



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Estimación de la estabilidad y levantamiento topográfico de la gruta Cueva del Mundo en la localidad Santa María Nativitas Coatlán, en el municipio de Santo Domingo Tehuantepec, Oaxaca.

TESINA

Que para obtener el título de

Ingeniero de Minas y Metalurgista

P R E S E N T A

Angel Isaac Vázquez Flores

DIRECTOR DE TESINA

Ing. Javier Mancera Alejándrez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018



RESUMEN

Este trabajo evaluará las condiciones estructurales y mecánicas del macizo rocoso, así como la calidad del mismo en la gruta Cueva del Mundo localizada en Santo Domingo Tehuantepec en el estado de Oaxaca, cuyos resultados permitirán estimar la estabilidad, y al mismo tiempo realizar un modelo tridimensional de la misma. Consistirá en asistir a la zona de estudio y realizar el levantamiento topográfico, recoger datos estructurales y describir el macizo rocoso. Para su elaboración se realizarán trabajos de investigación bibliográfica, en campo, analíticos y experimentales.

Basados en métodos convencionales de topografía será la manera en que se realizará el modelo tridimensional y en el cual se apreciará de mejor forma las zonas en que se estimará la estabilidad.

El uso de la clasificación GSI por sus siglas en inglés, Geological Strength Index, será clave para fijar la calidad del macizo rocoso. La calidad del macizo se encuentra especificada, según el GSI, por dos parámetros: las condiciones estructurales y el nivel de intemperismo en la superficie de la roca. Para determinar el valor de la resistencia a la compresión simple se utilizará el ensayo Franklin, de este modo se tendrán los elementos necesarios para alimentar el software RocLab, el cual se encuentra basado en el criterio de rotura de Mohr-Coulomb, y así podrán determinarse los parámetros de resistencia como cohesión y ángulo de fricción.

Finalmente, con la ayuda de la herramienta electrónica UNWEDGE (Versión 3.005), desarrollada por la empresa canadiense Rocscience en el año 2004, se logrará estimar la estabilidad de la gruta en las zonas de peligro.

Palabras Claves: Macizo rocoso, estabilidad, clasificaciones geomecánicas, calidad del macizo, GSI, ensayo Franklin, resistencia a la compresión simple, criterios de rotura, Mohr-Coulomb.



ABSTRACT

This work will value the rock mass's structural and mechanic conditions, furthermore its quality in the cave Cueva del Mundo which results will allow to estimate the stability and to make a tridimensional model of it.

This will consist in attend the study zone and make a topographic survey, gather structural dates and describe the rock mass. It will elaborate it by making field survey and bibliographic, analytical and experimental researches. Based on conventional topographical methods, also it will made a tri dimensional model to appreciate the zones where it is necessary to estimate the stability.

Compared the current Geomechanical classification, it will be determined that the Geological Strength Index (GSI) is the best option to establish the rock mass quality. The rock mass quality is determined, according to GSI, by two parameters: the structural conditions and the weathering level in the rock surface. In addition, it will be used the Franklin test or PLT to estimate the uniaxial compressive strength and to have the necessary elements to power the RocLab software (it is based on the Mohr-Coulomb failure criterion), and to determine the resistance parameters such cohesion and friction angle.

Finally, it will be used an electronic tool called UNWEDGE (Version 3.005), developed by the Canadian company Rocscience in 2004, to achieve the estimation of the crave stability.

KEY WORDS: Rock mass, stability, geomechanical classification, rock mass quality, GSI, Franklin test, uniaxial compressive strength, failure criterion, Mohr – Coulumb.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	6
ÍNDICE DE FIGURAS	8
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	16
1.1 ANTECEDENTES	16
1.2 ACERCA DE SANTA MARÍA NATIVITAS COATLÁN	17
1.3 OBJETIVOS Y ALCANCES DE ESTUDIO	19
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA	24
2.1 METODOLOGÍA DEL LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DE LA GRUTA	24
2.2 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO 3D DE LA GRUTA	29
2.3. LEVANTAMIENTO GEOLÓGICO	36
2.4 OBTENCIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL MACIZO ROCOSO	37
2.4.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE	37
2.4.2 DENSIDAD	41
CAPÍTULO III. RESULTADOS	48
3.1 TOPOGRAFÍA	48
3.2. CONTEXTO GEOLÓGICO	51
3.2.1 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	58
3.3 MECÁNICA DE ROCAS	63
3.3.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE	63
3.3.2 DENSIDAD	66
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS	70
4.1 ANÁLISIS DEL ERROR EN LA TOPOGRAFÍA Y CONSIDERACIONES EN EL MODELO 3D	70
4.2 CLASIFICACIÓN GSI	72
4.3 OBTENCIÓN DE PARÁMETROS DE RESISTENCIA CON RocLab	75
4.4 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD	83
CONCLUSIONES	105
RECOMENDACIONES	109
BIBLIOGRAFÍA	110

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1 Ruta Cd. de Oaxaca a Santa María Nativitas Coatlán por carretera federal 190 y 185D. Fuente: Google Maps, 2017.	17
1.2 Formaciones geológicas (estalactitas) en el interior de la gruta Cueva del Mundo.	18
2.1 Toma de rumbo del eje central de la gruta.	25
2.2 Levantamiento de rumbos dentro de la gruta.	25
2.3 Toma de lectura con el distanciómetro.	26
2.4 Esquema de una sección transversal.	28
2.5 Margen y eje central de la gruta en AutoCAD.	29
2.6 Comando <i>Region</i> en el espacio de trabajo de AutoCAD.	29
2.7 Selección del contorno de la sección transversal.	30
2.8 Sección transversal convertida en plano.	30
2.9 Comando <i>Rotate3d</i> en el espacio de trabajo de AutoCAD.	31
2.10 Selección del plano a rotar.	31
2.11 Región rotada en el plano XZ.	32
2.12 Planos perpendiculares a la línea de rumbo y al plano XZ2.	32
2.13 Comando <i>Loft</i> en el espacio de trabajo de AutoCAD.	33
2.14 Suavizado preliminar de la superficie.	34
2.15 Suavizado final de la superficie.	34
2.16a. Prensa hidráulica para el ensayo Franklin. Fuente: Tomada en el Lab. Mecánica de Rocas, Facultad de Ingeniería, UNAM.	37
2.16b. Esquema de prensa hidráulica para ensayo Franklin.	37
2.17 Muestras de roca extraídas de la gruta.	38
2.18a Corte de muestras con esmeriladora.	38
2.18b Muestras listas para el ensayo.	38
2.19 Diámetro equivalente de las muestras. Fuente: ISRM, 1985.	39
2.20 Muestra de rocas entre las puntas cónicas de la prensa hidráulica.	40
2.21 Realización del ensayo Franklin.	41
2.22 Material para la obtención de la densidad de las muestras de roca.	42
2.23 Roca sobre la balanza electrónica.	42
2.24 Probeta marcada con agua a los 500 ml.	43
2.25 Muestra de roca dentro de la probeta con agua.	43
3.1 Plano gruta Cueva del Mundo.	49
3.2. Vista Sureste del modelo tridimensional de la gruta.	50
3.3 Vista Suroeste del modelo tridimensional de la gruta.	50
3.4 Columna estratigráfica esquemática de la zona de estudio (modificada de la Carta Geológica-Minera Juchitán E15-10 D15-1, escala 1:250 000, Consejo de Recursos Minerales).	51

3.5 Mapa geológico de la zona de estudio.	52
3.6a Secuencia de esquistos y filitas al Este de la cumbre La Llorona.	53
3.6b Superficie donde se observan los planos de esquistosidad que son casi paralelos al corte.	53
3.7 Secuencia de areniscas y limolitas al Norte de Santiago Ixcatepec.	54
3.8a Entrada a la gruta, en donde se observan los distintos planos de discontinuidad.	55
3.8b Interior de la gruta, fracturas rellenas de calcita.	55
3.9a Formaciones geológicas en las paredes de la gruta.	56
3.9b Formaciones geológicas en el techo de la gruta (llamadas “medusas” por los pobladores).	56
3.10a Caracterización de areniscas y limolitas en la zona de estudio.	57
3.10b Secuencia de areniscas y limolitas en el Norte de Santa María Nativitas Coatlán.	57
3.11 Tabla comparativa de clasificaciones geomecánicas en función de la UCS. Fuente: González de Vallejo <i>et. al.</i> , 2002.4.1	65
4.1 Condiciones de poca luz en el interior de la gruta.	70
4.2 Fotografía de una discontinuidad presente en el macizo rocoso.	72
4.3 Fotografía de las estructuras del macizo rocoso.	73
4.4. Zonificación del macizo rocoso en la tabla del GSI. Fuente: Marinós, V., Marinós, P., Hoek, E. (2005).	74
4.5 Envoltorio de Mohr-Coulomb. Fuente: González de Vallejo, <i>et.al</i> , 2002.	76
4.6 Cuadro de ingreso de datos de RocLab	77
4.7 Submenú de ingreso de datos para estimar el valor <i>mi</i> en RocLab.	78
4.8 Tabla de asignación del valor <i>D</i> en RocLab. Fuente: Hoek, E., C. Carranza-Torres, and B. Corkum, 2004.	79
4.9 Perfil de elevaciones. Fuente: Google Earth.	80
4.10a Datos de ingreso para el macizo rocoso de la gruta.	80
4.10b Gráfica del modelo de rotura de Mohr-Coulomb para el macizo rocoso de la gruta. En línea azul el modelo Mohr-Coulomb y en amarillo el modelo de Hoek – Brown.	81
4.11 Parámetros obtenidos de RocLab para el macizo rocoso.	81
4.12 Cuñas posibles correspondientes a la forma de la excavación. Fuente: Suárez F. José Francisco (s.f.).	84

4.13 Contorno de la sección transversal de la gruta en UNWEDGE.	86
4.14 Familias principales de discontinuidades y eje de la excavación.	87
4.15 Submenú de ingreso de datos generales, tales como orientación e inclinación de la obra, factor de seguridad de diseño, peso específico de la roca y agua.	88
4.16 Submenú de ingreso de datos de propiedades de las discontinuidades.	89
4.17a Vista isométrica de las cuñas.	90
4.17b Vista isométrica individual de las cuñas.	90
4.18a Vista isométrica del cadenamiento 0+040 m.	92
4.18b Vista frontal del cadenamiento 0+040 m.	92
4.19 Vista isométrica del cadenamiento 0+050 m.	93
4.20a Vista isométrica del cadenamiento 0+060 m.	94
4.20b Vista frontal del cadenamiento 0+060 m.	94
4.21a Vista isométrica del cadenamiento 0+320 m.	95
4.21b Vista frontal del cadenamiento 0+320m.	95
4.22a Vista isométrica del cadenamiento 0+350 m.	96
4.22b Vista frontal del cadenamiento 0+350 m.	96
4.23a Vista isométrica del cadenamiento 0+385m.	97
4.23b Vista frontal del cadenamiento 0+385m.	97
4.24a Vista isométrica del cadenamiento 0+400m.	98
4.24b Vista frontal del cadenamiento 0+400m.	98
4.25 Vista isométrica del cadenamiento 0+418.	99
4.26a Vista isométrica del cadenamiento 0+428m.	100
4.26b Vista frontal del cadenamiento 0+428m.	100

CAPÍTULO 1

Capítulo 1

1.1 Antecedentes

En la actualidad la ingeniería que se aplica para el diseño, construcción y monitoreo de obras ha evolucionado bastante rápido, permanece la metodología y los criterios de evaluación; pero las herramientas para el procesamiento de datos e interpretación de información son más rápidas, con una interfaz simple y fácil de usar, lo que ha permitido un crecimiento exponencial en construcciones con una alta demanda de personal capacitado.

La comprensión de las matemáticas y la posibilidad de procesar grandes cantidades de datos desde equipos de cómputo accesibles, nos ha permitido desarrollar herramientas cada vez más complejas que ayudan a modelar situaciones reales facilitando su operación y que además impactan de manera positiva en los costos. Ejemplo de ello, son las herramientas basadas en métodos numéricos, en especial aquellas destinadas al análisis de estabilidad.

La inestabilidad en obras es una situación común que se presenta en todos los proyectos, sin excepción, entendiéndose que la inestabilidad es la pérdida o falta de equilibrio cuando ocurre una excavación o una cavidad natural llega a formarse, y que dicha inestabilidad tenderá de nuevo a una situación de equilibrio en un lapso de tiempo indefinido.

La inestabilidad es una condición que se controla con distintas técnicas, sin embargo para llegar hasta esos conceptos primero es necesario comprender las causas de la misma. Palmstrom & Stille (2010) escribieron que *“en la mayoría de casos, una combinación de la composición del macizo rocoso y; el efecto del estado de esfuerzos, la forma y geometría de la excavación, las condiciones del agua, la influencia de la excavación y la instalación de elementos de soporte; determinarán el comportamiento del terreno”* (p.117 - 118).

En palabras más sencillas, la inestabilidad se debe a tres principales razones: las condiciones de agua que existan, la gravedad (combinada con las condiciones estructurales) y el estado de esfuerzos que esté presente en la excavación.

De las causas antes mencionadas, el agua, resulta ser una condición que se encuentra casi siempre en obras subterráneas por la presencia del nivel freático y que como tal deben diseñarse dichas obras contemplando las medidas correctivas a tales condiciones.

La mecánica de rocas se convierte en una herramienta imprescindible para el diseño de una excavación, y en otras ocasiones para el control y monitoreo de excavaciones ya existentes.

Lo anterior significa que todo estudiante y egresado de una carrera afín a la construcción o a la minería debería contar con los conocimientos básicos de mecánica de rocas que le permitan desarrollar un criterio para conducir los proyectos que habrá de realizar.

1.2 Acerca de Santa María Nativitas Coatlán

Santa María Nativitas Coatlán es una localidad situada en el municipio de Santo Domingo Tehuantepec, Oaxaca, cuyas coordenadas GPS son 16.86° latitud y 95.53° (-) longitud con una altitud aproximada de 980 msnm. Para llegar a la población se debe tomar la carretera 190, al Sureste del centro de la ciudad de Oaxaca, durante 245 km hasta llegar a la carretera internacional 185D pasando por el municipio de Santa María Jalapa del Marqués, se debe continuar por la carretera internacional 185D por 10 km en dirección Noreste hasta la primera desviación con dirección a la presa Benito Juárez rodeando por la laguna “El Marqués” y continuar hasta el municipio de Santiago Lachiguiri donde el camino pavimentado termina y comienza el camino pesado de terracería, por el cual se debe continuar aproximadamente 40 km hasta la población.

En la Figura 1.1 extraída de *Google Maps* se puede ver con mayor detalle la ruta hacia la población.

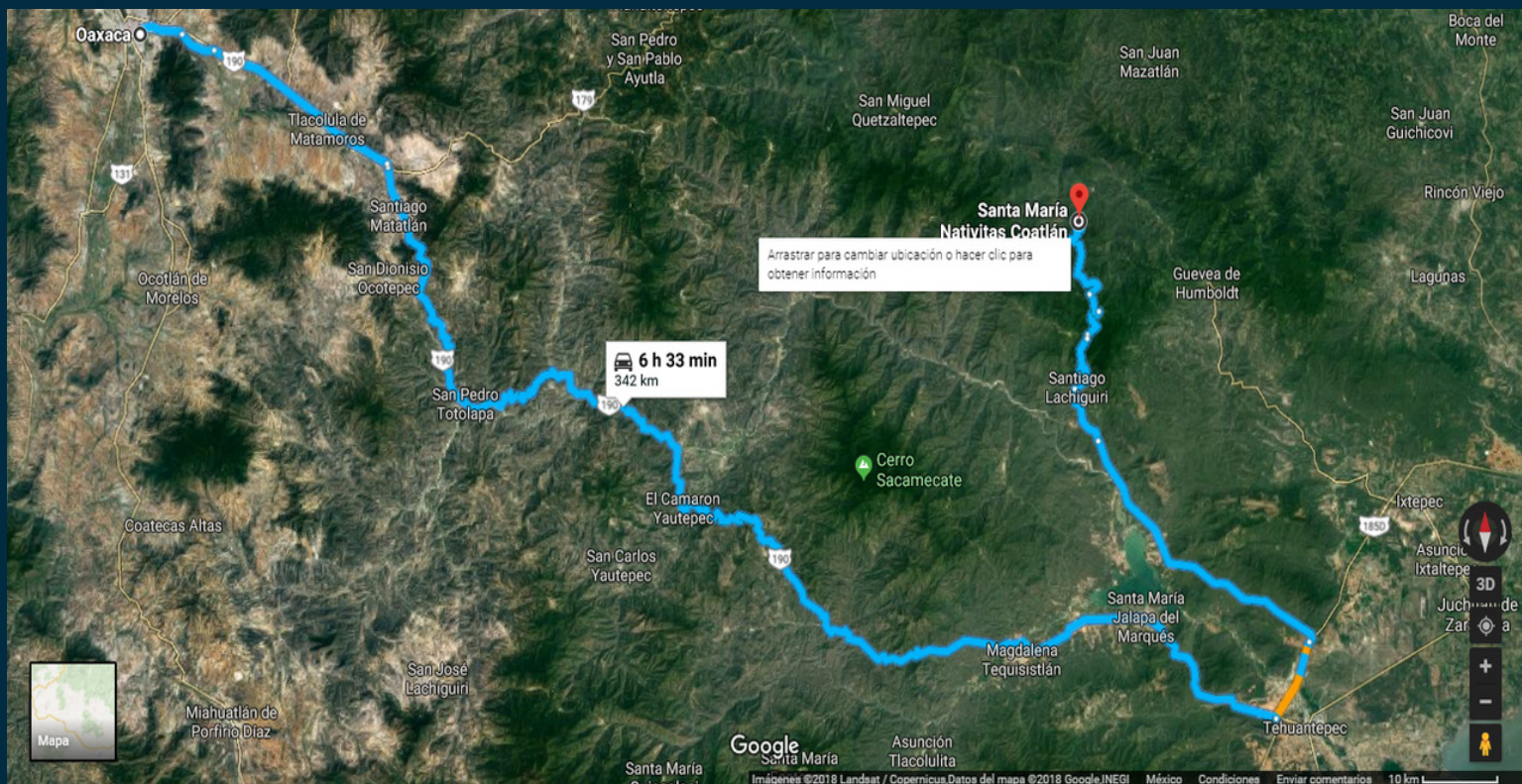


Figura 1.1 Ruta Cd. de Oaxaca a Santa María Nativitas Coatlán por carretera federal 190 y 185D.
Fuente: Google Maps, 2017.

Datos consultados en el sitio “Espacio y datos de México” del INEGI (2016) reportan que en la localidad existe un total de 241 viviendas particulares, de las cuales sólo 142 se encuentran habitadas y que el total de la población es de tan solo 584 personas de todas las edades. La actividad económica principal de la comunidad es la agricultura y la pequeña ganadería que se destina a la alimentación de la misma. El turismo es casi nulo en la zona, ya que los parques recreativos se encuentran distantes, sumándole a esto la situación de difícil acceso por los caminos de terracería.

El gran auge del ecoturismo en los últimos años, coloca a la comunidad de Santa María Nativitas Coatlán en una posición privilegiada para poder aprovechar la diversidad de la flora, fauna y la presencia de grutas y cuevas de la región para explorar dicho campo.

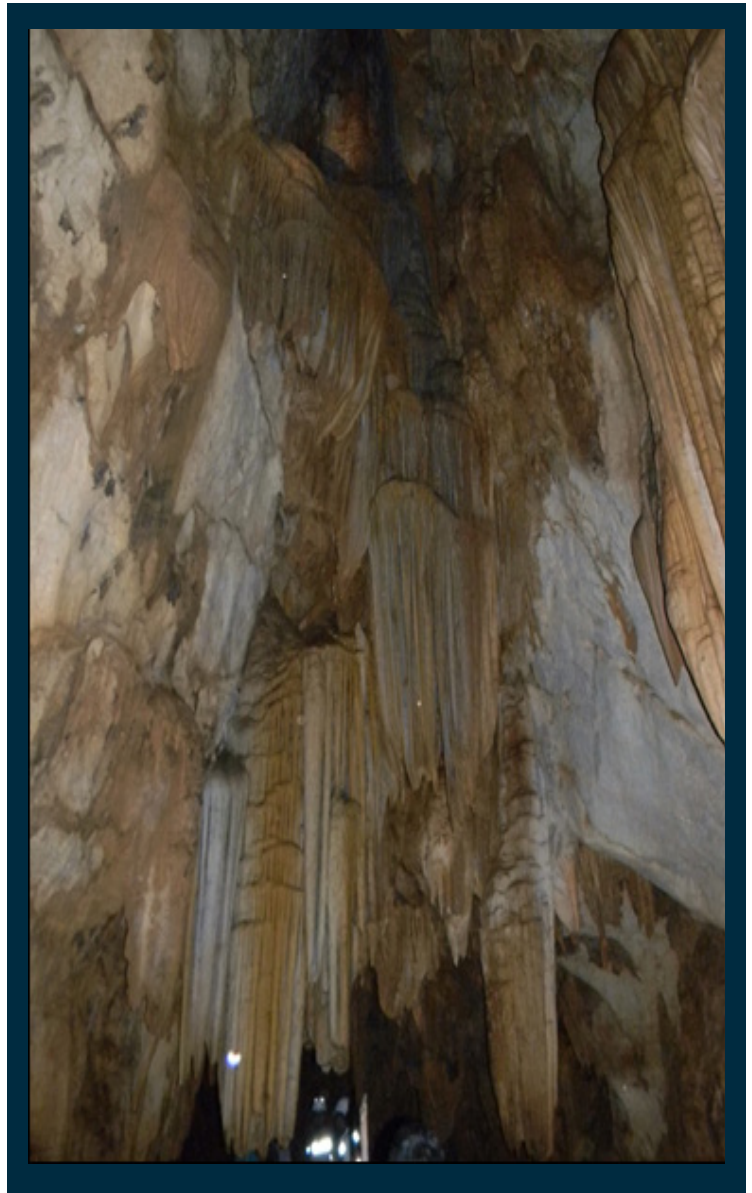


Figura 1.2 Formaciones geológicas (estalactitas) en el interior de la gruta Cueva del Mundo.

1.3 Objetivos y alcances de estudio

Objeto de estudio.

La gruta Cueva del Mundo, ubicada en la localidad de Santa María Nativitas Coatlán, municipio de Santo Domingo Tehuantepec, Oaxaca.

Problema

La escasa información sobre la gruta Cueva del Mundo que permita estimar la estabilidad de la misma.

La información que puede recopilarse en gabinete, a través de bibliografía que trata sobre zonas próximas al área no puede ser utilizada porque las condiciones siempre serán diferentes en cada punto de la región. Los datos recopilados en campo ofrecen la posibilidad de utilizar los resultados para realizar un modelo tridimensional de la gruta y hacer uso de las características del macizo rocoso para estimar la estabilidad de grutas cercanas a la zona, en caso de existir.

Hipótesis

Si se determinan las condiciones geológicas y las mecánicas estructurales de la gruta Cueva del Mundo, podrá realizarse la estimación de la estabilidad del macizo rocoso que la compone.

Así mismo, si se reúnen los datos necesarios, suficientes y con el menor error, será posible realizar un modelo tridimensional de la gruta Cueva del Mundo que sea lo más acertado posible a la realidad.

Objetivo general

Realizar el levantamiento topográfico de una gruta, ubicada en la localidad de Santa María Nativitas Coatlán. Además de estimar la estabilidad de la misma.

Objetivos particulares

- a) Elaborar cartografía geológica somera de la zona.
- b) Construir un modelo tridimensional detallado a partir del levantamiento topográfico realizado.
- c) Describir a detalle la geología de la gruta, el tipo de roca, los minerales asociados y la génesis de la misma, así como describir las condiciones estructurales de la zona de estudio.
- d) Determinar las propiedades de la roca intacta a través de pruebas de laboratorio, tales como resistencia a la compresión simple y prueba de densidad.
- e) Organizar, analizar y determinar estadísticamente las principales familias de discontinuidades geológico-estructurales y, con ello, identificar zonas de inestabilidad.
- f) Estimar la estabilidad de la gruta a través del análisis cinemático que realiza la herramienta electrónica UNWEDGE.

Alcances

El objetivo principal de este estudio fue determinar la estabilidad de las zonas de interés, donde fueron detectadas familias de discontinuidades que formaron cuñas en paredes y/o techo de la gruta. Sin embargo, existe información a la cual no fue posible acceder por falta de tiempo y herramientas, ejemplo de ello es la entrada y salida de agua y los esfuerzos que actuaban en la excavación, por lo que sólo se describirá brevemente un escenario para el comportamiento de dichas incógnitas.

