



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – GEOTECNIA

**METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE CAVIDADES DE ORIGEN
KÁRSTICO EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
LAURA NATALIA CUCAITA VARGAS

TUTOR PRINCIPAL
DR. EDUARDO BOTERO JARAMILLO
INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., AGOSTO 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. RIGOBERTO RIVERA CONSTANTINO

Secretario: DRA. ALEXANDRA OSSA LÓPEZ

1 er. Vocal: DR. EDUARDO BOTERO JARAMILLO

2 do. Vocal: DR. LUIS OSORIO FLORES

3 er. Vocal: M.I. MARIA CLARA MADRIGAL MADRIGAL

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX.

TUTOR DE TESIS:

DR. EDUARDO BOTERO JARAMILLO

FIRMA

DEDICATORIA

A mi yo del pasado.

Se que parece un sueño inalcanzable, pero con determinación y trabajo duro lo vas a conseguir. ¡Nunca dudes de tu grandeza!

A mi esposo, Josimar.

Este logro es tan tuyo como mío. Gracias por creer en mi aun cuando yo no lo hacía. ¡Te amo!

AGRADECIMIENTOS

A DIOS

A mis padres Luz Mery y Ernesto, y a mi hermano David por sus palabras de aliento que en cada llamada o en cada conversación me alentaban a llegar a la meta.

A mi profesor Dr. Eduardo Botero Jaramillo a quien admiro no solo por su alto nivel de conocimientos, sino por su gran calidad de ser humano.

A la Universidad Nacional Autónoma de México.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico durante el desarrollo de mis estudios de posgrado.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Al Ing. Sergio Herrera, por su generosidad y guía en la elaboración del modelo numérico.

A los sinodales Dr. Rigoberto Rivera Constantino, Dra. Alexandra Ossa López, Dr. Luis Osorio Flores y M.I. María Clara Madrigal Madrigal por el tiempo invertido y los comentarios hacia el presente trabajo.

A mis amigos de la generación, en especial a Mauricio Bernal por los conocimientos compartidos y las buenas experiencias a lo largo de la maestría.

RESUMEN

En este trabajo de tesis se propone una metodología para analizar la estabilidad de cavidades ubicadas en la Península de Yucatán, que tenga en cuenta las características únicas del entorno kárstico; el enfoque metodológico tiene como objetivo comprender y estudiar el mecanismo de falla de las cavidades simulando la degradación de las propiedades del material mediante un análisis paramétrico con reducción de parámetros. Con el fin de hacer una validación se ha aplicado a un ejemplo práctico con datos de una cavidad superficial ubicada a 14 km del municipio de Chocholá, sobre la carretera Federal Mérida – Campeche, se ha filtrado toda la información disponible y se ha planteado un modelo bidimensional plástico de deformación plana en el programa RS2 usando el criterio de resistencia de Hoek-Brown para representar el problema.

Como resultado se han hallado los parámetros mecánicos mínimos con lo que se lograría la estabilidad en el estado actual, también se ha simulado un posible escenario de la evolución de la estabilidad con el tiempo (efecto de degradación del material) y finalmente, se han evaluado las sobrecargas que al ser impuestas en el techo de la cavidad podrían ocasionar un colapso. Se concluye que la metodología de análisis propuesta es sencilla, rápida y de buena precisión; lo cual representa una gran ventaja en la solución de problemas de este tipo en la ingeniería práctica pues normalmente se emplean programas complejos que toman mucho tiempo y no son fáciles de manejar. Cualitativamente se ha demostrado que el planteamiento utilizado es fiable, se obtienen resultados realistas útiles para establecer un marco de referencia, que permite tener un mejor entendimiento del comportamiento mecánico del sistema depósito-cavidad.

TABLA DE CONTENIDO

Introducción	11
Objetivos	13
Alcances y limitaciones.....	13
1. Antecedentes sobre karst.....	14
1.1. Desarrollo y evolución del karst.....	15
1.2. Peligro asociado al karst	20
1.3. Clasificación del karst.....	24
2. Karst en México.....	31
2.1. Clasificación morfoclimática y geotécnica del karst en México	31
2.2. Descripción general del karst de montañas plegadas y falladas	35
2.3. Descripción general del karst de plataforma: Península de Yucatán	41
3. Métodos de exploración.....	52
3.1. Estudios previos	52
3.2. Sondeos	56
3.3. Prospección geofísica.....	60
4. Metodología de análisis propuesta.....	75
4.1. Paso 1: Investigación en campo y en laboratorio.....	75
4.2. Paso 2: Análisis teórico y conceptual	77
4.3. Paso 3: Análisis numérico.....	83
5. Ejemplo de aplicación.....	84
5.1. Paso 1. Características de campo y laboratorio.....	84
5.2. paso 2. Análisis teórico y conceptual.....	91
5.3. paso 3. Análisis numérico	96
5.4. Análisis de resultados obtenidos	100
Conclusiones y recomendaciones.....	111
Referencias	117

LISTA DE TABLAS

1. Antecedentes sobre Karst

Tabla 1. Morfologías kársticas	19
Tabla 2. Clasificación geotécnica del karst	24

2. Karst en México

Tabla 3. Clasificación morfoclimática y geotécnica del karst en México	34
Tabla 4. Perímetro, área y localización de los tipos de karst.....	34

3. Métodos de exploración

Tabla 5. Métodos geofísicos aplicados a la investigación del macizo rocoso.....	74
---	----

5. Ejemplo de aplicación

Tabla 6. Planos del dominio estructural afloramiento	87
Tabla 7. Características de la cavidad idealizada	91
Tabla 8. Resumen de los ensayos de identificación y estado en los materiales	92
Tabla 9. Estratos y parámetros en el modelo.....	94
Tabla 10. Carga de diseño correspondiente a tren Cooper E-80	99
Tabla 11. Variación del GSI.	101
Tabla 12. Variación de E_i	101
Tabla 13. Variación de σ'_c	102
Tabla 14. Variación de todos los parámetros en la misma proporción.....	102
Tabla 15. Propiedades mínimas del terreno.....	104
Tabla 16. Evolución del factor de resistencia (FR) y la altura de la zona de cortante.	105

LISTA DE FIGURAS

1. Antecedentes sobre Karst

Figura 1. Distribución mundial de los principales afloramientos kársticos	14
Figura 2. Fases del proceso de karstificación en rocas calizas.	17
Figura 3. Principales tipos de peligros asociados al karst.	20
Figura 4. Entrada de gran cantidad de agua a la galería de una mina de plomo y zinc.	21
Figura 5. Daños producidos por inundaciones en zona kárstica en Tarento, Italia	22
Figura 6. Vaciado rápido de un lago artificial en Bucovina, Ucrania.	22
Figura 7. Asentamiento kárstico en entornos agrícola rural y suburbano en EEUU.....	23
Figura 8. Características morfológicas de las condiciones del terreno.....	25
Figura 9. Clasificación de las dolinas según los mecanismos de falla que las forman	26
Figura 10. Dolinas de colapso relacionadas con la disolución de yeso en Loteta, España. .	27
Figura 11. Dolinas de colapso grande y pequeña en Koolanda al sur de Australia.....	27
Figura 12. Dolina de hundimiento en Guatemala.....	28
Figura 13. Dolina enterrada en Villar del Cobo, España.....	29
Figura 14. Dolina de cobertura en Al Issawiah, Arabia Saudita	29
Figura 15. Dolina de subsidencia en España	30

2. Karst en México

Figura 16. Mapa de zonas kársticas de México.....	31
Figura 17. Formas típicas del karst tropical	33
Figura 18. Patrón de tipos de desarrollo kárstico en la Sierras.....	35
Figura 19. Ambientes geomorfológicos en la península de Yucatán	42
Figura 20. Patrón de desarrollo kárstico en la península de Yucatán.....	43
Figura 21. Esquema de la variación del NAF durante los últimos 20.000 años.....	44
Figura 22. Representación conceptual de un medio kárstico costero.....	45
Figura 23. Esquema del aspecto de los conductos kársticos según su origen	46
Figura 24. Clasificación de espeleotemas y otros rasgos característicos del endokarst	46
Figura 25. Colapso en un campo de cultivo en Chencoh	48
Figura 26. Colapsos frente al hotel Iberostar, Cancún	48
Figura 27. Colapsos en la Laguna de Chakanbacán	49
Figura 28. Colapso en Xpu-Há que revela cavidad con aguas cristalinas	50
Figura 29. Asentamiento cerca al hotel Iberostar, Cancún.....	50

3. Métodos de exploración

Figura 30. Línea férrea Palenda-La Coruña afectada por deslizamientos karsticos...54	Figura
31. Caja de sondeo a) calizas sin relleno b) calizas con relleno arenoso	57
Figura 32. Cristalización de calcita en calizas cretácicas	57
Figura 33. Sondeo a rotación a) Vertical b) Inclinado	58
Figura 34. Sondeos con barrena helicoidal.....	59
Figura 35. Sistema a rotopercusión	60
Figura 36. Valores de resistividad de las rocas más comunes.....	61
Figura 37. Medida de resistividades del terreno mediante métodos eléctricos	62
Figura 38. Ejemplo de sondeo eléctrico vertical (SEV)	63

Figura 39. Inversión por el método iterativo en una TRE	64
Figura 40. Esquema del ensayo de refracción sísmica	65
Figura 41. Velocidad de fase para distintas longitudes de ondas	66
Figura 42. Esquema del ensayo Cross-Hole	67
Figura 43. Esquema de los ensayos: (a) down-hole y (b) up-hole	68
Figura 44. Métodos electromagnéticos utilizados en exploración geofísica	68
Figura 45. Concepto de los sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo	69
Figura 46. Campos electromagnéticos generados por ondas de radio.....	70
Figura 47. Perfiles interpretados de GPR adquiridos a 50 MHz en Caballo, Venezuela	71
Figura 48. Modelización de un perfil gravimétrico	72

4. Metodología de análisis propuesta

Figura 49. Diagrama de flujo de la metodología propuesta	75
Figura 50. Elección de modelo constitutivo según el GSI	78
Figura 51. Criterio de Mohr-Coulomb modificado	79
Figura 52. Criterio Barton - Bandis	80
Figura 53. Envolvente Hoek - Brown.....	81
Figura 54. Cálculo del Factor de resistencia en RS2	82

5. Ejemplo de aplicación

Figura 55. Localización del sitio de estudio	85
Figura 56. Croquis de ubicación cavidad en estudio	86
Figura 57. Vista de banco de extracción. Sitio de estudio.....	86
Figura 58. Detalle afloramiento rocoso en el sitio de estudio	87
Figura 59. Diagrama de polos discontinuidades en superficie	87
Figura 60. Anomalía C9	88
Figura 61. Localización de las líneas de georradar Z9	88
Figura 62. Radargramas líneas Z9-A y Z9-B	89
Figura 63. Registro del SAC-T3-CV-20.....	89
Figura 64. Proyección en planta de la cavidad	90
Figura 65. Perfil geotécnico.....	90
Figura 66. Sección tipo considerado en los cálculos	92
Figura 67. Base de datos: Resistencia a la compresión simple de la roca intacta	93
Figura 68. Base de datos: m_i para diferentes tipos de roca.....	93
Figura 69. Constantes m_b , s y a calculadas por RS2	95
Figura 70. Malla de elementos finitos	96
Figura 71. Etapa 1. Fase inicial	97
Figura 72. Etapa 2. Construcción de terraplén	98
Figura 73. Etapa 5. Tren detenido.	98
Figura 74. Tren de diseño COOPER E-80	99
Figura 75. Puntos de análisis	100
Figura 76. Variación de parámetros Vs factor de resistencia (FR)	103
Figura 77. Variación de parámetros Vs Altura de la zona de cortante	103
Figura 78. Factor de resistencia (FR), considerando el 100% de las propiedades.	104
Figura 79. Factor de resistencia (SR) considerando el 95% de las propiedades teóricas..	105

Figura 80. Factor de resistencia (FR), considerando el 90% de las propiedades teóricas. .	106
Figura 81. Factor de resistencia (FR), considerando el 85% de las propiedades teóricas. .	106
Figura 82 . Factor de resistencia (FR), considerando el 80% de las propiedades teóricas. .	107
Figura 83. Factor de resistencia (FR), considerando el 75% de las propiedades teóricas. .	107
Figura 84. Factor de resistencia (FR), al construirse el terraplén.	108
Figura 85. Factor de resistencia (FR), tren detenido.	109
Figura 86. Desplazamientos verticales, tren detenido.	109
Figura 87. Vectores de desplazamiento, tren detenido.	110
Figura 88. Trayectorias de esfuerzo, tren detenido.	110

INTRODUCCIÓN

El termino karst se refiere a procesos de disolución química que afectan a rocas calcáreas (calizas y dolomías) y evaporíticas (halita, yeso y anhidrita) los cuales han dado lugar a la formación de paisajes kársticos que, en términos geológicos e hidrogeológicos, son únicos debido al distinto conjunto de parámetros y ambientes en cada región. En el caso de México, aproximadamente el 20% del territorio está ubicado sobre rocas karstificables, principalmente calizas y en menor grado yesos. La mayoría de estas rocas están distribuidas a lo largo de la Sierra Madre Oriental, Sierra Madre del Sur, Sierras de Chiapas y la Península de Yucatán; cuentan con una gran variedad de relieves y formas kársticas debidas a las diferencias en estructura geológica, clima e historia geomorfológica de cada región que desafortunadamente, han sido poco estudiados.

La península de Yucatán es el afloramiento continuo de calizas más extenso del país, las tres formas predominantes del terreno en el karst Yucateco son las depresiones cerradas conocidas como dolinas, úvalas y poljes, las cuales representan un gran peligro de colapso, de hecho, en los últimos años se han reportado numerosos casos de colapsos y hundimientos catastróficos en la zona, que han afectado comunidades, vías y otras obras de infraestructura, e incluso han costado vidas; estos hechos ponen en evidencia la falta de conocimiento sobre las características especiales de los terrenos kársticos y su distribución debido a la falta de una metodología específica para evaluar el fenómeno.

Para cualquier proyecto de ingeniería que se desarrolle en esta zona es de vital importancia que se tengan en cuenta las características únicas del entorno kárstico, empezando por recolectar la información suficiente tanto en campo como en laboratorio para determinar la ubicación y geometría de las dolinas, así como las propiedades mecánicas de la roca. De igual manera, en gabinete se deben analizar el mecanismo de falla del techo de las dolinas y el comportamiento mecánico del macizo rocoso teniendo en cuenta la influencia de las discontinuidades y el efecto de la degradación de los materiales por el proceso de karsticidad. Generalmente se utilizan modelos continuos, dónde se idealiza el material como isótropo, perfectamente elasto-plástico, pero estos se pueden quedar cortos en la evaluación del fenómeno y el riesgo que pueda representar, en especial dónde las dolinas sean superficiales y de dimensiones significativas que puedan generar un colapso del techo y por lo tanto de la superficie del terreno.

En este trabajo de tesis se propone una metodología para analizar la estabilidad de cavidades ubicadas en la Península de Yucatán, que tenga en cuenta las características únicas del entorno kárstico. El enfoque metodológico tiene como objetivo comprender y estudiar el mecanismo de falla de las cavidades simulando la degradación de las propiedades del material mediante un análisis paramétrico con reducción de parámetros.

El documento está organizado en cuatro capítulos que se han ido completando y diseñando conforme se han llevado a cabo la investigación y los cálculos. En el primero se hace una

revisión de los antecedentes sobre karst; también se presenta una descripción detallada de las formas kársticas más frecuentes, así como la clasificación de los peligros asociados al karst, mostrando casos documentados en el mundo y finalmente, se describe la clasificación, según características geotécnicas y la morfología de las dolinas.

En el segundo capítulo se trata el karst en México, se expone la clasificación de las zonas kársticas superficiales del territorio relacionándolas con el efecto que tiene el clima sobre ellas, éstas se dividen en karst de montañas plegadas y falladas y en karst de plataforma presente en la península de Yucatán. Se hace referencia a los cenotes, cómo se originan y las formas constructivas que pueden tener, y para concluir, se describen algunos colapsos y asentamientos que se han registrado en los últimos años en la zona de estudio.

El tercer capítulo presenta los métodos de exploración aplicables a zonas kársticas, partiendo de los estudios previos que incluyen la revisión de información y antecedentes, los métodos de fotointerpretación y teledetección, así como el levantamiento geológico y geotécnico en campo. Describe los diferentes tipos de sondeos y al final, expone los métodos geofísicos usados para el reconocimiento del terreno kárstico que se dividen según el parámetro físico investigado.

En el cuarto capítulo se plantea la metodología de análisis basada en un procedimiento paso a paso que incluye la recolección de la información de campo y laboratorio, revisión de la calidad y cantidad de los datos recolectados para plantear el tipo de análisis y, por último, la aproximación paramétrica con un análisis teórico y conceptual seleccionando el tipo de modelo y el criterio de resistencia que representen mejor el problema tomando como referencia la clasificación del GSI (*geological strength index*) propuesta por Hoek & Brown (2018). De igual manera, un modelo numérico con el que se evalúa la estabilidad de la cavidad, se plantea un posible escenario de la evolución de la estabilidad con el tiempo (con reducción de parámetros) y, se observa el campo de desplazamientos inducidos por una condición de carga específica o un cambio en las condiciones de contorno.

Como recurso final, en el quinto capítulo se aplica la metodología a un ejemplo práctico con datos de una cavidad superficial ubicada a 14 km del municipio de Chocholá, sobre la carretera Federal Mérida – Campeche. Se hace el filtro de toda la información disponible y se plantea un modelo bidimensional plástico de deformación plana en el programa RS2 (Rocscience Inc, 2022) usando el criterio de resistencia de Hoek-Brown para representar el problema. Con este modelo se hallaron los parámetros mecánicos mínimos con lo que se lograría la estabilidad en estado actual, también se simuló un posible escenario de la evolución de la estabilidad con el tiempo (efecto de la degradación del material). De igual manera, se evaluaron las sobrecargas que al ser impuestas en el techo de la cavidad podrían ocasionar un colapso. Para ello, se ha hecho un análisis paramétrico con reducción de parámetros, iterando hasta alcanzar la condición de falla.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Proponer una metodología para analizar la estabilidad de cavidades ubicadas en la Península de Yucatán, que tenga en cuenta las características únicas del entorno kárstico.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer un panorama general acerca de la problemática de karst en México y en el mundo y su incidencia sobre las obras de infraestructura y las actividades humanas.
- Mostrar de forma detallada los métodos de exploración más importantes en la caracterización de terrenos kársticos.
- Plantear una metodología de análisis que permita comprender y estudiar el mecanismo de falla de las cavidades kársticas de la península de Yucatán simulando la degradación de las propiedades del material mediante un análisis paramétrico.
- Aplicar la metodología propuesta a un caso en la zona de estudio para comprobarla y validarla en la práctica.

ALCANCES Y LIMITACIONES

La mayor limitante que se presentó para el desarrollo de la metodología fue la falta de información abundante y fiable para aplicarla en un ejemplo práctico, no se logró contar con datos de ensayos sobre núcleos de roca debido a la fase del proyecto de la cual se tenía información. Entonces se trabajó con información recolectada en campo para un proyecto en la zona de estudio y los parámetros de resistencia del terreno para valores típicos de calizas (reportados en la bibliografía).

Lo anterior implica que este trabajo tiene como alcance la aplicación de un análisis paramétrico que sirve para comprender y estudiar los mecanismos de comportamiento y funcionamiento del problema que se plantee. Sin embargo, la metodología también es aplicable en el caso de contar con información abundante y fiable, en el que el análisis puede ser determinista y el modelo tendrá fines predictivos, de diseño y de dimensionamiento precisos.

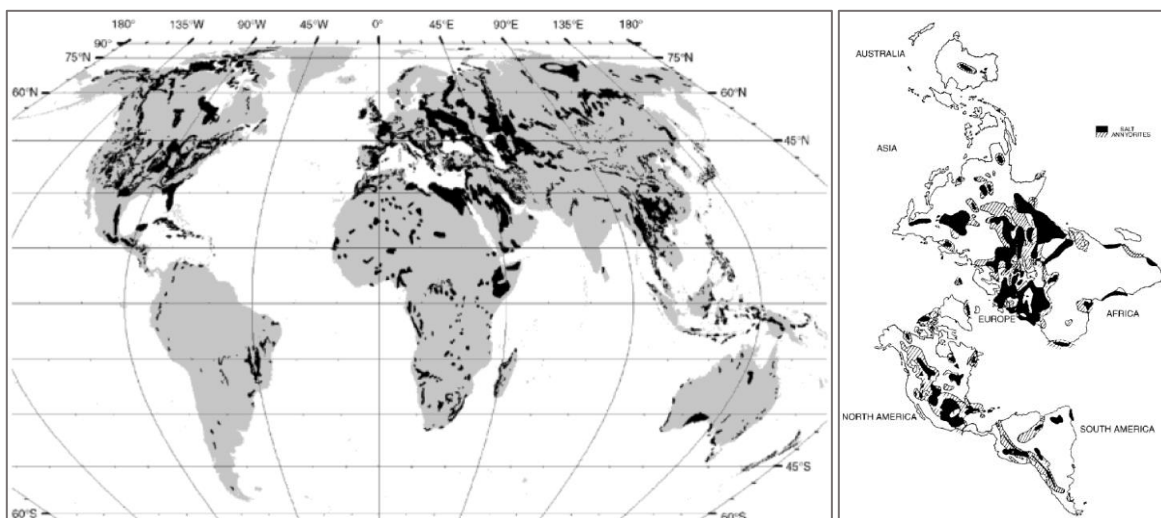
1. ANTECEDENTES SOBRE KARST

Citando a Pinillos (2015), la palabra karst significa “paisaje de relieve accidentado, con grietas y crestas agudas, originado por la erosión química en terrenos de rocas fácilmente solubles como yeso, calizas, dolomías o sal. Las formas negativas del relieve (dolinas, poljes, resumideros) y el drenaje subterráneo a través de cavernas son las características principales de este tipo de entornos”.

El término "karst" proviene del serbocroata y significa "campo de piedras calizas", y también es el nombre de una región en la península de Istria, al norte del mar Adriático, donde se realizaron los primeros estudios científicos sobre la circulación del agua en las calizas, y en general sobre el conjunto de fenómenos relacionados con la disolución de las rocas por el agua. Los fenómenos y formas kársticas se pueden dar superficialmente (exokarst) o subterráneos (endokarst) (Espinasa, 2015).

Tal y como lo indica su definición y de acuerdo con el origen de la palabra, el término karst hace mención a procesos de disolución que afectan a rocas calcáreas (calizas y dolomías, Figura 1.a), pero también puede referirse a formas de disolución similares en rocas evaporíticas (Figura 1.b) como la halita, el yeso y la anhidrita. La idea fundamental que se debe tener es que un entorno kárstico, en términos geológicos e hidrogeológicos, es ÚNICO debido al distinto conjunto de parámetros y entornos en cada región (Pinillos, 2015).

Figura 1. Distribución mundial de los principales afloramientos kársticos: a) rocas calcáreas. b) rocas evaporíticas (modificado de Ford & Williams, 2007)



De acuerdo con Ford y Williams (2007), extensas zonas del mundo están ocupadas por karst en rocas calcáreas y evaporíticas. Las rocas calcáreas están presentes en aproximadamente el 10% de la superficie terrestre (Figura 1.a) y subyacen mucho más, estas pueden acumularse con espesores de varios kilómetros. Por su parte, las rocas evaporíticas están o han estado presentes debajo del 25% de las superficies continentales (Figura 1.b).

Existe una karstificación importante en el continente americano, principalmente en México y Estados Unidos con regiones kársticas de gran extensión. Esto se debe a que poseen zonas con alta pluviometría y clima tropical en donde se encuentran rocas calcáreas, que, en principio, son zonas proclives para la existencia de este fenómeno (Pinillos, 2015). Algunas de las zonas del mundo que tienen más registro de problemas asociados a macizos calcáreos karstificados son: Japón, Eslovenia, China, México, Alemania, Corea, Malasia, Bélgica; siendo el karst de China, el más extenso del mundo.

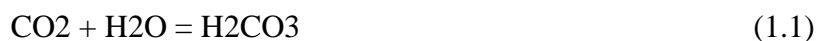
1.1. DESARROLLO Y EVOLUCIÓN DEL KARST

1.1.1. PROCESO DE DISOLUCIÓN

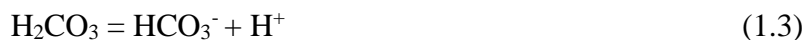
Espinasa (2015) indica que la principal característica del karst, en cuanto a su origen, es que se desarrolla en rocas solubles. Además, al disolverse, estas rocas no deben dejar prácticamente ningún residuo sólido, pues en caso contrario rellenarían rápidamente cualquier vacío creado por la solución. Las rocas evaporíticas (yeso, anhidrita y halita) son solubles directamente en el agua y no dejan residuos, esto sucede mediante un proceso físico reversible. No sucede así en las calizas y dolomías, en este caso, el desarrollo del karst depende de la corrosión, término que, usado en el sentido geomorfológico, se refiere a "la destrucción de las rocas por disolución química y remoción de la sustancia mineral".

La disolución de la caliza y/o dolomía que es el proceso principal del fenómeno kárstico se efectúa en un sistema de sustancias del tipo $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-MeCO}_3$ (Me: Ca o Mg) que, de manera simplificada, sucede en cuatro fases (Figura 2). Pinillos (2015) las describe de la siguiente manera:

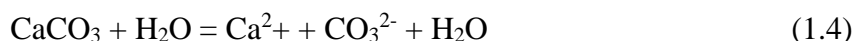
1. Disolución escasa en agua pura (bajos contenidos de anión bicarbonato), disociándose en anión carbonato y catión metálico. La tasa de disolución es alta pero muy limitada en el tiempo, generando formas superficiales con desarrollo rápido.



2. Formación de ácido carbónico disociado (anión bicarbonato + protón) en bajas proporciones, a partir de la oxidación del anión carbonato ($\text{pH} < 8.5$). La tasa de disolución es alta-media, dando lugar a formas más incisivas, también superficiales.



3. Intervención del dióxido de carbono atmosférico o edáfico, que está físicamente disuelto en el agua. Una pequeña proporción será hidratada y químicamente disuelta dando ácido carbónico disociado, y retroalimentando el proceso al formarse más ácido carbónico a partir de aniones carbonato procedentes de la roca. La disponibilidad de este (fuerte y agresivo) hace que esta fase, aun con tasas de disolución medias, sea la más importante en la karstificación superficial.



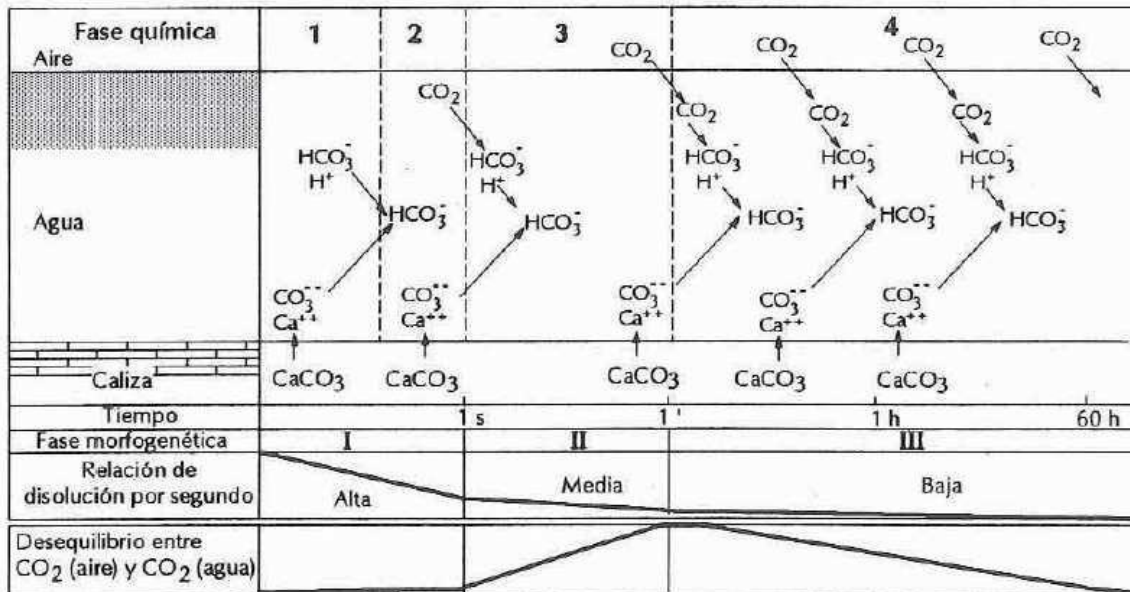
4. Fase con total interacción atmósfera-agua-roca. El desequilibrio entre el contenido de dióxido de carbono del aire y del agua llega a sustituirse disolviendo físicamente grandes cantidades de este (en función de su disponibilidad y la temperatura del agua). Así aparecen numerosas reacciones reversibles hasta llegar a un cierto equilibrio que puede ser alterado según el flujo del agua, la superficie de roca expuesta, variaciones del nivel freático, temperatura, etc. Las tasas de disolución disminuyen progresivamente, aunque la duración de esta etapa llega a generar karstificaciones importantes.



Así puede encontrarse la muy conocida y usada fórmula para la disolución de las calizas:



Figura 2. Fases del proceso de karstificación en rocas calizas (Pedraza, 1996).



1.1.2. GÉNESIS Y EVOLUCIÓN DEL KARST

Pinillos (2015) describe que la formación de un sistema kárstico comienza con la infiltración del agua en el macizo rocoso entre las fisuras y discontinuidades preexistentes en la roca. Al principio, el movimiento tiene lugar según líneas de flujo homogéneas, la disolución "avanza" desde la zona de infiltración, produciendo el ensanchamiento de las fisuras y dando lugar a los llamados conductos de disolución. En un momento determinado, la velocidad de circulación aumenta rápidamente y algunos de estos conductos conectan la zona de absorción con las surgencias; en las fisuras próximas, la velocidad también pasa a ser mayor, ya que el agua converge hacia estos conductos: las líneas de flujo se reorientan y se dirigen hacia ellos. De esta forma la disolución se incrementa progresivamente.

El desarrollo de estos conductos primarios a partir de las fisuras es la fase más larga del proceso de karstificación, algunos autores citan tiempos de formación de 1.000 a 100.000 años por kilómetro. Después, cuando la velocidad del agua aumenta, la disolución es más rápida. En pocos miles de años (o cientos en condiciones favorables) pueden alcanzarse dimensiones métricas (Pinillos, 2015).

Este proceso termina formando redes de drenaje subterráneo en las que miles de pequeños conductos van confluyendo hacia otros progresivamente mayores, cuyo número es limitado. En las primeras etapas de formación, cuando el volumen de las fisuras es pequeño, el agua es vaciada lentamente, el nivel freático permanece relativamente elevado y la zona de fluctuación, por su parte, alcanza un gran tamaño. Por el contrario, a medida que las fisuras

se ensanchan, el agua es evacuada más deprisa y el nivel freático desciende. Pinillos (2015) argumenta que, de este modo, se generarán dos zonas de comportamiento diferenciado en función de la posición del nivel de agua: zona freática (bajo el nivel freático) y zona vadosa (por encima del freático). En función de la zona en la que se encuentre, el agua circulará de forma diferente.

Como señala Pinillo (2015), la roca sufre distintos procesos que condicionan su posterior karstificación desde el momento de su deposición en la cuenca sedimentaria como: interrupciones sedimentarias, mezcla de fluidos, esfuerzos tectónicos (fallas, diaclasas, grietas de descompresión, etc.), o la propia estructura de la roca y procesos de diagénesis. La mayoría de los materiales susceptibles de ser disueltos por el agua presentan una red de fisuras interconectadas lo suficientemente densa, como para que el agua se mueva en ellas.

1.1.3. FORMAS DEL RELIEVE KÁRSTICO

De acuerdo con Pinillos (2015), las formas kársticas se pueden clasificar según su condición superficial o subterránea en exokársticas y endokársticas, dentro de ellas se puede realizar una segunda división entre formas de precipitación y formas de erosión, denominándolas constructivas y destructivas, respectivamente. Además, se puede hacer referencia también a formas mayores y menores, con base en su tamaño. En la Tabla 1 se presenta una clasificación y descripción detallada de las formas kársticas más frecuentes.

Tabla 1. Morfologías kársticas (Pinillos, 2015)

CUADRO RESUMEN DE PRINCIPALES MORFOLOGÍAS KÁRSTICAS					
FORMAS EXOKÁRSTICAS	DESTRUCTIVAS	MAYORES	Dolinas	Depresiones con geometría cónica, tronco cónica o irregular, pero de planta más o menos circular, paredes escarpadas y fondo plano o en embudo. Conectan aguas superficiales y subterráneas ya que, salvo que hayan quedado colgadas, son sumideros de escorrentía. Aquéllas que derivan de colapsos suelen tener una morfología irregular (en general subrectangular) y con frecuencia aparecen asociadas a simas y sumideros. El fondo a veces está tapizado por coluviones procedentes de las paredes y material residual de la disolución. Según la relación R (diámetro/ profundidad) y la pendiente de sus paredes, se clasifican en: artesa o pila (R=10 y 10-12 ^º); embudo (R=2-3 y 30-40 ^º) y ventana (R<1 y 60- 70 ^º). Casos especiales son los colapsos o disolución del techo en una red subterránea activa, generando las ventanas kársticas y cenotes (México y centroamérica).	
			Úvalas	Son dolinas coalescentes que suelen generar depresiones amplias cerradas y de fondo plano o irregular, donde se produce una intensa infiltración.	
			Poljes	Depresiones de origen diverso y de tamaño kilométrico, en general mixtas litológicas y estructurales, con un fondo plano relleno por material aluvial-coluvial o residual de la disolución. Pueden tener surgencias (izvor) o sumideros (ponor), también cavidades que actúan indistintamente como ambos (estavela); todos ellos controlan el desarrollo de redes fluviales autóctonas o alóctonas. El nivel freático está próximo a la superficie, por lo cual sufren inundaciones estacionales, excepto en pequeñas colinas que destacan de su fondo (hums).	
			Pavimentos	Superficies de rocas carbonatadas que coinciden con planos de estratificación en estructuras horizontales o subhorizontales, ligeramente pulidas por corrosión y con algunas micro-depresiones a favor del diaclasado.	
			Valles kársticos	Corresponden a formas de incisión pluvial en zonas kársticas. Se trata de conductos superficiales con paredes verticalizadas, que sirven de valle a un río, o quedan fuera de la corriente actual como valles secos o muertos. Cuando presentan en su cabecera un farallón rocoso producto del colapso en la misma cavidad de la que surge el río, se denominan valles en fondo de saco; si un río desaparece en un sumidero al final del valle, reciben el nombre de valles ciegos.	
			Mogotes, torres o pináculos	Relieves cónicos, piramidales o cilíndricos, de carácter residual en karst tropicales; destacan sobre una llanura que forma el nivel de base de la karstificación (rocas poco permeables o no karstificables). En estados incipientes adquieren formas hemisféricas por convergencia de dolinas irregulares.	
	MENORES	Lapiaz, karren o lenar	Formas desarrolladas en superficies libres o cubiertas de vegetación y suelo, que se imponen a todas las anteriores. Se deben a la acción directa de la escorrentía, dando elementos corrosivos de detalle como sonacanaladuras, canalones y pasadizos. En general se trata de microformas tipo: surcos, canales, crestas agudas y coalescentes, surcos meandriformes, surcos paralelos y de cresta redondeada, hendiduras o depresiones ovaladas según la pendiente, micro-dolinas, callejones, etc. Algunos autores incluyen en este conjunto incluso pavimentos, les denominan macrolapiaz.		
		Simas o sumideros (sinkholes)	Conductos verticales o muy inclinados que suponen la conexión entre aguas superficiales y subterráneas, por lo cual son mixtas exo y endokársticas. Cuando su desarrollo es idóneo, adquieren secciones circulares o elípticas y morfología cilíndrica o cónica (campanas y simas voladas); aquellas que presentan tapones por nieve o hielo reciben el nombre de teserefts.		
		CONSTRUCTIVAS		Edificios trabertínicos y tobáceos	Tienen su origen en la precipitación superficial del carbonato, bien por procesos fisicoquímicos (travertinos), o con intervención de organismos (vegetación, bacterias), en cuyo caso se denominan tobas. Ambas son construcciones características de surgencias (formaciones en cascada, columna o peldaños) y canales pluviales (formaciones en mantos o represas); llegan a generar acumulaciones de gran espesor, que pueden obstruir la circulación del agua formando lagunas.
		MIXTAS		Cubetas de decalcificación	Depresiones que contienen, en mayor o menor espesor, relleno de residuos o impurezas procedentes de la roca original karstificada. El material de relleno suele estar formado por arcillas, óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio y, en ocasiones, arenas. En zonas tropicales forman lateritas, en otras más secas "terra rossa", y en las templadas "terra fusca".
FORMAS ENDOKÁRSTICAS		DESTRUCTIVAS	Cuevas, cavernas o galerías	Conductos subterráneos originados por aguas de infiltración mediante el ensanchamiento de discontinuidades: diaclasas, planos de estratificación, cambios de porosidad, etc. Su profundidad, longitud, trazado en planta y sección, es muy variable; en general con dimensiones deca, hecto o kilométricas. En su evolución se mezclan procesos de colapso o hundimiento, con disolución; éstos dan formas características según circule el agua a presión (tubos freáticos) o no (pasajes vadados, galerías de encajamiento o invasión). Suelen presentar elementos menores subsidiarios, como son: micro-conductos múltiples, micro-cavidades anexas y cúpulas de disolución, cavidades o salientes de y dimensión milimétrica, centimétrica o decimétrica, en muros o techos, rizaduras o huellas de corriente, etc. A medida que desciende el nivel freático por encajamiento del nivel de base regional, los conductos van quedando abandonados o colgados, formándose otros nuevos en niveles más profundos.	
	CONSTRUCTIVAS		DE ACUMULACIÓN	Espeleotemas	Constituyen todo un conjunto de depósitos debidos a la precipitación de material carbonatado (fundamentalmente calcita y aragonito), sulfatado (yeso, epsomita), o cloruros (halita, silvina, etc.). En función de su morfología y origen se clasifican en: cenitales o de techo (fundamentalmente estalactitas cónicas, aplanadas, excéntricas, etc.), parietales o de pared, (cortezas o costras), pavimentarias o de suelo (estalagmitas) y mixtas (como las columnas).
		DE DEPOSICIÓN	Relleno de conductos	Materiales que ocupan el lecho de conductos, originados mediante aportes mecánicos (corrientes pluviales en régimen freático-vadado, coladas de barro, desprendimientos y colapsos), o acumulaciones debidas a restos orgánicos (excrementos animales o restos vegetales). Algunos son autóctonos (residuos de decalcificación, bloques de colapsos, etc.) y otros alóctonos (introducidos por corrientes de agua exteriores o por animales).	

