



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE INGENIERÍA

COLEGIO DE GEOFÍSICA

**ANÁLISIS DE LA CLASIFICACIÓN RMR MEDIANTE
CONFIGURACIÓN GEOMECÁNICA Y MODELACIÓN
GEOESTADÍSTICA DE UN MACIZO ROCOSO: CASO
SAN ANTONIO TENEXTEPEC, PEROTE, VER.**

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADA EN INGENIERÍA GEOFÍSICA

PRESENTA:

BRENDA AGUILAR FUENTES

DIRECTOR:

M.I. JOSÉ LUIS GONZÁLEZ GUEVARA

Puebla, pue., junio de 2025

DEDICATORIA

A mi mamá, por su amor incondicional, su apoyo constante, su comprensión y su confianza en mí sin las cuales este trabajo no habría sido posible. A mi hermano, por siempre estar ahí recordándome su apoyo y cariño y brindarme su ánimo en los momentos difíciles. A mis dulces mascotas, las que están conmigo y las que he perdido a lo largo del tiempo, pero que siempre formarán parte de mi corazón. Este trabajo es inspirado en ustedes, en nuestra familia.

En memoria de mi padre, que está en mi mente y en mi corazón, siempre recordaré sus palabras, su amor incondicional, la confianza que gracias a él tengo y la fortaleza que me dejó su partida.

A mi novio, por su amor, su paciencia, su comprensión, su ayuda, sus palabras de aliento cuando más las necesitaba, por hacerme sonreír cada día durante estos años. Gracias por elegirme todos los días, ser mi compañero y estar siempre a mi lado.

AGRADECIMIENTOS

Al Mtro. José Luis González Guevara, director de este trabajo y mi docente en mi formación universitaria, gracias por su guía, paciencia y conocimientos compartidos durante todo el proceso que me permitieron seguir adelante.

A todos mis profesores que han estado presentes en mi formación profesional y personal por sus valiosas contribuciones y ver mi potencial.

A mi familia, por su amor y apoyo constante, por tenerme confianza y creer en mí en todo momento. A mis amigos, por ser mi red de apoyo y por las innumerables risas y momentos que me ayudaron a mantener el equilibrio. Y finalmente a mi novio, por su amor, paciencia y comprensión, sin los cuales este logro no habría sido posible.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	9
RESUMEN.....	11
ABSTRACT	12
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	13
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
1.2. JUSTIFICACIÓN	13
1.3. OBJETIVO GENERAL	14
1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
1.5. HIPÓTESIS	15
1.6. ANTECEDENTES	15
CAPÍTULO 2. MARCO GEOLÓGICO	17
2.1. UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	17
2.2. FISIOGRAFÍA	18
2.3. OROGRAFÍA	19
2.4. GEOLOGÍA	21
2.5. HIDROLOGÍA	24
CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO	26
3.1. MINERÍA.....	26
3.2. MINERÍA EN MÉXICO	27
3.3. EXTRACCIÓN DE MINERALES NO METÁLICOS EN MÉXICO	30
3.4. NORMATIVA EN LA MINERÍA	32
3.5. GEOMECÁNICA	35
3.5.1. MACIZO ROCOSO	35

3.6. APLICACIÓN EN LA MINERÍA	36
3.7. CLASIFICACIONES GEOMECÁNICAS.....	37
3.7.1. Q DE BARTON	38
3.7.2. RMR.....	39
3.7.3. GSI.....	40
3.8. GEOESTADÍSTICA.....	41
3.8.1. VARIABLE REGIONALIZADA	41
3.8.2. INTERPOLACIÓN ESPACIAL	43
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA	44
4.1. RECONOCIMIENTO GEOLÓGICO	44
4.2. OBTENCIÓN DE DATOS RMR	47
4.3. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO GEOESTADÍSTICO.....	55
4.3.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO EXPLORATORIO	55
4.3.2. VARIOGRAMA.....	56
4.3.3. KRIGING	57
CAPÍTULO 5. RESULTADOS	58
5.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS.....	58
5.2. CONSTRUCCIÓN DEL VARIOGRAMA.....	60
5.3. INTERPOLACIÓN KRIGING.....	61
5.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	65
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	67
6.1. CONCLUSIONES	67
6.2. RECOMENDACIONES	70
REFERENCIAS	71
GLOSARIO	75

ANEXOS..... 78

ANEXO 1 78

ANEXO 2 79

ANEXO 3 97

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del municipio de Perote, en el estado de Veracruz, elaboración propia.	17
Figura 2. Subprovincias del estado de Veracruz, elaboración propia.	18
Figura 3. Orografía del municipio de Perote, elaboración propia.	20
Figura 4. Porción de la carta geológica VERACRUZ E14-3, (Servicio Geológico Mexicano, 2024)	23
Figura 5. Localización del acuífero, (CONAGUA, 2024).	25
Figura 6. Participación en la actividad minera por estados, elaboración propia con datos de (CAMIMEX, 2020).	29
Figura 7. México, productor a nivel mundial (CAMIMEX, 2020).	29
Figura 8. Área de estudio, elaboración propia.	44
Figura 9. Entrada de la mina, zona norte.	45
Figura 10. Altura máxima, zona noreste.	46
Figura 11. Alteración geológica, zona sur.	46
Figura 12. Intercalación de caliza arcillosa, zona suroeste.	47
Figura 13. Distribución de puntos para la toma de valores RMR en la zona de estudio, elaboración propia.	48
Figura 14. Metodología en la aplicación de las clasificaciones geomecánicas (González de Vallejo, 2002).	52
Figura 15. Histograma de los valores RMR, elaboración propia.	59
Figura 16. Variograma experimental de los valores RMR, elaboración propia.	60
Figura 17. Variograma teórico de los valores RMR, elaboración propia.	61
Figura 18. Superficie para interpolación, elaboración propia.	62
Figura 19. Modelo kriging, elaboración propia.	63
Figura 20. Varianza del modelo predictivo.	64
Figura 21. Delimitación del yacimiento, elaboración propia.	65
Figura 22. Histograma del parámetro resistencia de la roca (RCS), elaboración propia.	97
Figura 23. Histograma del parámetro RQD, elaboración propia.	97

Figura 24. Histograma del parámetro separación de las discontinuidades, elaboración propia.	98
Figura 25. Histograma del parámetro condición de las discontinuidades, elaboración propia.	98
Figura 26. Histograma del parámetro presencia de agua, elaboración propia.	99

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Calidad de macizos rocosos con relación al índice RMR, (González de Vallejo, 2002).	39
Tabla 2. Parámetros de la clasificación geomecánica RMR, (González de Vallejo, 2002).	53
Tabla 3. Calidad y clase del macizo rocoso conforme a la valoración RMR, (González de Vallejo, 2002).....	54
Tabla 4. Valores RMR de los puntos, elaboración propia.....	54
Tabla 5. Caracterización geomecánica RMR de los puntos, elaboración propia.....	58
Tabla 6. Estadística descriptiva de los datos, elaboración propia.	60
Tabla 7. Coordenadas de los puntos de estudio, elaboración propia.	78
Tabla 8. Parámetros para clasificación RMR en el punto 1, elaboración propia.....	79
Tabla 9. Parámetros para clasificación RMR en el punto 2, elaboración propia.....	80
Tabla 10. Parámetros para clasificación RMR en el punto 3, elaboración propia.....	81
Tabla 11. Parámetros para clasificación RMR en el punto 4, elaboración propia.....	82
Tabla 12. Parámetros para clasificación RMR en el punto 5, elaboración propia.....	83
Tabla 13. Parámetros para clasificación RMR en el punto 6, elaboración propia.....	84
Tabla 14. Parámetros para clasificación RMR en el punto 7, elaboración propia.....	85
Tabla 15. Parámetros para clasificación RMR en el punto 8, elaboración propia.....	86
Tabla 16. Parámetros para clasificación RMR en el punto 9, elaboración propia.....	87
Tabla 17. Parámetros para clasificación RMR en el punto 10, elaboración propia... 88	
Tabla 18. Parámetros para clasificación RMR en el punto 11, elaboración propia... 89	
Tabla 19. Parámetros para clasificación RMR en el punto 12, elaboración propia... 90	
Tabla 20. Parámetros para clasificación RMR en el punto 13, elaboración propia... 91	
Tabla 21. Parámetros para clasificación RMR en el punto 14, elaboración propia... 92	
Tabla 22. Parámetros para clasificación RMR en el punto 15, elaboración propia... 93	
Tabla 23. Parámetros para clasificación RMR en el punto 16, elaboración propia... 94	
Tabla 24. Parámetros para clasificación RMR en el punto 17, elaboración propia... 95	
Tabla 25. Parámetros para clasificación RMR en el punto 18, elaboración propia... 96	

INTRODUCCIÓN

En la actualidad dentro del área minera se busca una caracterización detallada de los yacimientos, no solo en el ámbito geológico, sino también en los aspectos geofísicos y geotécnicos o geomecánicos. Esta evaluación integral es indispensable para llevar a cabo una planificación eficiente de la extracción y procesamiento del mineral, así como para el desarrollo adecuado del diseño minero y la correcta ejecución de las operaciones durante toda la vida útil del proyecto. Debido a la variedad de yacimientos que pueden llegar a encontrarse, es necesario hacer caracterizaciones específicas dependiendo de la necesidad de cada yacimiento.

Los métodos de caracterización se realizan en campo (in situ), ya que es ahí donde es posible observar las condiciones en las que se encuentra el macizo rocoso, además de las observaciones que se realizan in situ es posible combinarlo con análisis geoestadístico, desde la recopilación y organización de datos hasta la realización de modelos predictivos que permitan conocer todos los posibles escenarios del comportamiento del macizo rocoso. Una de estas caracterizaciones es la clasificación geomecánica RMR (Rock Mass Rating) o también conocida como caracterización geomecánica de Bienawski.

La intención de utilizar la geoestadística junto con la geomecánica es generar un modelo predictivo con los datos obtenidos a través de la clasificación geomecánica RMR presente en el yacimiento para cuantificar este parámetro mediante simulación geoestadística. Los datos de campo correspondientes a los valores de la caracterización geomecánica RMR que sustentan este trabajo se obtuvieron en el año 2022 por medio de una empresa privada.

En el Capítulo 1 Introducción, se mencionan la problemática en la que se sustenta este trabajo, la justificación, los objetivos planteados para el desarrollo de la investigación, la hipótesis y los antecedentes; este apartado da una visión introductoria del trabajo de investigación.

En el Capítulo 2 Marco Geológico, se describen las características de la zona de estudio, como lo son la ubicación, fisiografía, orografía, geología e hidrología; este apartado muestra información sobre los aspectos geológicos particulares del área.

En el Capítulo 3 Marco Teórico, se presenta una recopilación de conceptos necesarios para mejorar entendimiento de este trabajo, estos se enfocan en el área de la minería y su aplicación en México, en geomecánica y particularmente en las caracterizaciones geomecánicas, de igual forma se habla sobre la geoestadística y su aplicación a los modelos de interpolación.

En la Capítulo 4 Metodología, se habla sobre los pasos a seguir en la realización de este trabajo, se presenta un reconocimiento geológico puntual de la zona de estudio, se describe la obtención de los datos RMR, y por último se detalla el procedimiento a seguir para generar un modelo geoestadístico predictivo.

Finalmente, en el Capítulos 5 Resultados, se muestra el modelo de interpolación obtenido junto con un modelo de varianza de este; y en el Capítulo 6 Conclusiones y Recomendaciones, además de una interpretación de los resultados, se mencionan los argumentos y discusiones finales del presente trabajo.

RESUMEN

La presente investigación está enfocada en implementar un modelo geoestadístico a partir de los datos que brinda la caracterización geomecánica RMR (Rock Mass Rating), misma que puede generar beneficios en la explotación del yacimiento a estudiar, considerando que la roca es la materia prima en la industria minera. La zona de estudio se encuentra en la localidad San Antonio Tenex-tepec, dentro del municipio de Perote en el estado de Veracruz. Los datos de campo en los que se basa el modelo geoestadístico se obtuvieron en el año 2022 por medio de una empresa privada, y son usados para ese trabajo con el fin de analizarlos geoestadísticamente y generar un modelo predictivo basado en interpolación tipo kriging. Para generar el modelo se utilizó el software RStudio, que es un software diseñado específicamente para el desarrollo en el lenguaje de programación R. El modelo obtenido complementa los datos RMR de las zonas que no fueron caracterizadas, de igual forma el análisis geoestadístico permite conocer las características geomecánicas del yacimiento, así como zonas no aprovechables para explotación.

Palabras clave: modelo geoestadístico, kriging, yacimiento, y caracterización RMR.

ABSTRACT

This research is focused on implementing a geostatistical model based on the data provided by the RMR (Rock Mass Rating) geomechanical characterization, which can generate benefits in the exploitation of the deposit to be studied, considering that rock is the raw material in the mining industry. The study area is located in the town of San Antonio Tenextepec, within the municipality of Perote in the state of Veracruz. The field data on which the geostatistical model is based were obtained in 2022 by a private company, and are used for this work in order to analyze them geostatistically and generate a predictive model based on kriging-type interpolation. To generate the model, the RStudio software was used, which is a software designed specifically for development in the R programming language. The model obtained complements the RMR data of the areas that were not characterized, in the same way the geostatistical analysis allows to know the geomechanical characteristics of the deposit, as well as areas not usable for exploitation.

Keywords: geostatistical model, kriging, reservoir, and RMR characterization.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta el tema de la tesis, la problemática principal que impulsó la realización de este trabajo, la justificación y relevancia del trabajo, los objetivos de estudio, la hipótesis planteada y los antecedentes encontrados sobre investigaciones similares, además brinda una visión general de la estructura del documento.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Definir la calidad de los macizos rocosos es un aspecto importante que se puede empezar a realizar desde las investigaciones de campo del sitio de estudio, para esto es necesario observar las condiciones del macizo rocoso a través de las caracterizaciones geomecánicas, es decir si presenta fracturas, fallas o zonas de contacto, etc. Una de las caracterizaciones geomecánicas más utilizadas en la actualidad es la clasificación RMR, ya que permite clasificar el macizo rocoso con índices de referencia.

La caracterización geomecánica es esencial para una adecuada planificación de la extracción y el procesamiento del mineral, debido a las características de extracción del material (voladura), es necesario repetir el procedimiento para obtener los valores de la caracterización geomecánica, lo que dificulta que se pueda caracterizar el yacimiento en su totalidad.

1.2. JUSTIFICACIÓN

La caracterización geomecánica es fundamental en la minería, ya que permite evaluar las propiedades mecánicas de los macizos rocosos y su posible comportamiento ante cargas y deformaciones. Implementar metodologías de predicción espacial o de

simulación geoestadística puede usarse como forma de aprovechar los beneficios técnicos y económicos con respecto a la obtención de datos geomecánicos.

A raíz de esto surge la necesidad de implementar metodologías en el área de estudio que permitan la cuantificación de datos relacionados a la calidad de la roca y de esta forma generar un modelo predictivo con valores de clasificación geomecánica, facilitando el entendimiento y comportamiento del macizo rocoso sin necesidad de caracterizar, en campo, el yacimiento en su totalidad. Realizar análisis geoestadísticos en conjuntos de datos ayuda a la planificación e implementación de estrategias futuras para un mejor aprovechamiento del recurso y así potencializar el valor económico del proyecto minero.

1.3. OBJETIVO GENERAL

Generar un análisis geoestadístico a través de un modelo predictivo de la clasificación geomecánica RMR, aplicado al macizo rocoso del yacimiento ubicado en San Antonio Tenextepac, Perote, Ver., a fin de validar esta técnica mediante interpolación y obtener la calidad del macizo en su totalidad.

1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un reconocimiento geológico de la zona de estudio, para identificar, describir y analizar las características geológicas que se presentan en el yacimiento evaluando las formaciones rocosas y otras estructuras geológicas.
- Integrar las herramientas geoestadísticas de interpolación a través del uso de modelos predictivos para analizar el comportamiento del macizo rocoso del yacimiento a estudiar.
- Determinar zonas dentro del yacimiento, conforme a la calidad de la roca, a partir de los resultados obtenidos con el modelo geoestadístico a emplear, con la intención de caracterizar geomecánicamente el macizo rocoso.

1.5. HIPÓTESIS

Las caracterizaciones geomecánicas, como el *Rock Mass Rating* (RMR), son variables que se caracterizan por mostrar una continuidad espacial, lo que implica que sus valores varían de forma gradual en el espacio. Sin embargo, no se dispone de un conocimiento completo de su comportamiento en toda el área de estudio, sino únicamente en puntos específicos donde se han efectuado mediciones directas. A partir de estas observaciones dispersas, se busca inferir cómo se comporta la variable en el resto del territorio mediante herramientas estadísticas o geoestadísticas. (mapeo geotécnico o ensayos geomecánicos en muestras de sondajes diamantinos, para los cuales se recuperan testigos de roca) (Alvarado Valdés, 2020).

Por tanto, los datos obtenidos mediante la caracterización geomecánica, cuando se integran con herramientas de predicción espacial o simulaciones geoestadísticas, pueden ser aprovechados para generar beneficios tanto técnicos como económicos en el análisis del macizo rocoso. Este enfoque permite optimizar el proceso exploratorio, reduciendo tiempos y recursos, al mismo tiempo que brinda información valiosa sobre zonas adyacentes que aún no han sido directamente exploradas, mejorando así la planificación y toma de decisiones en el desarrollo del yacimiento.

1.6. ANTECEDENTES

Como se ha mencionado en párrafos anteriores, la clasificación geomecánica es una parte fundamental del proceso de la exploración y caracterización de los macizos rocosos, por otro lado, la geoestadística es utilizada en diversos análisis de conjuntos de datos.

Con respecto a la implementación de los análisis geoestadísticos se ha encontrado un trabajo que relaciona la clasificación geomecánica y las herramientas de predicción usando geoestadística, este trabajo lleva por nombre *Modelamiento Geoestadístico de la*

Clasificación Geomecánica de Bieniawski (RMR) y fue escrito por Fabiola Alvarado Valdés en 2020, y consiste en desarrollar un modelo geoestadístico para evaluar la calidad de la roca en un yacimiento tipo skarn, el cual ha sido caracterizado geotécnicamente a partir de sondajes efectuados desde galerías en una mina subterránea, cuya localización se mantiene confidencial. La simulación del Rock Mass Rating (RMR) se aborda mediante dos estrategias distintas: la primera considera los valores del RMR según la versión de 1989 como una variable continua, aplicando un modelo gaussiano para su simulación; la segunda se basa en la cosimulación de las nueve variables discretas que componen el RMR, utilizando para ello un modelo gaussiano truncado que respeta la naturaleza discreta de estos componentes. (Alvarado Valdés, 2020).

CAPÍTULO 2. MARCO GEOLÓGICO

Este apartado proporciona una visión detallada de las características y estructuras geológicas de una región específica, en este caso el municipio de Perote perteneciente al estado de Veracruz, incluye la localización y delimitación del área de estudio, descripción de las formas del relieve y sus procesos formativos, descripción de la configuración geológica de la región y mención de los acuíferos y sistemas de aguas subterráneas.

2.1. UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio se encuentra en el Ejido de San Antonio Tenextepec dentro del municipio de Perote, ubicado en la zona central del estado de Veracruz, limítrofe con el estado de Puebla y con el número de municipio 128 con coordenadas.: Latitud: 19° 29'2.0004" y Longitud 97° 15'50.0004" con una altitud de 2540 msnm.



Figura 1. Ubicación del municipio de Perote, en el estado de Veracruz, elaboración propia.

2.2. FISIOGRAFÍA

Dentro de la República Mexicana se pueden encontrar 15 diferentes provincias fisiográficas, de las cuales el estado de Veracruz abarca áreas que corresponden, en diferente proporción, a siete provincias fisiográficas.

El sitio de estudio se localiza sobre provincia correspondiente al Eje Neovolcánico, esta provincia se representa como una acumulación de estructuras volcánicas de diferentes clases, que tiene su origen en numerosos y sucesivos episodios volcánicos que se iniciaron a mediados del Terciario y continuaron hasta el presente. Uno de sus principales rasgos es la franja volcánica que se extiende de oeste a este. Además de los principales estratovolcanes de México y algunos volcanes en escudo, esta provincia incluye sierras volcánicas, coladas de lava de gran extensión, depósitos de ceniza, cuencas cerradas con lagos y estructuras tipo calderas volcánicas (Rodríguez Elizarrás & Morales Barrera, 2010).

Dentro de la porción del Eje Neovolcánico que abarca el estado de Veracruz, se encuentran 3 subprovincias (Figura 2), que son: Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo, Lagos y Volcanes de Anáhuac y la Sierra de Chiconquiaco.

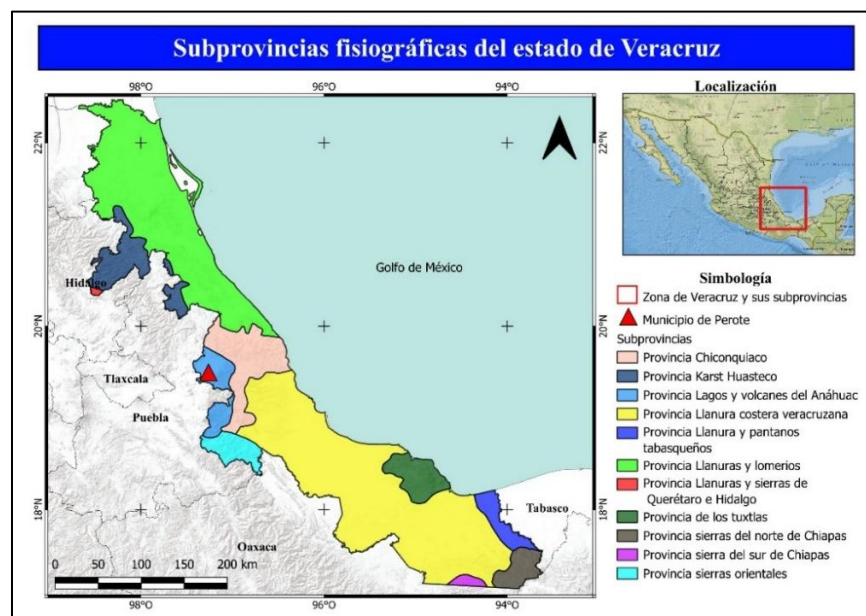


Figura 2. Subprovincias del estado de Veracruz, elaboración propia.