La limitante principal para el estudio fue la precisión de la información y el error que conlleva para los resultados, ocasionados en una primera etapa por la exactitud de los instrumentos y la sensibilidad que tienen en el ambiente al que se les expuso, y por otro lado el detalle en la descripción geológica *in situ* del lugar, que podría ser malinterpretada afectando principalmente en la obtención del *GSI (Geological Strength Index)*.

Justificación

Los motivos que condujeron a investigar las condiciones estructurales de la excavación y analizar el factor de seguridad de las zonas de inestabilidad, se centran en el apoyo a la comunidad como parte del servicio social que lleva por nombre “Colaboración en proyectos de ingeniería aplicada de la División de Ingeniería de Ciencias de la Tierra” de la Facultad de Ingeniería de la UNAM y cuya finalidad es que los alumnos puedan llevar a la práctica lo aprendido en las aulas en proyectos de ingeniería aplicada y de igual manera participar en proyectos que beneficien a la comunidad.

Al evaluar la estabilidad de la gruta se buscó apoyar a la comunidad de Santa María Nativitas Coatlán y así lograr que, con el estudio técnico de la gruta, las autoridades cuenten con los elementos necesarios para llamar la atención de las dependencias pertinentes y puedan recibir el apoyo que necesitan para explorar el campo turístico de la región.

CAPÍTULO 2

Capítulo 2

2.1 Metodología del levantamiento topográfico de la gruta

La topografía es la ciencia que estudia el conjunto de procedimientos para determinar las posiciones de puntos sobre la superficie de la tierra, por medio de medidas según los tres elementos del espacio, dos distancias y una elevación.

Montes de Oca (1989) dice que: *“todas las operaciones en Topografía están sujetas a las imperfecciones propias de los aparatos y a las imperfecciones en el manejo de ellas; y por lo tanto ninguna medida en Topografía es exacta [...]”* (p.2).

Conocer la topografía de un lugar nos ayuda a georreferenciarlo y así cada punto, línea, plano o superficie tenga coordenadas x , y , z que faciliten los trabajos que puedan desprenderse de la misma. Para el levantamiento por secciones transversales de la gruta se eligió un método simple y sencillo, que consiste en tomar el rumbo del eje central de la gruta y a partir de este reconocer puntos en paredes y techo que permitan interpolar una sección con otra para crear un modelo tridimensional.

El levantamiento topográfico fue realizado con el siguiente equipo:

- Distanciómetro, marca South, modelo PD56N con un alcance de 60 m.
- Brújula Brunton.
- Cinta métrica flexible de 50 m.
- Se midió la estatura de dos compañeros participantes, de tal manera que se marcara desde la suela del zapato 1 m. de altura. Esto serviría como referencia para tomar todas las medidas en un plano estático. No se consideraron pendientes en el levantamiento de rumbos, debido a que eran casi imperceptibles.
- Los rumbos fueron tomados en distancias de 10 m o más cortas en los tramos donde existía una curvatura o las paredes de la gruta cambiaban bruscamente.

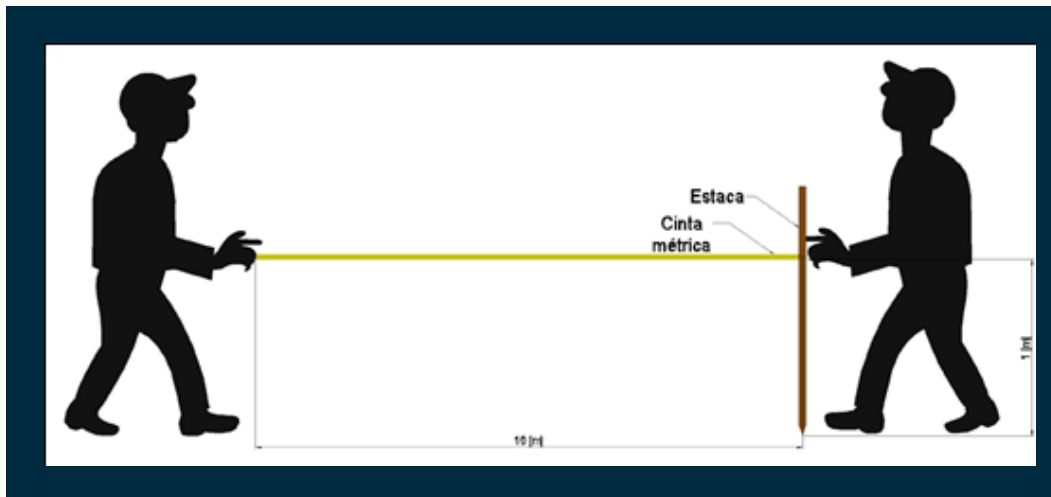


Figura 2.1 Toma de rumbo del eje central de la gruta.

La toma de rumbos fue tomada como se describe a continuación:

1. Un compañero se sitúa en un punto inicial tomando la cinta métrica y apoyándola en una estaca, mientras otro compañero avanza 10 m más adelante sujetando la cinta métrica con la marca de los 10 metros en su mano como se muestra en la figura 2.1.



Figura 2.2 Levantamiento de rumbos en la gruta.

2. Un tercer compañero sujeta la brújula Brunton y la posiciona sobre la estaca, de tal manera que la pínula se alinee con la cinta métrica e inmediatamente después registra la lectura que la brújula marque. Ver figura 2.2.

La toma de las secciones transversales de la gruta fue tomada con la siguiente metodología:

- Sin modificar la configuración de los compañeros antes formados para la toma del rumbo (Figura 2.1), se toman sobre la cinta métrica los puntos en las paredes y techos para las secciones.



Figura 2.3 Toma de lectura con el distanciómetro.

- Un tercer compañero sujeta con las dos manos el distanciómetro y lo coloca en la marca cero de la cinta métrica, dónde el otro compañero se encuentra sujetando la estaca y la cinta
- El compañero que tiene el distanciómetro toma las medidas según el siguiente patrón; empezando con la esquina inferior derecha, a cero grados del lado derecho, a 15 grados con respecto a la horizontal del lado derecho, a 30 grados con respecto a la horizontal del lado derecho y así sucesivamente cada 15° grados hasta completar el patrón. Ver figura 2.3.
- Mientras realiza el apunte de las medidas un cuarto compañero anota y describe brevemente la sección.
- Al término del registro de datos se continúa con la siguiente sección. Para determinar la distancia se hace una evaluación sobre la gruta, es decir, si las paredes de la gruta cambian bruscamente entonces deberá disminuir la distancia entre ellas, en caso de que las paredes tengan continuidad se podrá ampliar la distancia entre ellas.
- Al finalizar el levantamiento se procesa la información en AutoCAD para las secciones 2D. Las secciones transversales finales deben ser similares a la que se muestra en la figura 2.4.

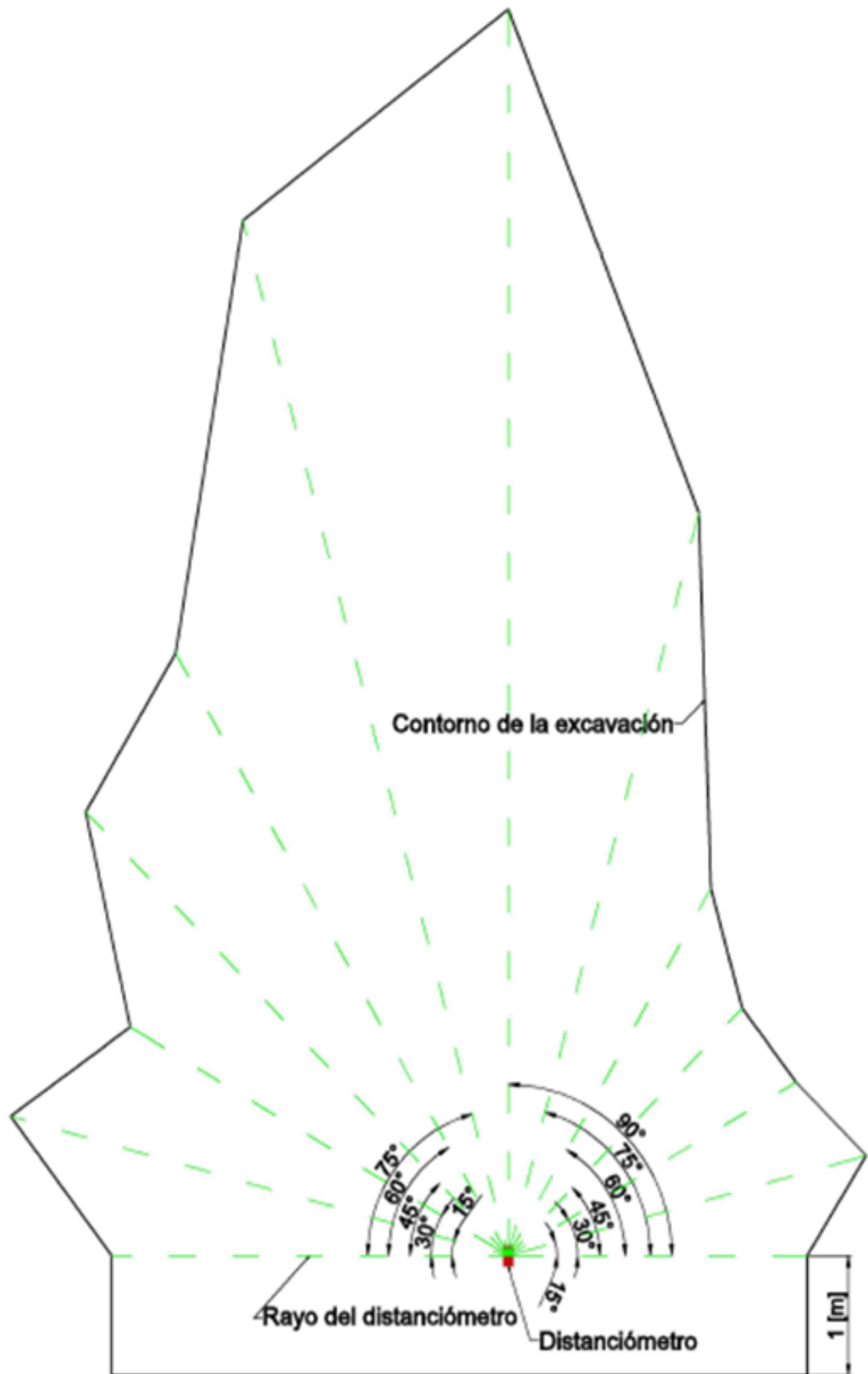


Figura 2.4 Esquema de una sección transversal.

2.2 Construcción del modelo 3D de la gruta.

El modelo tridimensional fue realizado con un total de 112 secciones transversales en la herramienta de dibujo asistido por computadora, AutoCAD.

A continuación se explica brevemente la metodología y el resultado que se obtuvo de cada uno de los pasos.

1. Se trazan los rumbos con la longitud original tomada en el levantamiento topográfico, de tal manera que pueda observarse el eje central de la gruta como se muestra en la figura 2.5.

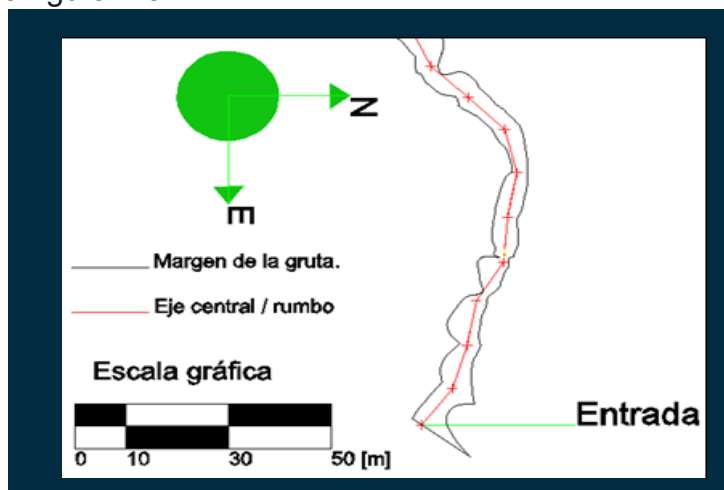


Figura 2.5 Margen y eje central de la gruta en AutoCAD.

2. Las secciones dibujadas anteriormente deben convertirse en planos, es decir, dejar de ser líneas dibujadas y adquirir propiedades de un área. La única condición necesaria para poder realizar el procedimiento es que el contorno de la sección sea cerrado. Para transformar la sección a un plano se hace uso del comando *Region* de AutoCAD y se procede como se describe a continuación.

- a. En el espacio de trabajo y sin seleccionar nada, se escribe en el teclado la palabra *Region* y apretamos la tecla *enter* para aceptar el comando, como se muestra en la figura 2.6. De igual forma puede buscarse el comando en las pestañas de la barra de menú.

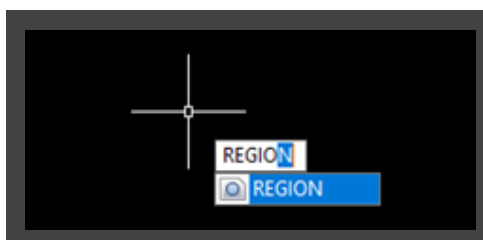


Figura 2.6 Comando *Region* en el espacio de trabajo de AutoCAD.

- b. Aceptado el comando, el programa pide que seleccionemos el objeto que se desee convertir en plano. Se hace la selección del contorno de la sección (figura 2.7) y se teclea *enter* para confirmar la acción. Inmediatamente debe notarse el cambio en el color de la sección (figura 2.8), evidencia de que se le han asignado dichas propiedades.

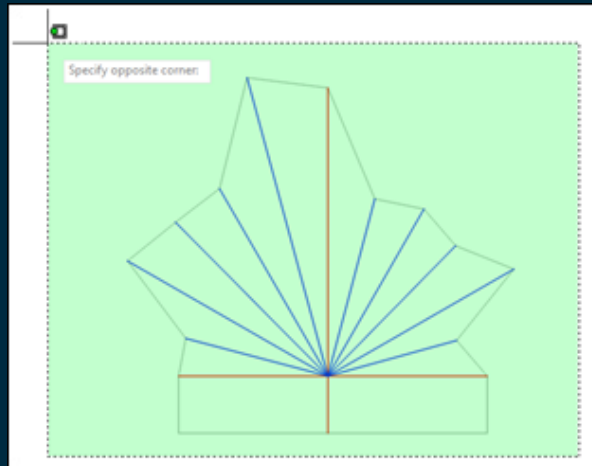


Figura 2.7 Selección del contorno de la sección transversal.

- c. Se realiza el mismo procedimiento para todas las secciones.

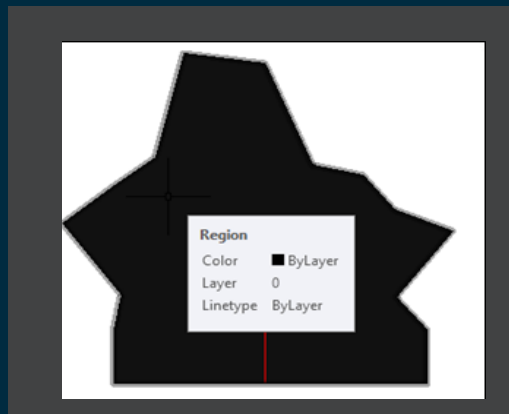


Figura 2.8 Sección transversal convertida en plano.

3. Una vez convertidas las secciones en planos o regiones, éstas deben girarse 90° perpendicular al plano XY. Para girar una sección se procede de la siguiente manera:

- a. Se escribe en el teclado, y sin seleccionar nada, el comando *Rotate3D*.

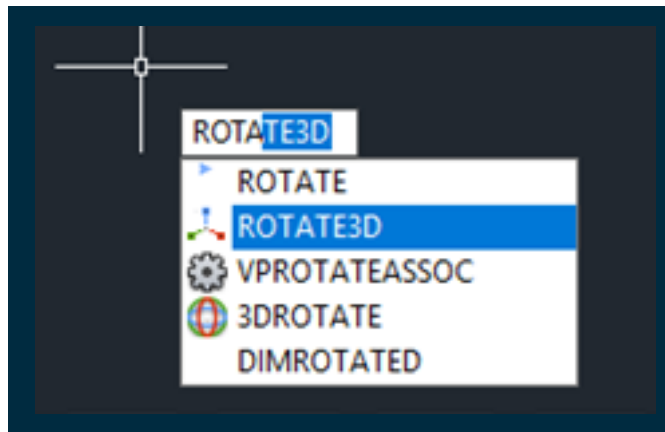


Figura 2.9 Comando Rotate3D en el espacio de trabajo de AutoCAD.

b. A continuación, el programa pide que sea seleccionado el objeto que se desea rotar. Debe darse un *click* sobre el plano y teclear *enter* para aceptar la acción.



Figura 2.10 Selección del plano a rotar.

c. Inmediatamente después se selecciona la línea base, que servirá como eje para rotar nuestra sección. AutoCAD pedirá el valor numérico correspondiente al ángulo de rotación.

d. Debe introducirse el valor numérico de 90° para que el programa entienda la perpendicularidad, se teclea *enter* y puede notarse que la región se encuentra en el plano XZ.

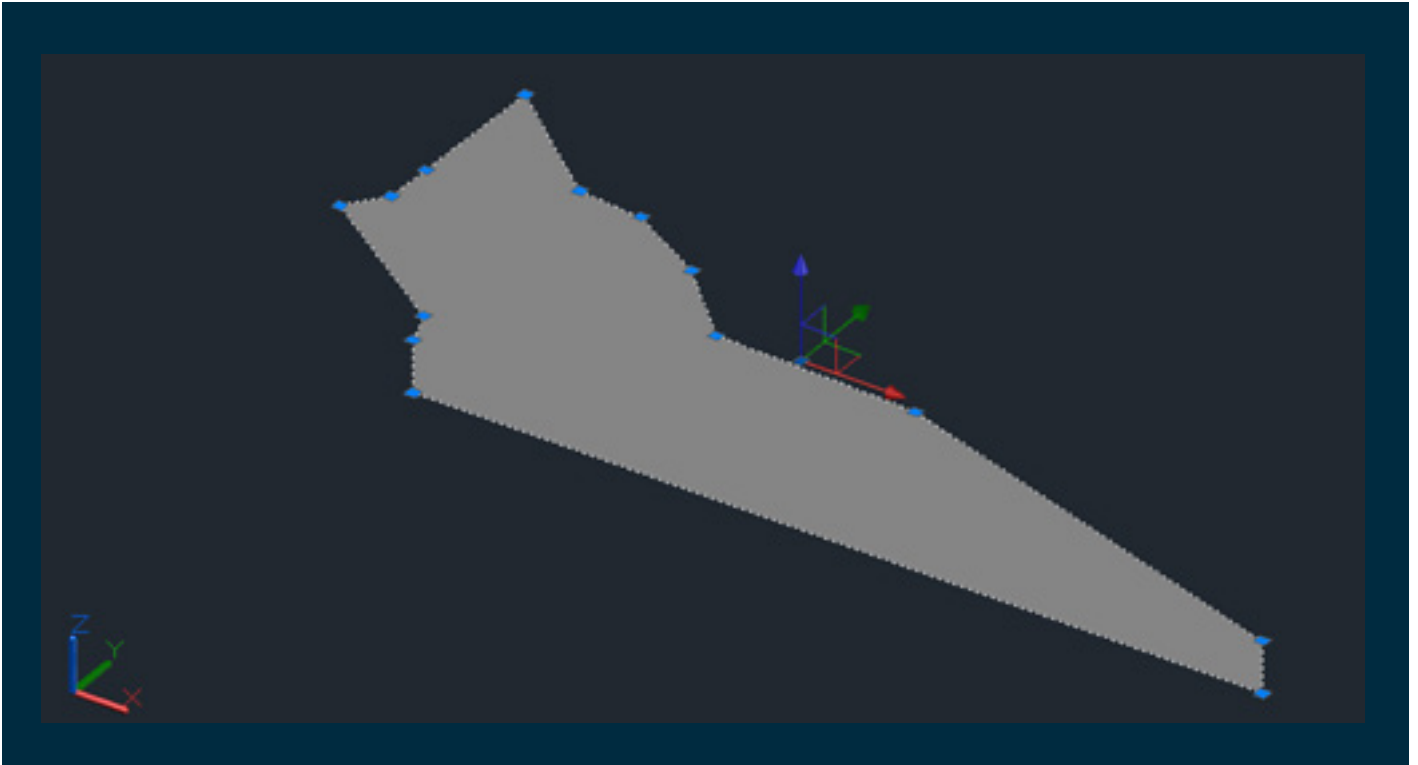


Figura 2.11 Región rotada en el plano XZ.

4. Una vez rotadas las secciones, se colocan sobre la línea de rumbo o eje central de la gruta. Para ello, la región debe ser perpendicular a la línea de rumbo.

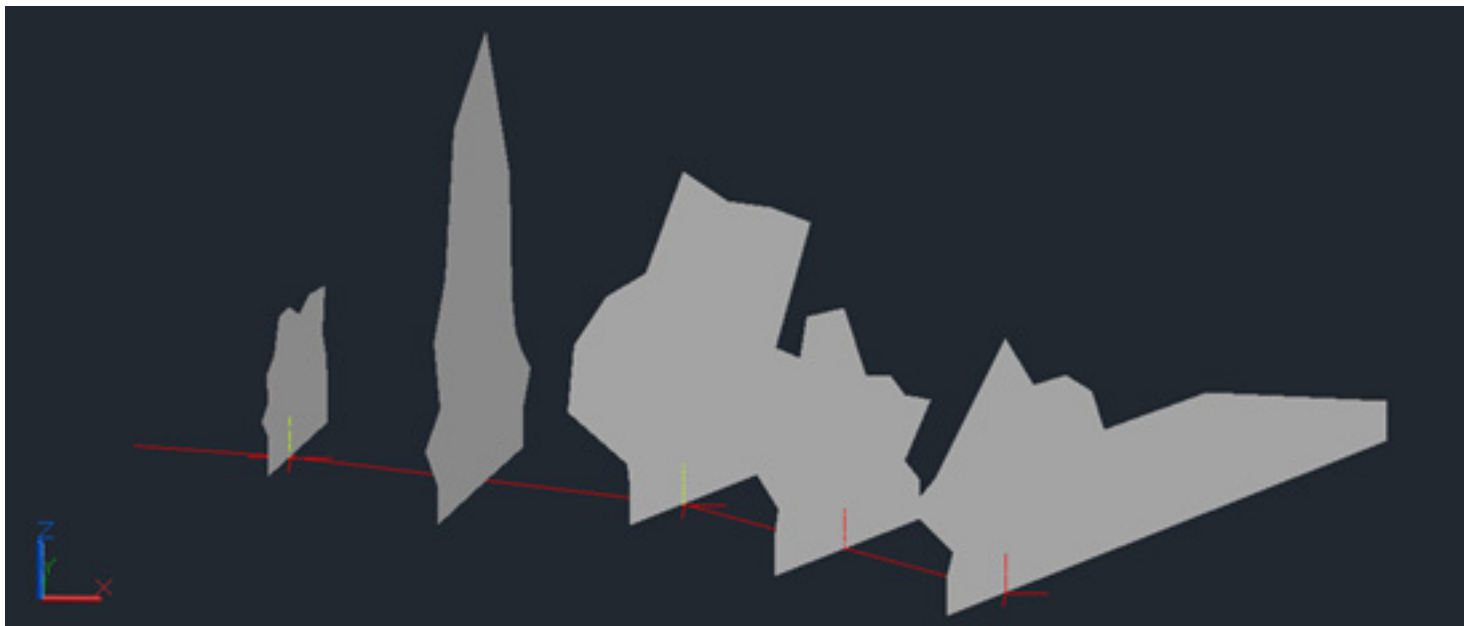


Figura 2.12 Planos perpendiculares a la línea de rumbo y al plano XZ.

5. Lo siguiente es convertir los planos o regiones en 2D a una superficie tridimensional para poder visualizar el contorno de la gruta ya modelado, para lo cual se describe el siguiente procedimiento:

a. Se escribe en el teclado sin seleccionar nada y en el espacio de trabajo de

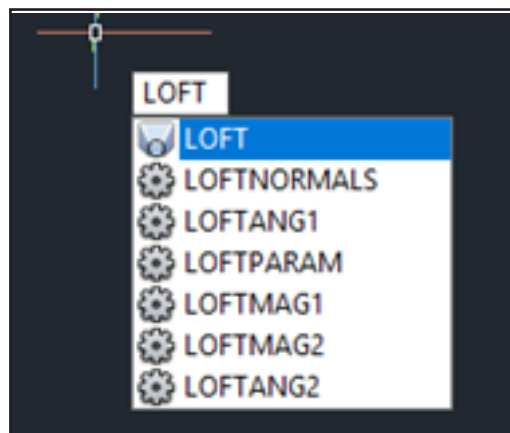


Figura 2.13 Comando *Loft* en el espacio de trabajo de AutoCAD.