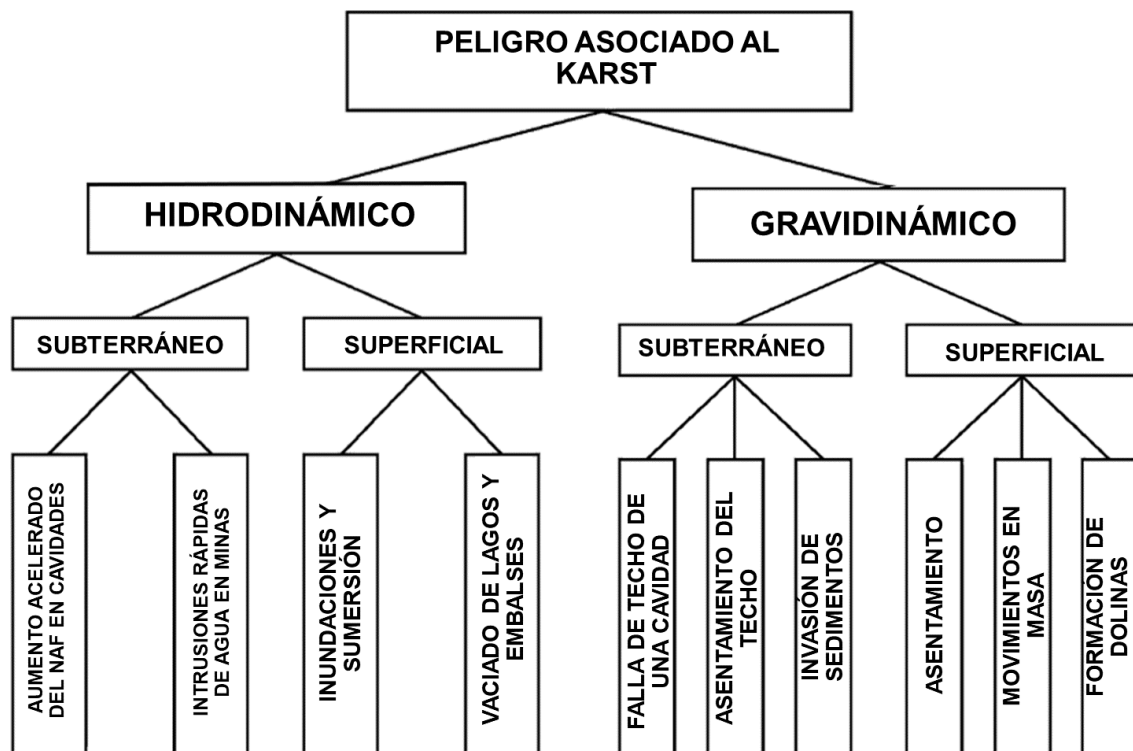
1.2. PELIGRO ASOCIADO AL KARST

Andreychouk & Tyc (2013) afirman que el karst es uno de los entornos más vulnerables del mundo a fenómenos naturales y antrópicos. Este fenómeno ocurre en áreas con drenaje subterráneo eficiente y rocas solubles: carbonatadas como piedra caliza, dolomita y creta, sulfatos como yeso y anhidrita, cloruros como sal de roca y sal de potasio y algunos silicatos, cuarcitas y sedimentos silíceos amorfos. Involucra procesos de acción rápida (colapso, asentamiento, movimientos de pendientes e inundaciones) y sus efectos (degradación de acuíferos y del terreno). Con frecuencia causa graves daños, en particular en dónde hay intensa actividad humana.

1.2.1. CLASIFICACIÓN DE LOS PELIGROS ASOCIADOS AL KARST

Según Andreychouk & Tyc (2013) los peligros asociados al karst se pueden dividir en dos grupos principales: gravodinámicos (procesos gravitacionales en el karst) e hidrodinámicos (relacionados con el flujo de agua y los cambios violentos del régimen del agua en el karst) (Figura 3). Los dos tipos pueden ocurrir tanto en superficie como en profundidad.

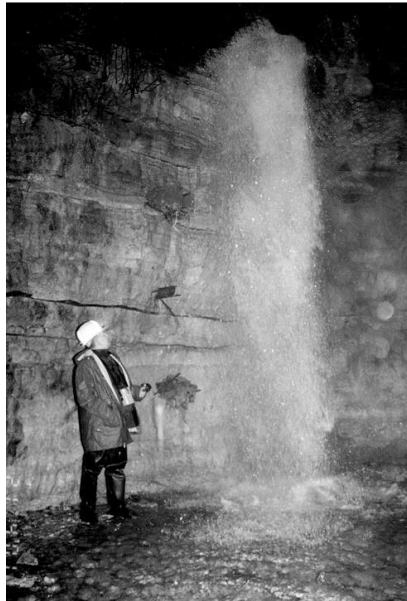
Figura 3. Principales tipos de peligros asociados al karst (modificado de Andreychouk & Tyc, 2013).



PELIGROS HIDRODINÁMICOS

- **El aumento acelerado del nivel freático en las cavidades** causado por las fuertes lluvias es un gran peligro hidrodinámico subterráneo. El nivel freático puede aumentar rápidamente a varias decenas de metros y, en raras ocasiones, incluso a varios cientos de metros, dependiendo de las precipitaciones y de la morfología del sistema de cavidades. En áreas planas, sistemas completos de cavidades horizontales pueden inundarse por completo (Andreychouk & Tyc, 2013).
- **Las intrusiones rápidas de agua en las minas** que explotan depósitos kársticos representan un gran peligro. Estas pueden ocurrir en minas de bauxita, níquel, plomo, zinc, hierro, yeso, sal y carbón u otras minas adyacentes al karst. Las cavidades llenas de agua o zonas de riego en la roca kárstica comúnmente drenan en galerías durante la operación minera (Figura 4). La entrada rápida, a veces violenta, de grandes cantidades de agua en la galería de la mina provoca un gran riesgo para los mineros y la maquinaria (Andreychouk & Tyc, 2013).

Figura 4. Entrada de gran cantidad de agua a la galería de una mina de plomo y zinc Olkusz, sur de Polonia (Andreychouk & Tyc, 2013).



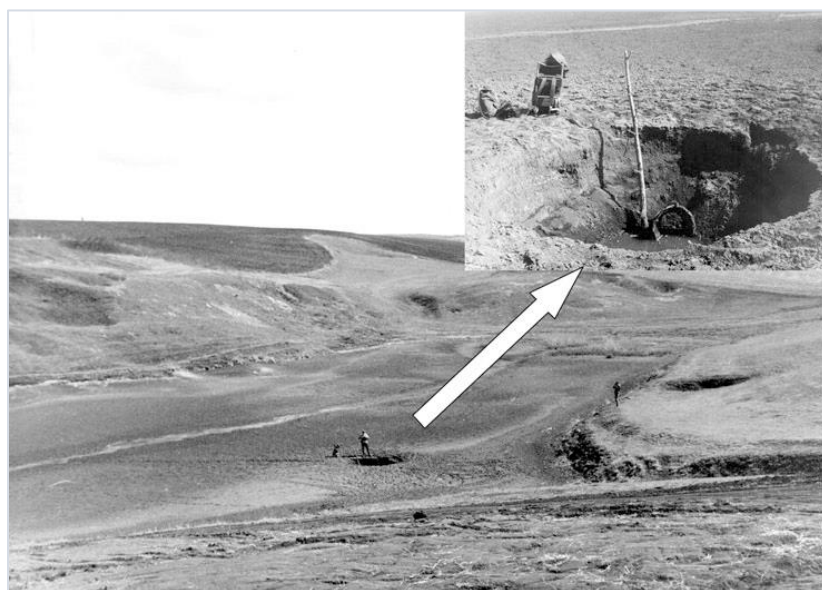
- **Las inundaciones y la sumersión** son procesos periódicos en el karst que presentan peligros hidrodinámicos superficiales. Según Bonacci *et al.* (2006) el agua se infiltra en el karst a través de la compleja red de juntas hasta que se transfiere a las zonas de salida. Por lo tanto, hay una cantidad muy limitada de escorrentía superficial; cuando las dolinas se obstruyen parcial o totalmente, el agua no puede entrar al terreno y, por lo tanto, se acumula en la superficie, creando inundaciones y áreas de inundación, especialmente en el caso de valles muy planos, tipo polje (Figura 5).

Figura 5. Daños producidos por inundaciones en zona kárstica: los efectos de la inundación de septiembre de 2003 en la provincia de Tarento, Italia (Parise, 2009).



- Un fenómeno mucho más peligroso y menos predecible es el **vaciado rápido de lagos y embalses**. Andreychouk & Tyc (2013) afirman que es muy común en áreas donde los lagos kársticos o los embalses artificiales se elevan sobre el nivel freático regional. El desarrollo de cavidades de asentamiento en el fondo puede provocar el vaciado rápido del lago durante períodos que van desde minutos u horas hasta varios días (Figura 6).

Figura 6. Vaciado rápido de un lago artificial como resultado del colapso de los sedimentos del fondo y su drenaje por una cavidad, Bucovina, Ucrania (Andreychouk & Tyc, 2013).



PELIGROS GRAVIDINÁMICOS

- **La falla del techo de una cavidad y la invasión de sedimentos** son los peligros gravidinámicos subterráneos más importantes. La susceptibilidad a la rotura está relacionada con la integridad estructural del techo de la caverna (espesor, densidad de las juntas, etc.) y el ancho de su tramo sin soporte. Andreychouk & Tyc (2013) mencionan que en cavidades ubicadas debajo de acuíferos cubiertas por sedimentos poco permeables, puede ocurrir la invasión de sedimentos licuados no consolidados.
- Otro peligro asociado al karst del tipo gravidinámico superficial es el **asentamiento**, según Pierskalla (2019), las depresiones superficiales resultantes del asentamiento se desarrollan principalmente en karst de yeso, donde hay disolución de rocas a poca profundidad (Figura 7). Los diámetros pueden variar desde varias decenas hasta cientos de metros, y las formas pueden ser circulares, alargadas o irregulares y complejas.

Figura 7. Asentamiento kárstico en entornos (a) agrícola rural (b) y suburbano en Kentucky, EEUU (Pierskalla, 2019).



- Los **movimientos en masa** pueden ocurrir en pendientes y en los extremos de grandes dolinas. En el karst se pueden observar diferentes tipos de movimientos en masa, siendo los más significativos los caídos (White & White, 1969). El análisis de los depósitos dentro de los sistemas de dolinas es de gran importancia para la evaluación del riesgo.
- La **formación de dolinas** es, definitivamente uno de los peligros más típicos en zonas kársticas, pueden originarse a través de diferentes procesos, las tipologías más difíciles son aquellas que se caracterizan por desarrollarse rápidamente, como las dolinas de colapso (Tharp, 1995). La falta de señales premonitorias y la evolución rápida en la fase catastrófica del evento son elementos que merecen ser investigados más a fondo en el intento de trabajar en la mitigación del riesgo.

1.3. CLASIFICACIÓN DEL KARST

1.3.1. CLASIFICACIÓN SEGÚN CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS

Waltham & Fookes (2003) proponen una clasificación geotécnica del karst (Tabla 2) que se basa en el grado de intensidad con el que el terreno ha sido atacado por los procesos kársticos (variabilidad de disolución, frecuencia espacial de las dolinas y tamaños de las cavidades subterráneas), esto con el fin de facilitar la comprensión de las características de las regiones y de los posibles peligros asociados. La resistencia de la roca intacta no está considerada, aunque puede relacionarse con definiciones más amplias de la resistencia del macizo rocoso. Cabe resaltar que únicamente toman en cuenta las características de las calizas más resistentes y, los elementos del yeso y otras rocas carbonatadas pueden considerarse como variantes.

Tabla 2. Clasificación geotécnica del karst (Espinasa, 2015)

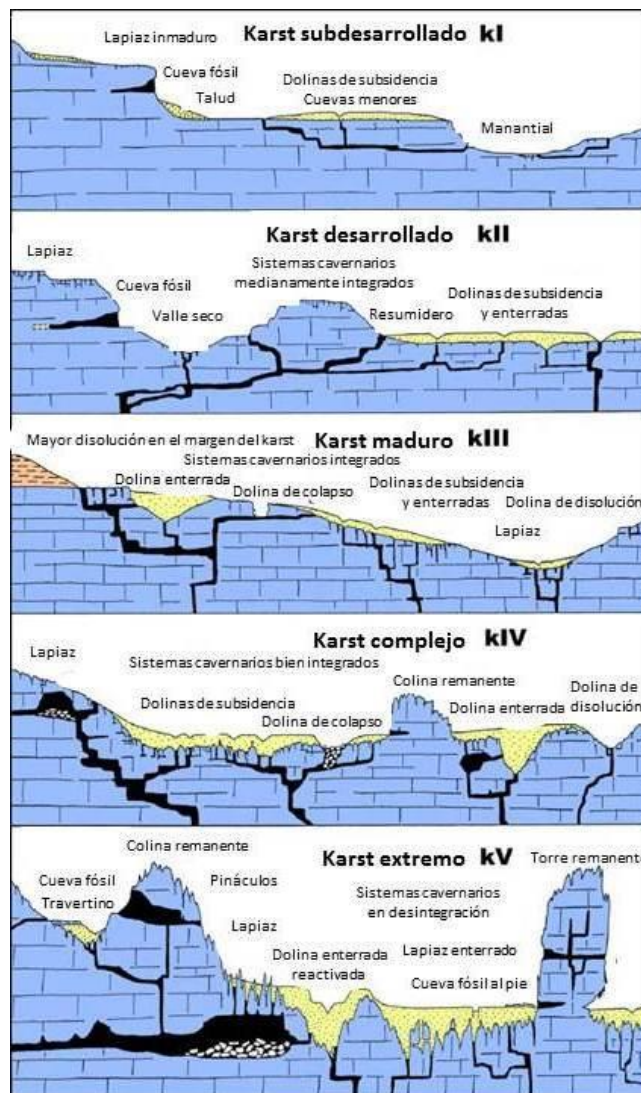
Categoría	Ubicación	Dolinas	Relieve superficial y cobertura	Disolución en el epikarst	Cuevas y cavidades
K-I Sub-desarrollado	Sólo en desiertos y calizas impuras	Raras FND < 0.001	Casi uniforme, pocas fisuras ampliadas por disolución	Mínima, poca o nula permeabilidad secundaria	Raras y pequeñas.
K-II Normal	El mínimo en regiones templado-subhúmeda	Pequeñas dolinas, de hundimiento y subsidencia. Sumideros activos FND 0.001-0.05	Numerosas fisuras ampliadas por disolución	Ampliamente desarrollada en los primeros metros más cercanos a la superficie	Muchas cavidades pequeñas, la mayoría <3m de sección
K-III Maduro	Común en zonas templado-subhúmedo, mínimo en regiones tropicales	Abundantes dolinas de subsidencia y hundimiento, grandes dolinas de disolución, pequeñas de colapso y/o cubiertas FND 0.05-1.0	Fisuramiento extensivo, relieve < 5m. bloques sueltos en el suelo de cobertura	Ampliación por disolución extensiva en la mayoría de las fisuras importantes	Abundantes cavidades <5m de sección, en múltiples niveles
K-IV Complejo	Lo normal en regiones tropicales	Muchas grandes dolinas de disolución, numerosas dolinas de subsidencia, dolinas de colapso y cubiertas diseminadas FND 0.5-2.0	Superficie de pináculos, bloques sueltos, Relieve de 5 a 20 m	Ampliación por disolución extensiva en todas las fisuras	Abundantes cavidades >5m de sección, en múltiples niveles
K-V Extremo	Sólo se encuentra en regiones tropicales húmedas	Muy grandes dolinas de todos los tipos. Compactación de suelos en dolinas cubiertas FND >>1	Altos pináculos y torres, relieve > 20m, pilares sueltos y socavados entre profundas fisuras rellenas de suelo	Abundantes y complejas cavidades de disolución en y entre las fisuras	Numerosos sistemas de cavernas con secciones >15m en complejo arreglo tridimensional

FND=Tasa de formación de nuevas dolinas por km² y por año

Las condiciones del terreno kárstico se dividen en una serie progresiva de cinco clases por los tipos de formas que presenten (Figura 8) y se identifican también por los parámetros establecidos (Tabla 2). De esta manera, se caracteriza al karst en términos de la complejidad y dificultad para las obras de ingeniería. En la Figura 8 se representan calizas en estratificación horizontal; en el caso de calizas plegadas se encontrarán formas de disolución más complejas, pero esto no debería afectar la clasificación de manera importante. La mayoría de las formas encontradas en los karst menos desarrollados se encontrarán también en las categorías más desarrolladas. Del mismo modo, los parámetros enlistados en la Tabla 2 no son exclusivos, así por ejemplo un karst bajo un clima desértico puede no tener un

desarrollo activo actualmente y por tanto parecer de clase K-I, pero contener grandes cavidades ocultas, formadas en periodos paleoclimáticos más húmedos, que correspondiera a una clase K-III o incluso K-IV (Waltham & Fookes, 2003).

Figura 8. Características morfológicas de las condiciones del terreno en cada una de las categorías de la clasificación geotécnica del karst (Espinasa, 2015)



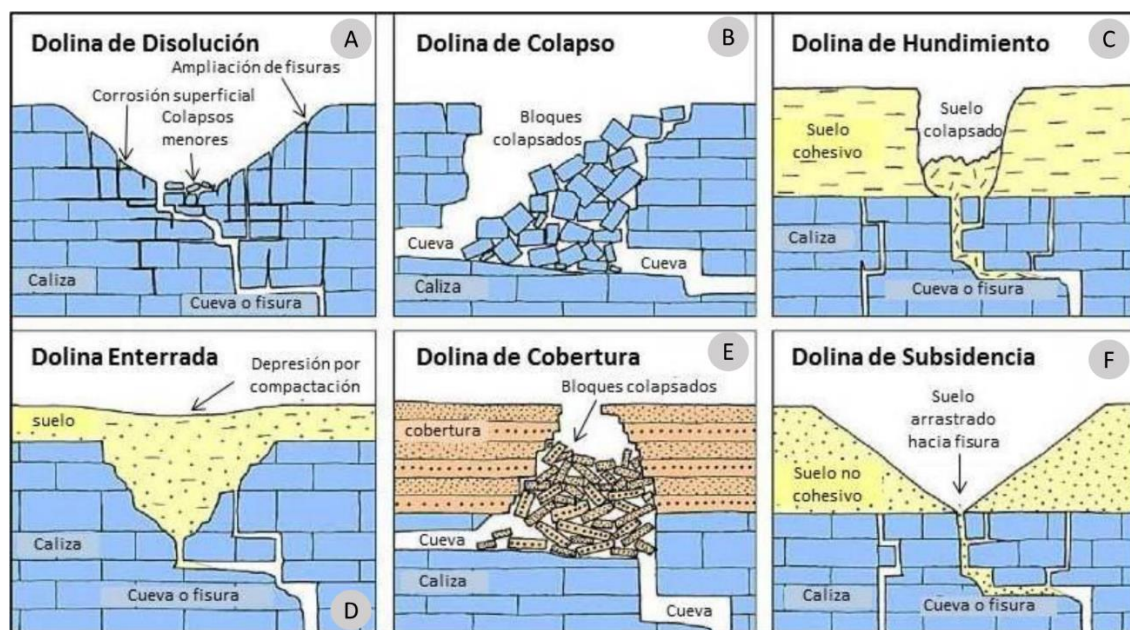
La extrema variabilidad local de las condiciones en el terreno kárstico implica que existen limitantes en cuanto a la aplicabilidad de una clasificación de este tipo. Waltham & Fookes (2003) afirman que en general, el desarrollo kárstico es más maduro y presenta mayor número de cavernas cerca de los contactos con litologías no solubles, ya que en esas zonas habrá mayor aporte de drenaje allogénico. El karst desarrollado bajo una cubierta de suelo es inevitablemente más peligroso que un karst desnudo, ya que las formas de disolución estarán cubiertas y escondidas, y se presentarán con mayor frecuencia hundimientos y subsidencia.

Waltham & Fookes (2003) sostienen que un problema adicional es ocasionado por la falta de interdependencia entre los componentes de un karst, por lo que en una región cuya morfología corresponde por ejemplo a una clase K-III, un sitio en particular puede mostrarse como mínimamente fisurado y sin desarrollo de karst en la superficie del terreno, por lo que sería mejor clasificado como de clase K-II, mientras que la existencia de una cavidad aislada a poca profundidad podría implicar que se trate de una clase K-IV. La clasificación original de la región como clase K-III seguiría siendo válida, pero las variaciones locales que tipifican al karst implican que cualquier punto puede pertenecer a una clase menor o mayor.

1.3.2. CLASIFICACIÓN SEGÚN LA MORFOLOGÍA DE LAS DOLINAS

De acuerdo con Waltham & Fookes (2005), las dolinas tienen forma cerrada, están situadas donde la superficie del terreno ha sido erosionada alrededor de un punto de drenaje hacia el interior de la masa de roca subyacente. Sus diámetros varían de algunos metros hasta varios kilómetros de diámetro y desarrollan profundidades de hasta 500 m. Waltham & Fookes (2005) las han clasificado en seis tipos (Figura 9), cada uno con su propio mecanismo discreto de formación. Asociado a las dolinas se producirán fenómenos de disolución, colapso o asentamiento, lo que representa una característica constante de todos los terrenos kársticos, además de las juntas abiertas o cavidades que existen en profundidad.

Figura 9. Clasificación de las dolinas según los mecanismos de falla que las forman (Espinasa, 2015)



- **Dolinas de disolución (Figura 9A):** Se forman por el descenso lento por disolución de la roca caliza, ayudado por el socavamiento y el colapso a pequeña escala sobre una cavidad grande o sobre un grupo de cavidades más pequeñas (Figura 10). Se

presentan en zonas kársticas que han evolucionado a lo largo de escalas de tiempo geológicas, y las más grandes son accidentes geográficos importantes.

Figura 10. Dolinas de colapso relacionadas con la disolución de yeso formados en 2014 en el embalse de Loteta, España. (Gutiérrez, 2016)



- **Dolinas de colapso (Figura 9B):** Se forman por la falla instantánea o progresiva y posterior colapso del techo de una cavidad. En general, los macizos rocosos calizos son muy resistentes por lo que el colapso a gran escala es poco común. En este sentido, la mayoría de dolinas no están originadas por el colapso de una cavidad sino por disolución superficial (Figura 11). Aunque las grandes dolinas de colapso no son comunes, el colapso a pequeña escala contribuye a la degradación y erosión superficial de la roca, existiendo una transición continua entre dolina de colapso y dolina de disolución.

Figura 11. Dolinas de colapso grande y pequeña en Koolanda al sur de Australia, ambas con caídas de 20m (Waltham, 2008).



- **Dolinas de hundimiento (Figura 9C):** Se forman por hundimiento rápido del terreno en dónde un estrato de suelo cohesivo colapsa hacia una cavidad subterránea que ha ido creciendo hasta llegar a la superficie mientras la porción inferior del suelo era lavada y transportada hacia las juntas y cavidades en la roca caliza subyacente. En la Figura 12 se presenta un ejemplo de este tipo, el caso de una gran dolina de colapso en los suburbios de la ciudad de Guatemala que cubría sedimentos piroclásticos débiles propensos a fallar.

Figura 12. Dolina de hundimiento en Guatemala a) gran dolina de colapso b) sedimentos expuestos (Waltham, 2008).



(a)



(b)

- **Dolinas enterradas (Figura 9D):** Ocurre dónde antiguas dolinas compactadas por disolución o colapso se llenan de tierra, escombros o sedimentos debido a un cambio en el medio ambiente. Entonces puede ocurrir un asentamiento de la superficie debido a la compactación del relleno del suelo y puede agravarse cuando parte del suelo es lavado en profundidad. Es común que no tengan expresión superficial.

El caso que se presenta en la Figura 13 es una dolina de compactación desarrollada sobre depósitos detríticos sueltos en Villar del Cobo, España, en la que las partículas se han filtrado a través de las juntas de la roca caliza generando una dolina en forma de embudo que se asemeja a las depresiones desarrolladas en los relojes de arena.

Figura 13. Dolina enterrada en Villar del Cobo, España (Gutiérrez, 2016).



- **Dolinas de cobertura (Figura 9E):** Son parecidas a las dolinas de colapso, pero en este caso, ocurre el colapso de materiales no solubles sobre una cavidad kárstica subyacente. Debido a la presencia de un nivel de techo no soluble, no se producirá posteriormente socavación. Este fenómeno ocurre solamente en terrenos de paleokarst o karst inter-estratificado en afloramientos de roca no soluble, como la dolina por colapso de nivel impermeable formada en basaltos del Neógeno sustentados por piedra caliza karstificada que se muestra en la Figura 14.

Figura 14. Dolina de cobertura en Al Issawiah, Arabia Saudita (Gutiérrez, 2016)



- **Dolinas de subsidencia (Figura 9F):** Se forman por asentamiento lento del terreno, a medida que, un estrato de suelo no cohesivo superficial se asienta en sus capas superiores se va eliminando desde abajo al ser lavado hacia las juntas de la roca caliza subyacente. Existe una transición continua entre las dolinas de hundimiento y de subsidencia que se forman a ritmos variables en suelos que van desde arcillas hasta arenas. Ambos procesos pueden ocurrir secuencialmente en el mismo sitio en condiciones de lluvia y flujo cambiantes, y el proceso de filtración puede considerarse como un proceso de asentamiento rápido.

En la Figura 15 se muestra una roca yesífera subhorizontal interrumpida por juntas disolutivas rellenas de sedimentos detríticos derivados de la superficie en el corte de la línea de alta velocidad Madrid-Barcelona en la Cuenca Cenozoica del Ebro, España.

Figura 15. Dolina de subsidencia en España. (Gutiérrez, 2016).

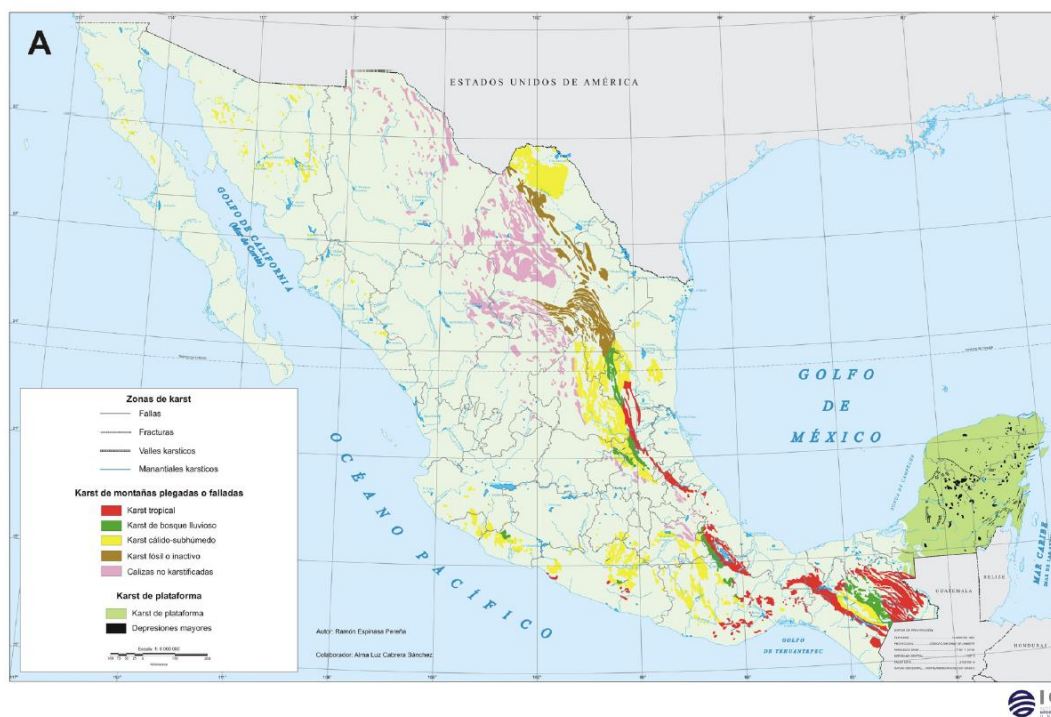


Las dolinas de hundimiento y de subsidencia representan el mayor peligro para las obras de ingeniería. Debido a que se generan por la filtración del agua en la roca, la mayoría ocurren durante lluvias abundantes a extraordinarias, o cuando el drenaje natural del terreno es afectado por obras de ingeniería civil (Espinasa, 2015). También, es frecuente que se produzcan donde una caliza karstificada y cubierta por suelo es drenada por extracción de agua subterránea, en especial cuando el nivel freático no es superficial, lo que produce drenaje vadoso que transporta sedimentos hacia el interior de las cavidades kársticas.

2. KARST EN MÉXICO

México tiene aproximadamente 20% del territorio nacional ocupado por zonas kársticas, principalmente calizas y en menor proporción yesos (Espinasa, 2014). A grandes rasgos, el karst en México es de dos tipos: el desarrollado en los cinturones de pliegues y fallas que constituyen la Sierra Madre Oriental, Sierras Orientales de Oaxaca, Sierra Madre del Sur y Sierras de Chiapas, y por otro lado el desarrollado en la gran plataforma calcárea que constituye la Península de Yucatán (Figura 16). Debido a que estas áreas poseen estructuras geológicas y climas diversos, existe en una gran variedad de relieves y formas kársticas que, desafortunadamente, han sido poco estudiados.

Figura 16. Mapa de zonas kársticas de México (Espinasa, 2007)



2.1. CLASIFICACIÓN MORFOCLIMÁTICA Y GEOTÉCNICA DEL KARST EN MÉXICO

La influencia del clima en el karst superficial ha sido bien establecida desde muy temprano (Lehmann, 1936; Roglic, 1972; Jennings, 1987; White, 1988) y en contraste se ha encontrado que, el karst subterráneo no está controlado climáticamente, si se menosprecia hasta cierto punto el tamaño de las cavidades que puedan existir (Ford & Williams, 1989). Debe aclararse, desde la posición de Espinasa (2015), que las áreas kársticas actualmente presentes en una cierta región pueden, y en algunos casos deben, haberse desarrollado bajo regímenes climáticos distintos al actual, pero relativamente pocos casos han sido documentados en México.

Espinasa (2015) creó la clasificación de las zonas kársticas superficiales de México relacionándolas con el efecto que tiene el clima sobre ellas. Las ha agrupado en dos tipos: Karst de Montañas Plegadas y Falladas y, por otro lado, Karst de Plataforma.

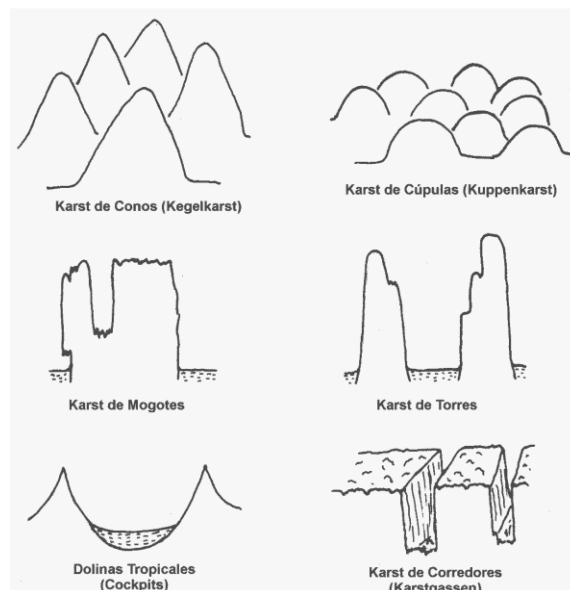
2.1.1. KARST DE MONTAÑAS PLEGADAS Y FALLADAS

- **Karst no desarrollado:** Calizas no karstificadas, ocurre únicamente en zonas áridas o en calizas muy impuras.
- **Karst semiárido, fósil e inactivo:** El clima actual no propicia la formación de fenómenos kársticos, exceptuando las rocas evaporíticas, que desarrollan espectaculares dolinas de colapso. No obstante, las grandes cavernas fósiles son frecuentes, lo cual indica un desarrollo anterior (paleokarst) bajo condiciones climáticas diferentes. Solamente en las porciones más elevadas de las sierras se encuentran algunas dolinas y cavidades de desarrollo principalmente vertical.
- **Karst subhúmedo:** Zonas con dolinas que perforan una superficie pero que dejan el suficiente espacio para que no interfieran entre ellas. Se desarrolla en las cumbres, relativamente planas, de cerros calizos de laderas empinadas. En ocasiones, ríos alóctonos¹ pueden cruzar áreas kársticas mediante cauces subterráneos o en profundas gargantas o cañones. Se desarrolla en climas templados. Suele tomarse como parámetro de comparación con los otros tipos de karst.
- **Karst tropical:** Presente en regiones cálidas y húmedas, se caracteriza por la presencia de cerros residuales de forma cónica, de cúpula, mogotes y torres, situados entre profundas dolinas, o rodeadas por planicies aluviales. Son muy frecuentes los casos de captura subterránea de ríos alóctonos. En México las formas más típicas son los conos (keggelkarst) y las dolinas (cockpit karst) (Figura 17).
- **Karst de bosque lluvioso:** Dolinas profundas separadas por estrechas cimas, en las porciones más húmedas y elevadas de las sierras. En las cumbres por encima de 3000 metros de altitud, se llegan a encontrar condiciones de karst alpino, con pequeñas dolinas, suelos escasos y gelifracción². El alto relieve propicia la formación de extensos sistemas de drenaje kárstico (cuevas) de hasta 2500 metros de desnivel.

¹ Río cuyas aguas proceden de unos lugares o regiones donde el clima es mucho más húmedo o lluvioso que el del lugar donde desembocan y que en un trayecto bastante prolongado se halla sumergido, volviendo a aparecer o emerger en las partes bajas, cercanas a su desembocadura (Moltó, 2013).

² Fragmentación de la roca que es sometida a tensión cuando, por las variaciones de temperatura, el agua en los vacíos de las rocas se congela y el paso de líquido a sólido provoca un aumento de volumen que provoca el desprendimiento de granos o fragmentos (Glosario geografía, 2022).

Figura 17. Formas típicas del karst tropical (Espinasa, 2015)



2.1.2. KARST DE PLATAFORMA

Desarrollado en una plataforma calcárea prácticamente plana, la península de Yucatán se caracteriza por la presencia de gran cantidad de cenotes, numerosas depresiones rellenas de suelos, y bóvedas en las porciones de mayor relieve. Presenta un importantísimo desarrollo de sistemas de drenaje kárstico asociado a grandes resurgencias³ en la costa oriental de Quintana Roo.

En términos generales, la clasificación morfoclimática (Espinasa, 2015) y la clasificación geotécnica de tipos de karst (Waltham & Fookes, 2005) son similares o complementarias. Como un primer acercamiento al problema de la susceptibilidad a fenómenos kársticos en México, Espinasa (2015) modificó el mapa de zonas kársticas comparando las características morfológicas de cada una de las categorías de la clasificación geotécnica de Waltham & Fookes (2005) con las descripciones de las formas encontradas en los distintos tipos de karst de la clasificación morfoclimática (Espinasa, 2015), encontrando que en su mayor parte coinciden ambas clasificaciones (Tabla 3). Aunque, es importante mencionar que el karst desarrollado en yesos es probablemente el más propenso del país a colapsos o asentamientos debido a su acelerado ritmo de evolución, éste se encuentra en la zona de Huitzuc de los Figueroa, Guerrero, así como Galeana, Nuevo León, clasificado como karst semiárido, fósil e inactivo por Espinasa (2007).

³ Ríos o arroyos absorbidos en terrenos calcáreos que vuelven a aparecer en una zona en forma de manantial (Grandjouan et al., 2017).

Tabla 3. Clasificación morfoclimática y geotécnica del karst en México (Espinasa,2015)

Clasificación Morfoclimática	Clasificación Geotécnica
Calizas no karstificadas	K-I Karst sub-desarrollado
Karst semiárido, fósil o inactivo	K-II Karst desarrollado
Karst cálido subhúmedo	K-III Karst maduro
Karst de bosque lluvioso	K-IV Karst complejo
Karst tropical	K-V Karst extremo

A partir del Atlas Nacional de Riesgos (Zepeda *et al.*, 2001), se determinaron el perímetro, área y localización de cada uno de los tipos de karst para cada región (Tabla 4).

Tabla 4. Perímetro, área y localización de los tipos de karst (Espinasa, 2015).

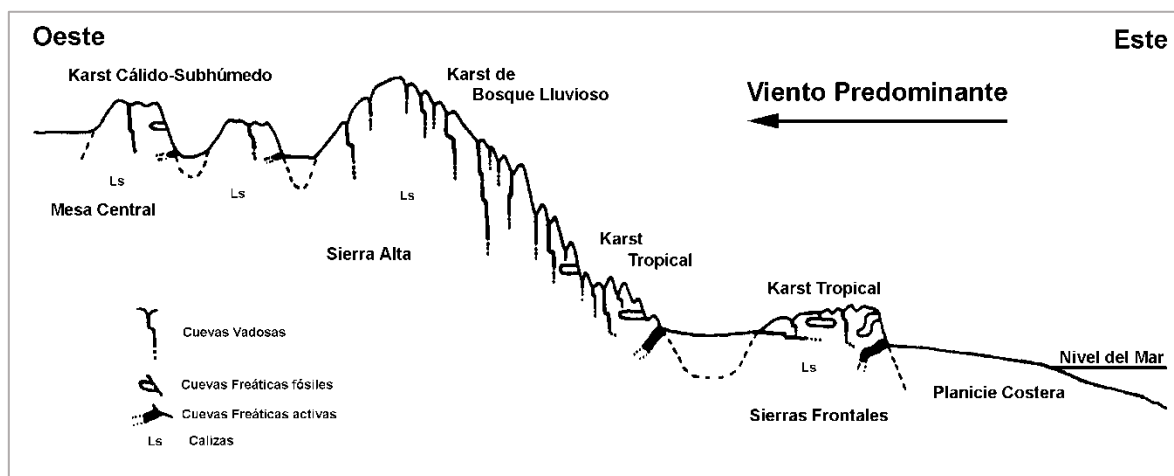
Región	Tipo de karst	Perímetro (Km)	Área (Km ²)	Estados
Sierra Madre del Sur	K-V Extremo	2 800	6 150	Colima, Guerrero, Michoacán, Oaxaca y Puebla
	K-IV Complejo	390	1 030	Guerrero, Michoacán y Oaxaca
	K-III Maduro	6 550	22 110	Colima, Estado de México, Guerrero, Jalisco, Michoacán, Morelos, Oaxaca y Puebla
Yucatán	K-V Extremo >100 dolinas/1000km ²	1 810	19 760	Campeche, Quintana Roo y Yucatán
	K-IV Complejo 50 - 100 dolinas/1000km ²	3 030	46 990	Campeche, Quintana Roo y Yucatán
	K-III Maduro <50 dolinas/1000m ²	470	3 290	Quintana Roo y Yucatán
	Depresiones mayores	2 960	4 450	Campeche, Quintana Roo y Yucatán
Chiapas	K-V Extremo	4 770	29 490	Chiapas, Oaxaca, Tabasco y Veracruz
	K-IV Complejo	990	4 410	Chiapas y Tabasco
	K-III Maduro	710	4 680	Chiapas
Coahuila	K-III Maduro	1 280	14 880	Coahuila
	K-II Desarrollado	2 650	11 140	Coahuila y Nuevo León
	K-I Subdesarrollado	6 470	37 710	Chihuahua, Coahuila, Durango y Nuevo León
Sierras Orientales Oaxaca	K-V Extremo	1 430	5 000	Oaxaca, Puebla y Veracruz
	K-IV Complejo	530	1 900	Puebla, Oaxaca y Veracruz
	K-III Maduro	150	430	Puebla y Veracruz
	K-I Subdesarrollado	180	390	Puebla
Sierra Madre Oriental	K-V Extremo	2 130	10 270	Hidalgo, San Luis Potosí, Puebla, Querétaro, Tamaulipas y Veracruz
	K-IV Complejo	1 110	5 080	Guanajuato, Hidalgo, Nuevo León, Querétaro, San Luis Potosí y Tamaulipas
	K-III Maduro	5 881	29 370	Guanajuato, Hidalgo, Querétaro, Nuevo León, San Luis Potosí y Tamaulipas
	K-II Desarrollado	2 580	15 670	Coahuila, Nuevo León, San Luis Potosí, Tamaulipas y Zacatecas
	K-I Subdesarrollado	5 700	16 750	Aguascalientes, Coahuila, Durango, Guanajuato, Hidalgo, Puebla, Querétaro, San Luis Potosí y Zacatecas

2.2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL KARST DE MONTAÑAS PLEGADAS Y FALLADAS

Según Espinasa (2015), debido a que el clima en las sierras de México se relaciona con cambios de altitud, las zonas kársticas presentan características paralelas al patrón de las mismas sierras. Así, se encuentra que, en la Sierra Madre Oriental, las serranías frontales que miran hacia el Golfo de México presentan un karst Tropical, y en las zonas más altas presentan un desarrollo kárstico de Bosque Tropical. En la sombra pluvial del parteaguas, predomina el karst Subhúmedo, y la presencia de zonas kársticas disminuye progresivamente hacia el oeste y norte, donde hay condiciones subáridas con ausencia casi total de rasgos kársticos debido a la disminución en el número de afloramientos de caliza (Espinasa, 1990, 2007). Este patrón es similar en las Sierras Orientales de Oaxaca (Figura 18).

En la Sierra Madre del Sur los afloramientos calcáreos están más aislados y son perpendiculares a la costa, el patrón no es tan claro, aunque sigue siendo visible con la humedad procedente del Océano Pacífico desde el sur. Como las Sierras de Chiapas están localizadas entre el Golfo y el Pacífico, reciben grandes cantidades de humedad tanto del norte como del sur, por lo que el karst Tropical y de Bosque Lluvioso impera, aunque una franja delgada en la Depresión Central de Chiapas presenta karst subhúmedo a lo largo del valle del Río Grijalva (Espinasa, 2015).

