

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA



ANÁLISIS DE RIESGOS GEOLÓGICOS Y ESTABILIDAD DE TALUDES
SOBRE EL TRAZO PROYECTADO DE LA AUTOPISTA INTERSERRANA
ENTRE ITURBIDE Y GALEANA, N.L.

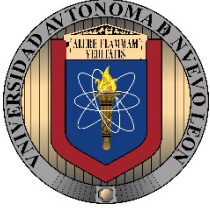
TESIS

SE PRESENTA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL
GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS GEOLÓGICAS

PRESENTA:

JOSÉ OLEGARIO RODRÍGUEZ GÓMEZ

LINARES, NUEVO LEÓN, AGOSTO DE 2026



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA



LA TESIS:

ANÁLISIS DE RIESGOS GEOLÓGICOS Y ESTABILIDAD DE TALUDES
SOBRE EL TRAZO PROYECTADO DE LA AUTOPISTA INTERSERRANA
ENTRE ITURBIDE Y GALEANA, N.L.

ELABORADA POR:

JOSÉ OLEGARIO RODRÍGUEZ GÓMEZ

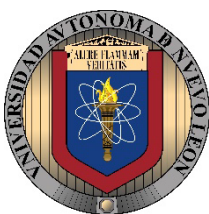
SE PRESENTA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS GEOLÓGICAS

Vo. Bo. DIRECTOR DE TESIS


DR. JOSÉ ROSBEL CHAPA GUERRERO

LINARES, NUEVO LEÓN, AGOSTO DE 2026



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA



LA TESIS:

ANÁLISIS DE RIESGOS GEOLÓGICOS Y ESTABILIDAD DE TALUDES
SOBRE EL TRAZO PROYECTADO DE LA AUTOPISTA INTERSERRANA
ENTRE ITURBIDE Y GALEANA, N.L.

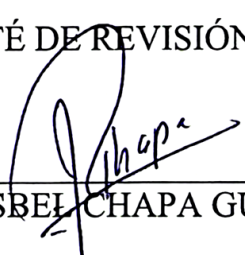
ELABORADA POR:

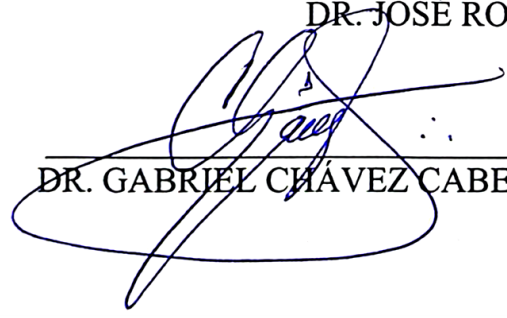
JOSÉ OLEGARIO RODRÍGUEZ GÓMEZ

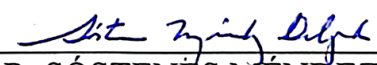
SE PRESENTA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS GEOLÓGICAS

Vo. Bo. COMITÉ DE REVISIÓN DE TESIS


DR. JOSÉ ROSBEL CHAPA GUERRERO


DR. GABRIEL CHÁVEZ CABELLO


DR. SÓSTENES MÉNDEZ DELGADO

LINARES, NUEVO LEÓN, AGOSTO DE 2026

"La verdadera gloria no reside en la ausencia de tropiezos, si no en la capacidad de levantarse después de cada caída. es en esos momentos donde la perseverancia fortalece el carácter, los sueños encuentran su rumbo y la determinación se convierte en el camino hacia el éxito."

Ing. José Olegario Rodríguez Gómez

AGRADECIMIENTOS

Agradecido infinitamente con Jehová Dios por su guía y dirección inmerecida.

Agradecido con La Facultad de Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de Nuevo León quien por más de 9 años me ha dado un lugar para formarme como persona y como trabajador, así como también me ha dado la posibilidad de conocer personas increíbles que han aportado en una forma positiva herramientas que ahora me ayudan a concluir este proyecto de investigación.

Le agradezco a la **Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI)**, por el apoyo económico otorgado mediante la Beca Nacional para Estudios de Posgrado, que hizo posible mi permanencia y formación durante el programa de posgrado, así como el desarrollo y culminación de la presente investigación.

Le agradezco al M.C Ángel García Peña, director en el período 2022-2025 de la Facultad de Ciencias de la Tierra de la UANL, quien desinteresadamente me dio la oportunidad de seguir con mis estudios de posgrado.

Agradecerle a mi asesor, maestro y amigo Dr. José Rosbel Chapa Guerrero quien confió en mi para llevar a cabo este proyecto de tesis.

Al Dr. Gabriel Chávez Cabello quien ha sido una persona clave en mi desarrollo profesional y académico.

A mis ex –compañeros de carrera y compañeros de trabajo en el área de laboratorio de preparación por su ayuda, comprensión e influencia en mi desarrollo laboral: Gustavo González Avendaño, Victoriano Beraza Cardona y Julio Alberto Treviño Rodríguez.

También quiero agradecer a todos mis maestros quienes forman parte importante de la riqueza en conocimientos que he alcanzado en esta etapa de mi formación profesional.

Tengo que agradecer a mi familia y amigos quienes siempre muestran un afecto y un apoyo, pero sobre todo una motivación positiva que me ayuda a cumplir mis propósitos.

DEDICATORIA

Primeramente, y siempre de esta manera, dedico este trabajo a **Jehová Dios**, por concederme la vida, la salud y la fortaleza necesarias para llegar a este momento tan importante, culminando una etapa más de mi formación académica y personal.

A mis padres, **Daudegario Rodríguez González y María Eugenia Gómez Garza**, por creer siempre en mí y no perder jamás la fe en mi capacidad de superación. Gracias por su apoyo constante, sus consejos, su esfuerzo incondicional y por brindarme, en todo momento, su amor y respaldo, tanto moral como económico, los cuales han sido fundamentales para alcanzar este logro.

A mis hermanos, **Violeta Alexandra Rodríguez Gómez y familia**, y **Edgar Jaaziel Rodríguez Gómez y familia**, quienes, al igual que mis padres, son un motor de motivación constante para superarme tanto en el ámbito profesional como en el personal.

De manera muy especial, dedico este trabajo a **Julia Dalinda Cuellar Hernández**, por su amor, comprensión y paciencia durante esta etapa de mi vida; quien de manera incondicional ha sido una fuente invaluable de apoyo y una motivación extra para seguir adelante.

RESUMEN

El presente estudio aborda la problemática geológica y geotécnica asociada a la construcción de la Autopista Interserrana, la cual conectará la carretera federal núm. 57 con la núm. 85. La autopista tendrá una longitud total de 81 km, de los cuales 32 km atravesarán una zona serrana a lo largo del cañón El Alamar, por donde fluye el río Potosí o Cabezones, que delimita los municipios de Iturbide, Linares y Montemorelos, en el estado de Nuevo León.

El trazo cruza el frente tectónico de la Sierra Madre Oriental, caracterizado por la presencia de pliegues y fallas geológicas de gran importancia, desarrolladas en rocas sedimentarias marinas de edad Jurásica y Cretácica, principalmente calizas, lutitas, areniscas y yesos. En este contexto, se analizaron los movimientos en masa naturales y antropogénicos potencialmente más destructivos, los cuales podrían impactar de manera significativa tanto al entorno social como a la obra civil proyectada. De no implementarse medidas preventivas adecuadas, dichos procesos podrían ocasionar pérdidas económicas millonarias, comprometer la seguridad vial y, en escenarios extremos, poner en riesgo vidas humanas.

Para el análisis integral del área de estudio se elaboraron cuatro cartas temáticas: carta geológica, carta de zonas homogéneas, carta de pendientes y mapa de riesgos. De manera complementaria, se llevó a cabo un análisis de estabilidad de taludes naturales, cuyos resultados indican que una proporción significativa de las laderas presenta condiciones de metaestabilidad, es decir, factores de seguridad cercanos al equilibrio, pero inferiores a los valores recomendados para este tipo de obras de infraestructura vial.

Se destaca que más del 90 % de los eventos destructivos asociados a movimientos en masa pueden prevenirse mediante la aplicación de análisis cualitativos (geomecánicos) y cuantitativos (geotécnicos). Estos estudios permiten obtener parámetros fundamentales como RMR (Rock Mass Rating), SMR (Slope Mass Rating) y RQD (Rock Quality Designation), los cuales son esenciales para predecir condiciones potenciales de inestabilidad y anticipar la necesidad de infraestructura de control y mitigación de estos fenómenos.

El objetivo principal del presente estudio fue caracterizar litológica y estructuralmente el macizo rocoso, con la finalidad de definir zonas de riesgo geológico potencial que pudieran afectar el futuro tramo carretero de la Autopista Interserrana entre Iturbide y Galeana, Nuevo León.

ABSTRACT

The present study addresses the geological and geotechnical issues associated with the construction of the Interserrana Highway, which will connect Federal Highway No. 57 with Federal Highway No. 85. The highway will have a total length of 81 km, of which 32 km will cross mountainous terrain along the El Alamar Canyon, through which the Potosí or Cabezones River flows, forming the boundary between the municipalities of Iturbide, Linares, and Montemorelos, in the state of Nuevo León.

The alignment crosses the tectonic front of the Sierra Madre Oriental, which is characterized by the presence of major folds and geological faults developed in Jurassic and Cretaceous marine sedimentary rocks, mainly limestones, shales, sandstones, and gypsum. In this geological setting, the most potentially destructive natural and anthropogenic mass movement processes were analyzed, as these could significantly impact both the surrounding social environment and the planned civil works. If adequate preventive measures are not implemented, these processes could result in substantial economic losses, compromise road safety, and, in extreme scenarios, pose a risk to human lives.

For the comprehensive analysis of the study area, four thematic maps were prepared: a geological map, a homogeneous zones map, a slope map, and a hazard map. Additionally, a stability analysis of natural slopes was carried out, the results of which indicate that a significant proportion of the hillslopes exhibit metastable conditions, that is, safety factors close to equilibrium but below the recommended values for this type of highway infrastructure.

It is emphasized that more than 90% of destructive events associated with mass movements can be prevented through the application of qualitative (geomechanical) and quantitative (geotechnical) analyses. These studies allow the determination of fundamental parameters such as RMR (Rock Mass Rating), SMR (Slope Mass Rating), and RQD (Rock Quality Designation), which are essential for predicting potential instability conditions and anticipating the need for control and mitigation infrastructure.

The main objective of this study was to lithologically and structurally characterize the rock mass in order to define potential geological hazard zones that could affect the future highway segment of the Interserrana Highway between Iturbide and Galeana, Nuevo León.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1- GENERALIDADES	15
1.1 JUSTIFICACIÓN.....	16
1.2 BENEFICIOS.....	18
1.3 HIPÓTESIS.....	18
1.4 METODOLOGÍA	18
1.5 ETAPAS METODOLÓGICAS DE LA TESIS	19
1.6 LOCALIZACIÓN	20
CAPÍTULO 2 – GEOLOGÍA REGIONAL Y LOCAL	21
2.1 GEOLOGÍA REGIONAL.....	21
2.1.1 EVOLUCIÓN TECTÓNICA DEL NE DE MÉXICO	21
2.1.2 SIERRA MADRE ORIENTAL	25
2.1.3 OROGENIAS SEVIER Y LARÁMIDE	27
2.2 GEOLOGÍA LOCAL.....	29
2.2.1 ESTRATIGRAFÍA DEL ÁREA.....	29
CAPÍTULO 3 – GEOLOGÍA APLICADA.....	44
3.1 TEORÍA SOBRE GEOLOGÍA APLICADA.....	44
3.2 CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA.....	46
3.3 CLASIFICACIÓN RMR (ROCK MASS RATING).....	46
3.4 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAxIAL DE LA ROCA	47
3.5 RQD (ROCK QUALITY DESIGNATION).....	48
3.6 CONDICIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES.....	50
3.7 LONGITUD DE LAS DIACLASAS	50
3.8 ABERTURA DE LAS DISCONTINUIDADES	51
3.9 RUGOSIDAD DE LAS DISCONTINUIDADES	52
3.10 RELLENO DE LAS DISCONTINUIDADES.....	52
3.11 ALTERACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES	53
3.12 CONDICIONES HIDROGEOLÓGICAS.....	53
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS.....	55
4.1 CLASIFICACIÓN RMR PARA LA DETERMINACIÓN DE ZONAS HOMOGÉNEAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO	55
4.1.1 FORMACIÓN TAMAULIPAS INFERIOR.....	56
4.1.2 FORMACIÓN TAMAULIPAS SUPERIOR.....	56
4.1.3 FORMACIÓN CUESTA DEL CURA.....	58
4.1.4 FORMACIÓN AGUA NUEVA	58
4.1.5 FORMACIÓN SAN FELIPE.....	60
4.1.6 FORMACIÓN MÉNDEZ	60
4.2 CLASIFICACIÓN DE ZONAS HOMOGÉNEAS	62
4.3 CLASIFICACIÓN DE ZONAS HOMOGÉNEAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO.....	63
4.3.1 ZONA HOMOGÉNEA 1 (ZH I): ROCA CALIZA.....	63
4.3.2 ZONA HOMOGÉNEA 2 (ZH II): ROCA CALIZA – ARCILLOSA	65
4.3.3 ZONA HOMOGÉNEA 3 (ZH III): ROCAS ARCILLOSAS	65
4.3.4 ZONA HOMOGÉNEA 4 (ZH IV): ROCA ARCILLOSA	65
4.3.5 ZONA HOMOGÉNEA 5 (ZH V): ROCA CALIZA – ARCILLOSA	65
4.3.6 ZONA HOMOGÉNEA 6 (ZH VI): ROCA CALIZA	66
4.3.7 ZONA HOMOGÉNEA 7 (ZH VII): SUELOS	66
4.4 CLASIFICACIÓN DE ZONAS MORFOLÓGICAS	66
4.5 ANÁLISIS CINEMÁTICO Y DETERMINACIÓN DE FACTOR DE SEGURIDAD (FS).....	67
4.6 CONO DE FRICCIÓN.....	68

