostrado ser de gran utilidad en exploración previa a los ensayos geotécnicos, ya que brindan al ingeniero información importante que será implementada en la planeación antes y durante el proyecto. Con esto es posible determinar las zonas de mayor interés para situar los Ensayos de Penetración Estándar (SPT) u otras técnicas de análisis geotécnico. He ahí la importancia de implementar ambos métodos de exploración de suelos, ya que al realizar esto el ingeniero será capaz de realizar modelos sumamente aproximados a la realidad, los cuales servirán como una guía para el ingeniero civil, el cual tendrá toda la información a considerar para poder diseñar las estructuras que serán cimentadas en el sitio.

## 1.6 HIPÓTESIS

Mediante la correlación de modelos de resistividad y parámetros geotécnicos del suelo, obtener secciones que describan de mejor manera la disposición espacial de los diferentes materiales presentes en el sitio. De esta manera, se obtendrá una descripción detallada de la distribución de cargas y como afectan estas al suelo de interés.



## CAPITULO II: ÁREA DE ESTUDIO

### 2.1 LOCALIZACIÓN

Progreso, Yucatán.

El estado de Yucatán forma parte de los 32 estados de la República Mexicana, cuyos límites colindan al Sur-Este con Quintana Roo, al Sur-Oeste con Campeche.

El presente trabajo se llevó a cabo al sur de la ciudad de Progreso, en el estado de Yucatán, cuyos límites colindan con los municipios de Chicxulub Pueblo al Este, Hunucmá al Oeste, Mérida al Sur y Ucu al Sur-Oeste.

El área de estudio está localizada al sur de la ciudad de Progreso, y al norte de la localidad Framboyanes. Las coordenadas geográficas del área de estudio son 223754.81 E – 2349312 N. Las imágenes expuestas a continuación muestran de mejor manera la localización antes mencionada.

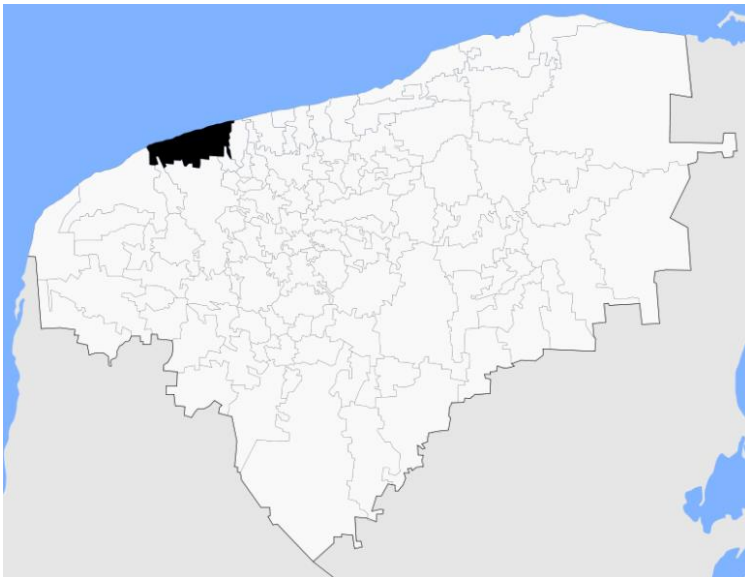


Figura 1. Ubicación del municipio de Progreso, al N-O de la península de Yucatán. (García-Gil, G. & Graniel, E., Sin fecha)

Mediante la definición del sitio de interés por medio de imágenes satelitales es posible realizar un reconocimiento del sitio en cuanto a términos generales se refiere, puesto que de esa manera es posible brindar un panorama inicial de las



diferentes características del sitio, a fin de ir con una idea aproximada al momento de realizar los ensayos y sondeos presenciales.



Figura 2. Localización del área de estudio al sur de la ciudad de Progreso, al norte de la comunidad Framboyanes. (Fotografía recuperada de: Google earth)

### 2.1.1 Clima

El análisis climatológico de la zona de estudio es de suma importancia para el proyecto, ya que las condiciones del suelo varían según la región en la que se encuentran y con ello las propiedades mecánicas que estos presentan al momento de ejercer cambios debidos a la actividad humana, específicamente al desarrollo de obras civiles, motivo de estudio de esta tesis.

El presente apartado se fundamenta en la información disponible de diversos artículos, publicaciones, e información acerca de las condiciones climatológicas del municipio de Progreso, Yucatán.

Gracias a las estaciones climatológicas Celestún, Sisal, Kinchil, Hunucmá, Maxcanú, Chicxulub y los observatorios meteorológicos de Mérida y Progreso, fue posible conocer los datos a continuación presentados.

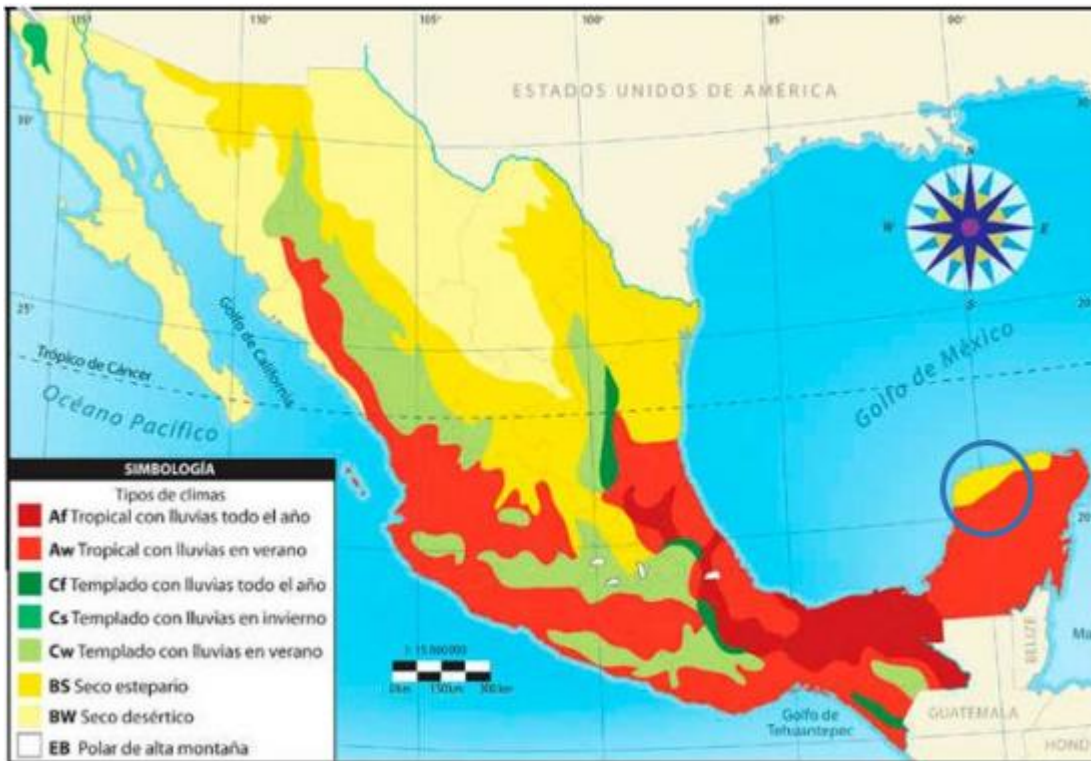


Figura 3. Mapa de climas en la República Mexicana, área de estudio situada dentro de la marca color azul. (Recuperado de: <http://www.mapademexico.com.mx/mapa-de-climas-de-mexico>)

En el estado de Yucatán predomina un clima Tropical con lluvias en verano, sin embargo, la región localizada al Norte del estado cuenta con un clima predominante Seco estepario, en el cual se encuentra comprendido el municipio de Progreso, lugar de desarrollo del presente proyecto.

Para la ciudad de Progreso la precipitación anual total promedio para el periodo hiper anual de la cuenca a la que pertenece fue de 66 años, cuyo valor medio fue 458.82 mm y un coeficiente de variación de 0.375. El régimen pluvial de progreso muestra ciclos de compensación entre años secos y años húmedos que van de 9 a 12 años. La mayor cantidad de precipitaciones se presentan entre los meses de Mayo hasta Octubre, mientras que durante el periodo comprendido entre los meses de Noviembre a Abril se le considera un periodo seco. Para la llanura litoral marina (Zona costera), el periodo húmedo representa el 85% al 90% del total de la lluvia.



A partir del análisis de intensidad-duración-frecuencia, el periodo de lluvias por año para progreso es de 42.4, cuyas precipitaciones de mayor frecuencia son de 60, 10 y 30 minutos. Una lluvia con 5 minutos de duración y un tiempo de retorno de 100 años, presenta una intensidad de 3mm/min.

De acuerdo con las variaciones presentes en la zona noroccidental del estado de Yucatán, la temperatura promedio para dicha zona es de 24.5° a 25.5° C, temperatura que presenta ser homogénea espacialmente.

### 2.1.2 Vías de comunicación

El estado de Yucatán cuenta con una red carretera ampliamente distribuida, con una longitud total de la red carretera de 6 481.3 km (fig. 1.4); de las cuales 1 359.6 km son primarias o principales, 2 519 km secundarias y 2 602.7 km terciarias o vecinales, que lo convierten, al menos a nivel peninsular, en uno de los estados mejor comunicados, tanto en la intercomunicación con sus municipios y localidades, como con los estados vecinos. Así pues, el municipio de Progreso cuenta con 3 carreteras principales que conectan la ciudad con el resto del estado, ubicándose así una al Este, la cual conecta con el municipio de Mococho, otra al Oeste, la cual conecta con el municipio de Hunucma y una última al Sur, la cual cuenta con 4 carriles y conecta directamente con la capital del estado, Mérida. Así también, se tiene la presencia de 3 carreteras secundarias, cuya procedencia son los municipios de Ucu, Conkal y Telchac Puerto, que conectan directamente con las 3 carreteras principales antes mencionadas.

Una de las vías más importantes del municipio de Progreso es la México 261, con rumbo sur-norte proveniente de Campeche, entra a Yucatán y atraviesa las poblaciones de Muna-Mérida para terminar en el puerto Progreso

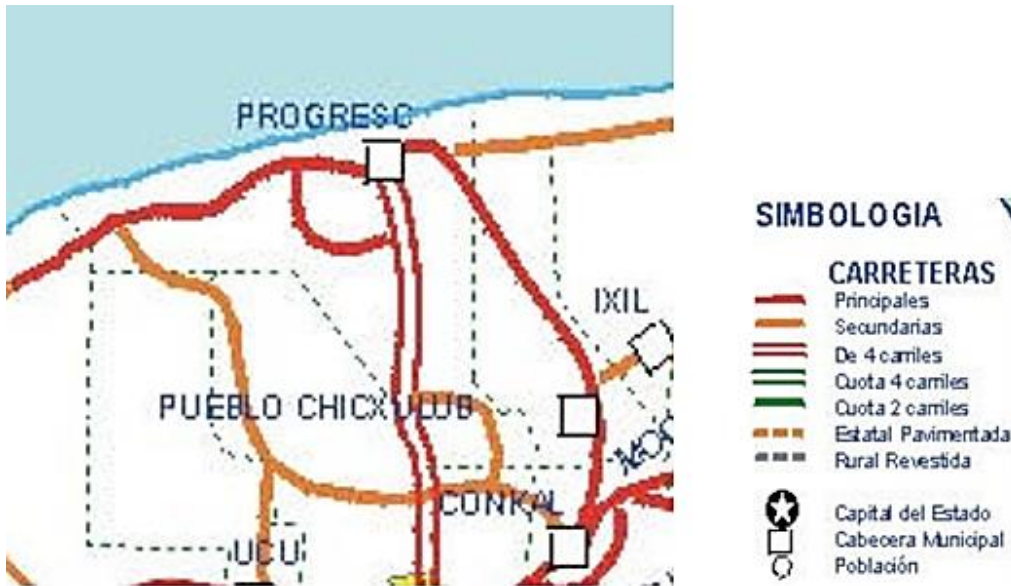


Figura 4. Principales vías de comunicación en el municipio de Progreso. (SCT, 2017)

## 2.2 GEOLOGÍA DEL SITIO

Dentro de la región costera noroccidental del estado de Yucatán, en la cual se encuentra la zona de estudio, se diferencian dos unidades funcionales de primer orden.

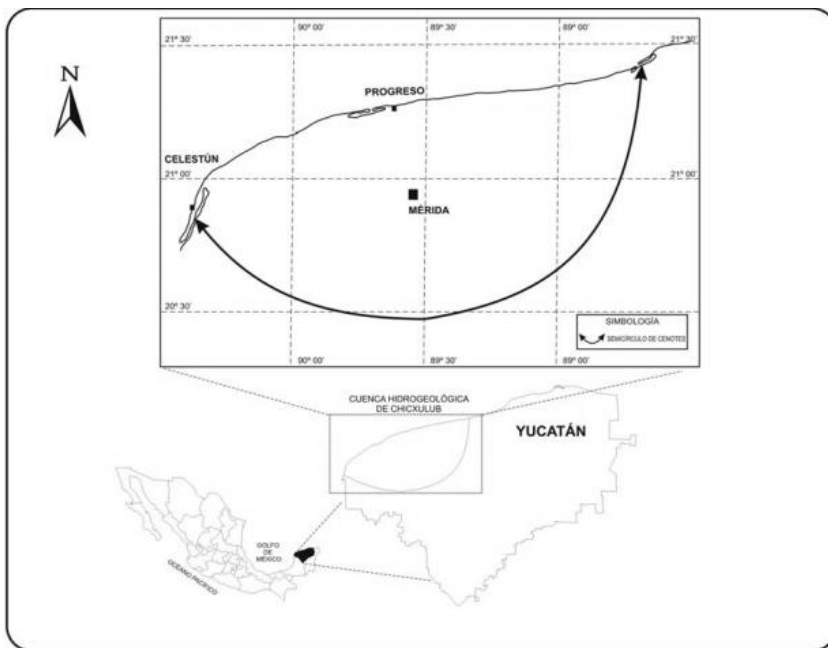


Figura 5. Localización de la región costera noroccidental del estado de Yucatán. (Batllori, E., et al, 2005)

De acuerdo a la localización previamente definida, se sabe que el área de estudio se encuentra dentro de una zona de llanura kárstica, litoral marino acumulativa, muy baja ( $H < 2$  MSNM), de edad cuaternaria, con dos variantes: eólico acumulativa (de edad holocénica, cordón litoral) y biogénico-acumulativa (de edad pleistocénica, pantanos costeros).

La llanura kárstica, litoral, marino-eólico, acumulativa representa la estructura geológica que protege todo el sistema de humedades costeros y es aquella que más impacto ha sufrido en playas, dunas y plataforma marina debido a las actividades humanas, mientras que la llanura kárstica, marino-biogénico, acumulativa, representa una zona de alta productividad biológica por los extensos manglares y ciénegas que se desarrollan y que han sufrido los impactos secundarios derivados de la actividad humana.

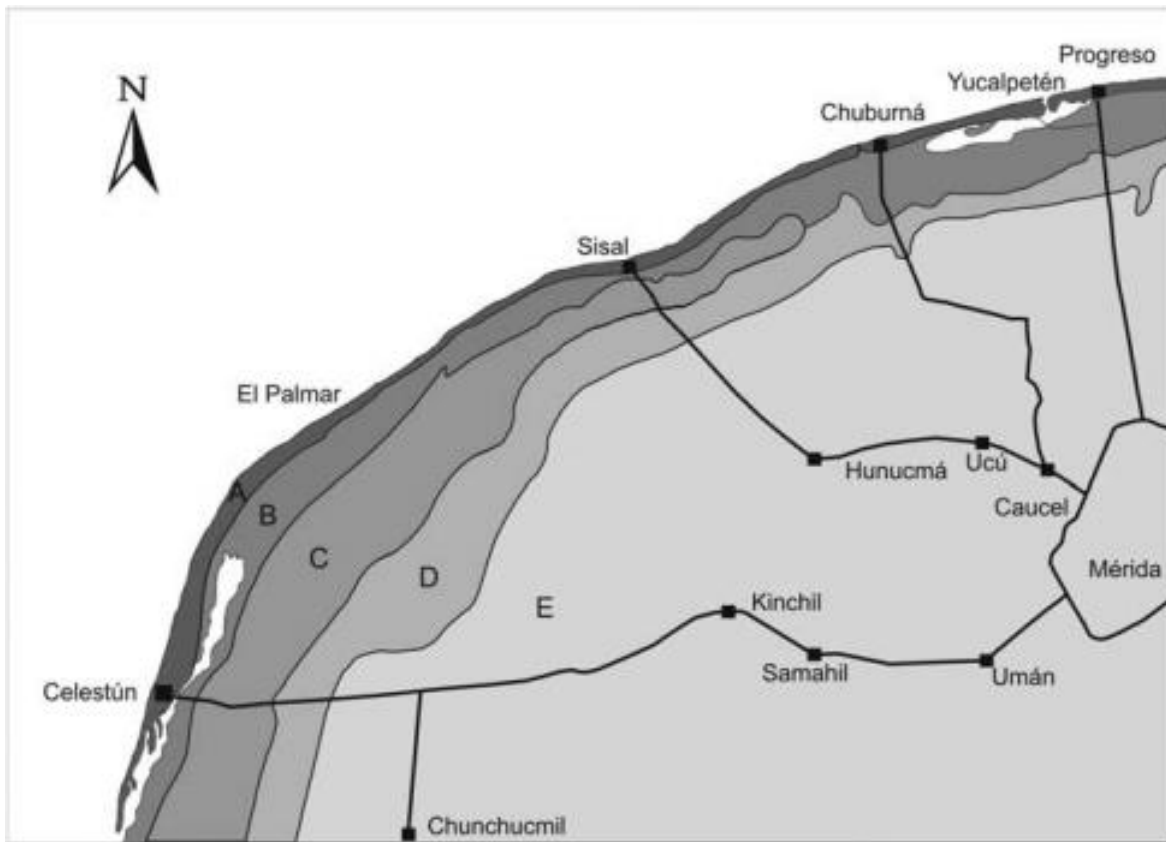


Figura 6. Unidades geográficas funcionales de la zona costera noroccidental del estado de Yucatán. (Batllori, E., et al, 2005)



## 2.2.1 Litología

El presente apartado analiza y describe las principales características geológicas del sitio de interés, el cual fue comentado anteriormente en el apartado de “Localización”.