El área por estudiar se encuentra en la subprovincia Lagos y volcanes del Anáhuac, que es considerada la más grande de las 14 subprovincias que conforman el Eje Neovolcánico, y está constituida por sierras volcánicas y aparatos individuales de gran tamaño que se alternan con llanuras. En el municipio abarca un área de superficie de 2,103.52 km², cubriendo cinco municipios completos y parte de otros trece. En esta subprovincia se incluye el Cofre de Perote, que es un aparato volcánico de tipo escudo muy erosionado, alcanza aproximadamente 4,280 msnm, y la ladera en la parte oriental del Pico de Orizaba, que se clasifica como un estratovolcán de forma cónica, y alcanza aproximadamente 5,600 msnm con esto constituye el punto más elevado de la República. De igual forma, en esta zona se encuentran algunas llanuras, lomeríos y mesetas (Rodríguez Elizarrás & Morales Barrera, 2010).

2.3. OROGRAFÍA

El Valle de Perote se ubica principalmente en la zona centro occidental del Estado de Veracruz, y en una parte de la Cuenca El Carmen en el Estado de Puebla, se presenta una topografía accidentada y muy variada en el área de estudio.

En el área de la planicie central se tiene una altura promedio de 2380 msnm, con zonas que tienen pendientes menores a 1° 8', excepto por algunos lomeríos calcáreos emergentes que se encuentran en la zona y tienen mayor altura. Al oriente del Valle, se observan más variaciones en la altitud, debido a que el terreno alcanza profundidades de hasta 700 msnm, en una distancia de aproximadamente 25 km. Las características anteriores ocasionan una variedad de factores particulares a observar con relación al comportamiento regional de factores tales como la temperatura, precipitación y estratificación de la vegetación, por mencionar algunos (Ochoa Martínez, 2017).

En las afueras del Valle se observan pendientes muy marcadas y fuertes, además de barrancas y cañadas muy pronunciadas. La vertiente correspondiente en la zona este, en la zona ubicada como "pie de monte", presenta profundas barrancas, con pendientes

medias a fuertes: 11° 19' y 21° 48' (entre 20.1% y 40.0%); y muy fuertes: 21° 49' y 38° 39' (entre 40.15 y 80.0%)), en su mayoría. Pero también se pueden encontrar pendientes moderadas: 5° 43' y 11° 18' (entre 10.1% y 20%). En esta zona es usual que la precipitación sea mayor, comparada con la parte Oeste. En la zona Sur, hacia el límite con Veracruz, el relieve se torna muy accidentado, con pendientes muy marcadas.

La elevación más destacada de la zona es el volcán Cofre de Perote, cuya altitud varía entre los 3,400 y 4,200 msnm. la evolución geológica y topográfica del Valle está estrechamente relacionada con este volcán, ya que ha influido tanto en sus características abióticas, que se consideran como el origen, el clima local, la humedad, la precipitación y los tipos de suelo, como en las condiciones bióticas, es decir, en las formas de vida que habitan la región.(Ochoa Martínez, 2017).

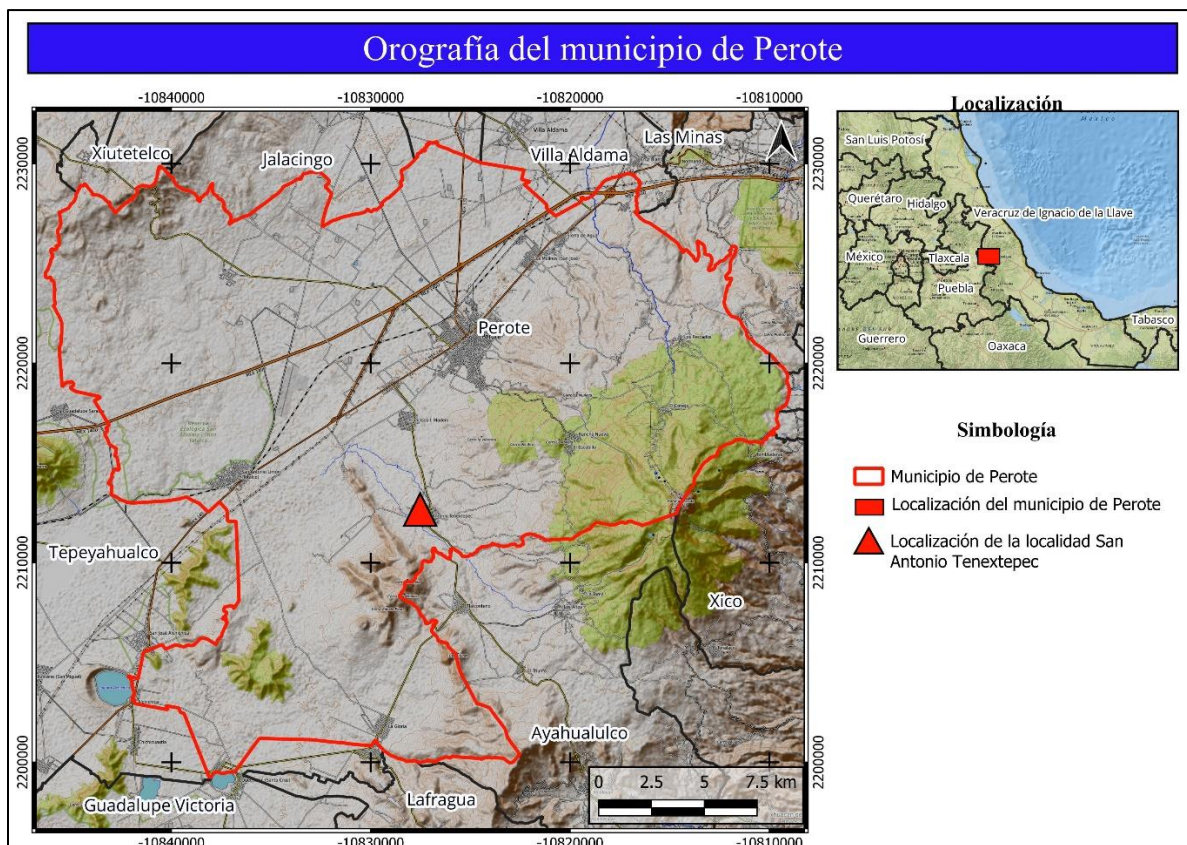


Figura 3. Orografía del municipio de Perote, elaboración propia.

2.4. GEOLOGÍA

La región del Valle de Perote “es parte de sector oriental de la provincia geológica conocida como Faja Volcánica Trans Mexicana (FVTM)” (Ferrari, 2000). El Cofre de Perote es un volcán inactivo de composición andesítica que muestra un avanzado grado de erosión, lo que le confiere una morfología más parecida a la de un volcán tipo escudo, su actividad comenzó hace alrededor de 1.5 millones de años. Los depósitos arenosos del Valle de Perote provienen mayoritariamente de materiales piroclásticos tanto de caída como de flujo, y se asocian con la caldera de Los Humeros, cuya formación principal es un cráter circular de unos 20 kilómetros de diámetro, originado durante el Pleistoceno. Esta zona se ubica entre los estados de Puebla y Veracruz, en las cercanías de la ciudad de Perote. Los depósitos de arena corresponden a una unidad definida como Ignimbrita Xáltipan y su edad fue estimada en 450 mil años (Rodríguez Elizarrás & Morales Barrera, 2010).

Las lagunas El Carmen y Tepeyahualco muestran evidencia de depósitos generados por actividad volcánica, y el movimiento de material piroclástico ha provocado tanto el cambio en el curso de estas aguas como su paulatina reducción. La región cuenta con una notable presencia de piedra pómez, ignimbritas, tobas y cenizas volcánicas, en su mayoría originadas en la caldera de Los Humeros. Hoy en día, el calor residual de dicha caldera alimenta una fuente significativa de energía geotérmica utilizada para generar electricidad. “Otros yacimientos importantes son los materiales pétreos, los cuales están relacionados con los enormes bancos de rocas carbonatadas; éstos se encuentran ubicados principalmente en la región central del Valle” (Rodríguez Elizarrás & Morales Barrera, 2010). En la región de Tatatila-Las Minas, la caliza fue alterada por la presencia de intrusivos graníticos del periodo Terciario, dando lugar a grandes formaciones de mármol. Asimismo, el origen volcánico de la zona se evidencia en los yacimientos de piedra pómez encontrados en el Valle de Perote, la cual se emplea comúnmente como agregado en la elaboración de concreto y en la fabricación de bloques de construcción, conocidos como “blocks” (Rodríguez Elizarrás & Morales Barrera, 2010).

El área de estudio está representada por calizas y dolomías de la Formación Orizaba, de edad Albiano-Cenomaniano. La Formación Orizaba se extiende por la región comprendida entre Los Humeros y Las Derrumbadas, está compuesta por calizas de tipo arrecifal que contienen abundante fauna bentonítica, lo cual indica un cambio de facies de cuenca respecto a la Formación Tamaulipas Superior. Generalmente, estas rocas se presentan en forma masiva, y sólo en las áreas donde hay transición entre facies se observan en capas estratificadas; forma grandes bancos con abundantes fragmentos de mega fósiles como lo son los caprínidos, gasterópodos (turritelas y nerineas), corales y fragmentos de pelecípodo. Por la microfauna, que se presenta se establece como una edad Albiano-Cenomaniano. Por la naturaleza arrecifal podría considerarse que es simple distinguir estas rocas de aquellas que se consideran de la edad Aptiano y Turoniano. El afloramiento de esta formación se presenta en solo tres zonas específicas. La primera se encuentra al sureste de Perote, en la parte norte de la sierra de Tenex-tepec, donde en el sector suroccidental aparece de forma estratificada debido al cambio de facies; en su lado occidental se aprecia un talud arrecifal con abundancia de miliólidos y una estratificación poco definida. El segundo afloramiento se localiza al pie sureste de Las Derrumbadas, cerca de los poblados de Tepetitlán y Paso Nacional, donde se distingue claramente una transición hacia los sedimentos de la Formación Guzmantla. El tercero, y más significativo tanto por su extensión como por su configuración estructural, corresponde a la sierra de Soltepec, próxima a las localidades de Aljibes y San Andrés. Esta formación se prolonga hacia el sureste, más allá del área de estudio, y concluye hacia el noroeste, cerca del extremo sur del poblado Rincón de Zitlaltepec (CONAGUA, 2024).

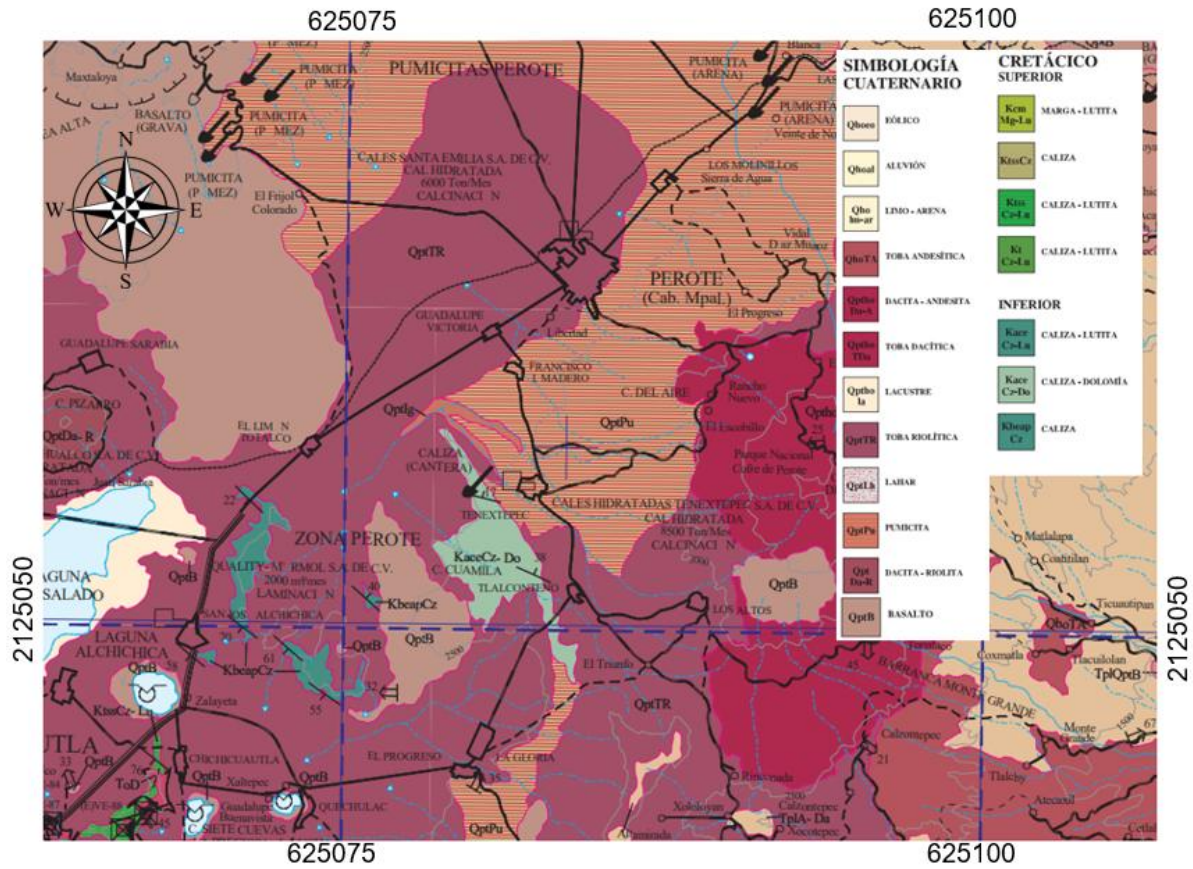


Figura 4. Porción de la carta geológica VERACRUZ E14-3, (Servicio Geológico Mexicano, 2024)

2.5. HIDROLOGÍA

La ubicación geográfica del municipio de Perote le otorga características hidrológicas singulares. Su parte occidental en conjunto con una pequeña fracción del municipio de Ayahualulco constituye el único sector del estado de Veracruz que se encuentra dentro de la cuenca del río Atoyac y pertenece a la región hidrológica del Balsas. En contraste, la zona oriental del municipio se integra a la cuenca del río Nautla y a otros afluentes que forman parte de la región hidrológica Tuxpan-Nautla (Ochoa Martínez, 2017).

Existe un acuífero principal en la zona, conocido como Acuífero Perote – Zelaya, el cual se ubica en la zona centro-occidental del Estado de Veracruz, con las coordenadas 19° 21' y 19° 52' latitud norte y 97° 06' y 97° 26' longitud oeste, las cuales abarcan aproximadamente una superficie de 1,016 km² (Figura 5). El territorio está delimitado al norte por los acuíferos Martínez de la Torre-Nautla y Tecolutla; al este por los acuíferos Valle de Actopan y Jalapa-Coatepec; y al sureste por el acuífero Costera de Veracruz, todos ellos ubicados dentro del Estado de Veracruz. Hacia el sur y el oeste, colinda con el acuífero Libres Oriental, perteneciente al Estado de Puebla (CONAGUA, 2024).

El acuífero se extiende a lo largo de tres regiones hidrológicas distintas, la mayor parte se encuentra dentro de la Región Hidrológica 18, conocida como “Balsas”, específicamente en la cuenca del río Atoyac. Su sector norte forma parte de la Región Hidrológica 27, denominada “Norte de Veracruz”, que incluye la cuenca del río Nautla y otros afluentes. Finalmente, una pequeña porción al este pertenece a la Región Hidrológica 28 “Papaloapan”, correspondiente a la cuenca del río Jamapa y afluentes asociados.

Este acuífero se considera de tipo libre, heterogéneo y anisótropo, tanto en sentido horizontal como vertical, la parte superior está compuesta por sedimentos aluviales, depósitos de lahares y piroclásticos, materiales lacustres y formaciones de basalto. Por su parte, la sección inferior se encuentra en rocas volcánicas y sedimentarias que, debido a fracturas, presentan una permeabilidad secundaria. Es en la parte superior donde se

localiza la unidad hidrogeológica en explotación, la cual tiene un espesor promedio de 200 m

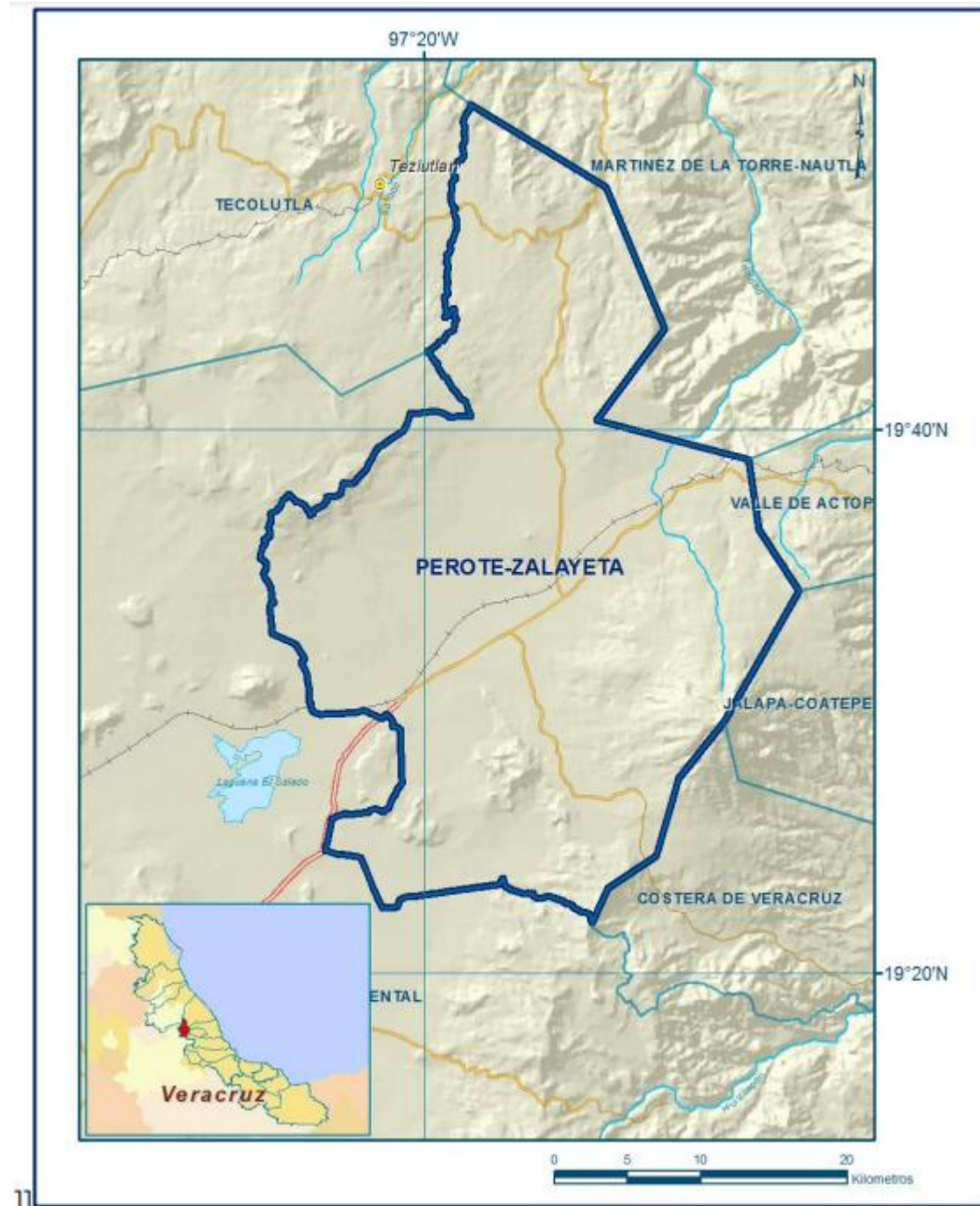


Figura 5. Localización del acuífero, (CONAGUA, 2024).

CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO

El siguiente capítulo presenta una revisión detallada de los estudios y teorías previas relacionadas con el tema de investigación, para esta investigación corresponde a la minería y su situación en México, la geomecánica como área de interés y más específico se habla sobre caracterizaciones geomecánicas, también se menciona sobre la geoestadística y la construcción de modelos de interpolación. En general, los siguientes párrafos proporcionan el contexto y el fundamento teórico del trabajo.

3.1. MINERÍA

Como es bien sabido la minería es una de las actividades pertenecientes al sector primario, y consiste en la extracción de minerales y elementos para su comercialización. La mayoría de estos elementos se utilizan como materia prima para la realización de diferentes objetos.

Hay distintos métodos de minería que varían según la ubicación, el tipo de recurso a extraer y las condiciones particulares del entorno en el que se pretende realizar la extracción, además que la minería puede darse en la tierra o en el suelo marino, y mediante dos procedimientos distintos de extracción, principalmente (Equipo editorial, Etecé., 2023):

- **Minería a cielo abierto:** implica retirar las capas superficiales de roca y la vegetación del área para dejar expuestos los depósitos minerales subterráneos. Dependiendo de la técnica utilizada, puede originarse una excavación en el terreno (minería a cielo abierto), una apertura directa sobre un yacimiento específico (explotación por canteras), o incluso un cambio drástico en el relieve.
- **Minería subterránea:** consiste en penetrar la roca hacia el subsuelo y construir túneles que conecten a los yacimientos. También incluye accesos horizontales (drift mining), accesos diagonales (slope mining) o verticales (shaft mining).

La minería también puede clasificarse por el tipo de mineral que se explota, como se muestra a continuación:

- **Minería metálica:** se extraen vetas de elementos metálicos (puros o no) que poseen un alto valor para la industria siderúrgica, como el cobre, el oro, la plata, el aluminio, el plomo, el mercurio y el hierro, entre otros.
- **Minería no metálica:** se extraen materiales fundamentales para el sector de la construcción, la cosmética y farmacéutica, joyería, etc. Estos materiales son de naturaleza no metálica, algunos ejemplos de estos son: la arcilla, caliza, mármol, granito, mica, etc.
- **Minería energética:** se extraen hidrocarburos y minerales de alto valor energético, entre ellos el petróleo y el gas natural, así como minerales como el carbón, que se utilizan principalmente como fuentes de energía en distintas industrias y procesos productivos. (Equipo editorial, Etecé., 2023).