AutoCAD, el comando *Loft*, y se tecldea *enter* para aceptar el comando.

b. AutoCAD pide que las regiones sean seleccionadas una por una y, en el orden que deseemos suavizarlas. Se sombrea las secciones de derecha a izquierda para observar una vista preliminar, luego se acepta la acción presionando *enter*. Se obtiene algo similar como puede apreciarse en la figura 2.14.

Para terminar se presiona de nuevo *enter*.

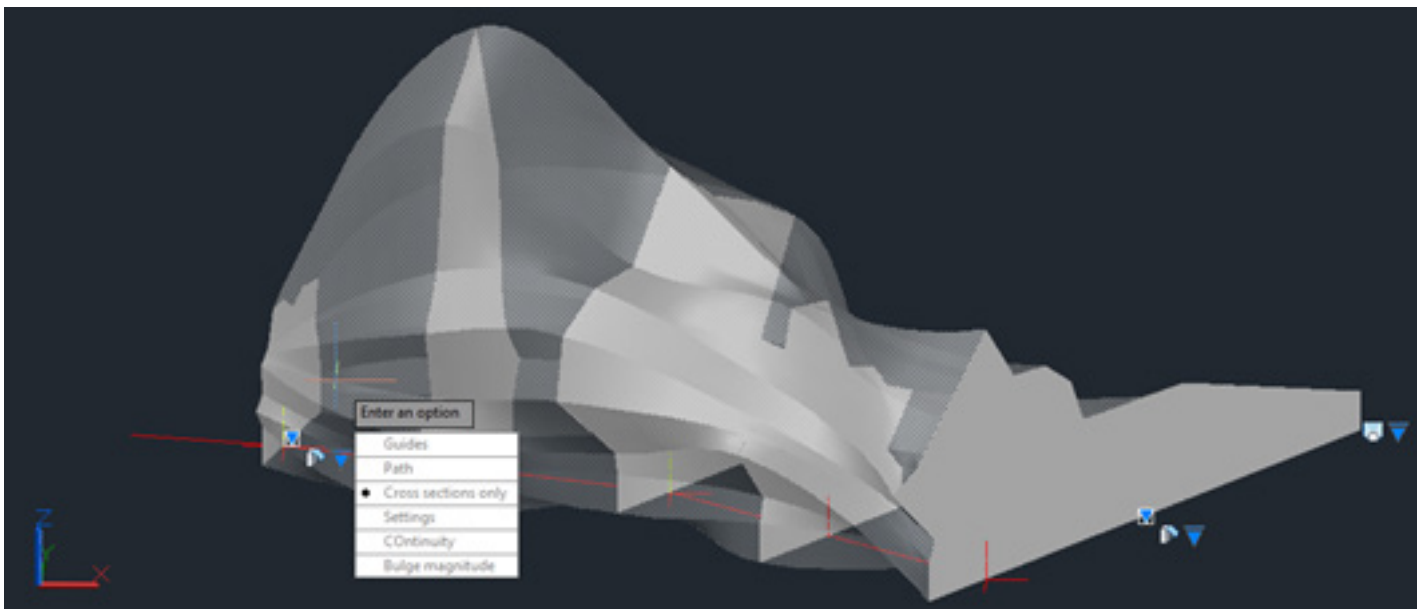


Figura 2.14 Suavizado preliminar de la superficie.

Se realiza el mismo procedimiento para todas las secciones.

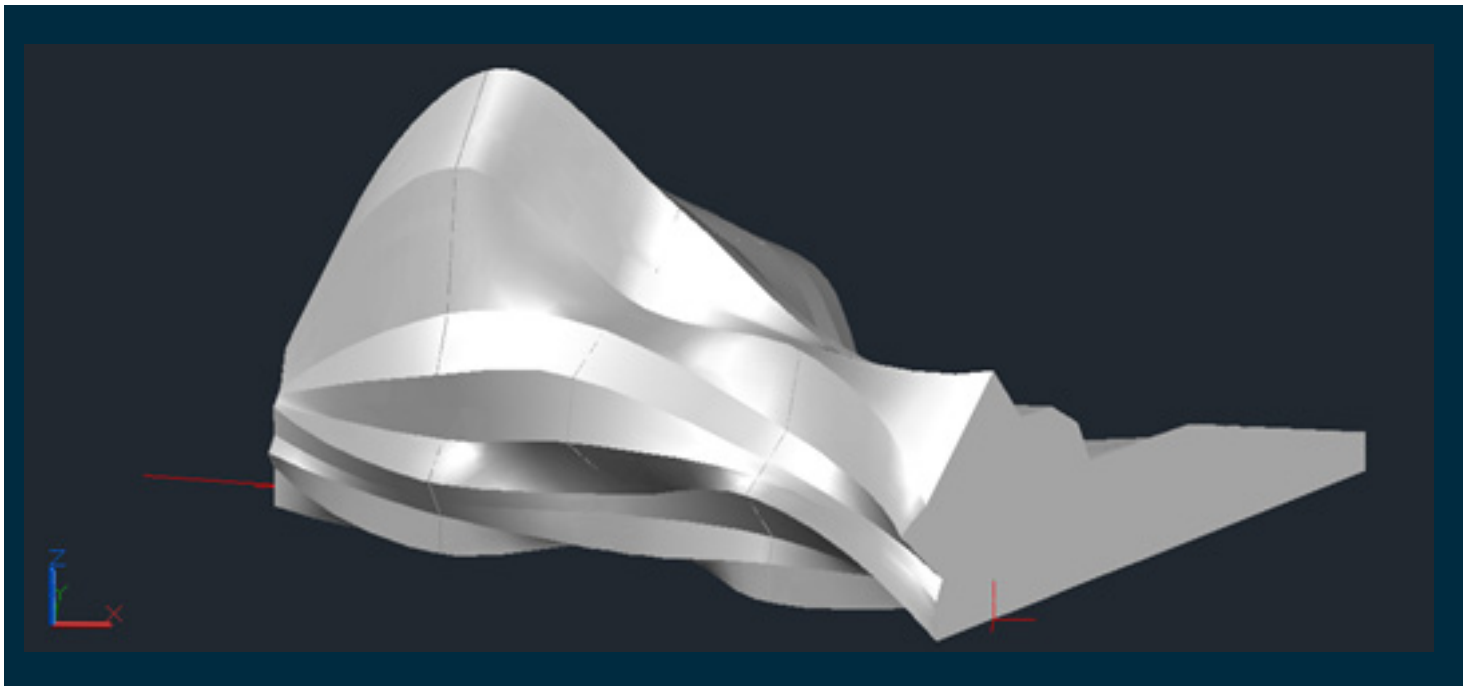


Figura 2.15 Suavizado final de la superficie.



2.3. Levantamiento geológico

Se llevó a cabo el levantamiento geológico de campo abarcando el área de la Cueva del Mundo y zonas aledañas. Se identificaron las unidades litológicas que afloran en la zona y que previamente se identificaron en la interpretación de imágenes satelitales.

La distribución superficial de la gruta fue verificada, poniendo los contactos en los planos topográficos disponibles; se describieron sus principales características geológicas, como son el tipo de roca, textura, estructura, alteración, consistencia, dureza y fracturamiento.

Se realizó un levantamiento estructural de las discontinuidades que permitieron definir las familias de discontinuidades de cada unidad litológica y sus principales características ingenieriles, como son orientación e inclinación, espaciamiento, continuidad, rugosidad, apertura, relleno, etc.

Las estructuras geológicas regionales se analizaron con el mayor detalle posible, ubicando sus trazas en los planos topográficos, tomando datos de dirección e inclinación, continuidad, rugosidad, apertura, espesor y rellenos, así como las condiciones de las rocas encajonantes.

Se tomaron fotografías que permitieron estudiar, analizar y discutir en gabinete las condiciones geológicas de las zonas que se discuten en la sección 3.2.

2.4 Obtención de las propiedades del macizo rocoso

Las propiedades físicas de la roca que se midieron, con muestras extraídas de las paredes de la gruta a lo largo de la misma, fueron las siguientes:

- La resistencia a la compresión simple, UCS, por sus siglas en inglés: Uniaxial Compressive Strength.
- Densidad.

A continuación se describe la metodología para obtenerlos:

2.4.1 Resistencia a la compresión simple

La primera comprobación se realizó utilizando la prueba Franklin o el ensayo de carga puntual con la prensa del laboratorio de Mecánica de Rocas (ISRM, 1985). El procedimiento consiste en romper una muestra entre dos puntas cónicas metálicas accionadas por una prensa (Figura 2.16b). La prueba de carga puntual no mide directamente la resistencia a la compresión simple (UCS), sino que nos entrega un índice de carga (I_p) el cual tiene una estrecha relación con la UCS (ASTM, 2002).

La razón más fuerte para elegir dicho ensayo es que pueden usarse muestras irregulares sin previa preparación y que la máquina es portátil.

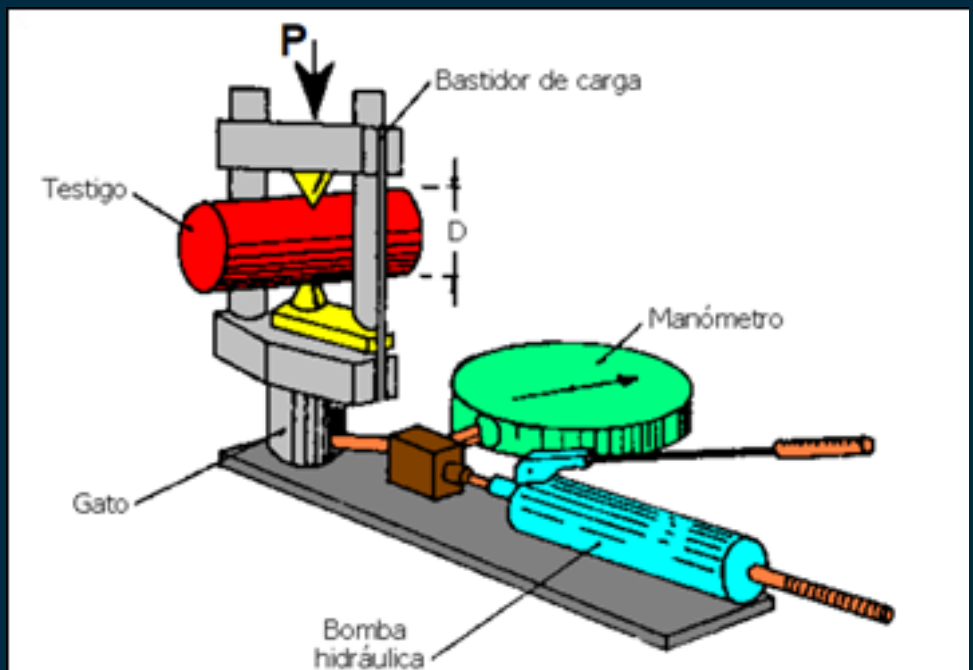


Figura 2.16a. Prensa hidráulica para el ensayo Franklin.

Fuente: Tomada en el Lab. Mecánica de Rocas, Facultad de Ingeniería, UNAM.

Figura 2.16b Esquema de prensa hidráulica para ensayo Franklin.

Aunque la prueba es simple y no requiere preparación de las muestras, la única restricción que existe es la abertura de la máquina, por lo que tuvieron que cortarse las muestras con una esmeriladora y disco para roca. Las muestras se cortaron lo más uniforme posible, según se indica en la norma ASTM 2002 para muestras irregulares. Ver figuras 217, 2.18a y 2.18b.



Figura 2.17 Muestras de roca extraídas de la gruta.



Figura 2.18a Corte de muestras con esmeriladora.



Figura 2.18b Muestras listas para el ensayo.

El índice de carga puntual se calcula de la siguiente manera:

$$I_s = \frac{P}{De^2} [MP\alpha]$$

Donde:

I_s : Índice de carga puntual.

P: Carga de falla.

De: Diámetro de núcleo equivalente = D para muestras diametrales.

De² = D² para muestras diametrales, mm².

De² = 4A/π para muestras irregulares, axiales o bloques, mm².

Donde

A = WD = área de la sección transversal mínima (figura 2.19).

A continuación se detalla paso a paso el proceso para la prueba PLT:

1. Una vez que las muestras se encuentran cortadas y listas para el ensayo se enumeran para mejor control y se calcula el área de la sección transversal como se muestra en la figura 2.19.

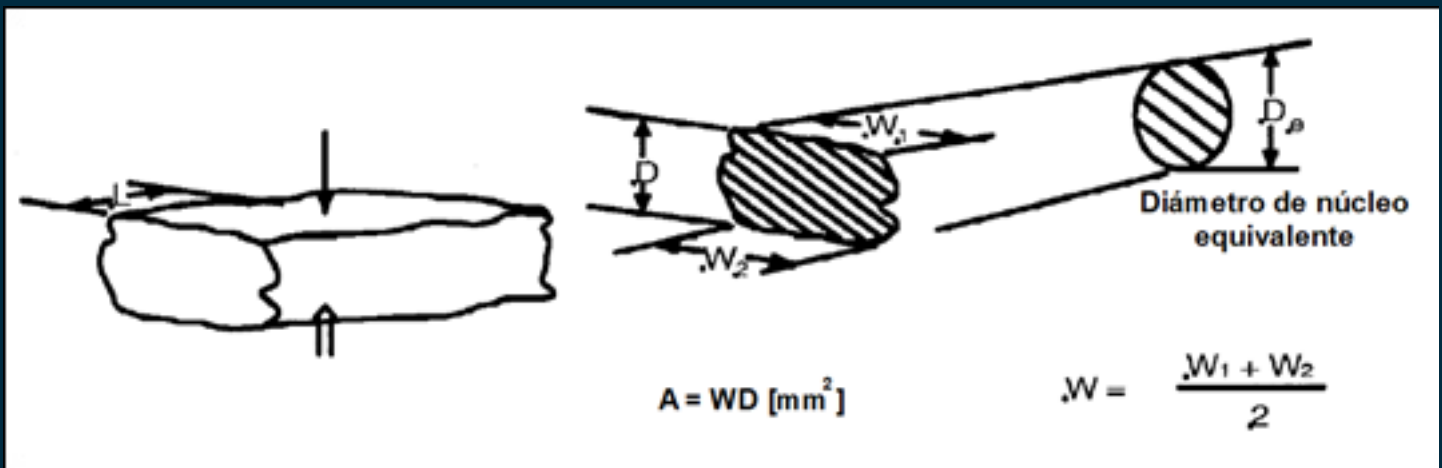


Figura 2.19 Diámetro equivalente de las muestras. Fuente: ISRM, 1985.

Donde:

A: Área equivalente, mm².

W: Largo promedio, mm.

D: Ancho, mm.

2. Se revisa la prensa, el aceite y las condiciones en general para evitar que algo falle y las lecturas logren ser correctas. El sistema electrónico de la prensa se inspecciona para verificar las unidades que se muestran y el funcionamiento de ésta.

3. Se introduce el valor del área de la sección transversal de la roca a ensayar en el menú electrónico de la prensa, y debe modificarse ese dato cada vez que se haga un ensayo con una roca diferente. Se afloja el tornillo del aceite para poder mover la parte móvil de la prensa, y se mueve hasta que se esté seguro que la roca puede colocarse entre las puntas cónicas de la prensa. Se aprieta el tornillo del aceite y se hace palanca en la prensa para que la roca pueda colocarse y quede fija entre las puntas. Ver figura 2.20.



Figura 2.20 Muestra de roca entre las puntas cónicas de la prensa hidráulica.

4. Con ayuda de la palanca, a una distancia considerada, se acciona la prensa poco a poco hasta que la roca falle. Cabe mencionar que la prensa mantiene una presión constante de 100 N/s, aproximadamente 10 kg/s. Por cuestiones de seguridad y ya que la rotura es violenta se sugiere utilizar bata y lentes de seguridad.

5. Mientras el encargado de la prensa se encuentra accionándola, otro compañero deberá estar atento a la lectura de la pantalla, especialmente de la lectura de la presión en kilonewtons, ya que cuando la roca falla, la lectura desaparece.



Figura 2.21 Realización del ensayo Franklin.

2.4.2 Densidad

La segunda prueba consistió en calcular la densidad para que a partir de ahí se calculara el peso específico de la roca. La prueba se realizó en tres muestras para promediar los resultados.

Para realizar la prueba se hizo uso de:

- Balanza.
- Probeta de plástico 1000 ml.
- Pipeta.
- 3 muestras de roca.



Figura 2.22 Material para la obtención de la densidad de las muestras de roca.

A continuación se detalla el procedimiento para el cálculo de la densidad:

1. Se conecta y enciende la balanza. Debe comprobarse que la balanza marque cero; en caso contrario se calibra restando la Tara para que la lectura sea correcta.
2. Se coloca la primera muestra en el plato de la balanza con cuidado, como se muestra en la figura 2.23. Se debe mantener en el plato unos cuantos segundos para que la balanza se estabilice y la lectura sea la correcta. Se anota el resultado y se procede a hacer lo mismo con las demás muestras.

Una vez obtenida la masa de cada una de las muestras se apaga la balanza y se desconecta.



Figura 2.23 Roca sobre la balanza electrónica.

3. Se toma la probeta de 1000 ml y verificamos que esté limpia y sin restos de algún otro material.

4. Con agua de la llave se llena hasta la marca de los 500 ml, como la figura 2.24 indica. Se hace uso de la pipeta para auxiliarse y ser preciso en el volumen de 500 ml. Este será nuestro volumen inicial para las tres muestras.



Figura 2.24 Probeta marcada con agua a los 500 ml.

5. Con cuidado se introduce la primera muestra dentro de la probeta, inclinando la probeta para que la muestra resbale por la pared de la misma. Se debe procurar no dejar caer la muestra de golpe en el fondo de la probeta, para evitar que salpique y existan pérdidas de volumen.

6. Se toma la medida del volumen de agua desplazado en la probeta, y se repite el procedimiento para las muestras restantes. Una vez finalizado el procedimiento se lavan los instrumentos y se colocan en su lugar.



Figura 2.25. Muestra de roca dentro de la probeta con agua.

Con los datos obtenidos y sabiendo que para el cálculo de la densidad se utiliza la siguiente relación:

$$\rho (\text{densidad}) = \frac{m (\text{masa})}{v (\text{volumen})} \left[\frac{g}{cc} \right]$$

Los resultados se presentan en el apartado 3.3.2 de este trabajo.

the \mathbb{R}^n -valued function \mathbf{f} is a solution of the system (1) if and only if \mathbf{f} is a solution of the system (2).

Let us assume that \mathbf{f} is a solution of the system (2). Then, for any $t \in \mathbb{R}$, we have

$$\mathbf{f}(t) = \mathbf{f}(0) + \int_0^t \mathbf{f}'(s) ds = \mathbf{f}(0) + \int_0^t \mathbf{A}(s) \mathbf{f}(s) ds.$$

Since \mathbf{f} is a solution of the system (2), we have $\mathbf{f}(0) = \mathbf{0}$. Therefore, we have

$$\mathbf{f}(t) = \int_0^t \mathbf{A}(s) \mathbf{f}(s) ds.$$

Since \mathbf{f} is a solution of the system (2), we have $\mathbf{f}(0) = \mathbf{0}$. Therefore, we have

$$\mathbf{f}(t) = \int_0^t \mathbf{A}(s) \mathbf{f}(s) ds.$$

Since \mathbf{f} is a solution of the system (2), we have $\mathbf{f}(0) = \mathbf{0}$. Therefore, we have

$$\mathbf{f}(t) = \int_0^t \mathbf{A}(s) \mathbf{f}(s) ds.$$

Since \mathbf{f} is a solution of the system (2), we have $\mathbf{f}(0) = \mathbf{0}$. Therefore, we have

$$\mathbf{f}(t) = \int_0^t \mathbf{A}(s) \mathbf{f}(s) ds.$$

Since \mathbf{f} is a solution of the system (2), we have $\mathbf{f}(0) = \mathbf{0}$. Therefore, we have

$$\mathbf{f}(t) = \int_0^t \mathbf{A}(s) \mathbf{f}(s) ds.$$

Since \mathbf{f} is a solution of the system (2), we have $\mathbf{f}(0) = \mathbf{0}$. Therefore, we have

$$\mathbf{f}(t) = \int_0^t \mathbf{A}(s) \mathbf{f}(s) ds.$$

Since \mathbf{f} is a solution of the system (2), we have $\mathbf{f}(0) = \mathbf{0}$. Therefore, we have

$$\mathbf{f}(t) = \int_0^t \mathbf{A}(s) \mathbf{f}(s) ds.$$

Since \mathbf{f} is a solution of the system (2), we have $\mathbf{f}(0) = \mathbf{0}$. Therefore, we have

$$\mathbf{f}(t) = \int_0^t \mathbf{A}(s) \mathbf{f}(s) ds.$$

Since \mathbf{f} is a solution of the system (2), we have $\mathbf{f}(0) = \mathbf{0}$. Therefore, we have

$$\mathbf{f}(t) = \int_0^t \mathbf{A}(s) \mathbf{f}(s) ds.$$

Since \mathbf{f} is a solution of the system (2), we have $\mathbf{f}(0) = \mathbf{0}$. Therefore, we have

$$\mathbf{f}(t) = \int_0^t \mathbf{A}(s) \mathbf{f}(s) ds.$$

Since \mathbf{f} is a solution of the system (2), we have $\mathbf{f}(0) = \mathbf{0}$. Therefore, we have

$$\mathbf{f}(t) = \int_0^t \mathbf{A}(s) \mathbf{f}(s) ds.$$

Since \mathbf{f} is a solution of the system (2), we have $\mathbf{f}(0) = \mathbf{0}$. Therefore, we have

$$\mathbf{f}(t) = \int_0^t \mathbf{A}(s) \mathbf{f}(s) ds.$$

CAPÍTULO 3

Capítulo 3

3.1 Topografía

El producto final de la topografía fue un modelo tridimensional de la gruta a partir del cual pudo realizarse un recorrido no manipulable, grabado en video a partir de una herramienta de dibujo asistido por computadora (CAD).

La consulta de dicho material puede realizarse en la página web *YouTube*, bajo el nombre de “Recorrido: Gruta Cueva del Mundo” o en la liga https://www.youtube.com/watch?v=g2GHY4A_Ams&t=7s.

En el video puede apreciarse la localización de la comunidad y las referencias que fueron descritas en el apartado 1.2 de este trabajo. El video se realizó gracias a las herramientas electrónicas: Windows Movie Maker, Screencast-O-matic, Google Earth y AutoCAD 2016.

En la siguiente imagen se presenta una figura del plano en dos dimensiones el cual sirvió de base para el modelado tridimensional, y posteriormente figuras de algunas vistas isométricas del modelo tridimensional.