Tomando como base la carta geológica F16-7 correspondiente al estado de Yucatán, se sabe que el territorio se encuentra conformado en su totalidad por un ambiente sedimentario calcáreo del Terciario producto de las transgresiones y regresiones del mar a lo largo de los años, por lo que el territorio es de origen marino, cuyos niveles de permeabilidad son altos.

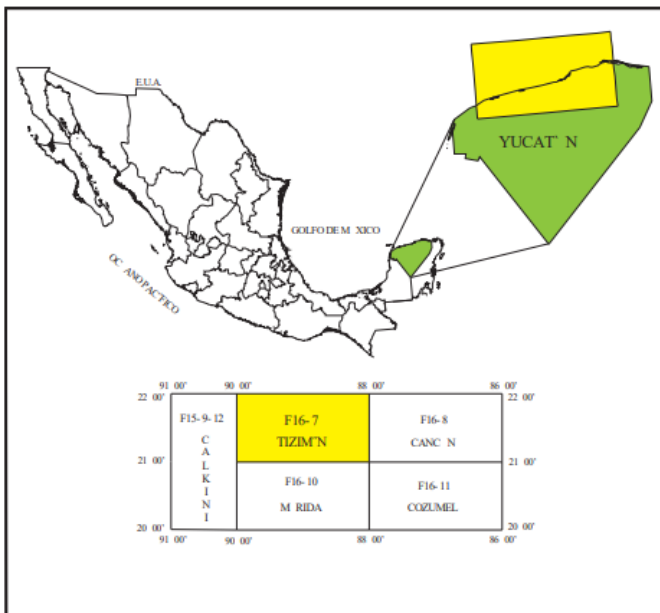


Figura 7. Carta geológico-minera Tizimín F16-7 Yucatán (INEGI, 2006).

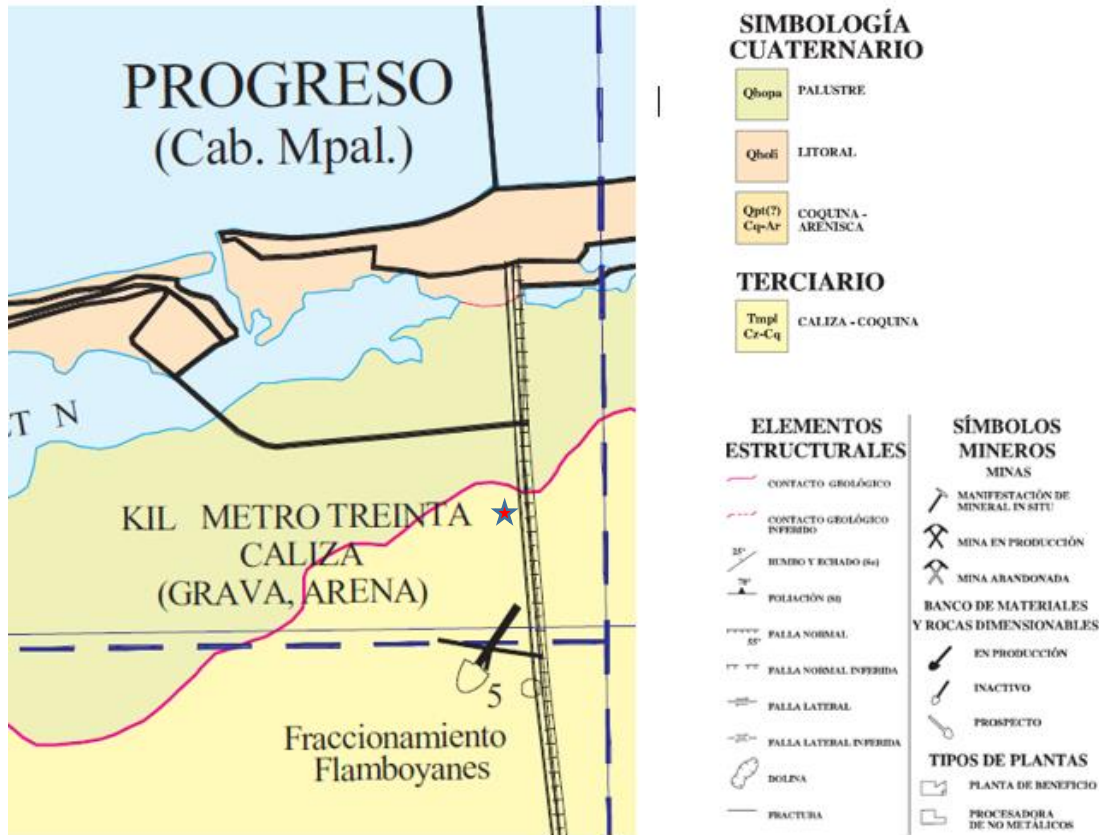


Figura 8. Porción de la carta geológica F16-7 correspondiente al sitio de interés. (INEGI, 2006)

Tal como se pudo observar en la figura anterior, la ciudad de Progreso está compuesta por dos unidades litológicas, de las cuales únicamente una de ellas cubre en su totalidad el área de estudio, el cual se encuentra compuesto principalmente por rocas carbonatadas cuyas características varían según a la profundidad a la que se encuentran y las condiciones a las que están sometidas. Un ejemplo claro de lo recién mencionado es la karstificación que sufren las rocas carbonatadas por acción del agua, el cual consiste en un proceso químico mediante el cual el agua erosiona la roca, dejando así oquedades dentro de la roca, tal como se muestra en la siguiente imagen.

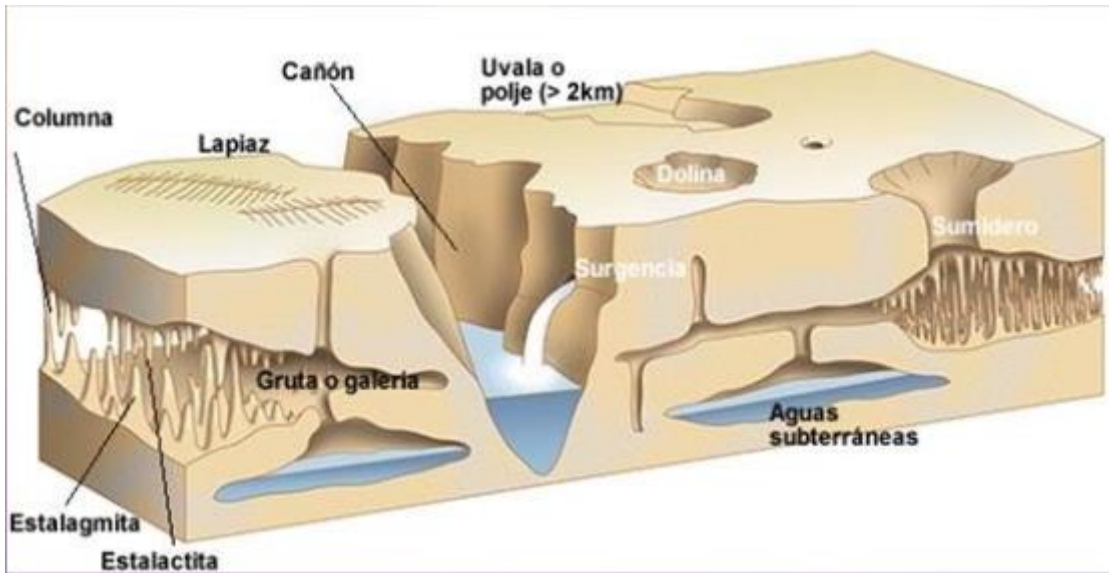


Figura 9. Diagrama de karstificación de la roca. (Velilla, J. & Cáncer, P., 2010)

*“El subsuelo de la zona costera está formado por rocas carbonatadas solubles de origen marino, con abundantes ductos de disolución y fracturas”.* (Duch-Gary, 1991)

La región cercana a la costa se encuentra distribuida paralelamente a esta, por lo que aproximadamente 20 km territorio adentro se localizan las calizas recristalizadas altamente compactas, que en adición a ello y por su carácter marino se caracterizan por encontrarse distribuidas masivamente con una coloración clara que varía entre blanquizco-cremoso y presencia de microfósiles.

### 2.2.2 Geomorfología

La zona de estudio se encuentra dentro de la cuenca hidrológica de Chicxulub, cuyo límite está definido por el conocido “Anillo de cenotes”. Dentro de la cuenca de Chicxulub la máxima elevación en el área es de 9 msnm. La variación en altitud hacia la ciudad de Progreso es de 0.257 m/km disminuyendo así hacia Celestún de 106 m/km, manteniendo una elevación uniforme a lo largo de la cuenca.

La plataforma de Yucatán no presenta mayor complicación en cuanto a geología respecta, la cual consiste en una elongación sub-horizontal de carbonatos y evaporitas del cretácico inferior-cuaternario, encontrándose sobre este una



acumulación de espesor considerable de sedimentos marinos del Paleozoico tardío, seguido de una sedimentación continental durante el Jurásico, el cual subyace un amplio depósito de evaporitas correspondientes a una cuenca carbonatada por arrecifes pertenecientes al Cretácico temprano. La figura mostrada a continuación materializa lo anterior mencionado mediante un mapa de provincias fisiográficas en Yucatán.

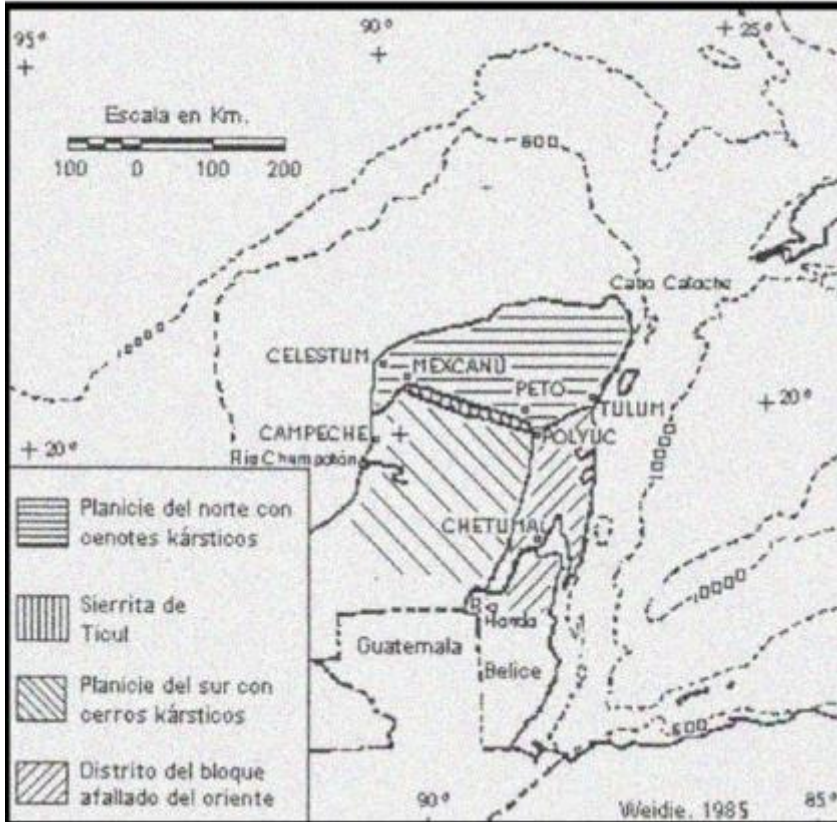


Figura 10. Provincias fisiográficas de la península de Yucatán.

La península de Yucatán es producto de la sedimentación calcárea, la cual se encuentra cubierta por un mar poco profundo que emergió periódicamente centímetro a centímetro cada siglo, adquiriendo la forma plana que caracteriza al estado, ya que este se encuentra tan solo unos cuantos metros sobre el nivel del mar y una ligera inclinación en sus pendientes, así como también contrastes mínimos en su topografía.



### 2.2.3 Hidrogeología

La composición geológica de la zona cuenta con calizas de diversos grados de compactación y dureza, siendo la capa superficial la más firme, aligerándose a profundidad. Sin embargo, se trata de una roca soluble en agua cuya acción presenta las formaciones previamente mencionadas en apartados anteriores, conocidos como karstificación. Estas rocas son altamente vulnerables a sufrir fracturamientos debido a cambios de temperatura, acción biológica de la fauna, desgaste mecánico, etc. Lo anterior mencionado presenta una base introductoria al comportamiento hidrogeológico de la zona de estudio, puesto que debido a dichas características el agua liberada durante las precipitaciones es infiltrada velozmente hacia el interior, gracias a la relativa fácil disolución de las rocas encontradas en el lugar, con lo cual se forman extensas formaciones de cavernas cercanas a la costa. De esta manera es que los cenotes presentes en Yucatán son la expresión más joven de karstificación en la península, los cuales forman una red de cavernas sumamente compleja, la cual actúa como una línea de conducción de grandes volúmenes de agua.

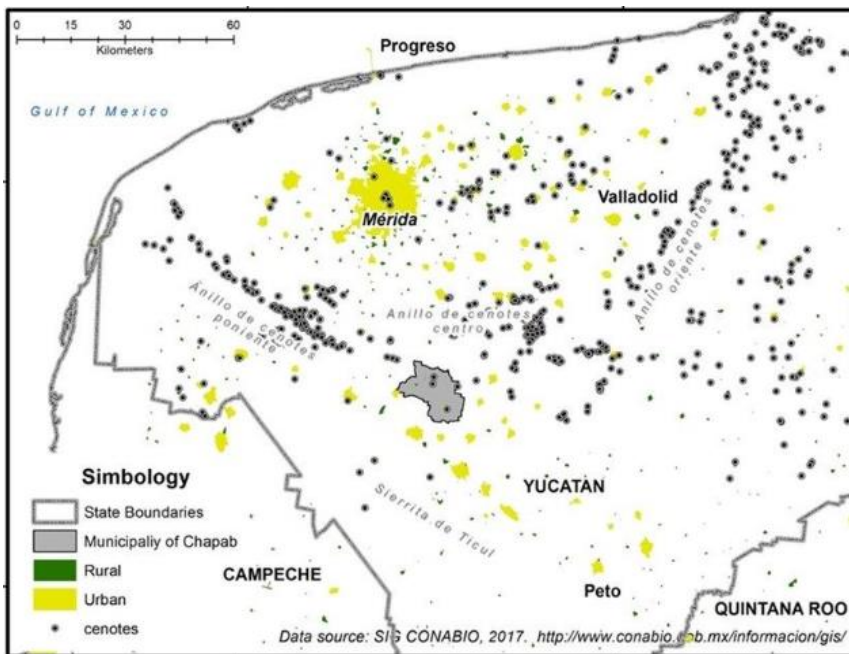


Figura 11. Red de cenotes del estado de Yucatán.



El estado de Yucatán, como ya se comentó, se caracteriza por la presencia de una amplia red de cavernas interconectadas que facilitan el flujo subterráneo de agua, la cual no se traslada mediante corrientes superficiales en el estado de Yucatán, debido a que estas son evaporadas inmediatamente después de las precipitaciones o bien son filtradas a través de las diferentes capas de la corteza terrestre, siendo así absorbidas por las capas vegetales, suelos y rocas, generando así las captaciones de agua subterránea. El carácter predominantemente plano del estado de Yucatán, aunado al coeficiente de infiltración alto en el sitio, no permite que las aguas provenientes de las precipitaciones sean aprovechadas de la manera en que se realizan en otros lugares de la República Mexicana mediante obras de almacenamiento (presas, bordos, etc.), por lo cual no se tiene presencia de redes estacionarias hidrométricas en el estado.



## CAPITULO III: EXPLORACIÓN GEOFÍSICA

La aplicación de los diversos métodos geofísicos ha incrementado a lo largo de los últimos años debido a su carácter no invasivo, rapidez de ejecución, disminución de costos durante la ejecución de un proyecto en su etapa de planeación y evaluación previa. La exploración geofísica presenta múltiples ventajas, tales como la determinación de profundidad de los diferentes estratos que componen el subsuelo, así como también definir zonas de alta peligrosidad, ya sea por zonas altamente sísmicas, con gran presencia de cavernas y oquedades ocultas bajo litofacies en el subsuelo, e inclusive conocer las condiciones de obras preexistentes, las cuales pueden ser evaluadas mediante la aplicación de metodologías específicas que proporcionan información de gran valor para determinar la factibilidad de permanencia de una obra determinada.

### 3.1 PROSPECCIÓN ELÉCTRICA

El presente apartado tiene la finalidad de dar a conocer las principales características del método seleccionado (Tomografía eléctrica) para la realización del proyecto, explicando así el modus operandi, aplicaciones, tipo de arreglo, resultados y todo lo que conlleva la metodología en cuestión.

#### 3.1.1 Antecedentes

La prospección eléctrica surgió a raíz de un cuestionamiento referente a si las rocas permitían el paso de una corriente eléctrica a través de estas, por lo cual, a lo largo del tiempo fue ideado un método dieléctrico con el cual fuera posible tomar lectura de la resistividad que presentan dichos materiales. A medida que la evolución tecnológica y el desarrollo científico avanzaron a lo largo del tiempo, fueron surgiendo nuevos cuestionamientos y nuevas maneras de comprender y estudiar el comportamiento de los materiales que conforman el planeta tierra, así como también de la necesidad de desarrollar nuevas y mejores metodologías que permitieran sustentar el crecimiento de la población del planeta tierra. De este modo, poco a poco se le fue brindando un enfoque económico-industrial a la aplicación de la exploración geofísica. A raíz de las diferentes vertientes de pensamiento, los



primeros científicos en retomar las ideas de la época primitiva desarrollaron estudios enfocados en la obtención de resultados específicos de la prospección eléctrica, siendo la búsqueda de yacimientos minerales la principal aplicación en ese entonces.