La minería sigue siendo indispensable actualmente, ya que con ella se obtiene la materia prima con la que funcionan numerosas industrias de diferentes sectores. Entre ellas se destacan la industria química, siderúrgica, manufacturera y tecnológica.

3.2. MINERÍA EN MÉXICO

En términos económicos, la minería es una industria clave para el desarrollo de México, además, que genera ingresos significativos para el país y es un motor de desarrollo económico y social en las comunidades cercanas a las operaciones mineras. México destaca a nivel mundial como uno de los mayores productores de plata, y cuenta además con vastos yacimientos de metales como oro, cobre y zinc. Esta actividad minera constituye una pieza clave en la economía nacional, al representar una proporción relevante del Producto Interno Bruto (PIB) y generar una gran cantidad de empleos en diversas regiones del país. (Grupo ORS , 2023).

En 2020, la minería en México aportó el 8.3 % al PIB industrial y el 2.3 % al PIB nacional, según datos del SGM (2021). Ese mismo año, el país se posicionó como el principal productor mundial de plata y ocupó el sexto lugar en la producción de oro. Los estados de Sonora y Zacatecas destacaron por sus altos niveles de extracción de estos metales. La actividad minera en México se realiza mayormente bajo un régimen de concesiones, las cuales son otorgadas tanto a empresas nacionales como extranjeras, y permiten la explotación de yacimientos minerales en zonas específicas a cambio de un pago. Hasta 2021, el gobierno había concesionado el 8.59 % del territorio nacional, lo que representa un total de 24,066 títulos mineros (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales , 2022).

México es un país altamente minero, la mayor parte del territorio mexicano practica la minería desde grandes empresas exportadores de minerales y materiales hasta industrias locales que abastecen pequeños negocios principalmente enfocados en la construcción; en la Figura 6, se muestra el porcentaje de participación minera que tienen los estados de la República Mexicana, y en la Figura 7 se muestran los lugares que ocupa México respecto a la producción de 17 minerales a nivel mundial.

En conclusión, la minería representa un pilar fundamental para el desarrollo económico de México, al destacar por su contribución al empleo y al PIB. Asimismo, el sector ha mostrado avances significativos en la incorporación de tecnologías modernas, enfocadas en aumentar la eficiencia y reforzar la seguridad en sus procesos. Con este panorama, se proyecta que la industria minera continúe creciendo y consolidándose como un elemento clave para el progreso económico del país (Grupo ORS , 2023).

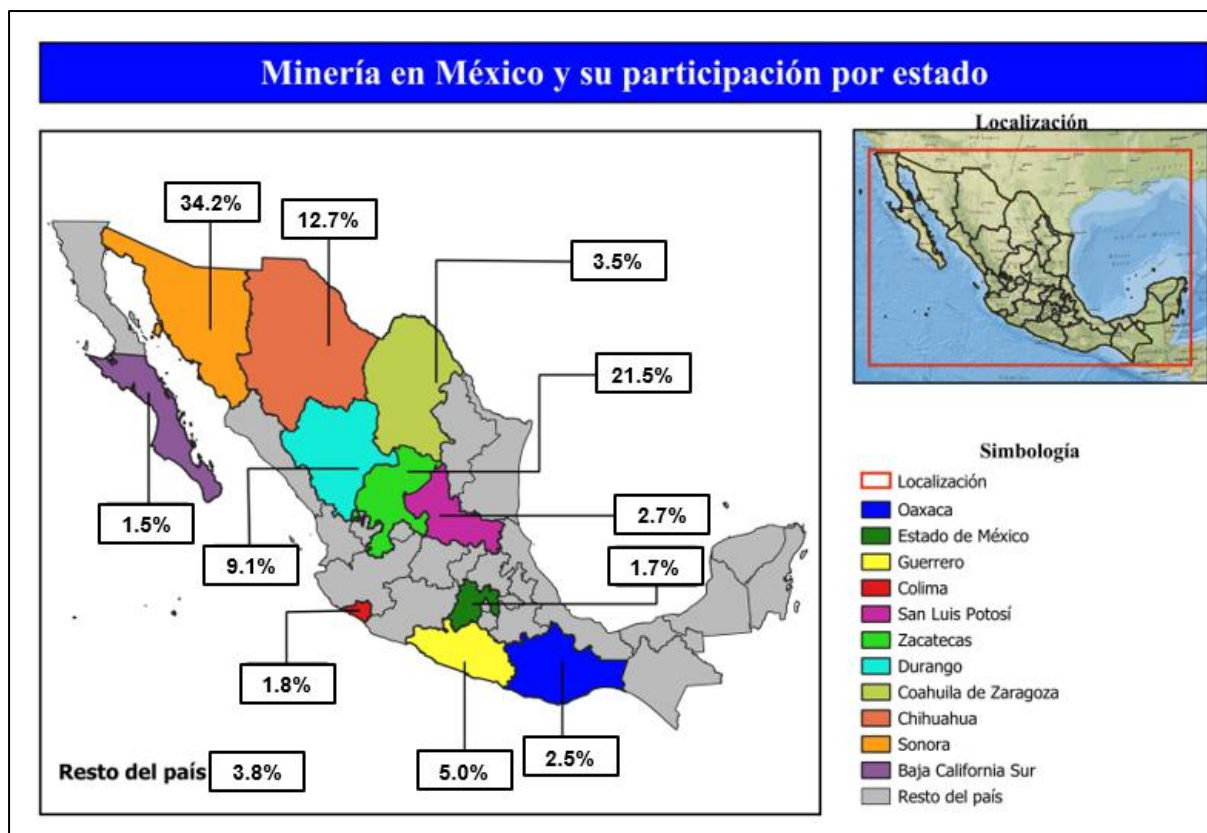


Figura 6. Participación en la actividad minera por estados, elaboración propia con datos de (CAMIMEX, 2020).

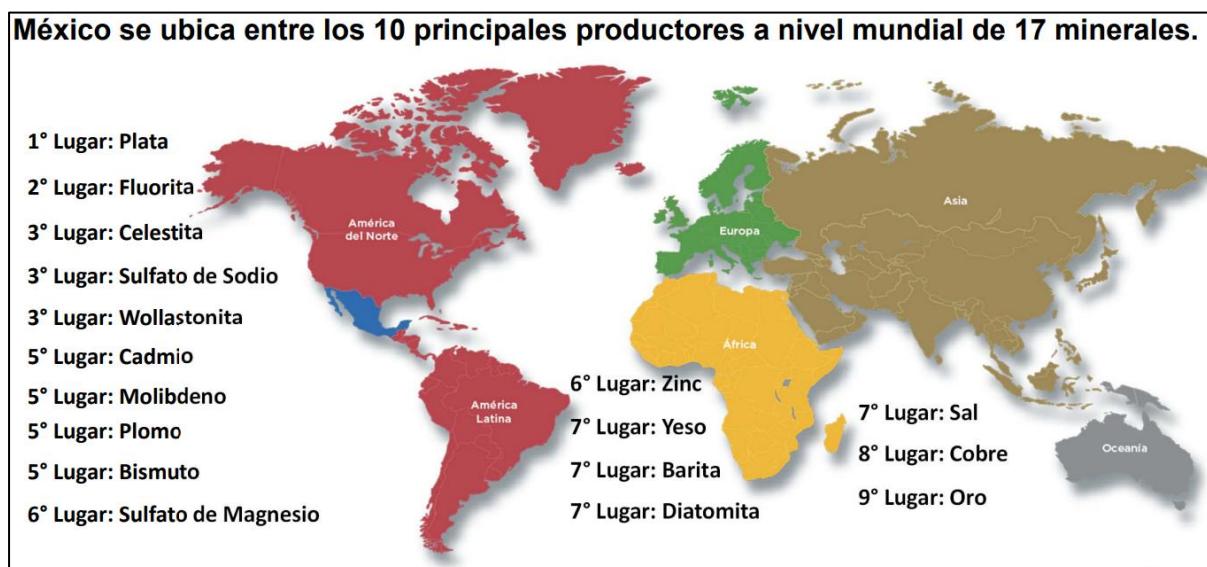


Figura 7. México, productor a nivel mundial (CAMIMEX, 2020).

3.3. EXTRACCIÓN DE MINERALES NO METÁLICOS EN MÉXICO

Para México, la minería es una de las actividades económicas con mayor demanda debido a los diversos yacimientos que se presentan, sin embargo “existen pocos trabajos que aborden la minería contemporánea mexicana desde una perspectiva de análisis territorial y son, aún, más escasos los que se ocupan de la minería de no metálicos” (Sánchez-Crispin & Sánchez-Salazar, s.f.).

La economía relacionada con los minerales no metálicos incluye una amplia gama de recursos, que va desde materiales comunes utilizados en la construcción hasta recursos mucho más escasos y valiosos. Mientras que los primeros se encuentran con facilidad en la corteza terrestre y, por ende, tienen un bajo valor comercial, los segundos son poco frecuentes y alcanzan precios elevados en el mercado debido a su rareza y demanda especializada (Sánchez-Crispin & Sánchez-Salazar).

En México, un país con una larga tradición minera, el desarrollo del subsector no metálico ha surgido en tiempos relativamente recientes dentro del panorama económico. La evolución de la minería mexicana puede dividirse en cuatro grandes etapas. La primera abarca del siglo XVI hasta los primeros años del siglo XIX, periodo en el que los colonizadores españoles llevaron a cabo la exploración y explotación de yacimientos de metales preciosos, principalmente en las regiones del centro y norte del territorio. En la segunda etapa, comprendida entre la consumación de la Independencia y mediados del siglo XX, sobresale la participación de inversionistas extranjeros interesados en reactivar antiguas minas de metales valiosos ubicadas en los distritos mineros más relevantes del país. La tercera etapa del desarrollo minero en México comenzó en las últimas décadas del siglo XIX, marcada por una nueva ola de inversión extranjera, principalmente de origen estadounidense, enfocada en la explotación de yacimientos de minerales metálicos no ferrosos y energéticos ubicados en el centro y norte del país. Estos recursos eran fundamentales para el auge industrial que vivían Europa Occidental y Estados Unidos, lo que impulsó su demanda en el mercado internacional.

La cuarta fase se inició en la década de 1940, cuando la minería de minerales no metálicos comenzó a desarrollarse con fines económicos, impulsada por la creciente demanda tanto nacional como extranjera, especialmente estadounidense. Durante la Segunda Guerra Mundial y el periodo posterior, minerales como el grafito y el azufre fueron los primeros en incorporarse al aparato productivo, seguidos por la fluorita y la barita. En los años sesenta se sumaron otros recursos como roca fosfórica, yeso, sal, sulfato de sodio y, más tarde, celestita.

A diferencia de los minerales metálicos, los no metálicos se integraron tardíamente a la economía nacional. Sin embargo, su auge en los años setenta incentivó una mayor participación del Estado, lo que se reflejó en la creación del Fideicomiso de Minerales No Metálicos Mexicanos (FMNM), la promulgación de las leyes mineras de 1975 y 1978 que reservaron al Estado la explotación de minerales como el azufre, fósforo y potasio y la participación directa de la Comisión de Fomento Minero en la extracción de sal, azufre y roca fosfórica (CAMIMEX, 1989).

Aunque el crecimiento del sector no ha sido constante, su importancia ha ido en aumento. En 1980, representaba el 35 % del valor total de la producción minera nacional; para 1985, superó el 50 %. Sin embargo, entre 1985 y 1988, su participación bajó al 44 % debido al crecimiento de la minería metálica. A pesar de ello, en 1989 México logró destacarse a nivel mundial como uno de los principales productores de minerales no metálicos, ocupando el primer lugar en fluorita, barita y sulfato de sodio; el segundo en sal y grafito; el tercero en azufre y el cuarto en celestita. (CAMIMEX, 1989).

En México no se dispone de inventarios geológicos precisos sobre las reservas de minerales no metálicos; sin embargo, el país posee importantes depósitos de sal, yeso y fluorita. Estos recursos podrían representar una fuente relevante de divisas y constituir una opción viable para las regiones y trabajadores que actualmente dependen de la minería metálica, una vez que los yacimientos de esta última se agoten. (Sánchez-Crispin & Sánchez-Salazar, s.f.).

3.4. NORMATIVA EN LA MINERÍA

La minería, como todas las actividades en México, se rige por diferentes normas y legislaciones, que permiten tener regulaciones en la minería incluyendo normas para limitar la ubicación de las operaciones mineras, prevenir la contaminación del agua y del aire, controlar los desechos mineros y restaurar el sitio una vez que se ha terminado con la extracción minera, por mencionar algunos.

Las actividades mineras en México, según Cravioto (2019), se rigen principalmente por:

- **Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos:** en el artículo 27 de la Constitución se establece que la Nación es la propietaria original de las tierras y aguas dentro del territorio nacional, y tiene la facultad de transferir su dominio a los particulares, dando origen a la propiedad privada. También se consagra el principio de libre empresa y se determina que la exploración y aprovechamiento de los recursos minerales únicamente podrán realizarse a través de concesiones otorgadas por el Estado.
- **Ley de Minería:** la cual fue promulgada el 26 de junio de 1992 y reformada por última vez el 8 de mayo de 2023 según el Diario Oficial de la Federación, constituye el marco legal fundamental para la actividad minera en México. Esta normativa define los procedimientos y requisitos necesarios para obtener concesiones mineras, además de señalar las obligaciones y responsabilidades de quienes las poseen. Asimismo, establece las pautas para regular cada etapa del proceso minero: desde la exploración y explotación, hasta el beneficio de los minerales, el cierre de operaciones y la restauración ambiental de las zonas intervenidas.
- **Reglamento de la Ley de Minería:** el cual fue promulgado el 12 de octubre de 2012 y reformado por última vez el 31 de octubre de 2014, regula los procedimientos y requisitos necesarios para obtener concesiones mineras. También define las obligaciones y responsabilidades que deben cumplir los concesionarios. Además, establece los lineamientos para supervisar todas las etapas de la actividad minera: desde la exploración inicial, pasando por la

explotación y el aprovechamiento de los recursos, hasta el cierre de las operaciones y la restauración ambiental de las zonas intervenidas.

Además del marco legal principal, la actividad minera en México se encuentra sujeta a un conjunto amplio de normas técnicas, ambientales y de seguridad que buscan garantizar operaciones responsables y sostenibles. Entre ellas destacan:

- **Normas Oficiales Mexicanas (NOM):** regulan aspectos esenciales como la protección ambiental, la gestión de residuos peligrosos, la seguridad en minas subterráneas y a cielo abierto, y la salud de los trabajadores.
- **Acuerdos y convenios internacionales:** México es parte de tratados que influyen en la política minera.

Con esto se busca no solo ordenar la actividad minera, sino también asegurar que contribuya al desarrollo económico del país sin comprometer el medio ambiente ni la salud de las comunidades. A continuación, se enlistan algunos instrumentos jurídicos relacionados, según la Secretaría de Economía, 2020:

Legislación y Normatividad:

- Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos
- Ley Orgánica de la Administración Pública (LOAP)
- Reglamento Interior de la Secretaría de Economía
- Ley Minera
- Reglamento de la Ley Minera
- Manual de Servicios al Público en Materia Minera
- Ley Federal de Derechos
- Ley de Inversión Extranjera
- Reglamento de la Ley de Inversión Extranjera
- Ley Federal del Trabajo
- Reglamento Federal de Seguridad y Salud en el Trabajo
- Ley Federal de Armas de Fuego y Explosivos

- Reglamento de la Ley Federal de Armas de Fuego y Explosivos
- Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)
- Reglamento de la LGEEPA en materia de Ordenamiento Ecológico
- Reglamento de la LGEEPA en materia de Impacto Ambiental
- Reglamento de la LGEEPA en Materia de Áreas Naturales Protegidas
- Reglamento de la LGEEPA en Materia de Autorregulación y Auditorías Ambientales
- Reglamento de la LGEEPA en Materia de Prevención y Control de Contaminación de la Atmósfera
- Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable
- Ley de Desarrollo Rural Sustentable
- Reglamento de la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable
- NOM-023-STPS-2012, Minas subterráneas y minas a cielo abierto - Condiciones de seguridad y salud
- NOM-032-STPS-2008, Seguridad para minas subterráneas de carbón
- NOM-120-SEMARNAT-2020, Protección ambiental en exploración minera directa
- NOM-141-SEMARNAT-2003, Especificaciones y criterios depósitos de jales
- NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, Concentraciones de remediación de suelos
- NOM-155-SEMARNAT-2007, Protección ambiental para lixiviación de oro y plata
- NOM-157-SEMARNAT-2009, Planes de manejo de residuos mineros
- NOM-159-SEMARNAT-2011, Protección ambiental para lixiviación de cobre

Convenios internacionales de colaboración en materia minera:

- México-China, Convenio de colaboración
- México-China, Protocolo de prórroga
- México-Corea, Convenio de colaboración
- México-Corea, Convenio de colaboración -ingles-
- México-Cuba, Convenio de colaboración

La aplicación del reglamento en materia minera recae en la Secretaría de Economía, la cual supervisa su cumplimiento. Por otro lado, el Servicio Geológico Mexicano se encarga de elaborar la información geológica fundamental del país, que ayuda a entender la minería en el país, además, que es información que está al alcance de los mexicanos. “La regulación minera es de naturaleza federal, por lo tanto, las autoridades locales o municipales no tienen interferencia en esas actividades” (Minería en línea, 2023).

3.5. GEOMECÁNICA

La geomecánica es la ciencia encargada de analizar las propiedades elásticas de las rocas y su relación con los esfuerzos en el subsuelo, tanto en estado natural como los efectos que provocan las intervenciones humanas, como la minería o la construcción subterránea (Sosa Massaro, 2021). Además, es capaz de integrar diferentes aspectos como la mecánica de rocas, la geología, la geofísica, alcanzando así el desarrollo óptimo para la producción económica y segura de involucrar macizos rocosos.

3.5.1. MACIZO ROCOSO

Las rocas pueden describirse como conjuntos de sustancias minerales que constituyen la corteza terrestre, pudiendo estas pueden clasificarse según su origen: ígneas, sedimentarias y metamórficas. En general, presentan fracturas (discontinuidades) y sus propiedades son muy heterogéneas debido a los procesos de intemperización, o meteorización, por la acción de agentes atmosféricos, y a eventos de alteración (González de Vallejo, 2002).

El macizo se constituye de dos subestructuras: la roca intacta y las discontinuidades, la roca intacta es el bloque de roca entre discontinuidades, mientras que las discontinuidades son superficies que separan bloques del macizo. Las características de las discontinuidades son las que establecen la mecánica o comportamiento del macizo,

de carácter discontinuo y anisótropo. Además, la presencia de estos planos de discontinuidad son la principal diferencia entre las masas rocosas y los suelos (González de Vallejo, 2002).

3.6. APLICACIÓN EN LA MINERÍA

La explotación minera se considera una de las labores más riesgosas para el ser humano, debido a la diversidad y complejidad de los peligros que implica. A medida que la demanda de minerales continúa creciendo, también lo hace la necesidad de acceder a yacimientos más profundos y complejos, lo cual impulsa el desarrollo e implementación de métodos extractivos y tecnologías cada vez más avanzadas. Para hacer frente a este desafío, es fundamental implementar un control riguroso y oportuno sobre las labores de minado, así como elegir métodos de explotación que garanticen elevados estándares de seguridad. Esto implica una planificación cuidadosa, monitoreo constante de las condiciones geológicas y el uso de tecnologías modernas que refuercen la prevención de riesgos. (Torres Yupanqui, Ruiz Castro, Daga Huaricanha, & Vizcarra Arana, 2010).

El área de geomecánica tiene como función principal evaluar las condiciones del macizo rocoso en cada etapa del proyecto minero: desde el diseño inicial, pasando por la construcción y operación, hasta llegar al cierre de la mina. Su propósito es prevenir desprendimientos de roca mediante la implementación oportuna de sistemas de sostenimiento que garanticen la estabilidad de las excavaciones subterráneas. Debido a la relevancia de esta labor, resulta esencial contar con herramientas y referentes técnicos especializados en geomecánica. Estos sirven de apoyo para operadores, consultores y supervisores, asegurando que las actividades mineras subterráneas se realicen con base en criterios técnicos sólidos y bajo condiciones seguras. (Organismo supervisor de la Inversión en Energía y Minería, 2017).

Se prioriza la relación entre esfuerzo y deformación, ya sea elástica, plástica o de rotura y su impacto en cada etapa del desarrollo de un yacimiento, desde la exploración hasta el cierre de la mina (Sosa Massaro, 2021).

3.7. CLASIFICACIONES GEOMECAÑICAS

En el área de la minería resulta esencial analizar la respuesta del suelo y la roca bajo distintos esfuerzos a los que están sometidos. El propósito de las clasificaciones es evaluar el comportamiento mecánico del terreno, a partir de este análisis, es posible plantear medidas de control y seguridad que garanticen operaciones más estables y seguras dentro del proyecto minero.

En la industria minera, el índice GSI y los sistemas RMR y Q de Barton, se utilizan como datos fundamentales tanto en diversos métodos de diseño como en numerosos programas de modelado numérico. Los sistemas de clasificación geomecánica buscan sintetizar en un valor único las características de resistencia de un macizo rocoso. Sin embargo, dado que este tipo de material suele presentar una marcada anisotropía, es decir, sus propiedades varían según la dirección del esfuerzo aplicado, puede ser necesario emplear distintos sistemas de clasificación para describirlo adecuadamente. (Organismo supervisor de la Inversión en Energía y Minería, 2017).