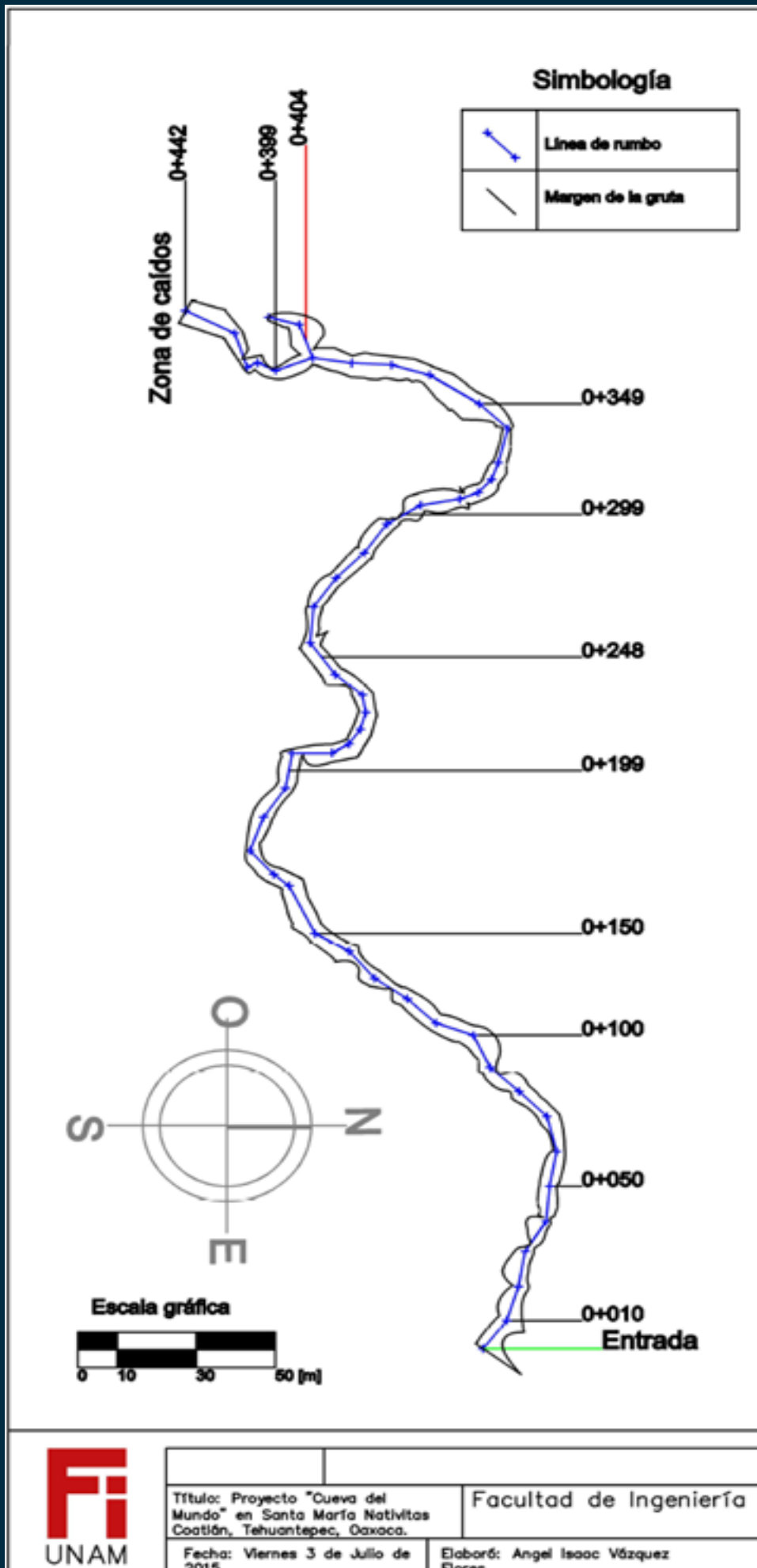


Figura 3.1 Plano gruta Cueva del Mundo

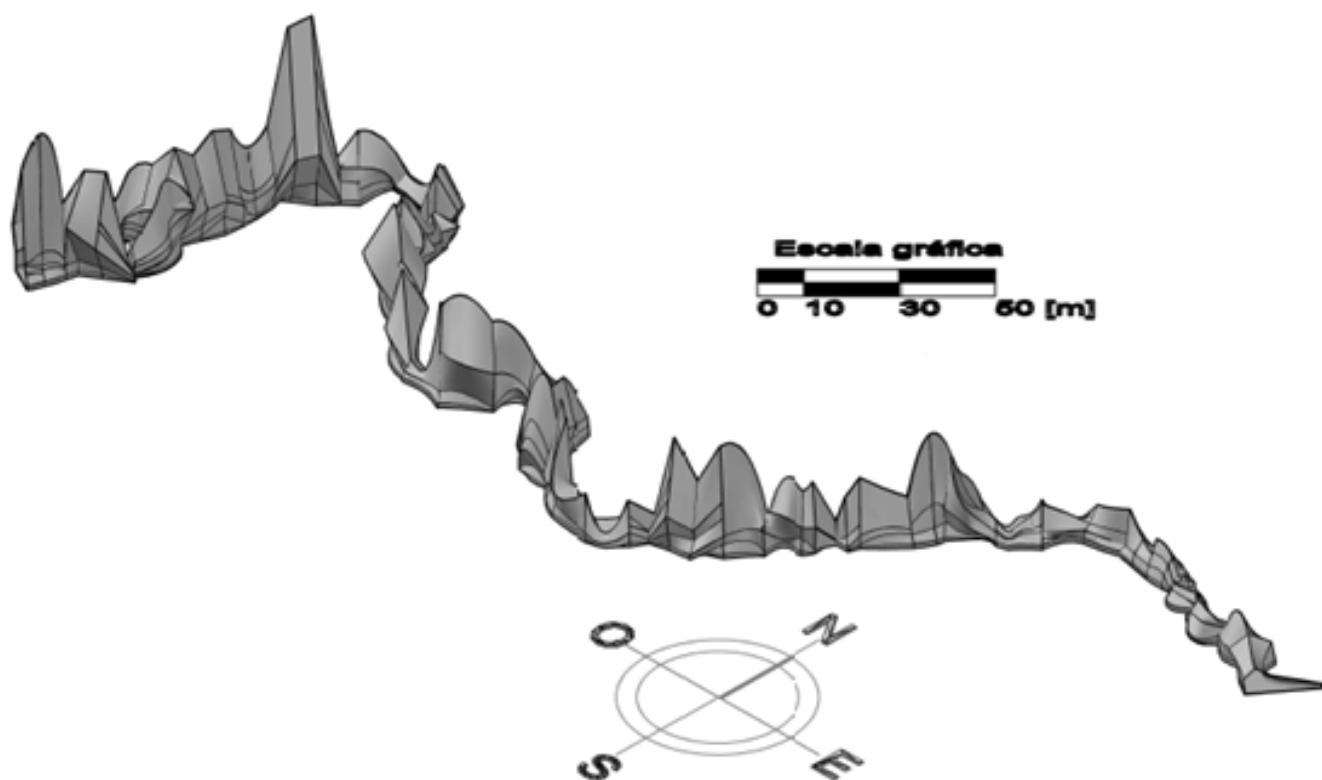


Figura 3.2 Vista Sureste del modelo tridimensional de la gruta.

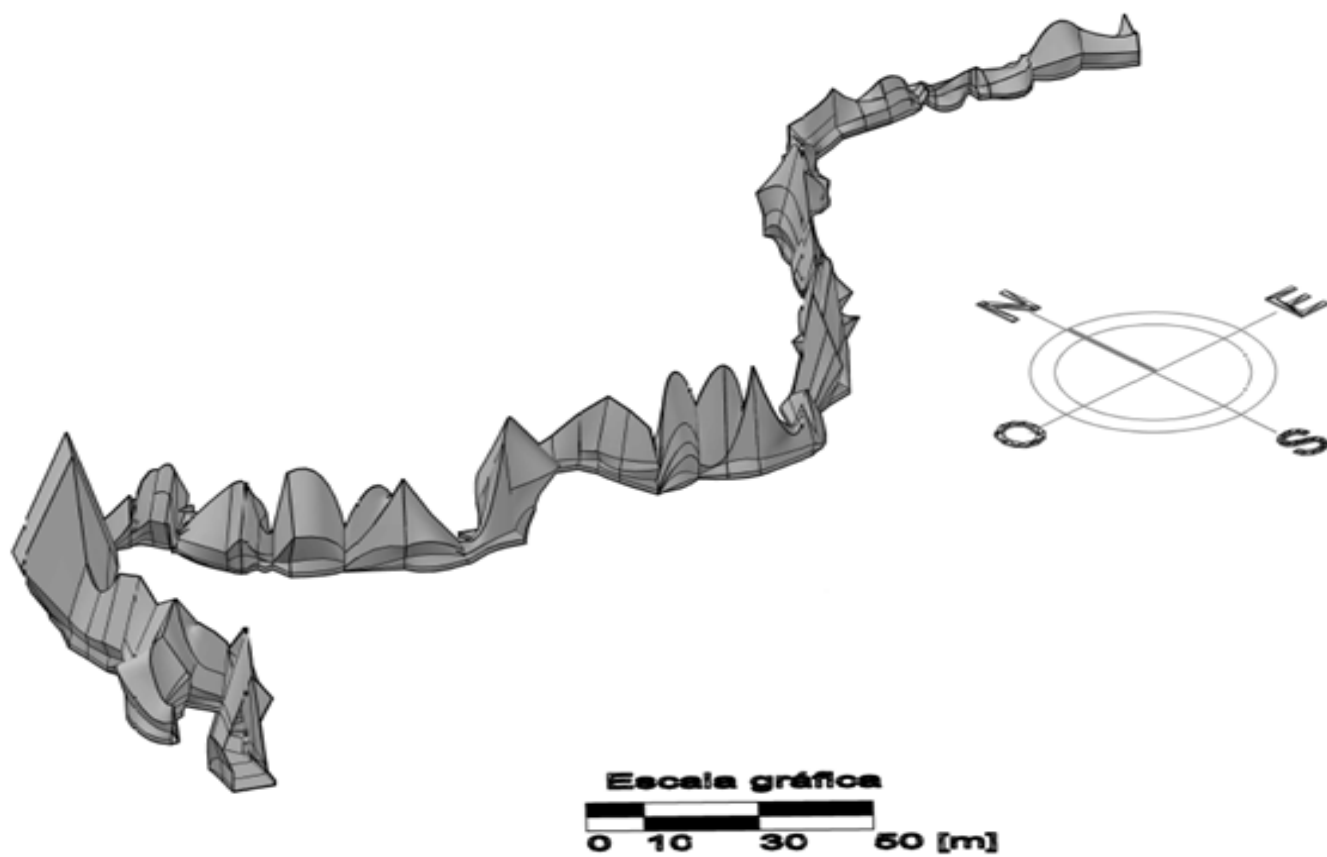


Figura 3.3 Vista Suroeste del modelo tridimensional de la gruta.

3.2 Contexto geológico

La zona de interés se encuentra en la parte sur del estado de Oaxaca. Se trata de una región con cambios topográficos abruptos y una alta complejidad geológica, por su gran variedad litológica y contexto tectónico.

En la zona de estudio afloran rocas metasedimentarias y metamórficas del Carbonífero, rocas clásticas del Jurásico Medio, y calizas y terrígenas del Cretácico. También se encuentran rocas volcánicas del Paleoceno (ver figuras 3.4 y 3.5).

Se ha tomado como referencia para las edades de las rocas las reportadas en la Carta Geológica-Minera Juchitán E15- 10 D15- 1, escala 1:250 000, Consejo de Recursos Minerales.

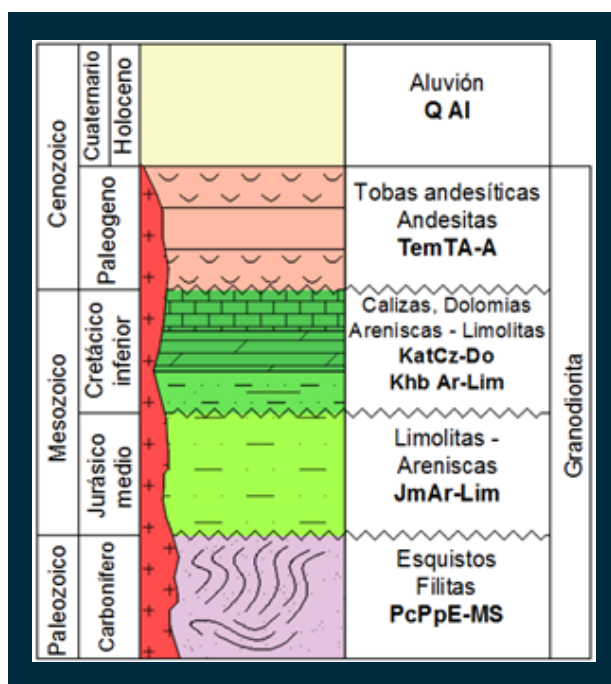


Figura 3.4 Columna estratigráfica esquemática de la zona de estudio (modificada de la Carta Geológica-Minera Juchitán E15- 10 D15- 1, escala 1:250 000, Consejo de Recursos Minerales).

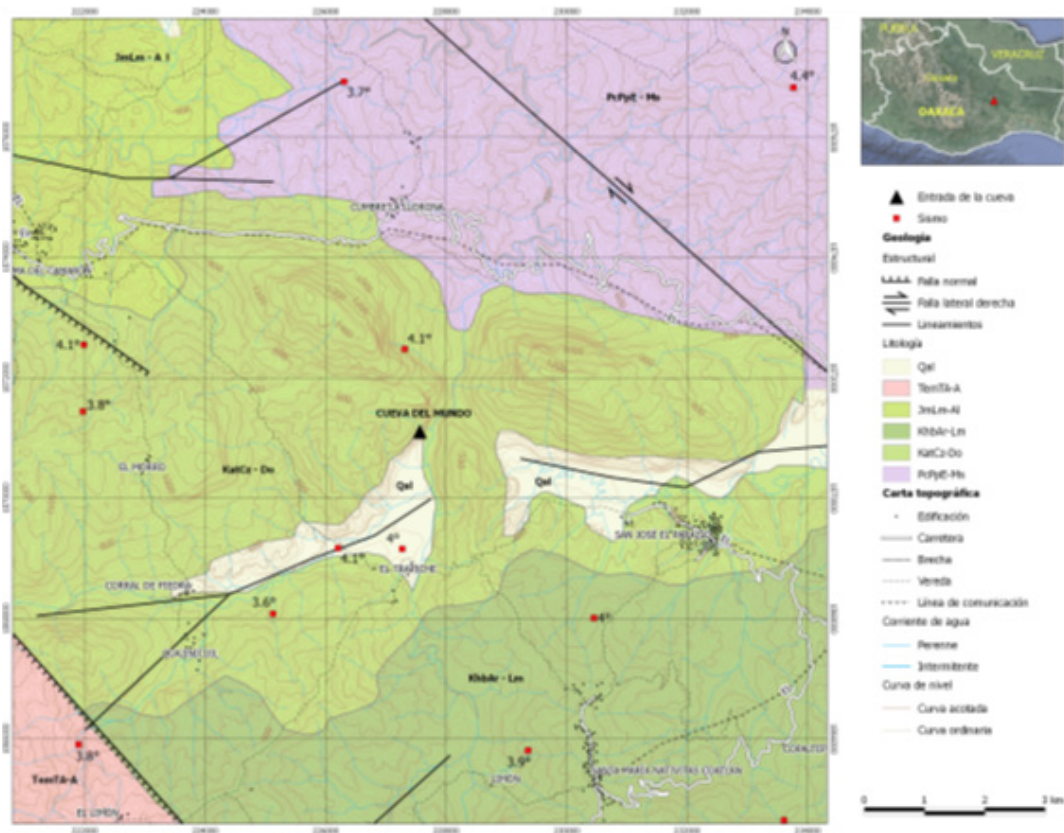


Figura 3.5 Mapa geológico de la zona de estudio.

Esquistos y filitas (PcPpE-Ms).

Esquistos y filitas constituyen una secuencia perteneciente al Complejo de Sierra de Juárez. Se trata de rocas metamórficas de bajo grado en facies de esquistos verdes, es una franja orientada de noreste-sureste. Consiste en una secuencia de esquistos de clorita, sericita y cuarzo, de color gris verdoso y que presentan un color amarillo pardo (ver Figura 3.6a), documentado por Martínez (Martínez, *et al*, 2000) y están distribuidos hacia el Norte de la Cueva del Mundo en el borde Norte del poblado de cumbre de La Llorona, (Figuras 3.6a y 3.6b).



Figura 3.6a Secuencia de esquistos y filitas al Este de la cumbre La Llorona



Figura 3.6b Superficie donde se observan los planos de esquistosidad que son casi paralelos al corte.

Areniscas y limolitas (Jm Lm-Ar).

Se trata de una secuencia sedimentaria que alterna areniscas de grano medio a grano grueso de color café con tonalidades rojizas. Los estratos de areniscas observados en general tienen de 5 a 50 cm de espesor y presentan orientaciones preferenciales de S40°E/53°SW y N80°E/62°.

En la Figura 3.7 se puede percibir la coloración y los espesores observados de los estratos de areniscas.

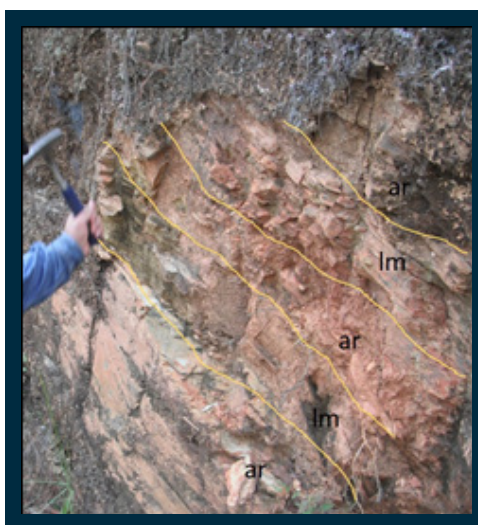


Figura 3.7 Secuencia de areniscas y limolitas al Norte de Santiago Ixcatepec.

Calizas y dolomias (KatCz-Do).

Es una secuencia de caliza, está considerada como parte de la formación Sierra Madre. Martínez (Martínez *et al.*, 2000) las describen como rocas calcáreas de plataforma cuya edad va del Albiano al Cenomaniano, con textura de *mudstone* de acuerdo con la clasificación de Dunham de 1962. Presenta recristalización y su estratificación va de gruesa a masiva; en el sitio de la gruta no fue posible identificar su estratificación por la cubierta de calcita precipitada en las caras.

Ferrusquía-Villafranca (1999) describe a rocas asociadas a este paquete como “rocas compuestas de micrita de color gris medio que presentan recristalización considerable y fracturamiento extenso con relleno de calcita”. Esta unidad se alterna con calizas dolomitizadas, (ver figuras 3.8a y 3.8b). En estas rocas fue donde se labró la Cueva del Mundo, producto de la disolución de los carbonatos.

La formación de grutas en rocas carbonatadas se debe a la disolución por aguas meteoricas que se infiltran aprovechando los planos de discontinuidad como fallas, fracturas o la misma estratificación. A este fenómeno se le llama karsticidad o carsticidad. En un principio el agua que se infiltra es controlada principalmente por la topografía, sin embargo, cuando la ampliación de las discontinuidades corta los planos de estratificación se establece una red tridimensional de cavidades anegadas entre los bloques de calizas.

La disolución y escurrimiento del agua moldea formas peculiares dentro de la gruta, figuras 3.9a y 3.9b.

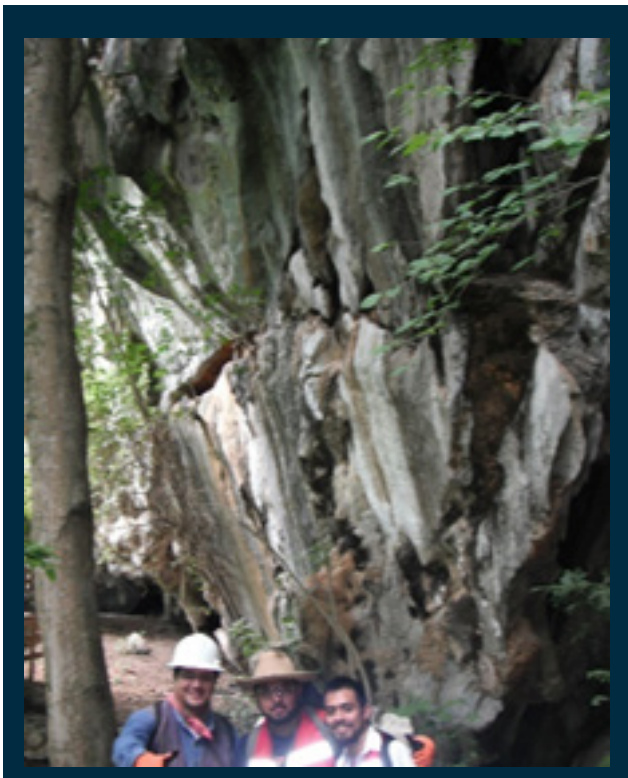


Figura 3.8a Entrada a la gruta, en donde se observan los distintos planos de discontinuidad.



Figura 3.8b Interior de la gruta, fracturas rellenas de calcita.



Figura 3.9a Formaciones geológicas en las paredes de la gruta.



Figura 3.9b Formaciones geológicas en el techo de la gruta (llamadas “medusas” por los pobladores).

Areniscas y limolitas (KhbAr-Lm).

Las areniscas que se observaron tenían una coloración café claro con estratos de espesores de 3 a 30 cm. Se midieron orientaciones preferenciales de la estratificación de $N80^{\circ}W/20^{\circ}$ y $N30^{\circ}E/45^{\circ}$ en el Norte del poblado Santa María Nativita Coatlán. Ver Figura 3.10a y 3.10b.



Figura 3.10a Medición de estructuras en areniscas y limolitas.



Figura 3.10b Secuencia de areniscas y limolitas en el Norte de Santa María Nativitas Coatlán.

3.2.2 Geología estructural

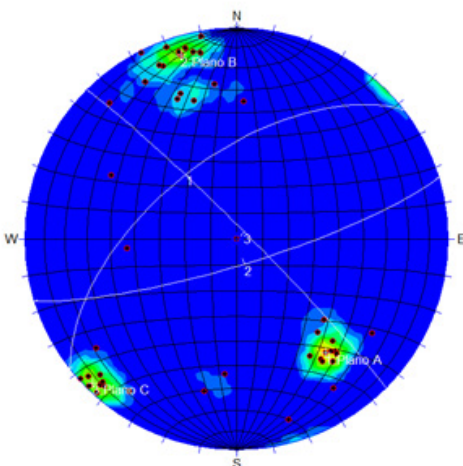
El análisis estadístico se realizó con 583 referencias de discontinuidades recogidos en los 443 metros mapeados de la gruta. La información se registró en la herramienta DIPS, de Rocscience, modificando el software a una red equiareal y bajo la distribución de Schmidt.

Los datos de discontinuidades en el software DIPS se introdujeron en el formato de máxima pendiente y dirección de la máxima pendiente en azimuthal. El dato que surgió, producto de esta información fue el polo del plano. Para mayor comprensión se transformaron, únicamente los polos de las familias principales de discontinuidades identificadas, a rumbo y echado con la regla de la mano derecha.

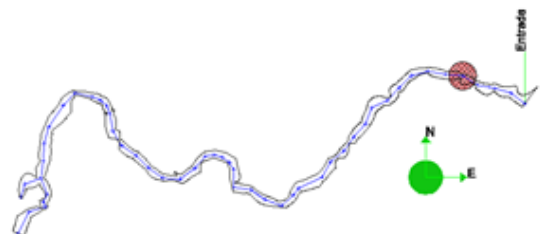
Los estereogramas con los polos de dichas discontinuidades y las familias principales de las mismas se presentan a continuación.

El video que se encuentra en la página web, YouTube, cuya consulta puede hacerse bajo el nombre de “Cueva del Mundo: Zonas de inestabilidad” o en el enlace <https://www.youtube.com/watch?v=p9Cb8AFWVTQ>, pueden apreciarse las familias principales de discontinuidades a lo largo de la gruta.