4.7	MECANISMOS DE INESTABILIDAD EN TALUDES Y LADERAS.....	69
4.7.1	DESPRENDIMIENTO	69
4.7.2	DESLIZAMIENTO PLANAR (TRASLACIONAL).....	70
4.7.3	DESLIZAMIENTO EN CUÑA	70
4.7.4	VUELCO (VOLCAMIENTO).....	71
4.7.5	DESLIZAMIENTO ROTACIONAL.....	72
4.7.6	FLUJOS.....	72
4.7.7	DESLIZAMIENTOS COMPUESTOS	73
4.8	ANÁLISIS DE TALUDES EN EL ÁREA DE ESTUDIO	73
4.9	CARACTERIZACIÓN DE FRACTURAS	74
4.10	ANÁLISIS CINEMÁTICO DE UN TALUD.	77
4.11	FACTOR DE SEGURIDAD.....	80
4.12	COEFICIENTE DE SEGURIDAD POR RUPTURA PLANAR	82
4.13	FACTOR DE SEGURIDAD MEDIANTE EL MÉTODO DE DOVELAS	86
4.14	MÉTODO APLICADO.....	87
4.15	APLICACIÓN DE GEOSTUDIO.....	90
	CAPÍTULO 5 – DICUSIÓN.....	93
5.1	INTRODUCCIÓN	93
5.2	ZONAS DE RIESGOS GEOLÓGICOS	94
5.2.1	ZRG 1: CALIZAS CON PENDIENTE >15°, ESTRATIFICACIÓN NO INVERTIDA ..	94
5.2.2	ZRG 2: CARBONATOS-ARCILLAS CON PENDIENTE >15°, ESTRATIFICACIÓN NO INVERTIDA	95
5.2.3	ZRG 3: ARCILLAS CON PENDIENTE >15°, ESTRATIFICACIÓN NO INVERTIDA	96
5.2.4	ZRG 4, 5 y 6: ARCILLAS, CARBONATOS- ARCILLAS, CARBONATOS CON PENDIENTE >15°, ESTRATIFICACIÓN INVERTIDA	97
5.2.5	ZRG 7: SUELOS TERCIARIOS CON PENDIENTE < 5°	98
5.2.6	ZRG 8: ARCILLAS CON UNA PENDIENTE ENTRE 5°-15°, ESTRATIFICACIÓN INVERTIDA.....	98
5.2.7	ZRG 9: CALIZA INTERCALADA CON ARCILLA, CON UNA PENDIENTE ENTRE 5°-15° ESTRATIFICACIÓN INVERTIDA.	99
5.2.8	ZRG 10: ARCILLAS, CON PENDIENTE DE ENTRE 5°-15°, ESTRATIFICACIÓN NO INVERTIDA.....	100
5.2.9	ZRG 11: CALIZA INTERCALADA CON ARCILLA QUE PRESENTA PENDIENTES ENTRE 5°-15°, ESTRATIFICACIÓN NO INVERTIDA.	101
5.2.10	ZRG: RÍOS Y ARROYOS.....	101
	CAPÍTULO 6 – CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	104
6.1	ZONIFICACIÓN DE RIESGOS	104
6.2	ESTABILIDAD DEL TALUD – MÉTODO DE FELLENIOUS.....	104
6.2.1	MEDIDAS RECOMENDADAS	105
6.2.2	RESULTADOS ADICIONALES DEL MODELADO.....	105
6.3	CONCLUSIÓN	105
6.4	TRABAJO A FUTURO	106
	BIBLIOGRAFÍA	107
	ANEXOS	114
8.1	ANEXO I – MAPA GEOLÓGICO	115
8.2	ANEXO II – MAPA DE ZONAS HOMOGÉNEAS	116
8.3	ANEXO III – MAPA GEOMORFOLÓGICO.....	117
8.4	ANEXO IV – RESULTADOS DE ENE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES MEDIANTE EL MÉTODO DE FELLENIOUS IMPLEMENTANDO GEOSTUDIO.	118
8.5	ANEXO V – CARTA DE RIESGOS GEOLÓGICOS	126

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1; - Mapa conceptual que resume la interacción entre la Geología aplicada y la ingeniería Civil.	15
Figura 1.2 ; - Trazo de las carreteras que conectan el sur del estado de Nuevo León con el norte del país. Trazo amarillo corresponde a la carretera N°57 que conecta con la carretera N°40. Trazo verde corresponde a la carretera Interserrana. Trazo rojo corresponde a la carretera N°58 que conecta con la carretera N°85 a la altura de Linares. El trazado de estas vías de comunicación terrestres es tomando en cuenta que el tráfico pesado tiene como objetivo llegar hasta la frontera norte por las zonas de más libre acceso usando el libramiento perimetral de Monterrey.	17
Figura 1.3; -Diagrama de flujo que muestra la metodología del actual proyecto de tesis.....	19
Figura 1.4; -Localización del área de estudio, imagen satelital, con la referencia del contorno del estado de Nuevo León. La curva roja segmentada muestra el trazo de la carretera Interserrana.	20
Figura 2.1; - Modelo de la evolución tectónica para las provincias del pacífico occidental de México y Oriente del Golfo de México. Tomado de Goldhammer (1999, sin escala).	23
Figura 2.2; - Sección estructural basada en Chávez-Cabello (no publicado) y en observaciones realizadas por Jones et al. (1995).....	26
Figura 2.3; - Mapa estructural de la Saliente de Monterrey de Padilla y Sánchez (1985). Abreviaciones: MY: Monterrey, S: Saltillo, A: Allende, SA: San Antonio de las Alazanas, MS: Montemorelos, L: Linares, G: Galeana, EC: El Carmen, LV: La Ventura, CO: Concepción del Oro y ES: El Salvador. El recuadro de la parte derecha enmarca el área de estudio. Flechas grises menores indican transporte tectónico local y flecha blanca mayor indica transporte tectónico regional. Tomado de Chávez-Cabello et al. (2011).....	27
Figura 2.4; - Extensión del cinturón cabalgado cordillerano (Sevier), del cinturón de pliegues y cabalgaduras mexicano (Sierra Madre Oriental) y la provincia Larámide dentro de la Cordillera de Norteamérica; figura integrada de diferentes trabajos; DeCelles, 2004; Fitz Díaz et al., 2011; Ferrari et al., 2012; Bryan et al., 2013).	28
Figura 2.5; -. Mapa tectónico del noreste del Pacífico entre 74 y 64 Ma. Las flechas indican el movimiento relativo de las placas Farallón y la placa Kula (modificado de Bunge & Grand, 2000; de Valencia-Moreno & Ortega-Rivera, 2011).....	29
Figura 2.6; -Columna estratigráfica representativa del área de estudio, mostrando las unidades litológicas y su distribución temporal desde el Jurásico Superior hasta el Cuaternario.....	30
Figura 2.7; -Horizontes de margá y lutita bituminosa intercaladas de la Formación la Casita con fracturas por tensión rellenas de calcita, formando estructuras tipo pinch-out, desarrolladas en el flanco NE invertido del anticlinal de Potrero Prieto, expuesto sobre.....	32
Figura 2.8; - Afloramiento de la Formación Taraises. Aquí se aprecian de manera contrastante las areniscas contenidas en esta unidad, en contacto invertido con los estratos de caliza arcillosa intercalada con lutita bituminosa de la Formación La Casita.....	33
Figura 2.9; - Estratos masivos de Mudstone y Wackstone de la Formación Tamaulipas Inferior cerca del Ejido Brownsville, Galeana, N.L. (Coordenadas UTM: 14 R 394416, 2742840).....	35
Figura 2.10; - Afloramiento de Formación la Peña en el que se aprecian calizas arcillosas con un color al intemperismo ocre-amarillento, las capas tienen espesores en promedio de 15 a 30 cm., (Coordenadas UTM: 14 R 401391, 2751700).	36
Figura 2.11; - Afloramiento de la Formación Tamaulipas Superior, horizonte de aproximadamente 60 cm de espesor con múltiples vetillas de calcita y nódulos de pedernal, (Coordenadas UTM: 14 R 394075, 2742973).....	37

Figura 2.12; - Afloramiento de la Formación Cuesta del Cura que exhibe pliegues apretados con plano axial vergente al noreste y eje de pliegue con inmersión al sureste, (Coordenadas UTM: 14 R40092, 275100).	39
Figura 2.13; - Afloramiento de la formación Agua Nueva expuesto en corte carretero, (Coordenadas UTM: 14R 401929, 275127).	40
Figura 2.14; - Afloramiento de la formación San Felipe, estratos con espesores de 30 cm de caliza intercalados con horizontes verdes de bentonita, (Coordenadas UTM: 14R 395921, 2741324).	41
Figura 2.15; - Afloramiento de la Formación Méndez con las características lutitas masivas donde con casi imperceptibles los planos de estratificación. En este afloramiento se denota muy bien que en los horizontes de lutita la foliación está bien desarrollada (Coordenadas UTM: 14R 396091, 2741641).	43
Figura 3.1; - Martillo de Schmidt o Esclerómetro.	48
Figur 3.2; - Gráfico de Miller para la determinación de la resistencia a la compresión simple.	49
Figura 4.1; - Mapa de localización de las distintas estaciones en las que se estuvieron recabando los datos necesarios para la clasificación RMR, estrellas rojas corresponden a las estaciones donde las rocas son arcillosas, estrellas verdes son las estaciones donde se recabaron datos de roca caliza- arcillosa, estrellas azules son las estaciones que se tomaron en roca caliza.	55
Figura 4.2; - a) Afloramiento de la Formación Tamaulipas Inferior; b) Calizas de la Formación Tamaulipas Superior con estructuras de karren y, c) afloramiento en la Formación Cuesta del Cura, calizas estratificadas con alternancias de bandas de pedernal.	57
Figura 4.3; - a) Afloramiento de la Formación Agua Nueva donde se aprecia la intercalación de los horizontes de margas y los horizontes arcillosos; b) Afloramiento de la Formación San Felipe con horizontes de caliza silicificada, arenisca de grano fino, limolitas y lutitas con un alto grado de meteorización.	59
Figura 4.4; - Afloramiento de lutitas masivas alteradas de la Formación Méndez.	61
Figura 4.5; - Sección geológica correspondiente al mapa de Zonas Homogéneas, con la relación estructural.	64
Figura 4.6; - Se muestra la proyección estereográfica del cono de fricción: la intersección del cono con el hemisferio delimita el ángulo de fricción ϕ . El punto B, cuya proyección queda dentro de dicho círculo, presenta una inclinación menor que ϕ y, por tanto, permanece cinemáticamente estable. En contraste, el punto A, más inclinado, proyecta fuera del círculo de fricción y genera condiciones de inestabilidad (modificado de Armas-Zagoya, 2004).	69
Figura 4.7; - Representación esquemática del proceso cinemático asociado a un desprendimiento, donde bloques individuales se separan y caen libremente desde una pendiente empinada.	70
Figura 4.8; - Ilustración conceptual que muestra el comportamiento cinemático característico de un deslizamiento planar, con desplazamiento del material a lo largo de una superficie de debilidad inclinada.	70
Figura 4.9; - Esquema explicativo que representa la interacción estructural que origina un deslizamiento en cuña, producto de la intersección de dos planos de discontinuidad.	71
Figura 4.10; - Modelo esquemático que describe el mecanismo de inestabilidad por vuelco, en el que bloques rotan hacia adelante a partir de una base fija por efecto de la gravedad.	71
Figura 4.11; - Diagrama simplificado que ejemplifica el desplazamiento de una masa en un deslizamiento rotacional, siguiendo una superficie de ruptura curva típica de materiales cohesivos.	72