La principal ventaja de las clasificaciones geomecánicas es que permiten obtener una estimación preliminar de los parámetros mecánicos del macizo rocoso de manera económica y práctica. Sin embargo, es importante reconocer que este tipo de herramientas puede simplificar en exceso la realidad geológica, especialmente al aplicarlas en macizos rocosos blandos o alterados, ya que tienden a sobrestimar sus características de resistencia sin considerar elementos como la deformabilidad del terreno. Estas limitaciones deben ser consideradas al aplicar las clasificaciones, debiendo interpretar los resultados con criterio y siempre en base al conocimiento de las propiedades y del comportamiento geomecánico de los diferentes tipos de macizos rocosos (González de Vallejo, 2002).

3.7.1. Q DE BARTON

La clasificación Q de Barton es, junto con la RMR de Bieniawski, una de las herramientas geomecánicas más reconocidas para caracterizar macizos rocosos. Aunque ambas son ampliamente aplicadas, tienen enfoques diferentes: el RMR se utiliza principalmente para estimar las propiedades geomecánicas del macizo rocoso, como su resistencia y calidad general, mientras que el sistema Q es especialmente útil para diseñar y evaluar el tipo y nivel de sostenimiento requerido en túneles y excavaciones subterráneas, sin embargo, para el caso de estabilidad de taludes es útil para la definición de datos de interés como lo son el tamaño de bloque.

La clasificación Q fue desarrollada en 1974 por Barton, Lunde y Lien a partir de la información de numerosos túneles. Posteriormente ha sido revisada en varias ocasiones.

El índice Q varía entre 0,001 y 1000 clasificándose el macizo rocoso como:

- 0,00 y 0,01: Roca excepcionalmente mala
- 0,01 y 0,1: Roca extremadamente mala
- 0,1 y 1: Roca muy mala
- 1 y 4: Roca mala
- 4 y 10: Roca media
- 10 y 40: Roca buena
- 40 y 100: Roca muy buena
- 100 y 400: Roca extremadamente buena
- 400 y 1.000: Roca excepcionalmente buena

Al analizar la puntuación asignada a cada uno de los bloques que conforman el sistema de clasificación Q, es posible identificar cuáles de sus componentes tienen un mayor impacto en la evaluación final del macizo rocoso. Esto permite determinar qué parámetros influyen más directamente en la calidad geomecánica del macizo, ya sea por mejorarla o degradarla, y enfocar con mayor precisión las decisiones de diseño y sostenimiento según las características más determinantes del entorno subterráneo.

3.7.2. RMR

La clasificación geomecánica Rock Mass Rating (RMR) fue desarrollada por Bieniawski en 1973, establece un sistema de clasificación de macizos rocosos que además permite relacionar índices de calidad con parámetros geotécnicos del macizo y de excavación. Esta clasificación tiene en cuenta los siguientes parámetros geomecánicos:

- Resistencia de la roca
- Grado de fracturación en términos del RQD.
- Espaciado de las discontinuidades.
- Condiciones de las discontinuidades.
- Condiciones hidrogeológicas.
- Orientación de las discontinuidades con respecto a la excavación.

Se distinguen cinco clases, el significado geotécnico se expresa en la Tabla 1, en donde se le asigna una calidad a cada clase. Así, un macizo rocoso clasificado como Muy Bueno (Clase I), será un macizo rocoso duro, poco fracturado, sin filtraciones importantes y poco meteorizado, presentando muy pocos problemas frente a su estabilidad y resistencia.

Tabla 1. Calidad de macizos rocosos con relación al índice RMR, (González de Vallejo, 2002).

Clase	Calidad	Valoración RMR
I	Muy buena	100-81
II	Buena	80-61
III	Media	60-41
IV	Mala	40-21
V	Muy mala	<20

3.7.3. GSI

El índice GSI (Geological Strength Index) es un método utilizado para evaluar las características geomecánicas de los macizos rocosos mediante la observación visual directa de sus propiedades geológicas en el terreno. Este sistema permite una caracterización rápida y práctica del macizo, facilitando la estimación de su resistencia en función de su estructura y grado de alteración.

La evaluación se fundamenta en la observación directa del macizo rocoso, considerando tanto su estructura como las características superficiales, particularmente las discontinuidades. Para ello, se analiza el grado de meteorización de las rocas, su origen y evolución geológica, el estado actual de fracturación y la orientación y distribución de las juntas presentes. Este enfoque permite una caracterización integral del comportamiento geomecánico del macizo.

El método GSI es capaz de caracterizar los macizos rocosos de baja calidad, que presentan un RMR menor a 20.

El índice GSI varía entre 1 y 100, donde los valores más bajos representan macizos rocosos de baja calidad, caracterizados por una estructura fuertemente fragmentada, superficies intensamente meteorizadas y presencia frecuente de rellenos arcillosos blandos en las discontinuidades.

Por otro lado, las puntuaciones cercanas a 100 indican macizos de excelente calidad, con estructuras intactas, mínimamente afectadas por procesos de meteorización y escasa fragmentación. Esta clasificación permite estimar de forma visual y rápida la resistencia geomecánica del macizo evaluado (González de Vallejo, 2002).

3.8. GEOESTADÍSTICA

Parte de la metodología y parámetros a utilizar en este trabajo se basan en el uso de herramientas geoestadísticas, por lo que se considera necesario incluir definiciones correspondientes a esta línea de investigación.

La geoestadística es una rama de la estadística que trata fenómenos espaciales, su interés primordial es la estimación, predicción y simulación de dichos fenómenos. Esta herramienta ofrece una manera de describir la continuidad espacial, que es un rasgo distintivo esencial de muchos fenómenos naturales, y proporciona adaptaciones de las técnicas clásicas de regresión para tomar ventajas de esta continuidad (Giraldo Henao, 2002)

En la modelación espacial se puede trabajar con datos de diferentes áreas como lo son: geología, ciencias del suelo, agronomía, ingeniería forestal, astronomía, o cualquier disciplina que trabaja con datos colectados en diferentes locaciones espaciales, en este caso con datos geomecánicos.

3.8.1. VARIABLE REGIONALIZADA

Una variable regionalizada es una función matemática que describe cómo cambia una magnitud que tiene relación a un fenómeno natural a lo largo de un espacio geográfico. Esta variación no es completamente aleatoria, sino que presenta patrones de continuidad espacial, lo que permite analizarla como una característica distribuida en el espacio.

Las variables regionalizadas poseen atributos específicos que describen cómo un fenómeno natural varía espacialmente. Entre estas características se incluyen su naturaleza, localización, campo, continuidad, anisotropía, soporte, aditividad y direccionalidad (Alvarado Valdés, 2020).

Las variables regionalizadas pueden dividirse en 3 clases:

- Variables discretas
- Variables continuas
- Variables categóricas

Las variables continuas representan fenómenos que pueden adoptar un número infinito de valores dentro de un intervalo determinado, por lo que se expresan en una escala cuantitativa continua; por ejemplo, la ley de un metal, que puede variar de forma gradual. Las variables discretas, en cambio, también se sitúan dentro de una escala cuantitativa, pero están restringidas a valores enteros, como sucede con los conteos o con indicadores como el RMR, que asigna puntajes específicos. Por su parte, las variables categóricas clasifican los datos en grupos o categorías sin un orden numérico definido, ya que operan bajo una codificación que agrupa según características cualitativas más que cuantitativas. (Alvarado Valdés, 2020).

La localización de una variable regionalizada indica el punto específico donde se obtiene su valor, lo cual define su presencia dentro de un área del espacio conocida como campo geométrico, como podría ser el macizo rocoso bajo estudio. La continuidad espacial expresa qué tan persistentes y predecibles son sus valores en el campo geométrico. La anisotropía implica que la variable presenta distintas características según la dirección en que se mida, es decir, no se comporta de igual manera en todas las orientaciones. El soporte se refiere al área o volumen sobre el cual se realiza la medición de la variable. La aditividad hace posible agregar o promediar los valores para representar unidades espaciales mayores. Finalmente, la direccionalidad refleja cómo los resultados pueden variar dependiendo del sentido en el que se efectúe la medición (Alvarado Valdés, 2020).

3.8.2. INTERPOLACIÓN ESPACIAL

Las técnicas de interpolación espacial se utilizan para estimar los valores de las variables en ubicaciones no muestreadas en función de los valores de la misma variable en ubicaciones muestreadas. “Estas técnicas se apoyan en la interpretación de la variable regionalizada como una realización de una función aleatoria y el modelamiento de su distribución espacial” (Alvarado Valdés, 2020). Es decir, genera diferentes versiones de una misma función aleatoria a través de procesos de interpolación, de manera que cada una conserve sus propiedades esenciales, especialmente en cuanto a la distribución de valores y la continuidad espacial. Estas permiten explorar la variabilidad inherente al fenómeno representado y se utilizan comúnmente en simulaciones geoestadísticas para estimar escenarios posibles dentro de un mismo modelo.

La interpolación espacial puede clasificarse en:

- **Deterministas:** generan superficies continuas a través del grado de similitud o suavizado. Dentro de esta categoría se encuentran los métodos globales, locales, IDW (distancia inversa ponderada) y Spline.
- **Geoestadísticos:** generan superficies continuas a partir de las propiedades estadísticas de los datos iniciales. Dentro de esta categoría se encuentran el Kriging y Cokriging.

Los modelos predictivos permiten predecir los valores de una variable objetivo con respecto a un área determinada, es importante elegir el tipo de modelo más adecuado con respecto a los datos iniciales.

Las herramientas de interpolación IDW y Spline se conocen como métodos determinísticos de interpolación porque están basados directamente en los valores medidos o en fórmulas matemáticas específicas que determinan la suavidad de la superficie resultante. Por otro lado, los métodos geoestadísticos, como kriging, están basados en modelos estadísticos que incluyen la autocorrelación, es decir, las relaciones estadísticas entre los puntos medidos de una superficie (ArcGIS Pro, 2024).

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

A continuación, se describen los métodos y procedimientos utilizados para llevar a cabo la investigación. Incluye detalles sobre el diseño del modelo, el conjunto de datos estudiados, los instrumentos de recolección de datos, y los procedimientos de análisis.

4.1. RECONOCIMIENTO GEOLÓGICO

Se realizó una visita a la zona de estudio en el municipio de Perote dentro del ejido San Antonio Tenextepec (Figura 8) en el mes de junio del año 2024, el recorrido tuvo como propósito verificar las condiciones geológicas de la mina, observando sus principales afloramientos se pudo reafirmar la litología superficial, así como una alteración encontrada en la parte sur.

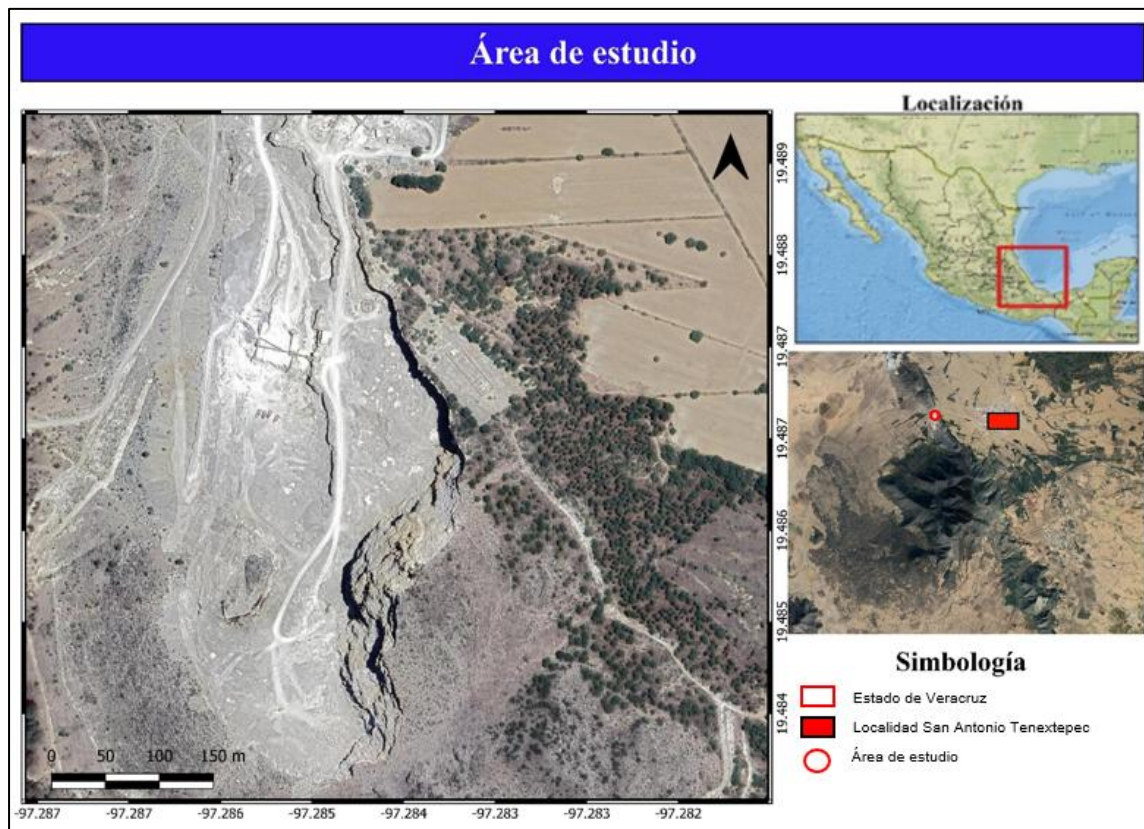


Figura 8. Área de estudio, elaboración propia.

Referente a la geología, el interés minero es la roca caliza para la fabricación de cal, por lo que en su mayoría la litología está compuesta por caliza y en menor proporción por dolomía (Figuras 9 y 10) las cuales tienen presencia de arcilla sobre la cara del macizo rocoso, además en la zona sur se encuentra una alteración geológica de posible composición skarn (Figura 11), por otro lado, en la zona suroeste se tienen intercalación de toba de grano grueso color oscuro con caliza arcillosa (Figura 12).

En la entrada de la mina el macizo rocoso tiene una altura de 17.5 m, y la obra se adentra aproximadamente 500 m, la altura máxima del macizo se encuentra en la zona noreste y alcanza hasta 25 m aproximadamente. A profundidad, se encuentra material silicificado que además incluye calcita y óxidos de hierro, en esta zona es que se ha determinado que existe una alteración, y no se considera un material explotable para la mina. En otro sitio, aflora una secuencia de capas de caliza arcillosa con espesores de 1 a 3 m, intercaladas con toba de grano grueso con espesores de 0.5 a 1 m, la cementación que presentan ambos materiales no es muy alta, pues hay muestras que se deshacen con la mano. Las capas de estos estratos tienen un rumbo de N36°S con una inclinación de 42° al SE.



Figura 9. Entrada de la mina, zona norte.



Figura 10. *Altura máxima, zona noreste.*



Figura 11. *Alteración geológica, zona sur.*



Figura 12. Intercalación de caliza arcillosa, zona suroeste.

4.2. OBTENCIÓN DE DATOS RMR

Los datos utilizados para la elaboración de esta investigación fueron adquiridos en el mes de septiembre del año 2022, como parte de una campaña de exploración para una empresa privada. Esta campaña consistió en la obtención de datos RMR de un yacimiento de caliza, con la intención de determinar la calidad del macizo rocoso conforme a la clasificación geomecánica RMR de Bieniawski. Se tomaron datos en 18 puntos del yacimiento con una separación aproximada de 50 metros entre sí.

La distribución de los puntos caracterizados se puede observar en la Figura 13, las coordenadas de cada una de las observaciones realizadas en esta campaña se encuentran en el Anexo 1.

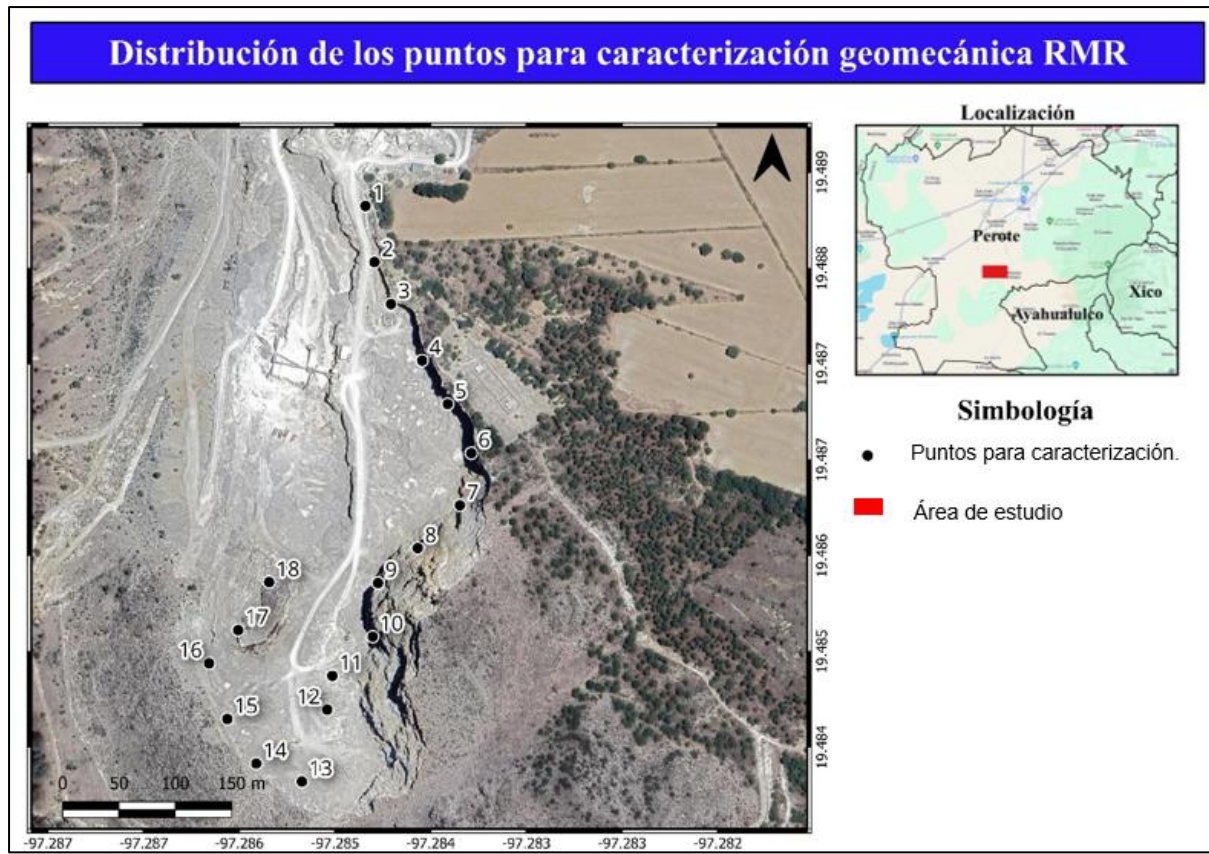


Figura 13. Distribución de puntos para la toma de valores RMR en la zona de estudio, elaboración propia.

Las clasificaciones geomecánicas componen un proceso para determinar la caracterización de los macizos rocosos a partir de la observación de ciertas características *in situ*. Para aplicar la clasificación RMR se divide el macizo rocoso en zonas o tramos que presenten características geológicas más o menos uniformes de acuerdo con las observaciones hechas en campo, en las que se lleva a cabo la toma de datos y medidas referentes a las propiedades y características de la matriz rocosa y de las discontinuidades (González de Vallejo, 2002), también se pueden establecer puntos de control, que es lo que se realizó en este muestreo de datos.

Una vez que se han obtenido las puntuaciones de los 5 parámetros del RMR, se emplea la corrección por discontinuidades y finalmente se obtiene un valor numérico con el que se clasifica al macizo rocoso. A continuación, se describen estos parámetros:

- **Resistencia de la roca (RCS):** para la resistencia de la roca se designa un valor en kg/cm^2 para determinar su resistencia en un rango entre $<10 \text{ kg/cm}^2$ y $>2500 \text{ kg/cm}^2$. La resistencia a la compresión de una roca es su capacidad para resistir fuerzas que tienden a comprimirla. Puede obtenerse mediante ensayos de compresión uniaxial, donde se somete una muestra de roca a una carga axial hasta que se produce su fractura, y también puede obtenerse una aproximación del valor *in situ* usando un esclerómetro también conocido como martillo Schmidt. Mediante el esclerómetro se cuantifica la resistencia al rebote de una superficie rocosa, que se correlaciona con la resistencia a compresión simple. (González de Vallejo, 2002).
- **RQD (Rock Quality Designation):** en el RQD se determina un porcentaje de calificación al macizo rocoso, de 100% (más competente) a 0% (menos competente). Este parámetro mide la frecuencia de fracturas naturales presentes en el macizo rocoso y la dirección que se mide. Si la frecuencia de fracturas aumenta, la valoración del RQD disminuye. El valor del RQD es la relación expresada como un porcentaje de la suma de todas las partes de longitudes mayores a 10 cm dividido por la longitud total de la corrida de perforación. Como una alternativa al RQD, la frecuencia lineal de discontinuidades también es un índice para estimar la intensidad de juntas en un macizo rocoso. Se calcula simplemente agregando el número de discontinuidades naturales en el macizo rocoso observado (Organismo supervisor de la Inversión en Energía y Minería, 2017).
- **Espaciado de las discontinuidades:** El espaciado entre los planos de discontinuidad condiciona el tamaño de los bloques de matriz rocosa y, define el papel que ésta tendrá en el comportamiento mecánico del macizo rocoso. El espaciado se define como la distancia entre dos planos de discontinuidad de una misma familia, medida en la dirección perpendicular a dichos planos. Normalmente este valor se refiere al espaciado medio o modal de los valores medidos para las

discontinuidades de una misma familia. La medida del espaciado se realiza con una cinta métrica, en una longitud suficientemente representativa de la frecuencia de discontinuidades, al menos de tres metros. Como norma general, la longitud de medida debe ser unas diez veces superior al espaciado. La cinta debe colocarse perpendicularmente a los planos, registrándose la distancia entre discontinuidades adyacentes (González de Vallejo, 2002).