Hacia los comienzos de la época clásica el científico Conrad Schlumberger y el científico americano Frank Wenner de manera individual, idearon el dispositivo tetraelectrónico, siendo este el sucesor inmediato de los primeros equipos dieléctricos ideados en la época primitiva. Gracias a este nuevo avance en la época clásica y al desarrollo continuo de la investigación, la prospección eléctrica se subdividió en tres principales líneas de investigación y desarrollo: la escuela Franco-Soviética, Wenner o de Gish-Rooney y la Sueca. Dadas las circunstancias de investigación dividida por parte de los científicos, se logró realizar importantes avances que hasta el día de hoy tienen un alto nivel de importancia, casos como la solución a la distribución de un potencial en un semi espacio estratificado, la realización de sondeos eléctricos profundos involucrados en el descubrimiento de yacimientos de hidrocarburos, etc.

### 3.1.2 Fundamento del método

Los métodos eléctricos de exploración se fundamentan en la teoría general de campo eléctrico, los cuales cumplen con la función de detectar los efectos de una corriente eléctrica (Natural o inducida). La teoría de campo eléctrico parte de las ecuaciones propuestas por James Clerk Maxwell (Ley de Ampere y Ley de Faraday).

La tomografía de resistividad eléctrica (2D) permite conocer las variaciones de resistividad en el subsuelo a medida que se profundiza en este mediante la inyección de corriente eléctrica en el subsuelo a través de un par de electrodos inyectorios y un par de electrodos receptores, los cuales captan la diferencia de potencial entre estos. Es importante mencionar que el arreglo multielectrónico puede variar su configuración según sean los propósitos y necesidades del estudio a realizar, mismos que se abordarán posteriormente dentro de este capítulo. (Zúñiga, Sin fecha)

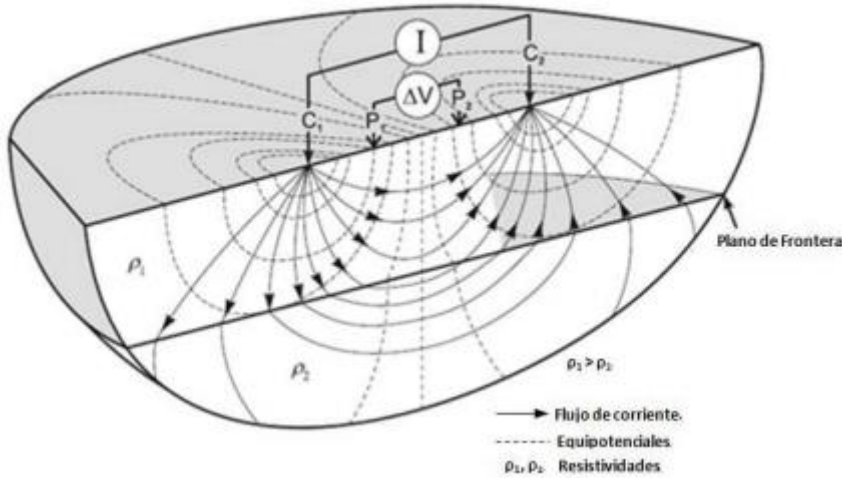


Figura 12. Diagrama del arreglo multielectrónico. (Knödel, 2007)

Los valores de potencial obtenidos siguen un patrón simétrico basado en la disposición del arreglo multielectrónico, es decir de acuerdo a los puntos medios existentes entre electrodos, sin embargo, la resistividad registrada será independiente de la posición de estos (inyectores y receptores), cumpliendo el principio de reciprocidad tanto en medios homogéneos como heterogéneo.

Para la obtención de la resistividad, la inyección de corriente continua entre el par de electrodos AB, mide la tensión entre el par de electrodos MN, donde la diferencia de potencial es

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right)$$

La resistividad viene dada por la expresión

$$\rho = g \frac{\Delta V}{I}$$

Donde

$$g = 2\pi \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right)^{-1}$$



Es un factor geométrico que depende únicamente del arreglo de los electrodos. La magnitud del factor geométrico ( $k$ ) se determina por la distancia entre los electrodos del dispositivo y se le da el nombre de factor geométrico. En el caso de Dipolo-Dipolo y Wenner-Schlumberger cuentan con dos parámetros, el dipolo de longitud “ $a$ ” y el dipolo de separación “ $n$ ”.

### 3.1.3 Propiedad resistiva/conductiva de las rocas/suelos

El presente apartado analiza de manera específica la propiedad conductiva/resistiva de las rocas/suelos que componen el planeta tierra, las cuales varían de acuerdo a diversas propiedades que disminuyen o incrementan la propiedad abordada en cuestión. Para el estudio en cuestión, a los valores de resistividad obtenidos se le asignaron tipología de material acorde con los sondeos geotécnicos obtenidos, así como la geología regional/local y las características que estas presentan, mismas que alteran el valor de resistividad en cada segmento litológico.

Las rocas/suelos cuentan con múltiples propiedades adquiridas durante y después de su formación, propiedades como magnetismo, radiación, conductividad/resistividad, etc. Gracias a los avances tecnológicos y científicos desarrollados en épocas recientes, es posible determinar el grado de intensidad de cada una de estas propiedades, siendo la propiedad eléctrica la que atañe al presente estudio. En resumen, las propiedades físicas obtenidas mediante la aplicación del método eléctrico son la conductividad/resistividad eléctrica y el potencial espontáneo, siendo la primera propiedad física la de especial interés para la presente investigación.

Una misma clase de roca/suelo puede variar el valor de su propiedad conductiva/resistiva según sean los factores bajo los que se encuentran, llámese temperatura, grado de compactación, porosidad, permeabilidad, grado de fracturamiento, humedad, etc. por ello, es importante evaluar de manera minuciosa los valores obtenidos mediante la aplicación del método de prospección eléctrica. A continuación se muestra una tabla de resistividad de los materiales más comunes encontrados en la corteza terrestre, con los cuales es posible correlacionar los valores de resistividad obtenidos durante la exploración geofísica. Debido al



carácter poroso y permeable de algunos materiales, es posible que estos tengan en su interior agua retenida, de modo que el grado de humedad y saturación con la que estos cuentan influirá en los valores de conductividad/resistividad obtenidos.

Material	Resistividad ( $\Omega.m$ )	
	Mínimo	Máximo
Grava	50 (agua saturada)	$> 10^4$ (en seco)
Arena	50 (agua saturada)	$> 10^4$ (en seco)
Limo	20	50
Marga	30	100
Arcilla (húmeda)	5	30
Arcilla (seca)		$>1000$
Lodos	15	25
Arenisca	$<50$ (húmedo)	$> 10^5$ (en compacto)
Caliza	100 (húmedo)	$> 10^5$ (en compacto)
Esquisto	50 (húmedo)	$> 10^5$ (en compacto)
Toba	$2 \times 10^3$ (húmedo)	$10^5$ (mojada)
Rocas ígneas y metamórficas	$<100$ (degradado, húmedo)	$> 10^6$ (en compacto)
Roca de sal	30 (húmedo)	$> 10^6$ (en compacto)
Residuos domésticos e industriales	$< 1$	$>1000$ (de plástico)
Agua natural	10	300
Agua de mar (35 % NaCl)	0.25	
Agua salada	(salmuera) $< 0.15$	$3 \times 10^3$
Agua superficial (rocas ígneas)	0.1	100
Agua superficial (sedimentos)	10	$10^6$

Tabla 1. Resistividad de los materiales. (Gasulla, 1999).

### 3.1.4 Instrumentación y tipos de arreglo

El equipamiento utilizado en esta técnica de exploración consiste en un resistímetro digital, el cual consta tanto de un módulo transmisor (envía corriente) como de un módulo receptor, siendo este último aquel que registra las resistividades y/o potencial espontáneo del subsuelo. Una vez registrados dichos datos, el equipo los mostrará en el display para que estos puedan ser evaluados por el operador. El



quipo será suministrado de los accesorios necesarios para la realización de los sondeos (cables, electrodos, conexiones, etc.).

La configuración espacial de los electrodos puede definir diferentes características obtenidas en la ejecución del método, basándose así en el espaciamiento existente entre ellos. Dicho esto, la relación profundidad-resolución se modifica según sean las aplicaciones del estudio, por lo que será necesario definir previamente la propiedad a la que se le dará mayor enfoque, o bien una relación equilibrada.

- WENNER.- Este tipo de arreglo lleva el nombre del científico que lo aplico por primera vez, cuya configuración consiste en un espaciado equidistante entre electrodos, donde la longitud del dipolo será entre A-B. Este tipo de arreglo es apropiado para definir estructuras horizontales y deficiente para detectar cambios verticales. La profundidad de investigación es aproximadamente  $\frac{1}{2}$  del espaciado entre electrodos.

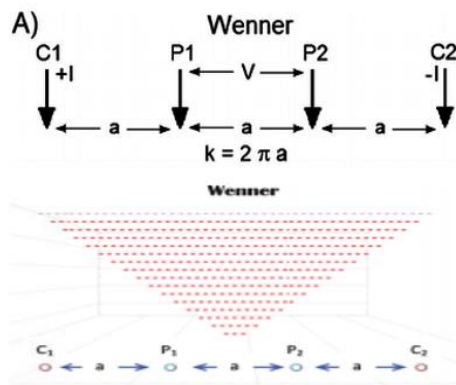


Figura 13. Arreglo Wenner.

- WENNER-SCHLUMBERGER.- Este arreglo es un modelo integrado entre el arreglo Wenner y el arreglo Schlumberger, cuya disposición de electrodos es equivalente a aquella utilizada en el arreglo Wenner, a diferencia de que para este caso particular la relación distancia será entre A-M (o N-B). Este tipo de arreglo es adecuado tanto para estructuras horizontales como verticales, donde la intensidad de la señal dependerá del factor “n” (Inversamente proporcional). La profundidad de investigación es 10% mayor que aquella lograda con el tipo de arreglo Wenner. (Zúñiga, R.)

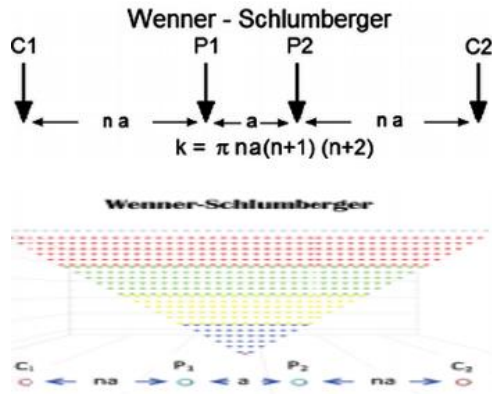


Figura 14. Arreglo Wenner-Schlumberger.

- **DIPOLO-DIPOLO.-**

Este tipo de arreglo es adecuado para reconocer estructuras verticales, por lo que no es apto para detección de capas horizontales. La intensidad de la señal será menor conforme el valor del factor “n” incrementa. La profundidad de investigación está en función de la abertura entre electrodos y del factor “n”.

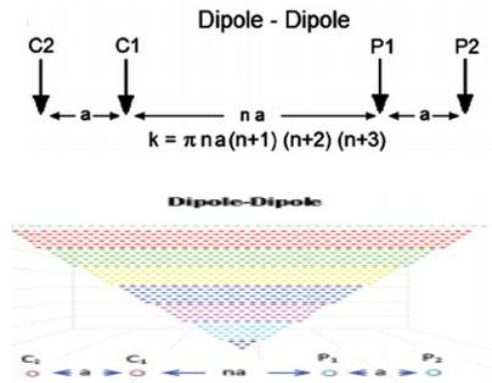


Figura 15. Arreglo dipolo-dipolo.

### 3.1.5 Aplicaciones

Si bien es cierto que existen distintas maneras de llegar a un resultado en específico, la prospección eléctrica tiene una amplia variedad de aplicaciones, las cuales han de ser evaluadas según sean las necesidades de cada proyecto. Por



ello, a continuación se presenta una lista de aplicaciones cuya relación es a la ingeniería geotécnica.

- Determinación de espesores de litofacies.
- Ubicación espacial de cavidades.
- Estado actual de la base subyacente a las estructuras antrópicas.
- Análisis de estabilidad de taludes.
- Determinación del N.A.F.
- Reconocimiento de macizo rocoso.

### 3.1.6 Tomografía eléctrica / Implementación del método

La finalidad principal de una tomografía eléctrica, es la de conocer con detalle los estratos superficiales del terreno objeto de estudio, obteniendo para tal fin lecturas de resistividades eléctricas. El método de exploración denominado tomografía eléctrica, consiste en realizar un número muy elevado de medidas realizadas desde la superficie del terreno, por debajo de una línea de exploración, hasta una profundidad de exploración que depende del arreglo utilizado (geometría) y de los materiales distribuidos en el subsuelo, de tal manera que se puedan interpretar los cambios de las rocas que constituyen el subsuelo y su distribución, además de la presencia de agua subterránea, contenido mineralógico que presentan las formaciones de roca.

Como ya se comentó en apartados anteriores, el método se basa en el análisis de la corriente eléctrica que es introducida a través de dos electrodos, utilizando dos varillas de acero introducidas en el suelo sobre la línea de exploración, conectadas a un circuito transmisor y con la circulación de corriente, se establece un campo eléctrico que genera superficies equipotenciales perpendiculares al flujo de corriente, las cuales son distorsionadas por la presencia de las capas o estratos. La circulación de la corriente en el terreno, ocasiona la creación de diferencias de potencial, cuya magnitud va a depender de la distribución de los materiales en el subsuelo presente y de otros factores, que se miden en pares de puntos en el



terreno, mediante el uso de voltímetros de alta precisión, integrados al sistema y que se colocan en la superficie sobre la línea de exploración, los cuales forman en conjunto el arreglo multielectrónico.

A continuación se especifican las características principales de los sondeos a realizar:

- Nombre del arreglo: Dipolo-dipolo
- Abertura eléctrica: 2 metros

### 3.1.6.1 Sección 1

El primer perfil realizado en el estudio fue dispuesto a manera que sigue una dirección preferencial S-N, el cual tiene una elongación total de 110 metros, cuya profundidad de investigación fue de 15 metros a través de las diferentes litofacies que componen el subsuelo del área estudiada.

El área de estudio está comprendida dentro de la zona 16 Q, comenzando así la sección 1 en las coordenadas 224316 E – 2349221 N y concluyendo en las coordenadas 224326 E – 2349329 N. **(Consultar anexo fotográfico)**

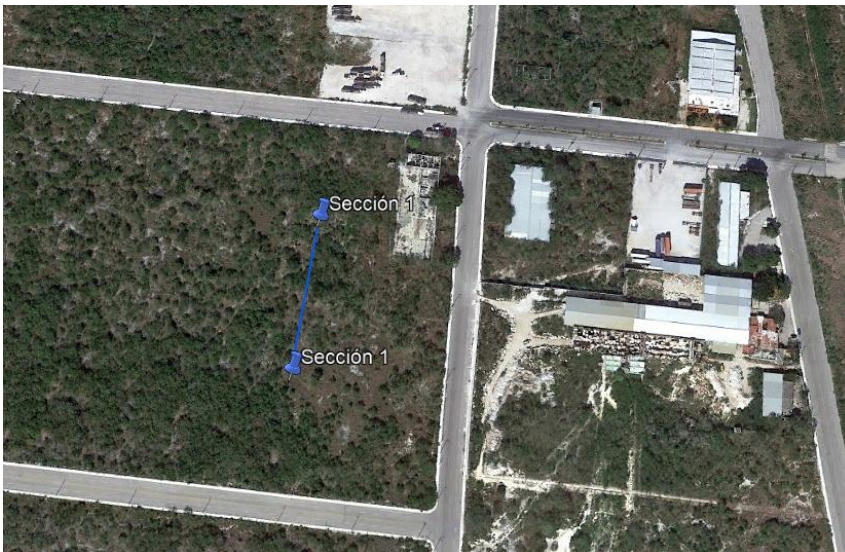


Figura 16. Sección 1 (Dirección preferencial S-N).



### 3.1.6.2 Sección 2

La segunda sección realizada se ubicó perpendicularmente a la sección 1, siguiendo así una dirección preferencial E-O con una elongación total de 110 metros y alcanzando así una profundidad de 15 metros a través del subsuelo, cuya descripción

Esta sección comienza en las coordenadas 224340 E – 2349280 N y concluye en las coordenadas 224237 E – 2349287 N. **(Consultar anexo fotográfico)**

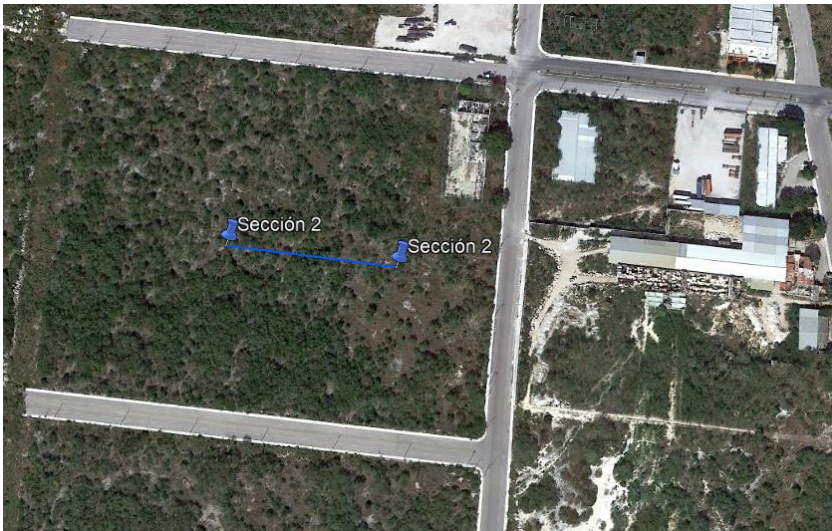


Figura 17. Sección 2 (Dirección preferencial E-O).

### 3.1.6.3 Sección 3

Una tercera sección fue realizada paralelamente a la sección 1, a diferencia de que esta nueva sección cuenta con una elongación de tan solo 55 metros, es decir, la mitad de la elongación en la sección 1. A pesar de solo extenderse a lo largo de 55 metros, esta sección alcanzó una profundidad de 15 metros al igual que las dos secciones anteriormente mencionadas.