Figura 4.12; - Modelo esquemático que representa la dinámica de un flujo, en el cual el material saturado se moviliza con comportamiento viscoso, generando un desplazamiento caótico y continuo a lo largo de la pendiente.....	73
Figura 4.13; - Talud de análisis, las líneas proyectan la dirección relativa de buzamiento de la estratificación.	74
Figura 4.14; -Fracturas asociadas con pliegues. La proyección estereográfica muestra las orientaciones del sistema de coordenadas (a, b y c), el círculo máximo punteado de la red representa el rumbo y buzamiento de la estratificación en las zonas donde la capa no es horizontal. Las fracturas de extensión y de cizalla se representan por los círculos máximos sólidos; A: ac y $0kl > a$, B: bc y $hk0 > b$, C: $h0l > a$, D: bc y $hk0 > a$, E: $h0l > c$ (Twiss & Moores, 1992).....	75
Figura 4.15;- Representación de los datos estructurales obtenidos en campo en proyección estereográfica tanto de estratificación como familias de juntas.	76
Figura 4.16; - “Test de Markland” para diagnosticar fallas cinemáticas en taludes rocosos (Makland, J.T 1972).	78
Figura 4.17; - Proyección estereográfica del análisis cinemático del talud $180^\circ/40^\circ$, donde se muestran las familias de discontinuidades J1, J2, J3 y SS, así como las zonas críticas asociadas a posibles mecanismos de falla en función del ángulo de fricción interna ($\phi = 15^\circ$).	79
Figura 4.18; - Afloramiento en talud donde muestra la relación de las principales discontinuidades.	80
Figura 4.19; - a) Peso de la muestra en una balanza de precisión, b) llenado de la probeta previamente la inserción de las muestras, c) y d) relación del aumento de volumen posterior a la inmersión de la muestra en el agua.....	
Figura 4.20; - Simulación de 405 superficies potenciales de falla rotacional empleadas para evaluar la estabilidad del talud mediante el análisis del factor de seguridad. Las trayectorias representadas en color rojo corresponden a las superficies de falla con menor factor de seguridad, indicando condiciones de mayor inestabilidad y probabilidad de deslizamiento. Los tonos amarillos representan condiciones intermedias de estabilidad, mientras que las trayectorias en color verde y azul indican superficies con factores de seguridad más altos, asociadas a condiciones relativamente estables del talud. La distribución de las superficies de falla permite identificar las zonas críticas y el comportamiento geomecánico del macizo ante posibles mecanismos de falla rotacional.	92
Figura 5.1; -Relación entre el ángulo de inclinación de las márgenes de un cauce y el nivel de vulnerabilidad asociado a procesos de socavación e inestabilidad de taludes. Pendientes cercanas a 45° indican condiciones de alto riesgo, mientras que pendientes menores a 33° representan zonas relativamente estables y de menor susceptibilidad geomorfológica.	103

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1; -Índice de calidad de la roca (Tomado de González de Vallejo et al., 2002).....	49
Tabla 3.2.; - Valores para la clasificación de la separación de las diaclasas (Tomado de González de Vallejo et al., 2002).	51
Tabla 3.3; - Clasificación de la apertura de las diaclasas (Tomado de González de Vallejo et al., 2002).....	51
Tabla 3.4; - Clasificación de la rugosidad en las diaclasas (Tomado de González de Vallejo et al., 2002).....	52
Tabla 3.5; - Clasificación para el tipo de relleno presente en las diaclasas (Tomado de González de Vallejo et al., 2002).	52
Tabla 3.6; - Clasificación de las diaclasas según su grado de alteración (Tomado de González de Vallejo et al., 2002).	53
Tabla 3.7; - Valores de la clasificación del macizo rocoso según las condiciones hidrogeológicas (Tomado de González de Vallejo et al., 2002).	54
Tabla 3.8; - Clasificación de los valores de RMR y valores de cohesión y ángulo de rozamiento (González de Vallejo et al., 2002).	54
Tabla 4.1; - Clasificación RMR (Formación Tamaulipas Inferior).....	56
Tabla 4.2; - Clasificación RMR para la Formación Tamaulipas Superior en el área de estudio.	57
Tabla 4.3; - Clasificación RMR de la Formación Cuesta del Cura en el área de estudio.	58
Tabla 4.4; - Clasificación RMR de la Formación Agua Nueva en el área de estudio.....	59
Tabla 4.5; - Clasificación RMR para la Formación San Felipe en el área de estudio.....	60
Tabla 4.6; - Clasificación RMR para la Formación Méndez en el área de estudio.	61
Tabla 4.7; - Clasificación de las pendientes según su grado de inclinación (Chapa Guerrero, 1993).....	67
Tabla 4.8; - Mecanismos de inestabilidad cinemática (Makland, J.T 1972).	77
Tabla 4.9; - Datos de talud para su análisis.	84
Tabla 4.10; - Cálculos para obtener A, U, V, W, utilizando el peso específico de 28.81 kN/m ³	85
Tabla 4.11; - Símbolos y parámetros empleados en el cálculo del factor de seguridad.....	87
Tabla 4.12; - Parámetros geotécnicos de resistencia (γ -c- ϕ) empleados en el análisis de estabilidad.....	88
Tabla 4.13; - Método de dovelas programado en Excel.....	89
Tabla 4.14; - Relación entre equilibrio límite del momento resistente y momento actuante.	90

CAPÍTULO 1- GENERALIDADES

INTRODUCCIÓN

Por muchos años la ingeniería geológica ha sido aplicada al estudio y solución de los grandes problemas de la ingeniería civil, así como también en el desarrollo de obras extractivas de la industria minera (Figura 1.1). La finalidad de la ingeniería geológica es que las obras de ingeniería sean óptimas y contemplen la mayoría de los factores que pueden ser detonantes de peligros como pérdidas económicas o riesgos asociados a la integridad de las personas que interactúan en el espacio tiempo de cualquier operación u obra de ingeniería.

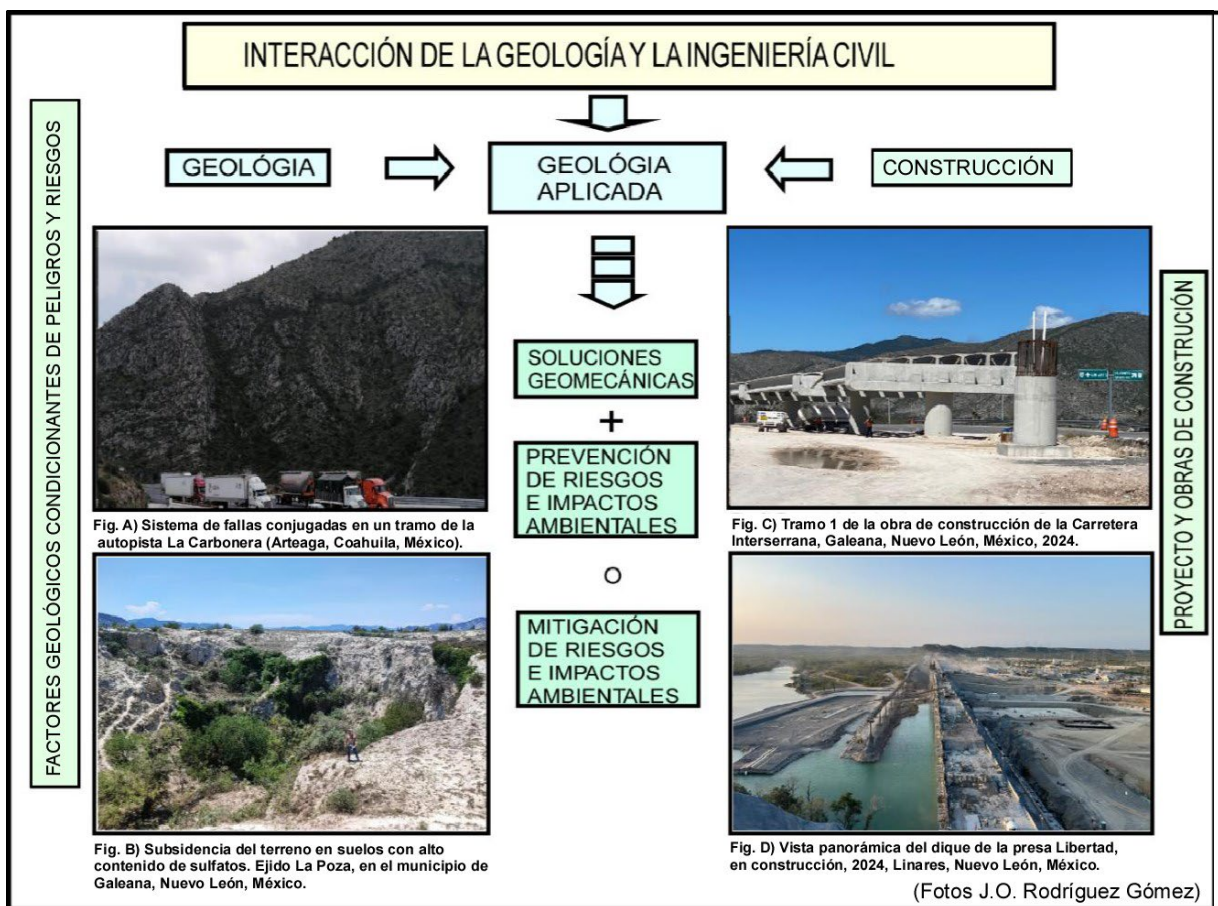


Figura 1.1; - Mapa conceptual que resume la interacción entre la Geología aplicada y la ingeniería Civil.

1.1 JUSTIFICACIÓN

La presente tesis se realizó en un sector del trazo del proyecto de la Autopista Interserrana, propuesta en el estado de Nuevo León y que consiste en la construcción de una carretera tipo A4. Este tipo de obra civil consiste en una autopista de 4 carriles de acuerdo con la normativa vigente de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). Dichos carriles tienen una dimensión a lo ancho de 3.5 m cada uno y son 2 por cada sentido. También cuentan con un acotamiento de 2.5 m y una separación entre sentidos de 1 m, alcanzando una longitud total de 81.459 km, para conectar las carreteras MEX-85 Monterrey - Ciudad Victoria y la carretera MEX-57 Matehuala – Entronque Puerto México. Este proyecto está constituido por tres segmentos de obra los cuales se han planificado de la siguiente manera:

Segmento1

A lo largo de 15 km, este tramo inicia en la Carretera Nacional No. 85 a la altura de la comunidad Alto del Coyote, prolongándose hasta el umbral de la zona serrana en el Ejido Loma Alta. El proyecto contempla una autopista tipo A4, un tramo compartido con la Carretera Federal 85, nueve pasos elevados y diversas obras de drenaje e hidráulica.

Segmento2

Con 38 km de recorrido, cruza la Sierra Madre Oriental entre los Ejidos Loma Alta, Potrero Prieto y termina en la comunidad de Puerto Pastores. El plan incorpora 43 viaductos, seis túneles, cuatro rampas de frenado y áreas de descanso turístico. Actualmente se desarrolla la fase de ingeniería ejecutiva.