Cadenamiento 0+040:



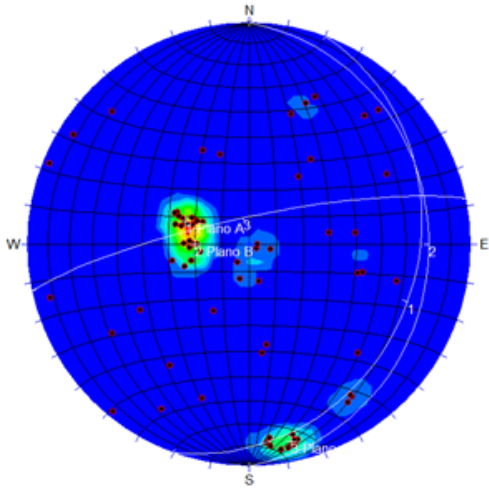
Ubicación en croquis



Número de datos: 45

Familia de discontinuidades	Rumbo / Echado
A	SW52°/58°
B	NE73°/80°
C	NW45°/86°

Cadenamiento 0+050:



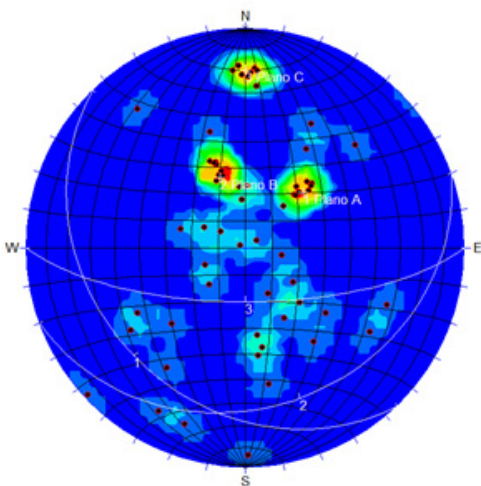
Ubicación en croquis



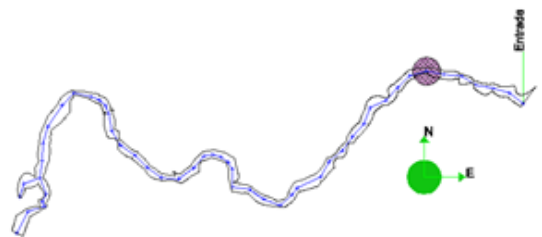
Número de datos: 73

Familia de discontinuidades	Rumbo / Echado
A	NE20°/25
B	N/20°
C	SW78°/80°

Cadenamiento 0+060:



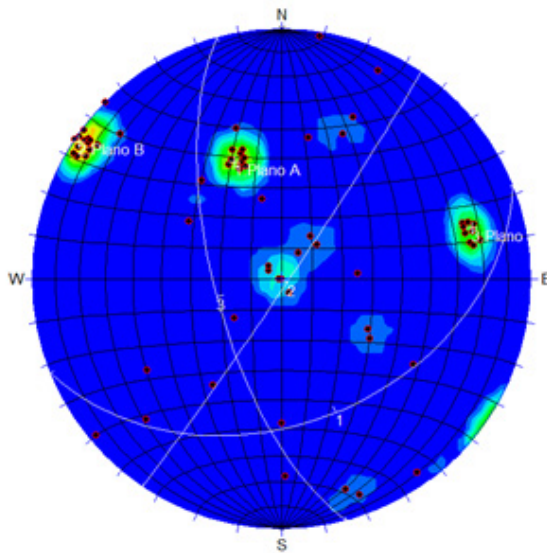
Ubicación en croquis



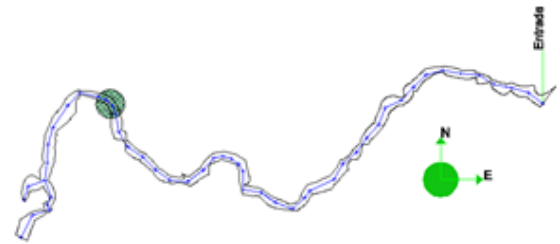
Número de datos: 61

Familia de discontinuidades	Rumbo / Echado
A	SE44°/30°
B	NE70°/28°
C	E0°/70°

Cadenamiento 0+320:



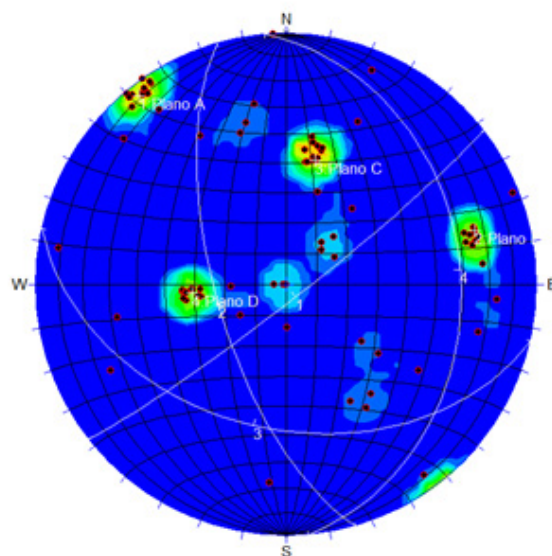
Ubicación en croquis



Número de datos: 65

Familia de dis-continuidades	Rumbo / Echado
A	NE68°/42°
B	NE34°/88°
C	SE15°/68°

Cadenamiento 0+350:



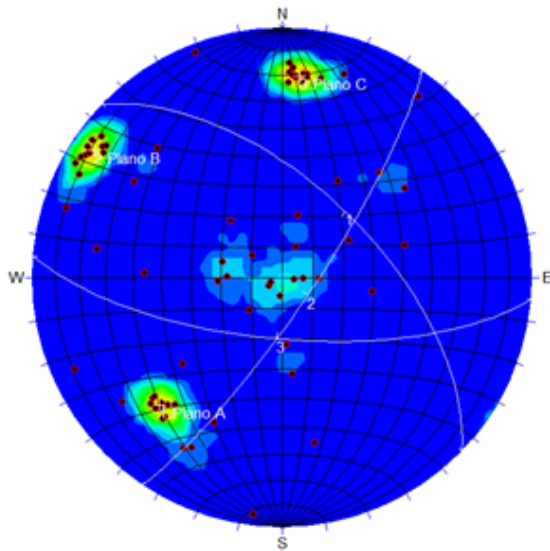
Ubicación en croquis



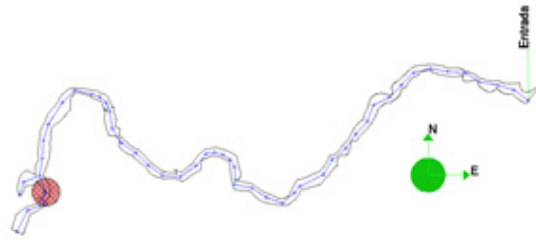
Número de datos: 86

Familia de dis-continuidades	Rumbo / Echado
A	NE52°/85°
B	SE16°/67°
C	SE77°/42°
D	NW85°/31°

Cadenamiento 0+385:



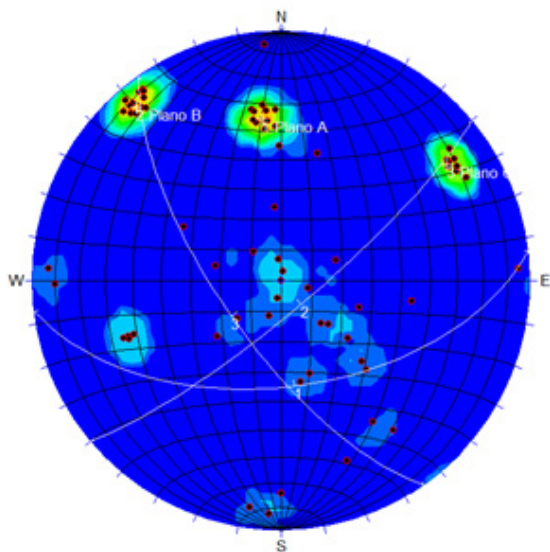
Ubicación en croquis



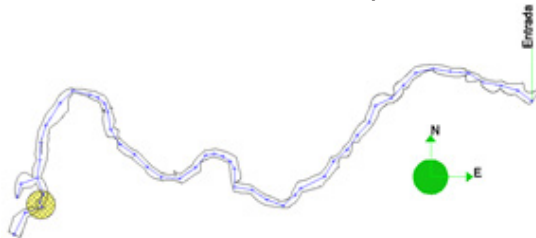
Número de datos: 73

Familia de discontinuidades	Rumbo / Echado
A	NW44°/60°
B	NE34°/80°
C	SE85°/70°

Cadenamiento 0+400:



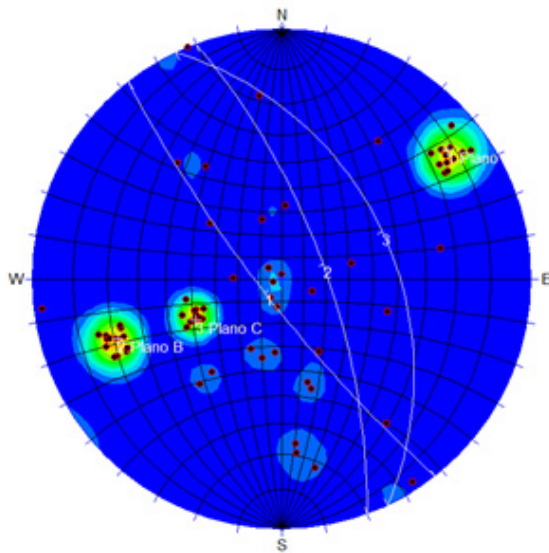
Ubicación en croquis



Número de datos: 72

Familia de discontinuidades	Rumbo / Echado
A	NE83°/55°
B	NE50°/80°
C	SE35°/70°

Cadenamiento 0+418:



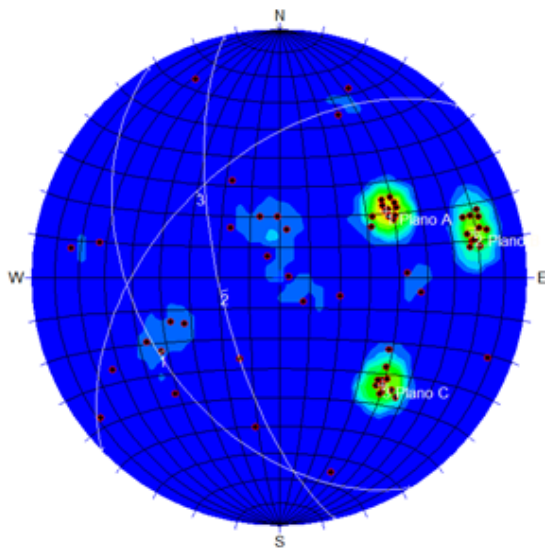
Ubicación en croquis



Número de datos: 45

Familia de discontinuidades	Rumbo / Echado
A	SE38°/80°
B	NW20°/70°
C	NW25°/42°

Cadenamiento 0+428:



Ubicación en croquis



Número de datos: 62

Familia de discontinuidades	Rumbo / Echado
A	SE32°/42°
B	SE13°/70°
C	SW46°/50°

3.3 Mecánica de rocas

3.3.1 Resistencia a la compresión simple

Los datos obtenidos con el procedimiento descrito en la sección 2.4.1 de este trabajo se muestran en la siguiente tabla:

Muestra	Ancho (w)	Largo (D)	Área transversal	Carga de falla (P) KN	Diámetro equivalente (De)	Índice de carga puntual (Is)
R1	$(70+62)/2 = 66$ mm	28 mm	1848 mm ²	5.2	2352.9 mm ²	2.2 MPa
R2	$(101+90)/2 = 95.5$ mm	40 mm	3820 mm ²	4.2	4863.8 mm ²	0.9 MPa
R3	$(64+75)/2 = 69.5$ mm	28 mm	1946 mm ²	4.7	4477.7 mm ²	1.05 MPa
R4	$(71+75)/2 = 73$ mm	44 mm	3212 mm ²	4.2	4089.6 mm ²	1.02 MPa
R5	$(82+81)/2 = 81.5$ mm	35 mm	2852.5 mm ²	6.5	3631.9 mm ²	1.78 MPa
R6	$(86+94)/2 = 90$ mm	40 mm	3600 mm ²	5.3	4583.7 mm ²	1.16 MPa
R7	$(60+58)/2 = 59$ mm	34 mm	2006 mm ²	3.2	2554.1 mm ²	1.25 MPa
R8	$(75+68)/2 = 71.5$ mm	32 mm	2288 mm ²	5.3	2913.1 mm ²	1.82 MPa
R9	$(69+76)/2 = 72.5$ mm	33 mm	2392.5 mm ²	7.3	3046.2 mm ²	2.4 MPa
R10	$(65+54)/2 = 59.5$ mm	41 mm	2439.5 mm ²	3.6	3106 mm ²	1.16 MPa

Al haber descartado el valor máximo y el mínimo obtenidos del índice de carga puntual (I_s) y realizado un promedio, podemos obtener lo siguiente:

$$I_{s(50)} = \frac{(2.2 + 1.05 + 1.02 + 1.78 + 1.16 + 1.25 + 1.82 + 1.16)}{8} = \frac{11.44}{8}$$

$$I_{s(50)} = 1.43 \text{ MPa}$$

Como ya se ha mencionado anteriormente, el I_s tiene una estrecha relación con la UCS, y basado en la fórmula dictada por Roig (1983) para muestras irregulares, tenemos que:

$$UCS \equiv 39 * I_{s(50)}$$

Por lo tanto

$$UCS = 39 * 1.43 \text{ MPa}$$

$$UCS = 55.78 \text{ MPa}$$

Una vez obtenida la resistencia a la compresión simple, podemos hacer una clasificación previa de la roca. Al consultar la tabla de la imagen 3.4 se puede obtener información cualitativa de utilidad.

Por ejemplo, según la ISRM de 1981 y la clasificación ISRM (International Society of Rock Mechanics and Rock Engineering), de 1981 y la clasificación de la Sociedad Geológica de Londres de 1970, es una roca dura. Mientras que para Bieniawski de 1973 se trata de una roca de mediana dureza.

Si profundizáramos más en la bibliografía podríamos encontrar bastantes características que se le adjudican a una roca de este tipo, pero en un momento determinado tendríamos que detener la descripción cualitativa por falta de elementos, y más aún porque las clasificaciones geomecánicas en su mayoría están orientadas a la construcción y ya hemos resaltado que se trata de una gruta, es decir, una cavidad originada de forma natural.

Es lógico pensar que una roca dura no tendría problemas en soportar una excavación, sin embargo, aún existen factores a considerar. Por ejemplo, conocer que se trata de una roca dura no proporciona la densidad del fracturamiento o la calidad de la misma, y tampoco describe la composición mineralógica del lugar.

Es decir que el dato anteriormente obtenido sólo basta para imaginar que la roca puede soportar una carga considerable.

Hasta este punto sólo podemos pensar en una breve descripción del macizo rocoso, con el avance y obtención de datos podemos dar una mayor certeza de lo antes aquí escrito.

Clasificación de las rocas a partir de su resistencia a compresión simple

Resistencia a la compresión simple (MPa)	ISRM (1981)	Geological Society of London (1970)	Bieniawski (1973)	Ejemplos
< 1	Suelos			
1-5	Muy blanda	Blanda > 1,25	Muy baja	Sal, lutita, limolita, marga, toba, carbón.
5-12,5	Blanda	Moderadamente blanda		
12,5-25		Moderadamente dura		
25-50	Moderadamente dura		Baja	Esquisto, pizarra.
50-100	Dura	Dura	Media	Rocas metamórficas esquistosas, mármol, granito, gneiss, arenisca, caliza porosa.
100-200	Muy dura	Muy dura	Alta	Rocas ígneas y metamórficas duras, arenisca muy cementada, caliza, dolomía.
> 200		Extremadamente dura	Muy alta	Cuarcita, gabro, basalto.
> 250				

Figura 3.11 Tabla comparativa de clasificaciones geomecánicas en función de la UCS.

Fuente: González de Vallejo et. al., 2002.

3.3.2 Densidad

Con los datos obtenidos y al saber que para el cálculo de la densidad se utiliza la relación siguiente:

$$\rho \text{ (densidad)} = \frac{m \text{ (masa)} \text{ g}}{v \text{ (volumen)} \text{ cc}}$$

Se procede a calcularla, sabiendo que 1ml equivale a 1 cm³ de líquido.

Muestra	Masa, g	Volumen inicial (Vi) cm ³	Volumen final (Vf) cm ³	Vreal = Vf-Vi cm ³	Densidad g/cm ³
Roca 1	430.3	500	670	170	2.53
Roca 2	530.2	500	700	200	2.65
Roca 3	408.9	500	660	160	2.55

Para no descartar ningún dato anterior, haremos un promedio de la densidad, resultando en:

$$\rho_{media} = \frac{(2.53 + 2.65 + 2.55)}{3} = \frac{7.73 \text{ g}}{3 \text{ cc}}$$

$$\rho = 2.57 \frac{\text{g}}{\text{cc}} = 2.57 \frac{\text{Ton}}{\text{m}^3} = 2570 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El peso volumétrico de la roca se calcula a partir de la densidad con la expresión siguiente:

$$\gamma(\text{peso volumétrico}) \frac{N}{m^3} = \rho(\text{densidad}) \frac{kg}{m^3} * g(\text{gravedad}) \frac{m}{s^2}$$

$$\gamma = 2570 \frac{kg}{m^3} * 9.81 \frac{m}{s^2} = 25,211.7 \frac{N}{m^3} = 0.02521 \frac{MN}{m^3}$$

CAPÍTULO 4

Capítulo 4

4.1 Análisis del error en la topografía y consideraciones en el modelo 3D

Idealmente un modelo gráfico debe poder retratar lo más fielmente posible la realidad, si fue realizado con el máximo cuidado y detalle. Sin embargo, para el modelo tridimensional de la gruta existen errores de medición ocasionados en un primer momento por el factor humano, es decir, la medición de las distancias a las paredes internas de la gruta con el distanciómetro fue realizado con una plantilla marcada cada quince grados para tomar las secciones transversales de la misma, dando lugar a dichos errores puesto que el distanciómetro se sujetaba con la mano. Además de lo irregular del piso y la escasez de luz los cuales provocaron que en ocasiones la plantilla se ladeara y causara que las medidas debieran repetirse. Ver figura 4.1.



Figura 4.1 Condiciones de poca luz en el interior de la gruta.

También debe considerarse el error detrás de los instrumentos de medición (brújula, cinta y distanciómetro), de los cuales el que presentó una mayor falla fue el distanciómetro ya que por su principio de funcionamiento y condiciones de la gruta donde abundaba el polvo, , humedad y falta de luz, las mediciones pudieron haber sido tomadas incorrectamente en +/- 20cm por captura.

El modelo tridimensional tuvo ciertas consideraciones para poder llevarse a cabo; por ejemplo, AutoCAD es una plataforma de dibujo asistido por computadora con bastantes herramientas que nos permite modelar superficies, sólidos y mallas. Sin embargo, requiere una suministración de los datos necesarios para poder tener acceso a todos los beneficios, condición para la cual el modelo estuvo limitado y por ello se puso bastante peso en la herramienta, es decir, el modelo se originó siguiendo trayectorias perpendiculares entre los bordes de las secciones y se dio por bien aceptado ya que se desconocía el espacio entre las mismas.

Las herramientas para crear superficies en AutoCAD 2016 tienen restricciones; una de ellas es que los elementos que pretenden formar una superficie deben estar lo suficientemente espaciados para que el programa pueda suavizar la superficie en una curva, es decir, que el suavizado en curvas para secciones muy juntas no debe ser brusco o de lo contrario no se formará.

En las escasas situaciones en las que se presentó el traslape de los contornos de las secciones hubo que suavizarse la línea de rumbo y recorrer unos pocos metros la sección.

4.2 Clasificación GSI

El sistema de clasificación para macizos rocosos GSI (Hoek, E. and Brown, E. T., 1997) por sus siglas en inglés, *Geological Strength Index*, que en su primera versión publicada en 1980 tenía limitantes en campo porque carecía de recuadros para hacer encasillar las descripciones que se obtenían, fue modificada con el paso del tiempo por el autor y los mismos usuarios acorde a sus necesidades hasta que en el año 1994 surgió como tal el GSI para macizos rocosos anisotópicos y heterogéneos (Marinos, P., Hoek, E, 2000).

El GSI es expresado con un valor numérico entre 5 y 100 que representa la calidad del macizo rocoso. Las estimaciones más bajas describen una roca de muy mala calidad y los valores altos expresan que la calidad del macizo rocoso es buena, en la figura 4.3 se muestra la tabla de la clasificación geomecánica GSI. El GSI es una clasificación neutra, es decir, no se encuentra orientada a obras, sino que su único fin es poder determinar la calidad de la roca a partir de dos parámetros: la densidad de fracturamiento y las condiciones de superficie (intemperismo).

Dicho valor se obtendrá del siguiente análisis de fotografías y descripción breve del afloramiento.



Figura 4.2 Fotografía de una discontinuidad presente en el macizo rocoso.

En la imagen 4.2 se puede observar una pequeña, pero representativa porción del macizo rocoso, en la cual se visualiza la intersección de por lo menos dos familias de discontinuidades, es por ello que puede apreciarse un fracturamiento, que hasta cierto punto es simétrico. Por el ambiente húmedo al que se encuentra expuesta la gruta algunas de las discontinuidades se encuentran rellenas de arcillas o cubiertas por la misma, lo que en ocasiones dificulta su reconocimiento.



Figura 4.3 Fotografía de las estructuras del macizo rocoso.

Debido al clima lluvioso de la región, las paredes se encuentran húmedas en gran parte de la gruta, lo que hace pensar que el agua pluvial percola por las fracturas y ocasiona presión entre ellas, abriéndolas y dejándolas expuestas como se muestran. Sin embargo las condiciones de la superficie expuesta no son tan deplorables, es decir, el macizo tiene una buena calidad. Con la información que nos proporciona la imagen podríamos asignar un valor de GSI de 80 a 60.

En la imagen 4.3 se muestra otro escenario de la gruta, donde las paredes se encuentran relativamente secas, y las discontinuidades presentes rellenas por calcita. No se percibe a simple vista un patrón de discontinuidades, sino que son aleatorias.

También puede observarse que las discontinuidades son cerradas. La tonalidad de la roca nos dice que es una superficie fresca y de buena calidad. Con el escenario que plantea la imagen, se le asignará un GSI de 40 a 60.

Con las descripciones anteriores, procedemos a localizar en una tabla de GSI, la calidad del macizo rocoso.

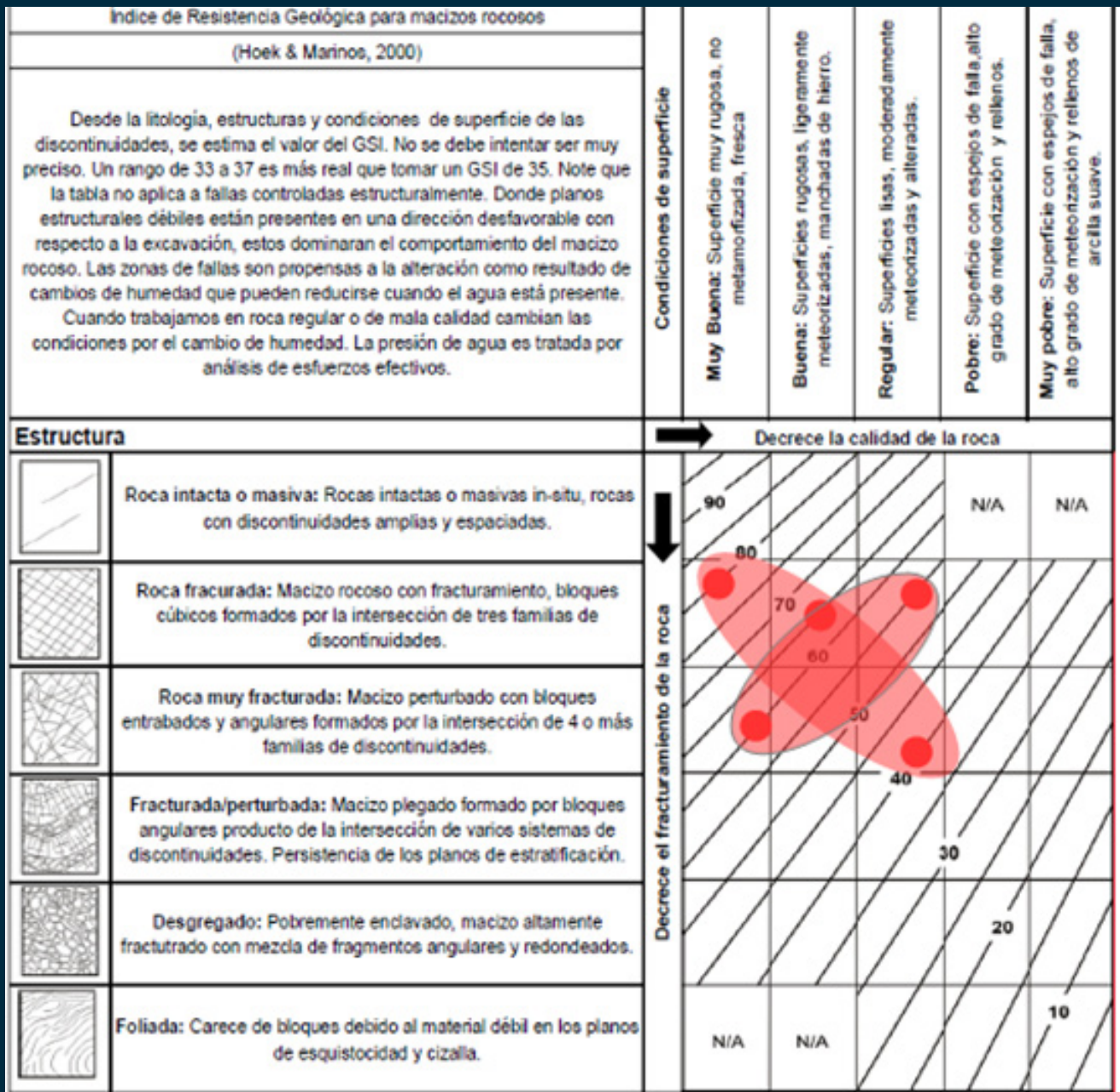


Figura 4.4 Zonificación del macizo rocoso en la tabla del GSI. Fuente: Marinos, V., Marinos, P., Hoek, E. (2005).