Esta sección sigue una dirección preferencial N-S, cuyo inicio se encuentra en las coordenadas 224400 E – 2349289 N y concluye en las coordenadas 224387 E – 2349235 N. **(Consultar anexo fotográfico)**

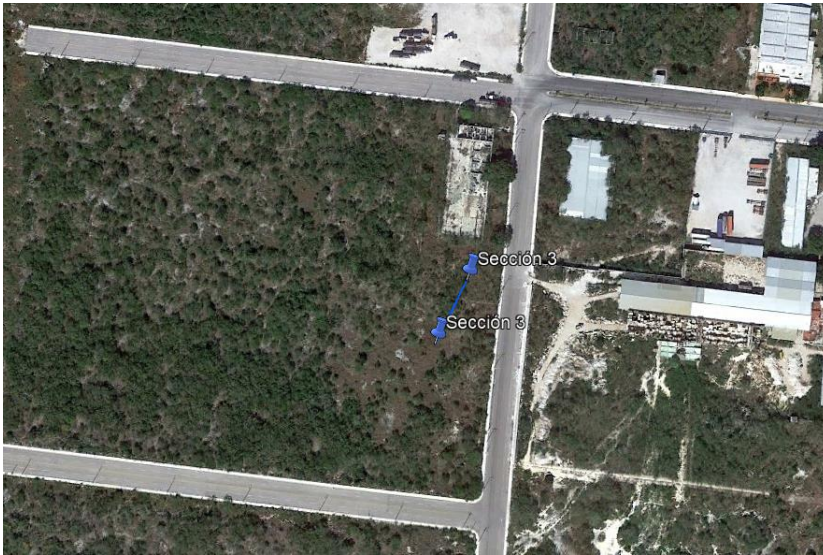


Figura 18. Sección 3 (Dirección preferencial N-S).

### 3.1.7 Procesado de datos

#### Primeros pasos

Para comenzar a tratar los datos adquiridos en campo, estos se trasladaran directamente a un dispositivo computacional. Cuando estos han sido introducidos en dicho equipo, se abrirán en una hoja de cálculo para comenzar con el tratamiento adecuado. En primera instancia se deberá especificar la siguiente información de acuerdo a los sondeos realizados previamente:

- Nombre del arreglo
- Abertura eléctrica
- Numero o tipo de arreglo
- Datos totales
- 1 (indica que si conocemos la ubicación de los puntos de atribución)
- 0 ( indica que conocemos las resistividades)
- Datos de las tomografías



Una vez agregados estos datos se añadirán aquellos correspondientes a la topografía de la zona de estudio, los cuales serán plasmados de la siguiente manera:

- (indica que es topografía)
- Numero de electrodos
- Se inicia con cero
- Se termina el conteo de los electrodos respetando su separación
- Se agregan 6 ceros
- Aun lado del conteo se reparte la diferencia (si la hay) de la elevación

Ya que se han introducido los valores anteriormente mencionados se procederá a guardar el documento en formato “.dat” para poder hacer uso de este en el software correspondiente (RES2DINV).

## **RES2DINV**

Para comenzar con el procesado se utiliza el software RES2DINV.

- Se abrirá el documento guardado con anterioridad y a continuación en la opción “edit” se seleccionará la opción “exterminate bad datum point”, cuya finalidad es la de eliminar aquellos puntos cuya correlación no sea acertada a lo obtenido en los modelos.
- Posteriormente se modificará el número de iteraciones según sea el adecuado para cada caso de estudio y se procederá a realizar la inversión.
- Una vez realizada la inversión se selecciona la única opción disponible en el menú “display” y se marca la opción “logarítmico” o “linear contour intervals”.
- Concluido lo anterior se exporta el archivo como formato surfer y se seleccionan las casillas de “resistividad directa” y “modelo con topografía”, para poderle dar seguimiento en dicho SURFER.

## **SURFER**

- Para comenzar el tratamiento en el software SURFER se abre el archivo previamente guardado (modres.dat), se elimina la primera fila y se guarda.



- Se procede a abrir una hoja plot y abrir el menú “grid” seleccionando la opción “data”, a continuación se cambian los valores a 100 y 100 con la opción “triangulation with linear interpolation”. Obtenido esto se abre el grid generado y se vuelve a guardar una vez más, sin embargo, a diferencia de la primera vez que se realizó esta acción esta nueva ocasión se guardará en formato “DAT XYZ”.
- Para poder abrir este nuevo archivo de datos es necesario reiniciar el programa. Una vez reiniciado se abre el archivo y en el menú “transform” se intercambia la letra C por D en la segunda ecuación y la letra B por A, los cuales deberán estar en función de la orientación de la tomografía, es decir, será suma si la coordenada inicial es menor que la final y será resta si la coordenada inicial es mayor que la final.
- Las últimas 3 columnas se copiaran para poder trabajarlas en una hoja de cálculo “Excel”.

## Excel

- Se pegan las tres columnas anteriores y se verifica que cada 100 datos se repita la misma coordenada
- En la columna D se escribe la coordenada inicial este\* y se reproduce hasta la fila 100 (esto dependerá de la coordenada que se encuentre en la última fila que se pegó; ya que si la coordenada que aparece es la final norte se debe empezar con la final este)
- En la columna E se divide la diferencia de la coordenada este final menos la inicial entre 100 que son los datos a los cada cuantos se repite, y de la misma manera se reproduce hasta 100.
- En la columna F se escribe del 1 al 100
- En la columna G se multiplica E\*F
- En la columna H se suma D+G
- Ahora los datos de la columna H se copian y se pega debajo del ultimo valor de esta columna hasta llegar a los 10000

En una hoja diferente se continuará con el tratamiento de datos



- Se copia la columna H en B
- C en C
- En D se copia A
- Y en A copiamos B
- Se seleccionan las cuatro columnas de la nueva hoja y se orden de mayor a menor, eliminamos de las cuatro columnas los datos que en A tengan exponente
- Se pasa la columna A a la columna E y se elimina la columna A
- Se guarda

## **VOXLER**

- Se importa el documento de Excel que se guardó se le da ok
- En la ventana de “network manager” aparece el archivo cargado, se le da clic derecho, se selecciona la parte “graphics output” y se le da clic a la tercera opción “scatter plot”, se agrega “axes” de la misma opción que la anterior.
- En la descripción de la gráfica ya generada (property manager) se le modifican los colores dependiendo las unidades geológicas y sus respectivas resistividades en la opción de color map.

Una vez generados los mapas de resistividades se georreferenciaron las tomografías con el área de estudio para tener una visión amplificada de la distribución de dicha zona.

## **Google earth**

Se define el polígono de interés en el software de acuerdo a las coordenadas obtenidas en campo, con la finalidad de correlacionar la disposición espacial de las tomografías con el área de estudio. Con ayuda de marcas de posición (herramienta de google earth) se define el polígono, el cual tendrá que abarcar toda el área para poder visualizar dentro de la imagen los resultados obtenidos.

## **Global mapper**



- Antes que nada se deberá tener cuidado de encontrarse en coordenadas UTM que es la manera en que se trabajaron las tomografías.
- Para comenzar, definiremos perfectamente únicamente el área de estudio.
- Introducir nuestros valores de coordenada E y N obtenidos en las marcas de posición de google earth previamente definidos. Para ello, se deberá seleccionar un punto dentro de la imagen que aparece en la parte derecha del programa, los cuales servirán como referencia al agregar las coordenadas.
- Una vez añadidas las coordenadas del área de interés con sus respectivos puntos de posición y se procederá a generar la imagen georreferenciada, la cual se deberá de exportar como imagen y guardar en la carpeta correspondiente.

## VOXLER

- Para finalizar se deberá importar la imagen creada, oprimiendo clic derecho, importar y seleccionar la imagen.
- Posteriormente, cuando esta haya sido importada, se oprimirá clic derecho, graphics output, orthoimage. **(Consultar anexo fotográfico)**

### 3.1.8 Interpretación y resultados

A continuación se presentan los resultados obtenidos del procesado de datos, los cuales son de gran valor en el presente estudio puesto que son de vital importancia para realizar la correlación deseada.

#### 3.1.8.1 Sección 1

La imagen a continuación presentada muestra la distribución espacial de resistividades de las diferentes rocas encontradas en el subsuelo a lo largo de la sección 1, cuya longitud total es de 110 metros y 15 metros de profundidad.

La sección 1 tiene una amplia variación en cuanto a valores resistivos se refiere, puesto que en la capa más superficial es posible encontrar valores bajo resistivos, acompañados de resistivos que oscilan entre medio-bajo, además es posible notar



que a lo largo de dicha sección la presencia de altos resistivos es mínima, alrededor de 1% de la sección total. A medida que se profundiza más en la sección se presenta un comportamiento casi constante a lo largo de casi toda la parte media de esta, encontrando así resistivos medios que se extienden a una profundidad promedio de 10 metros. En la parte final de la sección retornan los valores bajos de resistividad, los cuales decrecen a profundidad hasta llegar a la parte más profunda de la sección. La figura 19 muestra a detalle lo anterior mencionado.

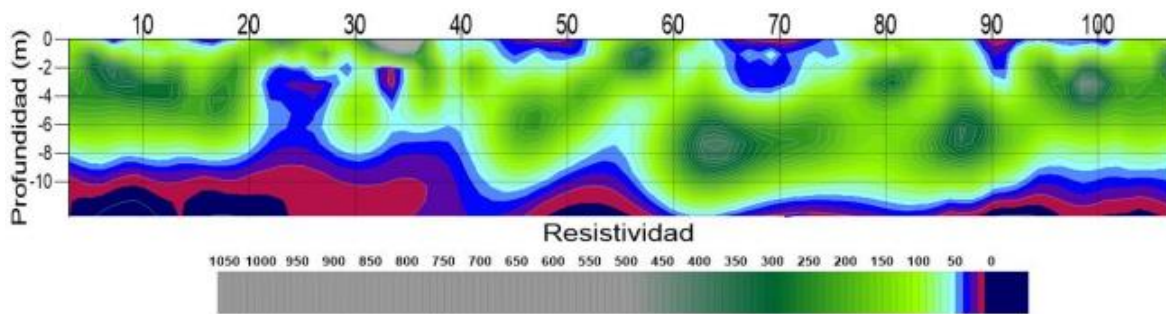


Figura 19. Modelo de resistividad en la sección 1.

De acuerdo con lo anterior mencionado y con base en lo abordado en el capítulo 3.1.3 (Propiedad resistiva/conductiva de las rocas), se realizó una correspondencia entre valores de resistividad y tipo de material de acuerdo a tablas de resistividad de los materiales, ubicando así la disposición espacial de los diferentes estratos que componen el área de estudio.

La sección 1 está compuesta en su capa más superficial por arena limosa, bajo el que subyace una capa continua de caliza de diferente tipología, tal como caliza sana, caliza medianamente agrietada, caliza fosilífera. Esta composición abarca la mayor parte de la sección, ocupando aproximadamente un 85% de esta, extendiéndose a una profundidad promedio de 10 metros, bajo la cual se encuentra una capa semi-homogénea de caliza fracturada con alto grado de karstificación. Lo anterior mencionado puede observarse de mejor manera en la figura 20 mostrada a continuación.



Figura 20. Sección estratigráfica correspondiente a los valores de resistividad en la sección 1.

### 3.1.8.2 Sección 2

La sección 2 cuenta con una elongación de 110 metros y 15 metros de profundidad, lo cual es afín a la sección 1, así como una correspondencia en cuanto a valores de resistividad se refiere, puesto que estas secciones son perpendiculares.

Al inicio de la sección es posible encontrar valores bajo resistivos que no tienen una gran presencia a lo largo de esta, profundizando apenas 2.5 metros aproximadamente y extendiéndose no más de 20 metros. Subyaciendo esta capa superficial bajo resistivos se encuentra una distribución de resistividad media-baja, la cual se extiende a lo largo de toda la sección y a una profundidad promedio de 10 metros. Una vez llegando a la profundidad antes mencionada reaparecen los valores bajos resistivos, extendiéndose hasta el final de la sección tanto en profundidad como en extensión horizontal, cuyo comportamiento es muy similar a lo encontrado en la sección 1, que como ya se comentó son afines debido a su correspondencia perpendicular. A continuación se presenta el modelo de resistividad obtenido para la sección 2.

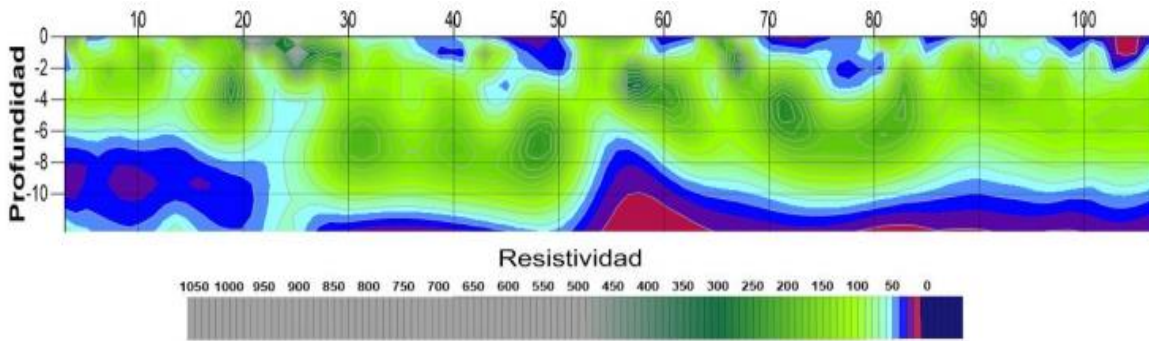


Figura 21. Modelo de resistividad en la sección 2.

Para poder realizar la sección estratigráfica correspondiente se recurrió a las tablas de resistividad de los materiales utilizadas para la sección 1, respetando así los mismos rangos de valores manejados para todo el estudio en cuestión, de manera que sea posible visualizar de manera adecuada todos los modelos obtenidos.

De acuerdo a los valores resistivos evaluados en el capítulo 3.1.3 (Propiedad resistiva/conductiva de las rocas), la parte superficial de la sección presenta arena limosa, bajo el cual subyace un amplio contenido de roca caliza de diferente índole; caliza sana, caliza fosilífera y caliza medianamente fracturada. Por último se encuentra una capa de caliza fracturada con alto grado de karstificación, al final de la sección, siendo este muy similar a la sección 1 anteriormente descrita.

La representación del modelo estratigráfico se presenta a continuación en la figura 22.



Figura 22. Sección estratigráfica correspondiente a los valores de resistividad en la sección 2.



### 3.1.8.3 Sección 3

Una tercera sección fue realizada para soportar de mejor manera las necesidades del proyecto en cuestión, por lo que se decidió ubicarla casi paralela a la sección 1, a 70 metros de separación aproximadamente. La sección 3 cuenta con tan solo 55 metros de extensión vertical, únicamente la mitad en comparación con las dos secciones anteriormente descritas. Sin embargo, a pesar de contar con tan solo la mitad de la elongación esta se extiende a la misma profundidad, alcanzando así también los 15 metros.

La sección 3 cuenta con una distribución de valores resistivos más continua que en las secciones anteriores, estando así distribuida similarmente a estas pero con un mayor grado de homogeneidad a la hora de profundizar en el modelo. Así pues, cuenta con valores bajo resistivos en la parte más superficial que tan solo se extienden por aproximadamente 10 metros de longitud horizontal y tan solo 1 metro de profundidad, los cuales se encuentran subyacidos inmediatamente por valores de resistividad media, cuya extensión abarca los 55 metros de extensión horizontal y una profundidad promedio de 12 metros. La parte más profunda del modelo presenta valores bajo resistivos que se extienden horizontalmente a lo largo de todo el modelo y contando con un espesor promedio de 4 metros aproximadamente. Lo anterior dicho muestra una correspondencia con las secciones anteriormente descritas, por lo que se puede apreciar que el área de estudio presenta características muy similares en toda su extensión, únicamente variando su disposición espacial y el contenido de los diferentes materiales ahí encontrados.

A continuación se presenta el modelo de resistividades correspondiente a la sección 3 para poder visualizar de manera específica la distribución de valores resistivos en esta.

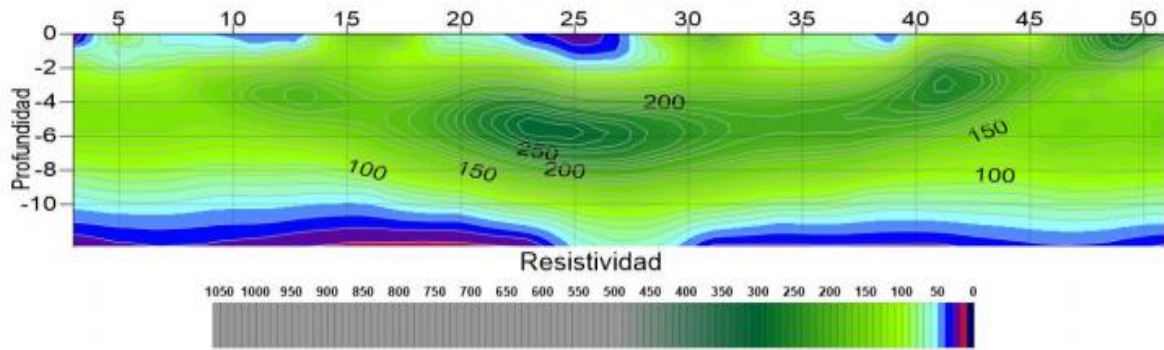


Figura 23. Modelo de resistividad en la sección 3.

De acuerdo al modelo de resistividades obtenido para la sección 3 se realizó una sección estratigráfica correspondiente a los valores de resistividad obtenidos y las tablas de resistividades de los materiales, tal como en las secciones anteriormente realizadas.

La sección 3, como ya se comentó, presenta un comportamiento continuo en cuanto a la disposición espacial de los materiales que la componen, comenzando así con una escasa presencia de arena limosa en la parte más superficial de esta, el cual tan solo se extiende aproximadamente 10 metros horizontalmente y 1 metro de profundidad. Bajo esta capa superficial se encuentra una concentración de roca caliza que varía sus características a medida que se aleja el modelo de la capa central, la cual está compuesta de roca caliza sana, caliza medianamente fracturada, así como también presencia de caliza fosilífera. La capa más profunda de la sección está compuesta por caliza fracturada con alto grado de karstificación, el cual se extiende a lo largo de toda la sección y cuenta con un espesor aproximado de 4 metros.