Figura 18. Patrón de tipos de desarrollo kárstico en la Sierra Madre Oriental y Sierras Orientales de Oaxaca (Espinasa, 2015)



Espinasa (2015) indica que en Coahuila y las Sierras Transversales hay presencia de grandes cavidades de origen freático, fósiles, colgadas a mucha altura sobre los fondos de los valles que han sido preservadas gracias al clima árido, lo cual evidencia un desarrollo paleokárstico

de posible edad Pliocénica⁴ que se ha encontrado en todas las sierras. Al sur del Río Purificación, Tamaulipas, la presencia de formas kársticas activas ha borrado prácticamente la evidencia de formas anteriores. La región de Purificación es particularmente interesante, pues muestra claramente la reactivación de galerías freáticas fósiles por nuevos arroyos vadosos activos.

Además del clima, la estructura y la litología también controlan el desarrollo kárstico moderno, y la mayoría de los conductos kársticos (cuevas activas) siguen áreas de mayor fracturamiento o intervalos litológicos muy solubles. La inmensa mayoría de las cavidades exploradas son de origen vadoso, tanto de invasión como de abatimiento del nivel freático, debido al gran relieve existente entre las zonas de captación y las resurgencias que crean una gran zona vadosa (Ford y Williams, 1989). Sin embargo, el gran espesor de calizas existente en muchos lugares garantiza una zona freática bien desarrollada. Las formas kársticas superficiales son claramente condicionadas por el clima existente, lo cual puede indicar un ajuste rápido de dichas formas a cambios climáticos, o por otro lado indicar condiciones climáticas relativamente estables durante el Cuaternario en México. Este es un punto que requiere mayor investigación (Espinasa, 2015).

A continuación, se presenta la descripción de los tipos de karst en cada región realizado por Espinasa (2015), quien utiliza la Regionalización Geomorfológica de Lugo y Córdova (1990) para nombrar a las distintas provincias y regiones.

2.2.1. SIERRA MADRE DEL SUR

- **Litología y estructura:** Las rocas con morfología kárstica más antiguas de la región son los yesos y anhidritas pertenecientes a la Formación Huitzuco, de edad Aptiano-Albiano. Estas rocas subyacen a calizas de edad Albiano-Cenomaniana, pertenecientes a la Formación Morelos, con estratos medianos a gruesos e incluso masivos de calizas muy puras, con un espesor de hasta 900 m; en ocasiones presenta estratos un poco más delgados, con mayor cantidad de bandas de pedernal, y algunos intervalos ligeramente arcillosos.
- **Susceptibilidad y desarrollo kárstico:** En general, puede decirse que el karst presenta una morfología característica de un clima cálido subhúmedo Maduro (K-III) en un área de 24,586 km² en los estados de Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, México, Morelos, Puebla y Oaxaca. El relieve está formado por anchos cerros de formas redondeadas con planicies en las partes altas, en las que se encuentran las dolinas, sumideros y demás

⁴ Periodo de la era Cenozoica que abarca desde el final del Mioceno (hace aproximadamente 5,3 millones de años) hasta principios del Pleistoceno (hace aproximadamente 1,8 millones de años) (agrega, 2022).

formas de absorción. Las cavidades son en su mayoría de desarrollo mixto, presentando tiros verticales a lo largo de fracturas y/o fallas, y galerías horizontales controladas por la estratificación.

Uno de los fenómenos kársticos más representativos de la región es la gruta de Cacahuamilpa, acondicionada para el turismo, que consiste en una gran galería de 1300 m de largo, decorada con múltiples estalagmitas. Aproximadamente, 100 m debajo, se encuentran los ríos subterráneos de Chontacoatlán (5,800 m de largo) y San Jerónimo (5,600 m de longitud), que cortan de parte a parte una cadena calcárea formada por los cerros Tepozonal y del Jumil.

2.2.2. MONTAÑAS DE CHIAPAS

- **Litología y estructura:** En esta zona prácticamente todos los fenómenos kársticos se desarrollan en calizas del cretácico medio, de ambiente de plataforma, pertenecientes a la Caliza Sierra Madre.
- **Susceptibilidad y desarrollo kárstico:** En un área de 32,250 km² entre los estados de Chiapas, Tabasco y Oaxaca (Tabla 4), se encuentra desarrollo Kárstico tropical Extremo (K-V), con todos los tipos de formas, imperando los conos (keggels). La fracción del altiplano de San Cristóbal, en contraste, es un karst de bosque lluvioso Complejo (K-IV) que ocupa un área de 4,820 km² en los estados de Chiapas y Tabasco, en el que predominan las dolinas de disolución; también se encuentran úvalas y poljes.

En la Depresión Central de Chiapas, el karst está menos desarrollado que en la anterior región debido a la menor altitud y a la baja precipitación pluvial, se trata de un karst propio de clima cálido subhúmedo Maduro (K-III) que cubre un área de 508,800 km² en el estado de Chiapas (Tabla 4). Los cerros tienen formas convexas, con planicies en las partes altas, en las que hay dolinas y otras formas de absorción.

2.2.3. SIERRAS DE COAHUILA

- **Litología y estructura:** El karst se ha desarrollado en calizas cretácicas pertenecientes a las Formaciones Cupido y Aurora. Las dos son unidades de gran espesor, muy puras, en estratos medianos a gruesos y masivos que contienen parches arrecifales. Estas rocas fueron plegadas, fracturadas y falladas por varios eventos desde fines del Cretácico, formando amplios anticlinales donde afloran rocas jurásicas de menor resistencia.
- **Susceptibilidad y desarrollo kárstico:** Esta región está gobernada por un clima árido, razón por la que no se presenta un desarrollo activo del karst superficial. Prácticamente todas las cavidades conocidas consisten en gigantescos salones de origen freático, totalmente fósiles, sin ninguna relación con la topografía actual. Un ejemplo es la gruta

de Villa García, acondicionada para el turismo y ubicada al noroeste de Monterrey. Consiste en dos grandes salones, el primero de 400 m de largo por 150 m de ancho y el segundo de 150 m de largo por 50 m de ancho. Está subdividida en pequeñas cámaras por macizos de estalagmitas e inmensos conos de derrumbe.

Actualmente no existe un relieve o drenaje kárstico en funcionamiento, por lo que se trata de un karst fósil (K-II Desarrollado) que cubre un área de 14,260 km² en los estados de Coahuila y Nuevo León. En la porción norte se encuentra el segundo mayor afloramiento continuo de calizas de México. La presencia del Sótano de Yermo, en cuyo fondo existe un lago con fuerte corriente, así como el gran Nacimiento Kikapú, un manantial kárstico de grandes dimensiones en las orillas del Río Bravo, indican la presencia de un acuífero kárstico importante en profundidad, aun cuando el desarrollo kárstico en superficie es mínimo. Existe presencia de K-III Maduro en un área de 19,558km² en el estado de Coahuila, Chihuahua, Durango, Nuevo León y en Coahuila, y cubriendo un área de 46,741 km² hay presencia de K-I Subdesarrollado (Tabla 4).

2.2.4. SIERRAS ORIENTALES DE OAXACA

- **Litología y estructura:** Todos los fenómenos kársticos de la región están desarrollados en los sedimentos calcáreos de edad cretácico pertenecientes a las Formaciones Orizaba y Maltrata. La primera consiste en grandes espesores de calizas depositadas en un mar somero, en trazas de plataforma, con abundantes parches arrecifales, en estratos gruesos a masivos, prácticamente sin impurezas. La segunda está formada por sedimentos carbonatados de talud y cuenca, en estratos delgados, con abundantes bandas y nódulos de pedernal e intervalos calcáreo-arcillosos.
- **Susceptibilidad y desarrollo kárstico:** Esta región es probablemente la que presenta el desarrollo kárstico más espectacular de México, debido al clima cálido-húmedo que la afecta y a su gran relieve. Se trata de un karst de elevaciones montañosas plegadas y falladas, en el que se encuentran las cavidades más profundas de América. Se distingue una serie de valles o cañones con dirección general oeste-este, que permite separar a la región en varios macizos distintos, cada uno de los cuales tiene sus propias áreas de captación, sistemas subterráneos de drenaje y grandes resurgencias al interior de los cañones.

Sin embargo, en cada macizo se puede distinguir una distribución de las formas kársticas superficiales en dirección este oeste, pasando de un karst tropical Extremo (K-V) localizado en los estados de Veracruz, Puebla, Oaxaca y abarcando un área de 5,600. km² (Tabla 4), con torres y conos kársticos (keggelkarst), en las porciones de menor altitud al oriente, a un karst de bosque lluvioso Complejo (K-IV) que se presenta en los estados de Puebla, Veracruz y Oaxaca, con un área de 2,138 km², en las porciones más elevadas de

la sierra, caracterizado por profundas dolinas de disolución. Son frecuentes en la porción occidental los sumideros de origen alóctono, originados sobre rocas impermeables, que al llegar a las calizas son absorbidos en masa, generando enormes sistemas de cavernas de desarrollo principalmente vadoso, entre las que se cuentan algunas de las cavidades más profundas del planeta.

Hacia el noroccidente en los estados de Veracruz y Puebla se encuentran también calizas en la “sombra pluvial” de la sierra, que por la poca lluvia recibida presentan menor desarrollo kárstico de tipo Maduro (K-III) con un área de 488 km² e incluso Subdesarrollado (K-I) en el estado de Puebla con un área de 440 km².

2.2.5. SIERRA MADRE ORIENTAL

- **Litología y estructura:** Las rocas más antiguas sobre las que se desarrollan fenómenos kársticos en la Sierra Madre Oriental son los yesos jurásicos de la Formación Olvido. Sobre ellos hay un intervalo terrígeno-carbonatado, representado por las formaciones La Casita y Taraises, en las que no se conoce desarrollo kárstico. Sigue una secuencia carbonatada de edad cretácica, formada por calizas de plataforma y/o arrecifales, en estratos medios a gruesos e incluso masivos, sin pedernal ni impurezas, que ha sido asignado a las formaciones Cupido, Tamaulipas Inferior, El Abra, Tamabra y El Doctor. Todas estas rocas fueron cubiertas por sedimentos calcáreo-arcillosos y terrígenos del cretácico tardío, dando origen a unidades sin desarrollo kárstico.
- **Susceptibilidad y desarrollo kárstico:** Se trata de la región kárstica más compleja del país, ya que por su gran extensión cubre numerosas zonas climáticas. El karst se divide en seis tipos: karst tropical tipo Cuetzalan, karst de bosque lluvioso, karst cálido subhúmedo, karst semiárido o fósil, calizas no karstificadas y karst tropical.

Consiste en una serie de cordilleras calcáreas paralelas en dirección casi norte-sur, separadas por valles subyacidos por rocas terrígenas, a excepción de la Sierra Norte de Puebla, donde el relieve es en forma de una cuesta monoclinial inclinada hacia el noreste. Varios ríos que drenan la Mesa Central y cruzan la Sierra Madre Oriental en dirección al golfo de México cortan esta área en numerosos macizos kársticos independientes. Estos ríos funcionan como nivel de base para las resurgencias kársticas. En los estados de Tamaulipas, Querétaro, Hidalgo, Veracruz, Puebla y San Luis Potosí (Tabla 4) puede verse karst tropical Extremo (K-V) en un área de 4,022 km². En la porción oriental de más baja altitud, con formas como conos, torres etc., karst de bosque lluvioso Complejo (K-IV) en las porciones más altas y 6,043 km² de karst subhúmedo Maduro (K-III) una vez transpuesta hacia el oeste la cresta de la sierra y en la “sombra pluvial” de la misma. Al sur del Río Blanco y al oeste de Cd. Victoria, Tamaulipas y en los estados de Nuevo León San Luis Potosí, Hidalgo, Guanajuato y Querétaro, se encuentra uno de los Karts más importantes de México, el de Purificación. La zona consiste en dos crestas alargadas

en dirección norte-sur; la cresta oriental presenta una gran cantidad de dolinas de disolución separadas por aristas afiladas, con un área 1,174 km² lo que hace pensar en un karst de tipo Complejo (K-IV). La cresta occidental dentro los estados de Tamaulipas y en los estados de Nuevo León, Guanajuato, Querétaro, Hidalgo y San Luis Potosí (Tabla 4), tiene un relieve menos abrupto, formado por cerros amplios, convexos, con dolinas en las partes altas, lo cual parece indicar un karst de tipo Maduro (K-III).

Adicionalmente, en la porción septentrional se encuentra la zona de Galeana, Nuevo León, donde el karst está bien formado, emplazado en yesos de la Formación Olvido. Se trata de un karst heredado, desarrollado en condiciones climáticas más húmedas, aunque no totalmente fosilizado. Las formas superficiales incluyen dolinas de disolución, de colapso, y abundantes sumideros, todos desarrollados en los yesos de la Formación Olvido, y generan un karst de tipo Maduro (K-III). El resto de las Sierras Transversales en los estados de Coahuila Aguascalientes, Durango, Guanajuato, Querétaro, Hidalgo, Puebla, San Luis Potosí, y Zacatecas, abarca un área de 34,597 km², no presentan un relieve kárstico superficial (Karst Subdesarrollado K-I a Desarrollado K-II).

En la porción centro-oriental está el macizo kárstico de Xilitla, uno de los karst tropicales más desarrollados de México, especialmente al sur del poblado de Tampaxal, donde el relieve está marcado por grandes cerros cónicos (keggel) y en forma de torres (turm), y existen inmensas depresiones de colapso. Una de las cavidades más importantes encontradas en esta zona es el mundialmente famoso sótano de las Golondrinas, con un tiro vertical de 376 m, formado por el derrumbe de una gran cámara subterránea, y que lleva a uno de los salones más voluminosos del planeta.

Al sur del Río Vinasco la morfología de la Sierra Madre Oriental cambia totalmente, pasando de una estructura muy compleja formada por pliegues, fallas, etc., a un monoclinal inclinado hacia el noreste. El karst desarrollado en esta región, a diferencia de todos los demás de la Sierra Madre Oriental (que son de elevaciones montañosas plegadas y falladas), es de mesa monoclinal inclinada. El relieve superficial está formado por laderas abruptas que separan valles de dirección sur-norte, desarrollados en la cubierta volcánica, y que terminan en sumideros al alcanzar el contacto con las calizas. Tanto al este como al oeste se encuentran profundos cañones (ríos Zempoala y Apulco), que funcionan como nivel de base para la erosión kárstica.

2.3. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL KARST DE PLATAFORMA: PENÍNSULA DE YUCATÁN

La península de Yucatán es el afloramiento continuo de calizas más extenso del país. Como lo hacen notar Estrada et al. (2019), los estratos de roca caliza de Yucatán corresponden a la era Cenozoica (periodos terciario y cuaternario) y se formaron principalmente a partir de arrecifes coralinos que, al ser expuestos a los agentes del intemperismo, se convirtieron en sedimentos; posteriormente, estos sedimentos se convirtieron en caliza a través de la diagénesis⁵.

Diversos estudios muestran la presencia de tres estratos de roca: la roca consolidada, el sascab y la coquina. La roca consolidada, denominada localmente como laja, corresponde a afloramientos rocosos de extrema dureza, con un espesor aproximado de 3 m, que se considera un producto de la litificación de los sedimentos originales. El sascab (del maya “sahcab”, tierra blanca) es una roca no consolidada de textura arenosa y bajo contenido de magnesio (aunque algunas pueden contener dolomita) que probablemente se originó del intemperismo del material calizo. La coquina o conchuela es una roca fosilífera con abundantes macroporos en la cual se encuentran conchas de moluscos (Estrada et al., 2019).

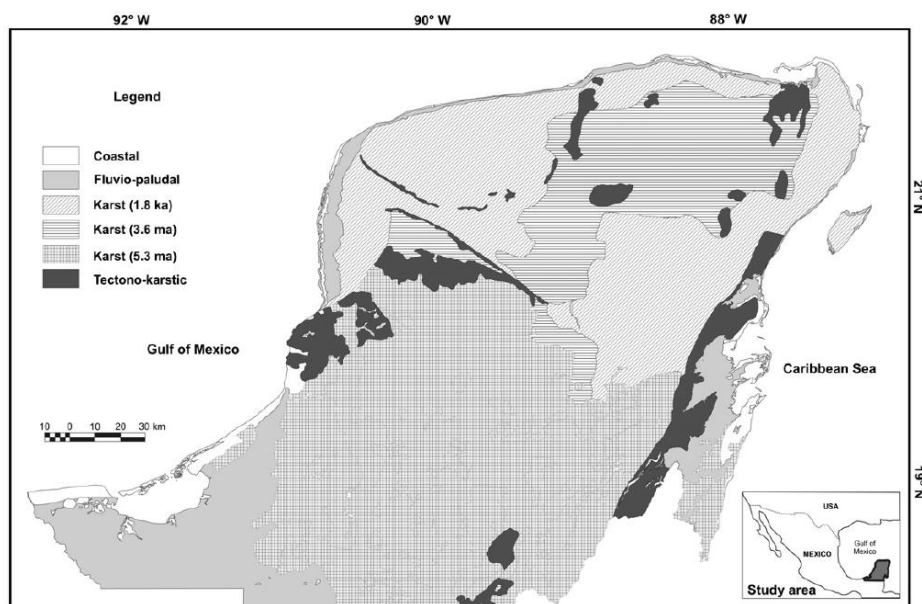
Las tres formas predominantes del terreno en el karst Yucateco son las depresiones cerradas conocidas como dolinas, úvalas y poljes. Aguilar et al. (2016) identificaron 6717 depresiones en la península de Yucatán, de las cuales 4620 fueron clasificadas como dolinas (cenotes), 2021 como úvalas y 76 como poljes. De acuerdo con Estrada et al. (2019) se caracteriza por un relieve ondulado formado por planicies estructurales y lomeríos, con depresiones y cavernas cuyas dimensiones se van ampliando hacia el sur. La planicie del noreste es una plataforma recientemente emergida sin prácticamente alguna deformación, a excepción de fallas de orientación nor-noreste a sur-suroeste en la porción oriental, y los cenotes (del Maya *dzonot*) localizados en la porción occidental, principalmente, alrededor del cráter de Chicxulub formando el conocido anillo de cenotes, con un diámetro aproximado de 160 km. En la porción central y suroeste se encuentra un relieve de planicies y lomeríos de gran tamaño, destacando la sierrita de Ticul. En esta zona no hay cenotes, las formas kársticas están limitadas a numerosas cavernas de varios tamaños.

Como expresa Bautista et al. (2011), tres fases de levantamiento tectónico, que se remontan a 5.3 Ma, 3.6 Ma y 18 ka han provocado la emersión del terreno y elevado la superficie de Yucatán (Figura 19). Con base en las fechas anteriores, las superficies de plataforma emergidas se pueden llamar maduras, intermedias y jóvenes, respectivamente. Los procesos

⁵ Conjunto de procesos químicos, físicos y biológicos que dan lugar a la formación de rocas sedimentarias a partir de la deposición de sedimentos (Maldonado, 2022).

de emersión de la plataforma incluyen elevación diferencial, inclinación tectónica generalizada y movimientos eustáticos⁶. Las fracturas tectónicas son frecuentes y generan características geomórficas importantes como alineaciones de colinas y grupos de dolinas como el anillo de cenotes.

Figura 19. Ambientes geomorfológicos en la Península de Yucatán y etapas de desarrollo kárstico (Bautista et al., 2011).



En cuanto a su morfología, la Península de Yucatán presenta dos unidades morfológicas principales, una en el norte donde predominan las planicies y rocas sedimentarias neógenas y la segunda al sur donde se alternan planicies con lomeríos de hasta 400 msnm en rocas sedimentarias del oligoceno. Existen dos principales formas de relieve: planicies y montículos; sin embargo, también existen otras formaciones como las planicies inclinadas, planicies onduladas y planicies escalonadas de geometría diversa (Estrada *et al.*, 2019).

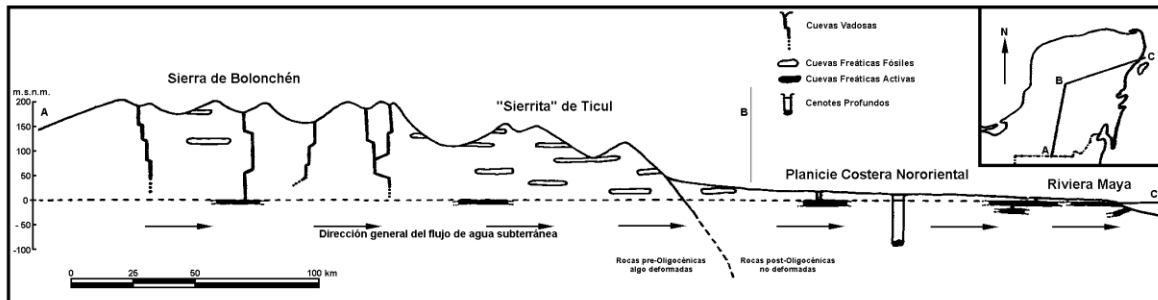
En los últimos 20 años se han realizado numerosas exploraciones en las que se han descubierto más de 800 kilómetros de galerías subterráneas inundadas en la costa oriental del estado de Quintana Roo, incluyendo las más extensas cavernas subacuáticas del mundo, de las cuales una es la cavidad más larga de México y la segunda del mundo, con más de 300 kilómetros de galerías. La presencia de estalactitas y estalagmitas, e incluso de restos arqueológicos pre-Mayas, indican que estas cavidades estaban secas durante la última era glacial, cuando el nivel del mar se encontraba hasta 100 metros bajo el nivel actual (Espinasa, 2015).

⁶ Variaciones lentas y continuas del nivel del mar, que fluctúan en el tiempo, debidas a movimientos ascendentes o descendentes del océano, y que son de alcance mundial (Glosario geografía, 2012).

En el centro de la península, particularmente en los alrededores de Valladolid, se ha encontrado también un gran número de cenotes de gran extensión vertical, incluso superior a los 100 metros. Lugo et al. (1992) proponen que dichos cenotes pudieran haberse desarrollado, por disolución de brechas de colapso, por encima de evaporitas que han sido disueltas entre los estratos. En la porción oriental de la península, depresiones alargadas y algunos lagos pudieran haberse desarrollado como poljes asociados a fallamiento normal.

Espinasa (2015) argumenta que, en el sur, en la mayor parte del relieve de lomeríos y planicies se presenta un relieve de karst tropical de cúpulas (kuppenkarst) de hasta 100 metros de altitud, pero menos de 30 m de relieve máximo, con los cerros rodeados de planicies. La porción norte (Sierrita de Ticul) no presenta drenaje superficial y todas las precipitaciones son captadas de forma difusa por el lapiaz hacia el acuífero kárstico. Existen cientos de cavernas de origen freático, fósiles que no se relacionan con el drenaje actual. En cambio, hacia el sur (Sierra de Bolonchén) se localizan numerosos cauces de arroyos temporales que suelen terminar en dolinas, que dan paso a cavidades de tipo vadoso de invasión, con tiros verticales y entradas subhorizontales que rápidamente transmiten el agua captada hasta el nivel freático, donde se han encontrado depresiones totalmente inundadas. Se considera que estas cavidades pudieran representar las formas de captación de los sistemas kársticos que desembocan en la costa de Quintana Roo (Figura 20).

Figura 20. Patrón de desarrollo kárstico en la península de Yucatán (Espinasa, 2015).



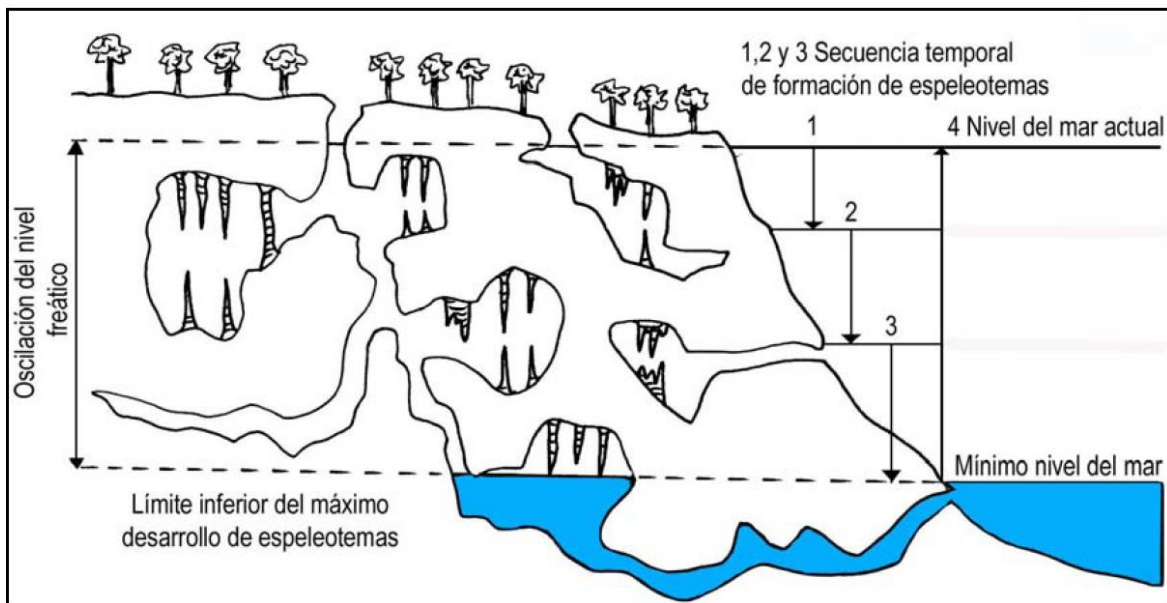
2.3.1. LOS CENOTES

Cenote es el término que hace referencia en México a dolinas o úvalas que conectan la superficie del terreno con cavidades subterráneas que generalmente presentan un nivel freático muy cercano a la superficie. García y Ordoñez (2010) señalan que con frecuencia los cenotes tienen conexión hidráulica entre sí a través de cavidades y galerías subterráneas y en muchos casos tienen salida directa al mar. El alto grado de karsticidad del sistema se ha dado por varios factores: Gran presencia de material carbonatado en los estratos, una acelerada y abundante infiltración favorecida por la morfología plana del terreno, elevada precipitación sobre una superficie con bastante vegetación, un nivel freático actual muy cercano a la

superficie que ha fluctuado considerablemente en los últimos 20.000 años, y la proximidad al mar, con el que existe conexión hidráulica.

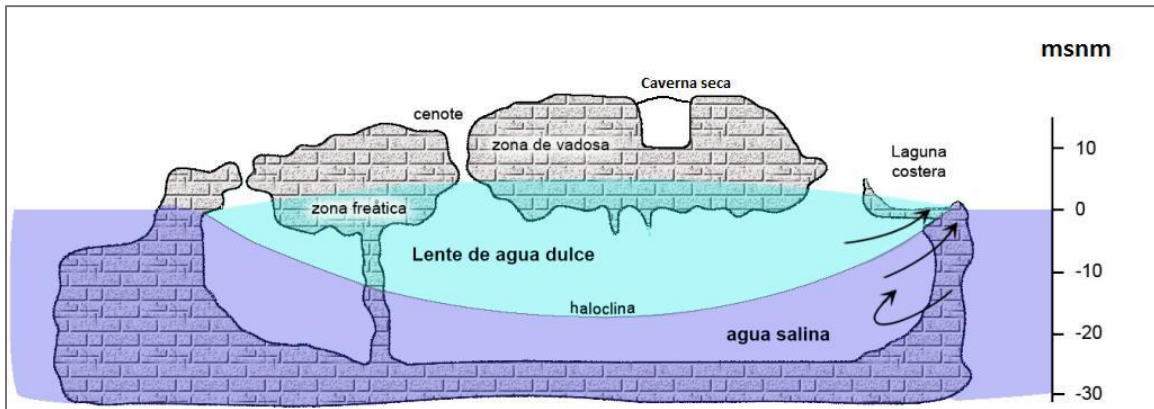
Los cenotes existentes en la actualidad, donde se encuentran estructuras kársticas constructivas, hacen referencia a una época geológica anterior en la que el nivel freático se localizaba a mayor profundidad, dejando galerías aireadas (no inundadas) que permitían la formación de estalactitas, estalagmitas y columnas, como estructuras principales. Ward & Weidie (1978) consideran que, durante la actividad glacial la retirada del nivel del mar produjo un descenso del nivel freático hasta igualarse con el nivel de este, originando la formación de conductos kársticos con un sentido de drenaje preferencial hacia el mar (Figura 21).

Figura 21. Esquema de la variación del NAF durante los últimos 20.000 años y su relación con la formación de espeleotemas (García y Ordoñez, 2010).



Después de la máxima expansión del hielo, el calentamiento y deshielo de los glaciares ocasionó una subida del nivel del mar que fue rellenando los conductos kársticos haciendo que subiera el nivel freático en toda la península de Yucatán (García y Ordonéz, 2010). En la actualidad, muchas de las cavidades del sistema kárstico de la zona este de Quintana Roo contienen agua dulce en la parte superior y agua salada en la parte inferior, separada por una franja más o menos neta definiendo una haloclina. La profundidad a la que se encuentra esta interfaz se incrementa a medida que se avanza hacia el interior de la península (Figura 22).

Figura 22. Representación conceptual de un medio kárstico costero. (Monroy, 2016)

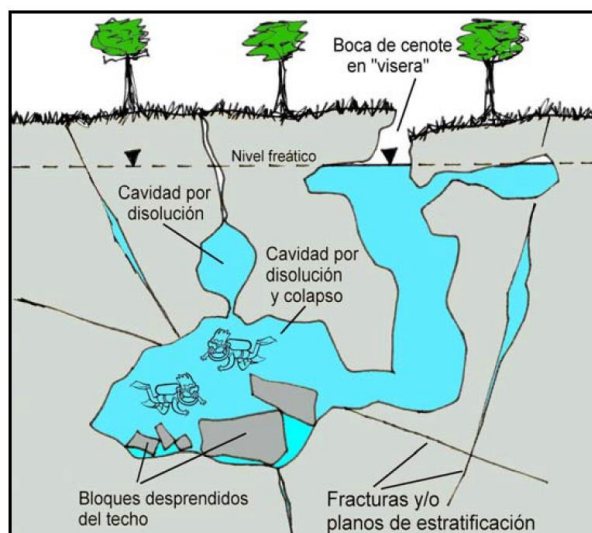


MORFOLOGÍA KÁRSTICA DE LOS CENOTES

En primera instancia, se forman cuevas y galerías por disolución de las rocas carbonatadas que entran en contacto con el agua subterránea ligeramente ácida. Desde el punto de vista de García y Ordoñez (2010), el agua subterránea que se infiltra a través de la zona de vacíos empieza a circular por los conductos que ya existen haciéndose más ácida y disolviendo lentamente la roca, agrandando las fracturas y planos de estratificación por donde circula. Tinajero (2016) sostiene que, cuando el agua alcanza la zona saturada, continúa disolviendo la roca creando un sistema de galerías subterráneas y red de drenaje, buscando puntos de descarga naturales. En este proceso las galerías se van interconectando entre si tanto horizontalmente como verticalmente, creando zonas de inestabilidad estructural dentro del sistema de cavernas, que pueden producir desplomes del techo, los cenotes se forman cuando esto ocurre y queda conectada la parte superficial con una cavidad.

Los cenotes se pueden originar por dos procesos, por disolución desde la superficie o “dolina”, o por colapso de la superficie del terreno cuando debajo hay una cueva subterránea (Figura 23). El factor desencadenante es la fuerza de gravedad cuya efectividad aumenta: con el peso de los materiales que tenga por encima, por la presencia de fracturas o planos de debilidad (p. ej. estratificación) y por el descenso del nivel freático, que actúa disminuyendo la presión hidrostática sobre el techo de la cavidad. (García y Ordoñez, 2010).

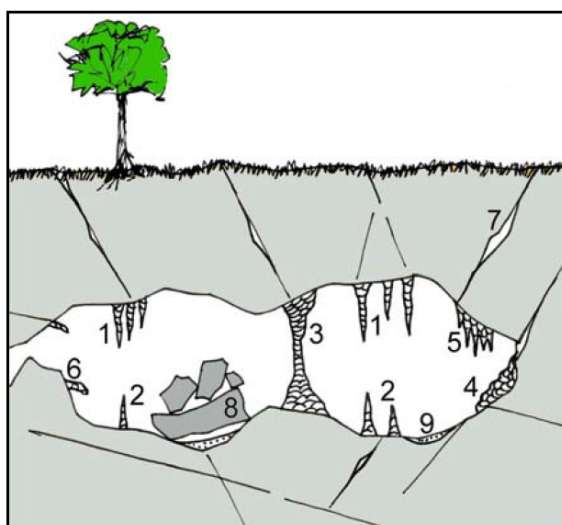
Figura 23. Esquema del aspecto de los conductos kársticos según su origen (García y Ordoñez, 2010).



FORMAS CONSTRUCTIVAS ENDOKÁRSTICAS

Las formas constructivas endokársticas (subterráneas) reciben el nombre de espeleotemas. Estas se forman cuando el agua de infiltración llega a una depresión (libre de agua) y una parte del dióxido de carbono disuelto en el agua fluye, favoreciendo la precipitación de una pequeña cantidad de calcita que poco a poco formará una estructura de mayor tamaño (García y Ordoñez, 2010). Este proceso es muy similar en todos los espeleotemas y en cuanto más aireada esté la cavidad, más efectivo será el proceso de precipitación. En la Figura 24 se presenta la clasificación de estas estructuras endokársticas según García y Ordoñez (2010).

Figura 24. Clasificación de espeleotemas y otros rasgos característicos del endokarst (García y Ordoñez, 2010).



1. Estalactitas.
2. Estalagmitas.
3. Columnas.
4. Terrazas travertínicas y gours.
5. Cortinas.
6. Discos.
7. Conducto de disolución.
8. Bloques desprendidos.
9. Depósitos de decantación.

A continuación, se describen los espeleotemas que se presentan en la Figura 25

- Las **estalactitas** son estructuras que cuelgan del techo de las cavidades, se forman por precipitación de calcita gota a gota y capa a capa, creciendo desde el techo hacia abajo. Otra forma kárstica muy típica es la **cortina**, presentando un aspecto de lámina de roca que cuelga del techo, con un origen muy similar al de las estalactitas. Cuando el flujo de agua que viene desde el techo de la cueva circula con cierta energía, algunas gotas de agua pueden escurrir por la estalactita y caer al suelo, donde precipita una pequeña cantidad de calcita. Si este proceso continúa en el tiempo, se repetirá el proceso descrito para las estalactitas, pero en sentido opuesto, creciendo desde el suelo hacia el techo y formando las **estalagmitas**.
- Si una estalactita y una estalagmita crecen y se juntan, forman otro tipo de estructura kárstica denominada **columna**. Por otra parte, los **discos** son estructuras de precipitación que crecen en las paredes de las cavidades perpendicularmente a ellas y finalmente, los **gours** son pequeñas balsas con los bordes constituidos de calcita, dando lugar a pendientes de aspecto escalonado. Se forman cuando el agua que circula por ellas se ventila por el flujo y precipita la calcita.

2.3.2. ASENTAMIENTOS Y COLAPSOS REPORTADO EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

Según dice Bautista (2016), el terreno de la península de Yucatán está en riesgo de colapsar debido a las formaciones kársticas presentes en el subsuelo. La zona de mayor riesgo está en el estado de Yucatán, específicamente en el centro, noreste y poniente, dónde se encuentra el “anillo de cenotes” que se formó como parte del Cráter de Chicxulub hace 65 millones de años.

Los cenotes representan un gran peligro para la población, los daños en las ciudades pueden ser desde ruptura de tuberías (agua, luz, drenaje) hasta la formación de grietas y asentamientos que comprometen la estabilidad estructural de las construcciones, igualmente pueden afectar carreteras, vías de ferrocarril y canales de riego (Fragoso y Pereira, 2018). No obstante, los cenotes son de gran importancia para el ecosistema de la zona ya que son lugares de recarga de los acuíferos. Incluso, en su interior hay ríos o arroyos de agua dulce, por lo que son una reserva natural necesaria de conservar. Bautista (2016) afirma que se ha elaborado un mapa en el que se determinó la cantidad de depresiones que se encuentran en la península de Yucatán, registrando 6717 cavidades, en un área de 454 kilómetros cuadrados.

En los siguientes párrafos se describen algunos colapsos y asentamientos que se han registrado en los últimos años en la zona.

- **Colapso en un campo de cultivo en Chencoh (febrero, 2011)**

Formación de una dolina de disolución en la que el flujo de agua deterioró gradualmente el tercer estrato de suelo ocasionando un colapso con 23 m de profundidad y 14 m de diámetro (Figura 25). Se reportó en un campo de cultivo en la zona menonita, en Chencoh, el área donde limitan los municipios de Champotón, Calakmul y Hopelchén (Info7, 2011).

Figura 25. Colapso en un campo de cultivo en Chencoh (Info7, 2011)



- **Colapso frente al hotel Iberostar, Cancún (agosto, 2015)**

Una dolina de colapso se originó exponiendo el nivel freático, con 12 m de diámetro y 2.5 m de profundidad (Figura 26). Se presentó a la altura del kilómetro 307+700 de la carretera federal: Playa del Carmen -Cancún, frente al hotel Iberostar, este hecho afectó al menos a 30 mil personas que se trasladaban por esta vía hacia Cancún, Puerto Morelos, Playa del Carmen y Tulum (Milenio, 2015).

Figura 26. Colapsos frente al hotel Iberostar, Cancún (Milenio, 2015)



- **Colapsos en la Laguna de Chakanbacán (agosto, 2018)**

Casi la mayor parte del agua en la Laguna de Chakanbacán se drenó en cuestión de días luego de una serie de colapsos que originaron la apertura de tres dolinas con 12 y 6 m de diámetro y 4 y 6 m de profundidad, así como la formación de una gran cantidad de grietas (Figura 27). Se ubica cerca de la comunidad de Nicolás Bravo en el estado de Quintana Roo (Wright, 2018).

Fragoso (2018) destaca que la laguna tiene aproximadamente 2 km de longitud, ocupa una extensión de casi 50 hectáreas y se encuentra ubicada en el lado oeste de una serie de depresiones de 761 hectáreas formadas a lo largo de una línea de debilidad que corre paralela a una pendiente de contacto entre la formación Icaiché (muy antigua) y la formación Calizas del Peten (de mediana antigüedad). Uno de los colapsos se formó exactamente en la orilla de una depresión más antigua que se había llenado de agua (Chakanbacab) lo que originó que toda el agua contenida se infiltrara rellenando las grietas y fracturas que se formaron, arrastrando gran cantidad de materiales.

Figura 27. Colapsos en la Laguna de Chakanbacán (Wright, 2018).



- **Colapso en Xpu-Há que revela cavidad con aguas cristalinas (junio, 2020)**

Cerca de la zona de Xpu-Há, en la Riviera Maya, a la altura del kilómetro 307+265 de la carretera federal: Playa del Carmen - Cancún, se presentó un colapso revelando la existencia de una cavidad con aguas cristalinas (Figura 28) que tras una exploración del Círculo Espeleológico del Mayab se descubrió que forma parte del sistema de ríos subterráneos más grande del mundo (Radio Fórmula, 2022). En su interior se encontraron vestigios con poco más de 2.5 millones de años de antigüedad pertenecientes al periodo Pleistoceno y Holoceno.

De igual manera se encontró una biósfera conformada por organismos invidentes como camarones, cochinillas y crustáceos; en el techo hay restos de moluscos, así como de distintas raíces de árboles que toman agua de la cavidad. La posible causa del colapso podría deberse a que, por una obra reciente, se dejaron materiales de construcción a un lado y el peso pudo haber debilitado el techo de la cavidad (Lakebuena, 2020).

Figura 28. Colapso en Xpu-Há que revela cavidad con aguas cristalinas (lakebuena, 2020).



- **Asentamiento cerca al hotel Iberostar, Cancún (febrero, 2021)**

En el kilómetro 314 de la carretera federal Playa del Carmen -Cancún se registró un asentamiento con una fractura que atravesó la vía en ambos carriles con un riesgo de colapso aún mayor (Figura 29). La falla ocurrió muy cerca al punto donde en agosto de 2015 (frente al hotel Iberostar) se registró un colapso que dejó incomunicada a la Riviera Maya con Cancún por varios días, a través de dicha vía (Hernández, 2021).

Figura 29. Asentamiento cerca al hotel Iberostar, Cancún (Hernández, 2021).



Fragoso y Pereira (2018) destacan la importancia de crear planes y programas de desarrollo urbano, programas de manejo y políticas de uso de suelo afines con las características geomorfológicas y del suelo, para prever daños como los mencionados anteriormente. Esto ha sido recomendado por numerosos autores, no obstante, las medidas de prevención y las recomendaciones que hay en los programas de desarrollo urbano no son llevadas a cabo apropiadamente por la administración, lo cual es muy similar en todo el mundo.