Segmento3

Comprende entre el entronque de la carretera federal No. 57 y la estatal No. 58 en San Roberto, hasta el Ejido Puerto Pastores, muy cerca de la cabecera municipal de Galeana. Este segmento se extiende por 18 km divididos en los subtramos 3A y 3B. El 3A ya fue puesto en servicio; el 3B de 16 km incluirá un puente de 400 m sobre el río y 25 obras para el manejo de aguas pluviales.

Con esta obra civil se pretende evitar el tránsito vehicular por la carretera federal N°58 tipo D (Linares-Iturbide) la cual, por muchos años, ha sido lugar de numerosos accidentes ocasionados por movimientos de laderas, resultando en pérdidas, tanto materiales como de vidas humanas. Esta carretera tiene una longitud de 98 km partiendo de la carretera federal N°57 hasta

la ciudad de Linares, donde conecta con la carretera federal México N°85 en Linares N.L (Figura 1.2).

Por otro lado, esta autopista evitará que el tráfico a la ciudad de Monterrey y Nuevo Laredo, Tamaulipas, a través de la carretera N°57, la cual tiene una longitud de 200 km aprox. desde el entronque San Roberto hasta la ciudad de Monterrey N.L. (Figura 1.2), reduzca el tiempo de traslado y riesgos inherentes a zonas de carreteras con alta sinuosidad sobre la carretera federal No. 57.

El proyecto de la carretera interserrana parte de la carretera federal N° 58 con la ampliación del tramo que conecta desde la carretera N° 57 hasta la comunidad de Puerto Pastores, en donde inicia la obra de puentes y túneles que atraviesan la sierra de manera perpendicular por un tramo de 38 km de largo hasta intersectar la carretera federal No. 85 que conecta la ciudad de Monterrey con el puerto de Altamira, Tamaulipas (Figura 1.2).

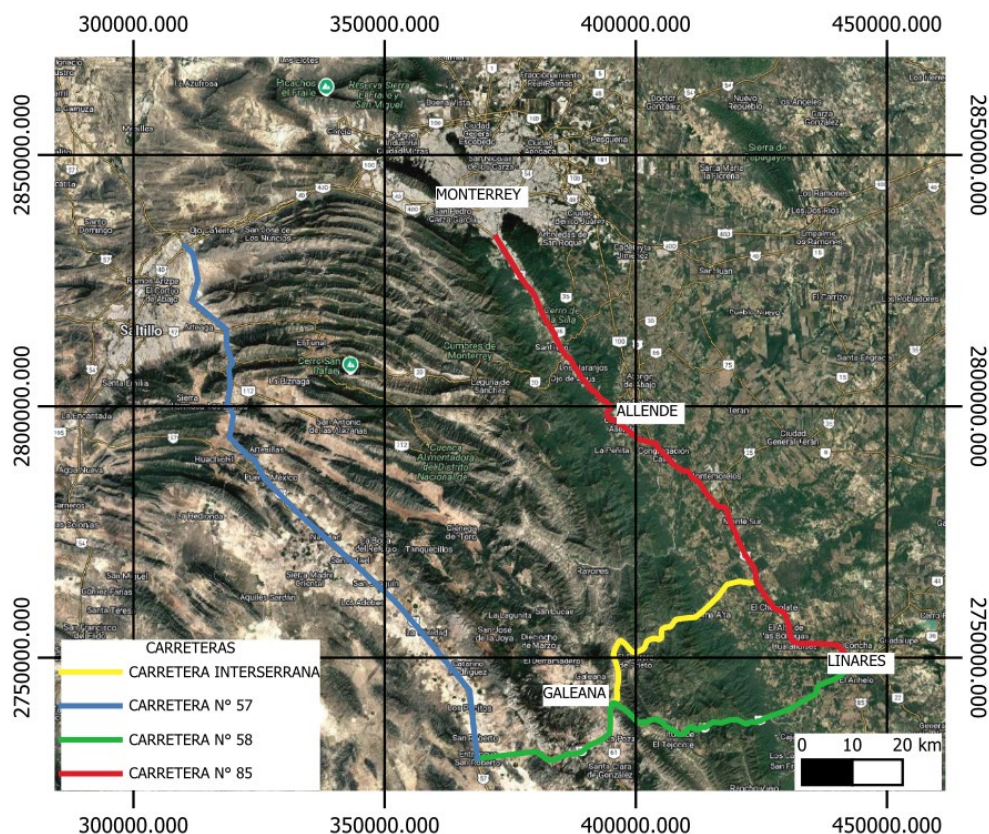


Figura 1.2 ; - Trazo de las carreteras que conectan el sur del estado de Nuevo León con el norte del país. Trazo amarillo corresponde a la carretera N°57 que conecta con la carretera N°40. Trazo verde corresponde a la carretera Interserrana. Trazo rojo corresponde a la carretera N°58 que conecta con la carretera N°85 a la altura de Linares. El trazado de estas vías de comunicación terrestres es tomando en cuenta que el tráfico pesado tiene como objetivo llegar hasta la frontera norte por las zonas de más libre acceso usando el libramiento perimetral de Monterrey.

1.2 BENEFICIOS

-Como principal objetivo es impulsar la economía del estado de Nuevo León, ya que con este arranque de obra se generan muchos empleos para la gente del sur del estado, así como también se impulsa el turismo y comercio para los locales.

-Representa una mejora muy importante conectando el sur del estado de Nuevo León con la aduana Colombia, pasando por la ciudad de Monterrey, N.L.

-Se potenciará de gran manera el traslado, tanto de personas como de bienes y servicios hacia la Área Metropolitana de Monterrey.

-A su vez, atraerá un mayor flujo del movimiento de transporte pesado internacional, generando una mayor y mejor inversión, y una derrama económica que impulse el desarrollo del sur del estado de Nuevo León.

-También, y no menos importante, es que, al conectarse con la ampliación del periférico, esto evitara que el transporte de carga pesada genere más tráfico (embotellamientos) en el Área Metropolitana de Monterrey.

1.3 HIPÓTESIS

El nuevo proyecto de la carretera interserrana que intersecta, en su mayoría, de manera perpendicular el eje plegado de la Sierra Madre Oriental se enfrenta con múltiples procesos de obra, en donde es fundamental entender las propiedades geomecánicas de los macizos rocosos para un mejor control de los factores de inestabilidad de ladera, y así disminuir el Riesgo Geológico.

1.4 METODOLOGÍA

Este trabajo se realizó mediante 5 etapas en las que se involucran salidas a campo, pruebas de laboratorio, análisis de datos e interpretación de resultados (Figura 1.3).



Figura 1.3; -Diagrama de flujo que muestra la metodología del actual proyecto de tesis.

1.5 ETAPAS METODOLÓGICAS DE LA TESIS

Primera etapa: Esta etapa consistió en la revisión bibliográfica de la zona. Se llevó a cabo una revisión exhaustiva de los trabajos previos llevados a cabo en áreas aledañas para tener un panorama general de la geología local y regional, así como también de la estratigrafía presente en el área de estudio.

Segunda etapa: Elaboración de carta topográfica base. Posteriormente, se obtuvo información de imágenes satelitales y cartas topográficas para realizar mapas base para preparar la cartografía geológica del área de interés.

Tercera etapa: Cartografía Geológica. En mapas escala 1:20000, 1:10000, 1:5000, mediante recorridos de campo, se realizaron 2 mapas, un mapa geológico estructural, y un mapa de zonas homogéneas que comprende la separación entre las unidades rocosas con base a su comportamiento geomecánico.

Cuarta etapa: En esta etapa el objetivo es mediante los SIG (sistemas de información geográfica) digitalizar la información recabada en nuestras cartografías para identificar las zonas de interés de acuerdo con nuestro análisis de riesgos

Quinta etapa: Análisis de Riesgo. Como etapa final una vez que tenemos delimitadas las zonas de riesgo en nuestro mapa lo siguiente es hacer un análisis de los distintos factores de riesgo en cada zona, para esto implementando análisis de estabilidad de taludes por el método de Fellenius, y también aplicando las clasificaciones de RMR.

1.6 LOCALIZACIÓN

El acceso al área de estudio se tiene a través de la Carretera Estatal N° 58, que comunica al municipio de Linares, N.L. con los municipios de Iturbide y Galeana. El área de estudio está delimitada por un polígono que tiene sus límites en las coordenadas, 14R 394053, 2739893, 14R 392058, 2745674, 14R 398061, 2747910, 14R 398639, 2744279 (Figura 1.4). Partiendo de Linares, N.L. se conduce hacia el oeste por la carretera estatal No. 58, por una distancia de 74 kilómetros, hasta acceder al área de estudio en el Ejido Puerto Pastores, el cual pertenece al municipio de Galeana, N.L.

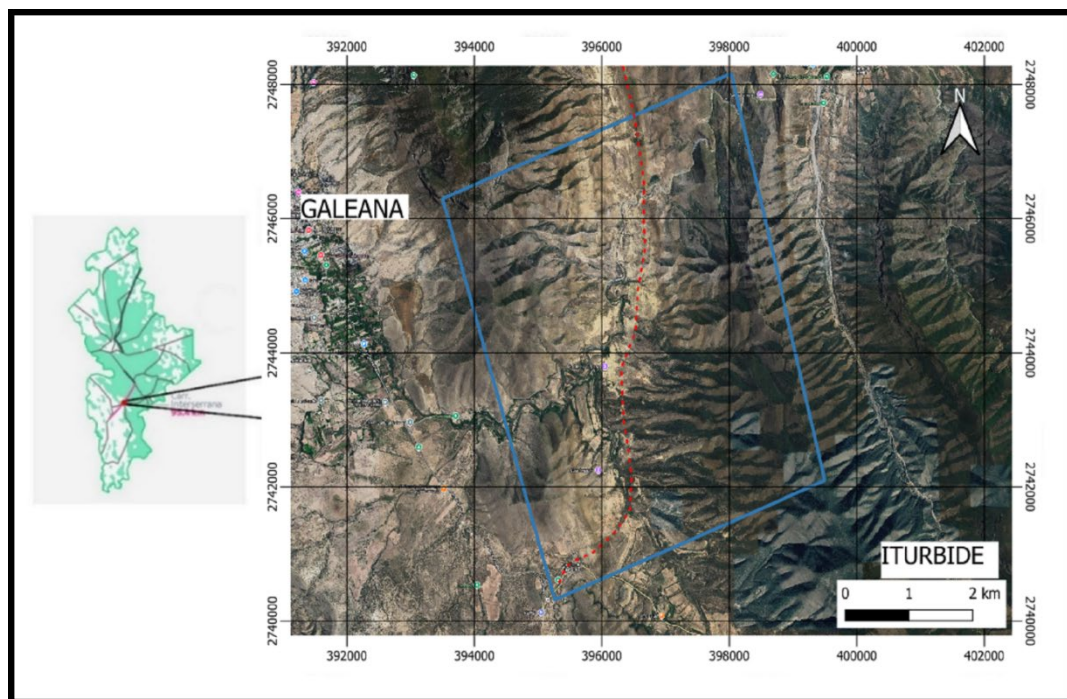


Figura 1.4; -Localización del área de estudio, imagen satelital, con la referencia del contorno del estado de Nuevo León. La curva roja segmentada muestra el trazo de la carretera Interserrana.

CAPÍTULO 2 – GEOLOGÍA REGIONAL Y LOCAL

2.1 GEOLOGÍA REGIONAL

La Sierra Madre Oriental (SMO) es una de las principales provincias fisiográficas de México, localizada en la porción noreste–este del país. Esta provincia limita al noreste con la Gran Llanura de Norteamérica, al este con la Llanura Costera del Golfo de México, y al oeste y sur con el Altiplano Mexicano. Asimismo, hacia el noroeste se encuentra parcialmente cubierta por rocas volcánicas félsicas de la Sierra Madre Occidental (SMOcc).

La SMO se extiende desde Parral, Chihuahua, hasta Zongolica, Veracruz, con una amplitud aproximada de entre 80 y 100 km. Está constituida principalmente por una cadena orográfica de pliegues y cabalgaduras, resultado de procesos compresivos asociados a la evolución tectónica del margen occidental de América del Norte.

En su porción central, esta provincia es interrumpida y cubierta por rocas volcánicas del Mioceno tardío pertenecientes al Cinturón Volcánico Mexicano (CVM), reapareciendo hacia el sureste en el estado de Veracruz (Padilla y Sánchez, 1982).