La sección estratigráfica presenta concordancia con las secciones anteriormente descritas, donde los materiales corresponden con las profundidades estimadas en los modelos resultantes, variando así en su disposición espacial pero manteniendo un comportamiento similar en las 3 secciones. A continuación se presenta el modelo



estratigráfico resultante para la sección 3, pudiendo observar la descripción realizada y analizando la correspondencia con las secciones previas.



Figura 24. Sección estratigráfica correspondiente a los valores de resistividad en la sección 3.



## CAPITULO IV: EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA

### 4.1 GEOTÉCNIA

La geotecnia es una ciencia que analiza a detalle las características del terreno como cimiento de una obra posterior, las cuales ejercerán cargas que modificarán las condiciones de deformabilidad y resistencia de este, interpretando así el origen y formación de los suelos mediante los cuales adquirieron las características y propiedades obtenidas. Mediante la etapa exploratoria se obtienen muestras y se definen las condiciones estratigráficas presentes en el sitio. Posteriormente, las pruebas de laboratorio conducen a la obtención de los parámetros mecánicos de los suelos. Estos parámetros forman parte fundamental dentro del análisis geotécnico ya que es posible determinar el comportamiento del suelo ante la aplicación de cargas debidas a las estructuras. Además, es importante mencionar que a través del análisis de dichos parámetros se obtiene el factor de seguridad.

#### 4.1.1 Fundamentos del Sondeo de Penetración Estándar (SPT)

La finalidad de realización de pruebas de campo tal como el Sondeo de Penetración Estándar es la de conocer las propiedades físicas y mecánicas de los suelos, pruebas mediante las cuales es posible obtener muestras que podrán ser analizadas con detalle en laboratorio.

Este método consiste en la introducción en el terreno de un penetrómetro que será golpeado por un martinete ligado a un sistema de caída, con lo cual se obtendrá la resistencia del terreno mediante la contabilización del número de golpes necesarios para introducir el ensayo en este. El tomamuestras debe introducirse 60 cm en el terreno, mientras que los golpes se contabilizan cada 15 cm. Mediante la aplicación de la metodología anterior mencionada se obtiene un valor N de resistencia a la penetración, cuyos valores de número de golpes se suman en el intervalo 15 – 45 cm, despreciándose así tanto el primer como el último tramo debido a posibles alteraciones del suelo, derrumbes de las paredes del sondeo o sobrecompactaciones debidas al propio ensayo.



Las variaciones debidas al grado de resistencia de los suelos representan cambios en la implementación del método, puesto que si estos son muy elevados, el sondeo se dará por finalizado cuando en un tramo se alcance los 50 golpes. En caso contrario en que el equipo descienda por su propio peso debido a la consistencia sumamente baja o nula del terreno, se indicará  $N = 0$ , ya que no fue necesario aplicar ningún golpe para penetrar el suelo.

El tomamuestras permite recabar cantidades de suelo que permiten ensayar la granulometría y plasticidad mediante los límites de Atterberg, de lo cual se hablará en el apartado siguiente (4.1.2 Parámetros mecánicos del suelo).

#### 4.1.2 Parámetros geotécnicos del suelo

Los parámetros geotécnicos del suelo, a diferencia de las propiedades físicas, son aquellas que rigen el comportamiento de los suelos bajo la acción de esfuerzos inducidos por agentes externos o debidos a cambios naturales del medio en el que se desarrollan. La información recabada en las etapas de exploración, permiten determinar factores cuya importancia radica en conocer el comportamiento del suelo ante según sus características y de acuerdo con el tipo de obra que se llevará a cabo sobre de este, por lo cual, es importante conocer aquellos parámetros que determinan el buen funcionamiento de las obras planeadas. A continuación se detallan individualmente dichos parámetros.

##### 4.1.2.1 Capacidad de carga admisible

Las obras de ingeniería requieren que las cimentaciones y estructuras sean diseñadas para satisfacer los requerimientos de las actividades a realizar, por lo que de acuerdo a las condiciones normales de carga esta deberá de comportarse satisfactoriamente. La resistencia del suelo deberá de ser analizada a fin de conocer el comportamiento de este ante grandes cargas que ocasionalmente se produzcan debido a fuentes diversas. La capacidad de carga representa tanto un problema a corto plazo, por lo que a continuación se abordará brevemente aquellas consideraciones pertinentes en el análisis de capacidad de carga referente a suelos.

La capacidad de carga admisible puede entenderse de mejor manera si esta es vista desde el punto de vista de la balanza de Khristianovich, cuyo desplazamiento está restringido por la fricción en las guías de los platillos, tal como se muestra a continuación.

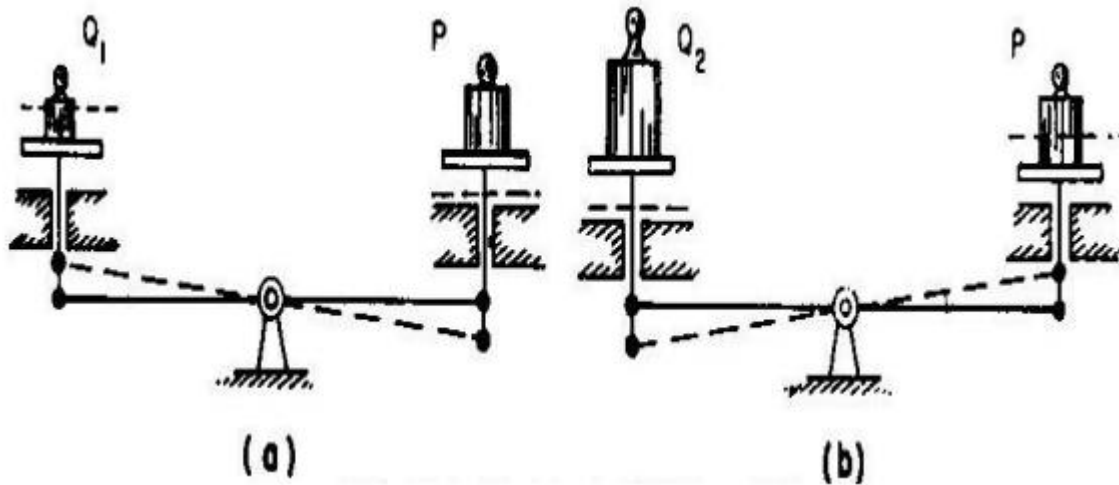


Figura 25. Modelo mecánico de la balanza de Khristianovich.

El principio fundamental de esta balanza es el equilibrio que esta desarrolla gracias a la fricción ocurrida en las guías pese a una diferencia de peso en los platillos, sin embargo, si el peso es mayor que la fricción desarrollada en las guías será necesario modificar el peso en el platillo contrario para mantener el equilibrio.

Es importante mencionar lo correspondiente a la balanza de Khristianovich puesto que en capacidad de carga para suelos no es aplicable debido a la ausencia de equilibrio dado por este. Dicho esto, existe una extensión al modelo de Khristianovich a los suelos, considerando así una cimentación en donde se deberá encontrar la carga máxima que puede aplicarse en esta sin que pierda estabilidad el sistema. En este modelo extendido para suelos puede visualizarse una correspondencia con la balanza anteriormente descrita, a continuación se muestra en la figura 26.

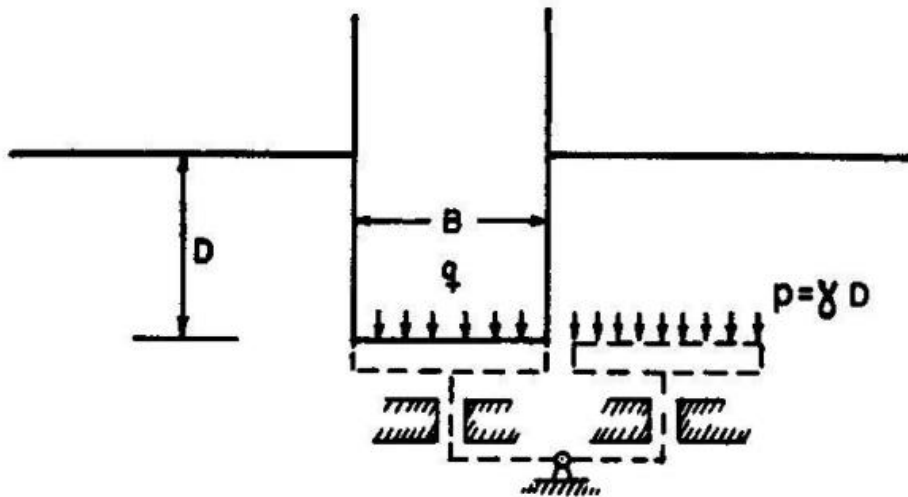


Figura 26. Correspondencia de un cimienta con la balanza de Khristianovich.

La manera de entender el concepto y desarrollo espacial de los suelos es variante según sea el caso, por lo que a lo largo de los años y los diversos estudios referentes a capacidad de carga han sido desarrolladas teorías para entender de mejor manera el funcionamiento real de estos. Las teorías más conocidas han sido desarrolladas con base en la teoría de la plasticidad. A continuación se mencionan las 4 teorías más comunes en el estudio de capacidad de carga.

- El suelo es homogéneo e isótropo
- No se consideran variaciones en el tiempo
- No se consideran fenómenos de histéresis en la curva de esfuerzo
- No se consideran efectos de temperatura

Aquella teoría que atañe al presente estudio es aquella en la que se considera el suelo como homogéneo e isótropo, puesto que esta hipótesis busca la simplicidad matemática y física; en la práctica, algunos suelos son más compatibles con esta hipótesis que otros; los suelos estratificados o aquellos cuyas propiedades tanto verticales como horizontales son los que más difieren y se separan de dicha suposición, por lo que a través del análisis geofísico se pretende brindar a estas hipótesis un sustento en el cual las consideraciones sean específicas de acuerdo al comportamiento espacial de los suelos estratificados.



La importancia de la capacidad de carga admisible específicamente es la base del diseño de cimentaciones superficiales, las cuales se basan en esta. Como ya se mencionó al principio de este apartado, la capacidad de carga admisible es la capacidad de un suelo a soportar una estructura y las presiones generadas por esta. El valor de capacidad de carga admisible se determina calculando en primera instancia la capacidad de carga última, cuyo valor equivale a la carga por unidad de área que ocasionaría falla por cortante en el suelo. Una vez obtenido este valor se determina la capacidad de carga admisible al dividirla entre un factor de seguridad que varía de acuerdo a la certidumbre existente en cada caso específico, el cual está determinado en apego al Código Reglamentario.

El valor de capacidad de carga admisible, también conocida como capacidad portante del suelo, se puede obtener mediante ensayos in situ como lo es el Sondeo de Penetración Estándar (SPT), por lo que en el apartado siguiente es descrito con mayor lujo de detalle el funcionamiento de dicho ensayo.

#### 4.1.3 Aplicaciones

En el apartado 4.1.1 se abordaron los fundamentos básicos del sondeo de penetración estándar, por lo que en el presente se abordará para qué es aplicada esta metodología, qué equipamiento es utilizado para llevar a cabo el sondeo y de qué manera es aplicado este.

El ensayo de penetración estándar es ampliamente utilizado en la exploración geotécnica dado el amplio campo de correlación entre el número de golpes proporcionado en el ensayo y parámetros geotécnicos primordiales en el diseño de cimentaciones. Algunas aplicaciones principales de aplicación del método son:

- Obtener la medida de la resistencia a la penetración con un muestreador en el suelo no cohesivo.
- Tomar muestras representativas del suelo.
- Hallar correlación entre el número de golpes y la compacidad.

#### 4.1.4 Instrumentación y ejecución del ensayo



El penetrómetro consiste en un tubo de acero con una zapata afilada acoplada a un extremo, este tubo se encuentra ranurado longitudinalmente para hacer más fácil la tarea de extracción de la muestra. Aunado al uso del penetrómetro también se hace uso de columna de barras de acero, martinete golpeador con varilla guía para mantener las medidas de seguridad, malacate utilizado para levantar y dejar caer libremente el martinete, entre otros artefactos secundarios que se utilizan en la ejecución del ensayo. A continuación se muestran unas fotografías representativas del equipo de perforación, penetrómetro y sus componentes.



Figura 27. Equipo de perforación con tubo partido.

Uno de los componentes más importantes en la aplicación del sondeo de penetración estándar (SPT) es el muestreador de tubo partido, puesto que gracias a este es posible obtener ejemplares de suelo que después podrán ser analizadas con mayor detalle en laboratorio.

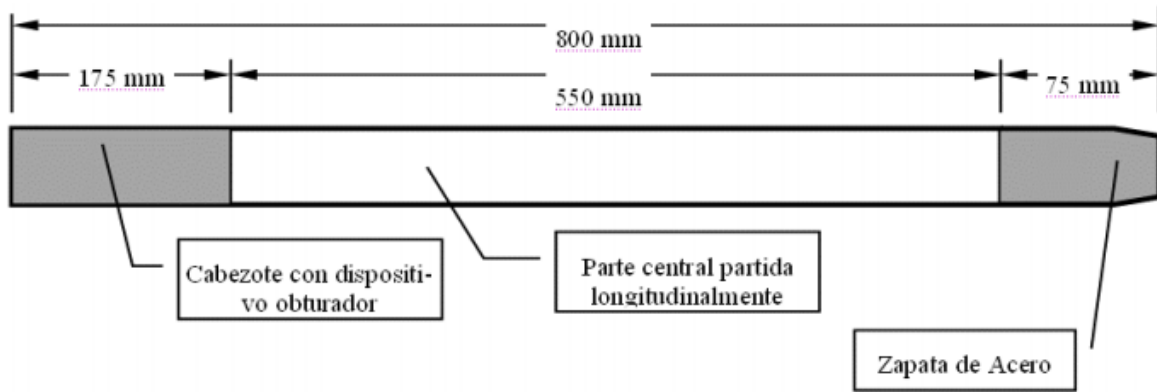


Figura 28. Tubo partido con dimensiones convencionales (pueden variar).

Cuando el equipo de perforación ha sido colocado en el lugar a muestrear se procede con la ejecución del ensayo, para lo cual es necesario izar el martinete a su máxima elevación a manera que este caiga por su propio peso al ser accionado el sistema.

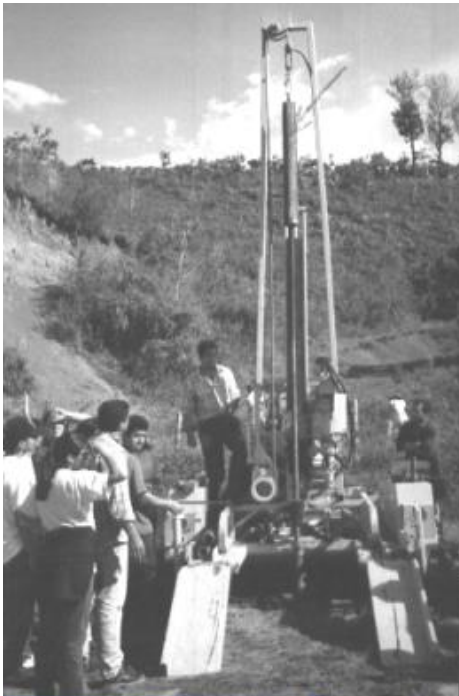


Figura 29. Equipo de perforación en el cual el martinete se mantiene en su máxima elevación previo a ser accionado.



Cuando el sistema es accionado el martinete desciende verticalmente hacia el suelo, golpeando con todo su peso el penetrómetro que se encuentra dentro del pozo, adentrándose así a cierta profundidad según sean las características del suelo en el sitio.



Figura 30. Descenso del martinete y contacto con el suelo.

Ahora que se conocen los componentes principales del equipo de perforación, se describirá de manera breve el procedimiento seguido en campo para llevar a cabo el ensayo. Con la finalidad de agilizar la descripción del procedimiento de campo se subdividirán las acciones en 3 grupos principales, cuya ejecución representan las etapas principales del ensayo.

#### Preparativos para la ejecución

- Antes de comenzar a accionar el equipo de perforación, es necesario evaluar los niveles del motor que hace funcionar la perforadora, puesto que un mal balance en estos puede provocar el mal funcionamiento del equipo de perforación, retrasando la ejecución del ensayo y con la posibilidad de averiar el equipamiento.



- Una vez realizado el chequeo, se ubica el punto que se va a perforar, ubicando sobre este el equipo de perforación, de modo que este coincida verticalmente con el punto a perforar.
- Con los gatos laterales del equipo de perforación se nivela la plataforma de la perforadora, tomando como base los niveles ubicados en la consola de operaciones.
- Se eleva la torre perforadora con la consola de operaciones para así poder colocar el sistema de bombeo del fluido de perforación. Mientras esto ocurre el lodo de perforación es preparado. (Es importante mencionar que este punto es implementado únicamente cuando las condiciones del suelo de interés no son aptas para que el pozo mantenga su forma por sí solo, es decir, el lodo de perforación evita que el pozo colapse por sí mismo, para lo cual se hace uso de una mezcla de agua y bentonita).
- Como último paso previo a la ejecución del ensayo, se acopla manualmente el tubo partido a la cuerda del martinete. **(Consultar anexo fotográfico)**

#### Ejecución del ensayo

- Como inicio de ejecución del ensayo se aplican golpes con el martinete sobre el tubo partido hasta que este haya penetrado 60 cm. Esta acción deberá de cesar si son requeridos 50 o más golpes para penetrar 15 cm en el suelo, extrayendo así únicamente las muestras que hayan sido recuperadas por el tubo partido.
- Se extrae el tubo partido del barreno y se desmonta manualmente del barreno para entregar la muestra al personal correspondiente. Una vez extraído el tubo se lava la broca para eliminar el lodo que pueda obstruir el conducto. Se retira la broca del barreno y se desmonta la columna de barras con ayuda del elevador acoplado al cable de acero.
- Se acopla manualmente el tubo partido a la columna de barras nuevamente con ayuda del elevador. Se repite el procedimiento las veces que lo requiera el estudio hasta concluirlo.