Como el GSI es una medida de la calidad del macizo rocoso, sería muy arbitrario y poco práctico asignar un valor, por lo que en lugar de eso se ha seleccionado una región, la marcada en rojo, donde se encuentra el macizo rocoso. Para proceder con los análisis y que de ninguna manera se vea sesgado hacia algún lado, tomaremos el valor medio de 60.

4.3 Obtención de parámetros de resistencia con RocLab

El procedimiento que se utilizará, a grandes rasgos, será el de emplear el criterio de rotura de Hoek – Brown para obtener la curva de rotura equivalente en el criterio de Mohr – Coulomb, y así conseguir un modelo que pueda ser utilizado para toda la gruta, asumiendo que ésta tiene las mismas propiedades en todas partes. El procedimiento se realiza de tal manera, porque se parte de las descripciones de la geología hechas en campo y los ensayos, que de manera indirecta, nos permiten saber la UCS. Si se procediera a realizar el ensayo a la compresión simple directamente, se podría omitir este apartado.

La herramienta electrónica *RocLab*, como la gran mayoría de software de mecánica de rocas, se encuentra basada en el criterio de rotura de Mohr–Coulomb y de forma equivalente en el criterio de rotura de Hoek–Brown (Hoek, E., C. Carranza-Torres, and B. Corkum, 2002).

El criterio de rotura de Mohr–Coulomb (González de Vallejo, *et.al.*, 2002, pp. 160), asume que el corte en las rocas es producto de la combinación de esfuerzos normales y tangenciales; la ecuación que define la superficie de falla es lineal y tangente a los círculos obtenidos mediante ensayos de resistencia a compresión y tensión, es decir, el esfuerzo cortante se encuentra en función del esfuerzo normal y cuya expresión matemática es:

$$\tau = c + (\sigma n)(\tan\Phi)$$

Donde:

C: es la cohesión, MPa

Φ : es el ángulo de fricción interna

τ : es el esfuerzo cortante o tangencial

σn : es el esfuerzo normal, MPa

La envolvente de Mohr–Coulomb representa el comportamiento elástico de las rocas. Cualquier combinación de esfuerzos normales y tangenciales que se localicen debajo de la superficie de falla, están en un estado elástico y si se encuentran sobre esta se producirá la rotura. No puede haber combinación alguna por encima de la superficie ya que si eso sucediera la roca habría alcanzado la rotura. Ver figura 4.5.

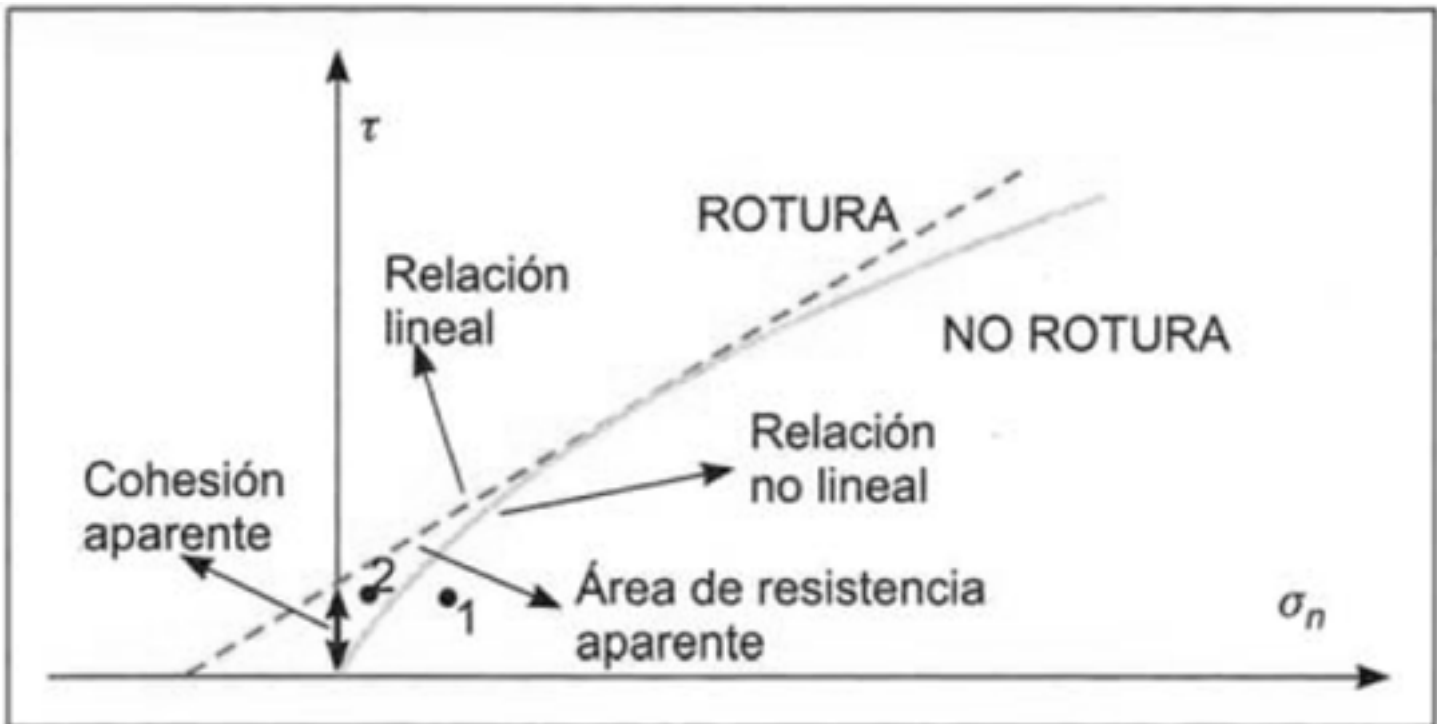


Figura 4.5 Envolvente de Mohr-Coulomb. Fuente: González de Vallejo, 2002.

Con los datos obtenidos hasta el momento es posible alimentar el software RocLab, y con ello obtener los parámetros de la roca que corresponden al modelo de rotura de Mohr-Coulomb.

Introducirse a dicho software y extraer datos requiere conocer cuatro parámetros del criterio de rotura de Hoek – Brown (Hoek, E., C. Carranza-Torres, and B. Corkum, 2004):

- La resistencia a la compresión simple (UCS).
- Índice de resistencia geológica o GSI, por sus siglas en inglés.
- Constante del material (m).
- Factor D o factor de voladura.

También se requiere seleccionar la aplicación del análisis, es decir, a una excavación subterránea, un talud o general. Para acercarse a la realidad el comportamiento del macizo rocoso y de los parámetros del mismo, hemos seleccionado una excavación subterránea, con lo que habrá de calcularse la columna litoestática de la misma.

Clasificación Hoek – Brown

Sigci: Resistencia a la compresión simple

GSI: Índice de resistencia geológica

mi: Constante del material

D: Factor de perturbación por voladuras

Criterio de rotura Hoek – Brown

Mb: Constante del material

S: Factor que depende del GSI

A: Factor que depende del GSI

The screenshot shows the following input fields in the RocLab software:

- Hoek-Brown Classification:** sigci: 30 MPa, GSI: 50, mi: 10, D: 0.
- Hoek-Brown Criterion:** mb: 1.677, s: 0.0039, a: 0.506.
- Failure Envelope Range:** Application: Tunnels, sig3max: 0.6642 MPa, Unit Weight: 0.026 MN/m³, Tunnel Depth: 50 m.
- Mohr-Coulomb Fit:** c: 0.367 MPa, phi: 49.98 deg.

Rango de la envolvente de rotura

Aplicación: General, túnel, talud y modificable.

Sig3max: Esfuerzo mínimo (horizontal) o sigma 3.

Peso unitario: Peso por unidad de volumen.

Profundidad del túnel:

Ajuste Mohr - Coulomb

C: Cohesión de la roca.

Φ (phi): Ángulo de fricción interna.

La constante del material (m), es un valor que depende del material, el tipo de roca y textura de la misma. El valor puede ser 28 +/- 5 para rocas duras y de 6 +/- 2 para rocas suaves o poco resistentes. Para la roca que analizamos, utilizaremos un valor de 7 +/- 2, tratándose de una caliza.

Figura 4.6 Cuadro de ingreso de datos de RocLab.

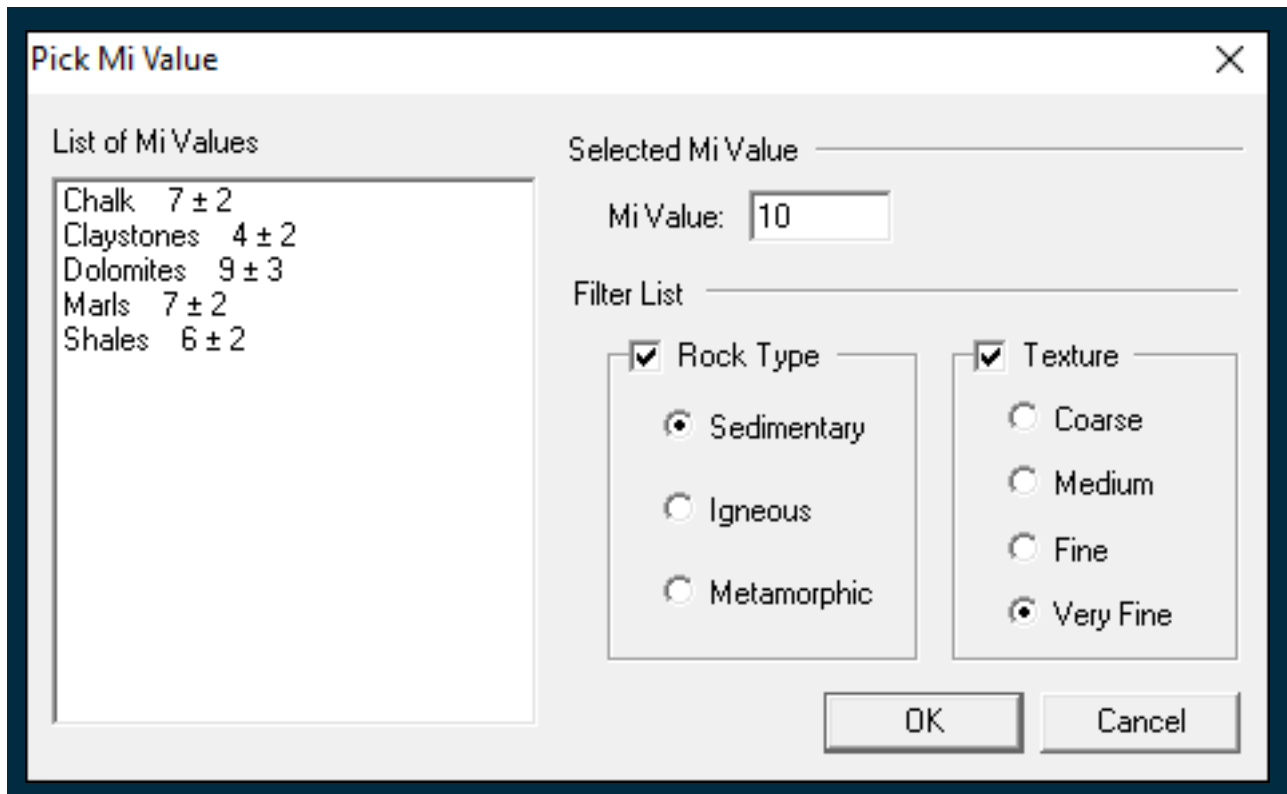


Figura 4.7 Submenú de ingreso de datos para estimar el valor *mi* en RocLab.

El factor D es una constante que depende sobre todo del grado de alteración al que ha sido sometido el macizo rocoso por los efectos de las voladuras o por la relajación de esfuerzos. Varía desde 0 para macizos rocosos *in situ* inalterados, hasta 1 para macizos rocosos muy alterados; también en función del tipo de excavación, subterránea o superficial. En la figura 4.8 se muestra la tabla con la cual se ha decidido asignar un valor de cero.




Apariencia del macizo rocoso	Descripción del macizo rocoso	Valor D sugerido
	<p>Excelente calidad de voladura controlada o excavación con tuneladora, TBM, con resultados de alteración mínima del macizo rocoso confinado circundante al túnel</p>	<p>$D = 0$</p>
	<p>Excavación mecánica o manual en macizos rocosos de mala calidad (sin voladuras) con una alteración mínima en el macizo rocoso circundante.</p> <p>Cuando aparezcan problemas de deformación en el piso durante el avance, la alteración puede ser severa a menos que se coloque una contrabóveda temporal, tal como se muestra en la fotografía.</p>	<p>$D = 0$</p> <p>$D = 0.5$ No invert</p>
	<p>Voladura de muy mala calidad en un túnel en roca competente con daños locales severos, extendiéndose 2 o 3 m en el macizo rocoso circundante.</p>	<p>$D = 0.8$</p>

Figura 4.8 Tabla de asignación del valor D en RocLab. Fuente: Hoek, E., C. Carranza-Torres, and B. Corkum, 2004.

La columna litoestática se obtuvo de un perfil de elevaciones extraído de la herramienta Google Earth como se muestra en la figura 4.9. Esto nos permite saber que la diferencia de altitudes, entre el punto más alto de la formación rocosa donde está la gruta y la entrada de la misma, es de 232 m. Es decir, que las paredes y techo de la gruta soportan una columna litoestática de 232 m, y que el esfuerzo que ejerza sobre ésta disminuirá o aumentará la resistencia a la rotura y al colapso de las zonas de riesgo.



Figura 4.9 Perfil de elevaciones. Fuente: Google Earth.

Hoek-Brown Classification	
sigci	56 MPa
GSI	60
mi	7
D	0
Hoek-Brown Criterion	
mb	1.68
s	0.01
a	0.50
Failure Envelope Range	
Application:	Tunnels
sig3max	2.85 MPa
Unit Weight	0.02521 MN/m ³
Tunnel Depth	232 m

Los datos se ingresan como se muestra en la figura 4.10a y aparecen graficados en la figura 4.10b; la línea azul representa el modelo de rotura de Mohr-Coulomb, mientras que la línea amarilla el modelo de rotura de Hoek-Brown. Los modelos son equivalentes, lo único que los diferencia es que el primero de ellos está expresado en función del esfuerzo normal y esfuerzo cortante, y el segundo se encuentra en función de los esfuerzos principales σ_1 y σ_3 .

Figura 4.10a Datos de ingreso para el macizo rocoso de la gruta.

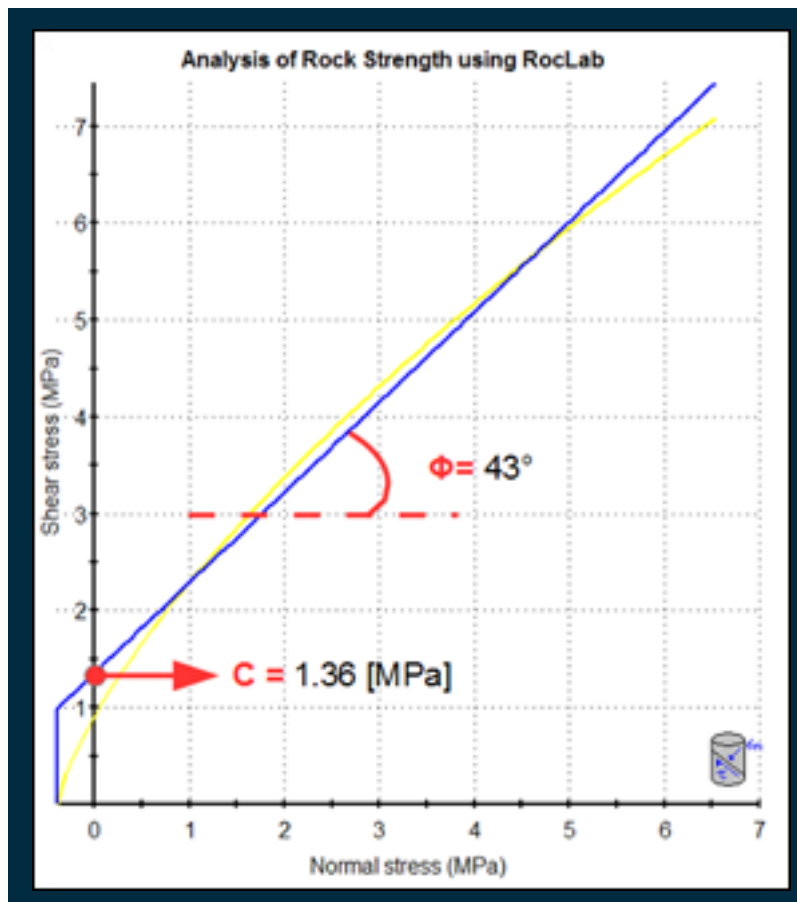


Figura 4.10b Gráfica del modelo de rotura para el macizo rocoso de la gruta. de Mohr-Coulomb. En línea azul el modelo Mohr-Coulomb y en amarillo el modelo de Hoek – Brown.

De la gráfica podemos obtener los datos de cohesión y del ángulo de fricción interna que pertenecen al criterio de Mohr-Coulomb, y que son de interés para continuar con el análisis de estabilidad.

Mohr-Coulomb Fit
 cohesion = 1.36 MPa friction angle = 43.01 deg

Figura 4.11 Parámetros obtenidos de RocLab para el macizo rocoso.

La ecuación del criterio de rotura según la expresión anteriormente mostrada quedaría de la siguiente manera para el macizo rocoso de la gruta:

$$\tau = 1.36 + \sigma n(\tan(43^\circ))$$

Y para el cual se debe cumplir que por encima de los valores de este modelo la rotura se haga presente, y por debajo de la curva exista la estabilidad.

Para conocer con mayor detalle el procedimiento y los datos necesarios para utilizar la herramienta electrónica *RocLab* se recomienda consultar el manual; *RocLab: Análisis de la resistencia del macizo rocoso mediante el criterio de rotura de Hoek-Brown* que se menciona en la bibliografía de este trabajo.

4.4 Análisis de estabilidad

Para el procesamiento de datos y visualización de los mismos se hizo uso de la herramienta UNWEDGE versión 3.005, la cual se describe brevemente.

La herramienta UNWEDGE es un software geotécnico utilizado para identificar cuñas y determinar si son propensas o no a caer. Existen tres modos diferentes de falla para una cuña en el interior de una excavación subterránea: rotura, deslizamiento en un plano y deslizamiento en dos planos. Las ecuaciones que permiten estimar el factor de seguridad, FS, y que utiliza simultáneamente UNWEDGE, para cada caso son:

Caso 1: Rotura en cuña

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^n [T_g^i \text{eff}^i] + C_g}{W_g}$$

Caso 2: Deslizamiento en único plano:

$$FS = \frac{N_i \tan \phi_i + A_i c_i}{S_i} + \frac{i \sum_{i=1}^n [(Tn_i^i \tan \phi_i + Ts_i^i) \text{eff}^i]}{S_i} + \frac{Cn_i \tan \phi_i + Cs_i}{S_i}$$

Caso 3: Deslizamiento en dos planos:

$$FS = \frac{N_i \tan \phi_i + N_j \tan \phi_j + A_i c_i + A_j c_j}{S_{ij}} + \frac{i \sum_{i=1}^n [(Tn_i^i \tan \phi_i + Tn_j^j \tan \phi_j + Ts_{ij}^i) \text{eff}^i]}{S_{ij}} + \frac{Cn_i \tan \phi_i + Cn_j \tan \phi_j + Cs_{ij}}{S_{ij}}$$

Donde:

N_i Componente normal al plano (i) del peso de la cuña (W), menos la presión de agua (u) en el plano (l).

S_i Componente tangencial al plano (i) del peso (W) de la cuña y en la dirección del deslizamiento.

S_{ij} Componente del peso (W) de la cuña en la dirección del eje definido por los planos i y j .

Tn_i Componente de la capacidad del anclaje (T) normal al plano i .

Ts_i Componente de la capacidad del anclaje (T) tangencial al plano i y en la dirección de deslizamiento.

T_{sij} Componente de la capacidad del (T) en la dirección del eje definido por los planos i y j .

Eff Eficiencia del anclaje (gobernada por la instalación y el modo de moverlo).

C_{ni} Componente de la capacidad del concreto lanzado (C) normal al plano i .

C_{si} Componente de la capacidad del concreto lanzado (C) tangencial al plano i y en la dirección del deslizamiento.

C_{sij} Componente de la capacidad del concreto lanzado (C) en la dirección del eje definido por los planos i y j .

A_i Área del plano i .

c_i Cohesión del plano i .

Φ_i Ángulo de fricción del plano i .

N Es el número de anclajes y g es la dirección gravitacional.

El cálculo de la estabilidad de una excavación subterránea en función de la formación de bloques potencialmente inestables se realiza con la herramienta UNWEDGE. Este programa permite estudiar la posibilidad de formación de cuñas en seis hipotéticos planos de rotura (Figura 4.12) y obtener el factor de seguridad para cada una de ellas.

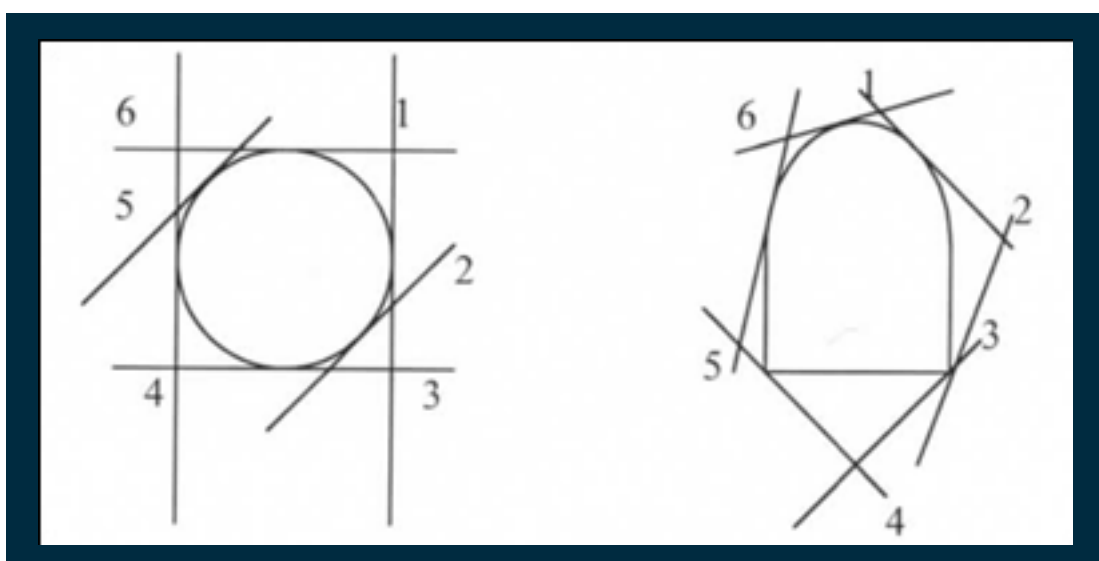


Figura 4.12 Cuñas posibles correspondientes a la forma de la excavación.

La herramienta UNWEDGE es muy útil porque permite calcular el factor de seguridad de los tres escenarios posibles en que fallaría cada una de las seis cuñas que pudieran formarse, y el análisis que muestra es para el escenario más desfavorable.

Para mayor comprensión se deberá entender por familia principal de discontinuidades como aquella que engloba y puede describir la preferencia de la mayoría de fracturas que tienen la misma o una similar orientación y echado.

El rumbo de la excavación se refiere a la orientación azimutal que tiene el eje central de la gruta en un plano XY, y que expresa el sentido de la excavación cuando existe una pendiente. La altura de la gruta es el dato que expresa los metros que existen desde el piso hasta el punto más alto de la sección en el cadenamamiento correspondiente donde se realizó el análisis. Y por último, la longitud de la sección es el tramo de gruta que se analiza y que no tiene cambios bruscos de dirección, con lo que se considera recta en ese cadenamamiento.

Para poder utilizar UNWEDGE se requiere de 5 datos esenciales:

- Familias principales de discontinuidades.
- Dirección o rumbo de la excavación.
- Sección de la excavación, que puede dibujarse o importarse como archivo DXF.
- Peso unitario de la roca.
- Valores del modelo de rotura Mohr Coulomb.