Los mismos planes y programas también representan un problema debido a que gran parte de ellos no toman en cuenta las características y propiedades de los suelos en los ejercicios de planeación, por ello, es de vital importancia la gestión de diferentes áreas en entornos urbanos para construir criterios multidisciplinarios en el tratamiento de estos problemas y su inclusión como normas de observancia obligatoria, no como simples recomendaciones (Fragoso y Pereira, 2018).

3. MÉTODOS DE EXPLORACIÓN

La exploración in situ constituye la parte esencial de los estudios geológico-geotécnicos necesarios para el proyecto y construcción de una obra de ingeniería en un terreno kárstico. Según González de Vallejo (2002), las actividades de investigación geotécnica deben ir en consonancia con las distintas fases de un proyecto:

- **Estudios previos:** Revisión de información, fotointerpretación, visita y reconocimiento previo de campo.
- **Anteproyecto:** Elaboración de la cartografía geológico-geotécnica (escalas 1:5.000-1:10.000), recolección de datos hidrológicos-hidrogeológicos e investigación geotécnica básica (prospección geofísica, sondeos espaciados y ensayos de identificación).
- **Proyecto:** Investigación geotécnica de detalle (prospección geofísica de detalle, sondeos en cada estructura y en toda la zona del proyecto, ensayos in situ y ensayos de laboratorio completos) y elaboración de cartografía geotécnica detalle (escalas 1:500-1:2.000).
- **Construcción:** Seguimiento geotécnico (planos geotécnicos de obra, revisión de estabilidad de excavaciones y túneles, control de parámetros geotécnicos y cimentación de estructuras) e instrumentación (Ensayos in situ y control de calidad).
- **Explotación:** Auscultación (seguimiento obra-terreno).

3.1. ESTUDIOS PREVIOS

Los estudios previos tienen como objetivo el conocimiento geológico-geotécnico general de la zona en donde se va a situar el proyecto. Gran parte de estos estudios se basan en la revisión de la información disponible, la fotointerpretación y en el reconocimiento geológico-geotécnico de campo (González de Vallejo, 2002).

3.1.1. REVISIÓN DE INFORMACIÓN Y ANTECEDENTES

Este trabajo consiste en la revisión de bibliografía, publicaciones e informes, sobre el proyecto y del sitio, así como mapas geológicos y de otro tipo. Es igualmente importante consultar documentos e informes sobre otros proyectos realizados en la zona, como carreteras, obras hidráulicas, etc.

Los mapas de riesgo kárstico son documentos de gran utilidad en esta etapa, delimitan las regiones donde se ha desarrollado o se puede desarrollar karst y resaltan su nivel de

peligrosidad (severo, alto, moderado, bajo). A nivel mundial se destaca la elaboración de este tipo de mapas en Estados Unidos (Davies et al., 1984) y en España (Ayala et al., 1986). De igual manera, otros autores como Hollingsworth (2007, 2009) y Chen et al. (2017) han realizado la delimitación de zonas kársticas a nivel mundial. En México se cuenta con el Mapa de susceptibilidad a fenómenos kársticos (Espinasa y Nieto, 2014).

Asimismo, las curvas de nivel de los mapas topográficos de detalle ayudan a detectar depresiones someras difíciles de reconocer en campo o mediante interpretaciones fotogeomorfológicas (Pinillos, 2015). Diversas técnicas geodésicas como la fotogrametría digital, los modelos digitales del terreno y los GPS de alta resolución pueden ser aplicadas para la identificación de zonas afectadas por subsidencia y la cuantificación del fenómeno.

3.1.2. FOTOINTERPRETACIÓN Y TELEDETECCIÓN

Las fotografías aéreas son una herramienta de gran utilidad para los análisis de peligrosidad por subsidencia (Pinillos, 2015). Las imágenes tomadas en años previos pueden ayudar a localizar dolinas que han quedado ocultas. Por otra parte, el análisis de fotografías aéreas tomadas en distintas fechas suministra información cronológica sobre la generación de las dolinas. Otro tipo de técnicas de teledetección como la interferometría de radar, puede ayudar a localizar zonas sometidas a una subsidencia gradual, así como a cuantificar la velocidad de la deformación. En los siguientes apartados se resumen los aspectos más aplicados de ambos métodos.

FOTOINTERPRETACIÓN

La fotointerpretación se basa en la fotogrametría, una técnica que consiste en proyectar una imagen en tres dimensiones, a partir de dos pares de fotos del mismo lugar, pero con distintos ángulos, esta técnica presenta las siguientes ventajas (González de Vallejo, 2002):

- Permite reconocer superficies muy extensas, pudiendo analizar fácilmente no solo las características de la zona del proyecto, sino también sus áreas limítrofes.
- El carácter extensivo de la fotointerpretación posibilita apreciar factores regionales de posible interés en el proyecto.
- En relación con otros métodos de investigación, la fotointerpretación es la técnica más rápida y económica.

Existen varios tipos de fotografías aéreas, algunas de las más utilizadas son: fotografías a color, fotografías en blanco y negro (Figura 30) y, fotografías infrarrojas o falso color, siendo estas últimas muy útiles para la identificación de zonas kársticas ya que producen tonalidades distorsionadas que facilitan la identificación de oquedades, vegetación (que aparece en rojo), zonas de agua, de humedad y redes de drenaje (González de Vallejo, 2002).

Un factor importante es la escala de la fotografía. En estudios previos las escalas más útiles en ingeniería geológica son las comprendidas entre 1/30.000 y 1/5.000. Como apoyo para los

reconocimientos de campo las escalas pueden variar entre 1/10.000 y 1/5.000. Dado lo anterior el nivel de precisión de las fotografías es un aspecto muy relevante (Olivos, 2014).

Por último, González de Vallejo (2002) hace hincapié en que antes de analizar una foto aérea, o encargar un vuelo para una zona concreta, debe tenerse en cuenta la época del año y la hora del día, ya que influyen en la calidad de la luz, la longitud de las sombras, y la cubierta de nubes.

Figura 30. Línea férrea Palenda-La Coruña afectada por deslizamientos y agrietamientos kársticos; escala 1/4.000 (González de Vallejo, 2002).



TELEDETECCIÓN

Ardila y Quintero (2013) señalan que la teledetección o detección a distancia se basa en el registro de la radiación electromagnética utilizando sensores remotos de diferentes tipos que no están en contacto físico con los objetos que emiten la energía (cámaras fotográficas, escáneres, sistemas de radar, etc.) y que son portados por diferentes vehículos de navegación aérea, unos ubicados en la atmósfera (globos, aviones, helicópteros, etc.) y otros fuera de la misma (satélites, estaciones orbitales, naves espaciales, etc.).

Cualquier objeto emite y/o refleja una radiación electromagnética como consecuencia de su interacción con las fuentes de energía propias o externas. Cada objeto tendrá una respuesta espectral propia, en cuanto a energía reflejada o energía emitida, que se conoce como “signatura o firma espectral”. Las características de dicha signatura dependen en primer lugar de su estructura atómica y molecular, de las características de su superficie, y de su temperatura. La proporción de la radiación incidente que es reflejada, absorbida y transmitida depende de las características del material que se observa y del estado de su superficie y varía en las distintas bandas del espectro electromagnético (González de Vallejo, 2002).

3.1.3. LEVANTAMIENTO GEOLÓGICO Y GEOTÉCNICO EN CAMPO

El levantamiento en campo de la zona de estudio es una de las tareas más importantes en la fase de estudios previos. Las estructuras de subsidencia que se puedan observar en los afloramientos (naturales y artificiales) suministran una valiosa información sobre diversos aspectos como: Dónde ha actuado la subsidencia en el pasado, cómo ha actuado la subsidencia (procesos y mecanismos) y dónde puede actuar en el futuro (Pinillos, 2015).

Asimismo, una fuente de información especialmente valiosa y a menudo obviada son las exploraciones espeleológicas. Según Pinillos (2015), el estudio del endokarst puede aportar información sobre la distribución de las cavidades accesibles y la localización de los puntos donde se produce el avance del techo de cavidades hacia la superficie pudiendo eventualmente dar lugar a una dolina en un futuro próximo.

Con respecto a los levantamientos en campo, González de Vallejo (2002) recomienda realizar los siguientes:

- **Datos geológicos**
 - Tipos de materiales, litología y composición, contactos litológicos, estratificación y estructuras sedimentarias.
 - Estructura geológica y contactos tectónicos, grado de fracturación, discontinuidades sistemáticas (diaclasas, foliación, estratificación) y singulares, zonas de falla y brechas, actividad tectónica y neotectónica.
 - Formaciones superficiales, zonas de alteración y grado de meteorización.
 - Morfología, condiciones geomorfológicas, procesos y evolución morfológica del terreno.

- **Descripción geotécnica de suelos**

Si se encuentra en superficie algún material de tipo suelo, debe hacerse una descripción de las características observadas, haciendo una clasificación mediante el SUCS, así como una descripción del color observado, la estructura (homogénea, estratificada, bandeada o laminada), la densidad en suelos granulares y la consistencia en suelos cohesivos.

- **Descripción geotécnica de macizos rocosos**

Comprende tres ámbitos: caracterización de la matriz rocosa, descripción de las discontinuidades y caracterización de las propiedades del macizo rocoso.

- **Datos hidrogeológicos e hidrológicos**
 - Situación del nivel o niveles freáticos, inspección de pozos, fuentes y manantiales.

- Localización de acuíferos, materiales permeables e impermeables, zonas de encharcamiento, etc.
- Localización de zonas de recarga y drenaje.

- **Inestabilidades del terreno**
 - Indicios o señales de deslizamientos o desprendimientos.
 - Áreas de erosión intensa.
 - Zonas afectadas por subsidencias, hundimientos y cavidades.

- **Accesos y situación de investigaciones**
 - Localización de caminos y vías de acceso para situar las investigaciones in situ, especialmente los sondeos.
 - Disponibilidad de agua, electricidad y permisos.
 - Selección de posibles emplazamientos para sondeos, geofísica, calicatas y estaciones geomecánicas.

- **Observación de patologías en estructuras**

Inspección de edificios, puentes, túneles, terraplenes, muros y demás estructuras que se encuentran en el entorno de la zona y que presentan algún tipo de daño estructural. Se debe prestar atención a la aparición de grietas y otros signos de distorsión, como inclinación en paredes, muros, etc.

3.2. SONDEOS

Una de las técnicas de estudio más frecuentemente utilizadas en zonas en las que se va a llevar a cabo algún tipo de obra civil son los sondeos mecánicos. Sin embargo, además de ser relativamente costosos, se encuentran una serie de limitaciones que deben ser tenidas en cuenta:

- Generalmente no permiten detectar de forma fiable las zonas afectadas por subsidencia por flexión sin generación de cavidades.
- Su capacidad para detectar cavidades es limitada, a no ser que se lleven a cabo con un espaciado reducido.
- Las interpretaciones a partir de los datos de sondeo en ocasiones poseen un alto grado de incertidumbre ya que las estructuras pueden ser muy complejas.

Al realizar los sondeos, las zonas que se presentan karstificadas podrán detectarse como huecos o también, se pueden encontrar los materiales que rellenan las oquedades (Pinillo, 2015). En la Figura 31.a se presenta una caja de sondeo en la que se ha detectado una oquedad que no se encontraba rellena. En otros casos, las karstificaciones que presentan los materiales pueden estar rellenas de materiales areno-arcillosos (Figura 31.b).

Figura 31. Caja de sondeo a) calizas sin relleno b) calizas con relleno arenoso (Pinillos, 2015)



(a)

(b)

Un último ejemplo de karstificaciones que pueden ser detectadas en los sondeos son las cristalizaciones ocurridas por circulación de agua entre los materiales calcáreos. En la Figura 32 se puede observar una cristalización de calcita en calizas cretácicas.

Figura 32. Cristalización de calcita en calizas cretácicas (Pinillos, 2015)



Los procedimientos de perforación dependen de la naturaleza del terreno y del tipo de muestreo y testificación que se vaya a realizar. González de Vallejo (2002) refiere que los más usuales son los sondeos a rotación (usados para recuperar testigos) y los sondeos helicoidales y a rotoperusión (empleados solamente para detectar la ubicación de una posible cavidad).

3.2.1. SONDEOS A ROTACIÓN

Los sondeos a rotación pueden perforar cualquier tipo de suelo o roca hasta profundidades muy elevadas y con distintas inclinaciones (Figura 33). La profundidad habitual no excede los 100 m, aunque pueden alcanzarse los 1.000 m. La extracción de testigo es continua y el porcentaje de recuperación del testigo con respecto a la longitud perforada puede ser muy alto, dependiendo del sistema de extracción (González de Vallejo, 2002).

Figura 33. Sondeo a rotación a) Vertical b) Inclinado (González de Vallejo, 2002)



En un sondeo a rotación el sistema de perforación consta de los siguientes elementos integrados en las baterías: cabeza, tubo porta testigo, extractor, manguito portaextractor y corona de corte. González de Vallejo (2002) los describe de la siguiente manera:

“La cabeza es la pieza de unión entre el tubo portatestigo, donde se recoge el testigo que se extrae de la perforación, y el varillaje que le trasmite el movimiento de rotación y empuje ejercido por la máquina de perforación. El manguito porta-extractor aloja un muelle (extractor) que sirve para cortar el testigo al sacarlo y no dejar que se deslice durante la maniobra de extracción. La corona es el elemento perforador que se emplea en el sondeo y dispone de unos útiles de corte que pueden ser de widia (carburo de wolframio) o de diamantes. Las coronas de widia se emplean en suelos y rocas blandas, y las coronas de diamante en rocas duras o muy duras”.

Las baterías de rotación pueden ser de tubo simple o doble. Cuando se requieren recuperaciones muy altas se emplea el tubo doble, en el que el agua desciende por el contacto entre ambos tubos, siendo en la base del tubo, en su unión con la corona, donde se puede producir el lavado del testigo. Por otro lado, el tubo interior va montado sobre rodamientos de bolas que permiten que éste permanezca prácticamente estacionario mientras gira el tubo exterior (González de Vallejo, 2002).

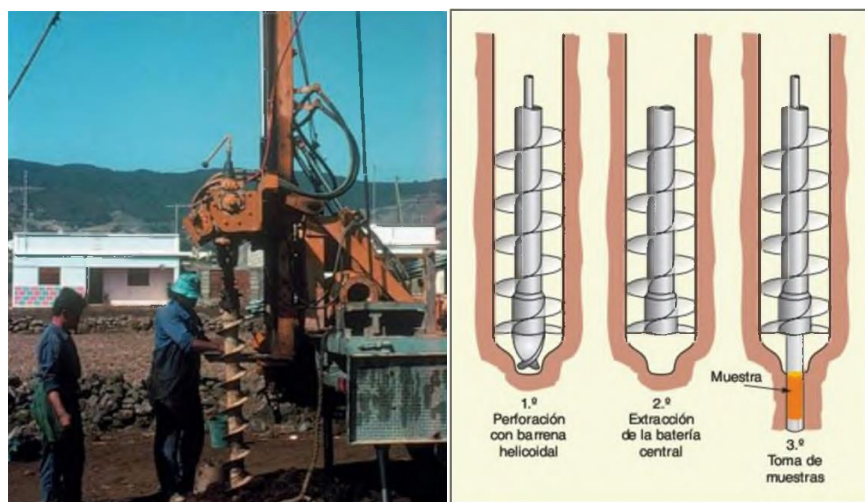
Teniendo en cuenta a Castilla y Herrera (2012), en condiciones favorables de perforación se suele utilizar el aire como fluido de limpieza. En condiciones difíciles pueden usarse agua o

lodos. Las dos principales variantes del sistema de rotación son la rotación con circulación directa y la rotación con circulación inversa. La principal diferencia entre ambas radica en el sentido de circulación del fluido de perforación. Sin embargo, ya los modernos equipos de perforación a rotación suelen estar preparados para trabajar a varios sistemas (circulación directa o inversa, rotopercusión, rotación con aire), pudiendo de este modo adaptarse a las condiciones específicas de cada perforación.

3.2.2. SONDEOS CON BARRENA HELICOIDAL

Un método alternativo al sondeo a rotación es la realización de una perforación con una herramienta que perfora y destroza el terreno. Frankie (2017) plantea que puede ser una barrena que en la punta tenga una trialeta o un elemento de corte apropiado para romper el terreno, evacuándolo en sentido ascendente por el giro del helicoide. González de Vallejo (2002) sostiene que los sondeos con barrena helicoidal (Figura 34) incluyen desde los que se realizan manualmente, para pequeñas profundidades (2-4 m) y diámetros (1-2 pulgadas), hasta los mecánicos, para profundidades hasta unos 40 m y diámetros de 3, 4, 6 y 8 pulgadas.

Figura 34. Sondeos con barrena helicoidal (González de Vallejo, 2002)



a) Sondeo helicoidal

b) Extracción de muestras

Aunque, el tipo de muestra que se obtiene en la sonda helicoidal es alterada, es posible en determinados casos obtener muestras inalteradas con barrenas huecas. Las barrenas son de dos tipos, huecas y normales (Figura 34b). Las primeras, a diferencia de las normales, permiten obtener muestras inalteradas sin extraer a la superficie la maniobra, y están formadas por un tubo central de mayor diámetro que en las normales. A lo largo y por el interior de las barrenas se instala un varillaje que termina al final de la cabeza helicoidal y lleva una pequeña broca. Estas varillas giran junto con la barrena hueca. Cuando se toma una muestra se extraen las varillas del interior de las barrenas, y a continuación se introduce por el interior de estas un tomamuestras (González de Vallejo, 2002).

3.2.3. SONDEOS A ROTOPERCUSIÓN

El sistema de perforación a rotopercusión (Figura 35) se basa en que la perforación se logra a través de la combinación de aplicar a la sarta de perforación un empuje y una rotación, junto con una percusión, logrando así una mejor fragmentación de la roca. Esta técnica es aplicable en investigaciones en las que los cuerpos mineralizados están próximos a la superficie o en ciertas zonas donde exista un recubrimiento difícil para cualquiera de otros métodos de perforación y sea necesario atravesar esa formación para después proseguir con otro de los métodos (Castilla y Herrera, 2012).

Figura 35. Sistema a rotopercusión (Castilla y Herrera, 2012)



Las velocidades de perforación habituales son del orden de los 5 m/hora, alcanzando profundidades máximas en torno a los 150-200 m. Según Castilla y Herrera (2012), en sondeos superficiales los métodos de perforación pueden ser con martillo en cabeza o bien martillo en fondo. A partir de 20-30m es habitual el uso de martillo en fondo. Cabe señalar que este tipo de sondeos tienen una doble finalidad: 1) Comprobar y orientar zonas fracturadas previamente y cavidades detectadas mediante estudios geológicos y geofísicos de superficie; y 2) Observar el nivel piezométrico del agua subterránea en las zonas altas del sustrato rocoso.

Entre las ventajas del método IGME (2022) resalta que los costos son bajos y las máquinas tienen fácil movilidad, la velocidad de salida de la sarta de perforación es muy rápida, no se causa daño a las formaciones permeables, no se contaminan los fluidos nativos de la formación, las barrenas tienen una larga duración y durante la perforación se puede estimar una permeabilidad aproximada de las formaciones atravesadas. Entre las desventajas hay que citar sus limitaciones en cuanto a tipo de formación y el elevado costo de compra y mantenimiento de compresores.

3.3. PROSPECCIÓN GEOFÍSICA

Los métodos geofísicos pueden proporcionar información útil del terreno en las regiones kársticas, por ejemplo, con la estimación de peligros, la exploración de aguas subterráneas y

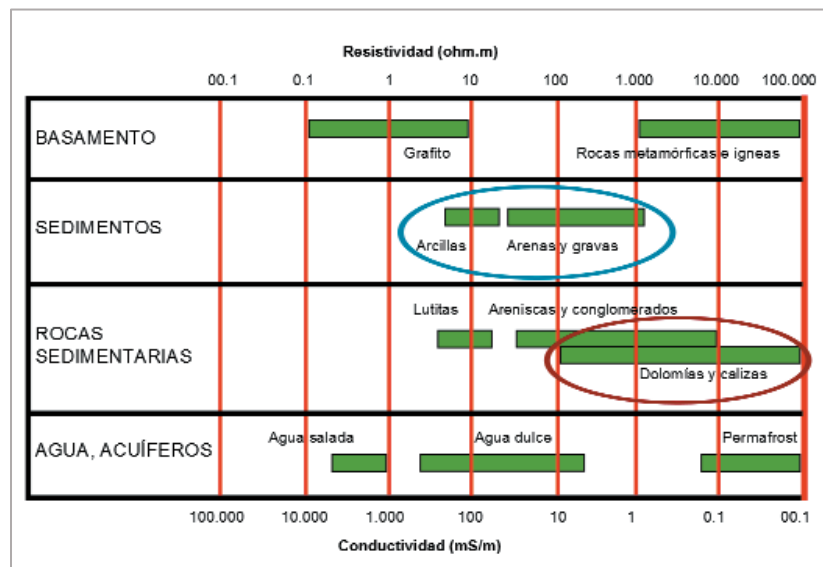
la evaluación de la vulnerabilidad. Asimismo, ayudan a detectar cavidades, estructuras de subsidencia o zonas anómalas que pueden posteriormente ser investigadas de forma directa mediante sondeos (Pinillos, 2015).

Sin embargo, Chalikakis *et al.* (2011) señalan que la caracterización adecuada de las heterogeneidades del entorno kárstico representa un desafío para la aplicación de los métodos geofísicos pues dependiendo de las condiciones climáticas, el drenaje, la saturación y las características físicas o geoquímicas del sistema, éstos pueden variar. Los conductos, por ejemplo, pueden o no estar saturados de agua, y algunas partes de la red pueden estar llenas de sedimentos no consolidados o incluso estar vacías. En este sentido, González de Vallejo (2002) agrega que existe una amplia variedad de métodos geofísicos para el reconocimiento del terreno kárstico que se dividen según el parámetro físico investigado: gravimetría (densidad), magnético (susceptibilidad magnética), eléctricos (resistividad), electromagnéticos (conductividad eléctrica y permeabilidad magnética) y sísmicos (velocidad de propagación de ondas sísmicas). A continuación, se describen los más utilizados.

3.3.1. MÉTODOS ELÉCTRICOS

Son aquellos que estudian la respuesta del terreno cuando se propagan a través de él corrientes eléctricas continuas, el parámetro físico que se controla es la resistividad (ρ) y la interpretación final se hace en función de las características geológicas de la zona en que se aplican (González de Vallejo, 2002). La resistividad es una propiedad intrínseca de las rocas (Figura 36) y depende de la litología, estructura interna y, sobre todo, de su contenido en agua, no siendo, entonces, una propiedad isótropa en la masa rocosa.

Figura 36. Valores de resistividad de las rocas más comunes (Bermejo *et al.*, 2014)



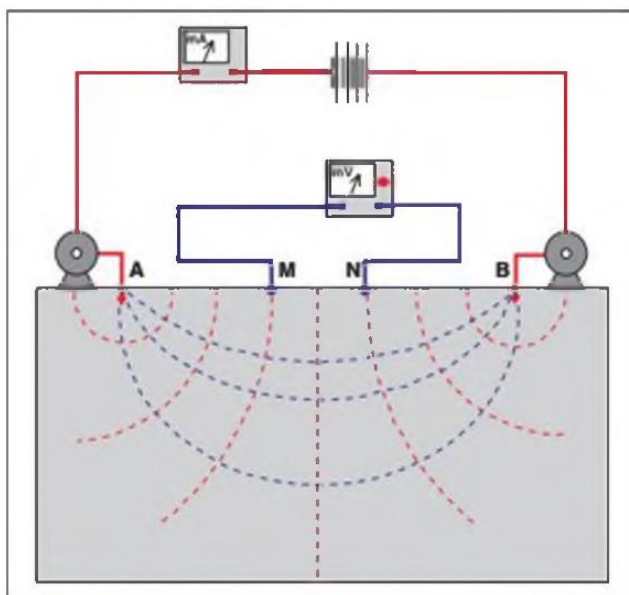
Según Bermejo *et al.* (2014), en los medios calcáreos en los que se desarrolla principalmente el karst, los valores de menor resistividad se suelen atribuir a sedimentos terrígenos (10-1000 Ω .m) que son los que se encuentran en los fondos pluviales y en los conductos colmatados. Por el contrario, los valores más resistivos son atribuidos a las rocas calcáreas del sustrato (1000-100.000 Ω .m).

El carácter infinitamente resistivo del aire perteneciente a las cavidades que se desarrollan en este tipo de rocas añade complejidad a la interpretación. Por ello, es necesario conocer las características geológicas del área estudiada.

Por su parte, González de Vallejo (2002) describe la medida de la resistividad del terreno en los siguientes pasos:

- Introducción en el terreno de una corriente continua de intensidad I, mediante dos electrodos, denominados A y B, conectados a una fuente de energía.
- Medida de la diferencia de potencial AV, generada por el paso de la corriente, entre dos electrodos denominados M y N (Figura 37).
- Cálculo de la resistividad del espesor de terreno afectado por el paso de la corriente.

Figura 37. Medida de resistividades del terreno mediante métodos eléctricos (González de Vallejo, 2002)



Bermejo *et al.*, (2014) sostienen que según la organización geométrica de los cuatro electrodos se configurarán distintos dispositivos, siendo los más utilizados Wenner-Schlumberger (Wn-Sch) y Dipolo-Dipolo (Dip-Dip). El dispositivo Wenner-Schlumberger tiene una mejor resolución en profundidad y un menor ruido, pero peor resolución espacial, mientras que el Dipolo-Dipolo localiza mejor las estructuras verticalizadas, aunque su

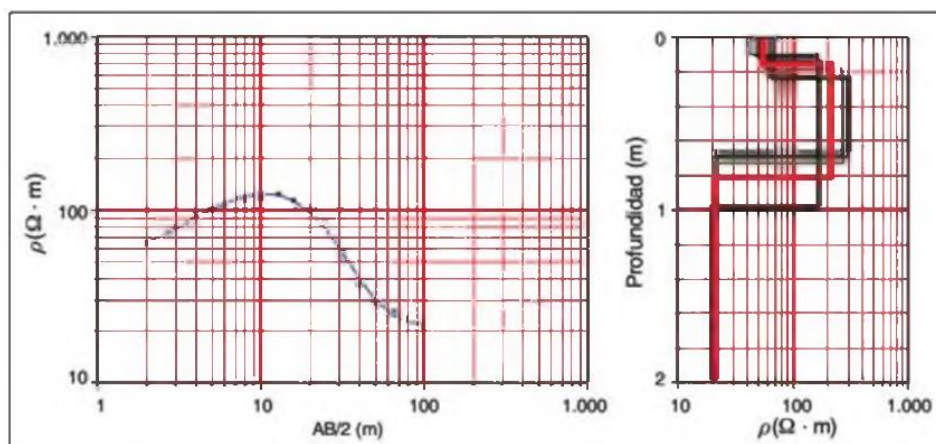
resolución en profundidad es inferior. Los métodos más comunes son los sondeos eléctricos verticales y la tomografía de resistividad eléctrica.

Es importante resaltar que los métodos eléctricos permiten conocer información sobre la litología de la roca y algunas características estructurales pueden detallarse mediante el uso de tomografía eléctrica 3D, que puede llegar a identificar las discontinuidades. Sin embargo, Chalikakis *et al.* (2011) hacen hincapié en que, la dificultad para identificar cómo implementar los electrodos correctamente en el terreno y asegurar un contacto adecuado (extremadamente difícil en los afloramientos de roca caliza) sigue siendo un problema práctico importante por resolver en entornos kársticos.

SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES (SEV)

Esta técnica consiste en separar sucesivamente los electrodos de corriente A y B del punto central, siguiendo una línea recta, y medir la resistividad en cada disposición. González de Vallejo (2002) refiere que la resistividad aparente calculada será, por tanto, la correspondiente a mayores espesores según se van separando los electrodos y se emplea generalmente la configuración Schlumberger. El resultado que se obtiene del SEV es la variación de la resistividad (ρ) con la profundidad en el punto central del perfil investigado. En la Figura 38 se muestra un ejemplo de interpretación de un SEV. Las profundidades más habituales de investigación están entre 0 y 200 m.

Figura 38. Ejemplo de sondeo eléctrico vertical (SEV) (González de Vallejo, 2002)

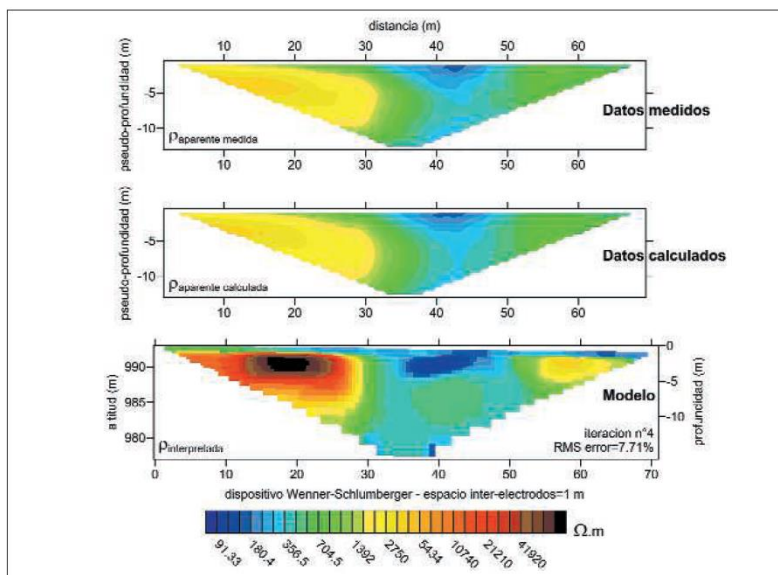


TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA (TRE)

Bermejo *et al.* (2014) plantean que en esta técnica se colocan hasta 96 electrodos equidistantes entre ellos, se realizan varias mediciones utilizándolos en diferentes configuraciones y se crean perfiles 2D y 3D con base en las diferentes resistividades eléctricas de los materiales. Posteriormente, los datos se procesan con un software de inversión que da un modelo de resistividad calculando los espesores y resistividades reales

de los materiales que se encontraron en el terreno, siendo capaz de detectar y caracterizar discontinuidades significativas, tanto en la vertical como en la horizontal (Figura 39).

Figura 39. Inversión por el método iterativo en una TRE (Bermejo et al., 2014).



La Tomografía de Resistividad Eléctrica es uno de los métodos más apropiados para el estudio del karst y sus yacimientos porque permite determinar, con suficiente aproximación, la dimensión, ubicación y potencialidad de los diferentes rellenos kársticos y cavidades, aunque las anomalías que se detectan deben ser comprobadas mediante ensayos intrusivos complementarios (Bermejo *et al.*, 2014).

3.3.2. MÉTODOS SÍSMICOS

Según González de Vallejo (2002), estos métodos estudian la propagación de ondas sísmicas producidas artificialmente en el terreno, estableciendo su relación con la configuración geológica del subsuelo. La velocidad de propagación depende básicamente de las constantes elásticas y de la densidad del medio. Los contactos entre los cuerpos geológicos con diferente velocidad de transmisión de las ondas sísmicas definen superficies de separación en las que las ondas sufren refracción, reflexión o difracción (ley de Snell).

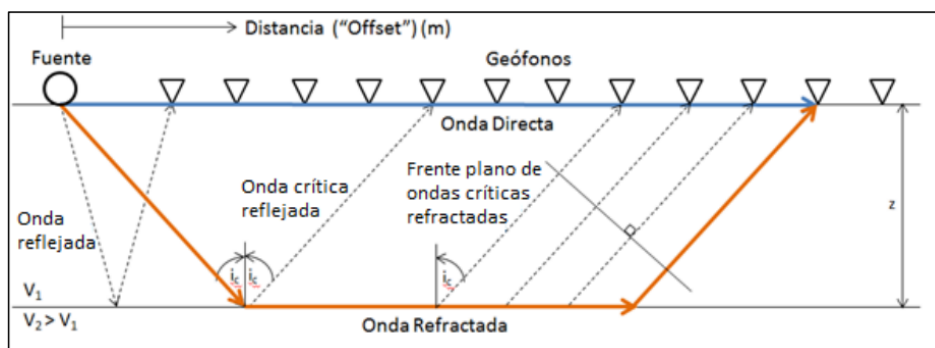
Para la detección de karst se emplea básicamente la sísmica de refracción, que estudia la energía que vuelve a la superficie tras sufrir refracción total en superficies límite del subsuelo. El modelo normal del subsuelo presenta velocidades crecientes en profundidad (suelo-roca alterada-roca sana), aunque hay excepciones donde se dan alternancias de niveles de diferente competencia y velocidad de propagación de ondas. Los métodos sísmicos tienen la ventaja de ser económicos rápidos y confiables permitiendo determinar la geometría y disposición de las rocas del subsuelo (Jaimes, 2011).

Por su parte, las técnicas de refracción sísmica pueden proporcionar una comprensión importante de las heterogeneidades kársticas cercanas a la superficie, como las rutas preferenciales y las cavidades someras (Chalikakis *et al.*, 2011). Sin embargo, la velocidad sísmica tiene que aumentar con la profundidad para lograr una profundidad de investigación suficiente ya que un manto cercano a la superficie podría ocultar estructuras subterráneas.

REFRACCIÓN SISMICA

En este ensayo se calculan los tiempos de propagación de ondas de volumen o de corte producidas en superficie a distintos receptores alineados con la fuente. De acuerdo con Humire (2013), en el caso del ensayo de refracción para ondas de corte, éstas se generan golpeando una placa rígida y fija en la superficie, en sentidos opuestos, para que se pueda observar la polarización de las ondas, y así reconocer el tiempo de llegada a cada receptor. En los receptores más cercanos a la fuente, la primera llegada corresponde a la onda directa, mientras que, para receptores más lejanos, la onda refractada podría llegar antes, siempre y cuando $V_2 > V_1$, como se muestra en la Figura 40.

Figura 40. Esquema del ensayo de refracción sísmica (Humire, 2013)



El método usa las primeras llegadas de las ondas a los geófonos (ondas P) y las llegadas de las ondas S para determinar la relación de Poisson y otros módulos dinámicos. Jaimes (2011) señala dentro de los alcances y limitaciones del método los siguientes:

- Revela variaciones en profundidad y en horizontalidad de las velocidades de onda P y S.
- Detecta la profundidad del basamento y de su relieve dependiendo de variables como longitud del tendido y energía de la fuente.
- Sólo funciona si la velocidad de propagación aumenta con la profundidad.

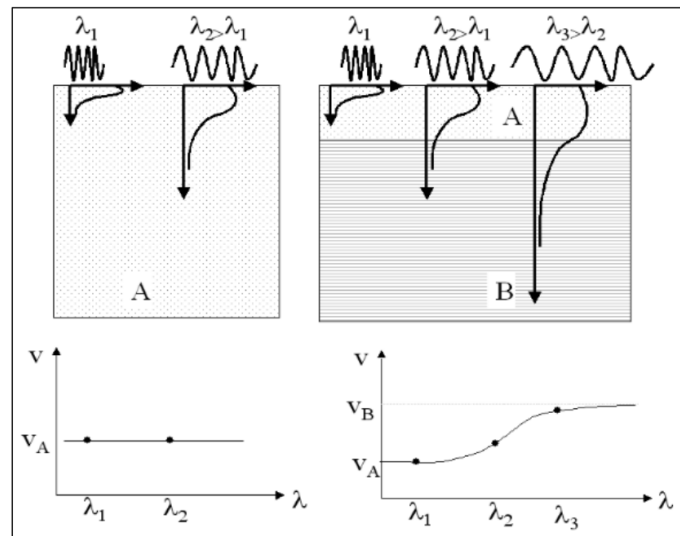
PROPAGACIÓN DE ONDAS SUPERFICIALES

En un semi-espacio homogéneo la velocidad de propagación (velocidad de fase) de las ondas Rayleigh siempre es idéntica, a diferencia de esto, en un medio estratificado la velocidad de fase depende de la frecuencia o longitud de onda (Figura 41), esta propiedad se conoce como dispersión. Humire (2013) plantea que los métodos geofísicos basados en el análisis de ondas

superficiales recurren a esta característica dispersiva para caracterizar el terreno, ya que depende de la estratigrafía, y en particular, del perfil de velocidades de ondas de corte.

Las ondas Rayleigh, dependiendo su longitud de onda (Figura 41) movilizan el suelo hasta una profundidad, así que cuando la longitud de onda es pequeña, la velocidad de fase dependerá de las propiedades de las capas superficiales, mientras que, si la longitud de onda es mayor, la velocidad dependerá en mayor medida de los estratos más profundos (Strobbia, 2003).

Figura 41. Velocidad de fase para distintas longitudes de ondas (λ_i) en un semi-espacio homogéneo (izquierda) y en un medio estratificado (derecha) (Strobbia, 2003)



De acuerdo con Humire (2013), el procedimiento para la caracterización geotécnica, basado en el análisis de la dispersión de ondas superficiales se puede resumir en:

- Observación y registro de ondas superficiales.
- Determinación de sus características dispersivas.
- Estimación del perfil de ondas de corte, basado en un proceso de inversión de las características dispersivas del sitio.

Las principales ventajas de estos métodos son: su bajo costo, su carácter no invasivo, y la posibilidad de detectar capas de material más blandos bajo capas más rígidas.

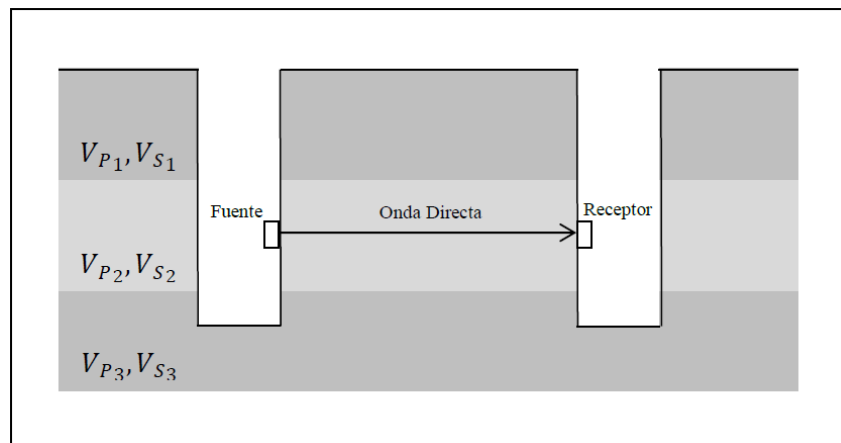
ENSAYO CROSS- HOLE

Este ensayo utiliza sondeos para medir la velocidad de las ondas sísmicas. Se realizan dos sondeos separados una distancia generalmente menor de 8 metros, uno con la fuente emisora de energía y otro con la fuente receptora situados a la misma profundidad, como se presenta en la Figura 42. Luego, se mide el tiempo de viaje entre ellos, y sabiendo previamente la distancia, se determina la velocidad de onda de corte (Jaimes, 2011). El ensayo se debe repetir

a diferentes profundidades para obtener los perfiles de velocidad, se recomienda utilizar más de dos sondeos para minimizar los errores que puedan surgir de las medidas de tiempo de disparo y los efectos del material superficial e intersondeos.

Entre las ventajas del método, Jaimes (2011) destaca que permite obtener perfiles de velocidad a profundidades de 30 a 60 metros utilizando fuentes emisoras mecánicas con fuentes tipo explosivo se pueden alcanzar mayores profundidades. Por el contrario, la desventaja del método radica en que las velocidades de las ondas sísmicas son sensibles a la distancia emisor receptor, la velocidad puede enmascarse si se atraviesan capas de alta velocidad. En este caso es recomendable usar otros métodos como la sísmica de refracción.

Figura 42. Esquema del ensayo Cross-Hole (Humire, 2013)

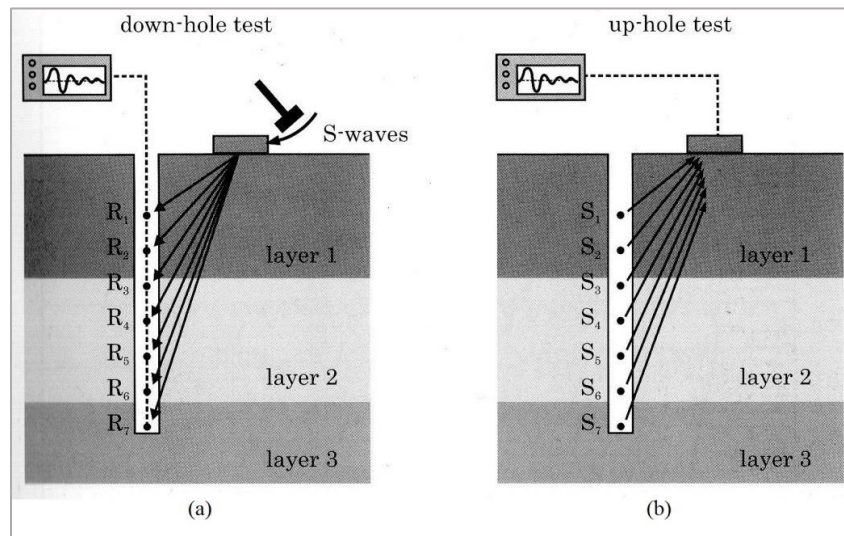


ENSAYO DOWN – HOLE (UP- HOLE)

Para este ensayo, los receptores son ubicados en la pared de la perforación mientras que la fuente se coloca en la superficie. El ensayo se puede realizar con un sólo receptor que va descendiendo para obtener la velocidad de corte a distintas profundidades, o con un arreglo de receptores distribuidos a lo largo de la perforación que graban la señal emitida por la fuente de manera simultánea (Semblat & Pecker, 2009). Esta última variante es más precisa, debido a que las señales registradas en los receptores son originadas por la misma fuente.