- En caso de requerir el lodo de perforación, este debe de ser sustituido cuando su consistencia se torne espesa, tenga alto contenido de arena o si este ha disminuido en cantidad debido a filtraciones en el sistema de flujo. **(Consultar anexo fotográfico)**

#### Extracción y clasificación de muestras

- Una vez que se extraen las muestras mediante el tubo partido, el personal encargado de clasificar muestras lava el tubo para retirar el exceso de lodo. Se procede a retirar la zapata y el cabezote para poder abrir el tubo.
- Si es posible, se extrae la muestra manualmente o de lo contrario con apoyo de un martillo. Se fotografían las muestras y se retira el tubo para poder embolsarla.
- Cuando la muestra se encuentre embolsada deberá de clasificarse y etiquetarse para su futura evaluación.
- El tubo partido se deberá de entregar limpio al personal encargado de la operación del sondeo para la continuación de este. **(Consultar anexo fotográfico)**

#### 4.1.5 Implementación del método

El sondeo de penetración estándar (SPT) es ampliamente utilizado en la exploración geotécnica debido a la facilidad de aplicación, rapidez de ejecución, sencillez de correlación entre número de golpes y compacidad del suelo, así como su costo de ejecución. Es por ello que se estima que un aproximado entre 85% a 90% de los diseños de las cimentaciones en el continente americano se basa en los resultados obtenidos mediante esta técnica de exploración. Así pues, la finalidad del proyecto tiene como base las recomendaciones de cimentación, proceso constructivo, niveles de desplante, criterios de excavación, caracterización del suelo para la construcción de una “planta modular y molino vertical”. Sin embargo, para efectos del presente estudio de investigación se consideran los parámetros geotécnicos obtenidos en la exploración geotécnica.



A partir de los sondeos de penetración estándar (SPT) o sondeos mixtos (SM), información de campo y resultados en los ensayos de laboratorio, se describe a manera general la estratigrafía del sitio explorado, representando los espesores de cada capa de material hasta la profundidad de exploración.

Se propuso la ubicación de 17 sondeos dentro de la extensión de la locación estudiada, de modo que estos estuvieran ubicados de acuerdo a las necesidades del proyecto, por lo cual, cada uno de ellos representa un punto de interés dentro del plano arquitectónico propuesto. Las imágenes mostradas a continuación ubican detalladamente los puntos en los que fueron llevados a cabo los sondeos antes mencionados.

Sondeo	Coordenadas UTM (WGS84)		Profundidad explorada, m
	Coordenadas X	Coordenadas Y	
SM-01	224,243.69	2,349,388.84	10
SM-02	224,242.80	2,349,272.40	10
SM-03	224,277.75	2,349,233.92	10
SM-04	224,242.18	2,349,189.94	10
SM-05	224,281.73	2,349,267.87	10
SM-06	224,284.85	2,349,294.46	10
SM-07	224,310.76	2,349,233.04	10
SM-08	224,321.50	2,349,263.18	10
SM-09	224,316.86	2,349,300.85	10
SM-10	224,326.64	2,349,306.85	10
SM-11	224,328.54	2,349,323.15	10
SM-12	224,225.62	2,349,335.23	10
SM-13	224,381.24	2,349,316.97	10
SM-14	224,353.68	2,349,176.85	10
SM-15	224,202.60	2,349,185.39	10
SM-16	224,380.00	2349,240.99	10
SM-17	224,332.30	2,349,355.07	10

Tabla 2. Coordenadas y profundidad explorada de los sondeos realizados.



Figura 31. Plano arquitectónico que muestra la ubicación de los sondeos realizados (En rojo).

A continuación se muestra la distribución espacial de los sondeos en el área de interés, en los cuales se puede apreciar un orden definido de acuerdo a la imagen anterior, la cual muestra esta misma ubicación en el plano arquitectónico de la obra a realizar.



Figura 32. Distribución de los sondeos en el predio de interés.



A partir del número de golpes registrados para cada uno de los estratos mediante el sondeo de penetración estándar, se determinaron por correlación las propiedades geotécnicas. Para la obtención de estas, se tomó en cuenta el número de golpes (N) correspondiente a cada estrato, considerando la resistencia que se obtendría de considerar un número de golpes medio de los estratos en toda la profundidad de exploración.

#### 4.1.6 Análisis de datos y resultados

Para obtener los parámetros geotécnicos buscados en este estudio, las muestras obtenidas en campo fueron tratadas en laboratorio mediante dos tipos de pruebas, según sea el caso:

Para el caso de suelos

- *Prueba triaxial*

Para el caso de roca

- *Prueba de compresión no confinada de la roca*

Mediante el análisis e interpretación observada en los sondeos de penetración estándar o sondeos mixtos, fue posible determinar una estratigrafía del sitio, la cual fue corroborada con las muestras extraídas durante la ejecución de estos, mismas que fueron protegidas y llevadas a laboratorio para seguir siendo evaluadas, ensayadas y así poder obtener las propiedades índice de estas.



Figura 33. Muestras de roca extraídas durante la ejecución de los sondeos.

En términos generales, la zona de interés cuenta con el predominio de la roca sedimentaria caliza en diferentes manifestaciones, ya que en algunas zonas se presentó sana, fracturada, karstificada, etc. Con base en la estratigrafía previamente mencionada y en adición al muestreo de campo, se llevó a cabo una serie de ensayos de laboratorio que aportaron la clasificación de los suelos, que, por medio de correlaciones fue posible obtener los parámetros geotécnicos escudriñados en este estudio, con los cuales se desarrolló el análisis de capacidad de carga.

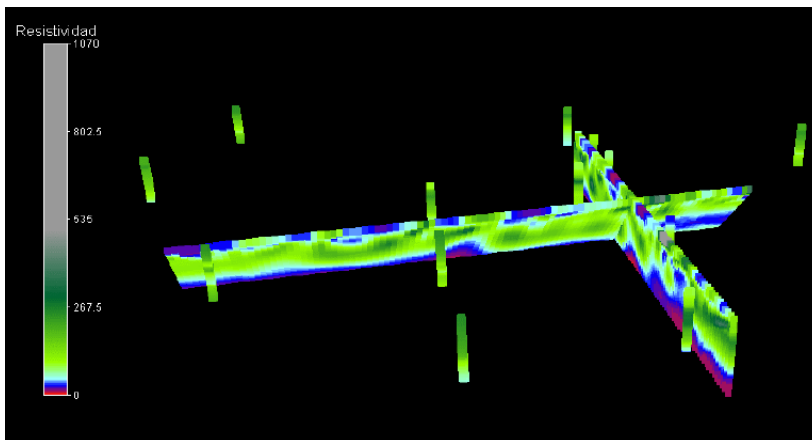


Figura 34. Distribución de SPT con asignación de valores de resistividad según el tipo de roca.



Las muestras alteradas obtenidas en el sitio se protegieron contra pérdida de humedad, para así ser evaluadas lo más acercado a las condiciones bajo las que se encuentra en el suelo. Estas se empacaron con extrema cautela y se trasladaron al laboratorio para ser evaluadas. **(Consultar anexo fotográfico)**

Gracias al tratamiento llevado a cabo en el laboratorio geotécnico, fue posible obtener información de gran importancia para la determinación del tipo de cimentación propuesta en el proyecto a desarrollar. Dentro de esta información es posible encontrar **(Consultar en anexos distribución estratigráfica por sondeo)**:

- Peso volumétrico ( $t/m^3$ )
- RQD (%)
- Resistencia a la compresión de la roca ( $kg/cm^2$ )

Considerando la estratigrafía encontrada en el sitio de interés, el análisis de capacidad de carga de la cimentación se basó en dichas condiciones, por lo que, el factor de seguridad adecuado para el tipo de sistema suelo-cimentación fue de entre 3 y 4. **(Consultar en anexos tabla resumen de ensayos de laboratorio)**

**NOTA:** El procedimiento llevado a cabo para el cálculo de capacidad de carga es de uso exclusivo de L&R Cía. Ingeniería Geotécnica, puesto que la metodología seguida fue desarrollada por la compañía y para uso exclusivo de esta. Toda información referente al proyecto en desarrollo cuenta con protección de derechos de autor y contrato de confidencialidad. Los datos utilizados en el presente trabajo de investigación están debidamente evaluados por los miembros de L&R Cía. Ingeniería Geotécnica, cuya utilización fue previamente autorizada.



## CAPITULO V: CORRELACIÓN DE RESULTADOS

### 5.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS INDEPENDIENTES DE CADA MÉTODO

Posterior al análisis individual llevado a cabo en los apartados correspondientes de la exploración geofísica y geotécnica, es de gran importancia discutir a manera específica la metodología desarrollada para efectos del presente trabajo de investigación, puesto que esta práctica ayudará a comprender con más claridad la importancia de llevar a cabo una correlación de métodos.

#### 5.1.1 Modelo de resistividades

A través de la exploración geofísica, fue posible obtener los modelos de resistividad mediante los cuales se realizó la interpretación y asignación de tipología de roca encontrada en el sitio de estudio. Los modelos estratigráficos obtenidos de esta actividad fueron utilizados para definir un modelo dividido en segmentos, que, con la finalidad de asignar un valor de material a cada punto de los modelos, podrán ser utilizados en la modelación numérica a realizar, puesto que esta requiere de un sistema de pequeños segmentos que brindan al análisis de capacidad de carga mayor aproximación a la realidad, gracias a que las consideraciones serán basadas en la distribución estratigráfica real del sitio de interés. La tabla a continuación presentada, muestra la asignación de valores de material que se realizó para cada elemento de los modelos, obtenidos del procesamiento e interpretación geofísica.

VALOR ASIGNADO	TIPO DE SUELO	PROPIEDADES	SIMBOLOGÍA
1	CALIZA ZANA, CALIZA FOSILÍFERA, CALIZA MEDIANAMENTE FRACTURADA	COMPACTO/FRACTURADO	
2	CALIZA FRACTURADA CON ALTO GRADO DE KARSTIFICACIÓN	KARSTIFICACIÓN	
3	ARENA LIMOSA	SUELTO	

Tabla 3. Asignación de valores de material y sus propiedades.



Los modelos estratigráficos obtenidos, se segmentaron uno por uno en el software AutoCAD, obteniendo así los modelos presentados a continuación.

El modelo número 1 cuenta con un total de 104 segmentos, de los cuales a cada uno se le asignó un valor de material de acuerdo a la tabla 3. Estos valores de material asignados serán de vital importancia al momento de realizar la modelación numérica basada en elemento finito para obtener la capacidad de carga admisible en cada modelo obtenido y de esta manera hacer las recomendaciones de cimentación adecuadas según la distribución estratigráfica y el parámetro geotécnico obtenido.

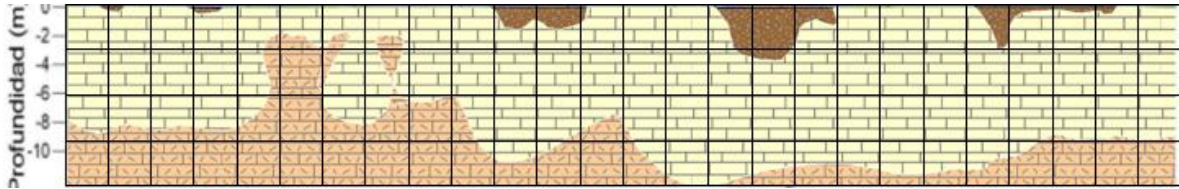


Figura 35. Perfil 1 dividido en segmentos para su posterior evaluación.

Para el modelo número 2 se tiene un total de 130 segmentos, a los cuales se les asigno un valor de material de acuerdo a la tabla 3.

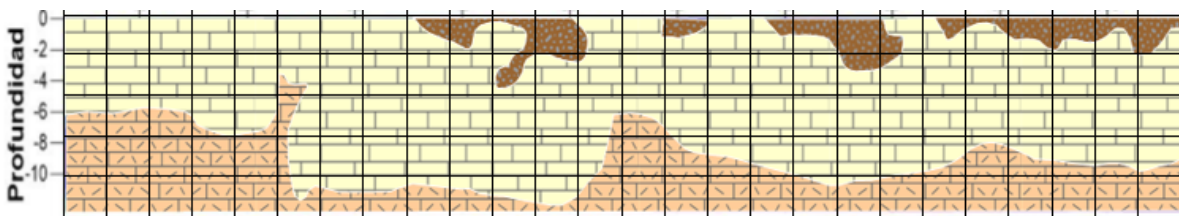


Figura 36. Perfil 2 dividido en segmentos para su posterior evaluación.

Para el modelo número 3 realizó el mismo procedimiento llevado a cabo tanto en el modelo 1 como en el modelo 2. De igual forma, los valores de material se asignaron con base en la tabla 3.

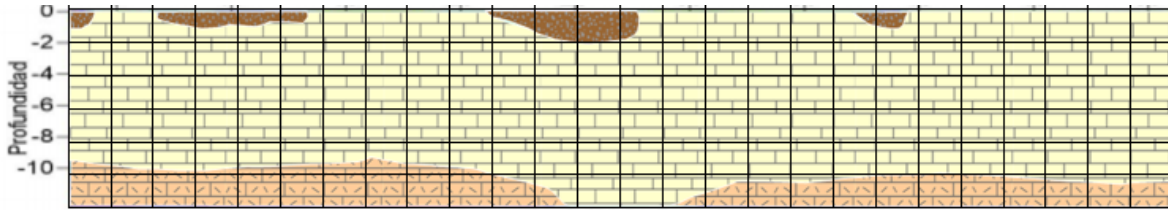


Figura 37. Perfil 3 dividido en segmentos para su posterior evaluación.

### 5.1.2 Parámetros geotécnicos

A lo largo del “**Capítulo IV: Exploración Geotécnica**”, se ha discutido la importancia que representa la capacidad de carga y su aplicación práctica en proyectos de ingeniería. Esto debido a que es de suma importancia conocer el valor de resistencia máxima que experimentará el suelo de estudio. Actualmente, este problema es acrecentado por las idealizaciones existentes, las cuales consideran el perfil estratigráfico del sitio de estudio como un modelo de 1 o 2 estratos, por lo que las consideraciones llevadas a cabo en el análisis de estos no representarán el comportamiento real del suelo ante las cargas aplicadas.

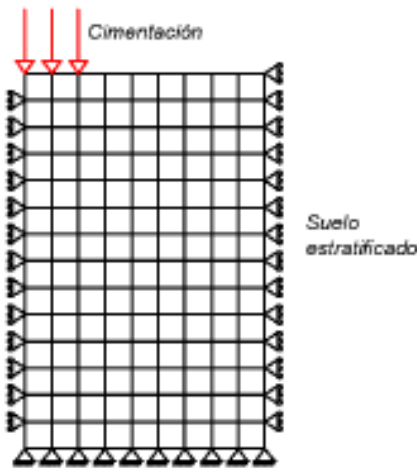


Figura 38. Modelación numérica simplificada. (Gómez, L.E., et al. 2018)

Dado este problema, el ser humano en su constante búsqueda de optimizar y mejorar la manera en que se resuelven los problemas actualmente, ha intentado dar un fundamento sólido a través de diversas consideraciones, siendo el elemento



finito una herramienta que ha demostrado ser la clave para la resolución de este complejo problema geotécnico.

Gracias al constante trabajo de investigación llevado a cabo por los científicos geotecnistas, hoy en día se ha llegado a la formulación de un modelo numérico que pueda predecir la capacidad de carga admisible de los suelos, sobre depósitos que se extienden desde 1 hasta n-estratos. (Gómez, L. E., et al. 2018)

Las consideraciones realizadas en el presente estudio, se realizan con base en fundamentos que suponen el suelo estratificado como un elemento homogéneo que se extiende a gran profundidad, despreciando así lo cambios de litofacies presentes en el subsuelo, modelando entonces de manera aproximada, mas no representando el comportamiento real de este. Lo anterior mencionado se puede observar en la figura 39, donde se representa el esfuerzo promedio en el borde superior izquierdo (Zapata localizada en ese punto) sobre un suelo considerado como homogéneo a lo largo de toda su extensión.

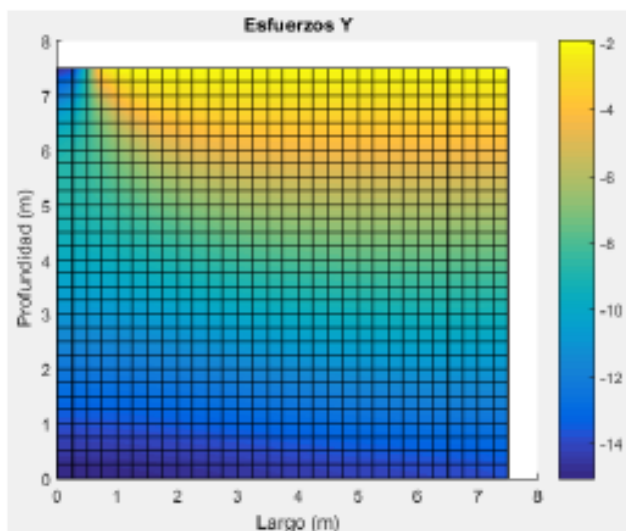


Figura 39. Distribución de esfuerzos verticales provocados por una zapata corrida en un medio homogéneo.

La modelación numérica del fenómeno de capacidad de carga admisible de los diversos perfiles mostrados en el presente trabajo de investigación, se llevaron a cabo utilizando la metodología propuesta por Gómez-Carreño et al., 2019. Una vez



concluido el análisis de elemento finito, se procede al cálculo de la capacidad de carga última, mediante la teoría propuesta por Zeevaert, en la cual se considera que el factor que determina el valor de la capacidad de carga última es la consistencia relativa del suelo en cuestión, manteniendo así la misma metodología para los diferentes tipos de consistencias.

**NOTA: La metodología utilizada en el presente apartado fue desarrollada por el M.C. Gómez Carreño Luis Enrique, quien permitió el uso de la información aquí presentada, que en colaboración al presente proyecto de investigación se llevó a cabo un trabajo en conjunto con la perspectiva Geofísico-Geotécnico que permitió obtener los resultados aquí mostrados. Para conocer con mayor detalle dicha metodología, consultar el artículo de investigación “Modelo simplificado de elemento finito (2D) para la predicción de capacidad de carga admisible en cimentaciones superficiales”, publicado a través de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica A.C.**

## 5.2 CORRELACIÓN DE MÉTODOS Y RESULTADOS

Ahora que se ha discutido de manera independiente las metodologías a correlacionar, es más evidente la importancia de esta correlación, ya que es posible precisar los puntos fuertes de cada una de estas.