2.1.1 EVOLUCIÓN TECTÓNICA DEL NE DE MÉXICO

El NE de México, donde se ubica el área de la presente tesis, a partir del Pensilvánico-Pérmico Temprano, experimentó un evento tectónico de primer orden denominado Colisión Continental. El margen sur de Laurentia y el norte de Gondwana colisionaron desarrollándose el evento orogénico Ouachita-Marathon. La colisión de estas dos grandes masas continentales trajo por consecuencia la formación de un supercontinente denominado Pangea (Dickinson Y Lawton, 2001).

El cinturón Ouachita-Marathon se extiende a lo largo del Oeste de Texas, Coahuila y algunas partes de Chihuahua (Sedlok et al., 1994). Durante este evento de colisión de continentes resultó la acumulación de sedimentos tipo flysch, los cuales desarrollaron capas de cientos a miles de metros de espesor. Las montañas Ouachita han sido fechadas de edad Mississípico-Pensilvánico Medio (Salvador, 1991).

Después de la colisión de continentes, se tiene documentado el desarrollo de un arco de margen continental en el borde Oeste de Pangea (Torres et al., 1999). Este mismo precedió a un rifting de la Pangea entre el Triásico Tardío – Jurásico Temprano en la parte central del Golfo de México (Michalzik y Schumann, 1994; Goldhammer, 1999; Dickinson y Lawton, 2001). Durante este período se inició un proceso de rift incipiente a consecuencia de una anomalía térmica, dando como resultado el origen de un proceso de fragmentación continental (Figura 2.1). Este proceso comenzó al norte del Bloque de Yucatán, justo al sur del límite del actual margen de la placa de América del Norte (Salvador, 1991). Esta etapa se caracterizó por una deformación extensional, en donde se generó un sistema de Grabens y Horsts, formándose los altos estructurales del Bloque o Isla de Coahuila, Isla de la Mula, Isla de Monclova, Bloque del Burro Peyote y el Archipiélago de Tamaulipas; así como también se formaron las depresiones de la Cuenca de Sabinas, Cuenca de Maverick, Cuenca Mexicana o Geosinclinal Mexicano, Cuenca de Magiscatzin, Canal de Chihuahua y el Canal de Monterrey. Estas cuencas están probablemente limitadas por fallas normales, con desplazamientos laterales izquierdos (cizallamiento oblicuo); es decir, habrían experimentado transtensión. Este rift culminó en el Oxfordiano Temprano (Goldhammer et al., 1991 y Goldhammer, 1999; Martini y Ortega-Gutiérrez, 2017).

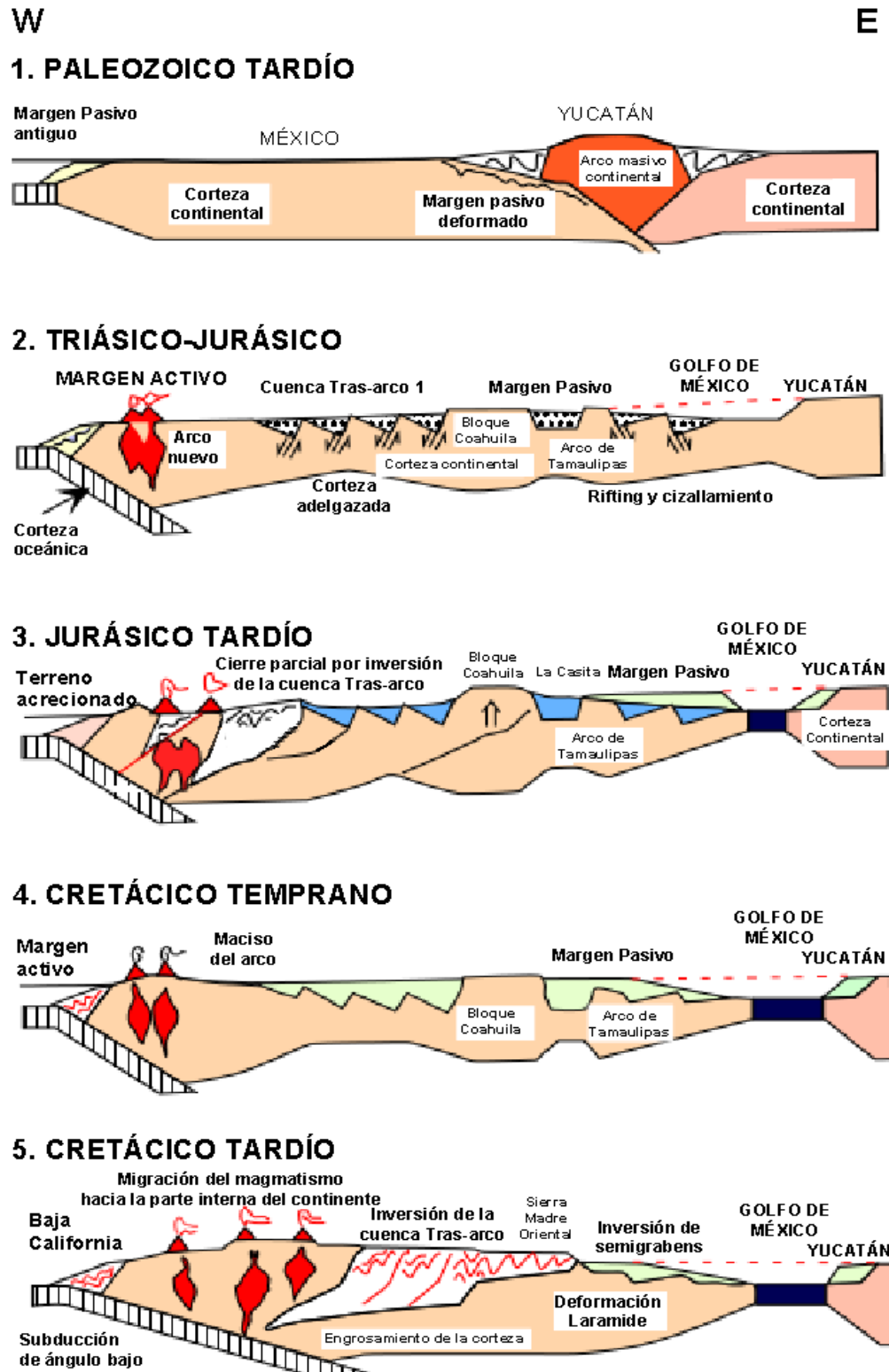


Figura 2.1; - Modelo de la evolución tectónica para las provincias del pacífico occidental de México y Oriente del Golfo de México. Tomado de Goldhammer (1999, sin escala).

Un evento tectónico importante durante el Jurásico Tardío, durante la apertura del Golfo de México, fue la rotación antihoraria y transporte hacia el sur del Bloque de Yucatán o Terreno Maya. Esto ocurrió debido a una gran falla transformante dextral (Falla Tamaulipas- Chiapas), debido al empuje de la corteza oceánica creada durante la apertura del Golfo de México entre los 164 y 137 Ma aproximadamente (Pindell, 1985). Por otro lado, se menciona que grandes movimientos intracontinentales sinestrales a lo largo de la falla transformante Mojave – Sonora Megashear, ocurrieron contemporáneamente. Pindell (1985) sugirió que este tipo de movimientos sinestrales en México, fueron debido a la subducción oblicua de la placa Farallón bajo las placas Yaqui y de América del Sur. La falla Mohave Sonora habría jugado un papel importante en la reconstrucción de terrenos tectónicos y arcos magmáticos en el norte de México. Durante la expansión del piso oceánico en el Golfo de México en el Oxfordiano, el Bloque de Yucatán se trasladó rápidamente hacia el sur a través de la falla Tamaulipas – Chiapas (PINDEL, 1985). Este evento marcó la pauta para la separación entre América del Norte y América del Sur (Wilson, 1990; Goldhammer et al., 1991; Sedlock et al. 1993, 1994; Goldhammer, 1999). Cuando esta falla se volvió inactiva, los carbonatos del Jurásico Superior cubrieron el Arco de Tamaulipas, quedando establecido el margen continental para el noreste mexicano. En este momento inició una transgresión marina continua hasta el Cretácico Tardío, cubriendo gran parte de México.

La expansión del Golfo de México finalizó en el Cretácico Temprano (Padilla y Sánchez, 1986; Wilson, 1990; Goldhammer Y Wilson, 1991; Goldhammer et al., 1993; Goldhammer, 1999), debido a la inactividad paulatina de la dorsal oceánica que se generó en el Golfo de México. Posteriormente, se comenzó a formar una dorsal oceánica nueva al sur del Bloque de Yucatán en el proto - Caribe durante el Cretácico Temprano (Coney, 1985; Sedlock et al., 1994).

A finales del Cenomaniano hasta principios del Maastrichtiano las facies sedimentarias en el NE de México fueron fuertemente influenciadas por la orogenia Laramide, ahora redefinida como orógeno mexicano (Fitz-Diaz et al., 2018). Este evento orogénico es el evento más importante para el período Cretácico Tardío – Eoceno como resultado de esfuerzos coaxiales compresivos que actuaron desde el SW en el borde continental del pacífico mexicano. La deformación involucró movimientos verticales del basamento con mecanismos complejos que deformaron los sedimentos de edad Mesozoico, cabalgando bloques continentales estables pre-

mesozoicos (De Cserna, 1956; Padilla y Sánchez, 1986, 1992). En este tiempo la Sierra Madre Oriental se desarrolló y la deformación migró del W al E, generándose cuencas de antepaís en el E y NE de México en el frente de la Sierra Madre Oriental, como: la Cuenca de Parras, La Popa, Sabinas, Cuenca de Burgos y Tampico Misantla (Goldhammer et al., 1991 y Goldhammer, 1999; (Figura 2.1)).

2.1.2 SIERRA MADRE ORIENTAL

La Sierra Madre Oriental (SMO) es la provincia fisiográfica que representa la cadena montañosa con mayor elevación en el norte y oriente de México; tiene una longitud que alcanza más de 1000 kilómetros y entre 80 y 200 km de amplitud, con un promedio de altura de 2,200 msnm. Este alto relieve de montañas separa una amplia meseta elevada, al oeste, de la Planicie costera del Golfo de México, al este. Geográficamente en México se extiende desde la ciudad de Parral Chihuahua, hasta Zongolica, Veracruz. En sus extremos noroeste y sureste, la SMO está cubierta por derrames volcánicos y una gran cantidad de rocas piroclásticas del Cenozoico de la Sierra Madre Occidental y del Cinturón Volcánico Mexicano (Eguiluz et al., 2000).

Campa y Coney (1983) incluyeron a la provincia morfotectónica de la SMO como parte del cinturón de pliegues y cabalgaduras mexicano, debido a que su estructura tectónica se compone esencialmente de fallas inversas y pliegues. Esta provincia constituye la parte sur de la Cordillera de Norteamérica, la cual se extiende desde Alaska, pasa por la parte occidental de Canadá y Estados Unidos e incluye a casi todo México. La Cordillera de Norteamérica es un relieve montañoso desarrollado a partir de al menos cinco orogenias: Antler, Sonoma, Nevadiana, Sevier y Laramide en USA. Las cuales ocurrieron en los últimos 350 millones de años, producto de la interacción de las placas oceánicas Kula y Farallón bajo la placa de Norteamérica (Dickinson, 2004). Las orogenias Sevier (130-50 Ma) y Laramide (80-40 Ma) son las responsables de los pliegues y cabalgaduras más jóvenes de la Cordillera en Canadá, Estados Unidos y México (orógeno mexicano).