Para continuar con el análisis se siguen los pasos descritos a continuación:

1. Se debe guardar en archivo DXF las secciones transversales, donde se hayan tomado y localizado las cuñas, a partir de AutoCAD.
2. En el espacio de trabajo debe localizarse la paleta de opciones que se muestra en la imagen y dar un *click* en *import DXF*, de inmediato se abrirá una pantalla para poder buscar un archivo compatible. Debe buscarse el archivo guardado en formato DXF del paso anterior y abrirlo.
3. Cuando el archivo se abra, aparecerá en el espacio de UNWEDGE el contorno de la sección, como se muestra en la figura 4.13.

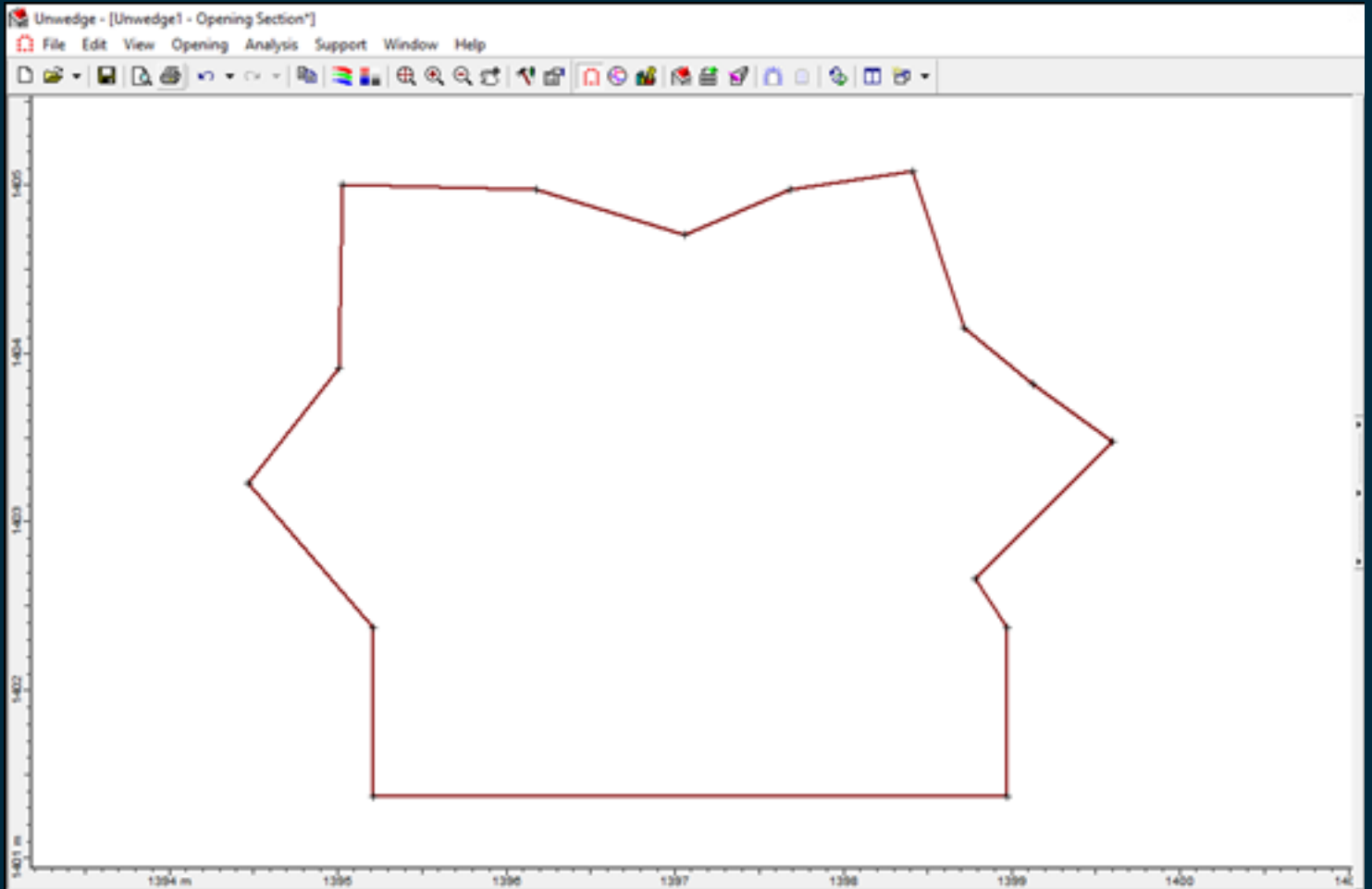


Figura 4.13 Contorno de la sección transversal de la gruta en UNWEDGE.

4. En la barra de herramientas de la parte superior, se ubica el botón *stereonet* y da *click*. En esta nueva ventana podremos ingresar los datos de los planos de discontinuidad obtenidos con DIPS y el rumbo del eje central de la gruta, donde fue localizada la cuña. Los datos de los planos de discontinuidad deben introducirse con el formato de máxima pendiente y dirección de la máxima pendiente en azimutal. La pantalla de salida al ingresar los datos debe ser similar a la que muestra la figura 4.14.

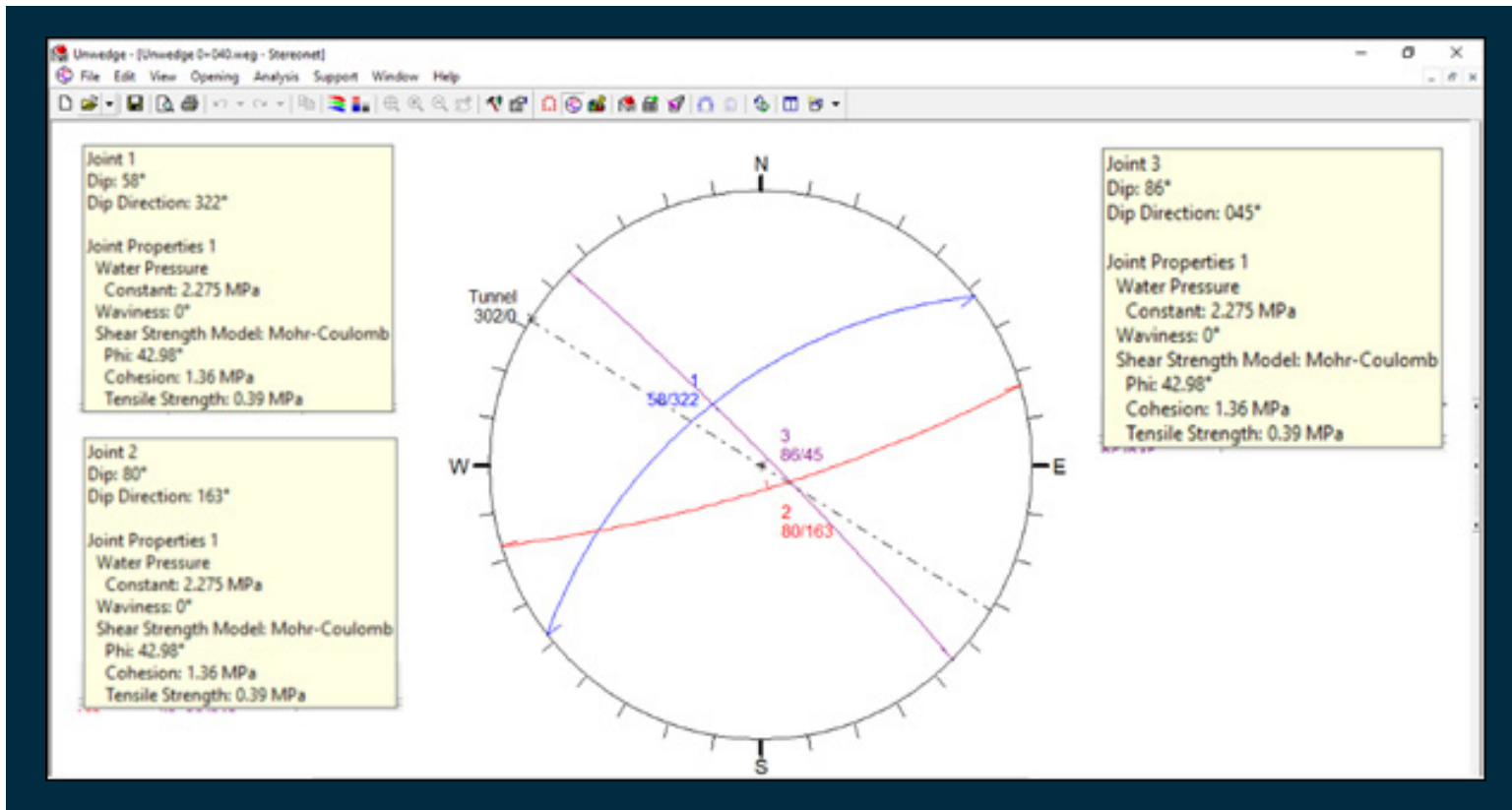


Figura. 4.14 Familias principales de discontinuidades y eje de la excavación.

5. En la barra de herramientas de la parte superior, se ubica el botón input data en cuyo submenú ingresaremos el dato de peso específico de la roca. De igual manera podrán verificarse los datos ingresados en el paso anterior. En este mismo submenú podrán integrarse, en caso de existir, fuerzas producidas por sismicidad, pero para el análisis no se ocuparán por falta de información. Ver figura 4.15.

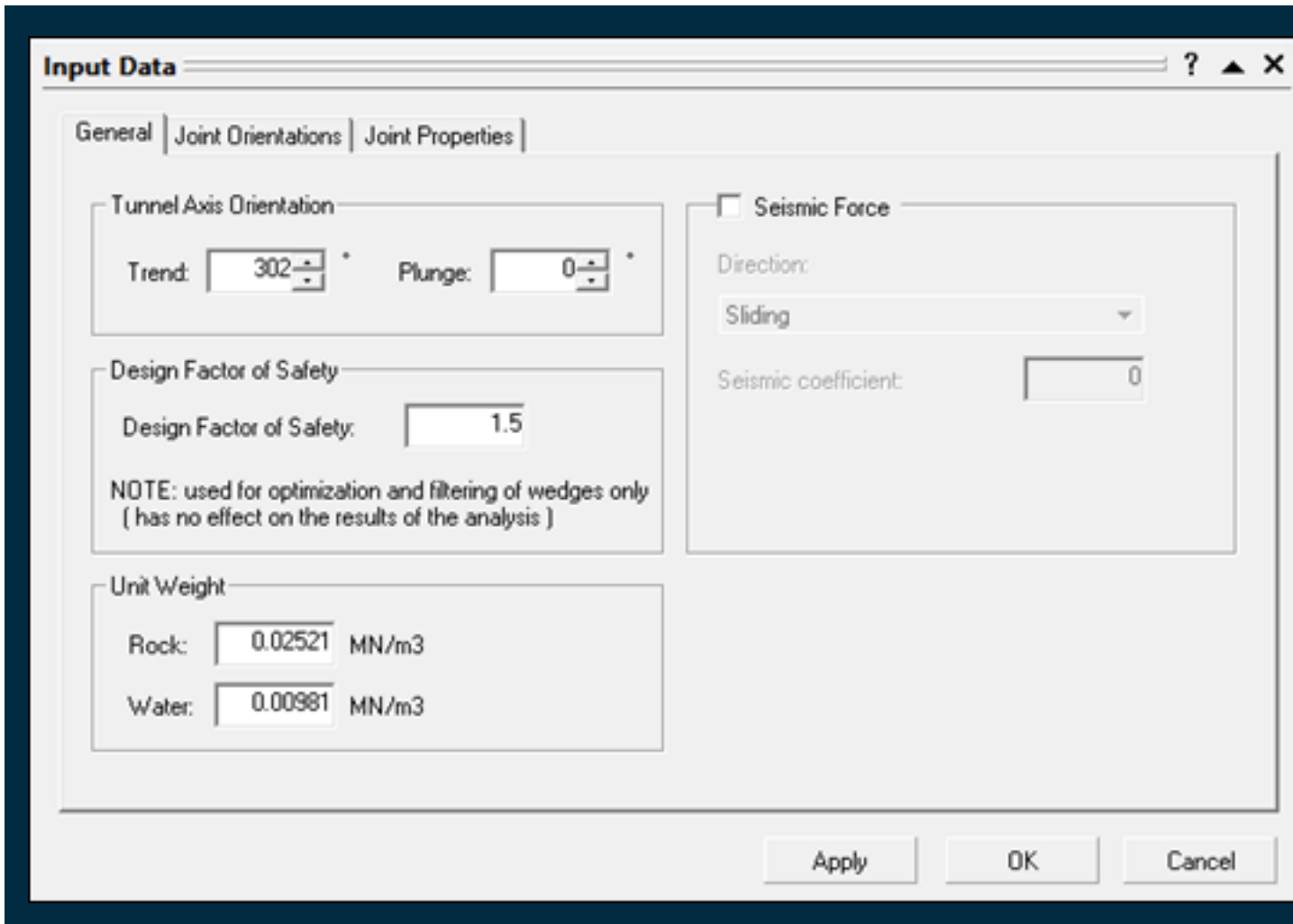


Figura. 4.15 Submenú de ingreso de datos generales tales como orientación e inclinación de la obra, factor de seguridad de diseño, peso específico de la roca y agua..

6. En la tercera pestaña del mismo submenú, en *joint properties*, deberán introducirse los valores obtenidos para el modelo de Mohr–Coulomb y calcular la presión de agua, utilizando la siguiente relación:

Presión hidrostática (Pa) = ρ (densidad)(kg/m³)*g(gravedad)(m/s²)*h(altura) (m)

Presión hidrostática = 1000(kg/m³)*9.81(m/s²)*232m = 2,275,920 (Pa) = 2.27 (MPa)

Se calcula la presión de agua, bajo el supuesto de que en el macizo rocoso existen fracturas por las cuales el agua pluvial se almacene y ejerza presión en las discontinuidades y hacia la gruta. Se otorgara el valor de cero a la rugosidad (el peor escenario), considerando una fractura plana. Damos *click* en *apply* para aceptar la introducción de datos. Ver figura 4.16.

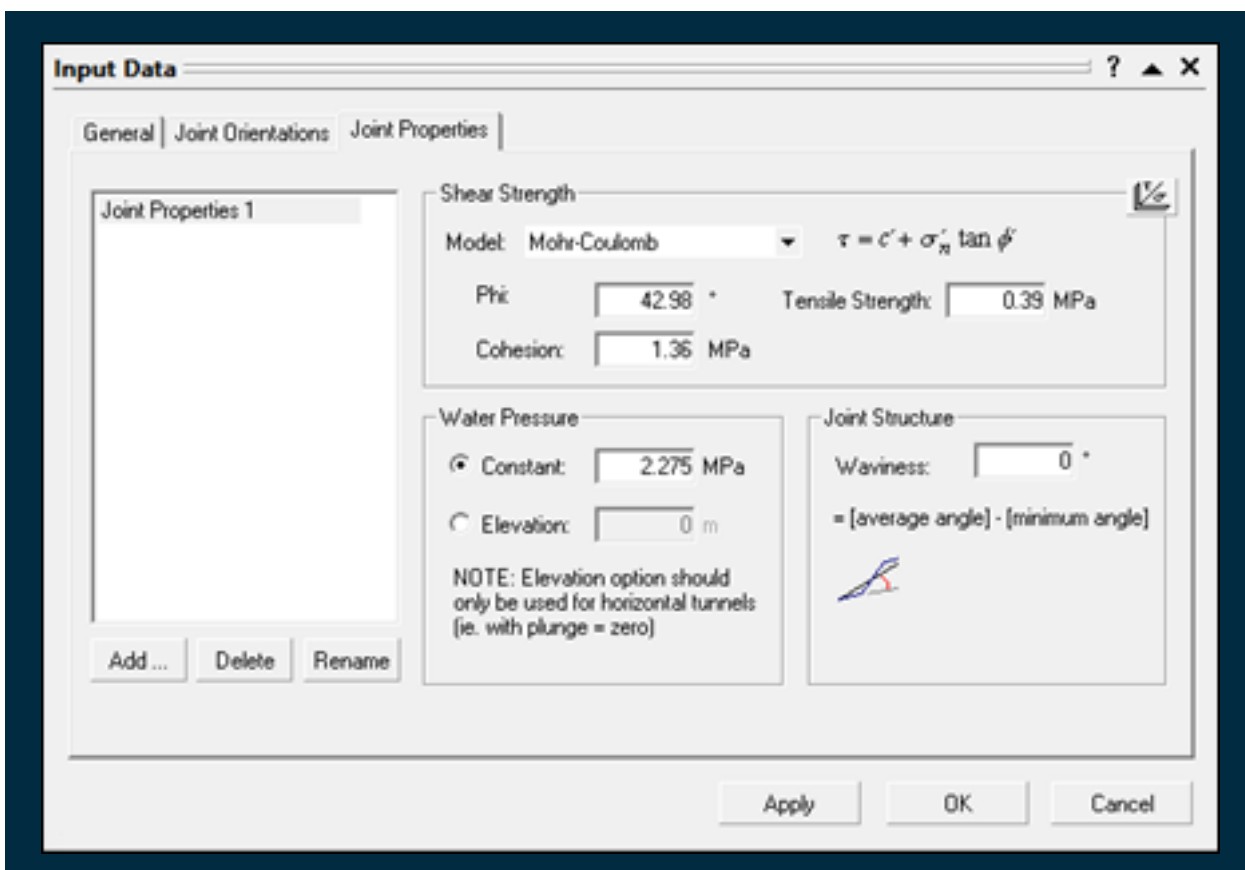


Figura 4.16 Submenú de ingreso de datos de propiedades de las discontinuidades.

7. El espacio de trabajo de UNWEDGE mostrará todas las cuñas posibles en la excavación en distintas vistas. Y en la barra de la derecha podremos observar cada una de las etiquetas con las que se han señalado las cuñas. Con el botón *multi perspective* de la barra de herramientas en la parte superior, podemos cambiar de pantalla para visualizar cada una de las cuñas individualmente y observar más a detalle sus características, por ejemplo: *Etiqueta*, *factor de seguridad*, *volumen de la cuña* y *modo de falla*. Ver figura 4.17a y 4.17b.

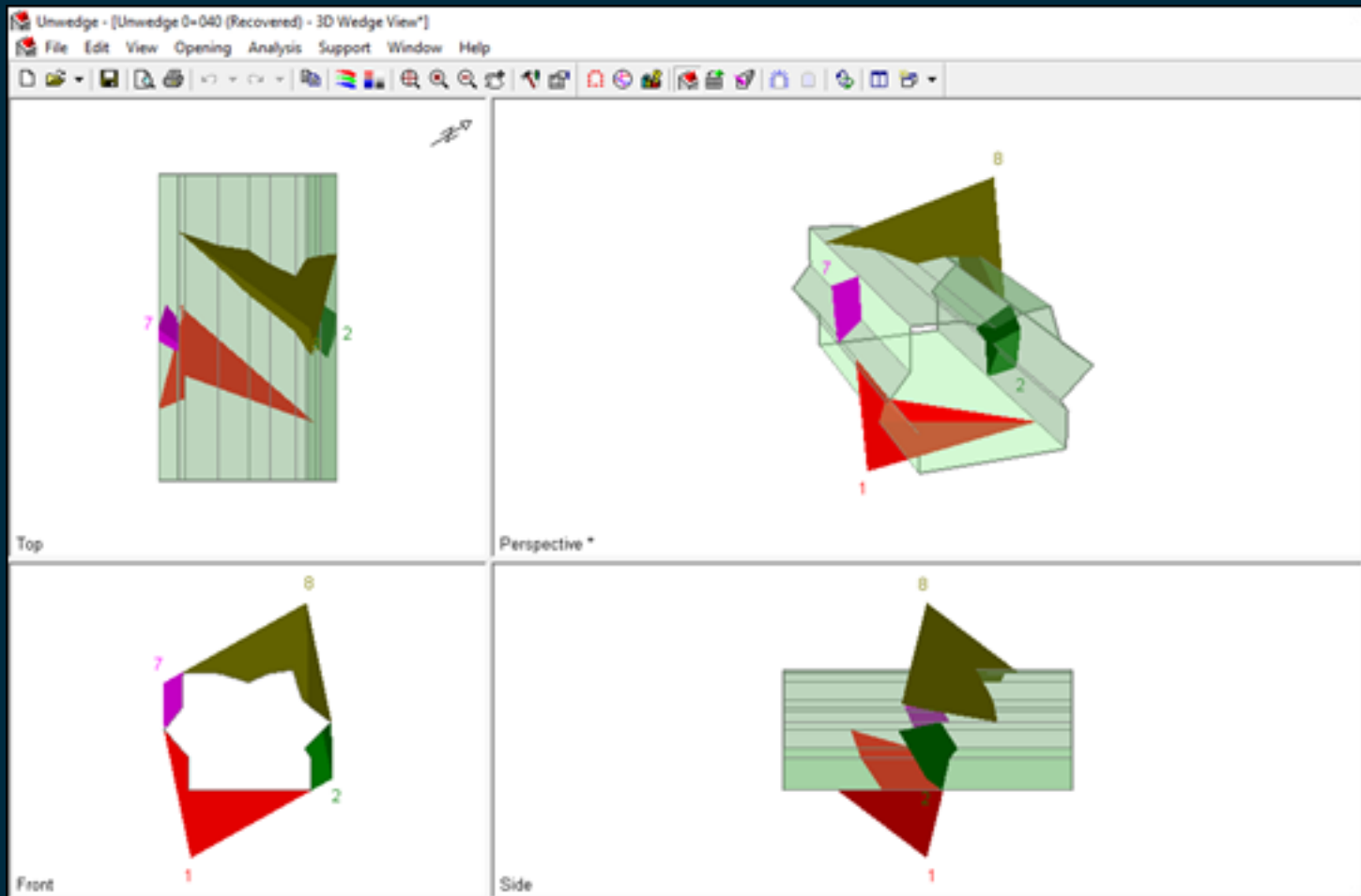


Figura 4.17a Vista isométrica de las cuñas.

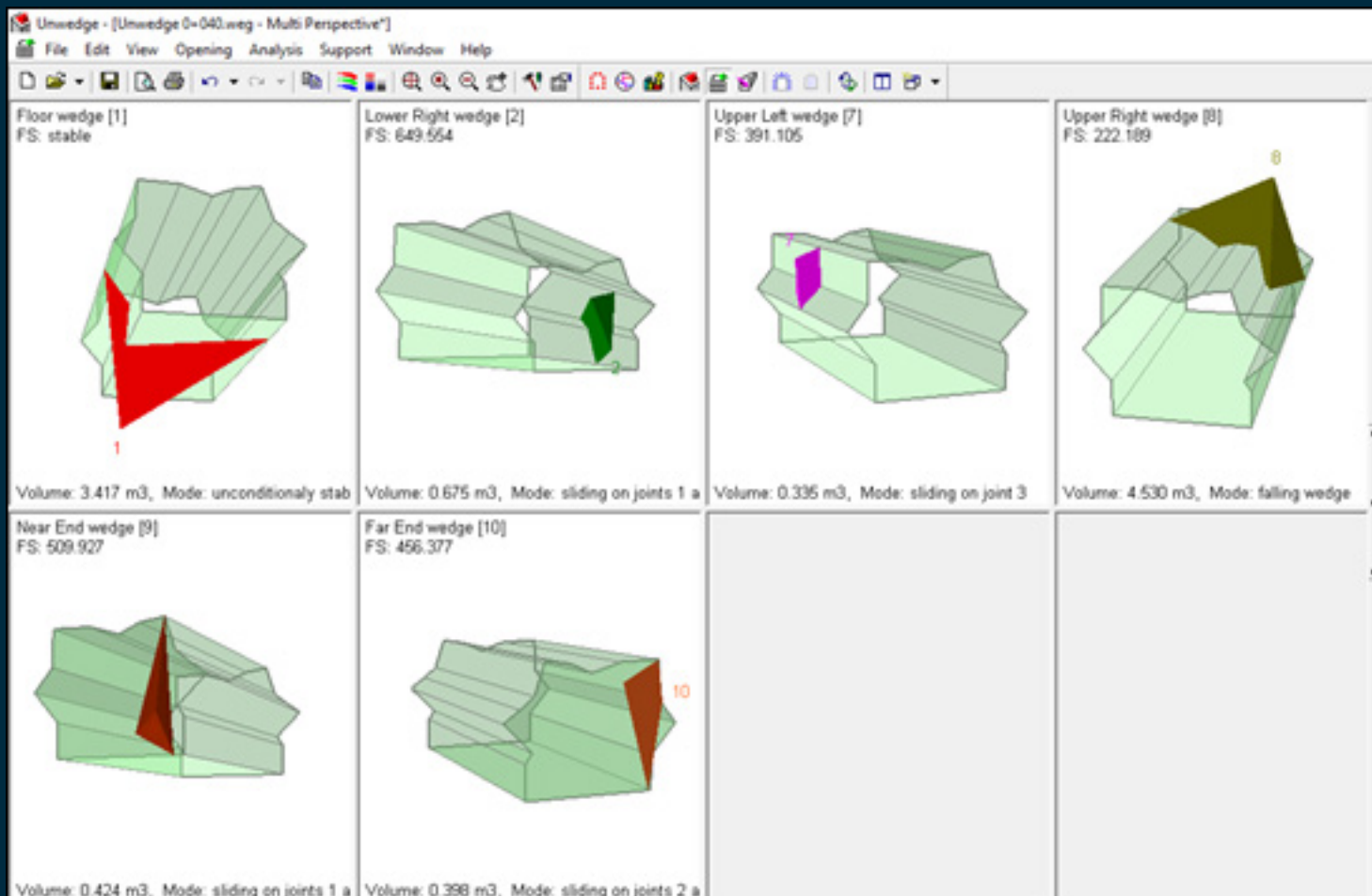


Figura 4.17b Vista isométrica individual de las cuñas.