Humire (2013) resalta que existe un método alternativo llamado Up-Hole en el cual se golpea en la perforación a distintas profundidades y se registra la señal con un sólo receptor ubicado en superficie, tal como se observa en la Figura 43. Las limitaciones del ensayo son el grado de alteración de los suelos cuando se realiza el sondeo, posibles efectos de fluidos en los sondeos, excesivo o insuficiente impulso, efecto de ruido sísmico y efectos del nivel freático (Jaimes, 2011).

Figura 43. Esquema de los ensayos: (a) down-hole y (b) up-hole (Semblat & Pecker, 2009)



3.3.3. MÉTODOS ELECTROMAGNÉTICOS

Cimadevilla (2017) afirma que este tipo de métodos se basan en el análisis de la propagación de ondas electromagnéticas (EM) en el subsuelo en función de la fuente de ondas, natural o artificial, una de las posibles clasificaciones de los métodos electromagnéticos es la que se presenta en la Figura 44. En el caso de los métodos de fuente artificial, se componen de un sistema emisor-receptor que actúan como fuente de energía y escucha respectivamente.

Figura 44. Métodos electromagnéticos utilizados en exploración geofísica (Migliano, 2012)

FUENTE	NATURAL	<ul style="list-style-type: none"> Magnetoteléurico Audiomagnetoteléurico Potencial natural Fuente natural Sondeo geomagnético profundo
	ARTIFICIAL	<ul style="list-style-type: none"> Very low frequency (VLF) Radar de penetración terrestre (GPR) Sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (SED T) Sondeos electromagnéticos en el dominio de la frecuencia Audiomagnetoteléurico de fuente controlada, Control Source Audio Magneto Telluric (CSAMT) Radiomagnetoteléurico (RMT)

Estos métodos han resultado útiles para identificar y ubicar varios rasgos kársticos. Chalikakis. (2011) destacan que pueden proporcionar información importante sobre las variaciones laterales del karst cercano a la superficie, como fracturas rellenas y contactos laterales con otras formaciones geológicas. Estas técnicas EM usan equipos livianos con alta

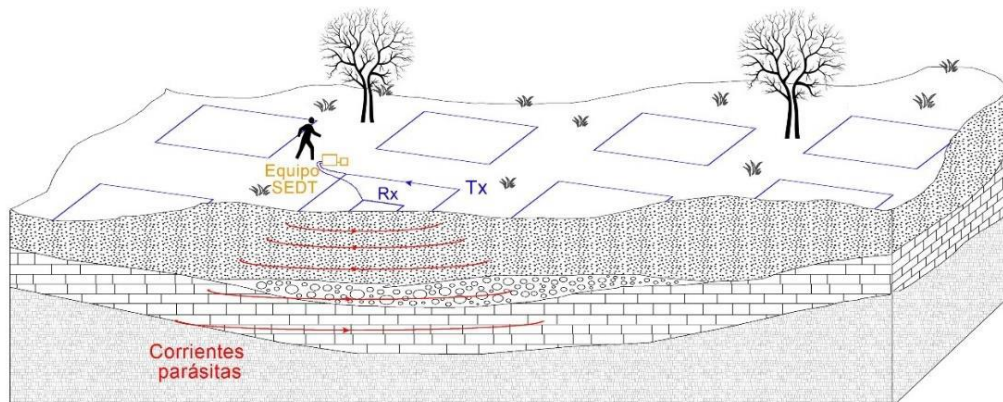
resolución y un rápido incremento de medición, lo cual es muy apreciado principalmente durante los estudios geofísicos preliminares.

SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO (SED-T)

La realización de un SED-T consiste en inyectar una corriente continua en un bucle o bobina transmisora (Tx) generando un campo magnético primario constante en el tiempo. Cimadevilla (2017) argumenta que cuando se interrumpe de forma instantánea la corriente que circula por la Tx, el campo magnético primario desaparece y esta variación temporal induce unas corrientes parásitas en los materiales conductores del subsuelo.

Estas corrientes fluyen en trayectorias cerradas, migrando en profundidad y lateralmente, disminuyendo su intensidad a lo largo del tiempo. Asociado a las corrientes parásitas o inducidas existe un campo magnético secundario que llega a superficie e induce un voltaje en la bobina receptora (Rx) (Figura 45). La forma en que decae el voltaje medido en superficie aporta información sobre la conductividad del subsuelo ya que la magnitud y distribución de la corriente inducida depende de las propiedades eléctricas del medio (Cimadevilla, 2017).

Figura 45. Concepto de los sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (Cimadevilla, 2017)



Chalikakis *et al.* (2011) refieren que estas técnicas se han utilizado con éxito sólo unas pocas veces, principalmente para localizar la parte superior de un sistema kárstico sedimentario enterrado y para caracterizar la cubierta sedimentaria suprayacente. Sin embargo, los métodos audiomagnetoteléuricos de fuente controlada (CSAMT) también han sido empleados en afloramientos kársticos donde los sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (SED-T) no funcionan correctamente.

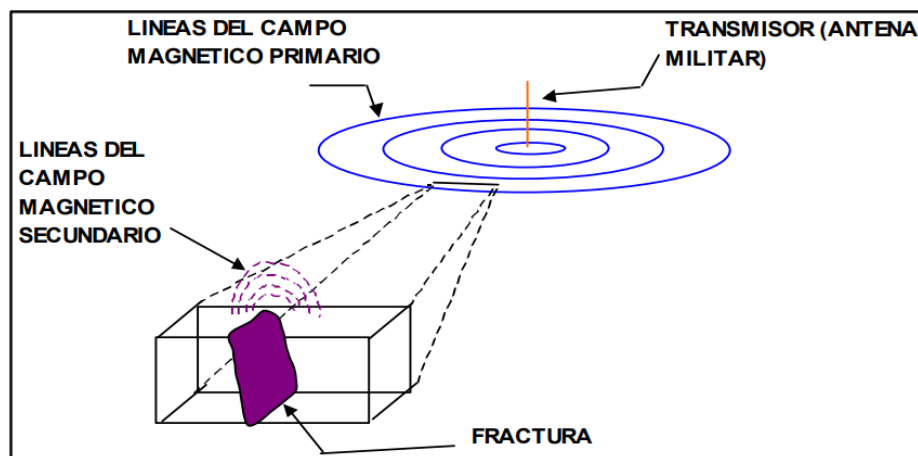
VERY LOWFREQUENCY (VLF)

La técnica de VLF se basa en la aplicación de ondas electromagnéticas de radio de muy baja frecuencia entre 3-30 KHz que pueden ser detectadas a más de 10 km; son utilizadas para determinar características eléctricas de los suelos y de rocas de baja profundidad donde existe un contraste en la conductividad eléctrica. La existencia de fallas y fracturas en el terreno aumenta la conductividad hidráulica y su porosidad, incrementando significativamente la conductividad eléctrica del terreno; esto a su vez ocasiona perturbaciones en las señales medidas con instrumentos VLF (Bortolotti, 2009).

La señal proveniente de las antenas alrededor del mundo que pueden ser captada en campo por medio de instrumentos VLF es una combinación de un campo primario (H_p) que al desplazarse en fase frente a un cuerpo conductor se convierte entonces en la fuente de un campo secundario. Es decir que, citando a Bortolotti (2009), las corrientes en el conductor son generadas cuando las ondas de radio (campo electromagnético) pasan a través de un conductor enterrado (por ejemplo, una fractura), creando un campo electromagnético secundario (Figura 46).

La gran ventaja de estos sistemas, independientemente de su precisión, es evitar la puesta en campo de pesados equipos generadores del campo primario, utilizando solamente ligeras bobinas que capten el campo resultante y pueden ser utilizados para estudiar grandes zonas con bastante rapidez (González de Vallejo, 2002).

Figura 46. Campos electromagnéticos generados por ondas de radio (Bortolotti, 2009).



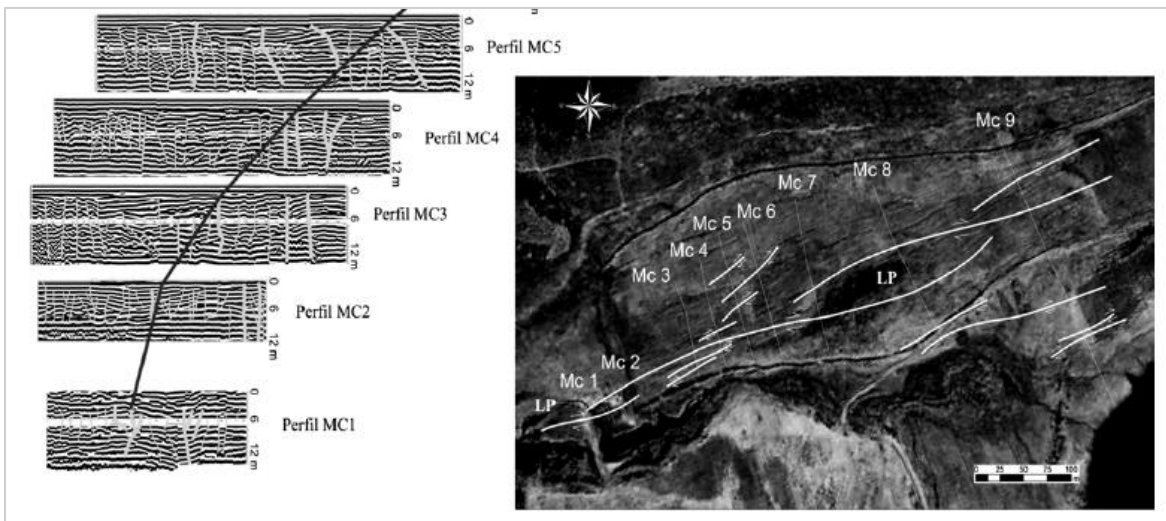
GEORADAR (GPR)

El método con georadar o radar de penetración terrestre (GPR), según Audemard *et al.* (2006) consiste en emitir un pulso de energía electromagnética de alta frecuencia (entre 10 y 500 MHz), generando ondas que se propaga en el terreno. Debido a cambios en las propiedades eléctricas de las diferentes litologías, en la composición mineralógica, y/o cambios de las características de la interfase entre diferentes litologías, algunas de estas

ondas son reflejadas hacia la superficie. Una vez que son captadas por el receptor, un monitor refleja la energía recibida en función del tiempo de arribo entre la transmisión de las ondas y la recepción de las reflexiones, siendo esto función de la velocidad de propagación y de la profundidad de los reflectores en el terreno.

Las imágenes obtenidas mediante GPR son perfiles de distancia horizontal versus doble tiempo de viaje (Two-way traveltime o TWT) en nanosegundos (Figura 47). Audemard *et al.*, (2013) plantean que la velocidad de propagación de ondas electromagnéticas está determinada por las propiedades dieléctricas de los sedimentos, entre más marcada es la diferencia entre las propiedades dieléctricas en la interfase de los distintos tipos litológicos, mayor será la magnitud de la señal reflejada. Todos estos efectos permiten inferir la estratigrafía del subsuelo con base en el carácter y geometría de las reflexiones, permitiendo visualizar discontinuidades y anomalías.

Figura 47. Perfiles interpretados de GPR adquiridos a 50 MHz en la localidad de Mesa del Caballo, Venezuela (Audemard *et al.*, 2006)

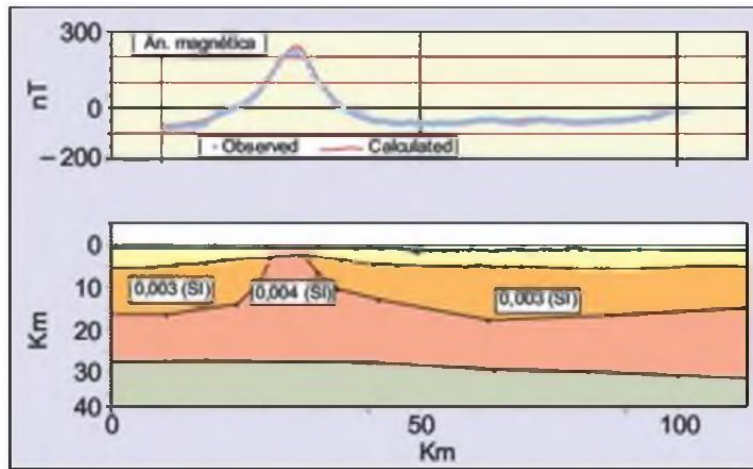


Por su parte, Chalikakis *et al.* (2011) mencionan que el GPR es muy eficaz para describir en detalle el epikarst y la zona de infiltración de los acuíferos kársticos, donde la piedra caliza aflora en la superficie. En los últimos años, las técnicas GPR parecen ser las herramientas geofísicas más populares para identificar y ubicar características kársticas del subsuelo, como cavidades, conductos y fracturas de disolución. El GPR es extremadamente limitado cuando la sobrecarga es eléctricamente conductora pero la ausencia de sedimentos eléctricamente conductores como las arcillas y el uso de bajas frecuencias (menos de 100 MHz) hacen que la aplicación de GPR en formaciones calizas sea eficiente y útil debido a la débil atenuación de las ondas de radar.

3.3.4. MÉTODOS GRAVIMÉTRICOS

Se basan en el estudio de las diferencias entre los valores medidos del campo gravitatorio terrestre en un lugar y el valor que teóricamente debería tener (anomalía gravimétrica). De acuerdo con González de Vallejo (2002), las anomalías están originadas por heterogeneidad en la densidad del subsuelo, y son positivas o negativas según exista en el lugar un cuerpo de mayor o menor densidad que la del entorno. La unidad de medida es el miligal ($\text{mgal} = 10^{-3} \text{cm/s}^2$) o la unidad gravimétrica ($\text{ug} = 10^{-4} \text{cm/s}^2$). Los aparatos de medida son los gravímetros con precisión de 0,01 mgal en los normales y 0,001 mgal en los modelos micro; los resultados se presentan en un perfil gravimétrico (Figura 48).

Figura 48. Modelización de un perfil gravimétrico (González de Vallejo, 2002).



González de Vallejo (2002) resalta que los métodos gravimétricos son útiles para localizar cualquier fenómeno en el que la variación de la densidad sea su característica fundamental; en ingeniería geológica se aplican para la detección de cavidades, localización de galerías, zonas con importantes pérdidas de finos con la consiguiente disminución de densidad, zonas con tratamientos del terreno con aumento de densidad, etc.

En terrenos kársticos, la aplicación exitosa del método de gravimetría para la detección de dolinas depende de un contraste de densidad entre el material de relleno de la dolina y su entorno. La gravimetría requiere un contraste de alta densidad entre la cavidad y la matriz circundante. Este método detecta solo grandes cavidades o aquellas cercanas a la superficie, así que no puede usarse para rastrear la ubicación de cavidades profundas, debido a que la presencia de conductos abiertos no proporciona una fuerte perturbación del campo de gravedad (Chalikakis *et al.*, 2011).

3.3.5. MÉTODOS MAGNÉTICOS

Su fundamento consiste en el estudio de las variaciones locales del campo magnético terrestre, obteniéndose medidas absolutas de la componente vertical del campo magnético. Las anomalías son debidas a diferencias en la susceptibilidad magnética de los suelos y rocas, y a la presencia de minerales permanentemente magnetizados (González de Vallejo, 2002). Los resultados que se obtienen no pueden ser interpretados directamente de manera cuantitativa a partir de los datos de campo; suelen interpretarse de forma cualitativa.

La principal ventaja, es que se trata de un método rápido y económico, empleando incluso menos de 30 s en la lectura de cada estación. El área a investigar se cubre habitualmente con una retícula de puntos de medición de espaciado regular y separación variable, en función del objetivo de la investigación. Los equipos más usados en la actualidad son los magnetómetros de protones. Los trabajos de campo pueden verse seriamente afectados por la presencia de tendidos eléctricos, vías férreas, vehículos en movimiento o si el terreno es muy heterogéneo (González de Vallejo, 2002).

Por otro lado, Chalikakis *et al.* (2011) señalan que existen limitaciones en cuanto a la implementación del método: Los sondeos por resonancia magnética (MRS) se pueden utilizar para investigar acuíferos kársticos, sin embargo, para su estudio se requiere una configuración de campo 3D y los correspondientes instrumentos de adquisición de datos multicanal. En la actualidad solo está disponible el equipo MRS de un solo canal; por lo tanto, el tiempo necesario para un estudio de campo 3D MRS se multiplica por un factor de cuatro o cinco. Además, el ruido EM ambiental influye en gran medida en las mediciones de MRS. En la etapa actual de desarrollo del instrumento, el método se limita a detectar grandes objetos cercanos a la superficie llenos de agua en áreas con bajo ruido EM ambiental. Los instrumentos de adquisición de datos multicanal y los enfoques numéricos 2D y 3D parecen prometedores para las investigaciones kársticas hidrogeológicas.

Para concluir, Pinillos (2015) expone una revisión hecha por diferentes autores de las principales ventajas e inconvenientes de la aplicación de los métodos geofísicos más usados para caracterizar karst (Tabla 5).

Tabla 5. Métodos geofísicos aplicados a la investigación del macizo rocoso (Pinillos, 2015)

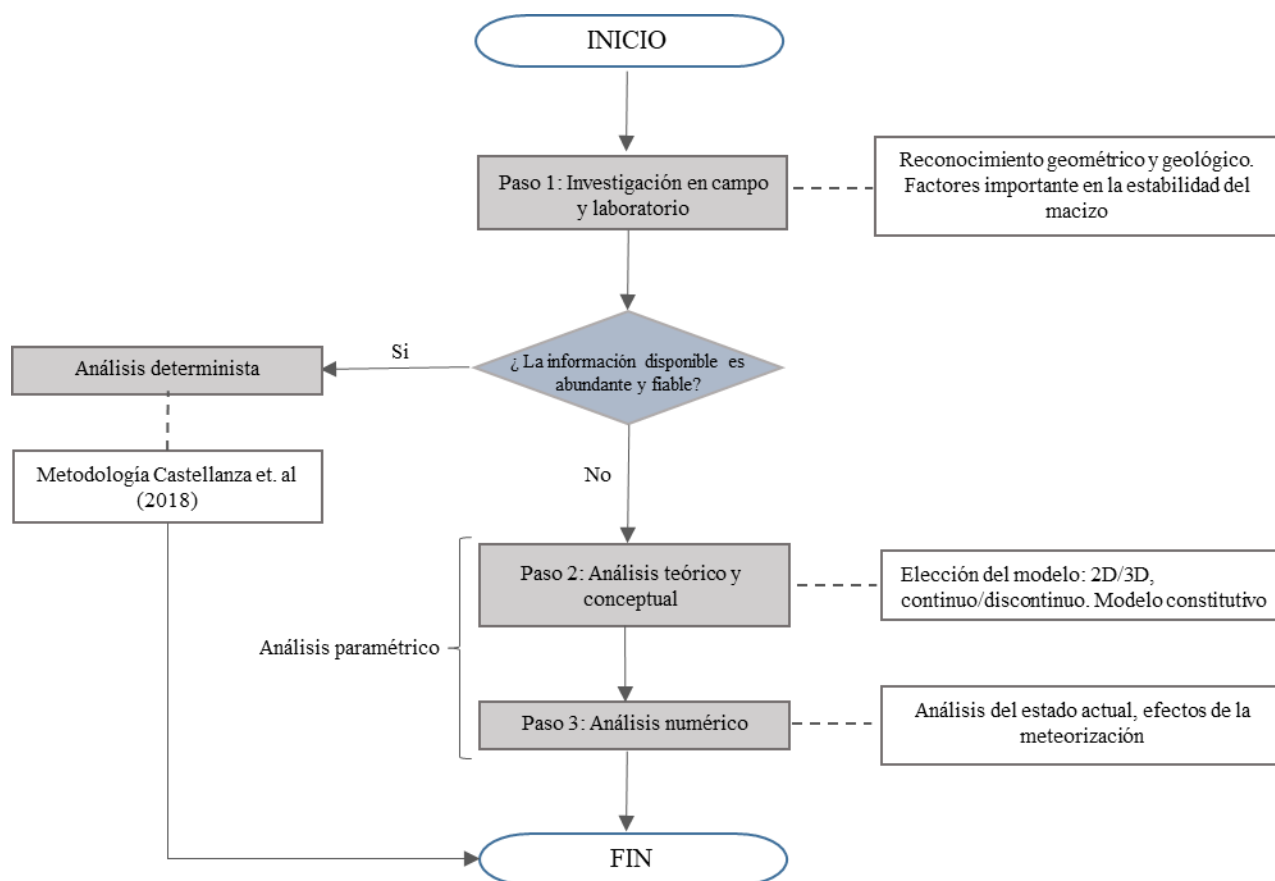
Método Geofísico	Metodología	Ventajas	Inconvenientes
Resistividad eléctrica	Se obtienen perfiles que muestran la resistividad del terreno tras el paso de corrientes eléctricas. La técnica se puede usar para obtener mapas de tomografía eléctrica en 3 dimensiones.	<ul style="list-style-type: none"> No la afectan las vibraciones ni una topografía irregular. Permite obtener mapas en 3D Permite obtener datos hasta de 40 m de profundidad Se obtienen los resultados con rapidez 	<ul style="list-style-type: none"> No se puede realizar sobre terrenos como concreto. La humedad del terreno reduce la calidad de los resultados. Si se realiza mediante medios manuales los datos tardan tiempo en adquirirse. Las anomalías que se detectan deben ser comprobadas mediante ensayos intrusivos complementarios.
Conductividad electromagnética (EM)	El método permite obtener mapas que muestran la conductividad de los materiales	<ul style="list-style-type: none"> No le afectan las vibraciones ni una topografía irregular. Se obtienen los resultados con rapidez No se requieren sensores que sean instalados en el terreno 	<ul style="list-style-type: none"> Las edificaciones y las estructuras metálicas crean interferencias. Profundidad de penetración limitada. Las anomalías que se detectan deben ser comprobadas mediante ensayos intrusivos complementarios.
Radar (GPR)	Se obtienen perfiles que muestran las variaciones de la impedancia del terreno	<ul style="list-style-type: none"> Se obtienen los resultados con rapidez. Permite identificar las características geométricas de las dolinas. 	<ul style="list-style-type: none"> Capacidad limitada de penetración. El agua y los materiales arcillosos reducen su poder de penetración. Los campos electromagnéticos externos ocasionan interferencias.
Microgravimetría	El método permite obtener mapas que muestran los cambios del campo gravitacional terrestre	<ul style="list-style-type: none"> Se puede usar en zonas con "ruido ambiental", cerca de edificaciones y cerca de fuentes eléctricas. 	<ul style="list-style-type: none"> Lentos y laboriosos cálculos para corregir la topografía. Elevada dificultad en áreas de compleja topografía Las anomalías que se detectan deben ser comprobadas mediante ensayos intrusivos complementarios.
Tomografía Cross- Hole	Se obtienen imágenes en 3D que muestran las variaciones de la resistividad eléctrica del terreno	<ul style="list-style-type: none"> Se puede usar satisfactoriamente en zonas desarrolladas con "ruido" ambiental. Proporciona imágenes 3D. 	<ul style="list-style-type: none"> Requiere sondeos mecánicos. Son ensayos caros en los casos en que se necesita realizar los sondeos.

4. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS PROPUESTA

Las actividades y etapas de trabajo requeridas para la ejecución del presente trabajo de grado están directamente ligadas a la metodología que se propone; la cual está basada en un procedimiento paso a paso que incluye investigación *in situ*, estudios experimentales de laboratorio (cuando sea posible), análisis teóricos y, finalmente, análisis numérico.

La metodología tiene como objetivo comprender y estudiar el mecanismo de falla de las cavidades teniendo en cuenta el efecto de los parámetros de resistencia del terreno para valores típicos de calizas (reportados en la bibliografía) y simulando la degradación de las propiedades del material mediante un análisis paramétrico con reducción de parámetros. Se sigue un procedimiento de cuatro pasos que se resume en la Figura 49.

Figura 49. Diagrama de flujo de la metodología propuesta



4.1. PASO 1: INVESTIGACIÓN EN CAMPO Y EN LABORATORIO

En esta primera etapa, el objetivo es recopilar toda la información disponible sobre la cavidad a analizar, incluye la que se toma en campo y los ensayos de laboratorio para caracterizar los diferentes materiales encontrados.

Se deben llevar a cabo estudios de campo tanto en el interior de las cavidades como en superficie, de acuerdo con los métodos descritos en el capítulo anterior que incluyen:

- Estudios previos: Revisión de información y antecedentes, levantamiento topográfico convencional o con herramientas avanzadas (fotointerpretación y teledetección), levantamiento geológico y geotécnico en campo.
- Análisis geológico e hidrogeológico detallado: Sondeos para recuperación de muestras, así como sondeos para identificar la ubicación exacta de las cavidades; con el fin de definir el modelo litológico, el entorno geoestructural y la eventual existencia de características hidrogeológicas, como circulación de agua o infiltración desde la superficie del suelo.
- Prospección geofísica: Se aplican diferentes métodos según las características del terreno y del proyecto para definir un modelo geométrico tridimensional de la cavidad y también determinar su área total.

Respecto a los ensayos de laboratorio, éstos tienen como finalidad definir los factores que juegan un papel importante en la estabilidad del macizo rocoso alrededor de la cavidad como las propiedades mecánicas actuales del material involucrado, la susceptibilidad de la roca a los procesos de meteorización y degradación, la propagación de la meteorización según las formas preferenciales, entre otras. Se deben realizar las pruebas de laboratorio precisas destinadas a caracterizar las propiedades físicas y mecánicas más importantes del material rocoso intacto y meteorizado (peso unitario, porosidad, contenido de agua, rigidez elástica, compresión uniaxial, resistencia a la tracción, resistencia al corte a altos niveles de esfuerzos, etc).

Incluso, ya existen metodologías de análisis como la propuesta por Castellanza *et al.* (2018) en la que con ciertas pruebas de laboratorio se logra obtener un índice del grado de meteorización in situ, así como el espesor de la capa afectada por este proceso y las condiciones ambientales del lugar. Para ello, los autores afirman que los escenarios de meteorización artificial pueden ser útiles para definir la ley de variación de la resistencia de la roca a corto y largo plazo. En particular, sería conveniente definir:

- Una meteorización a corto plazo para describir la rápida reducción de las propiedades geomecánicas del material rocoso de condiciones secas a húmedas.
- Una meteorización a largo plazo asociada a un proceso de meteorización relativamente lento, generalmente inducido por procesos de disolución química.

4.1.1. REVISIÓN: ¿LA INFORMACIÓN DISPONIBLE ES ABUNDANTE Y FIABLE?

Una vez tomada toda la información del proyecto, se deben evaluar el nivel de incertidumbre y el grado de variación de las propiedades del terreno, los cuales están relacionados con la fiabilidad y la cantidad de información que se haya podido recopilar tanto en campo como en laboratorio. Geoquantics (2019) asegura que cuanto mayor es la complejidad geológica/geotécnica del terreno y cuanto menor sea el presupuesto destinado a investigación geotécnica, mayor será el grado de incertidumbre, de esta manera un menor presupuesto implica menos ensayos y sondeos y por tanto menor calidad de la información. Por otro lado, la accesibilidad al terreno (que determinará la posibilidad de emplear determinada maquinaria y equipos), condicionará también de manera notable la información disponible.

Todo lo anterior implica que, la cantidad y la calidad de la información con la que se dispone determinarán el tipo de análisis que se pueda llevar a cabo. Si la información es escasa y con elevado grado de incertidumbre y/o variabilidad, entonces se podrá realizar un análisis paramétrico que servirá para comprender y estudiar los mecanismos de comportamiento y funcionamiento del problema en cuestión; en este caso, se sugiere elaborar un modelo simplificado (seguir Figura 49, pasos 2 a 4).

Por el contrario, si la información con la que se cuenta es abundante y fiable, el análisis será determinista y el modelo tendrá más bien fines predictivos, de diseño y de dimensionamiento precisos, en esta situación, se puede plantear la posibilidad de llevar a cabo modelos más complejos y sofisticados, puesto que se dispone de la información necesaria para alimentarlos. Se sugiere seguir metodologías como la de Castellanza *et al.* (2018) que propone un enfoque determinista validado en estudios de casos reales que muestra la conveniencia de realizar estudios experimentales, teóricos y numéricos avanzados para evaluar adecuadamente el peligro asociado a karst y diseñar mejor las medidas de mitigación si se requieren.

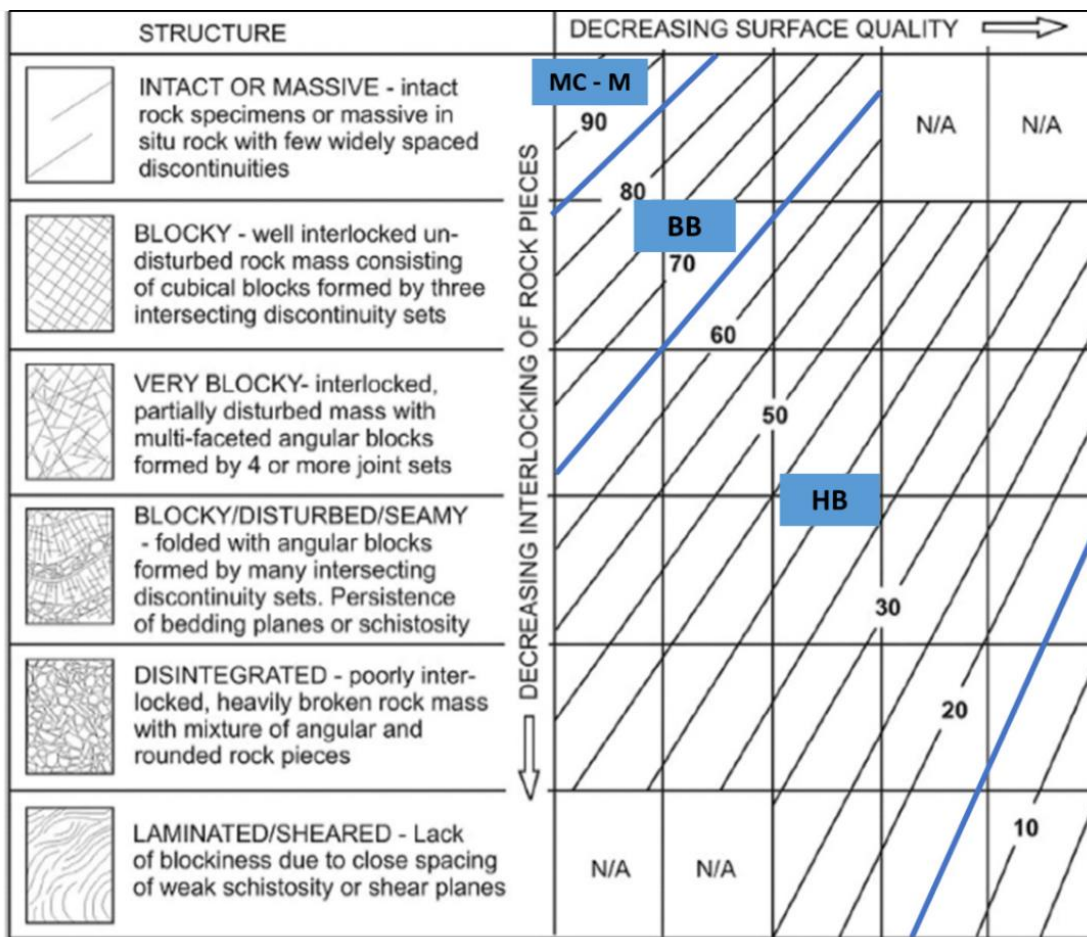
4.2. PASO 2: ANÁLISIS TEÓRICO Y CONCEPTUAL

Esta etapa debe estar dirigida a definir las características generales de la esquematización del problema real y está representada por la elección entre una geometría del modelo 2D o 3D (basado en la posible existencia de condiciones de deformación plana). Como se mencionó anteriormente para un análisis paramétrico se sugiere elaborar modelos simplificados, una representación 2D sería una buena opción, siempre y cuando se tengan en cuenta las limitaciones y suposiciones que deban llevarse a cabo para que los resultados obtenidos sean útiles.

Además, es necesario hacer la elección entre un modelo continuo o discontinuo, según la eventual presencia de juntas relevantes, así como el modelo constitutivo con el que se hará

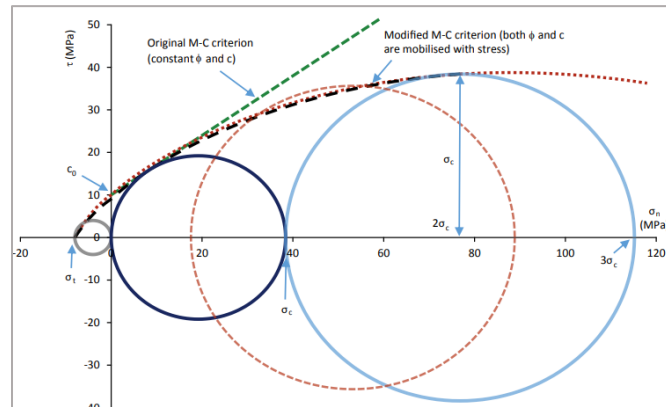
el análisis numérico en función del mecanismo de falla que pueda presentarse en el macizo rocoso. Para hacer esta elección se ha creado la Figura 50, modificando la tabla de clasificación del índice de resistencia geológica, por sus siglas en inglés, GSI (*geological strength index*) y teniendo en cuenta a Hoek & Brown (2018) quienes acotan los límites en los que es aplicable y por tanto el modelo constitutivo creado por dichos autores. De igual manera, los autores mencionan cómo deberían abordarse los problemas en macizos rocos que no estén dentro de este rango. A continuación, se explican los criterios de resistencia planteados para cada rango en la Figura 50.

Figura 50. Elección de modelo constitutivo según el GSI (modificado de Hoek & Marinos, 2000)



- MOHR-COULOMB MODIFICADO. MC-M ($100 \leq \text{GSI} \leq 85$).**
 Macizos rocosos homogéneos con pocas discontinuidades muy espaciadas. En este caso se sugiere usar el modelo propuesto por Shen *et al.* (2018) que modifica el criterio de resistencia al corte de Mohr-Coulomb, movilizandando la cohesión y el ángulo de fricción interna con el esfuerzo normal, con el fin de incluir el concepto de no linealidad y estado crítico para rocas intactas (Figura 51).

Figura 51. Criterio de Mohr-Coulomb modificado (Shen et al., 2018)



La expresión matemática para la resistencia es la misma que la forma clásica, pero los términos de cohesión y ángulo de fricción interna ahora dependen del esfuerzo normal, lo que lleva a una relación no lineal entre la resistencia y el esfuerzo normal, se proporciona la ecuación para determinar uno de los tres parámetros en términos de los otros dos. Esta ecuación no es lineal y, por lo tanto, se necesita un solucionador de ecuaciones no lineales, se utilizan las expresiones 4.1 y 4.2.

$$\tau = \sigma_n \tan \varphi + c \quad (4.1)$$

$$\sigma_c = \frac{2c_0 \cos \varphi_0}{1 - \sin \varphi_0} \text{ o } c_0 = \frac{1 - \sin \varphi_0}{2 \cos \varphi_0} \quad (4.2)$$

Donde:

σ_n es el esfuerzo normal

φ es el ángulo de fricción interna

c es la cohesión

σ_c es la resistencia al esfuerzo de compresión uniaxial

c_0 y φ_0 son los valores de cohesión y ángulo de fricción aparentes.

Actualmente el único Software que cuenta con este criterio es FRACOD (Fracom, 2022), que se basa en la mecánica de la fractura y con el que se puede hacer un modelo continuo.

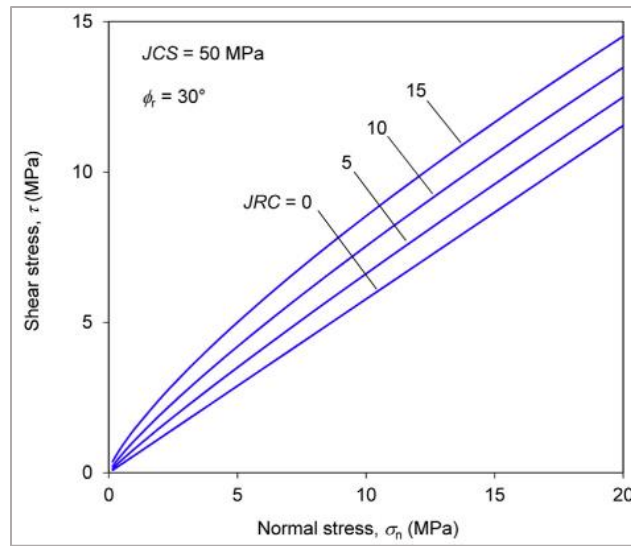
- **BARTON - BANDIS. BB ($85 \leq \text{GSI} \leq 65$).**

Macizos rocosos masivos entrelazados y no perturbados que constan de grandes bloques cúbicos formados por tres conjuntos de discontinuidades que se cruzan, en los que el proceso de falla está dominado por el deslizamiento y la rotación de los

bloques que depende de las características de las discontinuidades, esto se da sin una gran cantidad de rotura de roca intacta.

El criterio de resistencia que representa mejor este mecanismo de falla es el de Barton-Bandis (2013) que propone una relación empírica ampliamente utilizada para modelar la resistencia al corte y deformabilidad de las discontinuidades de la roca (Figura 52). Este criterio no es lineal y relaciona la resistencia al corte con el esfuerzo normal utilizando las ecuaciones 4.3 a 4.5.

Figura 52. Criterio Barton - Bandis (Prasetyo et al., 2017)



$$\tau = \sigma_n \tan \left[\phi_r + JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right] \quad (4.3)$$

$$\tau = \sigma_n \tan \left[\phi_r + JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right] \quad (4.4)$$

$$\phi_r = (\phi_b - 20) + 20 \left(\frac{r}{R} \right) \quad (4.5)$$

Donde ϕ_r es el ángulo de fricción residual de la superficie de falla, JRC es el coeficiente de rugosidad de la junta y JCS es la resistencia a la compresión de la pared de la junta, r es el número de rebote del martillo de Schmidt en superficies de fractura húmedas y erosionadas y R es el número de rebote de Schmidt en superficies lisas secas no erosionadas.

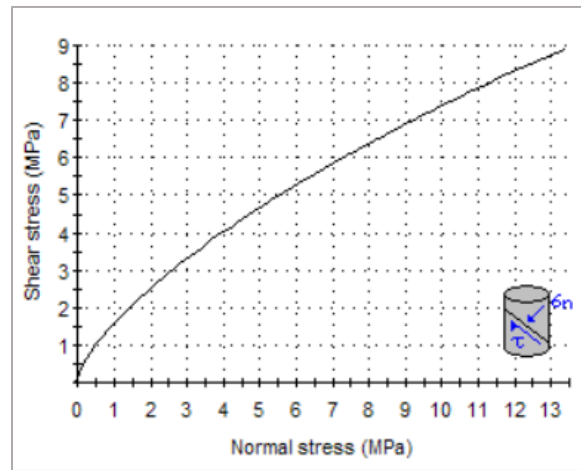
Existen varios programas que ya aplican este criterio y hacen modelos discontinuos como Unwedge (Rocscience Inc, 2022) que se basa en la teoría de bloques y UDEC (Itasca Inc, 2022) fundamentado en el método de elementos discretos (DEM).

- **HOEK - BROWN. HB ($65 \leq GSI \leq 15$).**

Macizo rocoso con gran número de discontinuidades, dónde los pequeños bloques de roca intacta no se pueden fracturar, simplemente se trasladan o rotan en relación unos con otros en cualquier dirección y el macizo se comporta como un material homogéneo.