El estilo estructural de la SMO consiste en una cadena de pliegues elongados, con flancos verticales a sub-verticales, con fallas y cabalgaduras en su mayoría con transporte tectónico hacia el antepaís, aunque en ocasiones se presentan vergencias opuestas (Padilla y Sánchez,

1985). Dichos elementos están controlados principalmente por variaciones importantes de los tipos, espesores y competencias de las rocas deformadas, así como por la existencia o ausencia de rocas evaporíticas en la base y/o volcanoclásticas de grano fino (figura 2.2) (Padilla y Sánchez, 1982; Eguiluz et al., 2000; Torres-Ramos, 2011; Fitz-Díaz et al., 2018; Guerra-Roel et al., 2024, 2025)

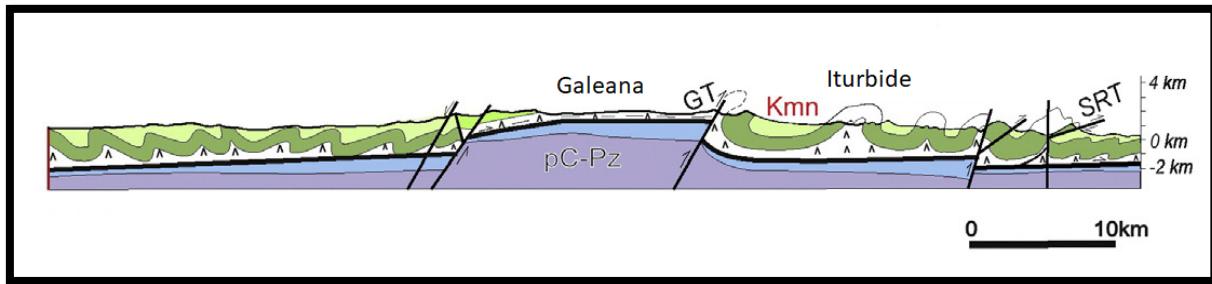


Figura 2.2; - Sección estructural basada en Chávez-Cabello (no publicado) y en observaciones realizadas por Jones et al. (1995).

El rasgo fisiográfico más significativo dentro de la SMO corresponde a la Curvatura de Monterrey (Figura 2.3), la cual es referida para describir la región en donde la Sierra Madre Oriental cambia su tren estructural de una dirección E-W, cerca de Saltillo, Coahuila, a una dirección NE-SW, al noreste de Saltillo y de una dirección E-W, cerca de Monterrey a una NW-SE al oeste de Linares (Padilla y Sánchez, 1978; Padilla y Sánchez, 1985).

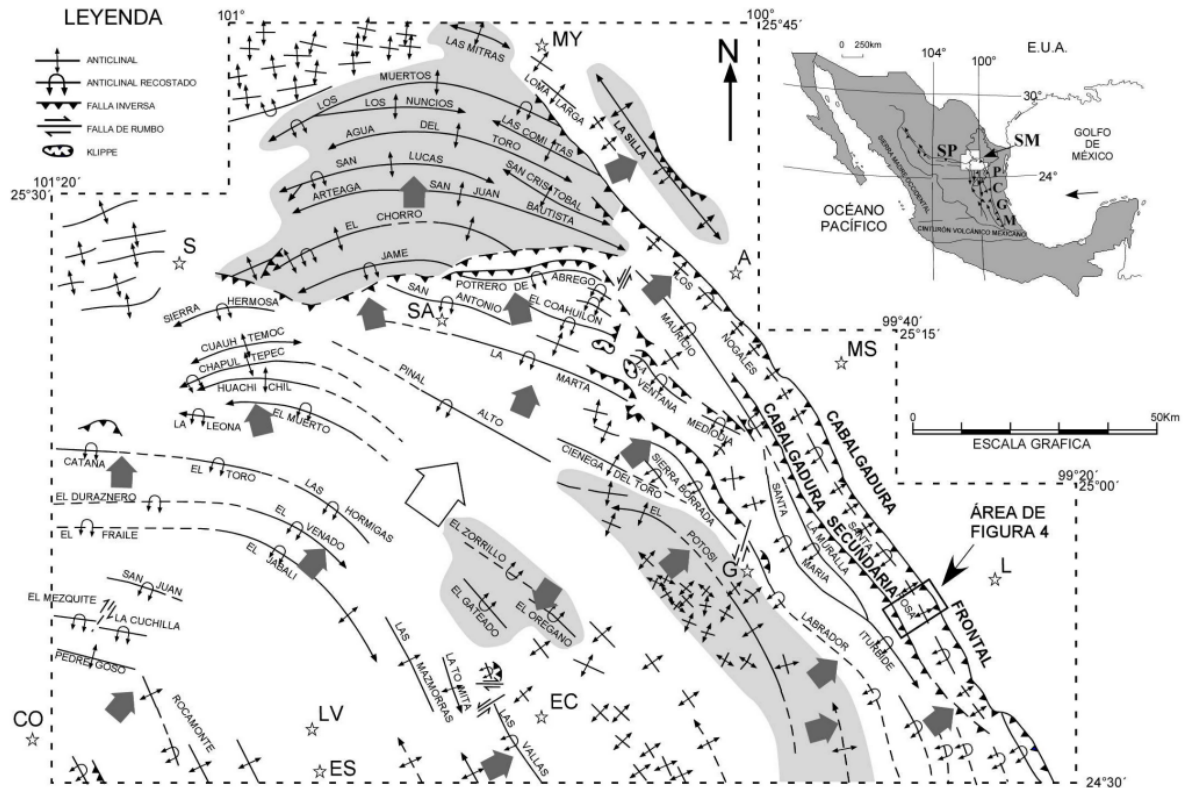


Figura 2.3; - Mapa estructural de la Saliente de Monterrey de Padilla y Sánchez (1985). Abreviaciones: MY: Monterrey, S: Saltillo, A: Allende, SA: San Antonio de las Alazanas, MS: Montemorelos, L: Linares, G: Galeana, EC: El Carmen, LV: La Ventura, CO: Concepción del Oro y ES: El Salvador. El recuadro de la parte derecha enmarca el área de estudio. Flechas grises menores indican transporte tectónico local y flecha blanca mayor indica transporte tectónico regional. Tomado de Chávez-Cabello et al. (2011).

2.1.3 OROGENIAS SEVIER Y LARÁMIDE

La orogenia Sevier en Canadá y USA ocurrió durante una etapa de cierre de cuencas marginales por colisión de terrenos tectónicos de origen oceánico (De Celles, 2004; Yonkee et al., 2014). Esta deformación se extendió hasta México con mecanismos idénticos de acreción del Terreno Guerrero (Figura 2.4).

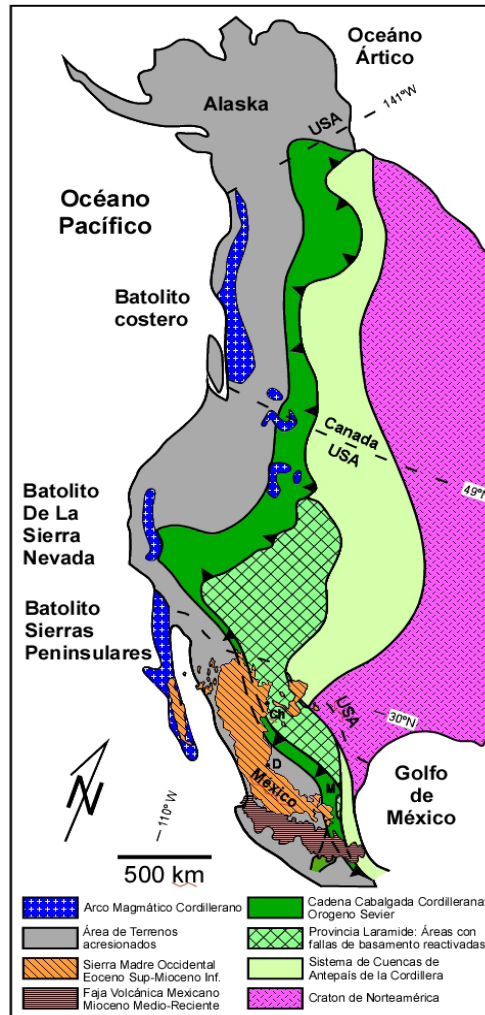


Figura 2.4; - Extensión del cinturón cabalgado cordillerano (Sevier), del cinturón de pliegues y cabalgaduras mexicano (Sierra Madre Oriental) y la provincia Larámide dentro de la Cordillera de Norteamérica; figura integrada de diferentes trabajos; DeCelles, 2004; Fitz Díaz et al., 2011; Ferrari et al., 2012; Bryan et al., 2013).

La orogenia Larámide, por otro lado, ha sido asociada a subducción sub-horizontal que generó cizalla en la base de la corteza continental, levantando y reactivando las fallas antiguas del basamento hasta 1,500 km dentro del continente (Coney, 1976; Dickinson et al., 1988; Dickinson, 2004).

El evento orogénico Larámide dejó también otras marcas evidenciadas de su paso por el occidente de América del Norte, incluyendo el cinturón de pliegues y cabalgaduras que se extiende a lo largo de gran parte del oeste de América del Norte, y el levantamiento tectónico de grandes bloques corticales en la región suroeste-central de los Estados Unidos (Figura 2.5), (Valencia-Moreno & Ortega-Rivera, 2011).



Figura 2.5; -. Mapa tectónico del noreste del Pacífico entre 74 y 64 Ma. Las flechas indican el movimiento relativo de las placas Farallón y la placa Kula (modificado de Bunge & Grand, 2000; de Valencia-Moreno & Ortega-Rivera, 2011).

2.2 GEOLOGÍA LOCAL

La estratigrafía de la Sierra Madre Oriental (SMO) en el área de estudio está representada mayormente por rocas carbonatadas y terrígenas del Mesozoico (Jurásico-Cretácico), las cuales se depositaron sobre un basamento cristalino de edad Mesoproterozoico y Paleozoico, el cual aflora en el cañón Peregrina en Cd. Victoria, Tamaulipas (Padilla y Sánchez, 1982; López-Ramos, 1985). El origen de las estructuras plegadas y falladas de la SMO se originaron por un acortamiento tectónico de escala continental asociado al orógeno mexicano que ocasionó plegamiento y fallas de rocas sedimentarias marinas durante el Cretácico Superior-Eoceno (Eguiluz et al., 2000; Ramírez-Peña y Chávez-Cabello, 2017; Fitz-Díaz et al., 2018).

2.2.1 ESTRATIGRAFÍA DEL ÁREA.

En el trabajo de cartografía de la presente tesis fue posible delimitar unidades jurásicas y cretácicas. La unidad más antigua mapeada fue la Formación La Casita del Jurásico, sobreyaciendo a esta concordante y transicionalmente se identificó a la formación Taraises del

Cretácico. Del período Cretácico, además, se identificaron las Formaciones Tamaulipas Inferior, formación La Peña, formación Tamaulipas Superior, formación Cuesta del Cura, formación Agua Nueva, formación San Felipe y formación Méndez, así como también algunos conglomerados, brechas, coluviones y terrazas aluviales recientes que forma parte del suelo de la región (Figura, 2.6).