- **Condiciones de las discontinuidades:** Las discontinuidades determinan de una forma definitiva las propiedades y el comportamiento de los macizos rocosos (González de Vallejo, 2002). La descripción y medida de estos parámetros para cada familia debe ser realizada en campo, y corresponden a la longitud de las discontinuidades, abertura, rugosidad, relleno y alteración. La medida de la continuidad o longitud se realiza con una cinta métrica. Si el afloramiento permite la observación tridimensional de los planos de discontinuidad, deberán medirse las longitudes a lo largo de la dirección y del buzamiento. Las discontinuidades pueden o no terminar contra otra discontinuidad, debiendo indicarse en la descripción. Es importante destacar las familias más continuas, ya que por lo general serán éstas las que condicionen principalmente los planos de rotura del macizo rocoso. La abertura es la distancia perpendicular que separa las paredes de la discontinuidad cuando no existe relleno, su medida se realiza directamente con una regla graduada en milímetros. El término rugosidad se emplea en sentido amplio para hacer referencia tanto a la ondulación de las superficies de discontinuidad, como a las irregularidades o rugosidades a pequeña escala de los planos, la rugosidad puede ser medida en campo con diversos métodos, dependiendo de la exactitud requerida, de la escala de medida o de la accesibilidad al afloramiento, incluyendo desde estimaciones cualitativas hasta medidas cuantitativas. El método más sencillo y rápido es la comparación visual de la discontinuidad con los perfiles estándar de rugosidad. Las discontinuidades pueden aparecer rellenas de un material de naturaleza distinta a la roca de las paredes. Existe gran variedad de materiales de relleno con propiedades físicas y

mecánicas muy variables, debe tenerse en cuenta que, si se trata de materiales blandos o alterados, éstos pueden sufrir variaciones importantes en sus propiedades resistentes a corto plazo si cambia su contenido en humedad. Por último, la alteración que puede llegar a presentar, la observación debe realizarse sobre la roca fresca, una vez retirada la capa superficial de alteración (González de Vallejo, 2002).

- **Condiciones hidrogeológicas:** con respecto al comportamiento hidrogeológico del macizo rocoso, se observa si este tiene o no presencia de agua. El contenido y el flujo de agua en los macizos rocosos tiene gran influencia en su comportamiento. Los factores hidrogeológicos a tener en cuenta son: niveles freáticos, direcciones de flujo, filtraciones y surgencias. Además, deben identificarse las zonas o elementos singulares (barreras o vías preferentes para el agua): fracturas, diques, cavidades, rellenos arcillosos en los cuales la presencia de agua podría influir (González de Vallejo, 2002).
- **Orientación de las discontinuidades del macizo rocoso:** las discontinuidades sistemáticas se presentan en familias con orientación y características más o menos homogéneas. La orientación relativa y el espaciado de las diferentes familias de un macizo rocoso definen la forma de los bloques que conforman el macizo. La orientación de una discontinuidad en el espacio queda definida por su dirección de buzamiento (dirección de la línea de máxima pendiente del plano de discontinuidad respecto al norte) y por su buzamiento (inclinación respecto a la horizontal de dicha línea). Su medida se realiza mediante la brújula con clinómetro (González de Vallejo, 2002).

Para su aplicación es necesario llevar a cabo una serie de observaciones y medidas en campo, que constituyen la base y la sistemática práctica de las clasificaciones, según se indica en la Figura 14, es importante mencionar que en esta investigación solo se calcularon datos correspondientes al índice RMR, pues obtener la calidad del macizo rocoso es el interés principal para la campaña de exploración.

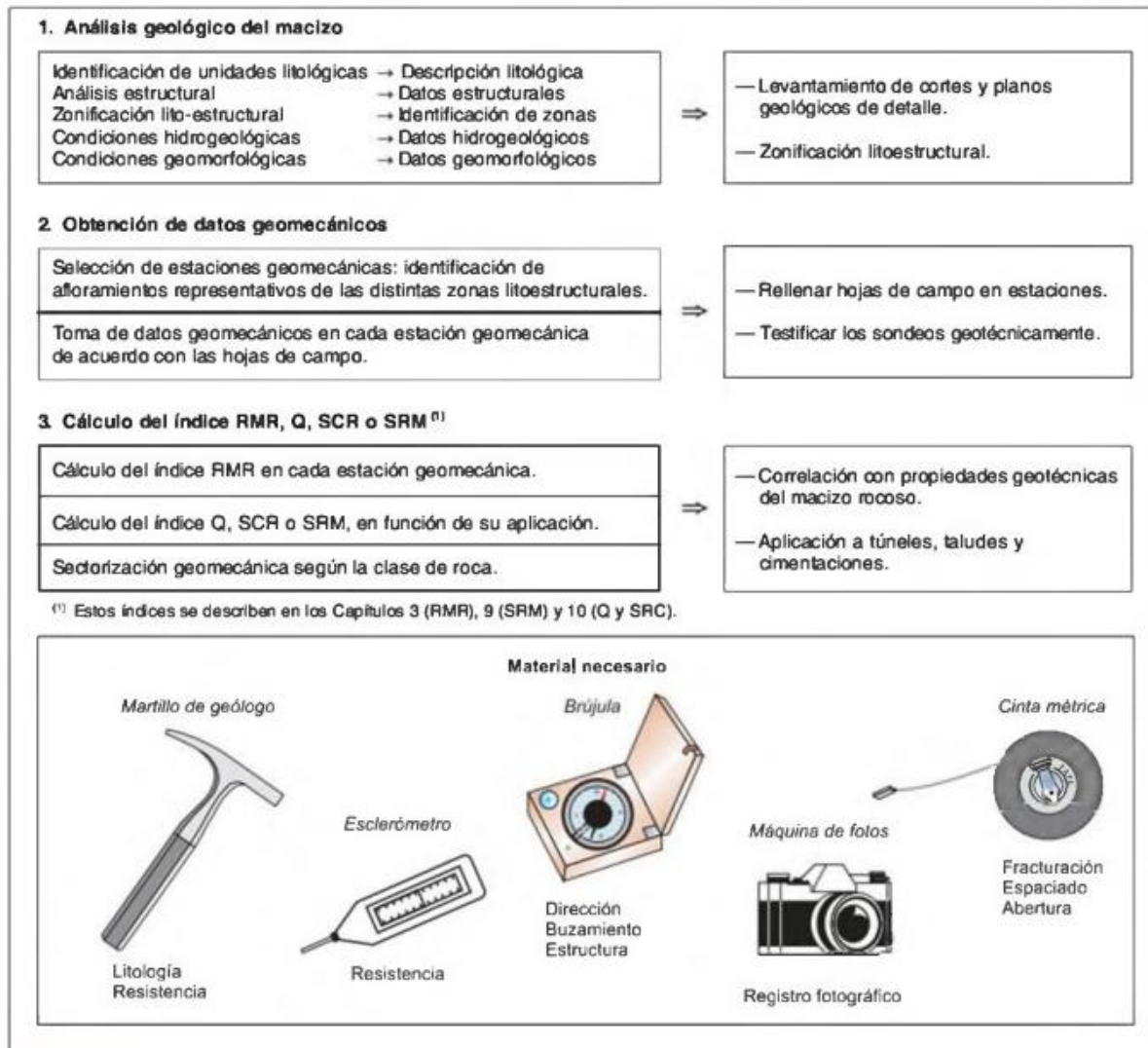


Figura 14. Metodología en la aplicación de las clasificaciones geomecánicas (González de Vallejo, 2002).

Para calcular el índice RMR correspondiente a cada uno de los puntos, se sigue el procedimiento señalado en la Tabla 2, en donde están plasmados los parámetros de caracterización, para cada parámetro se tienen asignados los valores de acuerdo con las características que presente la zona observada, finalmente se suman los parámetros para obtener el valor de RMR y determinar la calidad del macizo rocoso conforme a esta caracterización (Tabla 3). En la Tabla 4, se muestran los valores RMR para los 18 puntos, la puntuación otorgada para cada parámetro en todos los puntos se encuentra en el Anexo 2.

Tabla 2. Parámetros de la clasificación geomecánica RMR, (González de Vallejo, 2002).

1. RCS (kg/cm²)						
>2500	2500 - 1000	1000 - 500	500 - 250	250 - 50	50-10	<10
15	12	7	5	2	1	0
2. RQD (%)						
100 - 90	90 - 75	75 - 50	50 - 25	<25		
20	17	13	6	3		
3. SEPARACIÓN (m)						
>2.00	0.6 - 2.0	0.2 - 0.6	0.06 - 0.2	<0.06		
20	15	10	8	5		
4. ESTADO DE LAS DISCONTINUIDADES (FAMILIA PRINCIPAL)						
Longitud de la discontinuidad (m)	<1	1 a 3	3 a 10	10 a 20	>20	
	6	4	2	1	0	
Abertura (mm)	0	<0.10	0.1 a 1.0	1 a 5	>5	
	6	5	3	1	0	
Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Espejo	
	6	5	3	1	0	
Relleno	Sin relleno	Relleno duro		Relleno blando		
	-	<5 mm	>5 mm	<5 mm	>5 mm	
	6	4	2	2	0	
Alteración	Inalterado	Ligeramente alterado	Moderadamente alterado	Muy alterado	Descompuesto	
	6	5	3	1	0	
5. PRESENCIA DE AGUA						
Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteo	Fluyendo		
15	10	7	4	0		
6. CORRECCIÓN POR ORIENTACIÓN DE DISCONTINUIDADES						
Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables		
0	-5	-25	-50	-60		

Tabla 3. Calidad y clase del macizo rocoso conforme a la valoración RMR, (González de Vallejo, 2002).

Clase	Calidad	Valoración RMR
I	Muy buena	100-81
II	Buena	80-61
III	Media	60-41
IV	Mala	40-21
V	Muy mala	<20

Tabla 4. Valores RMR de los puntos, elaboración propia.

PUNTO	RMR	CALIDAD	CLASE
1	63	Buena	IV
2	64	Buena	IV
3	61	Buena	IV
4	69	Buena	IV
5	62	Buena	IV
6	64	Buena	IV
7	57	Media	III
8	56	Media	III
9	60	Media	III
10	59	Media	III
11	57	Media	III
12	57	Media	III
13	51	Media	III
14	46	Media	III
15	49	Media	III
16	46	Media	III
17	44	Media	III
18	41	Media	III

4.3. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO GEOESTADÍSTICO

Existen varios modelos de simulación basados en la interpolación, el modelo elegido para este trabajo será la interpolación por kriging ordinario. La interpolación kriging es un método estadístico que permite predecir los valores de las variables en ubicaciones no muestreadas y, al mismo tiempo, tener en cuenta la autocorrelación espacial (Li, 2023).

El kriging se basa en la suposición de que la correlación espacial entre las observaciones disminuye con la distancia, y que esta correlación se puede modelar utilizando una función matemática. La idea básica del kriging es encontrar un conjunto de pasos que se puedan usar para combinar los valores observados en ubicaciones cercanas para estimar el valor en la ubicación de destino. Las ponderaciones se eligen para minimizar la varianza del error de estimación, sujeto a la restricción de que el valor estimado es una combinación lineal de los valores observados (Giraldo Henao, 2002).

El método de kriging se desarrolla a través de diversas etapas, el análisis estadístico preliminar de los datos disponibles, la elaboración del modelo de variograma que describe la dependencia espacial, la generación de la superficie de estimación mediante interpolación, y la evaluación de la superficie de varianza que permite identificar la precisión o incertidumbre de las predicciones realizadas. A continuación, se detalla el procedimiento para la construcción del modelo de interpolación kriging.

4.3.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO EXPLORATORIO

Como paso inicial en la creación de cada modelo es necesario conocer y entender los datos con los que se va a trabajar. Para el caso particular de esta investigación los datos con los que se cuentan corresponden a las observaciones para el cálculo de RMR de 18 puntos de un yacimiento.

Para el análisis estadístico de los datos se usó el software RStudio y algunas de sus paqueterías. RStudio es un entorno de desarrollo integrado (IDE) para R y Python, que consta de una consola, un editor de sintaxis que admite la ejecución directa de código y

herramientas para el trazado, el historial, la depuración y la administración del espacio de trabajo, RStudio también permite visualizar los gráficos (POSIT, 2024) .

Para la construcción del kriging, solo es importante el valor de un tipo de categoría específico, esto significa que solo se puede interpolar una variable a la vez (Behr, 2020), la variable a interpolar es el valor final RMR de cada punto. Como parte de este análisis también se obtuvo el histograma del valor RMR, el cual se encuentra en el Capítulo 5 Resultados, y de los parámetros que forman parte del cálculo RMR, los cuales pueden observarse en el Anexo 3.

4.3.2. VARIOGRAMA

Una vez que se preparan los datos, el primer paso es construir un variograma y ajustarle una función de curva que luego se puede usar para interpolar valores sobre la cuadrícula de puntos.

El variograma es una herramienta comúnmente utilizada en geoestadística para analizar la autocorrelación espacial en los datos. Es una medida de la disimilitud entre pares de valores en diferentes ubicaciones dentro de un conjunto de datos. El variograma puede proporcionar información sobre la estructura espacial de los datos, lo que puede ser útil para predecir valores en ubicaciones no observadas a través de la interpolación de kriging. El variograma empírico se define como la diferencia cuadrática media entre pares de observaciones separadas por una cierta distancia o desfase. La forma de la curva del variograma puede proporcionar información sobre la estructura espacial de los datos (Li, 2023).

En la interpolación de kriging, el variograma se utiliza para estimar la autocorrelación espacial de la variable que se está modelando. El variograma empírico no asume la estructura espacial subyacente de los datos. Con el fin de utilizar el variograma para la predicción espacial a través de la interpolación de kriging u otras técnicas de geoestadística, es necesario modelar la estructura de autocorrelación espacial de los datos utilizando un modelo teórico de variograma (Li, 2023).

Estos modelos suelen tener una función de covarianza que describe la correlación esperada entre pares de observaciones a diferentes distancias, basándose en suposiciones sobre la estructura espacial subyacente de los datos, algunas funciones para el variograma son: exponencial, gaussiano y esférico.

El ajuste de un modelo de variograma teórico al variograma empírico implica estimar los parámetros del modelo que mejor describen la estructura de autocorrelación espacial de los datos.

4.3.3. KRIGING

El kriging es una técnica estadística utilizada para la interpolación espacial, que estima valores desconocidos en ubicaciones específicas en función de valores conocidos de puntos circundantes y que puede ser empleada una vez generados la superficie sobre la que se interpolaran los datos y los modelos de variograma.

Una vez realizada la interpolación con el software en el conjunto de puntos de las muestras con el kriging, se elabora un mapa para generar una representación global del comportamiento de la variable de interés en la zona estudiada. Los más representativos son los mapas de contornos, los mapas de calor, los mapas de residuos y los gráficos tridimensionales, para esta investigación se emplea un mapa de contornos (Giraldo Henao, 2002).

Para los mapas de calor, se divide el área de estudio en una malla y se hace la predicción en cada uno de los puntos de éste mismo. Consecutivamente se mapean los valores asignando una paleta o escala de colores, para generar las respuestas de color, usualmente los colores más intensos ilustran los valores más altos, este tipo de gráfico permite diferenciar la magnitud de la variable en toda el área de estudio. Generalmente se acompaña el mapa de interpolaciones de la variable con los mapas de los errores o el de las varianzas de predicción, con el propósito de identificar zonas de mayor incertidumbre respecto a las predicciones.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS

5.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS

Los datos están conformados por los parámetros que componen la clasificación geomecánica RMR, esto incluye la resistencia de la roca (RCS), RQD, separación de las discontinuidades, condición de las discontinuidades, presencia de agua y orientación de las discontinuidades, además se tienen las coordenadas, el punto al que corresponde y el valor RMR final (Tabla 5).

Tabla 5. Caracterización geomecánica RMR de los puntos, elaboración propia.

PUNTO	X	Y	RCS	RQD	SEPARACIÓN	CONDICIÓN	AGUA	ORIENTACIÓN	RMR
1	680018.44	2155804.56	12	17	10	14	15	-5	63
2	680027.04	2155752.11	12	17	15	15	10	-5	64
3	680042.01	2155712.96	12	17	10	10	15	-5	61
4	680070.19	2155660.45	12	17	15	15	15	-5	69
5	680093.21	2155620.06	12	17	8	15	15	-5	62
6	680114.57	2155574.33	12	17	10	15	15	-5	64
7	680104.92	2155525.51	12	17	8	10	15	-5	57
8	680068.01	2155485.15	12	17	10	12	10	-5	56
9	680032.99	2155452.15	12	17	8	13	15	-5	60
10	680028.86	2155401.97	12	17	10	10	15	-5	59
11	679993.4	2155365.1	12	17	8	10	15	-5	57
12	679988.3	2155314.54	12	17	8	10	15	-5	57
13	679967.4	2155265.95	12	13	15	6	10	-5	51
14	679919.14	2155282.31	12	13	8	8	10	-5	46
15	679894.08	2155327.41	12	13	10	9	10	-5	49
16	679884.02	2155375.67	7	13	8	8	15	-5	46
17	679909.38	2155406.85	5	13	8	8	15	-5	44
18	679936.5	2155452.03	5	13	8	5	15	-5	41

Como se mencionó en el capítulo anterior, para realizar una interpolación solo se puede trabajar con una variable a la vez y la variable a analizar corresponde a los valores RMR en la zona de estudio. De esta variable se obtuvo el histograma (Figura 15) de los datos, ya que este gráfico permite observar las frecuencias de los valores RMR, en la Tabla 6 se muestran los valores de la estadística descriptiva; se aprecia que para este caso particular el valor de la media corresponde a un puntaje de 57 con respecto al RMR, este clasifica el macizo rocoso con una calidad media, los datos se encuentran entre el rango de 41 RMR que aún entra en calidad media y el dato máximo 69 RMR correspondiente a calidad buena; con respecto a los cuartiles, se tiene un cuartil inferior con un valor de 49 y el cuartil superior de 62.

El histograma podría describirse como una forma acampanada con poca tendencia asimétrica del lado derecho, lo cual representa la estadística descriptiva presente en los datos, donde la moda con puntaje de 57 equivale al dato más frecuente, y una distribución de intervalos con mayor predominancia entre los valores 55 - 65, mostrando una tendencia en calidad de roca clasificada como media y buena.

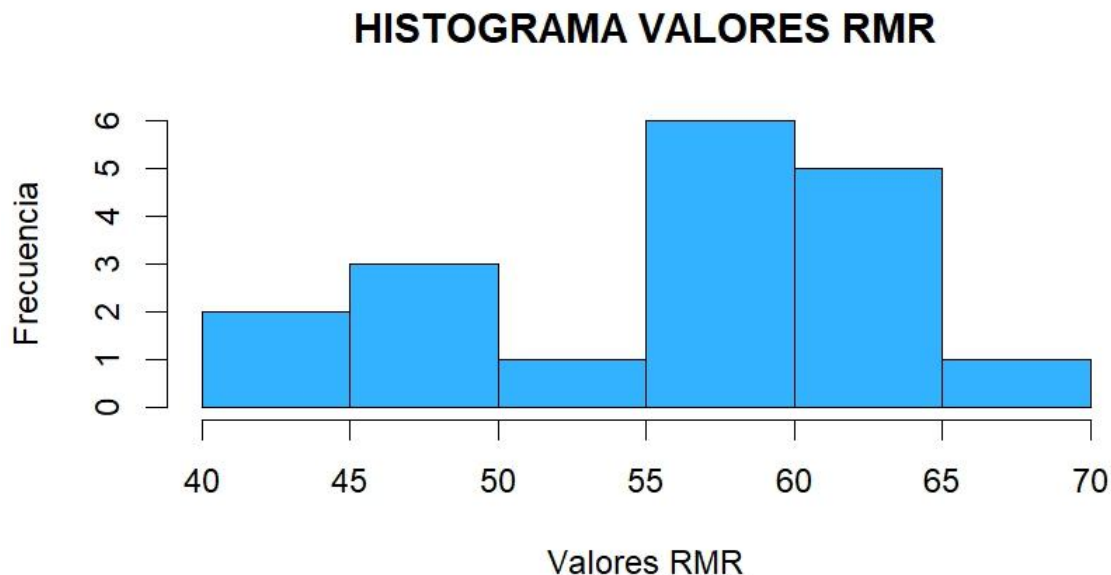


Figura 15. Histograma de los valores RMR, elaboración propia.

Tabla 6. Estadística descriptiva de los datos, elaboración propia.

ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LOS VALORES RMR		
Mediana	57	Valor central de un conjunto de datos
Moda	57	Valor más frecuente o repetitivo de un conjunto de datos
Cuartil inferior	49	Representa el 25% inferior de los datos
Cuartil superior	62	Representa el 75% superior

5.2. CONSTRUCCIÓN DEL VARIOGRAMA

Se calculó el variograma experimental de los datos RMR usando el software RStudio con la función *variogram* (Figura 16), con el modelo obtenido se aprecia la continuidad espacial de los datos.

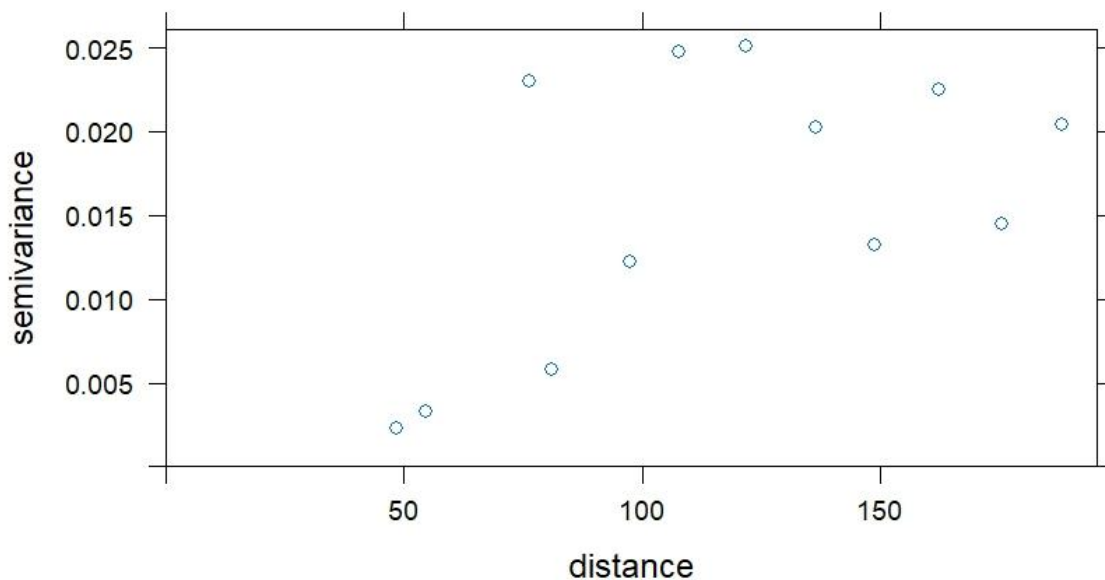


Figura 16. Variograma experimental de los valores RMR, elaboración propia.