Para esta situación, el modelo constitutivo apropiado es el propuesto por Hoek - Brown (2018) que parte de las propiedades de la roca intacta y luego, aplicando factores de reducción basándose en las características de las discontinuidades se modifica para adaptarse al comportamiento del macizo rocoso (Figura 53) utilizando las ecuaciones 4.6 a 4.9.

Figura 53. Envolvente Hoek - Brown (Rocscience Inc, 2022)



$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (4.6)$$

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \quad (4.7)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \quad (4.8)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right) \quad (4.9)$$

Donde:

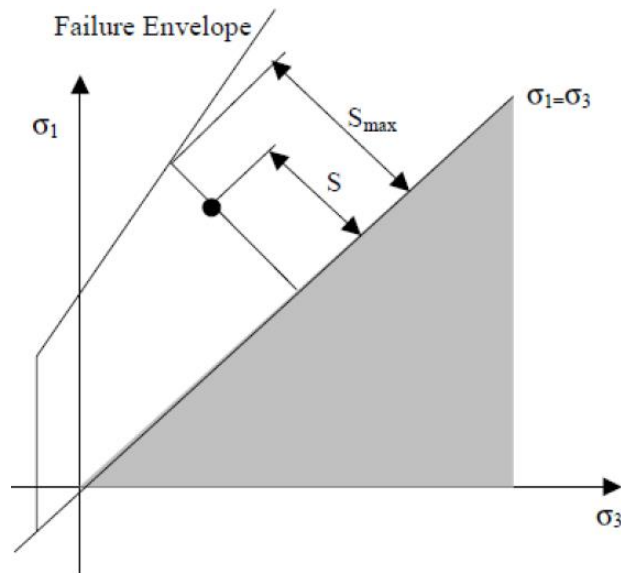
σ'_1 y σ'_3 son el máximo y mínimo esfuerzo principal efectivo en la fractura
 m_b es el valor de la constante m de Hoek - Brown para el macizo rocoso
 s y a son las constantes que dependen de las características del macizo rocoso
 σ_{ci} es el esfuerzo de compresión uniaxial de la roca intacta

m_i es el valor de la constante m de Hoek - Brown para la roca intacta
 GSI es el índice geológico de resistencia (*geological strength index*)
 D es el factor de perturbación del macizo rocoso

El programa más utilizado para implementar este criterio de rotura es RS2 (Rocscience Inc, 2022) que con un modelo continuo usando elemento finito (FEM) calcula un factor de resistencia (Strength Factor) que relaciona la resistencia máxima con un valor “ S ” (Figura 54) haciendo uso de las ecuaciones 4.10 a 4.16, en las que divide la resistencia de la roca (según sus criterios de falla) en el esfuerzo inducido en cada punto de la malla. Los tres esfuerzos principales influyen en el factor de resistencia (σ_1, σ_2 y σ_3), por lo que puede considerarse tridimensional.

En el caso de materiales elásticos, el factor de resistencia puede ser menor a la unidad, ya que se permite el sobreesfuerzo, pero en materiales plásticos, el factor de resistencia siempre es mayor o igual a la unidad.

Figura 54. Cálculo del Factor de resistencia en RS2 (Rocscience Inc, 2022)



$$\text{strength factor} = \frac{S_{max}}{S} \quad (4.10)$$

$$S_{max} = \frac{\sqrt{\left(1 + \frac{\tan \theta}{\sqrt{3}}\right)^2 \left(\frac{m \sigma_c}{8}\right)^2 + \left(\frac{m \sigma_c I_1}{12} + \frac{s \sigma_c^2}{4}\right) - \frac{m \sigma_c}{8} \left(1 + \frac{\tan \theta}{\sqrt{3}}\right)}}{\cos \theta} \quad (4.11)$$

$$S = \sqrt{J_2} \quad (4.12)$$

$$I_1 = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz} \quad (4.13)$$

$$J_2 = \frac{1}{6} \left[(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 \right] + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 \quad (4.14)$$

$$J_3 = \left(\sigma_{xx} - \frac{I_1}{3} \right) \left(\sigma_{yy} - \frac{I_1}{3} \right) \left(\sigma_{zz} - \frac{I_1}{3} \right) + 2\tau_{xy}\tau_{yz}\tau_{zx} - \left(\sigma_{xx} - \frac{I_1}{3} \right) \tau_{yz}^2 - \left(\sigma_{yy} - \frac{I_1}{3} \right) \tau_{zx}^2 - \left(\sigma_{zz} - \frac{I_1}{3} \right) \tau_{xy}^2 \quad (4.15)$$

$$\theta = \frac{1}{3} \arcsin \left[\frac{3\sqrt{3}J_3}{2J_2^{3/2}} \right] \quad -\frac{\pi}{6} < \theta < \frac{\pi}{6} \quad (4.16)$$

Donde:

m y s son las constantes de Hoek - Brown

σ_c es el esfuerzo de compresión uniaxial de la roca intacta

σ_{xx} , σ_{yy} y σ_{zz} son los esfuerzos normales a los planos x , y , z del tensor esfuerzo.

τ_{xy} , τ_{yz} y τ_{zx} son los esfuerzos cortantes a los planos x , y , z del tensor esfuerzo.

Finalmente, según Geoquantics (2019), debe evitarse el uso de modelos constitutivos elásticos, utilizados para la aplicación de métodos analíticos simples, ya que debe tenerse en cuenta el comportamiento elastoplástico que caracteriza a las rocas. Un modelo perfectamente elastoplástico de Mohr-Coulomb se considera apropiado para problemas donde el tipo de falla por cortante es dominante (cuando el esfuerzo efectivo medio es bajo), mientras que un modelo elastoplástico con el criterio de falla de Hoek - Brown (2018) tiene en cuenta, de acuerdo con el enfoque continuo equivalente, la influencia del estado de fracturamiento final del macizo rocoso o la no linealidad de la envolvente de falla.

4.3. PASO 3: ANÁLISIS NUMÉRICO

En esta última etapa de la metodología, partiendo del concepto de que el comportamiento del macizo rocoso en el entorno de una cavidad subterránea se establece con base en la magnitud de las deformaciones que el material presenta, se propone variar de manera selectiva la calidad del macizo rocoso alrededor de la excavación. Con este propósito se hace una reducción porcentual de los valores de GSI, E_{rm} , E_i y σ'_c .

En primera instancia, se evalúa la estabilidad de la cavidad en el estado actual. Posteriormente, se plantea un posible escenario de la evolución de la estabilidad con el tiempo (efecto de la degradación del material) con el fin de obtener un indicador del factor de seguridad y finalmente, induciendo una condición de carga específica o un cambio en las condiciones de contorno se observa el campo de desplazamientos inducidos y su influencia en la estabilidad global.

Se sugiere hacer análisis de sensibilidad para resaltar la influencia de factores específicos, como el estado de esfuerzos inicial del macizo rocoso o la regla de flujo del modelo constitutivo adoptado. En general, el modelo numérico debe simular el estado actual del macizo rocoso, implementando las condiciones de contorno mecánicas e hidráulicas y las condiciones de carga existentes o futuras.

5. EJEMPLO DE APLICACIÓN

5.1. PASO 1. CARACTERÍSTICAS DE CAMPO Y LABORATORIO

Debido a la alta karsticidad de la península de Yucatán y al riesgo que existe de que alguna obra civil quede ubicada encima de una cavidad se realiza un estudio metodológico y paramétrico que permita tener una idea más realista de las situaciones que podrían presentarse a futuro. Dada esta problemática, anteriormente han sido realizados algunos estudios específicos de detalle del peligro kárstico en la península, que incluyeron el análisis de un mapa de peligrosidad kárstica, el cual está dividido en zonas de riesgo severo, alto, moderado y bajo. De igual manera se han realizado campañas de reconocimiento geológico e investigación geofísica (TRE y GPR) para la elaboración de algunos perfiles de la estructura del subsuelo en las zonas con niveles de peligrosidad más altos y la detección de cavidades potenciales.

Tras la ejecución de la campaña de TRE en las zonas en donde el riesgo es severo o alto, se procesaron los datos y se detectó un conjunto de anomalías de resistividad, en donde se dan picos, tanto resistivos como conductores. Estos picos, pueden ser el resultado de numerosas configuraciones geológicas, dentro de las cuales también pueden ser debidos a la existencia de cavidades.

Se seleccionaron todas las anomalías resistivas y conductoras que podrían corresponder con la existencia de cavidades, y sobre estas anomalías se ejecutaron perfiles de georradar para definir si las anomalías detectadas en la geofísica marcaban también anomalías en el georradar, lo que indicaría una mayor probabilidad de que ambas anomalías puedan corresponder a una cavidad. En caso de coincidencia de anomalías pasaron a la siguiente fase de estudio, mientras que la no confirmación mediante georradar descartaría la existencia de cavidades.

La siguiente fase de estudio consistió en el uso de los resultados de una campaña intrusiva de prospección, consistente en la ejecución de sondeos de avance controlado (SAC) en todas y cada una de las anomalías que pudieran corresponder a cavidades que serían potencialmente inestables debido a su profundidad y tamaño. Estos sondeos permitieron confirmar si las anomalías correspondían a cavidades o, por el contrario, correspondían a otro tipo de configuración geológica y estructural. Esta fase de estudio se completó con una nueva campaña de perfiles de georradar paralelos a los anteriores en las zonas de anomalías confirmadas, con el objeto de poder proyectar en la superficie del terreno el área de la cavidad detectada en caso de confirmarse su existencia.

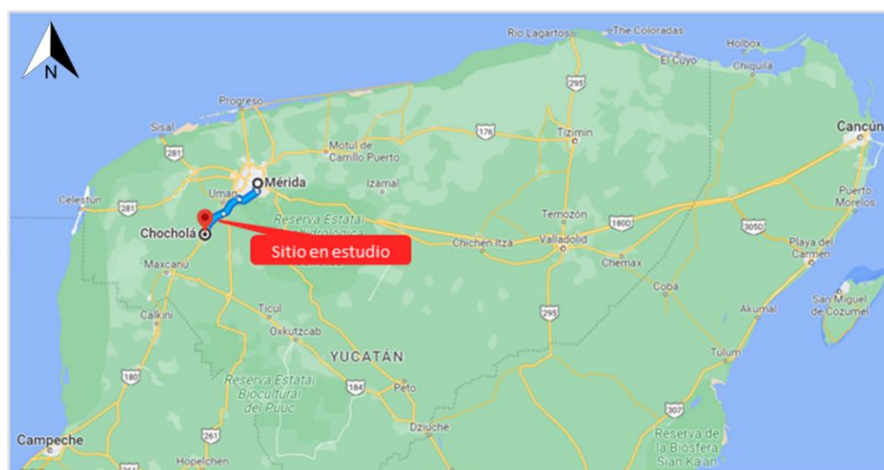
Para este trabajo de tesis se ha seleccionado la anomalía C9, dónde se confirmó la presencia de una cavidad a 6 m de profundidad con 3.25 m de altura y 20 m de diámetro. Se ha realizado un análisis paramétrico para estudiar la estabilidad de la cavidad.

A partir de este estudio se han determinado los parámetros mecánicos mínimos de la formación de roca para que sea estable (la condición actual de la cavidad) y evaluar si la consideración de algunas sobrecargas podría inducir un riesgo potencial de colapso a corto, mediano y largo plazo, lo que podría suponer un riesgo para la estabilidad de una obra civil sobre ésta.

5.1.1. UBICACIÓN

La anomalía se localiza en las coordenadas UTM: 201088.01 m E, 2291695.03 m N Zona 16Q. Está ubicada a 14 km del municipio de Chocholá (Figura 55), en la carretera Federal No. 180 Mérida – Campeche, en el tramo: Limite de los Estados, Campeche/Yucatán, Subtramo: Km. 119 + 300 (entronque Kopomá).

Figura 55. Localización del sitio de estudio (Comunicación personal, noviembre de 2020)



5.1.2. GEOLOGÍA GENERAL

En un punto de observación geológica a la altura del cadenamamiento 5040+600 (Figura 56), se ha observado la columna estratigráfica de la zona en un banco de extracción de material. A techo aparecen unas calizas en paquetes métricos y con estratificación subhorizontal. Bajo estas aparece el sascab⁷. La zona corresponde a la Formación Carrillo Puerto (TmplCz-Cq) que Durán y Méndez (2010) describen de la siguiente manera:

“Formación del Mioceno Superior-Plioceno, los niveles inferiores corresponden a coquinas de más o menos 1 m de espesor, cubiertas por calizas duras. La alteración de estas calizas por el intemperismo origina arcillas lateríticas. Los niveles superiores están representados por calizas blancas, duras y masivas. Los echados observados son débiles o nulos, con

⁷ Calizas blandas conocidas por su nombre maya como sascab que significa “tierra blanca”, predomina en el estado de Yucatán y corresponde a rocas sin consolidar. La consistencia obtenida se debe a la cristalización de aragonita a calcita que es un proceso necesario para la consolidación de una roca. (Durán y Méndez, 2010).

orientación NNE. Estas rocas mantienen una alta permeabilidad y porosidad, aunque sean secundarias, ya que se encuentran muy fracturadas y contienen abundantes oquedades de disolución”.

Figura 56. Croquis de ubicación cavidad en estudio
(Comunicación personal, noviembre de 2020)



En las Figura 57 y la Figura 58 se presentan las fotografías tomadas al afloramiento rocoso. De lo observado, así como de la tipología de los cenotes localizados en las inmediaciones del tramo proyectado se puede mencionar que, respecto a la karstificación, no se observa que el conjunto del macizo rocoso se halle altamente karstificado, sino que las oquedades y cavidades existentes se localizan de manera muy puntual, en zonas aisladas. La disolución de las calizas parece concentrarse en el nivel de calizas inferiores, progresando la karstificación hasta la superficie, pero no penetrando en las calizas del nivel superior. Estas cavidades se desarrollan en anchura, hasta llegar a un momento en que las calizas superiores no resisten la cavidad bajo ellas, y se produce el colapso, formándose las cavidades.

Figura 57. Vista de banco de extracción. Sitio de estudio
(Comunicación personal, noviembre de 2020)



**Figura 58. Detalle afloramiento rocoso en el sitio de estudio
(Comunicación personal, noviembre de 2020)**



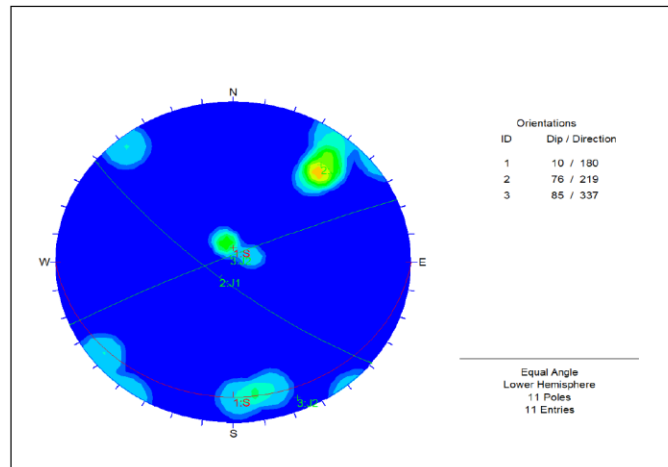
El buzamiento y la dirección de buzamiento medios de cada uno de los planos de discontinuidad existentes en este dominio estructural son los que se indican en la siguiente tabla.

**Tabla 6. Planos del dominio estructural afloramiento
(Comunicación personal, noviembre de 2020)**

Tipo de plano	Buzamiento (°)	Dirección de buzamiento (°)
S	10	180
J	76	219
J	85	337

En la Figura 59 se muestra la frecuencia de polos de las diferentes familias medidas, así como la distribución de estas discontinuidades.

**Figura 59. Diagrama de polos discontinuidades en superficie
(Comunicación personal, noviembre de 2020)**

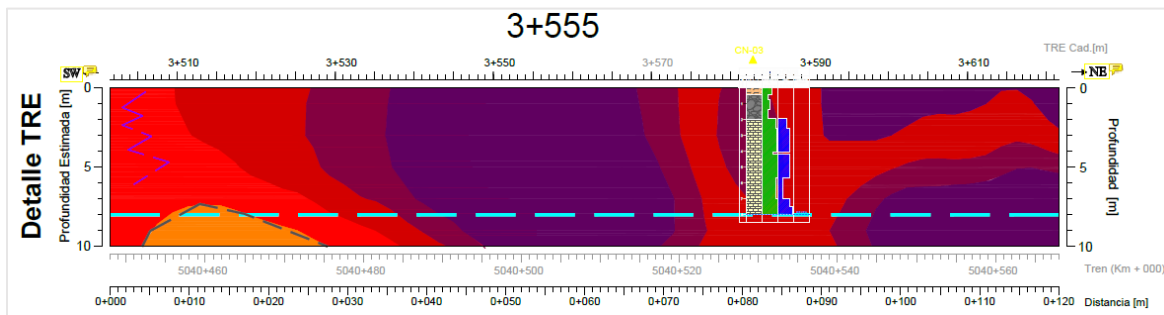


Como conclusión a todos estos aspectos y observaciones realizadas, se ha optado por un modelo del terreno en donde se contempla un primer nivel superior que está constituido por un material de relleno de características geotécnicas pobres, y por debajo se desarrolla un segundo nivel en donde las propiedades resistentes y deformacionales son mucho mayores.

5.1.3. DESCRIPCIÓN ANOMALÍA C9

En esta zona se ha localizado una franja central altamente resistiva, que se extiende hasta la superficie del terreno, y una zona en su extremo norte, en donde aparece una zona resistiva a unos 6.0 m de profundidad, próxima al contacto con el nivel freático. En la siguiente figura se muestra la anomalía geoelectrónica descrita.

Figura 60. Anomalía C9 (Comunicación personal, noviembre de 2020)



Con el fin de delimitar la anomalía C9 se han realizado dos líneas de georradar Z9-A y Z9-B las cuales tienen una longitud de 120 m cada una. En la Figura 61 se muestra la ubicación de los barridos de georradar realizados y en la Figura 62 se presentan los radargramas correspondientes.

Figura 61. Localización de las líneas de georradar Z9 (Comunicación personal, noviembre de 2020)



En los radargramas se detectaron una serie de anomalías, que se ubican principalmente en la zona resistiva del extremo norte del perfil TRE. En cambio, la zona resistiva central que se extendía hasta la superficie no ha marcado anomalías en el georradar. En este caso, se consideró que hay posibilidad de existencia de una cavidad de unos 20.0 m de longitud a 5.0 m de profundidad, donde se ejecutó un sondeo de avance controlado (SAC-T3-CV 20) con el objeto de comprobar si la anomalía corresponde realmente a una cavidad. En la Figura 63, se expone el resultado del sondeo de avance controlado realizado.

Figura 62. Radargramas líneas Z9-A y Z9-B (Comunicación personal, noviembre de 2020)

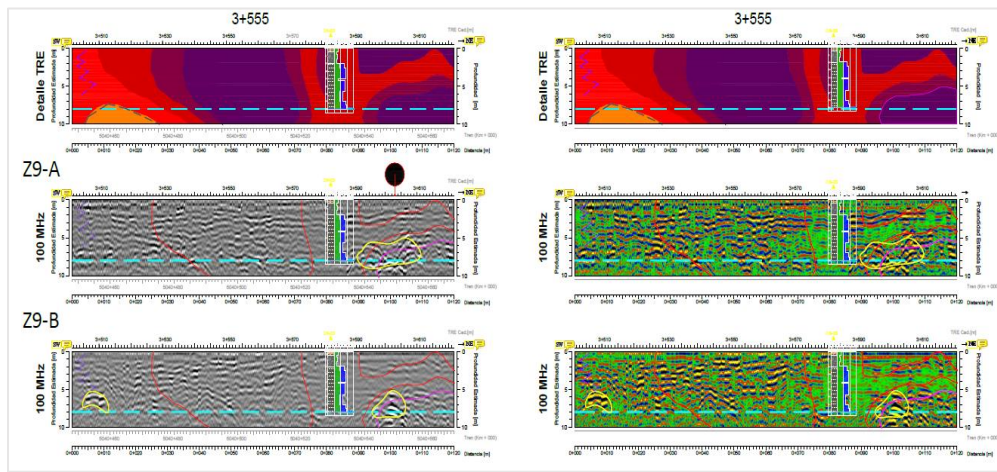
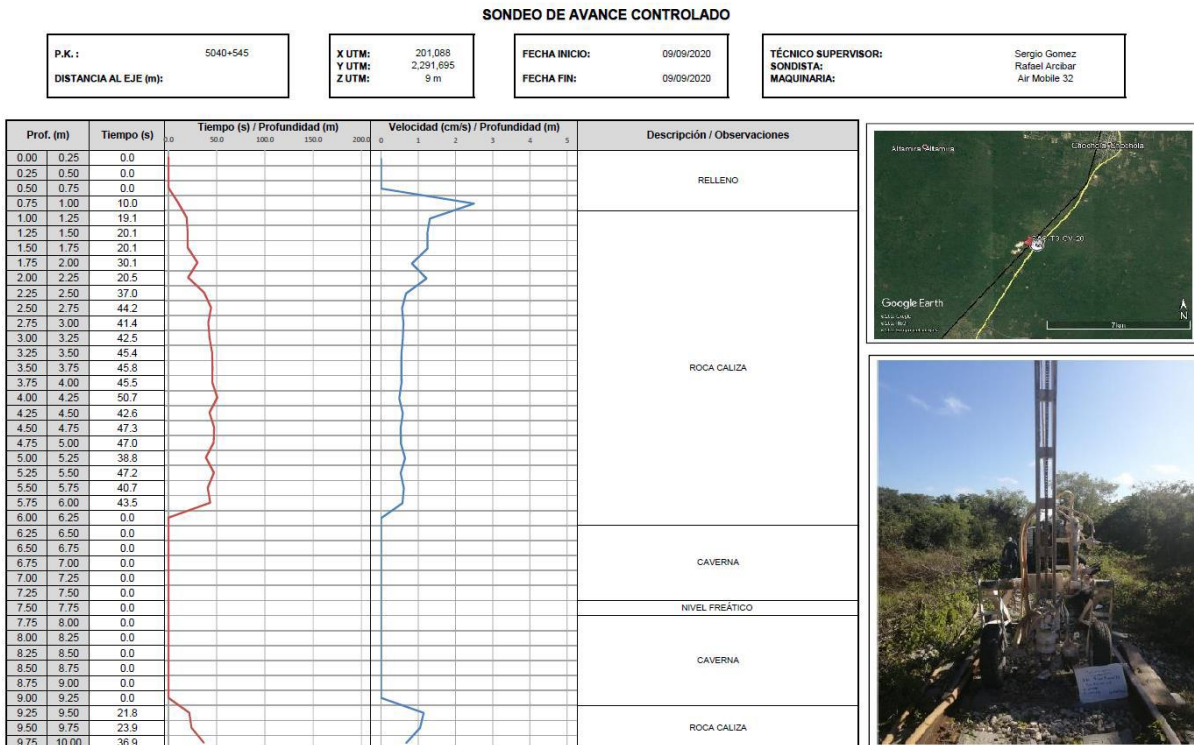


Figura 63. Registro del SAC-T3-CV-20 (Comunicación personal, noviembre de 2020)



El sondeo de avance controlado confirma la presencia de una cavidad a 6.0 metros de profundidad de 3.25 metros de alto, el nivel freático se sitúa a 7.5 m de profundidad. A partir de los 4 radargramas disponibles, se ha extrapolado en planta la superficie ocupada por la cavidad, cuya representación queda reflejada en la Figura 64. En la Figura 65 se muestra el perfil del terreno.

Figura 64. Proyección en planta de la cavidad (Comunicación personal, noviembre de 2020)

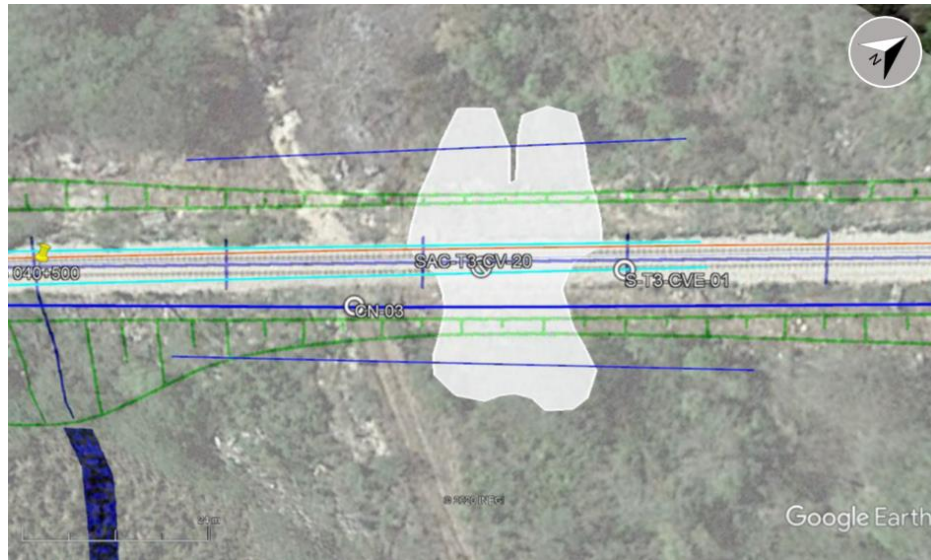
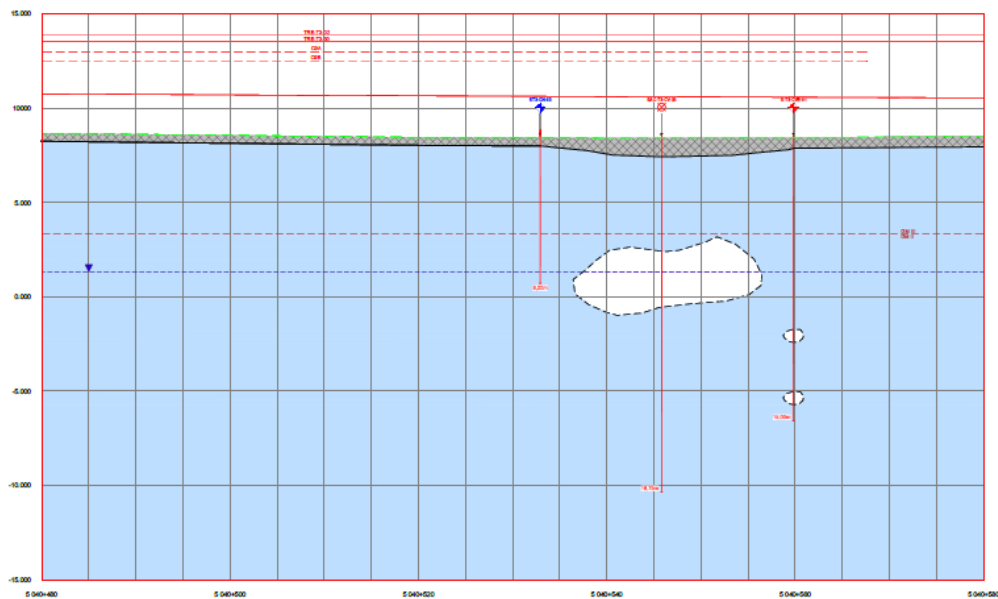


Figura 65. Perfil geotécnico (Comunicación personal, noviembre de 2020)



5.2. PASO 2. ANÁLISIS TEÓRICO Y CONCEPTUAL

Para analizar el comportamiento tenso-deformacional del terreno se ha realizado un modelo numérico aplicando el método de elemento finito, que representa al perfil de cálculo modelado. El programa utilizado es RS2 (Rocscience Inc, 2022), que permite simular el comportamiento de suelos, rocas y otros materiales estructurales que se ajustan a modelos elásticos, elastoplásticos y viscoelásticos, en dos dimensiones.

El modelo empleado es bidimensional plástico de deformación plana, que se caracteriza porque la dirección Z es muy grande con respecto a las otras medidas (relativo) y no aparecen deformaciones según la dirección Z (a lo largo de la pieza), tampoco deformaciones angulares γ_{xz} ni γ_{yz} . Debe tenerse en cuenta que un modelo tridimensional es posible que simule de forma más precisa el problema en estudio y los valores obtenidos con dicho modelo pueden diferir con los obtenidos con un modelo de deformación plana.

El criterio de resistencia de Hoek-Brown es el más adecuado para representar el comportamiento mecánico del material: Macizo rocoso con gran número de discontinuidades, donde los pequeños bloques de roca intacta no se pueden fracturar, simplemente se trasladan o rotan en relación unos con otros en cualquier dirección y el macizo se comporta como un material homogéneo.

El objetivo de estos cálculos es determinar los parámetros mecánicos mínimos del macizo rocoso para que sea estable (condición actual) y evaluar las sobrecargas que al ser impuestas en el techo de una cavidad de este tipo podrían ocasionar un colapso a corto, mediano y largo plazo. Para ello, se ha hecho un análisis paramétrico con reducción de parámetros, iterando hasta alcanzar la condición de falla.

Cabe destacar que, en la mayor parte de los casos analizados, la inestabilidad calculada no llega a un colapso total del techo, sino que se genera un mecanismo de inestabilidad creciente en el techo, que podría avanzar hasta alcanzar la superficie.

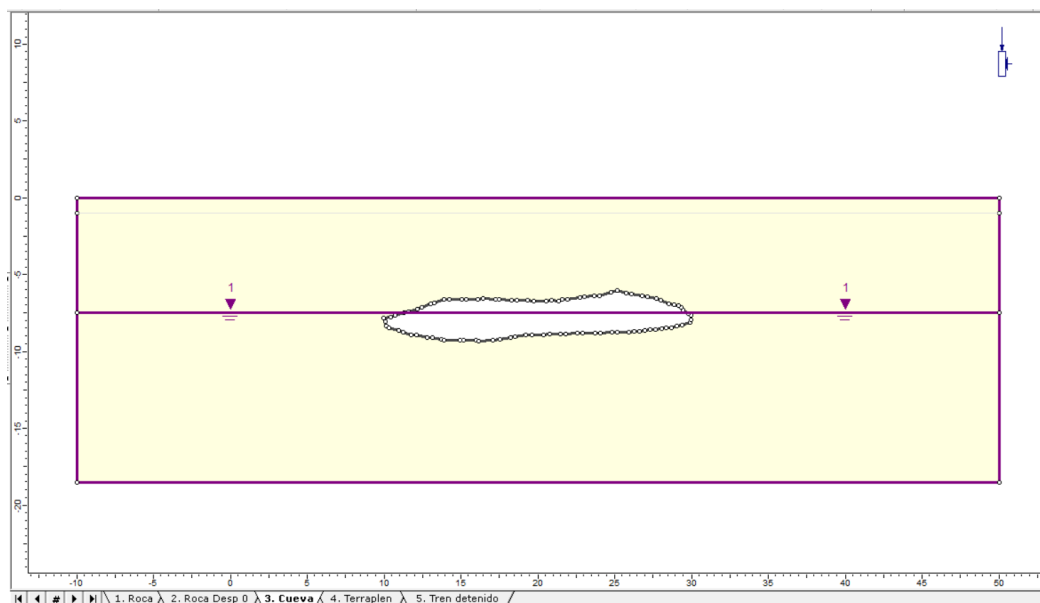
- DESCRIPCIÓN DE SECCIÓN CONSIDERADA

La sección tipo modelada corresponde a la geometría registrada en los radargramas aceptando las limitaciones de la exploración de campo y la información disponible. En la Tabla 7 se presentan las características más relevantes de la cavidad idealizada y en la Figura 66 la sección considerada.

Tabla 7. Características de la cavidad idealizada

Espesor del techo (m)	6.0
Ancho a nivel de techo (m)	20
Ancho a nivel de la base (m)	20
Altura de piso a techo de la dolina (m)	3.25

Figura 66. Sección tipo considerado en los cálculos



- PARÁMETROS DE CÁLCULO

Con base en los informes de estabilidad con los que se cuenta, los reconocimientos geotécnicos complementarios, la bibliografía existente y la experiencia adquirida en los materiales objeto de estudio, se han adoptado los parámetros geotécnicos necesarios y suficientes para ejecutar la modelación. A continuación, se detallan las consideraciones de cálculo realizadas.

- El peso volumétrico de la roca se ha tomado de los ensayos de laboratorio (Tabla 8) realizados a muestras de SPT en un banco cercano, se ha obtenido un valor de $\gamma=2.30 \text{ gr/cm}^3 \approx 2.30 \text{ t/m}^3$ y un peso volumétrico seco de $\gamma'=2.25 \text{ gr/cm}^3 \approx 2.25 \text{ t/m}^3$.

Tabla 8. Resumen de los ensayos de identificación y estado en los materiales (Comunicación personal, noviembre de 2020)

ENSAYOS DE ESTADO	Nº DATOS	MÁXIMO	MÍNIMO	MEDIA
Peso volumétrico seco (gr/cm^3)	238	2.85	1.49	2.25
Peso volumétrico del lugar (gr/cm^3)	238	2.92	1.58	2.30
Humedad (%)	238	19.62	0.25	2.59

- La resistencia a la compresión simple de la roca intacta ($\sigma_{ci} = 7650 \text{ t/m}^2$) se ha determinado con el valor medio reportado para calizas en la base de datos del programa RS2 (Rocscience Inc, 2022). La Figura 67 muestra los datos para diferentes tipos de roca.

Figura 67. Base de datos: Resistencia a la compresión simple de la roca intacta (Hoek & Brown, 2018)

Field Estimate of Strength	Examples	Strength (x 100 tsm)
Specimen can only be chipped with a geological hammer.	Fresh basalt, chert, diabase, gneiss, granite, quartzite.	>255
Specimen requires many blows of a geological hammer to fracture it.	Amphibolite, sandstone, basalt, gabbro, gneiss, granodiorite, limestone, marble, rhyolite, tuff.	102-255
Specimen requires more than one blow of a geological hammer to fracture it.	Limestone, marble, phyllite, sandstone, schist, shale.	51-102
Cannot be scraped or peeled with a pocket knife, specimen can be fractured with a single blow from a geological hammer.	Claystone, coal, concrete, schist, shale, siltstone.	26-51
Can be peeled with a pocket knife with difficulty, shallow indentation made by firm blow with point of a geological hammer.	Chalk, rocksalt, potash.	5.1-26
Crumbles under firm blows with point of a geological hammer, can be peeled by a pocket knife.	Highly weathered or altered rock.	1.0-5.1
Indented by thumbnail.	Stiff fault gouge.	0.25-1.0

Uniaxial Compressive Strength (sigci): 7650 tsm

- La constante de material de Hoek-Brown ($m_i = 9$) se ha definitivo con el valor mínimo reportado para calizas en la base de datos del programa RS2 (Hoek & Brown, 2018). La Figura 68 muestra los datos para diferentes tipos de roca.

Figura 68. Base de datos: m_i para diferentes tipos de roca (Hoek y Brown, 2018)

Rock Type	Mi Value	Standard Deviation
Marls	7	± 2
Metasandstone	19	± 3
Micritic Limestones	9	± 2
Migmatite	29	± 3
Norite	20	± 5
Obsidian	19	± 3
Peridotite	25	± 5
Phyllites	7	± 3
Porphyries	20	± 5
Quartzites	20	± 3
Rhyolite	25	± 5
Sandstones	17	± 4
Schists	12	± 3
Shales	6	± 2
Siltstones	7	± 2
Slates	7	± 4

Selected Mi Value: 9

Filter List:

- Rock Type
 - Sedimentary
 - Igneous
 - Metamorphic
- Texture
 - Coarse
 - Medium
 - Fine
 - Very Fine

- El valor de *geological strength index* ($GSI = 65$) se ha tomado de Hoek & Brown (2018), dónde menciona el valor máximo para rocas de regular calidad que es la que se observa en el afloramiento rocoso.
- El factor de perturbación ($D = 0.1$) se ha establecido teniendo en cuenta los criterios descritos por Hoek y Brown (2018) en la Tabla 2: Guía para estimar el factor de perturbación D debido a la relajación de esfuerzos y daños por voladuras. En el caso de estudio, en la dolina existe poca o nula influencia de voladuras o excavaciones que puedan generar alivio de esfuerzos en la masa de roca circundante.
- El módulo de deformación de la roca intacta ($E_i = 1.5 \times 10^6 \text{ t/m}^2$) se ha propuesto basado en la experiencia en otros proyectos con características de la roca intacta similares.
- El módulo de deformación del macizo rocoso ($E_{rm} = 8.55 \times 10^6 \text{ t/m}^2$) se ha calculado con la ecuación propuesta por Hoek & Diederichs (2006) que halla de forma empírica el módulo de deformación del macizo rocoso E_{rm} .

$$E_{rm} = E_i \left(0.02 + \frac{1 - D/2}{1 + e^{((60+15D-GSI)/11)}} \right)$$

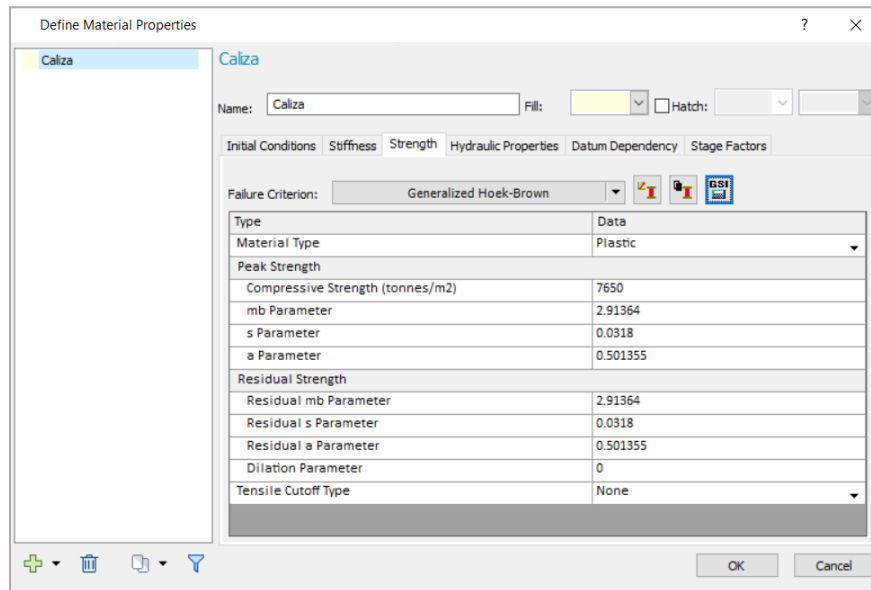
- Se han considerado 3 estratos para modelar las diferentes etapas de análisis (caliza, relleno y terraplén) sin embargo, con el fin de analizar únicamente el comportamiento tenso-deformacional del macizo rocoso, se han asignado parámetros geotécnicos solamente a la roca caliza y tanto el relleno subyacente como el terraplén construido en una etapa posterior han sido considerados como una carga uniformemente distribuida que corresponde al peso de cada material. En la Tabla 9, se presentan los parámetros geotécnicos considerados.

Tabla 9. Estratos y parámetros en el modelo

Estrato	Nombre	ν	$\gamma \text{ (t/m}^3\text{)}$	m_i	D	Carga (t/m^2)
1	Terraplén	-	-	-	-	4.25
2	Relleno	-	-	-	-	1.5
3	Caliza	0.3	2.3	9	0.1	-

- Se ha supuesto que el material presenta un comportamiento elasto-plástico ideal en el que los valores residuales son iguales a los valores pico, esto debido a que no se cuenta con información de pruebas de laboratorio. En la Figura 69 se presentan los valores de m_b , s ya calculados por RS2 para llevar a cabo la modelación.