Si bien es muy cierto que estas se han implementado de manera independiente durante todos estos años, resulta de especial interés captar las ventajas que presenta una correlación de métodos, puesto que esto le brindará a los estudios y proyectos ingenieriles un sustento fundamental en el diseño de cimentaciones.

La ingeniería geotécnica provee del factor más importante en lo que el presente estudio respecta, puesto que esta ciencia es la encargada de determinar el parámetro de capacidad de carga admisible, la cual determina qué tipo de cimentación y estructura es posible o no desplantar en el sitio de interés (cual sea el caso). Esta práctica es el día a día de los ingenieros y científicos encargados de



proyectos de desarrollo ingenieril hoy en día, con la cual, mediante la metodología propia de la ingeniería geotécnica ha sido posible llevar a cabo dichos proyectos de manera satisfactoria en la mayoría de los casos.

Ahora bien, si esta práctica ha resultado ser acertada y funcional, ¿Cuál es la razón para llevar a cabo una correlación de métodos? La respuesta a esta pregunta radica en las consideraciones efectuadas en todo proyecto que involucre los suelos, puesto que estos son considerados como un medio homogéneo de propiedades equivalentes en toda su extensión, que, para la mayoría de los casos no es así, puesto que estos están compuestos por una distribución de material diversificada de manera tanto horizontal como vertical. Además, la exploración geotécnica permite conocer de qué material se trata y como este se extiende de manera vertical, pero no de manera horizontal.

Por su parte, la ingeniería geofísica permite detallar con gran exactitud la distribución espacial de los estratos que componen el suelo y cómo estos varían su contenido tanto vertical como horizontalmente. Sin embargo, a pesar de lo anterior mencionado, esta práctica no permite determinar los parámetros geotécnicos que atañen al cálculo de capacidad de carga en una cimentación.

Los modelos estratificados obtenidos mediante la exploración geofísica permiten adecuar el análisis de capacidad de carga a las variaciones espaciales representativas de cada sitio de estudio, brindando así un mayor grado de exactitud en los resultados obtenidos, puesto que es posible determinar en qué sitios es o no pertinente desplantar una cimentación de acuerdo a estas variaciones. Con lo anterior, nos aseguramos que los incrementos y/o disminuciones elasto-plásticas provocadas por los esfuerzos externos distribuyan de manera real las deformaciones provocadas, por lo que los valores de capacidad de carga representarán de manera idónea el fenómeno descrito.

#### Caso 1

El perfil 1 muestra una correspondencia con el sondeo número 7, 8, 10 y 11, aproximadamente a 15 m, 45 m, 90 m y 105 m respectivamente. Cabe destacar que

estos sondeos no se extienden a lo largo del perfil 1 exactamente, variando así un par de metros hacia los costados de este, por lo que las correspondencias no serán exactas, más si acercadas a lo ahí presente. La imagen mostrada a continuación pretende representar la manera en que los sondeos geotécnicos se correlacionan con el perfil geofísico, detallando así más adelante el tipo de material extraído del sitio en cuestión analizado.

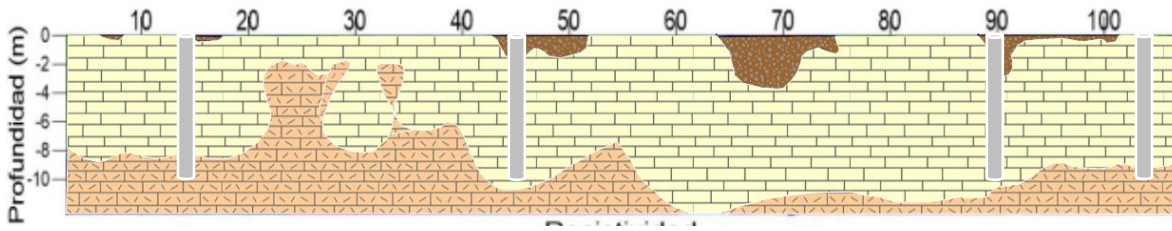


Figura 40. Perfil 1 con representación de los sondeos geotécnicos.

**(Consultar en anexos generales, Anexo 1: Distribución estratigráfica por sondeo)**

De acuerdo al perfil 1 (**Consultar Figura 35. Perfil 1 dividido en segmentos para su posterior evaluación**), se encontró que el depósito a lo largo del tendido está compuesto por caliza sana, caliza fosilífera, caliza medianamente agrietada, caliza fracturada con alto grado de karstificación y arena limosa en menor concentración en la parte superior del terreno.

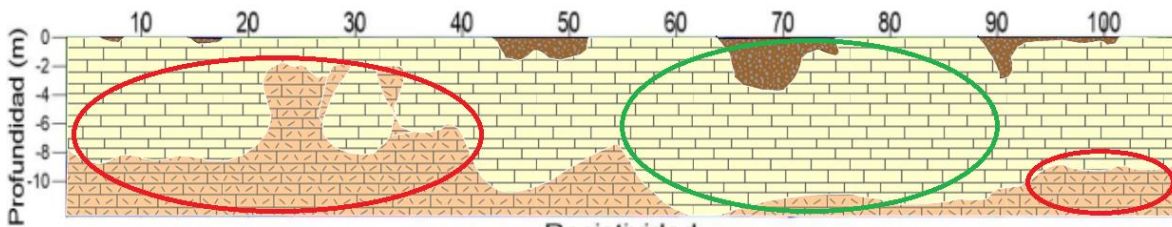


Figura 41. Perfil 1 (Se muestra dentro del componente rojo las zonas a considerar debido al carácter karstificado de las rocas, mientras que dentro del componente verde se muestra la zona competente, cuyos valores de capacidad de carga son mayores).



El depósito mostrado en el perfil 1, muestra que en las zonas definidas entre los 10 - 55 m y la zona comprendida entre 90 – 110, se deberá de tomar precauciones y consideraciones, esto debido a que en estas zonas se encuentra una capa de caliza fracturada con alto grado de karstificación, por lo cual la cimentación del proyecto se desplantaría sobre la zona cuya capacidad de carga oscila los 12 Ton/m<sup>2</sup>.

Contrariamente, la zona comprendida entre 60 – 90 m es altamente competente, esto debido a que la caliza sana, caliza fosilífera y la caliza medianamente agrietada cuentan con una compacidad alta, por lo cual, la capacidad de carga admisible para esta zona será de 33 Ton/m<sup>2</sup> o mayor.

## Caso 2

Es importante recalcar que una correlación adecuada de perfiles de suelo permitirá visualizar el panorama real del comportamiento de este ante la aplicación de cambios debidos al desplante de cimentaciones de una futura obra. Por ello, posterior al análisis llevado a cabo para el perfil 1, se abordará el segundo caso presentado en la exploración geofísica, información que ha sido correlacionada con los parámetros geotécnicos obtenidos.

A lo largo del perfil 2 se muestra una correspondencia con los sondeos geotécnicos 2, 5 y 8, los cuales se posicionan a 5 m, 45 m y 90 m respectivamente. Es importante mencionar que estos sondeos no cruzan exactamente sobre el perfil geofísico 2, más sin embargo se encuentran lo suficientemente cercanos para presentar una correspondencia bastante acertada en cuanto a tipos de materiales se refiere. A continuación se presenta una imagen que muestra la manera en que se encuentran dispuestos los sondeos correspondiendo así con el perfil geofísico 2. **(Consultar Anexos generales, Anexo 1: Distribución estratigráfica por sondeo)**

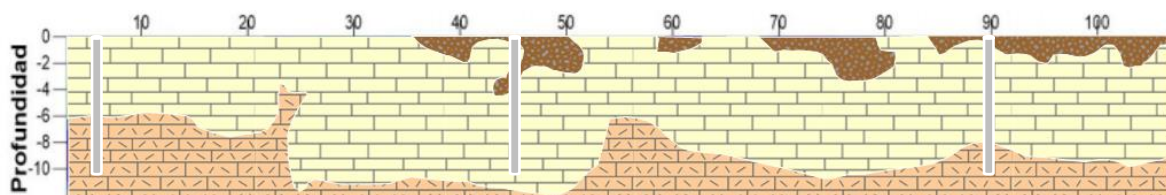




Figura 42. Perfil 2 con representación de sondeos geotécnicos.

El perfil 2 presenta un comportamiento muy similar al perfil 1, puesto que estos fueron dispuestos de manera perpendicular, tal como se puede observar en la figura 43.



Figura 43. Tendido de sondeos geofísicos.

A lo largo del perfil 2 se observa un depósito con contenido similar al perfil 1 de caliza sana, caliza fosilífera, caliza medianamente agrietada, caliza fracturada con alto grado de karstificación y arena limosa en menor concentración en la parte superior del terreno.

La modelación numérica de capacidad de carga admisible, realizado para el perfil 2, arrojó que de acuerdo a la extensión de este, los puntos comprendidos entre 0 – 22 m y 50 – 110 m cuentan con una capacidad de carga admisible que oscila entre 13 Ton/m<sup>2</sup> – 15 Ton/m<sup>2</sup> debido al carácter karstificado de las rocas ahí presentes, por lo que será una situación considerar al momento de evaluar el posible desplante de la estructura del proyecto en pie.

Caso contrario, la zona ubicada entre los 23 – 50 m del perfil 2, presenta ser altamente competente pasados los 2 metros de profundidad, puesto que su capa más superficial cuenta con presencia de arena limosa, cuyo contenido no afectaría puesto que se trata de la capa más superficial. Esta zona representa aquella de mayor compacidad dentro del perfil 2, ya que la capacidad de carga admisible para esta es de aproximadamente 31 Ton/m<sup>2</sup>.

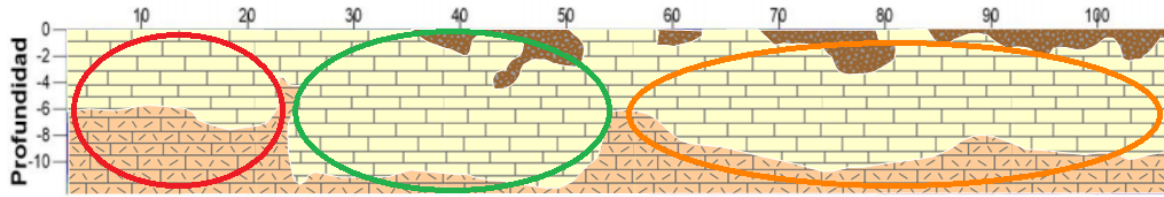


Figura 44. Perfil 2 (Se muestra dentro del componente rojo las zonas a considerar debido al carácter karstificado de las rocas, mientras que dentro del componente verde se muestra la zona competente, cuyos valores de capacidad de carga son mayores).

### Caso 3

El perfil geofísico 3 cuenta con tan solo la mitad de longitud en comparación con el par antes mencionado, es por ello que tan solo muestra correspondencia con el sondeo geotécnico 16, aproximadamente a 5.5 m del inicio del perfil 3. Es importante mencionar que existe una separación aceptable entre perfil y sondeo, por lo que la correlación de tipo de material encontrado puede variar un poco por esta razón, más sin embargo la correspondencia será notable. **(Consultar Anexos generales, Anexo 1: Distribución estratigráfica por sondeo)**

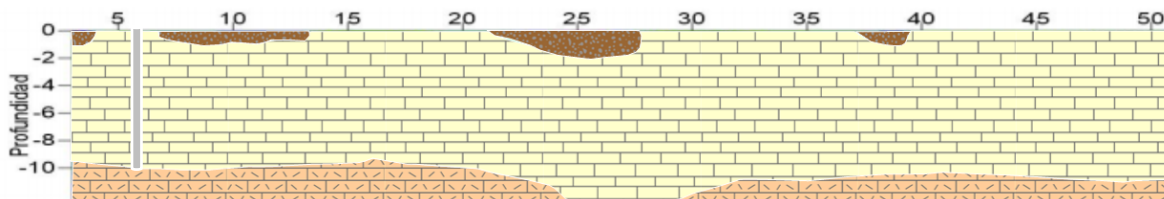


Figura 45. Perfil 3 con representación de sondeos geotécnicos.

En el caso del perfil 3, la situación en cuanto a contenido de materiales es equivalente a la de los primeros dos perfiles, únicamente variando la disposición en la que estos se encuentran, ya que este fue realizado de manera paralela al perfil 1. **(Consultar Figura 43. Tendido de sondeos geofísicos).**

Este perfil cuenta con una elongación total que equivale a la mitad de los dos primeros perfiles, es decir, 55 metros. El depósito para este perfil cuenta con una concentración menor de roca caliza fracturada con alto grado de karstificación en



comparación con los perfiles anteriores, caliza sana, caliza fosilífera, caliza medianamente agrietada.

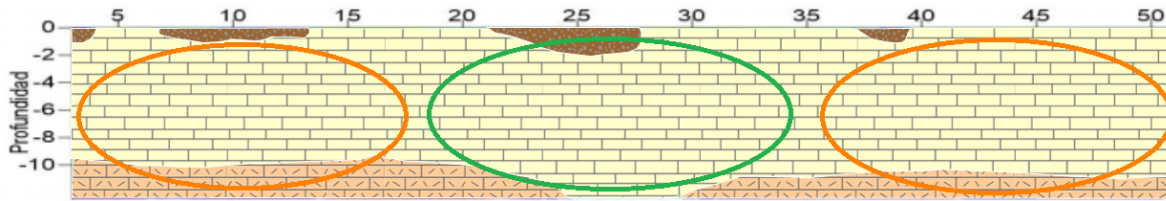


Figura 46. Perfil 3 (Se muestra dentro del componente rojo las zonas a considerar debido al carácter karstificado de las rocas, mientras que dentro del componente verde se muestra la zona competente, cuyos valores de capacidad de carga son mayores).

La modelación numérica correspondiente al perfil 3 mostró un comportamiento con mayor grado de compacidad, ya que en las zonas comprendidas entre 0 – 22 m y 33 – 55 m, cuya presencia de roca caliza fracturada con alto grado de karstificación, modifica la capacidad de carga, el valor de este fue de entre 15 Ton/m<sup>2</sup> – 18 Ton/m<sup>2</sup> aproximadamente.

Gracias a esta modelación numérica, se sabe que la zona mayormente competente de este perfil es aquella comprendida entre 23 – 33 m, esto debido a que el depósito ahí presente comprende materiales altamente firmes, cuya capacidad de carga admisible se aproxima a los 36 Ton/m<sup>2</sup>.

### 5.3 CONFIRMACIÓN DE HIPÓTESIS

Mediante la implementación de los modelos de resistividades obtenidos mediante la exploración geofísica, fue posible elaborar perfiles que describen el tipo de suelo presente en el sitio de estudio, con lo cual, la modelación numérica llevada a cabo para cada caso, mostró las variaciones en cuanto a capacidad de carga admisible respecta, siendo estas de especial importancia en el análisis previo al diseño de cimentaciones, puesto que de no haber sido implementada la presente correlación, no habría sido posible conocer el comportamiento real de la capacidad de carga admisible a través de la extensión estratigráfica del sitio, ya que dicha extensión



habría sido considerada como un medio homogéneo sin variaciones en su extensión.



## CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 CONCLUSIONES

El enfoque principal del presente estudio de investigación radica en unificar y aprovechar las bondades independientes de cada metodología, las cuales, mediante la evaluación por elemento finito permite realizar ajustes coherentes al diseño de capacidad de carga.

Previo a la realización del presente proyecto de investigación, en el cálculo de capacidad de carga para diseño de cimentaciones, el perfil estratigráfico presente en el subsuelo se consideraba homogéneo, por lo cual, mediante la aplicación y unificación de ciencias adicionales como lo es la Geofísica fue posible realizar determinaciones que se apegan a la distribución real de las capas que componen el subsuelo y a la capacidad de carga que estas son capaces de soportar para la ejecución de una obra.

Las muestras obtenidas de los sondeos geotécnicos, verifican la veracidad de los sondeos geofísicos, puesto que mediante la correlación de sondeos fue posible definir parámetros a considerar en el cálculo de capacidad de carga.

El método de Tomografía de resistividad eléctrica resuelve el complejo impedimento de la variación espacial de los suelos estratificados respecto a las técnicas implementadas en la exploración geotécnica, las cuales arrojan consideraciones unidimensionales a través de los estratos verticales, más no horizontales.

Las metodologías descritas funcionan adecuadamente de manera independiente para fines prácticos y cada uno de estos presenta ventajas uno sobre de otro, por lo que, la aplicación en conjunto de ambas y la correlación de resultados, permite al ingeniero sustentar con mayor grado de certidumbre el análisis correspondiente al diseño de cimentaciones para fines de obras civiles, con lo cual, la comunidad ingenieril se verá beneficiada, puesto que los proyectos de desarrollo contarán con un mayor grado de sustentabilidad a lo largo del tiempo.

El método para el cálculo de capacidad de carga admisible es independiente de cada usuario y su implementación varía de acuerdo a las necesidades, línea de



investigación, responsables de la investigación y tratamiento de datos, por lo que los resultados obtenidos van en función de la metodología utilizada.

La finalidad de la investigación realizada va en pos de aprovechar las bondades de cada ciencia como un factor común, puesto que ambas han sido desarrolladas para entender el comportamiento de los suelos sobre los cuales se encuentra postrada la actual sociedad y como es que estos pueden afectar al desarrollo de proyectos en pie, en desarrollo o futuros.

Este proyecto de investigación no pretende sustituir ningún lado de la línea de investigación correspondiente a cada ciencia, puesto que la manera de funcionar de esta metodología es en conjunto, aplicando los conocimientos independientes e implementando una correlación coherente entre ambas.

Con la modelación numérica de elemento finito para capacidad de carga admisible, se comprueba la eficacia del modelado respecto a otras técnicas de cálculo de este parámetro. Por ello, el usuario es el responsable de obtener los parámetros mecánicos de acuerdo al comportamiento del depósito.

Este proyecto de investigación tuvo su origen al plantear el interés de obtener un modelo geofísico que representara no solo las variaciones espaciales del medio estudiado, si no las características que van más allá, siendo estas los parámetros geotécnicos utilizados en el análisis de diseño de cimentaciones y etapa de pre-evaluación en obras civiles.

El desarrollo de este proyecto prevé ser a largo plazo un factor ineludible en la ingeniería moderna, puesto que sus ventajas de aplicación son ampliamente funcionales y coherentes.