El ajuste del modelo del variograma teórico (Figura 17) se realizó con la función *fit.variogram* usando un modelo gaussiano para ajustar la curva de datos.

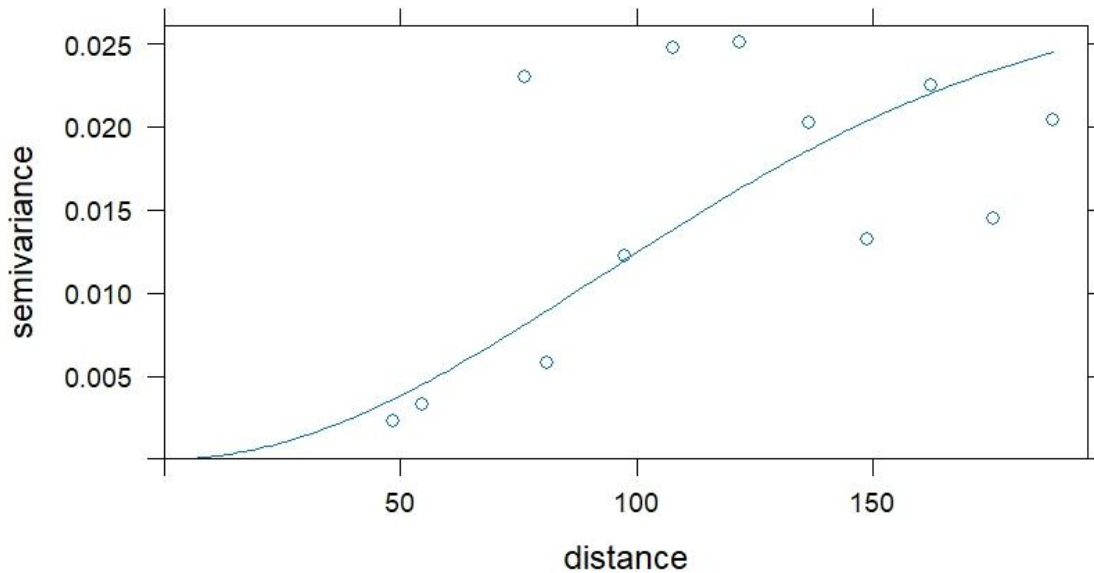


Figura 17. Variograma teórico de los valores RMR, elaboración propia.

El variograma y la función de curva se trazaron para comprender la estructura espacial del área. Visualmente, se observa que la función de curva puede describir relativamente bien la autocorrelación entre puntos.

5.3. INTERPOLACIÓN KRIGING

Para realizar una interpolación es necesario construir una superficie en donde proyectarla, esta superficie debe coincidir con el área de los datos iniciales y debe estar extendida para poder proyectar la interpolación, a esta superficie se le denominó inicialmente como malla.

La malla se forma con la función *raster*, que es una cuadrícula que contiene las coordenadas de la zona a interpolar, en la Figura 18 se muestra la malla con los puntos de estudio.

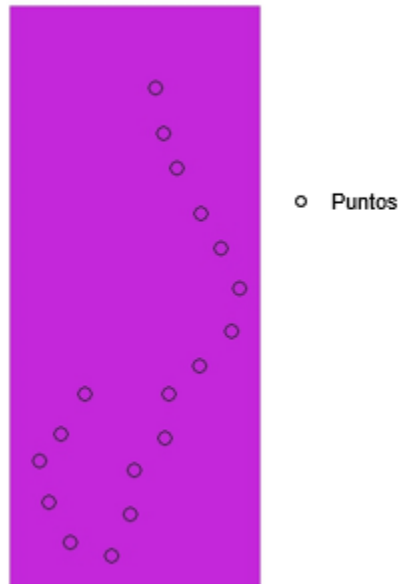


Figura 18. Superficie para interpolación, elaboración propia.

La construcción del kriging toma en cuenta la superficie (malla) en la cual se proyectará la interpolación y el modelo del variograma que define la interpolación de los valores. El modelo kriging se realizó con la función *krige* y el resultado se mapeo con un mapa de calor, el cual muestra las variaciones entre la interpolación de valores, sobre este mapa se sobrepusieron los puntos de valores RMR.

La Figura 19 muestra el modelo kriging con los puntos base que se utilizaron para construir el modelo, en el cual se muestran las predicciones de los valores en el área.

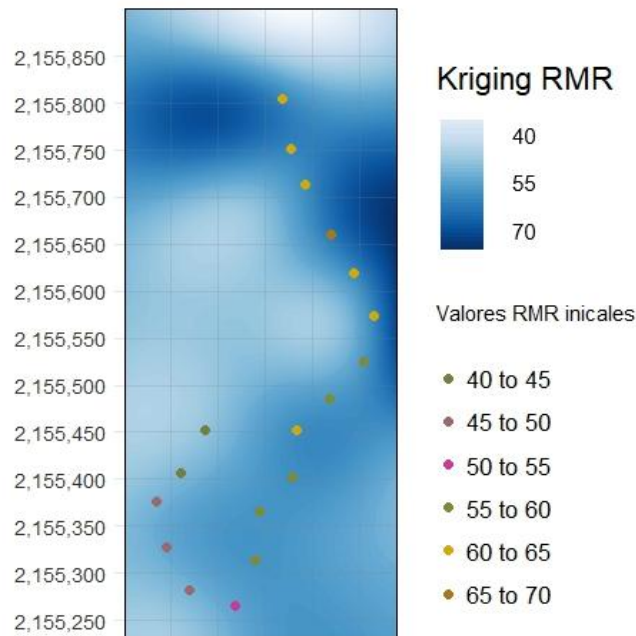


Figura 19. Modelo kriging, elaboración propia.

El modelo kriging obtenido comparte ciertas similitudes con el comportamiento de los datos, siendo los tonos azules oscuros los que tienen valores RMR más altos y los tonos azules claros con valores RMR más bajos. Conforme a esta tendencia, con la interpolación se detecta un área con calidad baja, un área con calidad media y un área con calidad buena, es importante recordar que la interpolación tiene un mejor ajuste conforme a la cercanía de los datos, por lo que se tendría que evaluar esta división de áreas conforme a la varianza del modelo (Figura 20), el mapa que presenta la varianza muestra la confiabilidad de los datos sobre el área interpolada y ayuda a terminar de delimitar el yacimiento por zonas conforme a su calidad.

La varianza que presenta el modelo es baja en la zona cercana a los puntos base y se extiende lo suficiente para delimitar el macizo, ya que los valores más bajos se presentan justamente en el yacimiento.

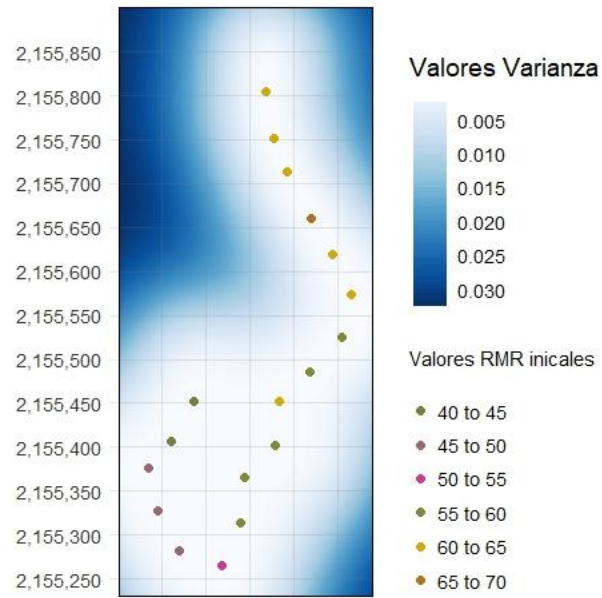


Figura 20. Varianza del modelo predictivo, elaboración propia.

5.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con respecto a los modelos obtenidos se pudo delimitar el yacimiento en tres zonas conforme a su calidad de macizo rocoso y proporcionar áreas preliminares de las zonas, cabe mencionar que estas zonas están relacionadas con la factibilidad de explotación en el yacimiento, en la Figura 21 se muestra la delimitación por zonas en el área del yacimiento.

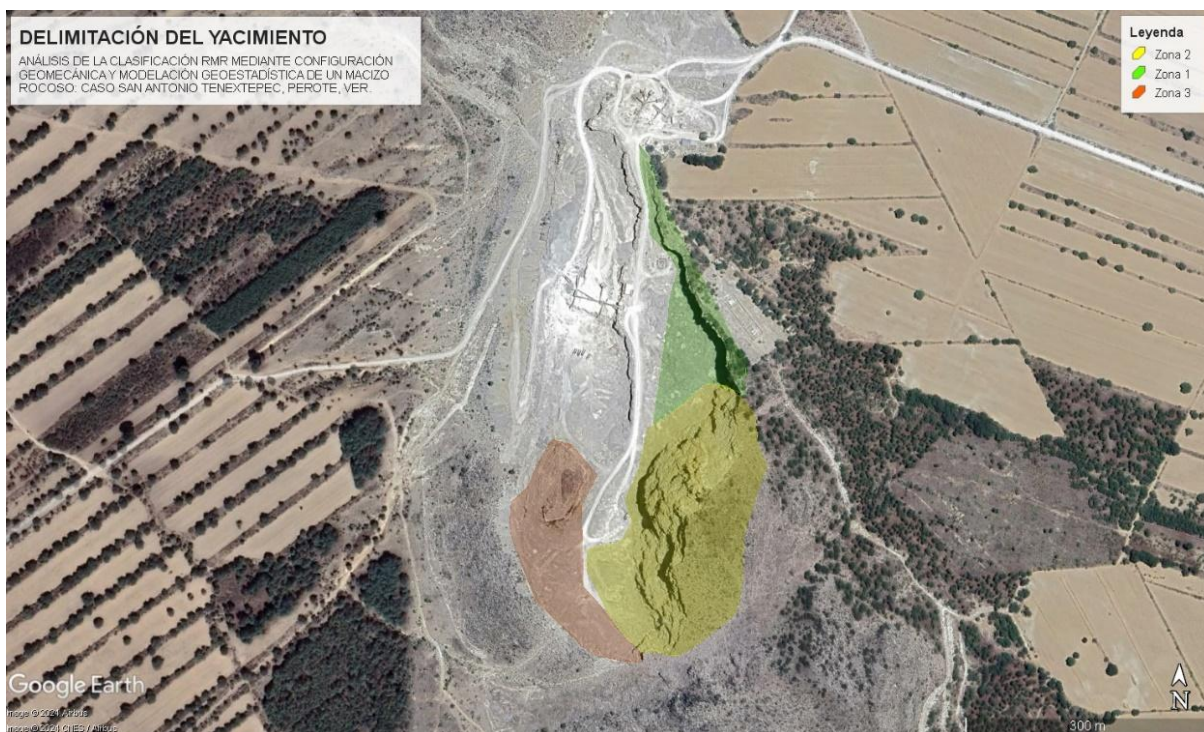


Figura 21. Delimitación del yacimiento, elaboración propia.

- **Zona 1:** se delimitó dentro del yacimiento la Zona 1, la cual se determinó con una calidad buena conforme a la clasificación RMR; los parámetros de clasificación geomecánica indican que tiene una resistencia promedio entre 1000 - 2500 kg/cm², un porcentaje de RQD entre 75 y 90, una separación entre las discontinuidades presentes de 0.6 - 2.0 m y poca o nula presencia de agua; geológicamente esta zona no presenta alteraciones en la roca, tampoco

representa algún riesgo geomecánico aparente conforme a los parámetros de caracterización, y se determina que es factible continuar la explotación de material, el área aproximada tiene un valor de 13,286 m².

- **Zona 2:** la cual se determinó con una calidad media conforme a la clasificación RMR; los parámetros de clasificación geomecánica indican que tiene una resistencia promedio entre 1000 - 2500 kg/cm², un porcentaje de RQD entre 75 y 90, una separación entre las discontinuidades presentes de 0.06 – 2.0 m y poca o nula presencia de agua; geológicamente esta zona no presenta alteraciones en la roca, pero delimita con una zona de alteración, tampoco representa algún riesgo geomecánico aparente conforme a los parámetros de caracterización, y se determina que es importante realizar un estudio geológico completo antes continuar la explotación de material que delimita con la zona de alteración, el área aproximada tiene un valor de 37,573 m².
- **Zona 3:** se delimitó dentro del yacimiento la Zona 3, la cual se determinó con una calidad media a baja conforme a la clasificación RMR; los parámetros de clasificación geomecánica indican que tiene una resistencia promedio entre 500 - 1000 kg/cm², un porcentaje de RQD entre 50 y 75, una separación entre las discontinuidades presentes de 0.06 - 0.2 m y poca o nula presencia de agua; geológicamente esta zona presenta una alteración considerable en la roca, además de zonas con intercalaciones de arcilla, tampoco representa algún riesgo geomecánico aparente conforme a los parámetros de caracterización, pero sus valores de resistencia son bajos y la presencia de arcilla imposibilita la explotación en esa zona, se debe realizar un estudio de exploración completo antes de determinar si la explotación de material es factible o no, descartando completamente la zona arcillosa para explotación, el área aproximada tiene un valor de 18,041 m².

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con base en la interpretación de los resultados, en donde se obtuvo un modelo de interpolación a partir de datos de clasificación geomecánica y se clasificó el yacimiento en tres zonas conforme a la calidad del macizo rocoso en función de los parámetros de la clasificación RMR, se desprenden las siguientes conclusiones y recomendaciones.

6.1. CONCLUSIONES

- Se contó con 18 datos de una campaña de exploración correspondientes a la obtención de la clasificación geomecánica RMR, que cubren un área de estudio correspondiente a la cara del yacimiento de la mina.
- Previo a la realización del modelo, se realizó un reconocimiento geológico en la mina para corroborar la litología de la zona. Se determinó que la litología en su mayor proporción está compuesta por caliza y en menor proporción por dolomía, las cuales tienen presencia de arcilla sobre la cara del macizo rocoso.
- La clasificación geomecánica RMR es usada para determinar la calidad de un macizo rocoso conforme a parámetros geomecánicos, esta clasificación se realiza en campo y puede acompañarse de sondeos para obtención de muestras.
- Se trabajó con datos de clasificación geomecánica RMR para generar un modelo de interpolación kriging que permitiera visualizar la calidad del macizo rocoso en función de los parámetros de la misma clasificación.
- Solo se consideraron para la interpolación los valores finales RMR sin los parámetros por los cuales está compuesta la clasificación geomecánica RMR,

puesto que para generar un modelo de interpolación solo se puede trabajar con una variable a la vez.

- Para realizar el modelo geoestadístico se trabajó con el software RStudio, ya que es un software de uso libre y presenta ventajas en el análisis de datos, además se pueden introducir de manera directa los códigos y/o herramientas que permiten una mejor interacción con los datos que se quieren trabajar.
- Con respecto al análisis estadístico, se obtuvo el rango de valores RMR en los que se encuentran los datos, la media, los cuartiles inferior y superior y el histograma que forman los valores.
- La construcción del variograma permite entender la autocorrelación entre puntos, esto significa que muestra a qué distancia los datos ya no son relevantes para el modelo predictivo. Además, el variograma se utiliza para realizar interpolaciones en nuevos datos sobre la zona delimitada.
- El modelo de interpolación kriging permitió estimar valores desconocidos en ubicaciones específicas del yacimiento de la mina, los valores estimados corresponden a la caracterización geomecánica RMR y siguen la tendencia que presentan los datos en campo.
- Si bien el modelo geoestadístico que presenta la predicción para los datos es una parte fundamental, es importante corroborar la precisión del modelo, por esta razón además de presentar el modelo kriging de los valores interpolados se presentó un modelo kriging de la varianza que presenta a lo largo del área determinada para la interpolación, este modelo permite identificar zonas de mayor incertidumbre respecto a las predicciones.

- Los modelos se presentaron como mapas de calor, ya que este gráfico permite identificar la magnitud de la variable en toda el área de estudio. Los modelos deben representarse en alguna cartografía para poder interpretar el comportamiento de los valores.
- Se identifican tres zonas conforme a la calidad presente en el yacimiento:
 - La Zona 1 se determinó con una calidad buena conforme a la clasificación RMR.
 - La Zona 2 se determinó con una calidad media conforme a la clasificación RMR.
 - La Zona 3 se determinó con una calidad media a baja conforme a la clasificación RMR.
- El análisis espacial permite resolver problemas complejos enfocados en información que pueda ser capaz de georreferenciarse con respecto a la ubicación del muestreo, además que ayuda a comprender de forma más eficiente dónde y qué está ocurriendo en la zona de estudio.
- Analizar un conjunto de datos va más allá de plasmar los datos en la zona de estudio, pues hay que estudiar las características de los valores y las relaciones entre ellos. Implementar un análisis espacial aporta nuevas perspectivas a la toma de decisiones, siempre y cuando se pruebe la precisión del modelo antes de efectuarlo en el mundo real, por eso es importante analizar el modelo con la varianza que este presenta.

6.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar campañas de exploración periódicas para actualizar los valores de la caracterización geomecánica RMR, debido al uso de explosivos para extraer la roca caliza, la calidad del macizo rocoso puede llegar a verse afectada.
- Se recomienda realizar un reconocimiento geológico con mayor detalle para definir completamente la zona de alteración geológica que presenta el yacimiento y determinar el impacto que la alteración tendrá en la explotación del material.
- Por último, se recomienda realizar un reconocimiento estructural de la zona para obtener los estereogramas pertinentes e identificar las familias de fallas primarias y secundarias que están presentes en el macizo rocoso.

REFERENCIAS

- Academia Balderix. (s.f.). *Caurtiles*. Obtenido de Probabilidad y Estadística: <https://www.probabilidadyestadistica.net/cuartiles/#:~:text=En%20estad%C3%ADstica,%20los%20%EE%80%80cuartiles%EE%80%81>
- Alvarado Valdés, F. (julio de 2020). MODELAMIENTO GEOESTADÍSTICO DE LA CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DE BIENAWSKI (RMR). Chile: Universidad de Chile. Obtenido de Universidad de Chile: [https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/176858/Modelamiento-geoestad%C3%ADstico-de-la-clasificaci%C3%B3n-geomec%C3%A1nica-de-Bieniawski-%28RMR%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=GEOMEC%C3%81NICA%20DE%20BIENIAWSKI%20\(RMR\),-Al%20ser%20la&text](https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/176858/Modelamiento-geoestad%C3%ADstico-de-la-clasificaci%C3%B3n-geomec%C3%A1nica-de-Bieniawski-%28RMR%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=GEOMEC%C3%81NICA%20DE%20BIENIAWSKI%20(RMR),-Al%20ser%20la&text)
- ArcGIS Pro. (2024). *esri*. Obtenido de Cómo funciona Kriging: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/3d-analyst/how-kriging-works.htm>
- Behr, A. (9 de Octubre de 2020). *Building Kriging Models in R - Utilizing Spatial Statistics Algorithms for Spatial Predictions*. Obtenido de Towards Data Science: <https://towardsdatascience.com/building-kriging-models-in-r-b94d7c9750d8>
- CAMIMEX. (1989). *Informe 1988 de los grupos productores de la Cámara Minera* . México: Minería CAMIMEX.
- CAMIMEX. (Noviembre de 2020). *Importancia de la minería en México*. Obtenido de GEOMIN: https://www.geomin.com.mx/pdf/panel/litio/ImportanciaMineria_MX_ForoLitio.pdf
- CONAGUA. (2024). *Diario Oficial de la Federación*. Obtenido de Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Perote-Zelaya (3004), Estado de Veracruz: https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/veracruz/DR_3004.pdf

Cravioto, F. (Febrero de 2019). *La normatividad minera en México: problemas y propuestas de modificación*. Obtenido de Mexican Civil Council for Sustainable Forestry:

<https://www.bing.com/ck/a?!&&p=3f9ae5fa78c7b683JmltdHM9MTcwNjA1NDQwMCZpZ3VpZD0wYmM0NjRjZS05YmI4LTU5ODctM2Q1Yy03NzYzOWE5ZDY4N2UmaW5zaWQ9NTI4Nw&pbn=3&ver=2&hsh=3&fclid=0bc464ce-9bb8-6987-3d5c-77639a9d687e&psq=normativa+en+la+miner%c3%ada&u=a1aHR0cHM6Ly93d3c>

Dávila Burga, J. (2011). *Diccionario Geológico*. Callao, Perú: Arth-Altuna. Obtenido de www.arth-altuna.com

Equipo editorial, Etecé. (23 de enero de 2023). *Enciclopedia Humanidades*. Obtenido de Minería: <https://humanidades.com/mineria/>

Ferrari, L. (2000). *Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década*. Obtenido de Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana: <http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/vols/epoca03/5301/ferrari.pdf>

Giraldo Henao, R. (2002). *INTRODUCCIÓN A LA GEOESTADÍSTICA - Teoría y Aplicación*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de https://geoinnova.org/wp-content/uploads/2021/08/LIBRO_-DE-_GEOESTADISTICA-R-Giraldo.pdf

González de Vallejo, L. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación.

Grupo ORS . (2023). *¿Qué es la minería en México?* Obtenido de Grupo ORS: <https://grupoor.com.mx/2023/04/26/que-es-la-mineria-en-mexico/>

Hita María, J. L. (2015). *APLICACIÓN DE MÉTODOS ESTADÍSTICOS A LA INGENIERÍA DE TÚNELES Y OBRAS SUBTERRÁNEAS*. Madrid, España.