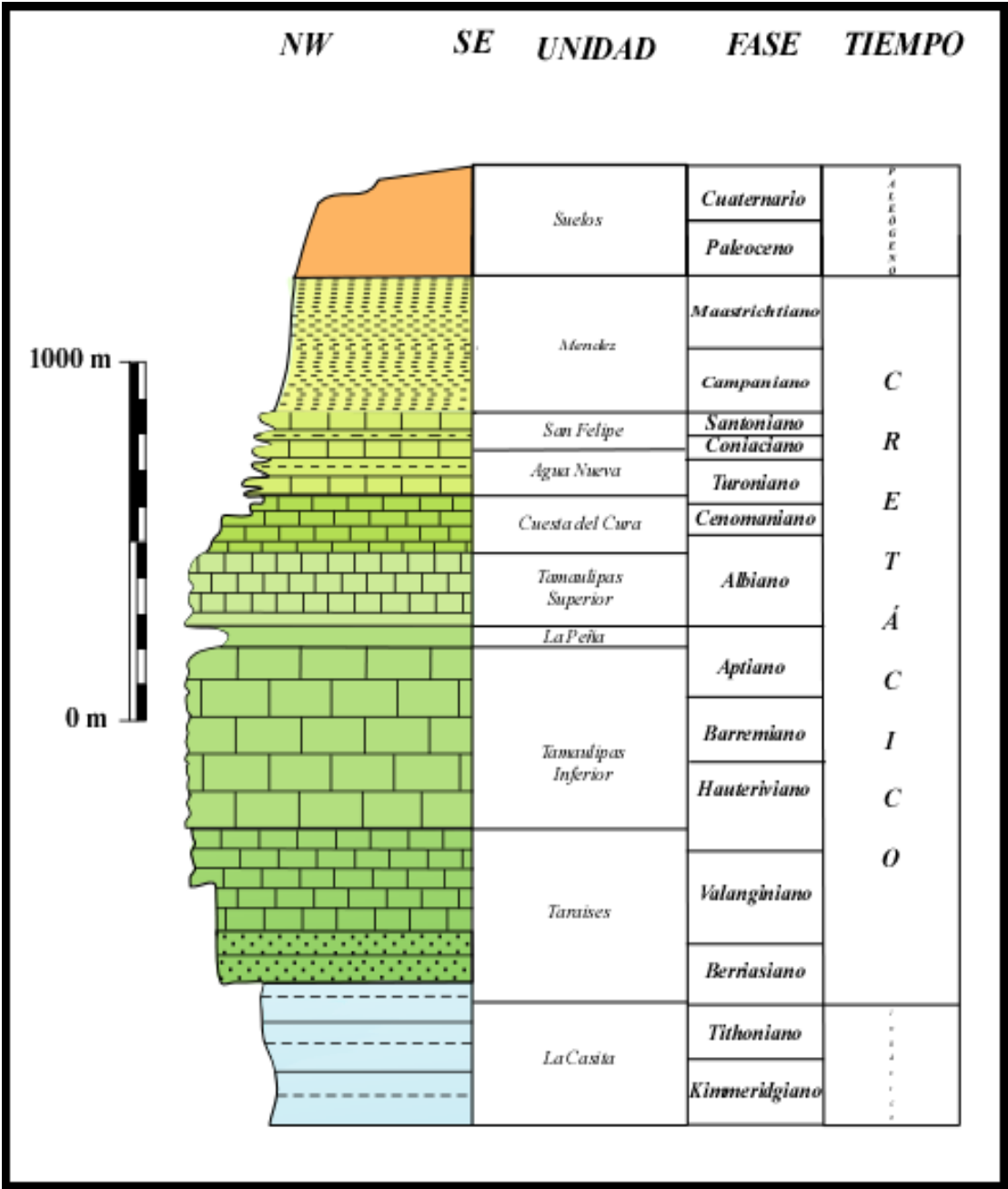


Figura 2.6; -Columna estratigráfica representativa del área de estudio, mostrando las unidades litológicas y su distribución temporal desde el Jurásico Superior hasta el Cuaternario.

2.2.1.1 Formación La Casita

La Formación La Casita del Jurásico (Kimmeridgiano-Tithoniano) está constituida por lutita de color gris oscuro a negro de carácter bituminoso, intercaladas con estratos delgados de caliza arcillosa; también puede presentar en algunas localidades arenisca (Potrero Prieto, Galeana) cementada por carbonato de calcio y horizontes fosfatados (Imlay, 1936; Ocampo-Díaz et al., 2008). El espesor propuesto para esta unidad varía de 60 a 800 m, en función de la proximidad al bloque de Coahuila y el alto de Tamaulipas (Isla de Terán), del cual derivan los flujos detríticos que dan origen a esta unidad (Fortunato, 1982; Michalzik, 1988; Michalzik y Schumann 1994; Eguiluz, 2002 (Formación Carbonera); Ocampo-Díaz et al., 2008).

Entre la región de Monterrey y Saltillo, la Formación La Casita ha sido subdividida en 3 unidades estratigráficas, las cuales han sido interpretadas como una progradación de un extenso complejo de abanico deltaico (fan-delta). Las cuales pueden correlacionarse a la sección noreste del Golfo de México (Fortunato y Ward, 1987; Michalzik, 1988; Michalzik y Schumann, 1994; Goldhammer, 1999).

DESCRIPCIÓN DE CAMPO: En el área de estudio, la Formación La Casita se reconoce principalmente por la presencia de lutita bituminosa, color oscuro, con múltiples betas de calcita que de manera perpendicular a los planos de estratificación rompen la continuidad de estos (Figura, 2.7).



Figura 2.7; -Horizontes de marga y lutita bituminosa intercaladas de la Formación la Casita con fracturas por tensión rellenas de calcita, formando estructuras tipo pinch-out, desarrolladas en el flanco NE invertido del anticlinal de Potrero Prieto, expuesto sobre

2.2.1.2 Formación Taraises

La Formación Taraises fue descrita en la localidad del cañón Taraises por Imlay (1936), quien atribuyó que estaba constituida por dos miembros, inferior y superior. El miembro inferior compuesto por estratos medianos a gruesos de caliza gris muy resistente a la erosión. Por otro lado, el miembro superior está constituido de estratos delgados de caliza intercalada con lutitas. En superficie fresca presenta un color gris claro a gris oscuro, también gris-amarillento o crema. Esta formación es una unidad altamente fosilífera y aflora frecuentemente en los núcleos de los anticlinales en la SMO.

De manera general, la unidad consiste en calizas arcillosas con una textura tipo mudstone a wackestone de color gris oscuro. La Formación Taraises también tiene un miembro arenoso denominado miembro arenoso Galeana, el cual ha sido clasificado como un depósito de frente deltaico (Michalzik, 1988; Ocampo-Díaz et al., 2008), bien expuesto en el flanco sur y norte del anticlinal de Potrero Prieto en la localidad del mismo nombre en Galeana, N.L.

DESCRIPCIÓN DE CAMPO: La Formación Tارايس, en el área de estudio, presenta una caliza arcillosa con espesores medianos a gruesos de entre 40 y 70 cm de espesor, intercalada con lutitas delgadas que en conjunto subyacen a un paquete potente de arenisca conocido como el miembro arenoso Galeana, constituido por areniscas que tienen un aspecto amarillento y son muy destacables por su competencia y relieve contrastante por su resistencia a la erosión. Esta unidad comprende alrededor de 500 m de espesor en el flanco sur del anticlinal de Potrero Prieto y se reduce a 10 metros en el flanco norte invertido de la estructura, bien expuesto en la localidad de Potrero Prieto de Abajo a lo largo del río Potosí (Figura 2.8).

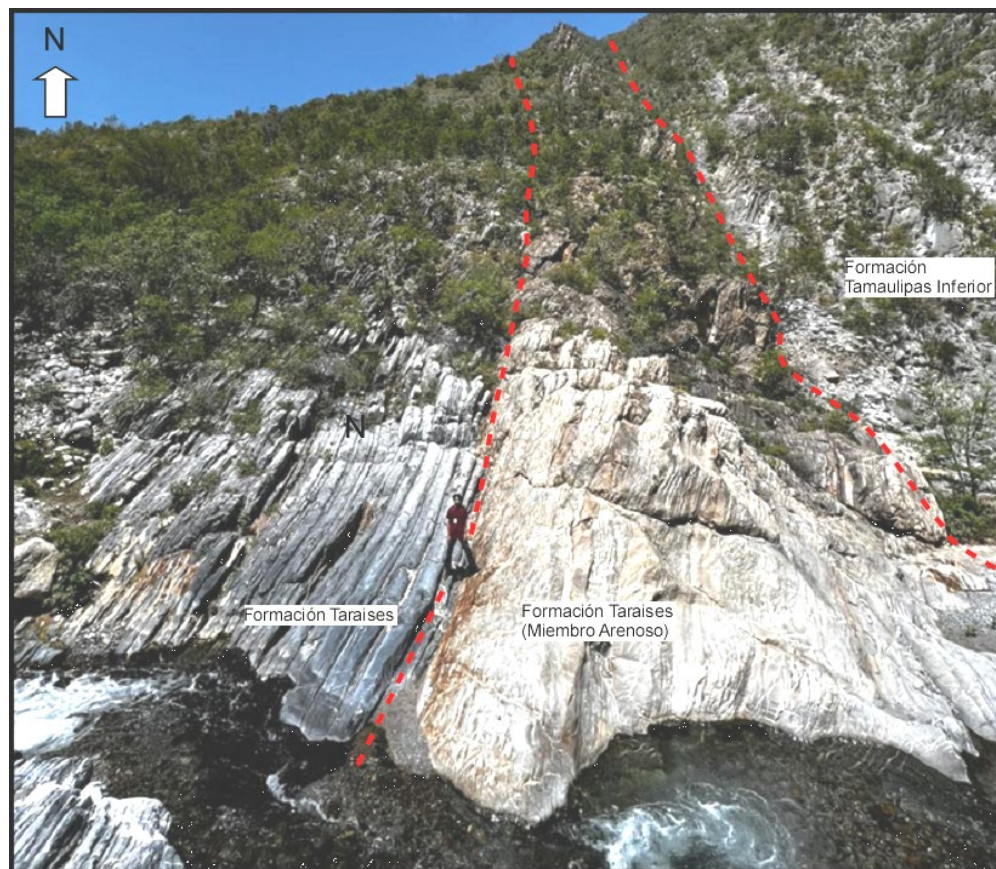


Figura 2.8; - Afloramiento de la Formación Tارايس. Aquí se aprecian de manera contrastante las areniscas contenidas en esta unidad, en contacto invertido con los estratos de caliza arcillosa intercalada con lutita bituminosa de la Formación La Casita.

2.2.1.3 Formación Tamaulipas Inferior

DEFINICIÓN: La Formación Tamaulipas Inferior fue definida por Muir (1936) tomando como base los sedimentos que sobreyacen al Jurásico superior y que subyacen a la Formación Otates, en el Cañón la Borrega en la Sierra de Tamaulipas, a 75 km hacia la parte sureste de Ciudad Victoria. A esta unidad se le atribuye una edad del Hauteriviano-Aptiano. La Formación Tamaulipas inferior tiene 3 miembros, los cuales se conforman por: miembro inferior de calcarenita, miembro intermedio bentonítico y el miembro superior calcilutítico.

El calcarenítico es el miembro más antiguo, el cual está constituido de intercalaciones de caliza con colores gris y crema. El miembro bentonítico es el de edad media y se encuentra constituido por una bentonita de color verde a gris verdoso, con intercalaciones de caliza y caliza ligeramente arcillosa. Por último, el mencionado miembro calcilutítico es el más joven y se encuentra constituido por intercalaciones de caliza y capas delgadas de lutita, también caliza arcillosa y nódulos de pedernal.

DESCRIPCIÓN DE CAMPO: En el área de estudio la Formación Tamaulipas Inferior conforma las partes de mayor relieve, siendo una de las rocas que presenta un comportamiento de mayor competencia a la erosión. Litológicamente se reconoce en esta zona la presencia de estratos con espesores gruesos a masivos ($>1\text{m}$), que van de los 70 cm a 2 m, delimitados por estilolitas diagenéticas bien desarrolladas. Las capas se componen casi exclusivamente de calizas muy competentes de color gris claro (Figura 2.9). Dominan los estratos tipo Mudstone y Wachstone, más hacia el noroeste, en la sierra de Labradores; diferentes autores han documentado la ocurrencia de un banco de rudistas importante que ha sido referido como el arrecife de Galeana (Michalzik, 1988; Ocampo-Díaz et al., 2008).



Figura 2.9; - Estratos masivos de Mudstone y Wackstone de la Formación Tamaulipas Inferior cerca del Ejido Brownsville, Galeana, N.L. (Coordenadas UTM: 14 R 394416, 2742840).

2.2.1.4 Formación La Peña

La Formación La Peña fue definida por Imlay (1936). Originalmente, este autor dividió a la Formación La Peña en dos miembros. De manera general, consta de 420 m de caliza color gris a colores claros con espesores de estratos que van de delgados a gruesos. Humphrey (1949) menciona que la unidad está formada por margas de color gris y que las mismas tienen un color que intemperiza a color rosa y rojo. En algunas zonas se presentan horizontes interestratificados con delgadas capas de roca caliza color gris a gris oscuro. Presenta estratos de lutitas color gris oscuro a negro con alto contenido fosilífero y presencia de lentes y capas de pedernal.

DESCRIPCIÓN DE CAMPO: En el área de estudio aflora como una pequeña unidad de rocas carbonatadas y arcillosas de color oscuro que intemperizan a un color amarillo ocre. Esta unidad tiene un espesor aproximado que oscila de los 15 a los 40 metros, particularmente en el área se puede apreciar que es una unidad de muy baja competencia a la erosión (Figura, 2.10).

Existen excelentes afloramientos de la Formación La Peña a lo largo del río Potosí, estructuralmente está expuesta en posición invertida en el flanco noreste del anticlinal de Potrero Prieto.



Figura 2.10; - Afloramiento de Formación la Peña en el que se aprecian calizas arcillosas con un color al intemperismo ocre-amarillento, las capas tienen espesores en promedio de 15 a 30 cm., (Coordenadas UTM: 14 R 401391, 2751700).