Las consideraciones llevadas a cabo durante la evaluación geofísica-geotécnica, permitieron identificar zonas cuya capacidad de carga disminuye considerablemente debido a las variaciones laterales a lo largo del perfil, situación que no era considerada con anterioridad en el cálculo de capacidad de carga por elemento finito, al no contar con el respaldo de secciones que muestren la distribución lateral de las litofacies presentes en el sitio de interés.



La aplicación del presente estudio de investigación, permitió reforzar el análisis de capacidad de carga, con lo cual se definieron zonas cuyas características deberán de ser consideradas en el diseño de cimentaciones.

## 6.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda ampliamente desarrollar la exploración geofísica previo a la exploración geotécnica a fin de poder determinar y proponer puntos estratégicos en los cuales la exploración geotécnica confirmará situaciones de incertidumbre durante la ejecución del proyecto.

Se recomienda ampliar la profundidad de los sondeos geotécnicos que permitan evaluar la posible presencia de cavernas en el sitio de interés, puesto que el carácter kárstico de la zona puede encontrarse en niveles más profundos a los que fueron explorados.

Se recomienda realizar sondeos geotécnicos sobre los perfiles geofísicos, de manera que la concordancia sea exacta, sin margen de error, a fin de establecer un modelo completo y real de litofacies, que permita ver el comportamiento que tiene el suelo en la zona y así añadir este mismo al diseño de capacidad de carga.

Se recomienda ampliar el proyecto de investigación considerando metodologías adicionales para elaborar un conjunto de correlaciones que permita obtener una descripción completa en cuanto las características y propiedades del suelo, es decir, aunar campos de aplicación alternos mediante los cuales se evalúe y determine las limitaciones y/o alcances de los futuros proyectos. Como tópicos a considerar se recomienda indagar en materia de Ingeniería sísmica e hidráulica.

Se recomienda no estandarizar la metodología descrita, puesto que para cada caso de estudio existen diferentes variaciones en cuanto a las características del medio, por lo que el usuario deberá de tomar como guía lo aquí presentado y dar sustento mediante los cálculos y exploraciones correspondientes a cada caso particular.



Las consideraciones que atañen al tipo de arreglo a utilizar en la exploración geofísica, van en función de las necesidades específicas del proyecto a desarrollar, por lo que se recomienda que el usuario evalúe lo anterior mencionado en la etapa de planeación del proyecto. El proyecto de investigación realizado, no es exclusivo de un tipo de arreglo y separación electródica, por lo cual para efectos de implementación, estas consideraciones no tienen un impacto mayúsculo en los resultados a obtener, más si en los objetivos del proyecto, tal como profundidad de investigación, resolución de los modelos de resistividades, etc.

La planeación previa a la realización de etapas exploratorias habrá de ser considerada como un tópico de sumo interés para el proyecto a desarrollar, por lo cual se recomienda ampliamente implementar técnicas de exploración geofísica, las cuales han demostrado un alto grado de efectividad en proyectos geotécnicos, además de que permitirá sugerir y planificar estratégicamente la exploración geotécnica, cuya finalidad es la de optimizar el desarrollo del proyecto, tanto económicamente como en la ejecución.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Administración portuaria integral de Progreso, Yucatán. (2017). Conectividad. 20 de Septiembre de 2018, de Secretaria de Comunicaciones y Transportes Sitio web: <https://www.puertosyucatan.com/ap/conectividad.htm#>
- Alarcón, A. (Sin fecha). Mecanismos de licuación y flujo de suelos granulares durante sismos. Bogotá, Colombia.
- Álvarez-Manilla, A. (2003). Geofísica aplicada en los proyectos básicos de ingeniería civil. Sanfandilla, Qro: Publicación técnica.
- Arias, D (2011). Exploración Geotécnica – Relaciones Geoeléctricas (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
- Baker, H., Gabr, A. & Djeddi. (2015). Geophysical and Geotechnical Techniques: Complementary tools in studying susurface features.. Emirates Arabic United (UEA) & Algeria (USTHB):
- Barbero, A. J. (Sin fecha). Inducción Electromagnética
- Batllori, E., González-Piedra, J. I., Díaz-Sosa, J. & Fébles, J. L. (2005). Caracterización Hidrológica de la región costera noroccidental del Estado de Yucatán, México.. Ciudad de México.
- Carrasco, P. (2013). Avance en técnicas Geofísicas para la caracterización del subsuelo mediante innovación y el uso de herramientas de gestión de información espacial (Tesis doctoral). Universidad de Salamanca, Castilla y León, España.
- Chávez Gandarilla, A. (2014). Fallas presentadas en algunas obras subterráneas y cimentaciones (Tesina de especialidad). Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F., México.
- Cheng, L. (2004). Soils and foundations Pearson/Prentice Hall, E.U.A.
- Collazos, C., González, O., Ante, Carlos., Bravo, D. & Concha, A. (2006). Ensayo de penetración estándar. Cauca, Colombia.: Universidad del Cauca.



- Comisión Nacional del Agua. (2012). Manual de mecánica de suelos y monitoreo del comportamiento de obras hidráulicas. México D.F.: Secretaría de medio ambiente y recursos naturales.
- Fernández-Sola, L. R. (2017). Interacción dinámica suelo-estructura. Ciudad de México.
- Flores-Estrella, H., Cárdenas, M. & Lomnitz, C. (2009). Respuesta sísmica en el Lago de Texcoco. Resultados a partir de registros de movimientos fuertes. Scielo, 81, pp, 18-20.
- García Galdamez, J. E., López Barahona, N. B. & Muñoz Ángeles, J. E. (2011). Aplicación de la prospección geofísica utilizando el método Schlumberger para la exploración del agua subterránea en Canton los Magueyes, colonia Santa Lucia, municipio de Ahuachapan. El Salvador.: Universidad del Salvador.
- García-Gil, G. & Graniel, E. (Sin fecha). Biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán. Tamaulipas, México: Contexto físico.
- Gómez-Carreño, L. E. (2018) Modelo simplificado de elemento finito (2D) para la predicción de la capacidad de carga admisible en cimentaciones superficiales. Lozada y Rodríguez Compañía Ingeniería Geotécnica, Puebla, Puebla.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Ingeniería (INEGI). (2002). Estudio Hidrológico del estado de Yucatán. 20 de Septiembre de 2018, de Gobierno del estado de Yucatán Sitio web: [http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825224165/702825224165.pdf](http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825224165/702825224165.pdf)
- Juárez-Badillo, E. & Rico, A. (2004). Mecánica de suelos 2: Teoría y aplicaciones de la mecánica de suelos. México D.F.: Limusa.
- Juárez-Badillo, E. & Rico, A. (2005). Mecánica de suelos 1: Fundamentos de la mecánica de Suelos. México: Limusa.



- Kofman, H. A. & Concari, S. B. (Sin fecha). Dificultades conceptuales con la Ley de Ampere: Análisis bibliográfico y simulación como propuesta. Santa Fe, Argentina.: Facultad de Ingeniería Química.
- Lambe, W. & Whitman, R. V. (2001). Mecánica de suelos. México D.F.: LIMUSA.
- Laterlite. (2015). Geotecnia e infraestructuras, soluciones ligeras y sólidas con arcilla expandida laterlite y hormigones ligeros estructurales. Milano. Italia: Guía técnica.
- Pellicer, E. (2015). Caracterización mediante tomografía eléctrica del deslizamiento de Toledo, Oviedo (Tesis de maestría). Universidad de Oviedo, Oviedo, España.
- Potts, D. M. & Zdravovic, L. (1999). Finite element analysis in geotechnical engineering. First edition. Thomas Telford.
- Ruíz Saucedo, U. (2003) Clasificación de texturas y parámetros mecánicos de suelos. México D.F.
- Ruíz Vázquez, M. & González Huesca, S. (2004). Geología aplicada a la ingeniería civil. México D.F.: LIMUSA.
- SIAPA. (2014). Criterios y lineamientos técnicos para factibilidades. Guadalajara, Jalisco.
- Sísmica de suelos. (2019). Sondeo de Penetración Estándar (SPT). Ciudad de México.
- Soriano, C. Y. (2014). Aplicación del ensayo de penetración estándar en la determinación de parámetros geotécnicos de suelos granulares. Universidad de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Zúñiga, R. (Sin fecha). Detección de zonas de riesgo en la ciudad de Guatemala. México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.



## ANEXOS

### Anexos generales

#### Anexo 1: Distribución estratigráfica por sondeo

##### Sondeo Mixto, SM-1

- De 0.00 m a 1.50 m de profundidad: Roca caliza sana
- De 1.50 m a 4.00 m de profundidad: Roca caliza fracturada
- De 4.00 m a 5.50 m de profundidad: Roca caliza fracturada con karsticidad
- De 5.50 m a 9.00 m de profundidad: Roca caliza fragmentada con material arenoso producto del proceso de karstificación.
- De 9.00 m a 10.00 m de profundidad: Roca caliza fracturada con karstificación.

##### Sondeo Mixto, SM-2

- De 0.00 m a 0.90 m de profundidad: Roca caliza sana
- De 0.90 m a 1.00 m de profundidad: Caverna
- De 1.00 m a 2.00 m de profundidad: Roca caliza sana
- De 2.00 m a 3.00 m de profundidad: Roca caliza fracturada con karsticidad
- De 3.00 m a 4.00 m de profundidad: Roca caliza sana
- De 4.00 m a 7.00 m de profundidad: Roca caliza con proceso de karsticidad
- De 7.00 m a 10.00 m de profundidad: Roca caliza fracturada con karsticidad

##### Sondeo Mixto, SM-3

- De 0.00 m a 6.20 m de profundidad: Roca caliza sana
- De 6.20 m a 10.00 m de profundidad: Roca caliza fracturada con karsticidad

##### Sondeo Mixto, SM-4

- De 0.00 m a 1.00 m de profundidad: Roca caliza fragmentada o fragmentos de roca
- De 1.00 m a 3.00 m de profundidad: Roca caliza sana
- De 3.00 m a 5.00 m de profundidad: Roca caliza fracturada



- De 5.00 m a 10.00 m de profundidad: Roca caliza fragmentada con proceso de karsticidad

#### Sondeo Mixto, SM-5

- De 0.00 m a 3.50 m de profundidad: Roca caliza sana
- De 3.50 m a 5.00 m de profundidad: Roca caliza fracturada
- De 5.00 m a 5.40 m de profundidad: Roca caliza fracturada con karsticidad / Caverna
- De 5.40 m a 6.20 m de profundidad: Roca caliza fragmentada con proceso de karsticidad y arena
- De 6.20 m a 10.00 m de profundidad: Roca caliza fracturada con karsticidad

#### Sondeo Mixto, SM-6

- De 0.00 m a 2.20 m de profundidad: Roca caliza sana
- De 2.20 m a 5.40 m de profundidad: Roca caliza fracturada con karsticidad
- De 5.40 m a 10.00 m de profundidad: Roca caliza muy fragmentada con alto grado de karsticidad

#### Sondeo Mixto, SM-7

- De 0.00 m a 2.00 m de profundidad: Roca caliza sana
- De 2.00 m a 3.70 m de profundidad: Roca caliza fracturada / Caverna
- De 3.70 m a 7.00 m de profundidad: Roca caliza sana
- De 7.00 m a 10.00 m de profundidad: Roca caliza fracturada con proceso de karsticidad

#### Sondeo Mixto, SM-8

- De 0.00 m a 1.00 m de profundidad: Roca caliza sana
- De 1.00 m a 2.30 m de profundidad: Roca caliza fracturada
- De 2.30 m a 6.50 m de profundidad: Roca caliza sana
- De 6.50 m a 7.50 m de profundidad: Roca caliza fracturada con proceso de karsticidad



- De 7.50 m a 8.10 m de profundidad: arena limosa de color blanco con gravas
- De 8.10 m a 10.00 m de profundidad: Roca caliza muy fracturada con alto grado de karsticidad

#### Sondeo Mixto, SM-9

- De 0.00 m a 1.00 m de profundidad: Roca caliza sana
- De 1.50 m a 4.60 m de profundidad: Roca caliza fracturada con karsticidad
- De 4.60 m a 5.00 m de profundidad: Roca caliza muy fracturada con alto grado de karsticidad
- De 5.00 m a 6.00 m de profundidad: Roca caliza fracturada con karsticidad
- De 6.00 m a 10.00 m de profundidad: Roca caliza fracturada con karsticidad / Cavernas

#### Sondeo Mixto, SM-10

- De 0.00 m a 2.00 m de profundidad: Roca caliza sana
- De 2.00 m a 3.00 m de profundidad: Roca caliza fracturada
- De 3.00 m a 8.50 m de profundidad: Roca caliza fracturada con karsticidad
- De 8.50 m a 10.00 m de profundidad: Arena limosa con fragmentos de roca

#### Sondeo Mixto, SM-11

- De 0.00 m a 4.50 m de profundidad: Roca caliza sana
- De 4.50 m a 4.90 m de profundidad: Arena limosa de color blanco / Caverna
- De 4.90 m a 8.60 m de profundidad: Roca caliza fracturada con karsticidad
- De 8.60 m a 10.00 m de profundidad: Arena limosa de color blanco con fragmentos de roca

#### Sondeo Mixto, SM-12

- De 0.00 m a 1.00 m de profundidad: Roca caliza sana
- De 1.00 m a 5.00 m de profundidad: Roca caliza fracturada
- De 5.00 m a 6.40 m de profundidad: Roca caliza fracturada con karsticidad



- De 6.40 m a 10.00 m de profundidad: Roca caliza muy fracturada con alto grado de karsticidad

#### Sondeo Mixto, SM-13

- De 0.00 m a 0.50 m de profundidad: Roca caliza sana
- De 0.50 m a 5.50 m de profundidad: Roca caliza fracturada con karsticidad
- De 5.50 m a 6.80 m de profundidad: Roca caliza muy fracturada con alto grado de karsticidad
- De 6.80 m a 7.00 m de profundidad: Roca caliza fracturada con karsticidad / Caverna
- De 7.00 m a 10.00 m de profundidad: Roca caliza fracturada con karsticidad

#### Sondeo Mixto, SM-14

- De 0.00 m a 10.00 m de profundidad: Roca caliza sana

#### Sondeo Mixto, SM-15

- De 0.00 m a 1.00 m de profundidad: Roca caliza sana
- De 1.00 m a 2.00 m de profundidad: Roca caliza fracturada con karsticidad / Cavernas
- De 2.00 m a 5.50 m de profundidad: Roca caliza fracturada con karsticidad
- De 5.50 m a 7.00 m de profundidad: Roca caliza muy fracturada con alto grado de karsticidad
- De 7.00 m a 10.00 m de profundidad: Roca caliza fracturada con karsticidad / Caverna

#### Sondeo Mixto, SM-16

- De 0.00 m a 0.30 m de profundidad: Limo arenoso con gravas
- De 0.30 m a 3.40 m de profundidad: Roca caliza fracturada
- De 3.40 m a 5.40 m de profundidad: Roca caliza fracturada / Caverna de 0.30 m
- De 5.40 m a 6.80 m de profundidad: Roca caliza fracturada



- De 6.80 m a 10.00 m de profundidad: Roca caliza fracturada con karsticidad / Arena limosa

#### Sondeo Mixto, SM-17

- De 0.00 m a 1.00 m de profundidad: Roca caliza sana
- De 1.00 m a 2.00 m de profundidad: Roca caliza fracturada con karsticidad / Caverna
- De 2.00 m a 3.50 m de profundidad: Roca caliza fracturada con karsticidad
- De 3.50 m a 10.00 m de profundidad: Roca caliza muy fracturada con alto grado de karsticidad

Anexo 2: Tabla de resumen

#### Anexo fotográfico



Sondeo 1: Posicionamiento, separación de electrodos y ejecución de sondeo.



Sondeo 2: Instalación de electrodos y operación del equipo.



Sondeo 3: Instalación y ejecución del sondeo.



Sondeo 1 y 2: Instalación y ejecución.



Sondeo 3 y 4: Ejecución, clasificación de muestras y extracción de muestras del tubo partido.



Sondeo 5 y 6: Instalación, clasificación de muestras y ejecución.



Sondeo 7 y 8: Ejecución, análisis de muestras e instalación.

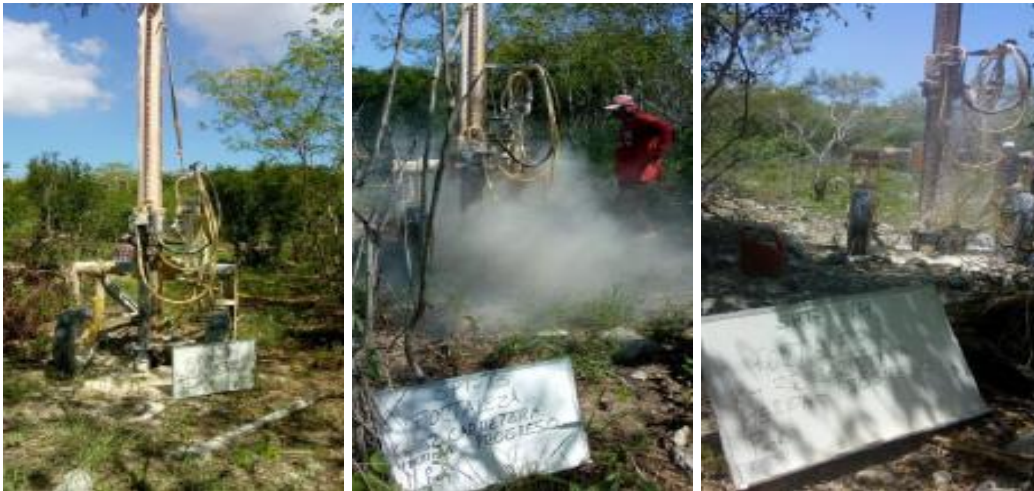




Sondeo 9 y 10: Ejecución, introducción de tubos y clasificación de muestras.



Sondeo 11 y 12: Análisis de muestras, embolsado contra pérdida de humedad e instalación.



Sondeo 13 y 14: Ejecución e instalación.



Sondeo 16 y 17: Ejecución, evaluación de muestras e instalación.



Muestras de caliza marina karstificada con contenido de orgánicos.



Clasificación de muestras obtenidas de los sondeos de penetración estándar.