Li, K. (8 de Marzo de 2023). *Kriging Interpolation in R*. Obtenido de Kennan Li: <https://kenan-li.github.io/blog/2023/Kriging/>

Minería en línea. (22 de Julio de 2023). *Marco legal y normativo de la minería en México*.
Obtenido de Mineriaenlinea: <https://mineriaenlinea.com/articulos/marco-legal-y-normativo-de-la-mineria-en-mexico/>

Ochoa Martínez, C. A. (2017). *Valle de Perote. Aspectos bioclimáticos y socioeconómicos*. Xalapa: IETEC-Arana Editores. Obtenido de <https://www.uv.mx/cienti/files/2013/02/Valle-de-Perote-Aspectos-bioclimaticos-y-socioeconomicos.pdf>

Organismo supervisor de la Inversión en Energía y Minería. (2017). *Guía de criterios geomecánicos para diseño, construcción, supervisión y cierre de labores subterráneas*. Lima: INVERIOSNES IAKOB S.AC. Obtenido de https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/mineria/Documentos/Publicaciones/Guia-Criterios-Geomecanicos.pdf

POSIT. (2024). *RStudio IDE*. Obtenido de posit: <https://posit.co/products/open-source/rstudio/>

Rodríguez Elizarrás, S. R., & Morales Barrera, W. V. (2010). *Atlas del patrimonio natural, histórico y cultural del estado de Veracruz* (Vol. I). México: Comisión del Estado de Veracruz para la Conmemoración de la Independencia Nacional y la Revolución Mexicana, Gobierno del Estado de Veracruz-Universidad. Obtenido de https://www.sev.gob.mx/servicios/publicaciones/colec_veracruzsigloXXI/PatrimonionaturalVeracruz/PatrimonionaturalVeracruz1.pdf

Sánchez-Crispin, Á., & Sánchez-Salazar, M. T. (s.f.). *LA MINERIA NO-METALICA EN MÉXICO: VISIÓN GEOGRÁFICO-ECONÓMICA*. Obtenido de OBSERVATORIO GEOGRÁFICO DE AMÉRICA LATINA: <http://observatoriogeograficoamericalatina.org.mx/egal3/Geografiasocioeconomicas/Geografiaindustrial/06.pdf>

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2000). 008. Bancos. En S. d. Transportes, *CTR. CONSTRUCCIÓN*. Obtenido de <https://normas.imt.mx/busqueda-desplegable.html#>

Secretaría de Economía. (27 de Agosto de 2020). *Acciones y Progrmas: Minería. Legislación, normatividad y convenios internacionales*. Obtenido de Secretaría de economía: [https://www.gob.mx/se/acciones-y-programas/mineria-legislacion-normatividad-y-convenios-internacionales-6986?state=published#:~:text=Ley%20Org%C3%A1nica%20de%20la%20Administraci%C3%B3n%20P%C3%ABlica%20%28LOAP%29%20Reglamento,Manual%20de%20Servicios%20al%](https://www.gob.mx/se/acciones-y-programas/mineria-legislacion-normatividad-y-convenios-internacionales-6986?state=published#:~:text=Ley%20Org%C3%A1nica%20de%20la%20Administraci%C3%B3n%20P%C3%ABlica%20%28LOAP%29%20Reglamento,Manual%20de%20Servicios%20al%20)

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales . (Noviembre de 2022). *MINERÍA*. Obtenido de Boletín Estadístico y Geográfico: https://gisviewer.semarnat.gob.mx/bol/11_2202/

Servicio Geológico Mexicano. (2024). *Cartas impresas disponibles del Servicio Geológico Mexicano*. Obtenido de SGM: <https://www.sgm.gob.mx/CartasDisponibles/>

Sosa Massaro, A. (2021). *Instituto Argentino del Petróleo y del Gas*. Obtenido de Geomecánica: <https://www.iapg.org.ar/conexplo/geomecanica.html>

Tecnología Minera. (2024). *Siete recomendaciones para una eficaz y precisa voladura en minería*. Obtenido de Tecnología Minera: <https://tecnologiaminera.com/noticia/siete-recomendaciones-para-una-eficaz-y-precisa-voladura-en-mineria-1707400152>

Torres Yupanqui, L. A., Ruiz Castro, A. A., Daga Huaricanha, J., & Vizcarra Arana, J. G. (2010). Geomecánica aplicada al control de las labores mineras para la minimización de caída de rocas en la mina Madrugada Cía. minera Huinac SAC- Ancash-2009. *Aporte Santiaguino*, 3(1), 35 - 40. Obtenido de <http://www.scielo.org.pe/pdf/as/v3n1/a05v3n1.pdf>

GLOSARIO

Alteración geológica: proceso de modificación de los minerales y rocas por acción de los agentes de erosión: agua, viento, hielo, sol, etc. Sinónimo: intemperismo, meteorización (Dávila Burga, 2011).

Caracterización geomecánica: método utilizado en ingeniería geotécnica para evaluar la calidad de los macizos rocosos, en el que se relacionan índices de calidad con parámetros geotécnicos (González de Vallejo, 2002).

Cuartil: los cuartiles son los tres valores que dividen a un conjunto de datos ordenados en cuatro partes iguales. Por lo tanto, el primer, segundo y tercer cuartil representan respectivamente el 25%, 50% y 75% del conjunto de datos estadísticos (Academia Balderix, s.f.).

Discontinuidad: son superficies dentro de las formaciones terrestres donde se interrumpen o cambian las características de las capas rocosas debido a procesos tectónicos, erosión o deposición. Las discontinuidades también se conocen como fracturas o discordancias (Dávila Burga, 2011).

Geomecánica: ciencia que estudia las propiedades elásticas de las rocas y su relación con los esfuerzos en el subsuelo, tanto en condiciones inalteradas como su respuesta a los cambios originados por las operaciones realizadas por el hombre (Sosa Massaro, 2021).

Geoestadística: rama de la estadística que trata fenómenos espaciales, su interés primordial es la estimación, predicción y simulación de dichos fenómenos (Giraldo Henao, 2002).

GSI: Geological Strength Index.

Histograma: representaciones del espacio muestral dividido en intervalos o clases comprendidas entre un valor mínimo y máximo. Cada uno de estos intervalos o clases comprenderá un número determinado de muestras, la frecuencia, dato representado en el diagrama (Hita María, 2015).

Interpolación: método estadístico para estimar un valor desconocido usando valores conocidos relacionados entre sí (Alvarado Valdés, 2020).

Kriging: conjunto de métodos de predicción espacial que se fundamentan en la minimización del error cuadrático medio de predicción. Los métodos kriging se aplican con frecuencia con el propósito de predicción, sin embargo, estas metodologías tienen diversas aplicaciones, dentro de las cuales se destacan la simulación y el diseño de redes óptimas de muestreo (Giraldo Henao, 2002).

Macizo rocoso: término descriptivo usado en Geotectónica, Orogenia, para referirse a las áreas montañosas cuyo núcleo está constituido de roca ígnea plutónica masiva o metamórficas, parcialmente erosionadas (Dávila Burga, 2011).

Mediana: representa el valor de la variable en la posición central de una muestra (Hita María, 2015).

Metamorfismo: es la suma de todos los procesos geológicos mediante los cuales los minerales de las rocas y ellas mismas sufren transformaciones en su estructura, textura y orientación, dando lugar a nuevos minerales y nuevas rocas sin cambiar su composición química. Los agentes principales de metamorfismo son: las presiones litostáticas de las rocas suprayacentes, la temperatura proveniente del gradiente geotérmico y de los procesos magmáticos y las soluciones hidrotermales (Dávila Burga, 2011).

Mineral: sustancia inorgánica u orgánica de propiedades físicas y químicas definidas, que permiten su diferenciación y reconocimiento (Dávila Burga, 2011).

Minería: ciencia y técnica que usa los métodos más convenientes para la explotación de los yacimientos minerales (Dávila Burga, 2011).

Moda: representa el valor que con mayor frecuencia se repite en una muestra (Hita María, 2015).

Modelo geoestadístico: disciplina que trabaja con datos colectados en diferentes locaciones espaciales, con los que se desarrollan representaciones que indiquen cuando

hay dependencia entre las medidas de los diferentes sitios. Usualmente dicha modelación concierne con la predicción espacial (Giraldo Henao, 2002).

Q de Barton: clasificación geomecánica que permite estimar parámetros geotécnicos del macizo rocoso, principalmente para sostenimientos de túneles y otras excavaciones subterráneas (González de Vallejo, 2002).

RCS: Resistencia a la Compresión Simple.

Reconocimiento geológico: prospección geológica preliminar de una determinada región o mina, con el objeto de determinar si ésta tiene alguna importancia económica y realizar posteriormente una prospección más detallada (Dávila Burga, 2011).

RMR: Rock Mass Rating.

RQD: Rock Quality Designation

Semivariograma: distancia promedio entre parejas de sitios dentro de cada intervalo y no a una distancia específica (Giraldo Henao, 2002).

Variograma: varianza de los incrementos de la variable regionalizada (Giraldo Henao, 2002).

Voladura: técnica esencial en la industria minera y de construcción, utilizada para fragmentar rocas y terrenos con el objetivo de facilitar la extracción de minerales o la construcción de infraestructuras (Tecnología Minera, 2024).

Yacimiento: lugar o terreno donde se ubican minerales de rendimiento económico o fósiles. Sinónimo: Depósito mineral, cuerpo mineralizado, entre otros (Dávila Burga, 2011).

ANEXOS

ANEXO 1

Tabla 7. Coordenadas de los puntos de estudio, elaboración propia.

Punto	Latitud	Longitud
1	19.488726	-97.284739
2	19.488252	-97.284663
3	19.487897	-97.284524
4	19.48742	-97.28426
5	19.487053	-97.284045
6	19.486638	-97.283846
7	19.486198	-97.283942
8	19.485837	-97.284298
9	19.485542	-97.284634
10	19.485089	-97.284679
11	19.484759	-97.28502
12	19.484473	-97.285963
13	19.483866	-97.285277
14	19.484018	-97.285735
15	19.484864	-97.286061
16	19.484864	.97.286061
17	19.485144	-97.285816
18	19.485549	-97.285554

ANEXO 2

Tabla 8. Parámetros para clasificación RMR en el punto 1, elaboración propia.

1.1 RCS (kg/cm²)						
>2500	2500 - 1000	1000 - 500	500 - 250	250 - 50	50-10	<10
15	12	7	5	2	1	0
1.2 RQD (%)						
100 - 90	90 - 75	75 - 50	50 - 25	<25		
20	17	13	6	3		
1.3 SEPARACIÓN (m)						
>2.00	0.6 - 2.0	0.2 - 0.6	0.06 - 0.2	<0.06		
20	15	10	8	5		
1.4 ESTADO DE LAS DISCONTINUIDADES (FAMILIA PRINCIPAL)						
Longitud de la discontinuidad (m)	<1	1 a 3	3 a 10	10 a 20	>20	
	6	4	2	1	0	
Apertura (mm)	0	<0.10	0.1 a 1.0	1 a 5	>5	
	6	5	3	1	0	
Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Espejo	
	6	5	3	1	0	
Relleno	Sin relleno	Relleno duro		Relleno blando		
	-	<5 mm	>5 mm	<5 mm	>5 mm	
	6	4	2	2	0	
Alteración	Inalterado	Ligeramente alterado	Moderadamente alterado	Muy alterado	Descompuesto	
	6	5	3	1	0	
1.5 PRESENCIA DE AGUA						
Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteo	Fluyendo		
15	10	7	4	0		
2. CORRECCIÓN POR ORIENTACIÓN DE DISCONTINUIDADES						
Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables		
0	-5	-25	-50	-60		

Tabla 9. Parámetros para clasificación RMR en el punto 2, elaboración propia.

1.1 RCS (kg/cm²)							
>2500	2500 - 1000	1000 - 500	500 - 250	250 - 50	50-10	<10	
15	12	7	5	2	1	0	
1.2 RQD (%)							
100 - 90	90 - 75	75 - 50	50 - 25	<25			
20	17	13	6	3			
1.3 SEPARACIÓN (m)							
>2.00	0.6 - 2.0	0.2 - 0.6	0.06 - 0.2	<0.06			
20	15	10	8	5			
1.4 ESTADO DE LAS DISCONTINUIDADES (FAMILIA PRINCIPAL)							
Longitud de la discontinuidad (m)	<1	1 a 3	3 a 10	10 a 20	>20		
	6	4	2	1	0		
Apertura (mm)	0	<0.10	0.1 a 1.0	1 a 5	>5		
	6	5	3	1	0		
Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Espejo		
	6	5	3	1	0		
Relleno	Sin relleno	Relleno duro		Relleno blando			
	-	<5 mm	>5 mm	<5 mm	>5 mm		
	6	4	2	2	0		
Alteración	Inalterado	Ligeramente alterado	Moderadamente alterado	Muy alterado	Descompuesto		
	6	5	3	1	0		
1.5 PRESENCIA DE AGUA							
Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteo	Fluyendo			
15	10	7	4	0			
2. CORRECCIÓN POR ORIENTACIÓN DE DISCONTINUIDADES							
Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables			
0	-5	-25	-50	-60			

Tabla 10. Parámetros para clasificación RMR en el punto 3, elaboración propia.

1.1 RCS (kg/cm²)						
>2500	2500 - 1000	1000 - 500	500 - 250	250 - 50	50-10	<10
15	12	7	5	2	1	0
1.2 RQD (%)						
100 - 90	90 - 75	75 - 50	50 - 25	<25		
20	17	13	6	3		
1.3 SEPARACIÓN (m)						
>2.00	0.6 - 2.0	0.2 - 0.6	0.06 - 0.2	<0.06		
20	15	10	8	5		
1.4 ESTADO DE LAS DISCONTINUIDADES (FAMILIA PRINCIPAL)						
Longitud de la discontinuidad (m)	<1	1 a 3	3 a 10	10 a 20	>20	
	6	4	2	1	0	
Apertura (mm)	0	<0.10	0.1 a 1.0	1 a 5	>5	
	6	5	3	1	0	
Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Espejo	
	6	5	3	1	0	
Relleno	Sin relleno	Relleno duro		Relleno blando		
	-	<5 mm	>5 mm	<5 mm	>5 mm	
	6	4	2	2	0	
Alteración	Inalterado	Ligeramente alterado	Moderadamente alterado	Muy alterado	Descompuesto	
	6	5	3	1	0	
1.5 PRESENCIA DE AGUA						
Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteo	Fluyendo		
15	10	7	4	0		
2. CORRECCIÓN POR ORIENTACIÓN DE DISCONTINUIDADES						
Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables		
0	-5	-25	-50	-60		

Tabla 11. Parámetros para clasificación RMR en el punto 4, elaboración propia.

1.1 RCS (kg/cm²)						
>2500	2500 - 1000	1000 - 500	500 - 250	250 - 50	50-10	<10
15	12	7	5	2	1	0
1.2 RQD (%)						
100 - 90	90 - 75	75 - 50	50 - 25	<25		
20	17	13	6	3		
1.3 SEPARACIÓN (m)						
>2.00	0.6 - 2.0	0.2 - 0.6	0.06 - 0.2	<0.06		
20	15	10	8	5		
1.4 ESTADO DE LAS DISCONTINUIDADES (FAMILIA PRINCIPAL)						
Longitud de la discontinuidad (m)	<1	1 a 3	3 a 10	10 a 20	>20	
	6	4	2	1	0	
Apertura (mm)	0	<0.10	0.1 a 1.0	1 a 5	>5	
	6	5	3	1	0	
Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Espejo	
	6	5	3	1	0	
Relleno	Sin relleno	Relleno duro		Relleno blando		
	-	<5 mm	>5 mm	<5 mm	>5 mm	
	6	4	2	2	0	
Alteración	Inalterado	Ligeramente alterado	Moderadamente alterado	Muy alterado	Descompuesto	
	6	5	3	1	0	
1.5 PRESENCIA DE AGUA						
Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteo	Fluyendo		
15	10	7	4	0		
2. CORRECCIÓN POR ORIENTACIÓN DE DISCONTINUIDADES						
Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables		
0	-5	-25	-50	-60		

Tabla 12. Parámetros para clasificación RMR en el punto 5, elaboración propia.

1.1 RCS (kg/cm²)						
>2500	2500 - 1000	1000 - 500	500 - 250	250 - 50	50-10	<10
15	12	7	5	2	1	0
1.2 RQD (%)						
100 - 90	90 - 75	75 - 50	50 - 25	<25		
20	17	13	6	3		
1.3 SEPARACIÓN (m)						
>2.00	0.6 - 2.0	0.2 - 0.6	0.06 - 0.2	<0.06		
20	15	10	8	5		
1.4 ESTADO DE LAS DISCONTINUIDADES (FAMILIA PRINCIPAL)						
Longitud de la discontinuidad (m)	<1	1 a 3	3 a 10	10 a 20	>20	
	6	4	2	1	0	
Apertura (mm)	0	<0.10	0.1 a 1.0	1 a 5	>5	
	6	5	3	1	0	
Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Espejo	
	6	5	3	1	0	
Relleno	Sin relleno	Relleno duro		Relleno blando		
	-	<5 mm	>5 mm	<5 mm	>5 mm	
	6	4	2	2	0	
Alteración	Inalterado	Ligeramente alterado	Moderadamente alterado	Muy alterado	Descompuesto	
	6	5	3	1	0	
1.5 PRESENCIA DE AGUA						
Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteo	Fluyendo		
15	10	7	4	0		
2. CORRECCIÓN POR ORIENTACIÓN DE DISCONTINUIDADES						
Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables		
0	-5	-25	-50	-60		

Tabla 13. Parámetros para clasificación RMR en el punto 6, elaboración propia.

1.1 RCS (kg/cm²)							
>2500	2500 - 1000	1000 - 500	500 - 250	250 - 50	50-10	<10	
15	12	7	5	2	1	0	
1.2 RQD (%)							
100 - 90	90 - 75	75 - 50	50 - 25	<25			
20	17	13	6	3			
1.3 SEPARACIÓN (m)							
>2.00	0.6 - 2.0	0.2 - 0.6	0.06 - 0.2	<0.06			
20	15	10	8	5			
1.4 ESTADO DE LAS DISCONTINUIDADES (FAMILIA PRINCIPAL)							
Longitud de la discontinuidad (m)	<1	1 a 3	3 a 10	10 a 20	>20		
	6	4	2	1	0		
Apertura (mm)	0	<0.10	0.1 a 1.0	1 a 5	>5		
	6	5	3	1	0		
Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Espejo		
	6	5	3	1	0		
Relleno	Sin relleno	Relleno duro		Relleno blando			
	-	<5 mm	>5 mm	<5 mm	>5 mm		
	6	4	2	2	0		
Alteración	Inalterado	Ligeramente alterado	Moderadamente alterado	Muy alterado	Descompuesto		
	6	5	3	1	0		
1.5 PRESENCIA DE AGUA							
Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteo	Fluyendo			
15	10	7	4	0			
2. CORRECCIÓN POR ORIENTACIÓN DE DISCONTINUIDADES							
Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables			
0	-5	-25	-50	-60			

Tabla 14. Parámetros para clasificación RMR en el punto 7, elaboración propia.

1.1 RCS (kg/cm²)						
>2500	2500 - 1000	1000 - 500	500 - 250	250 - 50	50-10	<10
15	12	7	5	2	1	0
1.2 RQD (%)						
100 - 90	90 - 75	75 - 50	50 - 25	<25		
20	17	13	6	3		
1.3 SEPARACIÓN (m)						
>2.00	0.6 - 2.0	0.2 - 0.6	0.06 - 0.2	<0.06		
20	15	10	8	5		
1.4 ESTADO DE LAS DISCONTINUIDADES (FAMILIA PRINCIPAL)						
Longitud de la discontinuidad (m)	<1	1 a 3	3 a 10	10 a 20	>20	
	6	4	2	1	0	
Apertura (mm)	0	<0.10	0.1 a 1.0	1 a 5	>5	
	6	5	3	1	0	
Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Espejo	
	6	5	3	1	0	
Relleno	Sin relleno	Relleno duro		Relleno blando		
	-	<5 mm	>5 mm	<5 mm	>5 mm	
	6	4	2	2	0	
Alteración	Inalterado	Ligeramente alterado	Moderadamente alterado	Muy alterado	Descompuesto	
	6	5	3	1	0	
1.5 PRESENCIA DE AGUA						
Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteo	Fluyendo		
15	10	7	4	0		
2. CORRECCIÓN POR ORIENTACIÓN DE DISCONTINUIDADES						
Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables		
0	-5	-25	-50	-60		

Tabla 15. Parámetros para clasificación RMR en el punto 8, elaboración propia.

1.1 RCS (kg/cm²)							
>2500	2500 - 1000	1000 - 500	500 - 250	250 - 50	50-10	<10	
15	12	7	5	2	1	0	
1.2 RQD (%)							
100 - 90	90 - 75	75 - 50	50 - 25	<25			
20	17	13	6	3			
1.3 SEPARACIÓN (m)							
>2.00	0.6 - 2.0	0.2 - 0.6	0.06 - 0.2	<0.06			
20	15	10	8	5			
1.4 ESTADO DE LAS DISCONTINUIDADES (FAMILIA PRINCIPAL)							
Longitud de la discontinuidad (m)	<1	1 a 3	3 a 10	10 a 20	>20		
	6	4	2	1	0		
Apertura (mm)	0	<0.10	0.1 a 1.0	1 a 5	>5		
	6	5	3	1	0		
Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Espejo		
	6	5	3	1	0		
Relleno	Sin relleno	Relleno duro		Relleno blando			
	-	<5 mm	>5 mm	<5 mm	>5 mm		
	6	4	2	2	0		
Alteración	Inalterado	Ligeramente alterado	Moderadamente alterado	Muy alterado	Descompuesto		
	6	5	3	1	0		
1.5 PRESENCIA DE AGUA							
Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteo	Fluyendo			
15	10	7	4	0			
2. CORRECCIÓN POR ORIENTACIÓN DE DISCONTINUIDADES							
Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables			
0	-5	-25	-50	-60			

Tabla 16. Parámetros para clasificación RMR en el punto 9, elaboración propia.