Figura 69. Constantes m_b , s y a calculadas por RS2

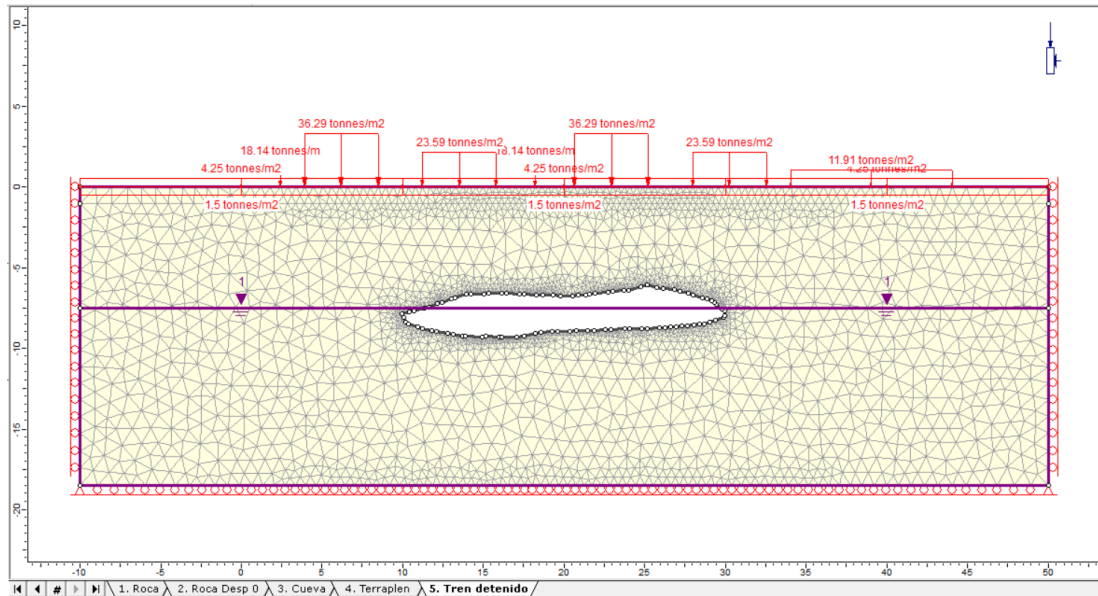


5.3. PASO 3. ANÁLISIS NUMÉRICO

- MALLA DE ELEMENTOS FINITOS

Después de realizar un análisis de sensibilidad, se determinó que, para poder obtener resultados suficientemente confiables, es aceptable utilizar una malla con 5437 elementos triangulares de 3 nodos. Las fronteras laterales de la malla se restringieron en dirección horizontal, mientras que la inferior se limitó en ambos sentidos (Figura 70).

Figura 70. Malla de elementos finitos



- ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Dado el gran nivel de incertidumbre que existe por la escasa información de laboratorio con la que se cuenta, como primera medida se realizó un análisis de sensibilidad para determinar cuál de los parámetros mecánicos gobierna la estabilidad del macizo rocoso. Se planteó hacer una reducción porcentual de manera selectiva de cada uno de ellos.

- ESCENARIOS DE ANÁLISIS

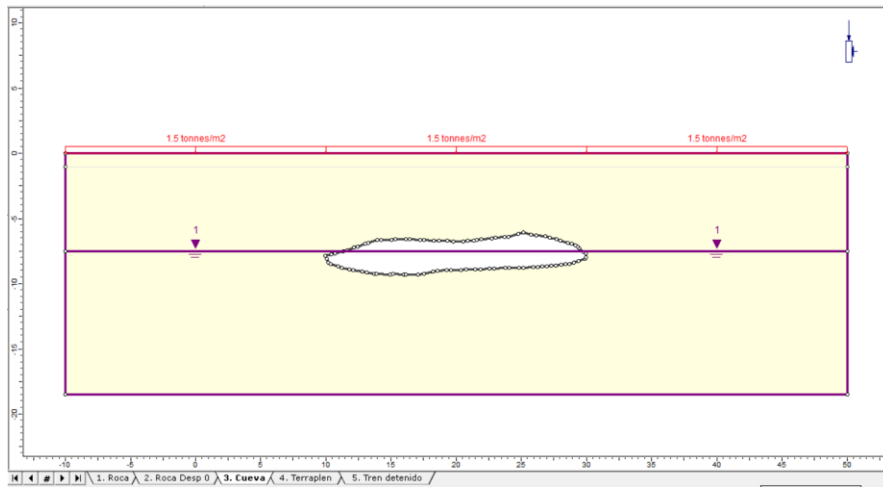
Posteriormente se llevó a cabo un análisis paramétrico planteando tres escenarios:

- Determinación de los mínimos con lo que se lograría la estabilidad en la condición actual.
- Simulación de un posible escenario de la evolución de la estabilidad con el tiempo (efecto de la degradación del material).
- Aplicación de una sobrecarga que simule un tren detenido justo encima de la cavidad.

- **ETAPAS DE ANÁLISIS**

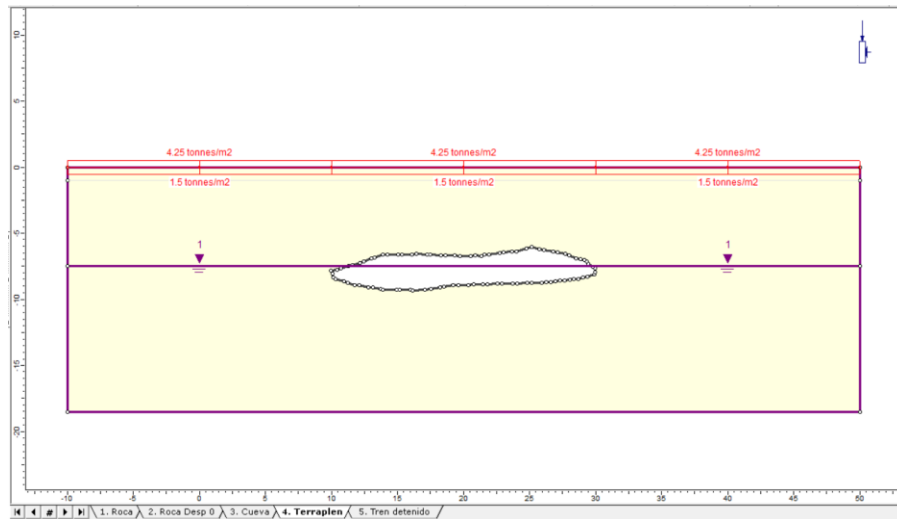
- a) Las etapas de modelado numérico se relacionaron con los tres escenarios propuestos. Para los dos primeros en los que se deseaba analizar el estado de esfuerzos alrededor de la cavidad en la condición actual y a mediano plazo se planteó la primera etapa del modelo:
- Etapa 1. Fase inicial. Estado de esfuerzos en el terreno en la condición actual (Figura 71).

Figura 71. Etapa 1. Fase inicial



- b) Para el tercer escenario en el que se aplicó una sobrecarga (tren detenido justo encima de la cavidad) y se observó su influencia en la estabilidad global del macizo rocoso, se plantearon dos etapas adicionales:
- Etapa 2. Construcción de terraplén elaborado con material de características de balasto encima del terreno natural (Figura 72).

Figura 72. Etapa 2. Construcción de terraplén



- Etapa 3. Colocación del tren detenido (Figura 73). Se ha considerado el peso del tren de diseño (tren de cargas COOPER E-80), según AREMA (2018). En la Figura 74 se presentan los detalles del modelo de la sobrecarga que transmite el tren de diseño. En la Tabla 10 se describen las características de la sobrecarga correspondiente al tren de diseño detenido.

Figura 73. Etapa 3. Tren detenido.

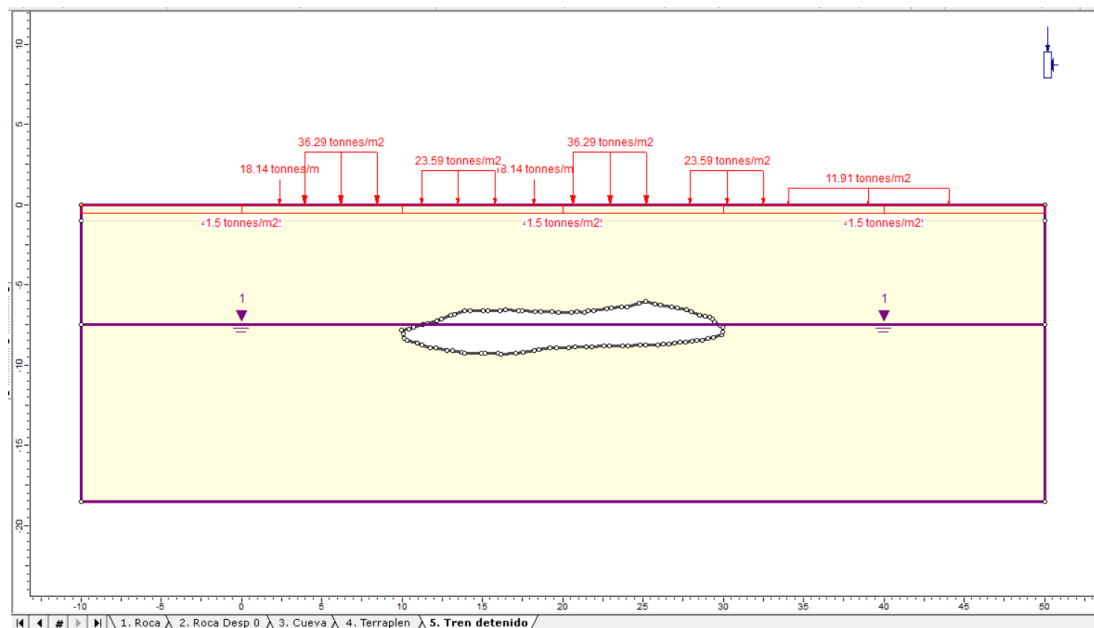
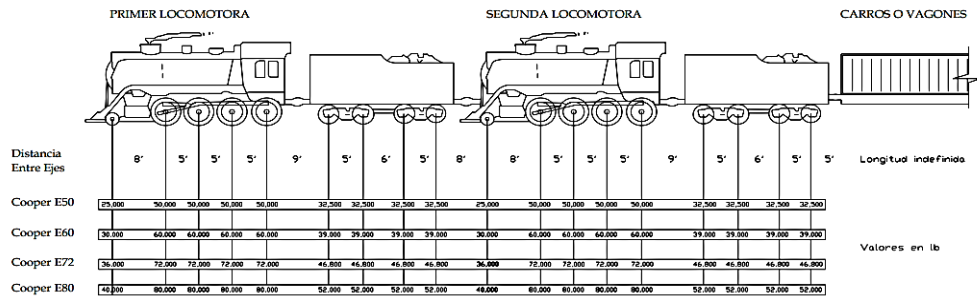
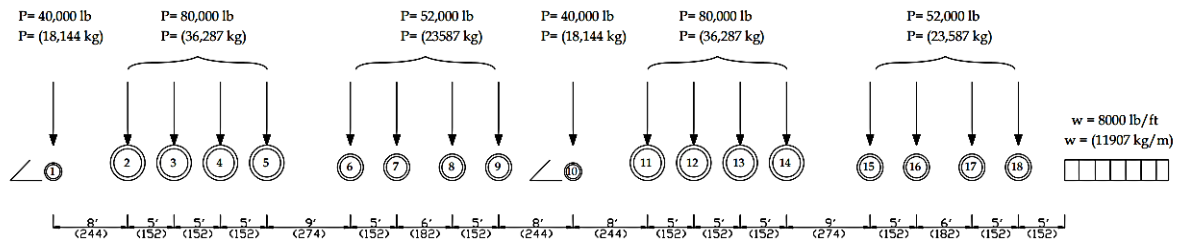


Figura 74. Tren de diseño COOPER E-80. AREMA (2018)



a) Carga viva tipo Cooper



b) Modelo tren de carga Tipo Cooper E-80

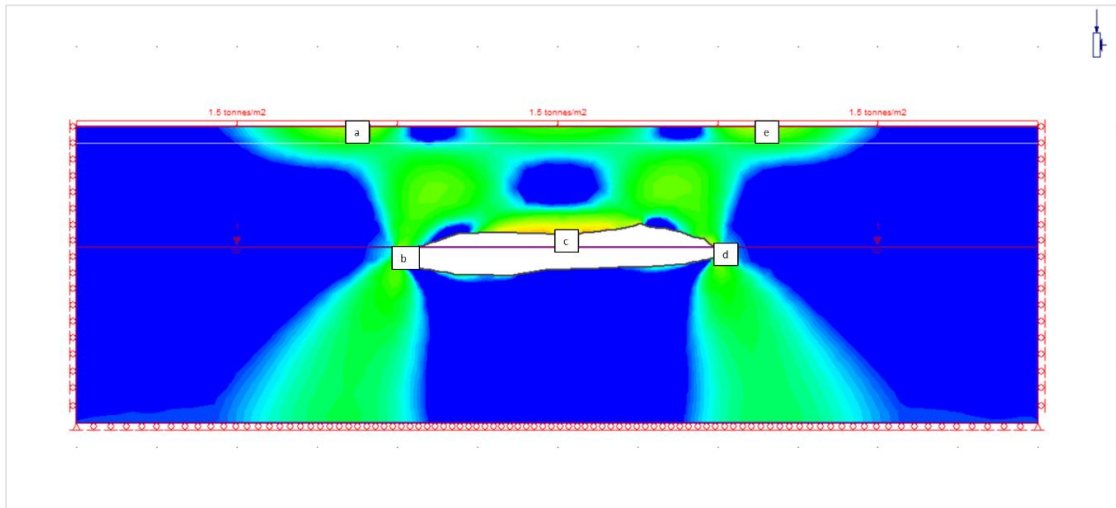
Tabla 10. Carga de diseño correspondiente a tren Cooper E-80. AREMA (2018)

Núm. de ejes	Longitud (m)	Carga (t/m ²)
1	0	18.14
2	2.44	36.29
3	1.52	
4	1.52	
5	1.52	
6	2.74	23.59
7	1.52	
8	1.82	
9	1.52	18.14
10	2.44	
11	2.44	
12	1.52	
13	1.52	36.29
14	1.52	
15	2.74	
16	1.52	
17	1.82	23.59
18	1.52	
19	1.52	
		11.91

5.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación, se presenta los resultados obtenidos en las etapas de modelación del sitio de estudio (cavidad con techo de 6 m). Se ha evaluado el factor de resistencia (SF) como criterio principal de falla. Adicionalmente en la etapa 5, se han revisado los desplazamientos verticales, los vectores de desplazamiento y las trayectorias de esfuerzos, dónde se puede definir mejor el mecanismo de falla. Con el fin de llevar a cabo el análisis de resultados, se tomaron en cuenta 5 puntos de análisis que sirvieran como puntos de referencia en donde se estima importante saber su comportamiento en términos de los desplazamientos (Figura 75).

Figura 75. Puntos de análisis



5.4.1. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

De la Tabla 11 a la Tabla 14 se presenta el resumen de los valores de factor de resistencia (FR) y la altura de la zona con puntos de cortante obtenidos en el techo de la cavidad para cada una de las reducciones de parámetros propuestas. Con el fin de determinar la condición de seguridad se ha tomado el siguiente criterio: Los valores de $FR \leq 1.5$ representan una falla de servicio potencial que debe ser evaluada junto con la altura de la zona con puntos de cortante.

En ese sentido se puede identificar en la Tabla 11 que el *GSI* es un parámetro que tiene gran influencia en la estabilidad del macizo rocoso pues su variación en un pequeño porcentaje (5%) genera reducciones importantes en el factor de resistencia y en la altura de la zona con puntos de cortante sobre el techo de la cavidad.

Tabla 11. Variación del GSI.

Modelo	GSI	E _i (t/m ²)	σ' _c (t/m ²)	m _i	D	FR	
						Techo cavidad	Altura puntos de cortante (m)
100%	65	1.50E+06	7650	9.0	0.1	1.86	0.00
95%	62					1.24	0.09
90%	59					1.03	0.52
85%	55					1.03	1.54
80%	52					1.03	2.19
75%	49					1.03	2.37
70%	46					1.03	2.45

En el caso del módulo de deformación de la roca intacta (E_i), se observa que este parámetro tiene una mínima contribución en la estabilidad del macizo rocoso pues como se muestra en la Tabla 12, al modificarlo no se presentan cambios en el factor de resistencia ni en la zona con puntos de cortante sobre el techo de la cavidad.

Tabla 12. Variación de E_i.

Modelo	E _i (t/m ²)	GSI	σ' _c (t/m ²)	m _i	D	FR	
						Techo cavidad	Altura puntos de cortante (m)
100%	1.50E+06	65	7650	9.0	0.1	1.86	0
95%	1.43E+06					1.86	0
90%	1.35E+06					1.86	0
85%	1.28E+06					1.86	0
80%	1.20E+06					1.86	0
75%	1.13E+06					1.86	0

Por su parte, la resistencia al esfuerzo de compresión uniaxial de la roca intacta (σ'_c) también interviene en la estabilidad del macizo rocoso, aunque en menor medida que el GSI. Esto se evidencia en la Tabla 13 que muestra una relación directamente proporcional entre la variación de σ'_c y el factor de resistencia (FR) resultante, sin embargo, no sucede lo mismo con la altura de la zona con puntos de cortante sobre el techo de la cavidad, que se mantiene casi intacta.

Tabla 13. Variación de σ'_c .

Modelo	σ'_c (t/m ²)	GSI	E _i (t/m ²)	m _i	D	FR	
						Techo cavidad	Altura puntos de cortante (m)
100%	7650	65	1.50E+06	9.0	0.1	1.86	0.00
95%	7268					1.72	0.00
90%	6885					1.63	0.00
85%	6503					1.45	0.00
80%	6120					1.24	0.06
75%	5738					1.24	0.19
70%	5355					1.03	0.25

Finalmente, de los resultados obtenidos de la reducción de todas las variables en la misma proporción (Tabla 14) y su comparación con los valores de factor de resistencia (Figura 76) y altura de la zona con puntos de cortante (Figura 77) después de variar cada una de forma aislada (GSI, E_i y σ'_c) se puede concluir que el parámetro mecánico que gobierna la estabilidad del macizo rocos es el GSI que hace referencia a las características observables en campo como grado de fracturamiento y calidad de las discontinuidades.

Tabla 14. Variación de todos los parámetros en la misma proporción.

Modelo	E _i (t/m ²)	σ'_c (t/m ²)	GSI	m _i	D	FR Condición actual	
						Techo cavidad	Altura puntos de cortante (m)
100%	1.50E+06	7650	65	9.0	0.1	1.86	0
95%	1.43E+06	7268	62			1.24	0
90%	1.35E+06	6885	59			1.03	0.92
85%	1.28E+06	6503	55			1.03	1.40
80%	1.20E+06	6120	52			1.03	2.36
75%	1.13E+06	5738	49			1.03	2.34
70%	1.05E+06	5355	46			1.03	2.37

Figura 76. Variación de parámetros vs factor de resistencia (FR)

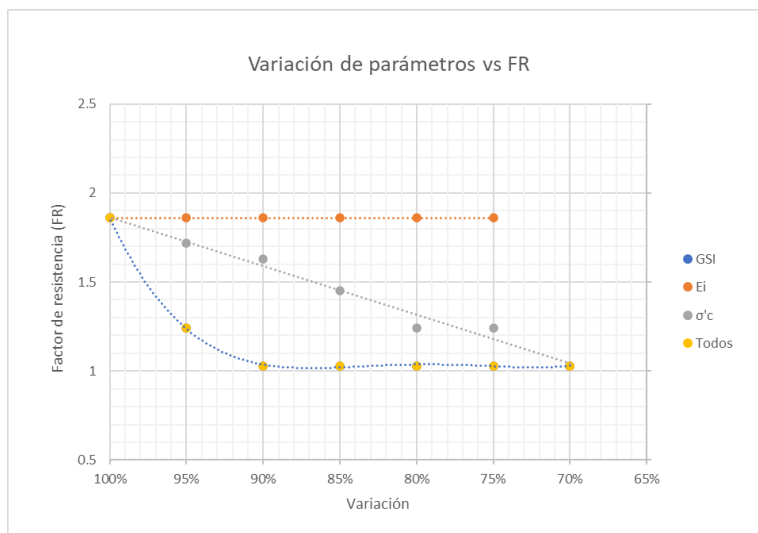
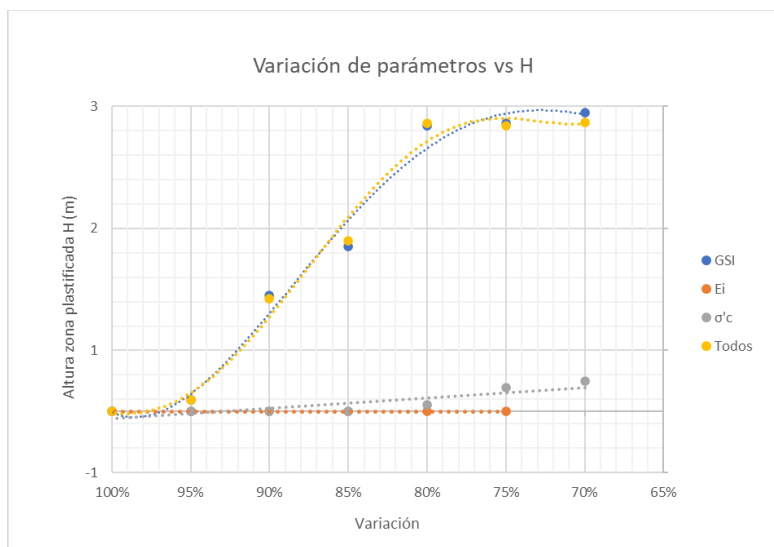


Figura 77. Variación de parámetros vs Altura de la zona de cortante



5.4.2. ESCENARIO A. PARÁMETROS MÍNIMOS PARA QUE LA CAVIDAD SEA ESTABLE EN LA CONDICIÓN ACTUAL.

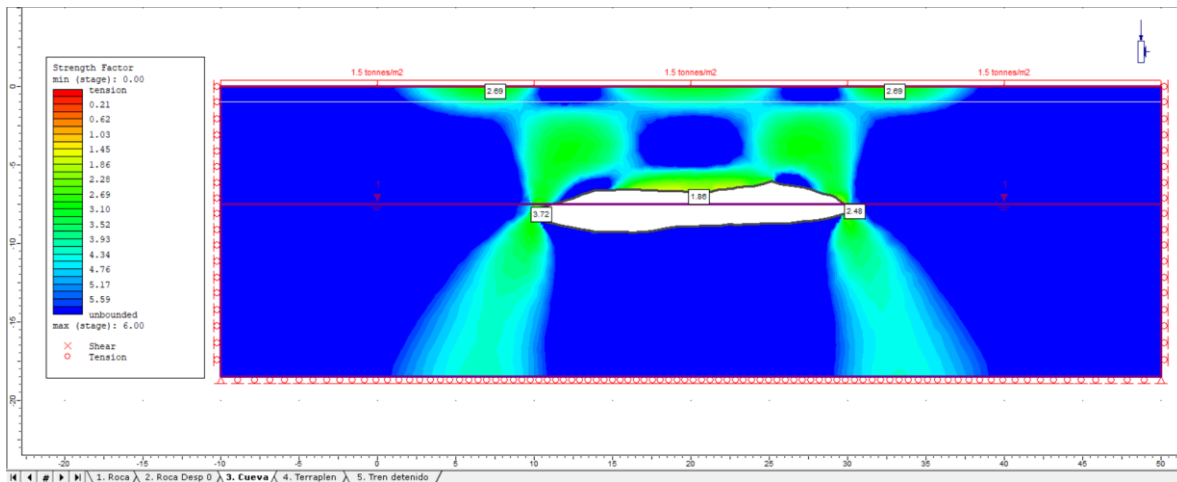
Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el análisis de sensibilidad, las propiedades mínimas del terreno con las que se lograría la estabilidad de la cavidad en la condición actual se encuentran entre el 100% y el 95% de los parámetros encontrados en las bases de datos de la bibliografía (Tabla 15). Con estos valores se llega a factores de resistencia en el techo de la cavidad (FR) de 1.86 y 1.24 respectivamente y, no se genera una zona con puntos de cortante.

Tabla 15. Propiedades mínimas del terreno

Modelo	E_i (t/m ²)	σ'_c (t/m ²)	GSI	m_i	D	FR Condición actual	
						Techo cavidad	Altura puntos de cortante (m)
100%	1.50E+06	7650	65	9.0	0.1	1.86	0
95%	1.43E+06	7268	62			1.24	0

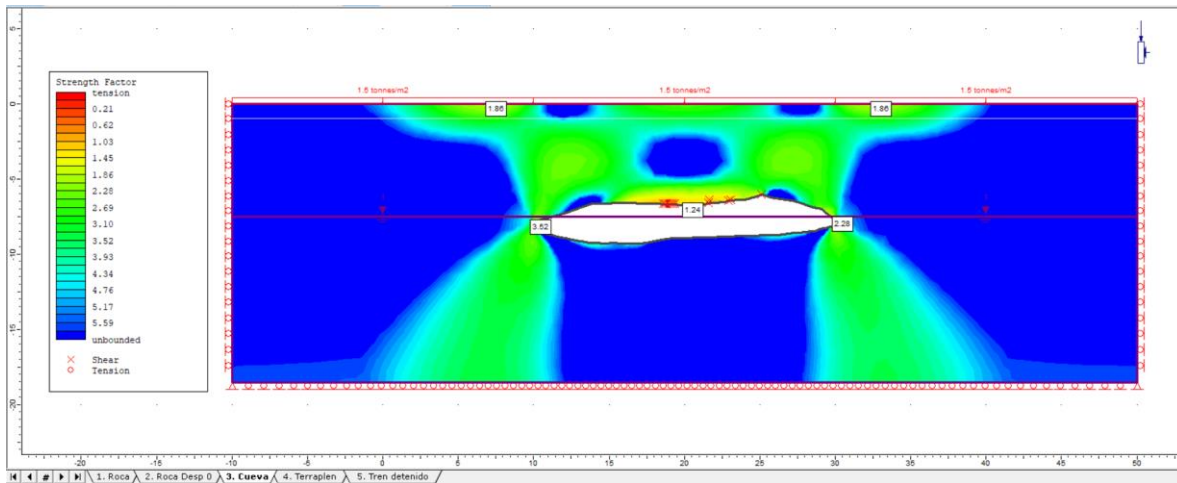
En la Figura 78 se muestra la distribución del factor de resistencia (FR) para el modelo que considera el 100% de los parámetros teóricos, dónde el mínimo (1.86) se presenta sobre el techo de la cavidad con color amarillo y los máximos hacia las paredes de ésta (3.72 y 248) con color verde y azul.

Figura 78. Factor de resistencia (FR), considerando el 100% de las propiedades teóricas.



Por otra parte, en la Figura 79 se muestra la distribución del factor de resistencia (FR) en la modelación con el 95% de los parámetros teóricos, dónde el mínimo (1.24) se presenta sobre el techo de la cavidad con color amarillo y los máximos hacia las paredes de ésta (3.52 y 2.28) con color verde y azul. Sobre el techo de la cavidad aparecen puntos de cortante, lo que indica que se encuentra estable pero susceptible a fallar ante la aplicación de alguna sobrecarga o el cambio de las condiciones estructurales por algún agente externo o el proceso mismo de evolución de ésta.

Figura 79. Factor de resistencia (SR) considerando el 95% de las propiedades teóricas.



5.4.3. ESCENARIO B. SIMULACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE LA ESTABILIDAD.

En la Tabla 16 se presenta el resumen de los valores de factor de resistencia (FR) y altura de la zona de cortante sobre el techo de la cavidad, obtenidos en los puntos de análisis para cada una de las reducciones de parámetros realizadas con el fin de simular la evolución de la estabilidad del macizo rocos por efecto de agentes externos como la degradación del material o la evolución de la cavidad. De la Figura 80 a la Figura 75 se muestra la distribución del factor de resistencia (FR) para cada una de las reducciones propuestas.

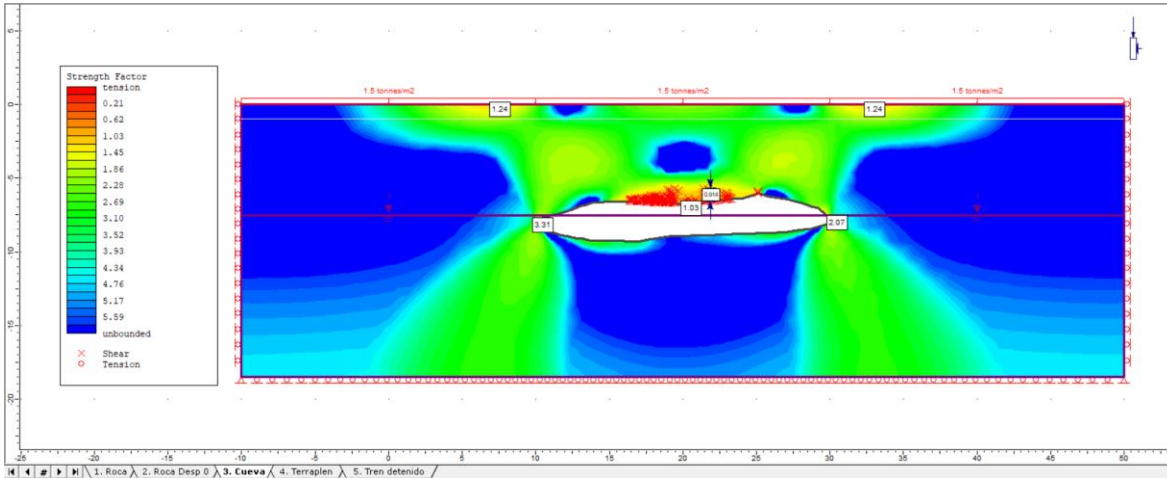
Tabla 16. Evolución del factor de resistencia (FR) y la altura de la zona de cortante.

Modelo	a	b	c	d	e	Altura puntos de cortante (m)
100%	2.69	3.72	1.86	2.48	2.69	0
95%	1.86	3.52	1.24	2.28	1.86	0
90%	1.24	3.31	1.03	2.07	1.24	0.92
85%	1.03	2.9	1.03	2.07	1.03	1.4
80%	1.45	2.9	1.03	1.86	1.45	2.36
75%	1.24	2.69	1.03	1.86	1.24	2.34

En el caso de la modelación con el 90% de los parámetros teóricos, los resultados muestran que se presentaría una condición de falla. Como se observa en la Figura 80, el factor de resistencia mínimo (1.03) se ubicaría sobre el techo de la cavidad (color amarillo) y los máximos hacia las paredes de ésta (3.31 y 2.07, color verde y azul). Sobre el techo se formaría una zona con puntos de cortante hasta una altura de 0.9m, lo cual representa la zona dónde

el material pierde la resistencia y se produciría la condición de falla incipiente. Además, en superficie se tiene que $FR=1.23$ lo cual indica que la falla de la cavidad estaría influyendo en el estado de esfuerzos de la superficie del terreno.

Figura 80. Factor de resistencia (FR), considerando el 90% de las propiedades teóricas.



Los demás modelos (85% a 75%) aportan más información sobre el mecanismo de falla. De la Figura 81 a la Figura 83 se muestra que el factor de resistencia mínimo (1.03) se ubicaría sobre el techo de la cavidad (color amarillo) y permanecería constante. Los máximos se ubicarían hacia las paredes con $FR \geq 1.8$ (color verde), lo cual indica que permanecerían estables y el colapso se daría por la falla del techo, lo cual concuerda con el proceso de formación de dolinas y cenotes.

La altura de la zona con puntos de cortante sobre el techo aumentaría de 1.4m a 2.34m, al igual que en los modelos anteriores representa la zona dónde el material pierde la resistencia y se produciría la condición de falla incipiente.

Figura 81. Factor de resistencia (FR), considerando el 85% de las propiedades teóricas.

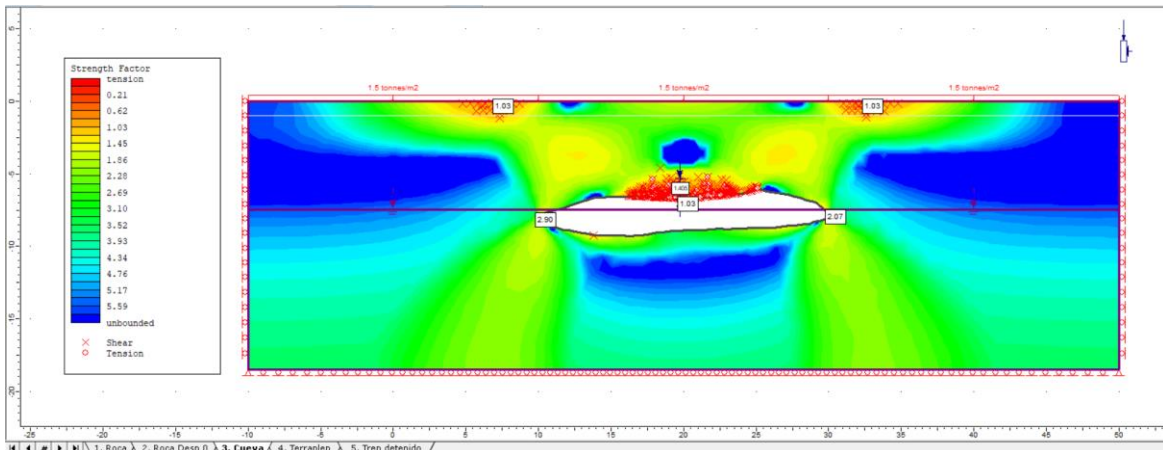


Figura 82 . Factor de resistencia (FR), considerando el 80% de las propiedades teóricas.

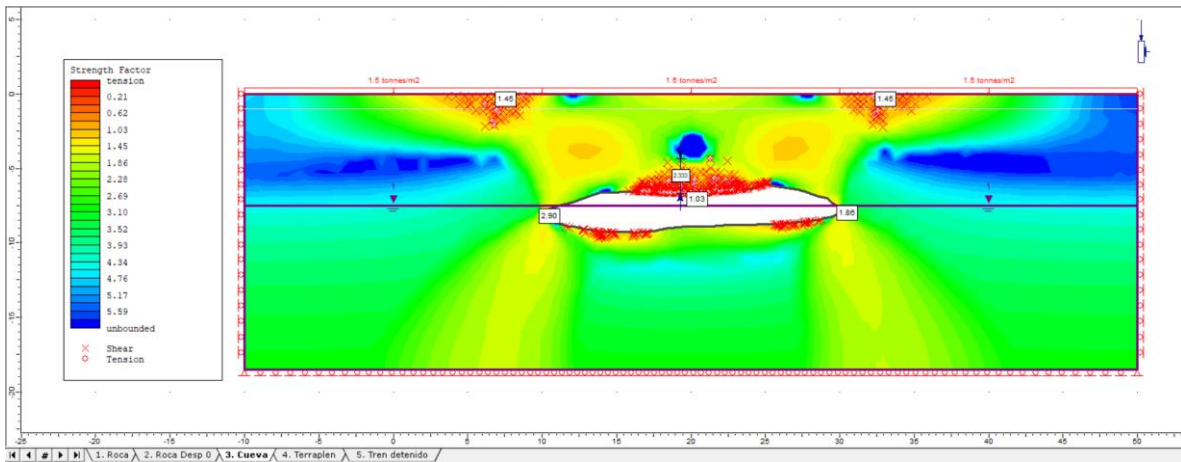
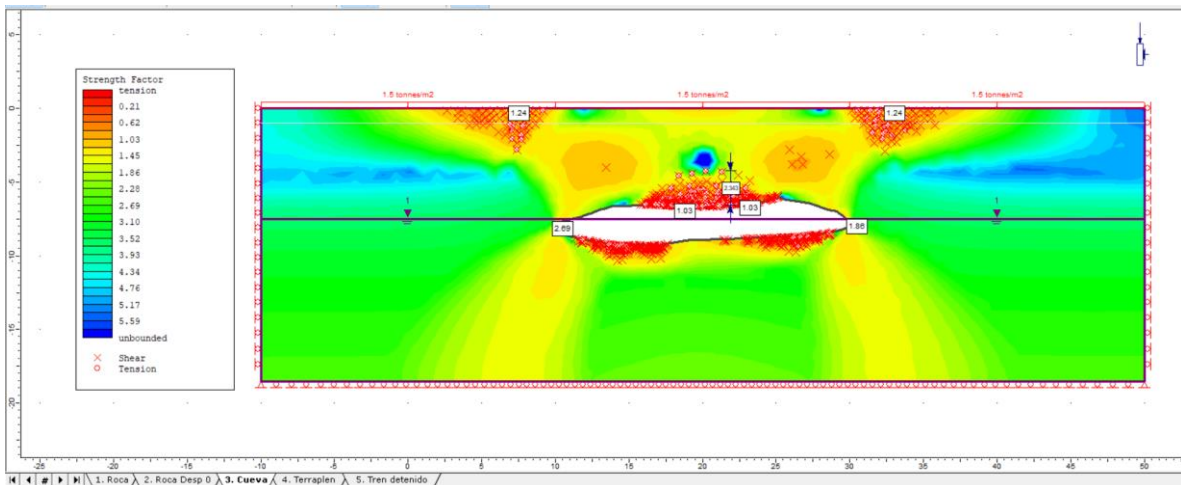


Figura 83. Factor de resistencia (FR), considerando el 75% de las propiedades teóricas.



5.4.4. ESCENARIO C. APLICACIÓN DE UNA SOBRECARGA. TREN DETENIDO.

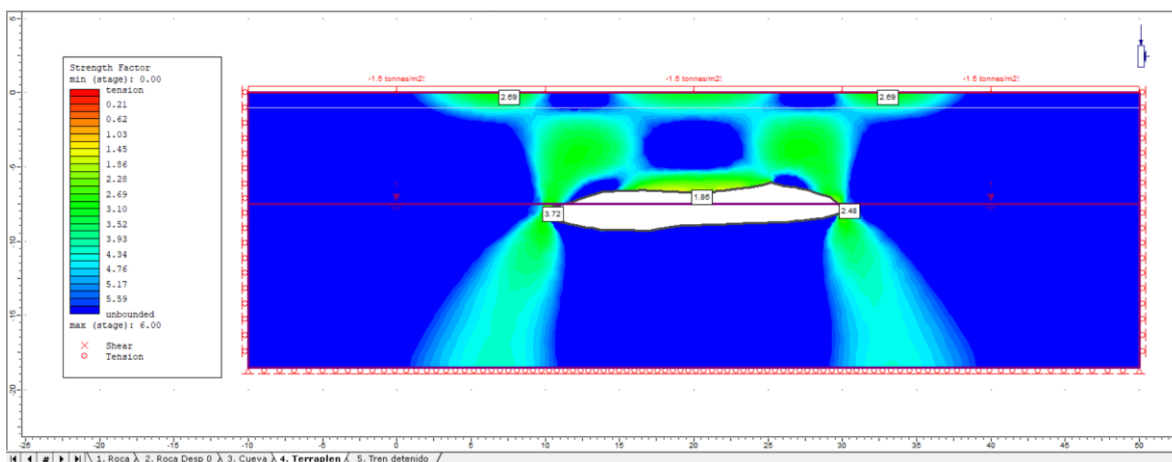
Para modelar este escenario de análisis de ha decidido trabajar con el 100% de los parámetros teóricos que como se ha visto en los incisos anteriores representan bien las propiedades mínimas del terreno con las que se lograría la estabilidad de la cavidad en la condición actual ya que con estos valores se llega a un factor de resistencia en el techo (FR) de 1.86 y, no se genera una zona con puntos de cortante.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos al aplicar una sobrecarga inducida por la construcción de un terraplén y la posterior ubicación de un tren que se detiene justo encima de la cavidad.

- ETAPA 2. CONSTRUCCIÓN TERRAPLÉN

En esta etapa no se presentan cambios en el estado de esfuerzos del material, lo cual indica que la sobrecarga inducida por el terraplén tiene influencia mínima en este caso. En la Figura 84 se presenta la distribución del factor de resistencia que ya fue descrita en los párrafos anteriores.

Figura 84. Factor de resistencia (FR) al construirse el terraplén.



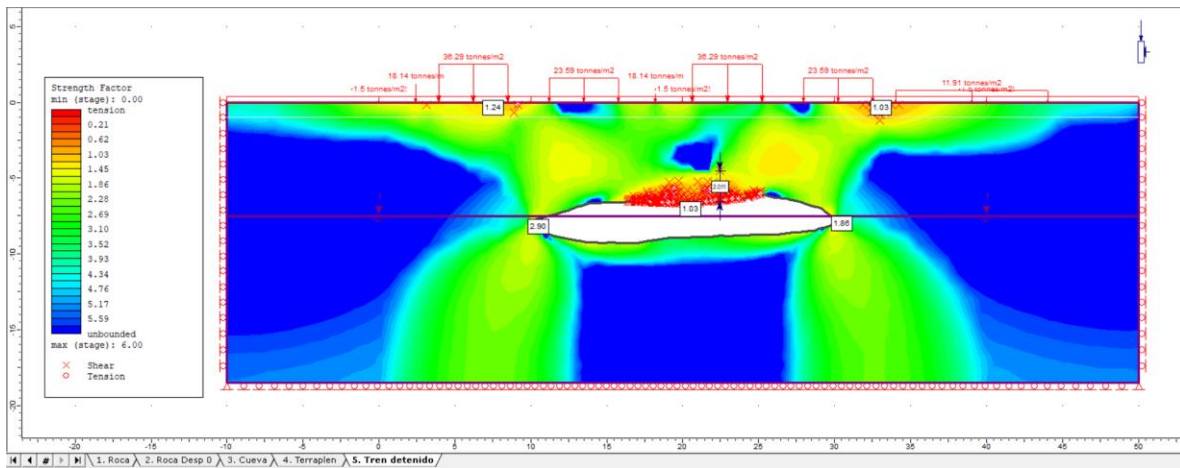
- ETAPA 3. TREN DETENIDO

En esta etapa se observa que, al inducir la sobrecarga del tren detenido justo encima de la cavidad se presenta la condición de falla incipiente en el techo, lo cual indica que el terreno colapsaría y sería necesario diseñar algún sistema de soporte en superficie o algún tipo de mejoramiento en el techo de la cavidad. Se revisaron: factor de resistencia, desplazamientos verticales, vectores de desplazamiento y trayectorias de esfuerzos. Los resultados obtenidos se presentan a continuación.