8. Se realiza el mismo procedimiento para todos los tramos de gruta donde se localizaron al menos tres planos de discontinuidad. Para todos deberán utilizarse los mismos valores del criterio de Mohr – Coulomb, peso específico de la roca y presión de agua. Ya que se considera que la litología no varía en la zona de estudio, y las condiciones del macizo rocoso permanecen constantes a lo largo de los 443 m de la gruta.

De todas las cuñas generadas por UNWEDGE, las que más deben preocupar son aquellas que pudieran caer, es decir, aquellas formadas en el techo de la excavación y en las paredes de la misma. Por la razón anterior el análisis de estabilidad se centrará en dichas cuñas. La estabilidad de una cuña se expresa en función de un valor numérico conocido como “factor de seguridad”. El factor de seguridad es una relación sencilla entre las fuerzas que resisten y las fuerzas que actúan, y para cada una de las posibles fallas en una excavación existe un factor, como ya se observó al principio de este tema, que describe el contexto de estabilidad.

Cuando el valor del FS es menor a uno, supone que las fuerzas actuantes son mayores que las resistentes y el colapso es inminente o ya se ha presentado; cuando el valor es superior a la unidad, quiere decir que las fuerzas resistentes soportan las fuerzas actuantes; y por último cuando el FS es igual uno quiere decir que las fuerzas actuantes y las fuerzas resistentes están en equilibrio.

En este apartado, se hace uso de la notación de planos máxima pendiente (*dip*) y dirección de la máxima pendiente (*dip direction*) que utiliza por defecto UNWEDGE, esto con la finalidad de tener congruencia y no confundir a quien pueda leer o desarrollar por su cuenta un análisis similar.

A continuación, se muestra el análisis para cada uno de los cadenamientos, dónde se localiza una cuña.

Análisis de estabilidad para el cadenamiento 0+040 m.

Familia de fallas A, plano A: $58^{\circ}/322^{\circ}$
 Familia de fallas B, plano B: $80^{\circ}/163^{\circ}$
 Familia de fallas C, plano C: $86^{\circ}/45^{\circ}$
 Rumbo de la excavación: 302°
 Altura de la gruta: 3.6 m.
 Longitud de la excavación: 2 m.

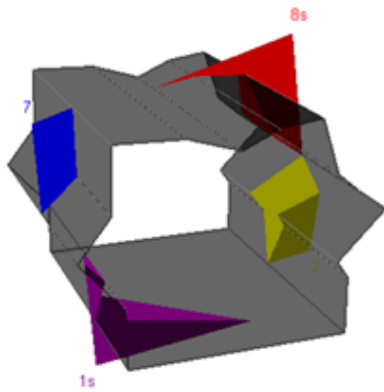


Figura 4.18a Vista isométrica del cadenamiento 0+040 m



Figura 4.18b Vista frontal del cadenamiento 0+040 m

Cuña	Factor de seguridad	Volumen, m ³	Modo de falla
Azul	1.1	0.34	Deslizamiento en el plano A
Roja	1.9	1.01	Deslizamiento en el plano B
Amarilla	1.1	0.67	Deslizamiento en el plano A
Morada	2	0.741	Deslizamiento en el plano B

Del análisis que se muestra en la tabla, las cuñas azul y amarilla son las que se encuentran en el límite de estabilidad con un factor de seguridad de 1.1.

Modificando el GSI, es decir, el valor que describe la calidad de la roca, puede notarse que la estabilidad de la cuña azul se ve comprometida, pues el factor de seguridad se reduce a 0.58, lo que significaría que se deslizaría. En el caso de la cuña amarilla no existe problema porque se encuentra prácticamente a pie de suelo. La cuña roja permanece estable.

Análisis de estabilidad para el cadenamiento 0+050 m.

Familia de fallas A, plano A: 25°/110°
 Familia de fallas B, plano B: 20°/90°
 Familia de fallas C, plano C: 80°/348°
 Rumbo de la excavación: 355°
 Altura de la gruta: 7.9 m.
 Longitud de la excavación: 5 m.

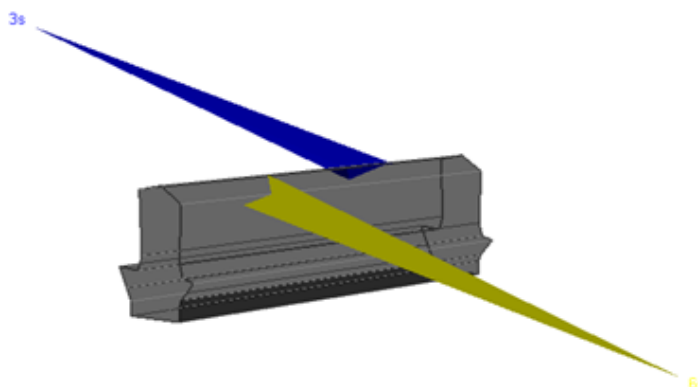


Figura 4.19 Vista isométrica del cadenamiento 0+050.

Cuña	Factor de seguridad	Volumen, m ³	Modo de falla
Azul	51	18.1	Deslizamiento en los planos B y C
Amarilla	56	19.1	Deslizamiento en los planos B y C

Debido al alto valor del FS, se considera que ambas cuñas son estables.

Análisis de estabilidad para el cadenamiento 0+060 m.

Familia de fallas A, plano A: $30^{\circ}/226^{\circ}$
 Familia de fallas B, plano B: $28^{\circ}/160^{\circ}$
 Familia de fallas C, plano C: $70^{\circ}/180^{\circ}$
 Rumbo de la excavación: 280°
 Altura de la gruta: 10.9 m.
 Longitud de la excavación: 5 m.

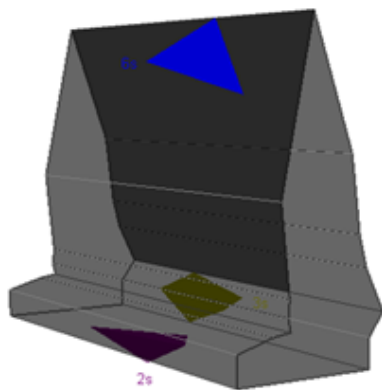


Figura 4.20a Vista isométrica del cadenamiento 0+060.



Figura 4.20b Vista frontal del cadenamiento 0+060.

Cuña	Factor de seguridad	Volumen, m ³	Modo de falla
Azul	1.9	1.05	Deslizamiento en el plano B
Amarilla	2	0.93	Deslizamiento en el plano B
Morada	1.5	0.89	Deslizamiento en el plano C

En la imagen se aprecia que la cuña azul, que se encuentra a una altura de 10.9 metros, es la más riesgosa. Modificando la calidad de la roca a una más baja y corriendo de nuevo UNWEDGE, se observa que el factor de seguridad no decae por mucho, aún mantiene un valor de 1.2, que significa que permanecerá estable.

Análisis de estabilidad para el cadenamamiento 0+320 m.

Familia de fallas A, plano A: $42^\circ/158^\circ$
 Familia de fallas B, plano B: $88^\circ/124^\circ$
 Familia de fallas C, plano C: $68^\circ/255^\circ$
 Rumbo de la excavación: 312°
 Altura de la gruta: 8.5 m.
 Longitud de la excavación: 5 m.

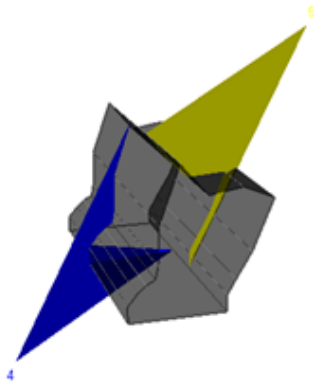


Figura 4.21a Vista isométrica del cadenamamiento 0+320.



Figura 4.21b Vista frontal del cadenamamiento 0+320.

Cuña	Factor de seguridad	Volumen, m ³	Modo de falla
Azul	4.1	30.9	Deslizamiento en los planos A y B
Amarilla	4	47.9	Deslizamiento en el plano B

Se observa que el FS es de 4 para cada una de las cuñas, por lo que se concluye que son y permanecerán estables.

Análisis de estabilidad para el cadenamiento 0+350 m.

Familia de fallas A, plano A: $85^{\circ}/142^{\circ}$
 Familia de fallas B, plano B: $67^{\circ}/254^{\circ}$
 Familia de fallas C, plano C: $42^{\circ}/193^{\circ}$
 Rumbo de la excavación: 213°
 Altura de la gruta: 12.7 m.
 Longitud de la excavación: 5 m.

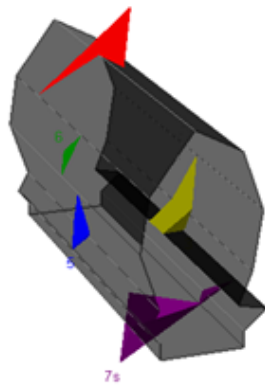


Figura 4.22a Vista isométrica del cadenamiento 0+350.

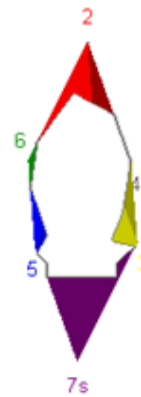


Figura 4.22b Vista frontal del cadenamiento 0+350.

Cuña	Factor de seguridad	Volumen, m ³	Modo de falla
Azul	0.75	2.1	Deslizamiento en el plano C
Verde	0.9	0.2	Rotura
Roja	4	7.4	Deslizamiento en los planos A y B
Amarilla	0.77	5.2	Suspendida
Morada	4.2	20.6	Deslizamiento en el plano A y B

Se observa que la cuña verde, la cual tiene un factor de seguridad de 0.9 y se encuentra a una altura aproximada de 9 metros, es la más preocupante. Modificando el valor de GSI a uno de 40 el factor de seguridad se reduce a 0.4 y son tales condiciones que es inminente su caída, por lo que debe tenerse especial cuidado con ella. La cuña roja mantiene su estabilidad aun cuando el GSI se modifica. Las cuñas laterales son propensas a caer al modificar el GSI.

Análisis de estabilidad para el cadenamamiento 0+385 m.

Familia de fallas A, plano A: 60°/44°
 Familia de fallas B, plano B: 80°/124°
 Familia de fallas C, plano C: 70°/185°
 Rumbo de la excavación: 188°
 Altura de la gruta: 23 m.
 Longitud de la excavación: 5 m.



Figura 4.23a Vista isométrica del cadenamamiento 0+385.

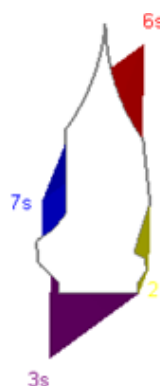


Figura 4.23b Vista frontal del cadenamamiento 0+385.

Cuña	Factor de seguridad	Volumen, m ³	Modo de falla
Azul	0.87	16.2	Deslizamiento en el plano C
Roja	2.1	16.3	Deslizamiento en los planos A y B
Amarilla	0.9	2.8	Deslizamiento en el plano C
Morada	2.4	31.5	Deslizamiento en el plano B

Las cuñas azul y roja que se encuentran a una altura aproximada de 10 y 18 metros, respectivamente, son las cuñas más preocupantes. Al modificar el valor de GSI al límite inferior de 40, el factor de seguridad de la cuña azul disminuye a 0.46 y ésta tendería a caer. Mientras que la cuña roja mantiene su estabilidad con un factor de seguridad de 1.2.

Análisis de estabilidad para el cadenamiento 0+400 m.

Familia de fallas A, plano A: $55^{\circ}/173^{\circ}$
 Familia de fallas B, plano B: $80^{\circ}/140^{\circ}$
 Familia de fallas C, plano C: $70^{\circ}/235^{\circ}$
 Rumbo de la excavación: 160°
 Altura de la gruta: 24.7 m.
 Longitud de la excavación: 5 m.

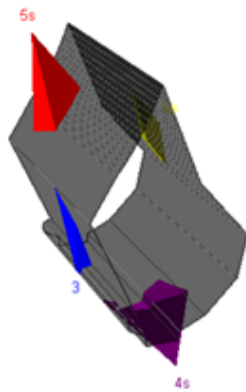


Figura 4.24a Vista isométrica del cadenamiento 0+400



Figura 4.24b Vista frontal del cadenamiento 0+400.

Cuña	Factor de seguridad	Volumen, m ³	Modo de falla
Azul	0.8	9.9	Suspendida
Roja	5.3	36.4	Deslizamiento en los planos A y B
Amarilla	1.3	8.1	Rotura
Morada	5.9	57.1	Deslizamiento en plano B

Se observa que las cuñas roja y amarilla representan un riesgo. Sin embargo, el factor de seguridad de la cuña roja tiene un valor de 5.3 y aun al variar la calidad de la roca mantiene un valor de 3.2, permaneciendo estable. Mientras que la cuña amarilla reduce su factor de seguridad a 0.7 muy cercano al valor de la tabla, lo que significaría que al tomar en cuenta otros factores (rugosidad, estado de esfuerzos, etc) permanecería estable en su sitio.

Análisis de estabilidad para el cadenamamiento 0+418 m.

Familia de fallas A, plano A: $80^{\circ}/232^{\circ}$

Familia de fallas B, plano B: $70^{\circ}/70^{\circ}$

Familia de fallas C, plano C: $42^{\circ}/65^{\circ}$

Rumbo de la excavación: 252°

Altura de la gruta: 6 m.

Longitud de la excavación: 3 m.

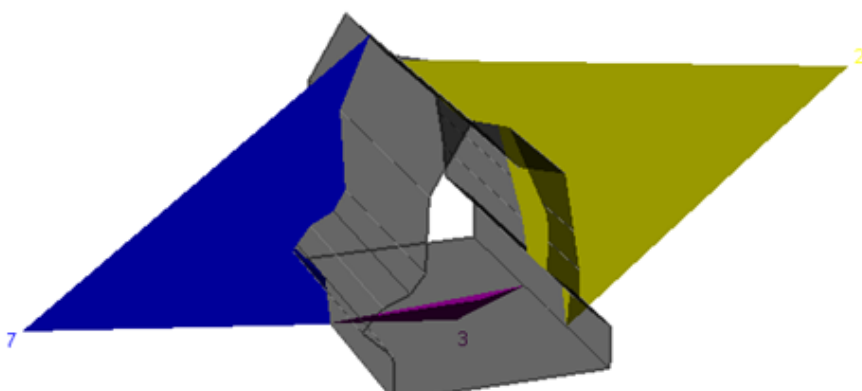


Figura 4.25 Vista isométrica del cadenamamiento 0+418.

Cuña	Factor de seguridad	Volumen, m ³	Modo de falla
Azul	6.3	10.2	Deslizamiento en los planos B y C
Amarilla	6.4	18.2	Deslizamiento en el plano B
Morada	2.1	0.09	Deslizamiento en plano B

Análisis de estabilidad para el cadenamiento 0+428 m.

Familia de fallas A: $42^{\circ}/238^{\circ}$
 Familia de fallas B: $70^{\circ}/257^{\circ}$
 Familia de fallas C: $50^{\circ}/316^{\circ}$
 Rumbo de la excavación: 207°
 Altura de la gruta: 25.4 m.
 Longitud de la excavación: 3 m.

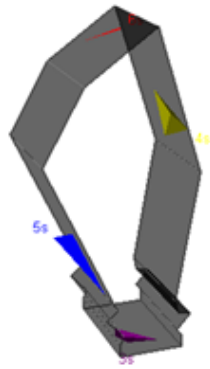


Figura 4.26a Vista isométrica del cadenamiento 0+428.

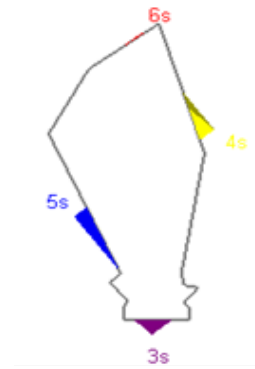


Figura 4.26b Vista frontal del cadenamiento 0+428.

Cuña	Factor de seguridad	Volumen, m ³	Modo de falla
Azul	2.1	3.7	Deslizamiento en el plano A
Roja	2.2	0.008	Rotura
Amarilla	2.2	2.4	Deslizamiento en el plano A
Morada	2.3	0.9	Deslizamiento en plano B

Debido al factor de seguridad de cada una de las cuñas, se determina que son estables.

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

- Las familias de discontinuidades que se obtuvieron del análisis estadístico fueron consideradas como fracturas que se extendían desde la pared de la gruta donde fueron tomadas hasta la superficie. Lo anterior se menciona porque el análisis de cuñas no es concluyente. Es decir, que cada una de las cuñas que se presentaron en las zonas de inestabilidad podrían no existir si alguna de las tres discontinuidades (necesarias para la formación de una cuña) no se propaga hasta la superficie. Sin embargo, el objetivo principal que persigue este trabajo es localizar y estimar la estabilidad en las zonas de riesgo según los datos obtenidos, por lo que para un mayor detalle de la gruta se dejan las bases en este escrito.
- Es notable que el valor del GSI, que asigna la calidad de la roca, es un dato que marca la diferencia entre la estabilidad y la inestabilidad de las cuñas. Una descripción errónea de la zona podría llevarnos a no considerar el peor escenario y mostrarse optimista ante una situación que no lo es. En general podemos decir que la principal forma de pérdida de estabilidad se debe al denso fracturamiento. Al tratarse de una roca dura podemos afirmar que el fracturamiento es a causa de la escasa capacidad de la misma roca de disipar energía. Es decir, una roca dura tiende a una rotura más rápida y violenta que una roca blanda.
- El peor escenario, donde la gruta se encuentra con una presión de agua constante, la mayoría de cuñas permanecen estables. Sin embargo, esa situación no se encuentra próxima a la realidad, ya que el agua busca la salida a través de las fracturas y es imposible medir la cantidad real que verdaderamente ejerce presión, lo que nos asegura que el factor de seguridad es todavía más alto. Aunado a lo anterior existe una condición de esfuerzos que no se tomó en cuenta, por falta de información, pero que de incluirse en el análisis aseguraría que el factor de seguridad de las zonas de inestabilidad se incrementa. Esto, porque la condición de esfuerzos “apretaría” la cuña, que sumado a la rugosidad, impediría la salida de la misma.
- El análisis de bloques en los primeros 50 metros de la gruta nos indica que las condiciones son estables. Sin embargo, a partir del cadenamiento 0+350 se presenta una condición de inestabilidad que se repite hasta el cadenamiento 0+400; y es que las cuñas que presentan un factor de seguridad por debajo de la unidad se encuentran en las paredes de la gruta y no en el techo. Es decir, que las cuñas de las paredes en ese tramo son las únicas en toda la gruta que pueden caer por presentar un factor de seguridad menor a uno. Lo que reduce la zona de vigilancia al tramo entre esos cadenamientos.

RECOMENDACIONES

RECOMENDACIONES

- La zona de caídos que se presenta a final de gruta requiere de estudio y análisis con la misma metodología, y posiblemente de emplear métodos numéricos para hallar la causa del derrumbe y posible remediación.
- Los parámetros de la roca obtenidos con RocLab deberían tener cierta similitud con los posibles datos obtenidos por métodos directos. En caso contrario una mala interpretación de algunos datos o descripciones llevarían a resultados inesperados, con la consiguiente pérdida de tiempo. En un posible caso, la consideración de realizar una prueba de compresión simple sobre muestras extraídas de la gruta podría guiar de mejor manera los resultados.
- Considerar que la mayoría de cuñas inestables se encuentran en el tramo final de la gruta debe tener una explicación geológica más allá de la que proporciona la mecánica de rocas, ya que el GSI no abarca el amplio espectro de la geología.
- En general, las zonas donde la estabilidad está comprometida y las cuñas se presentan como un peligro, se deberán tomar medidas preventivas, como la vigilancia constante del posible granilleo, visibilidad de las fracturas y un plan de emergencia en caso de caída repentina.

BIBLIOGRAFÍA

Artículos

- HOEK, E. AND BROWN, E. T. (1997). *Practical estimates or rock mass strength. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 34, No. 8, pp 1165 -1186. Recuperado de:
<https://www.rocscience.com/documents/hoek/references/Published-Papers.htm>
- HOEK, E., C. CARRANZA-TORRES, AND B. CORKUM (2002). *Hoek-Brown failure crieterion – 2002 Edition*. In R. Hammah, W. Bawden, J. Curran, and M. Telesnicki (Eds.), *Proceedings of NARMSTAC 2002, Mining Innovation and Technology*. Toronto. 10 July 2002, pp. 267 – 273. University of Toronto. Recuperado de:
<https://rocscience.com/documents/hoek/references/H2002.pdf>
- HOEK, E., C. CARRANZA-TORRES, AND B. CORKUM (2004). *El criterio de Rotura de Hoek-Brown*. Edición 2002. In Carlos López Jimeno (Ed.), *In geoTÚNELES*, Capítulo 1, Libro 7, 2003, pp. 35 – 47. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Minas. Recuperado de:
<https://www.rocscience.com/documents/pdfs/uploads/7713.pdf>
- International Society for Rock Mechanics, ISRM (1985). *Suggested method for determining point load strength*. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstract*, Vol.22, No.2, pp 51-60. Recuperado de:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0148906285923277>
- MARINOS, V., MARINOS, P., HOEK, E. (2005) *The geological Strength Index: applications and limitations*. *Bulletin of Engineering Geological and the Environment*, Vol. 64, pp 55-65. Recuperado de:
<https://www.rocscience.com/documents/hoek/references/Published-Papers.htm>
- MARINOS, P., HOEK, E. (2000). *GSI: A geologically friendly tool for rock mass strength estimation*. Recuperado de:
<https://www.rocscience.com/documents/hoek/references/H2000a.pdf>
- MARTÍNEZAMADOR HERIBERTO, M. Guadalupe Castro Rodríguez *et. al.*, (s.f.) . *Carta Geológico-Minera. Salina Cruz-Juchitán E15-10 Escala 1:250,000 Estado de Oaxaca*, Consejo de Recursos Minerales, Oaxaca, Mexico. pp 58.

Libros

- ASTM, (2002). *Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock*, ASTM D 5731-02.
- CHACÓN, M. JOSÉ (trad.), (2004). *RocLab: Análisis de la resistencia del macizo rocoso mediante el criterio de rotura de Hoek-Brown. (Manual del usuario, Universidad de Granada)*. Recuperado de:
<https://www.rocscience.com/downloads/roclab/RocLabManualSp.pdf>
- FERRUSQUÍA-VILLAFRANCA ISMAEL, (1999). *Contribución al conocimiento geológico de Oaxaca, México-El área Laollaga-Lachivizá*, Departamento de Paleontología, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Mexico, D.F.
- GÓNZALEZ DE VALLEJO, L. I., FERRER, M., ORTUÑO, L., OTEO, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Pearson Educación. Madrid.
- MONTES DE OCA. (1989). Topografía, cuarta edición. Alfaomega.
- PALMSTROM, A. & STILLE, H. (2010). Rock engineering. London: Thomas Telford.
- SUÁREZ F. JOSÉ FRANCISCO (s.f.). *Análisis y diseño de excavaciones subterráneas en roca: Clasificaciones empíricas del macizo rocoso*. México: Sociedad Mexicana de Mecánica de Rocas.

Enlaces

Tutoriales para el software DIPS de Rocscience:

https://www.rocscience.com/help/dips/webhelp7/tutorials/Dips_Tutorials.htm

Tutoriales para el software UNWEDGE de Rocscience, versión 3.005:

https://www.rocscience.com/help/unwedge/webhelp4/tutorials/Unwedge_Tutorials.htm

INEGI - Espacio y datos de México:

<http://www.bWeta.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/default.aspx?ag=205150114>.