1.1 RCS (kg/cm²)						
>2500	2500 - 1000	1000 - 500	500 - 250	250 - 50	50-10	<10
15	12	7	5	2	1	0
1.2 RQD (%)						
100 - 90	90 - 75	75 - 50	50 - 25	<25		
20	17	13	6	3		
1.3 SEPARACIÓN (m)						
>2.00	0.6 - 2.0	0.2 - 0.6	0.06 - 0.2	<0.06		
20	15	10	8	5		
1.4 ESTADO DE LAS DISCONTINUIDADES (FAMILIA PRINCIPAL)						
Longitud de la discontinuidad (m)	<1	1 a 3	3 a 10	10 a 20	>20	
	6	4	2	1	0	
Apertura (mm)	0	<0.10	0.1 a 1.0	1 a 5	>5	
	6	5	3	1	0	
Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Espejo	
	6	5	3	1	0	
Relleno	Sin relleno	Relleno duro		Relleno blando		
	-	<5 mm	>5 mm	<5 mm	>5 mm	
	6	4	2	2	0	
Alteración	Inalterado	Ligeramente alterado	Moderadamente alterado	Muy alterado	Descompuesto	
	6	5	3	1	0	
1.5 PRESENCIA DE AGUA						
Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteo	Fluyendo		
15	10	7	4	0		
2. CORRECCIÓN POR ORIENTACIÓN DE DISCONTINUIDADES						
Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables		
0	-5	-25	-50	-60		

Tabla 17. Parámetros para clasificación RMR en el punto 10, elaboración propia.

1.1 RCS (kg/cm²)						
>2500	2500 - 1000	1000 - 500	500 - 250	250 - 50	50-10	<10
15	12	7	5	2	1	0
1.2 RQD (%)						
100 - 90	90 - 75	75 - 50	50 - 25	<25		
20	17	13	6	3		
1.3 SEPARACIÓN (m)						
>2.00	0.6 - 2.0	0.2 - 0.6	0.06 - 0.2	<0.06		
20	15	10	8	5		
1.4 ESTADO DE LAS DISCONTINUIDADES (FAMILIA PRINCIPAL)						
Longitud de la discontinuidad (m)	<1	1 a 3	3 a 10	10 a 20	>20	
	6	4	2	1	0	
Apertura (mm)	0	<0.10	0.1 a 1.0	1 a 5	>5	
	6	5	3	1	0	
Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Espejo	
	6	5	3	1	0	
Relleno	Sin relleno	Relleno duro		Relleno blando		
	-	<5 mm	>5 mm	<5 mm	>5 mm	
	6	4	2	2	0	
Alteración	Inalterado	Ligeramente alterado	Moderadamente alterado	Muy alterado	Descompuesto	
	6	5	3	1	0	
1.5 PRESENCIA DE AGUA						
Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteo	Fluyendo		
15	10	7	4	0		
2. CORRECCIÓN POR ORIENTACIÓN DE DISCONTINUIDADES						
Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables		
0	-5	-25	-50	-60		

Tabla 18. Parámetros para clasificación RMR en el punto 11, elaboración propia.

1.1 RCS (kg/cm²)							
>2500	2500 - 1000	1000 - 500	500 - 250	250 - 50	50-10	<10	
15	12	7	5	2	1	0	
1.2 RQD (%)							
100 - 90	90 - 75	75 - 50	50 - 25	<25			
20	17	13	6	3			
1.3 SEPARACIÓN (m)							
>2.00	0.6 - 2.0	0.2 - 0.6	0.06 - 0.2	<0.06			
20	15	10	8	5			
1.4 ESTADO DE LAS DISCONTINUIDADES (FAMILIA PRINCIPAL)							
Longitud de la discontinuidad (m)	<1	1 a 3	3 a 10	10 a 20	>20		
	6	4	2	1	0		
Apertura (mm)	0	<0.10	0.1 a 1.0	1 a 5	>5		
	6	5	3	1	0		
Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Espejo		
	6	5	3	1	0		
Relleno	Sin relleno	Relleno duro		Relleno blando			
	-	<5 mm	>5 mm	<5 mm	>5 mm		
	6	4	2	2	0		
Alteración	Inalterado	Ligeramente alterado	Moderadamente alterado	Muy alterado	Descompuesto		
	6	5	3	1	0		
1.5 PRESENCIA DE AGUA							
Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteo	Fluyendo			
15	10	7	4	0			
2. CORRECCIÓN POR ORIENTACIÓN DE DISCONTINUIDADES							
Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables			
0	-5	-25	-50	-60			

Tabla 19. Parámetros para clasificación RMR en el punto 12, elaboración propia.

1.1 RCS (kg/cm²)							
>2500	2500 - 1000	1000 - 500	500 - 250	250 - 50	50-10	<10	
15	12	7	5	2	1	0	
1.2 RQD (%)							
100 - 90	90 - 75	75 - 50	50 - 25	<25			
20	17	13	6	3			
1.3 SEPARACIÓN (m)							
>2.00	0.6 - 2.0	0.2 - 0.6	0.06 - 0.2	<0.06			
20	15	10	8	5			
1.4 ESTADO DE LAS DISCONTINUIDADES (FAMILIA PRINCIPAL)							
Longitud de la discontinuidad (m)	<1	1 a 3	3 a 10	10 a 20	>20		
	6	4	2	1	0		
Apertura (mm)	0	<0.10	0.1 a 1.0	1 a 5	>5		
	6	5	3	1	0		
Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Espejo		
	6	5	3	1	0		
Relleno	Sin relleno	Relleno duro		Relleno blando			
	-	<5 mm	>5 mm	<5 mm	>5 mm		
	6	4	2	2	0		
Alteración	Inalterado	Ligeramente alterado	Moderadamente alterado	Muy alterado	Descompuesto		
	6	5	3	1	0		
1.5 PRESENCIA DE AGUA							
Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteo	Fluyendo			
15	10	7	4	0			
2. CORRECCIÓN POR ORIENTACIÓN DE DISCONTINUIDADES							
Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables			
0	-5	-25	-50	-60			

Tabla 20. Parámetros para clasificación RMR en el punto 13, elaboración propia.

1.1 RCS (kg/cm²)						
>2500	2500 - 1000	1000 - 500	500 - 250	250 - 50	50-10	<10
15	12	7	5	2	1	0
1.2 RQD (%)						
100 - 90	90 - 75	75 - 50	50 - 25	<25		
20	17	13	6	3		
1.3 SEPARACIÓN (m)						
>2.00	0.6 - 2.0	0.2 - 0.6	0.06 - 0.2	<0.06		
20	15	10	8	5		
1.4 ESTADO DE LAS DISCONTINUIDADES (FAMILIA PRINCIPAL)						
Longitud de la discontinuidad (m)	<1	1 a 3	3 a 10	10 a 20	>20	
	6	4	2	1	0	
Apertura (mm)	0	<0.10	0.1 a 1.0	1 a 5	>5	
	6	5	3	1	0	
Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Espejo	
	6	5	3	1	0	
Relleno	Sin relleno	Relleno duro		Relleno blando		
	-	<5 mm	>5 mm	<5 mm	>5 mm	
	6	4	2	2	0	
Alteración	Inalterado	Ligeramente alterado	Moderadamente alterado	Muy alterado	Descompuesto	
	6	5	3	1	0	
1.5 PRESENCIA DE AGUA						
Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteo	Fluyendo		
15	10	7	4	0		
2. CORRECCIÓN POR ORIENTACIÓN DE DISCONTINUIDADES						
Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables		
0	-5	-25	-50	-60		

Tabla 21. Parámetros para clasificación RMR en el punto 14, elaboración propia.

1.1 RCS (kg/cm²)							
>2500	2500 - 1000	1000 - 500	500 - 250	250 - 50	50-10	<10	
15	12	7	5	2	1	0	
1.2 RQD (%)							
100 - 90	90 - 75	75 - 50	50 - 25	<25			
20	17	13	6	3			
1.3 SEPARACIÓN (m)							
>2.00	0.6 - 2.0	0.2 - 0.6	0.06 - 0.2	<0.06			
20	15	10	8	5			
1.4 ESTADO DE LAS DISCONTINUIDADES (FAMILIA PRINCIPAL)							
Longitud de la discontinuidad (m)	<1	1 a 3	3 a 10	10 a 20	>20		
	6	4	2	1	0		
Apertura (mm)	0	<0.10	0.1 a 1.0	1 a 5	>5		
	6	5	3	1	0		
Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Espejo		
	6	5	3	1	0		
Relleno	Sin relleno	Relleno duro		Relleno blando			
	-	<5 mm	>5 mm	<5 mm	>5 mm		
	6	4	2	2	0		
Alteración	Inalterado	Ligeramente alterado	Moderadamente alterado	Muy alterado	Descompuesto		
	6	5	3	1	0		
1.5 PRESENCIA DE AGUA							
Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteo	Fluyendo			
15	10	7	4	0			
2. CORRECCIÓN POR ORIENTACIÓN DE DISCONTINUIDADES							
Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables			
0	-5	-25	-50	-60			

Tabla 22. Parámetros para clasificación RMR en el punto 15, elaboración propia.

1.1 RCS (kg/cm²)						
>2500	2500 - 1000	1000 - 500	500 - 250	250 - 50	50-10	<10
15	12	7	5	2	1	0
1.2 RQD (%)						
100 - 90	90 - 75	75 - 50	50 - 25	<25		
20	17	13	6	3		
1.3 SEPARACIÓN (m)						
>2.00	0.6 - 2.0	0.2 - 0.6	0.06 - 0.2	<0.06		
20	15	10	8	5		
1.4 ESTADO DE LAS DISCONTINUIDADES (FAMILIA PRINCIPAL)						
Longitud de la discontinuidad (m)	<1	1 a 3	3 a 10	10 a 20	>20	
	6	4	2	1	0	
Apertura (mm)	0	<0.10	0.1 a 1.0	1 a 5	>5	
	6	5	3	1	0	
Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Espejo	
	6	5	3	1	0	
Relleno	Sin relleno	Relleno duro		Relleno blando		
	-	<5 mm	>5 mm	<5 mm	>5 mm	
	6	4	2	2	0	
Alteración	Inalterado	Ligeramente alterado	Moderadamente alterado	Muy alterado	Descompuesto	
	6	5	3	1	0	
1.5 PRESENCIA DE AGUA						
Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteo	Fluyendo		
15	10	7	4	0		
2. CORRECCIÓN POR ORIENTACIÓN DE DISCONTINUIDADES						
Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables		
0	-5	-25	-50	-60		

Tabla 23. Parámetros para clasificación RMR en el punto 16, elaboración propia.

1.1 RCS (kg/cm²)						
>2500	2500 - 1000	1000 - 500	500 - 250	250 - 50	50-10	<10
15	12	7	5	2	1	0
1.2 RQD (%)						
100 - 90	90 - 75	75 - 50	50 - 25	<25		
20	17	13	6	3		
1.3 SEPARACIÓN (m)						
>2.00	0.6 - 2.0	0.2 - 0.6	0.06 - 0.2	<0.06		
20	15	10	8	5		
1.4 ESTADO DE LAS DISCONTINUIDADES (FAMILIA PRINCIPAL)						
Longitud de la discontinuidad (m)	<1	1 a 3	3 a 10	10 a 20	>20	
	6	4	2	1	0	
Apertura (mm)	0	<0.10	0.1 a 1.0	1 a 5	>5	
	6	5	3	1	0	
Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Espejo	
	6	5	3	1	0	
Relleno	Sin relleno	Relleno duro		Relleno blando		
	-	<5 mm	>5 mm	<5 mm	>5 mm	
	6	4	2	2	0	
Alteración	Inalterado	Ligeramente alterado	Moderadamente alterado	Muy alterado	Descompuesto	
	6	5	3	1	0	
1.5 PRESENCIA DE AGUA						
Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteo	Fluyendo		
15	10	7	4	0		
2. CORRECCIÓN POR ORIENTACIÓN DE DISCONTINUIDADES						
Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables		
0	-5	-25	-50	-60		

Tabla 24. Parámetros para clasificación RMR en el punto 17, elaboración propia.

1.1 RCS (kg/cm²)						
>2500	2500 - 1000	1000 - 500	500 - 250	250 - 50	50-10	<10
15	12	7	5	2	1	0
1.2 RQD (%)						
100 - 90	90 - 75	75 - 50	50 - 25	<25		
20	17	13	6	3		
1.3 SEPARACIÓN (m)						
>2.00	0.6 - 2.0	0.2 - 0.6	0.06 - 0.2	<0.06		
20	15	10	8	5		
1.4 ESTADO DE LAS DISCONTINUIDADES (FAMILIA PRINCIPAL)						
Longitud de la discontinuidad (m)	<1	1 a 3	3 a 10	10 a 20	>20	
	6	4	2	1	0	
Apertura (mm)	0	<0.10	0.1 a 1.0	1 a 5	>5	
	6	5	3	1	0	
Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Espejo	
	6	5	3	1	0	
Relleno	Sin relleno	Relleno duro		Relleno blando		
	-	<5 mm	>5 mm	<5 mm	>5 mm	
	6	4	2	2	0	
Alteración	Inalterado	Ligeramente alterado	Moderadamente alterado	Muy alterado	Descompuesto	
	6	5	3	1	0	
1.5 PRESENCIA DE AGUA						
Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteo	Fluyendo		
15	10	7	4	0		
2. CORRECCIÓN POR ORIENTACIÓN DE DISCONTINUIDADES						
Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables		
0	-5	-25	-50	-60		

Tabla 25. Parámetros para clasificación RMR en el punto 18, elaboración propia.

1.1 RCS (kg/cm²)						
>2500	2500 - 1000	1000 - 500	500 - 250	250 - 50	50-10	<10
15	12	7	5	2	1	0
1.2 RQD (%)						
100 - 90	90 - 75	75 - 50	50 - 25	<25		
20	17	13	6	3		
1.3 SEPARACIÓN (m)						
>2.00	0.6 - 2.0	0.2 - 0.6	0.06 - 0.2	<0.06		
20	15	10	8	5		
1.4 ESTADO DE LAS DISCONTINUIDADES (FAMILIA PRINCIPAL)						
Longitud de la discontinuidad (m)	<1	1 a 3	3 a 10	10 a 20	>20	
	6	4	2	1	0	
Apertura (mm)	0	<0.10	0.1 a 1.0	1 a 5	>5	
	6	5	3	1	0	
Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Espejo	
	6	5	3	1	0	
Relleno	Sin relleno	Relleno duro		Relleno blando		
	-	<5 mm	>5 mm	<5 mm	>5 mm	
	6	4	2	2	0	
Alteración	Inalterado	Ligeramente alterado	Moderadamente alterado	Muy alterado	Descompuesto	
	6	5	3	1	0	
1.5 PRESENCIA DE AGUA						
Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteo	Fluyendo		
15	10	7	4	0		
2. CORRECCIÓN POR ORIENTACIÓN DE DISCONTINUIDADES						
Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables		
0	-5	-25	-50	-60		

ANEXO 3

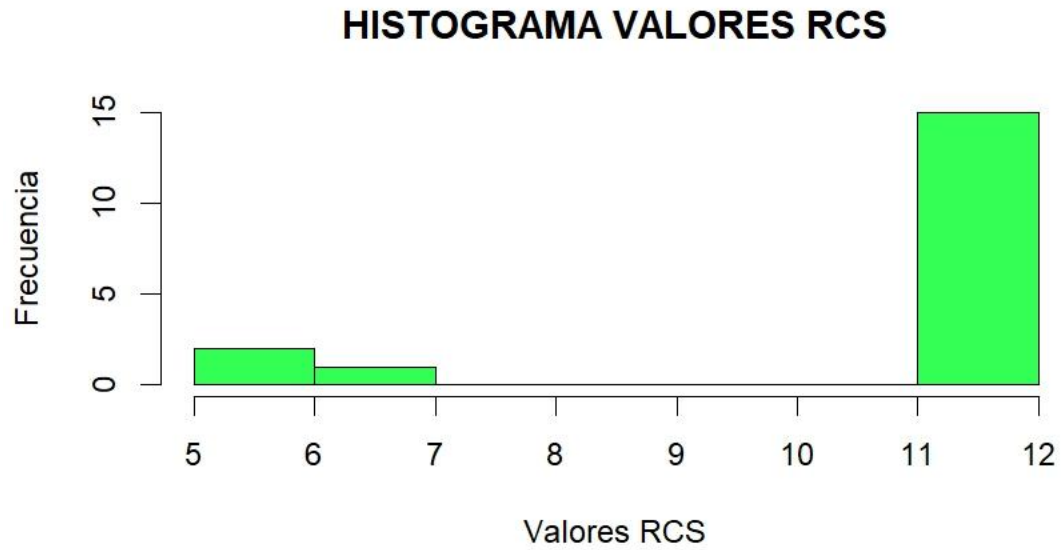


Figura 22. Histograma del parámetro resistencia de la roca (RCS), elaboración propia.

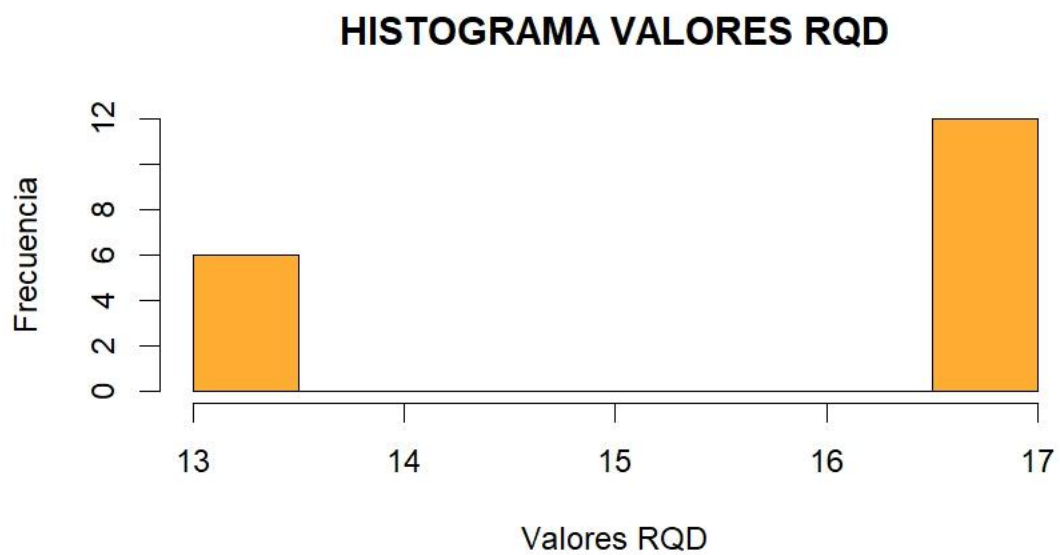


Figura 23. Histograma del parámetro RQD, elaboración propia.

HISTOGRAMA SEPARACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES

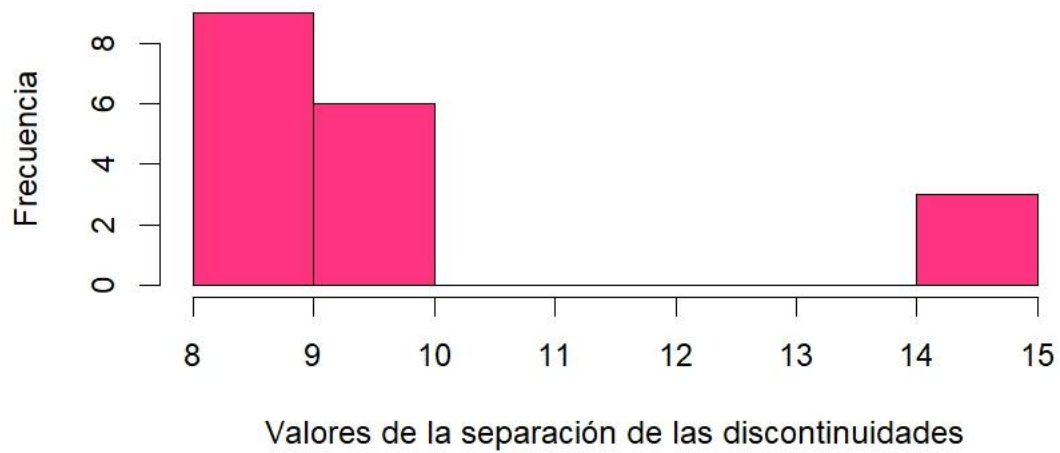


Figura 24. Histograma del parámetro separación de las discontinuidades, elaboración propia.

HISTOGRAMA CONDICIONES DE LAS DISCONTINUIDADES

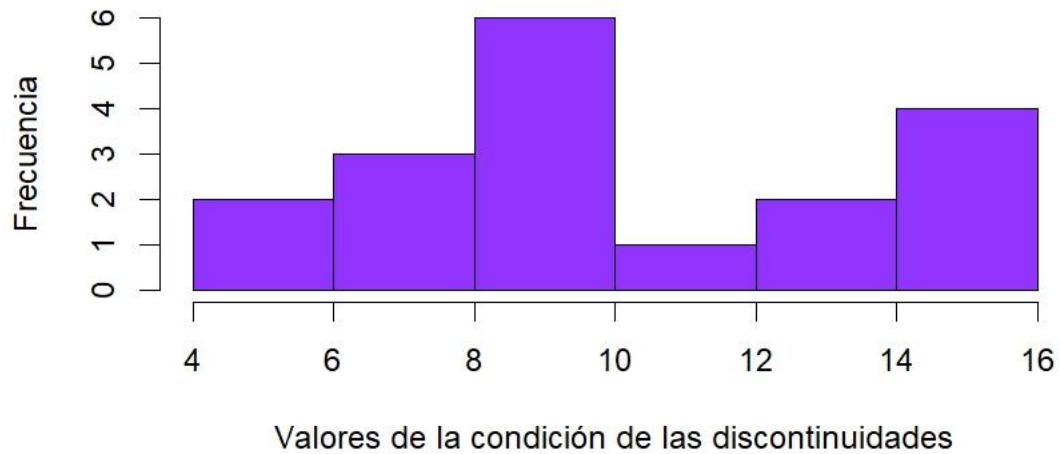


Figura 25. Histograma del parámetro condición de las discontinuidades, elaboración propia.



Figura 26. Histograma del parámetro presencia de agua, elaboración propia.