• Factor de resistencia

En la Figura 85 se muestra la distribución del factor de resistencia (FR), dónde el mínimo (1.03) se presenta sobre el techo de la cavidad con color amarillo y los máximos hacia las paredes de esta (2.90) con color verde y azul. Sobre el techo hay puntos de cortante a una altura de 2.01m, lo que indican que se presenta la condición de falla incipiente.

Figura 85. Factor de resistencia (FR), tren detenido.



- **Desplazamientos verticales y vectores de desplazamiento**

El mecanismo de falla se presenta por la caída del techo que produce el colapso hasta la superficie, las paredes se mantienen prácticamente intactas. En la Figura 86 y la Figura 87 se observa una concentración de desplazamientos descendentes en el centro del techo de la cavidad, pero con una magnitud muy pequeña (4 mm), representados con el color azul en diferentes tonos. En las paredes se presentan desplazamientos menores (1 mm) con color amarillo.

Figura 86. Desplazamientos verticales, tren detenido.

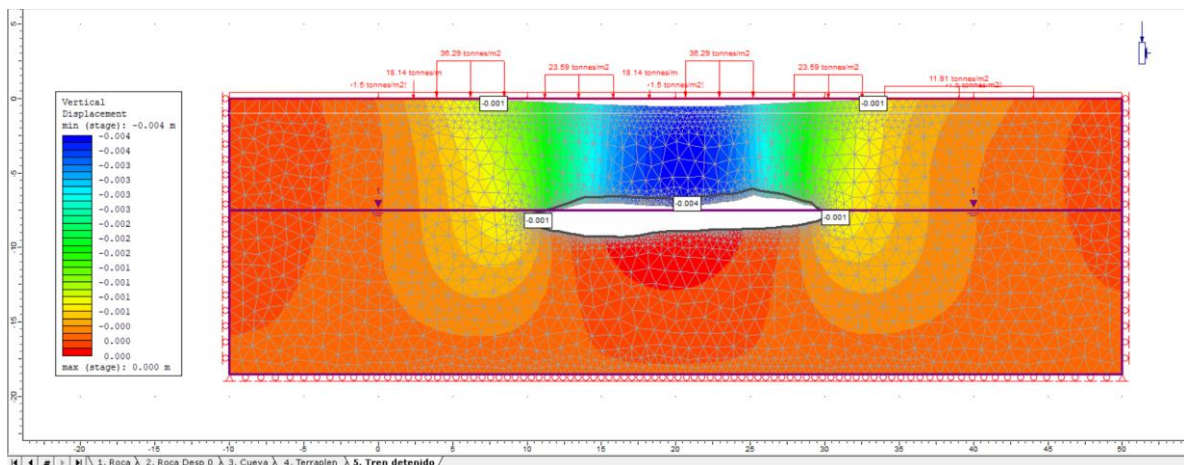
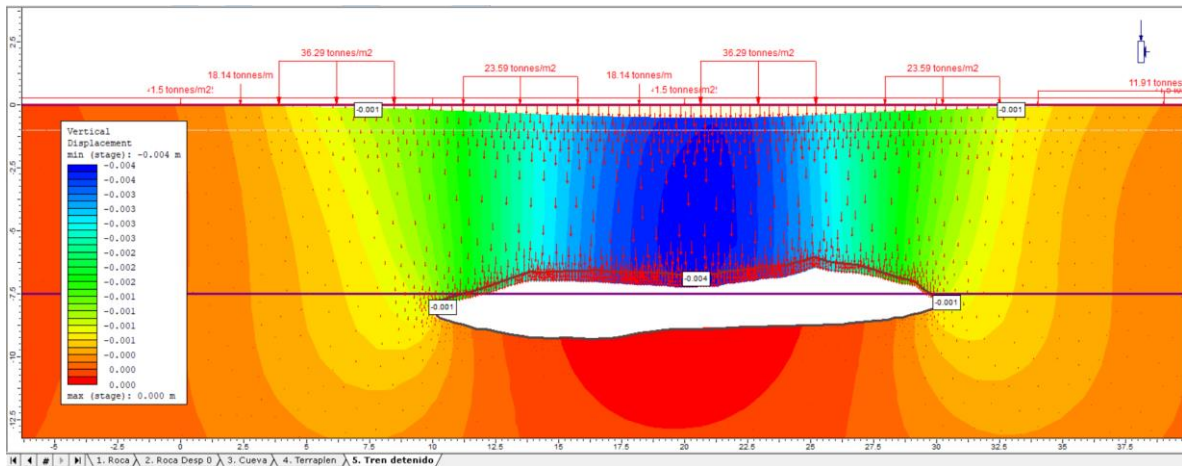


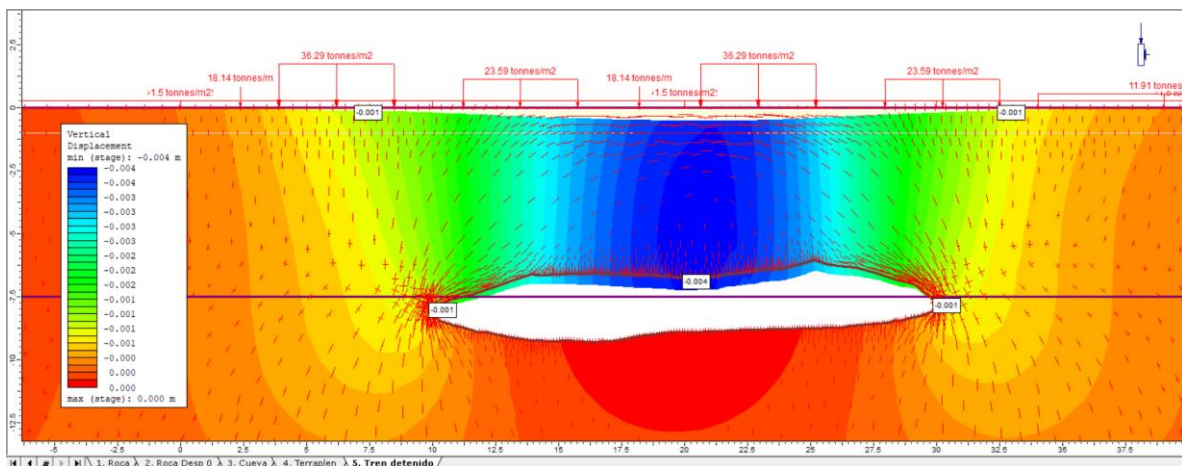
Figura 87. Vectores de desplazamiento, tren detenido.



- **Trayectoria de esfuerzos**

En la Figura 88 se presentan las trayectorias de esfuerzos alrededor de la cavidad, se desarrolla un efecto de arco en el que se afloja el material del techo y se da una transferencia de esfuerzos hacia las paredes que serán los apoyos, como sucede en un arco estructural. Como consecuencia se observa una concentración de esfuerzos en las paredes de la cavidad.

Figura 88. Trayectorias de esfuerzo, tren detenido.



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este documento se ha presentado una descripción detallada de una propuesta metodológica para hacer un análisis paramétrico de la estabilidad de cavidades ubicadas en la península de Yucatán, que tiene en cuenta las características únicas del entorno kárstico como la presencia de discontinuidades y el grado de meteorización del macizo rocoso.

En primera instancia, se ha establecido un panorama general acerca de la problemática del karst en el mundo haciendo una revisión de los antecedentes existentes en la bibliografía. Se evidencia que el fenómeno de karsticidad es un problema de gran impacto que no debe ser tomado a la ligera en los proyectos que se desarrollen en este tipo de entorno, los casos documentados demuestran los graves peligros que pueden presentarse como: falla del techo de las cavidades (más difícil cuando es instantánea), asentamientos, entrada rápida de grandes cantidades de agua en minas, inundaciones, vaciado rápido de lagos, entre otros.

Es importante considerar que la formación de dolinas es, definitivamente uno de los peligros más típicos en zonas kársticas, se pueden originar a través de diferentes procesos, siendo las tipologías más difíciles aquellas que se caracterizan por desarrollarse rápidamente, como las dolinas de colapso. Sin embargo, las dolinas de hundimiento y de subsidencia representan el mayor peligro para las obras de ingeniería, la mayoría ocurren durante lluvias abundantes o cuando el drenaje natural del terreno es afectado por obras de ingeniería civil, lo anterior debido a que se generan por la filtración del agua en la roca.

Respecto al karst de México, existe una gran área de oportunidad en su estudio; a pesar de que la plataforma calcárea de la península de Yucatán es la zona kárstica más grande y la más estudiada del país, el karst mexicano es muy diverso y, es incorrecto extrapolar estudios realizados en esta área con el karst desarrollado en montañas plegadas y falladas de otras zonas del territorio (karst no desarrollado, subhúmedo, tropical, etc.). Sobre todo, se debe prestar especial atención al karst desarrollado en yesos, ya que éste es probablemente el más propenso del país a colapsos o asentamientos en el corto y mediano plazo debido a su acelerado ritmo de evolución. Se puede encontrar en la zona de Huitzuc de los Figueroa, Guerrero, así como Galeana, Nuevo León, clasificado como karst semiárido, fósil e inactivo.

Otro punto que se ha considerado en este trabajo son los métodos de exploración geotécnica, éstos constituyen la parte esencial de los estudios geológico-geotécnicos necesarios para el proyecto y construcción de una obra de ingeniería en un terreno kárstico. En primer lugar, se deben llevar a cabo los estudios previos, en esta fase los mapas de riesgo kárstico resultan de gran utilidad considerando que delimitan las regiones donde se ha desarrollado o se puede desarrollar karst y también, resaltan su nivel de peligrosidad (severo, alto, moderado, bajo).

Además, otras técnicas geodésicas como la fotogrametría digital y la teledetección resultan ser muy convenientes para realizar análisis de peligrosidad por subsidencia. Por ejemplo, las imágenes tomadas en años previos pueden ayudar a localizar dolinas que han quedado

ocultas. También, otro tipo de técnicas de teledetección como la interferometría de radar pueden ayudar a localizar zonas sometidas a una subsidencia gradual, así como a cuantificar la velocidad de la deformación.

Debe señalarse que el levantamiento en campo es una de las tareas más importantes en la fase de estudios previos. Las estructuras de subsidencia que se puedan observar en los afloramientos (naturales y artificiales) suministran una valiosa información sobre diversos aspectos como: Dónde y cómo ha actuado la subsidencia en el pasado (procesos y mecanismos) y dónde puede actuar en el futuro.

Por otra parte, los sondeos mecánicos son una de las técnicas de estudio más frecuentemente utilizadas en los proyectos en zonas kársticas. Los procedimientos de perforación dependen de la naturaleza del terreno y del tipo de muestreo y testificación que se vaya a realizar, los más usuales son los sondeos a rotación (usados para recuperar testigos) y los sondeos helicoidales y a rotoperCUSión (empleados solamente para detectar la ubicación de una posible cavidad).

Sin embargo, además de que los sondeos son relativamente costosos, se encuentran una serie de limitaciones que deben ser tenidas en cuenta: Generalmente no permiten detectar de forma fiable las zonas afectadas por subsidencia sin generación de cavidades; además, su capacidad para detectar oquedades es limitada, a no ser que se lleven a cabo con un espaciado reducido; y así mismo, las interpretaciones a partir de los datos de sondeo en ocasiones poseen un alto grado de incertidumbre ya que las estructuras pueden ser muy complejas.

Cabe considerar, por otro lado, que la prospección geofísica es un recurso ampliamente utilizado para caracterizar el terreno kárstico dado que proporciona información muy útil, por ejemplo, con la detección de cavidades, estructuras de subsidencia o zonas anómalas que pueden posteriormente ser investigadas de forma directa mediante sondeos.

No obstante, la caracterización adecuada de las heterogeneidades del entorno kárstico representa un desafío para la aplicación de los métodos geofísicos pues, dependiendo de las condiciones climáticas, el drenaje, la saturación y las características físicas o geoquímicas del sistema, éstos pueden variar. Es por ello, que debe prestarse especial atención a la planeación de la prospección geofísica y hacer uso del criterio ingenieril para elegir los métodos más adecuados para el reconocimiento del terreno kárstico y proyecto en particular.

Pasando a la metodología de análisis propuesta, ésta tiene como objetivo evaluar el mecanismo de falla de las cavidades kársticas de la península de Yucatán simulando la degradación de las propiedades del material mediante un análisis paramétrico. Está basada en un procedimiento paso a paso que comienza con la fase 1: investigación en campo y laboratorio, dónde se debe recopilar toda la información disponible sobre la cavidad a analizar. Al respecto, se concluye que es un requisito indispensable realizar estudios geológico-geotécnicos rigurosos con métodos de exploración tanto directos como indirectos,

teniendo en cuenta las ventajas y desventajas que cada uno presenta, a fin de caracterizar adecuadamente el terreno kárstico y determinar la ubicación y geometría de la cavidad.

Deben estar acompañados de ensayos de laboratorio adecuados que conduzcan a definir los factores que juegan un papel importante en la estabilidad del macizo rocoso alrededor de la cavidad, como las propiedades mecánicas actuales del material involucrado, la susceptibilidad de la roca a los procesos de meteorización y degradación, la propagación de la meteorización según las formas preferenciales, entre otras. Se deben realizar las pruebas de laboratorio adecuadas destinadas a caracterizar las propiedades físicas y mecánicas más importantes del material rocoso intacto y meteorizado.

Dos limitantes que deben ser consideradas son el bajo presupuesto y el poco tiempo planeado para las fases de estudios previos y diseño, que en muchas ocasiones se destinan a los proyectos. Cuanto menor sea el presupuesto para investigación en campo y laboratorio, mayor será el grado de incertidumbre, de esta manera un menor presupuesto implica menos ensayos y sondeos y por tanto menor calidad de la información.

Ante esta situación, en este trabajo se ha planteado hacer un análisis paramétrico con un modelo numérico simplificado usando los datos del sitio que puedan ser recolectados, junto con los parámetros reportados en la bibliografía para rocas kársticas. Este análisis servirá para establecer un marco de referencia que ayude a tener un mejor entendimiento de los mecanismos de comportamiento y funcionamiento del problema en cuestión.

Claramente, solo será de utilidad en las fases preliminares del proyecto y, para lograr un análisis realista que tenga fines de diseño será indispensable complementarlo con datos obtenidos mediante una exploración y ensayos de laboratorio rigurosos, que permitan caracterizar el modelo numérico con un nivel de precisión que lleve a un verdadero entendimiento del comportamiento mecánico de las cavidades y logre mitigar el riesgo de un posible colapso del techo.

Siguiendo con los pasos planteados en la metodología, en la fase 2: análisis teórico y conceptual, se seleccionan el tipo de modelo y el criterio de resistencia que representan mejor el problema, tomando como referencia la clasificación del GSI (Hoek & Brown, 2018), la cual se basa en una apreciación cualitativa del macizo rocoso en términos del tamaño de bloques, rugosidad de las discontinuidades y grado de alteración (meteorización) de las juntas.

Este punto representa una gran ventaja ya que de forma muy sencilla se puede tener una idea de los factores que dominan el mecanismo de falla, siendo los más comunes aunque no los únicos, los siguientes: a) deslizamiento y rotación de los bloques relacionados con las características de las discontinuidades, caso en el que se utilizaría el criterio de Barton-Bandis (2013) o, b) traslación y rotación en cualquier dirección entre pequeños bloques de roca intacta que no se pueden fracturar, presentes en macizos rocosos con gran número de

discontinuidades que se comportarían como un material homogéneo, entonces, el criterio adecuado sería el de Hoek-Brown (2018).

Finalmente, en la fase 3: análisis numérico, se trazan tres escenarios: a) evaluación de la estabilidad de la cavidad, b) planteamiento de una posible evolución de la estabilidad con el tiempo (efecto de la degradación del material) y, c) observación del campo de desplazamientos inducidos por un cambio en las condiciones de contorno.

De esta fase se concluye que, en modelado numérico, el ingeniero debe agudizar su criterio para plantear el problema correctamente en el programa y tener en cuenta las limitantes que puedan representar las hipótesis y simplificaciones que haya considerado. Hay que prestar especial atención en el análisis de resultados para identificar los errores, pues el modelo numérico siempre dará una solución al problema planteado atendiendo a los datos de entrada que se hayan introducido. Por tanto, este resultado no tiene por qué ser necesariamente correcto si se ha cometido un error en la información proporcionada o en las hipótesis consideradas.

Pasando a la aplicación de la metodología a un ejemplo práctico, ésta se llevó a cabo con datos de una cavidad superficial con 6 m de profundidad, 3.25 m de altura y 20 m de diámetro, ubicada a 14 km del municipio de Chocholá, sobre la carretera Federal Mérida – Campeche.

La información con la cual se contó para ejecutar la primera fase (investigación en campo y laboratorio), evidencia que la detección de las cavidades es una tarea compleja y se requiere hacer uso de dos o más métodos geofísicos para confirmar que las anomalías detectadas con cada uno realmente corresponden a la misma oquedad y no a otro tipo de configuración geológica o estructural. Además, es un requisito indispensable llevar a cabo sondeos con recuperación de testigos, primero para comprobar con métodos directo la geometría y ubicación detectadas con los métodos indirectos (geofísicos), y segundo, para la obtención de muestras que deben ser ensayadas en laboratorio, destinadas a caracterizar las propiedades físicas y mecánicas más importantes del material rocoso intacto y meteorizado.

En este caso, la información fue escasa y con elevado grado de incertidumbre. El ancho y largo de la cavidad no pueden ser definidos con exactitud pues faltan sondeos que delimiten estas dimensiones correctamente; tampoco se pueden establecer las propiedades mecánicas del macizo rocoso porque no se contó con ensayos de laboratorio.

Con relación a la problemática expuesta se ha planteado hacer un análisis paramétrico con un modelo numérico simplificado usando los datos del sitio que pudieron ser recolectados, junto con los parámetros reportados en la bibliografía para rocas kársticas. En el paso 2 (análisis teórico y conceptual), se ha decidido realizar un modelo continuo, bidimensional plástico de deformación plana, aplicando el criterio de resistencia de Hoek-Brown en el programa RS2 (Rocscience Inc, 2022), que usando elemento finito (FEM) calcula un factor de resistencia (Strenght Factor).

Se infiere, que este último es el más adecuado para representar el comportamiento mecánico del material ya que en el levantamiento geológico se observó un macizo rocoso con bloques de tamaño mediano, alto grado de meteorización y juntas rugosas. Por otra parte, debe tenerse en cuenta que posiblemente, un modelo tridimensional, simule de forma más precisa el problema en estudio y los valores obtenidos con dicho modelo puedan diferir con los derivados de un modelo de deformación plana. La comparación de los resultados de modelos de estabilidad 2D y 3D, sería una línea de investigación de gran interés para trabajos futuros.

Para finalizar, en el paso 3 (análisis numérico), se ha hecho un análisis paramétrico con reducción porcentual de los parámetros mecánicos del macizo rocoso. Como primera medida, se hallaron los mínimos con lo que se lograría la estabilidad en la condición actual, para ello, se establecieron unos valores iniciales de GSI , E_{rm} , E_i y σ'_c , a partir de los reportados para rocas kársticas en las bases de datos de la bibliografía.

Se deduce que, para este caso las propiedades mínimas del terreno con las que se lograría la estabilidad en la condición actual se encuentran entre el 90% y el 85% de dichos valores. Si bien, estos resultados no podrán ser utilizados con fines de diseño, son muy útiles para conocer de forma preliminar las propiedades mecánicas del material en la condición actual y su susceptibilidad de falla ante algún cambio en las condiciones como la aplicación de una sobrecarga. Se resalta, la importancia de agudizar el criterio ingenieril al hacer uso de los valores de la bibliografía, pues se puede llegar a resultados poco realistas que planteen un macizo rocoso con una resistencia superior a la que en realidad posee actualmente. Por ello, se deben tener en cuenta las características particulares de cada proyecto y zona en particular.

En segundo lugar, se ha simulado un posible escenario de la evolución de la estabilidad con el tiempo (efecto de la degradación del material), haciendo una reducción porcentual de parámetros iterando hasta alcanzar la condición de falla en el modelo. Se concluye que, la falla calculada no llega a un colapso total del terreno, sino que se genera un mecanismo de inestabilidad creciente en el techo, que podría avanzar hasta alcanzar la superficie, lo cual concuerda con el proceso de formación de dolinas y cenotes.

Por último, se han evaluado las sobrecargas que al ser impuestas en el techo de la cavidad podrían ocasionar un colapso a corto, mediano y largo plazo. Se ha planteado la construcción de un terraplén y una sobrecarga generada por un tren detenido sobre la cavidad. Se observa que, al colocar la sobrecarga del tren, se presenta la condición de falla incipiente en el techo de la cavidad desde la primera modelación (100%), lo cual indica que con las propiedades mínimas del terreno (modelo al 90%) éste no soportaría la sobrecarga, por lo cual es necesario diseñar algún sistema de soporte en superficie o algún tipo de mejoramiento en el techo de la cavidad.

Sobre la evolución de la estabilidad por el efecto de la degradación del material se ha hallado que alrededor de la cavidad se va desarrollando un efecto de arqueamiento en el material del techo y se da una transferencia de esfuerzos hacia las paredes que serán los apoyos, como sucede en un arco estructural.

Se concluye que la metodología de análisis propuesta es sencilla, rápida y de buena precisión; aspectos que representan una gran ventaja en la solución de problemas de este tipo en la ingeniería práctica pues normalmente se emplean programas complejos que toman mucho tiempo y no son fáciles de manejar. Cualitativamente se ha demostrado que el planteamiento utilizado es fiable, se obtienen resultados realistas útiles para establecer un marco de referencia, que permite tener un mejor entendimiento del comportamiento mecánico del sistema depósito-cavidad.

REFERENCIAS

- Agrega. (2022). *Periodo Plioceno*.
http://agrega.juntadeandalucia.es/repositorio/10042013/4e/es-an_2013041012_9135326/paleontologia1/Plioceno.html.
<https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.01.006>
- Aguilar, Y., Bautista, F., Mendoza, M. E. Frausto, O., Ihl, T. (2016). *Density of karst depressions in Yucatán state, Mexico*. *Journal of Cave and Karst Studies*, 78(2): 51–60.
<https://doi.org/10.4311/2015ES0124>
- American Railway Engineering & Maintenance of Way Association, AREMA. (2018). EEUU.
- Andreychouk, V., Tyc, A. (2013). *Karst Hazards*. In Bobrowsky, P. (Eds). *Encyclopedia of Natural Hazards*. *Encyclopedia of Earth Sciences Series* (pp. 571–576). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4399-4_204
- Audemard, F., Ollarves, R., Diaz, G., Bechtold, M., Cataldi, A. (2006). *El geo-radar como herramienta para la definición de fallas activas: Aplicación en el sector central de la falla de Boconó, estado Mérida, Venezuela*. *Revista Facultad de Ingeniería*, (21): 57-70.
https://www.researchgate.net/publication/236147687_el_geo-radar_como_herramienta_para_la_definicion_de_fallas_activas_aplicacion_en_el_sector_central_de_la_falla_de_bocono_estado_merida_venezuela_ground_penetrating_radar_as_a_tool_for_the_recognition
- Barton, N. (1973). *Review of a new shear-strength criterion for rock joints*. *Engineering geology*, 7(4): 287-332. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(73\)90013-6](https://doi.org/10.1016/0013-7952(73)90013-6)
- Barton, N. (1976). *The shear strength of rock and rock joints*. *International Journal of rock mechanics and mining sciences & Geomechanics abstracts*, 13(9): 255-279.
[https://doi.org/10.1016/0148-9062\(76\)90003-6](https://doi.org/10.1016/0148-9062(76)90003-6)
- Barton, N., Bandis, S. (1990). *Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice* [article]. *Proc International Symposium on Rock Joints*, Loen, Norway, 603–610.
https://www.researchgate.net/publication/302172581_Review_of_predictive_capabilities_of_JRC-JCS_model_in_engineering_practice
- Bates, R., Jackson, J. (1987) *Glossary of geology*. American Geol. Institute, 3rd ed.
<https://doi.org/10.1029/88EO00010>

- Bautista, F. (2016). *Suelo de la Península de Yucatán, en riesgo de colapso*. Novedades Yucatán. <https://sipse.com/novedades-yucatan/suelo-merida-peligro-colapsar-consecuencia-formacion-natural-233473.html>
- Bautista, F., Palacio, G., Quintana, P., Zinck, J. (2011). *Spatial distribution and development of soils in tropical karst areas from the Peninsula of Yucatan, Mexico*. *Geomorphology*, (135): 308–321. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.02.014>
- Bermejo, L., Ortega, A., Guérin, R., Parés, J., Benito, A., Martín, M. A., Porres, J. (2014). *Técnicas de prospección geofísica aplicadas a yacimientos kársticos: Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT) en el Karst de Ojo Guareña (Ojo Guareña, Merindad de Sotoscueva, Burgos)*. *Cubía*, (18): 48-55. <https://www.researchgate.net/publication/315106326>
- Bonacci, O., Ljubenkovic, I., Roje, T. (2006). *Karst flash floods: an example from the Dinaric karst (Croatia)*, *Nat. Peligros Earth Syst. Sci*, (6): 195–203. <https://nhess.copernicus.org/articles/6/195/2006/>
- Bortolotti, A. (2009). *Estudio geofísico usando métodos electromagnéticos en un medio fracturado afectado por lixiviados* [Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional] CIIDIR Oaxaca. http://literatura.ciidiroaxaca.ipn.mx/jspui/handle/LITER_CIIDIROAX/301
- Castellanza, R., Lollino, P., Ciantia, M. (2018). *A methodological approach to assess the hazard of underground cavities subjected to environmental weathering*. *Tunnelling and Underground Space Technology*, (82): 278-292. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.08.041>
- Castilla, J., Herrera, J. (2012). *El proceso de exploración minera mediante sondeos*. Universidad Politécnica de Madrid. Departamento de Explotación de Recursos Minerales y Obras Subterráneas, Madrid, España. <https://doi.org/10.20868/UPM.book.10695>.
- Chalikakis, K., Plagnes, V., Guerin, R., Valois, R., Bosch, F. (2011). *Contribution of geophysical methods to karst-system exploration: an overview*. *Hydrogeology Journal*, 19(6): 1169-1180. <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0746-x>
- Chong, J. Ming-hua, Z., Wen-gui, C. (2008). *Stability analysis of subgrade cave roofs in karst region*. *Journal of Central South University of Technology*, (15): 38–44. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11771-008-0433-9>

- Cimadevilla, D. (2017). *Valoración de la técnica geofísica de los sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (SEDТ) para la caracterización de zonas poco profundas*. [Tesis de maestría, Universidad de Oviedo, España] Repositorio Institucional de la Universidad de Oviedo <http://hdl.handle.net/10651/46062>
- Durán, R., Méndez, M. (Eds). (2010). *Biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán*. CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA. <https://www.cicy.mx/sitios/biodiversidad-y-desarrollo-humano-en-yucatan/#Cap1>
- Espinasa, R. (1990). *Propuesta de clasificación del karst de la República Mexicana*. [Tesis profesional, Universidad Nacional Autónoma de México] Repositorio institucional de la UNAM. https://repositorio.unam.mx/contenidos/propuesta-del-clasificacion-de-karst-de-la-republica-mexicana-3488710?c=G22Oa2&d=false&q=:*&i=4&v=1&t=search_0&as=0
- Espinasa, R. (2007). *El Karst de México*, Mapa NA III 3, in Coll-Hurtado, A., Coord., “Nuevo Atlas Nacional de México”, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. https://geodigital.igg.unam.mx/atlas_nacional/index.html/
- Espinasa, R., Nieto, A. (2014). *Mapa de susceptibilidad a fenómenos kársticos* [cartel]. Reunión anual Unión Geofísica Mexicana, Sesión regular: Riesgos naturales, Puerto Vallarta, México. <https://www.ugm.org.mx/raugm2014/resumenes/abstract.php?abstractID=163>
- Espinasa, R., Nieto, A. (2015). *Análisis de la vulnerabilidad a fenómenos kársticos*. Centro nacional de prevención de desastres. https://www.files.cenapred.unam.mx/es/BibliotecaVirtual/BibliotecaVirtualSINAPROC/Informes%20Blancos/RV_Informe_Vulnerabilidad_Karst_2014.pdf
- Estrada, H., Jiménez, J., Álvarez, O., Barrientos, R. (2019). *El karst de Yucatán: su origen, morfología y biología*. Acta Universitaria, (29), 1-18. <http://doi.org/10.15174.au.2019.2292>
- Ford, D., Williams, P. (1989). *Karst Geomorphology and Hydrology*. Academic Division of Unwin Hyman Ltd, London.
- Ford, D., Williams, P. (2007). *Karst Hydrogeology and Geomorphology*, Wiley. <https://sudartomas.files.wordpress.com/2012/11/karsthydrogeologyandgeomorphology1.pdf>
- Fracom (2022). *FRACOD* [Software]. <http://www.fracom.fi/fracod2d.html>
- Fragoso, P. (2018). *¿Qué pasó con el Socavón?* amek.org. <https://www.amek.org.mx/2018/11/05/que-paso-con-el-socavon/>

- Fragoso, P., Pereira, A. (2018). *Suelos Y Karst, Origen De Inundaciones Y Hundimientos En Chetumal, Quintana Roo, México*. Revista científica europea, ESJ, (14): 33.
<https://doi.org/10.19044/esj.2018.v14n14p33>
- Frankie, F. (2017). *Sondeo geotécnico con barrena helicoidal*. Estudios Geotécnicos.
<https://estudiosgeotecnicos.info/index.php/sondeo-geotecnico-con-barrena-helicoidal/>
- García, E. (1990). *Carta de climas (1:4×106)*. Atlas Nacional de México. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.
<http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/book/150>
- García, M., Ordoñez, I. (2010). *Formas kársticas comunes de los cenotes del Estado de Quintana Roo (México)*. M+ A. Revista Electrónica de Medioambiente, (9); 15-35.
<https://revistas.ucm.es/index.php/MARE/article/download/MARE1010220015A/15020>
- Geoquantics. (2019). *El proceso de modelización numérica en geotecnia. Uso del software FLAC3D*. <https://geoquantics.com/2019/10/22/proceso-modelizacion-numerica-geotecnia-uso-del-software-flac3d/>
- Glosario geografía general. (2012). Movimientos eustáticos. <https://glosarios.servidor-alicante.com/geografia-general/movimientos-eustaticos>
- Glosario geografía general. (2022). *Gelifracción*. <https://glosarios.servidor-alicante.com/geografia-general/gelifraccion>
- González de Vallejo, L. (2002). *Ingeniería geológica*. PEARSON EDUCACIÓN. Madrid.
https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5540850/mod_resource/content/1/Livro%20.pdf
- Grandjouan, O., Hidalgo, L., Apaéstegui, J., Baby, P., Cochonneau, G., Condori, E., Guyot, J. (2017). *Las resurgencias del Alto Mayo (San Martín, Perú): estudio hidrológico sobre un karst tropical andino-amazónico*. Sociedad Geológica del Perú, (8): 83-96.
<https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010072956>
- Gutiérrez, F. (2016). *Sinkhole Hazards*. Oxford Research Encyclopedia of Natural Hazard Science. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780199389407.013.40>
- Hernández, N. (2021). *Quintana Roo: cierran parcialmente la carretera Playa del Carmen – Cancún*. Novedades Quintana Roo. <https://sipse.com/novedades/quintana-roo-cierran-parcialmente-carretera-playa-del-carmen-cancun-hundimiento-391898.html>
- Hoek, E., Brown, E. (2018). *The Hoek–Brown failure criterion and GSI–2018 edition*. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 11(3): 445-463.
<https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.001>

- Hoek, E., Diederichs, M. (2006). *Empirical estimation of rock mass modulus*. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 43 (2): 203–215. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2005.06.005>
- Hoover, R. (2003). *Geophysical choices for karst investigations in Sinkholes* [conference]. 9th Multidisciplinary Conference on Sinkholes & the Engineering and Environmental Impacts of Karst. <https://www.nrc.gov/docs/ML0726/ML072690161.pdf>
- Humire, F. (2013). *Aplicación de métodos geofísicos basados en ondas superficiales para la caracterización sísmica de suelos: aplicación a la microzonificación sísmica del norte y poniente de Santiago*. [Tesis profesional, Pontificia universidad católica de Chile] <https://repositorio.uc.cl/handle/11534/2877>
- IGME (2022). *Métodos de perforación de sondeos de investigación*. Instituto Geológico y Minero de España. https://www.igme.es/actividadesIGME/lineas/HidroyCA/publica/libros2_TH/libro51_54/pdf/lib51/in_02.pdf
- Info7. (2011). *Dice investigador que Yucatán es susceptible de hundimientos*. <https://www.info7.mx/nacional/dice-investigador-que-yucatan-es-susceptible-hundimientos/518866>
- Itasca consulting group Inc. (2022). *UDEC (7.0)* [Software]. <https://www.itascacg.com/software/UDEC>
- Jaimés, J. (2011). *Métodos geofísicos aplicados a la caracterización de suelos: estado del arte*. [Tesis profesional, Universidad Industrial de Santander] Archivo digital biblioteca UIS. <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2011/141131.pdf>
- Jennings, J. (1987). *Karst Geomorphology*. Basil Blackwell Inc., USA, p. 293.
- Klimchouk, A., Andrejchuk, V. (2005). *Karst breakdown mechanisms from observations in the gypsum caves of the Western Ukraine: implications for subsidence hazard assessment*. Environ Geol 48, 336–359. <https://doi.org/10.1007/s00254-005-1279-1>
- Lakebuena (2020). *Carretera en Yucatán revela cueva acuática*. <https://www.kebuena.com.mx/2020/carretera-en-yucatan-revela-cueva-acuatica-164695.html>
- Lehmann, H. (1936). *Morfologische studien auf Java*. Geog. Abhandlungen 9 (series 3), pp. 1-114.

- Lugo, H., Córdova, C. (1990). *Regionalización Geomorfológica de la República Mexicana*. Atlas Nacional de México, Hoja Geomorfológica 2, IV.3.4. Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Lugo, J., Aceves, J., Espinasa, R. (1992). *Rasgos geomorfológicos mayores de la península de Yucatán*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de geología, revista, vol. 10, no. 2, pp. 143-150. <http://www.rmccg.unam.mx/index.php/rmccg/article/view/1236>
- Maldonado, Y. (2022). *Diagénesis y litificación*. Geología Web. <https://geologiaweb.com/rocas/diagenesis/>
- Migliano, E. (2012). *Análisis de los valores de resistividad verdadera obtenidos a partir del método transitorio electromagnético en el dominio del tiempo*. [Tesis profesional, UNAM] Repositorio institucional de la UNAM <https://repositorio.unam.mx/contenidos/3497848>
- Milenio (2015). *Socavón paraliza tránsito en carretera Cancún-Playa del Carmen*. <https://www.milenio.com/estados/socavon-paraliza-transito-carretera-cancun-playa-carmen>
- Moltó, E. (2013). *Ríos alóctonos*. Levante: El mercantil Valenciano. <https://www.levante-emv.com/opinion/2013/04/04/rios-aloc-tonos-12909356.html>
- Monroy, E. (2016). *¿Cómo se formaron cuevas y cenotes? Espeleogénesis*. Karst Geochemistry and Hydrogeology <https://sites.northwestern.edu/monroyrios/2016/05/20/espeleogenesis/#.YpVrOXbMK3A>
- Parise, M. (2009). *Hazards in karst* [conference paper]. International Interdisciplinary Scientific Conference “Sustainability of the karst environment. Dinaric karst and other karst regions”. https://www.researchgate.net/publication/233731527_Hazards_in_karst
- Pierskalla, W. (2019). *Rethinking karst hazard assessment in Kentucky*. [Master's Thesis, University of Kentucky] Digital archive UKnowledge. <https://doi.org/10.13023/etd.2019.155>
- Pinillos, L. (2015). *Túneles en macizos calcáreos karstificados: Impacto en las obras subterráneas de los fenómenos kársticos, su evaluación y tratamiento*. [Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Madrid] Archivo digital UPM. <https://oa.upm.es/36261/>

- Prasetyo, S., Gutierrez, M., Barton, N. (2017). *Nonlinear shear behavior of rock joints using a linearized implementation of the Barton - Bandis model*. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 9(4): 671-682.
- Radio Fórmula (2022). *Tren Maya: ¿Qué son los socavones y qué los provoca?*. <https://www.radioformula.com.mx/nacional/2022/3/30/tren-maya-que-son-los-socavones-que-los-provoca-507917.html>
- Robledo, P., Durán, J., Pardo, E. (2020). *Karst y cuevas: La cuarta dimensión de la naturaleza*. IGME y Editorial Catarata, Madrid. <http://hdl.handle.net/10498/24971>
- Rocscience Inc. (2022). RS2 (11.015) [Software]. <https://www.rocscience.com/software/rs2>
- Rocscience Inc. (2022). Unwedge (5.016) [Software]. <https://www.rocscience.com/software/unwedge>
- Roglic, J. (1972). *Historical review of morphological concepts; in Important karst regions of the northern hemisphere*, Edited by M. Herak and V.T. Stringfield, Elsevier Pub.Co., New York, pp. 1-19.
- Semblat, J., Pecker, A. (2009). *Waves and Vibrations in Soils: Earthquakes, Traffic, Shocks, Construction Works*. Istituto Universitario di Studi Superiori di Pavia. https://www.researchgate.net/publication/260261077_Waves_and_Vibrations_in_Soils_Earthquakes_Traffic_Shocks_Construction_Works
- Shen, B., Shi, J., Barton, N. (2018). An approximate nonlinear modified Mohr-Coulomb shear strength criterion with critical state for intact rocks. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 10(4): 645-652. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674775517303669>
- Sowers, G. (1996). *Building on Sinkholes: Design and Construction of Foundations in Karst Terrain*. ASCE Press. <https://ascelibrary.org/doi/book/10.1061/9780784401767>
- Strobbia, C. (2003). *Surface Wave Methods: Acquisition, processing and inversion* [Ph.D. thesis, Politecnico di Torino, Italy] CiteSeerX <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.129.9410&rep=rep1&type=pdf>
- Tharp, T. (1995). *Mechanics of upward propagation of cover-collapse sinkholes*. Engineering Geology, (52): 23-33. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(98\)00051-9](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(98)00051-9)

- Tinajero, L. (2016). *Inversión e interpretación 2D y 3D de datos de resistividad eléctrica en el cenote Chac-Mool, Quintana Roo*. [Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California] CICESE Repositorio. <https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/90>
- Waltham, A., Fookes, P. (2005). *Engineering classification of karst ground conditions*. The Virtual Scientific Journal. Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers, 3(1), 6. https://digital.lib.usf.edu/content/SF/SO/05/46/71/00001/K26-04222-seka_pdf4513.pdf
- Waltham, T. (2008). *Sinkhole hazard case histories in karst terrains*. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 41(3): 291-300. <https://doi.org/10.1144/1470-9236/07-211>
- Ward, W., Weidie A. (1978). *Geology and hydrogeology of northeastern Yucatán*. Eds. New Orleans Geological Society. New Orleans, LA. <https://archives.datapages.com/data/nogs/data/006/006008/0003.htm>
- White, E., White, W. (1969). *Processes of cavern breakdown*. Bull. Natl. Speleol. Soc. 31 (4): 83–96
- White, W. (1988). *Geomorphology and hydrology of karst terrains*. Oxford University Press, New York, USA, p. 464.
- Wright, P. (2018). *Three Sinkholes Drain Lagoon on Mexico's Yucatan Peninsula*. The Weather channel. <https://weather.com/science/nature/news/2018-08-30-mexico-yucatan-peninsula-sinkholes-drain-lagoon>
- Zepeda, O., Sánchez, T. (2001). *Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastres en México*. Atlas Nacional de Riesgos de la República Mexicana. <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/>