2.2.1.5 Formación Tamaulipas Superior

La Formación Tamaulipas Superior, con una edad Albiano (Goldhammer, 1999), fue definida por Muir (1936), el cual se basó en algunos de los sedimentos que formaban parte del horizonte Otates en la Sierra de Tamaulipas en el Cañón la Borrega, localizada al noreste de Ciudad Victoria, Tamaulipas.

Se describe como una secuencia calcárea que se encuentra constituida en su mayoría por caliza arcillosa con estratificación delgada a mediana, con presencia de fósiles de radiolarios.

Entre sus planos de estratificación es común ver nódulos y bandas de pedernal. En los estratos de la base de la Formación Tamaulipas se observan capas medianas a gruesas con textura mudstone de color gris y estilolitas diagenéticas paralelas a la estratificación. Estos estratos se encuentran intercalados con lutitas delgadas en su base y, hacia la cima, nuevamente aparecen en la zona de transición con la Formación Cuesta del Cura. En la parte superior de la Formación Tamaulipas Superior se encuentran estratos de caliza de espesor delgado a medio, ondulados y con texturas mudstone. También presentan nódulos de pirita oxidados con diámetros menores a un centímetro y nódulos de pedernal de varios centímetros de diámetro (Padilla & Sánchez, 1985).

DESCRIPCIÓN DE CAMPO: Muy contrastante a la Formación la Peña, la Formación Tamaulipas Superior está constituida por caliza de color gris claro con espesores promedio de estratos de 50 cm hasta un metro. En las zonas de análisis de las propiedades mecánicas de la Formación Tamaulipas Superior, la roca presenta múltiples vetas rellenas de calcita producto de la asimilación de esfuerzos tectónicos que condicionan la fábrica de la roca (Figura 2.11).



Figura 2.11; - Afloramiento de la Formación Tamaulipas Superior, horizonte de aproximadamente 60 cm de espesor con múltiples vetillas de calcita y nódulos de pedernal, (Coordenadas UTM: 14 R 394075, 2742973).

2.2.1.6 Formación Cuesta del Cura

Esta unidad se compone en su mayoría de estratos delgados de caliza, con una característica que los hace destacar de las otras formaciones, por sus estratos ondulados; intercalados con lutita gris delgada y numerosos nódulos, lentes y bandas de pedernal negro (Imlay, 1936). De manera general, es una unidad constituida por caliza de color negra en fractura fresca, con estratificación que varía de espesor de delgado a medio (Rogers et al., 1957; Clemons y McLeroy, 1962; Ledezma-Guerrero, 1967; Echánove-Echánove, 1986; Mitre-Salazar, 1989; Aranda-Gómez et al., 1993 en Aranda-Gómez et al., 2000; Dávalos-Álvarez, 2003; Barboza-Gudiño et al., 2004). Ocasionalmente muestra algunas variaciones de color, presentando la caliza en color café grisáceo al intemperismo (Pérez-Rul, 1967).

En el poblado de Casillas la Formación Cuesta del Cura presenta una estratificación altamente ondulante, la cual se intercala con horizontes de lutita delgados; presenta bandas y lentes de pedernal negro. Por su alto contenido de arcilla, intercalada con bandas de pedernal y caliza, desarrolla plegamiento armónico tipo chevrón.

DESCRIPCIÓN DE CAMPO: En el área de estudio la Formación Cuesta del Cura se presenta como una unidad que expone rocas de color gris claro con espesores de estratos que van de 40 a 50 cm. Comúnmente se aprecian bandas, lentes y nódulos de pedernal negro. En nuestra zona de análisis es común ver a la Formación Cuesta del Cura con sus típicos pliegues armónicos de tipo chevrón (Figura 2.12).



Figura 2.12; - Afloramiento de la Formación Cuesta del Cura que exhibe pliegues apretados con plano axial vergente al noreste y eje de pliegue con inmersión al sureste, (Coordenadas UTM: 14 R40092, 275100).

2.2.1.7 Formación Agua Nueva

Esta formación es una unidad sobreyacente de forma concordante y transicional a la Formación Cuesta del Cura. Se compone de margas con espesores medianos a delgados y lutitas gruesas, que en ocasiones pueden incluir componentes orgánicos. Su depositación ocurrió en un ambiente de poca energía en la parte externa de una plataforma somera (Blanco-Piñón et al., 2002). Sin embargo, Ángeles-Villeda et al. (2005) reportan que el ambiente de depositación de esta unidad es de cuenca, debido a la textura y al predominio de géneros de foraminíferos planctónicos sobre los bentónicos.

DESCRIPCIÓN DE CAMPO: En el área de estudio se presentan calizas arcillosas con algunas intercalaciones de lutitas, tiene un aspecto en general laminar y presenta un color café claro producto de su intemperismo (Figura 2.13). En fractura fresca, la lutita y la marga presentan color negro debido a su contenido orgánico importante. Hacia la base con la Formación Cuesta de Cura, presenta en la zona de transición caliza ligeramente ondulante y

nódulos de pedernal negro. Hacia la cima, en su zona de transición con la Formación San Felipe, sus capas características se intercalan con horizontes bentoníticos y arenicas de grano fino.

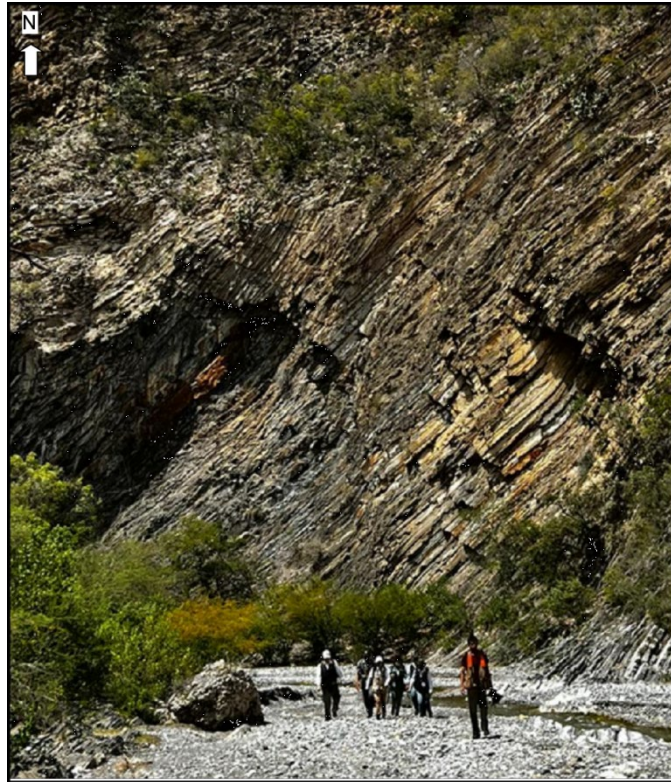


Figura 2.13; - Afloramiento de la formación Agua Nueva expuesto en corte carretero, (Coordenadas UTM: 14R 401929, 275127).

2.2.1.8 Formación San Felipe

La Formación San Felipe fue definida por Muir (1936) y redefinida por Imlay (1944) en Ciudad Valles, S.L.P., como capas de calizas gris claro con espesores delgados, intercalada con lutita y capas de bentonita, la cual mostraba un espesor total de la unidad, de 120 a 158 metros. Por otra parte, Padilla y Sánchez (1982) reportó que esta unidad, entre la región de Monterrey y Linares, N.L., tiene espesores que fluctúan entre 140 y 330 m, presentando principalmente caliza arcillosa (marga gris a verde), intercaladas con lutitas con escasos nódulos de pedernal y bentonita. Su ambiente de depositación se interpreta que corresponde a mar abierto con aporte de terrígenos.

Seibertz (1988) realizó una descripción de esta unidad a partir de secciones neo-tipo en el estado de Nuevo León en los Municipios de El Carmen, Rayones, el Álamo y la Boca. Este autor dividió la unidad en 2 miembros: (a) El Miembro la Boca (32 m de espesor), el cual sobreyace en concordancia a caliza margosa de la Formación Agua Nueva (Turoniano); este miembro se constituye por caliza color gris verdoso que a su vez se intercala con arenisca de color verde, las cuales gradan a limonita y lutita ocre; y (b) El Miembro Solís (95 m de espesor) constituido de una alternancia de caliza con lutita, limolita, con capas de glauconita, arenisca verde y horizontes de porcelanita. Al ascender estratigráficamente en esta formación, es muy notorio el cambio de litología carbonatada a otra con un aspecto totalmente arcilloso en la transición con la Formación Méndez.

DESCRIPCIÓN DE CAMPO: La Formación San Felipe en el área de estudio presenta caliza silicificada de color blanquecino que intemperiza a ocre. Se encuentran intercaladas con horizontes de arcilla, arenisca de grano fino, limolita y capas de bentonita de color verde (Figura 3.14).



Figura 2.14; - Afloramiento de la formación San Felipe, estratos con espesores de 30 cm de caliza intercalados con horizontes verdes de bentonita, (Coordenadas UTM: 14R 395921, 2741324).

La Formación San Felipe aflora en ambos flancos del sinclinal de Puerto Pastores, estructuralmente se encuentra en posición invertida con 85° de inclinación en el flanco trasero del sinclinal, presenta una fracturamiento importante y desarrollo importante de vetas de cuarzo en su parte media y de calcita hacia su base y cima. En el flanco normal de la estructura presenta menos desarrollo de fracturas y vetilleo, presentando una posición estructural normal con 60° de buzamiento.

2.2.1.9 Formación Méndez

Por último, el depósito de la secuencia marina concluyó con la depositación de la Formación Méndez, constituida principalmente de lutita masiva de estructuras con una foliación bien desarrollada. Chávez-Cabello et al. (2011) clasifica esta formación como una secuencia tipo *flysch*, la cual se caracteriza por zonas en la cuenca de antefosa en mar abierto, con flujos turbidíticos que se intercalan. Se interpretó que los flujos turbidíticos provienen de las áreas de plataforma. Estos depósitos evolucionaron al final del Maastrichtiano a brechas calcáreas de talud, en las cercanías con los bordes de las plataformas. Por las múltiples apariciones de foraminíferos en el registro paleo-estratigráfico de esta formación, algunos autores llegaron a la conclusión que esta unidad fue depositada en un ambiente de mar abierto en las partes interior y media de la zona nerítica.

DESCRIPCIÓN DE CAMPO: En el área de estudio la Formación Méndez es una unidad de lutita calcárea masiva que intemperiza a color amarillo ocre y en fractura fresca presenta un color gris oscuro; es común en esta zona encontrar afloramientos donde la Formación Méndez presenta una foliación primaria y secundaria bien desarrolladas, con sus clásicas estructuras de lápiz (Figura 2.15)

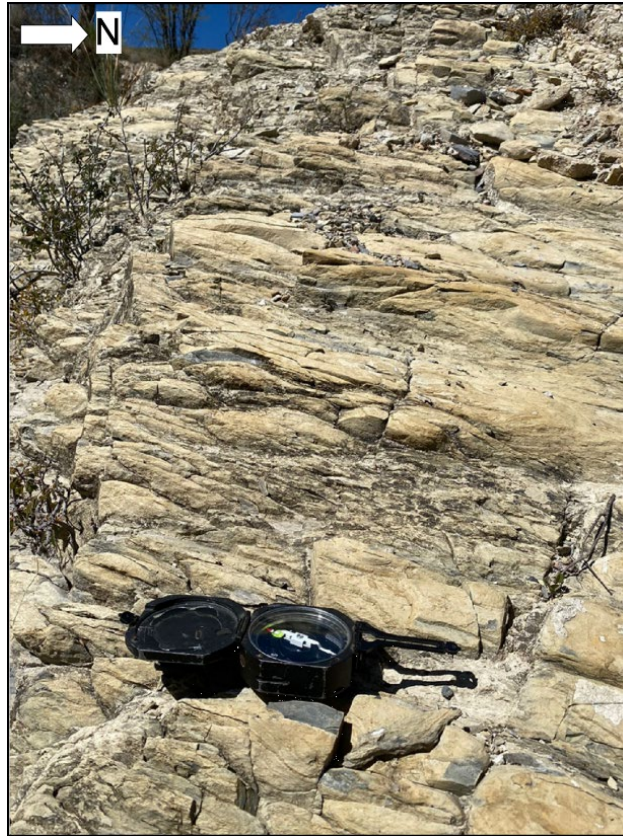


Figura 2.15; - Afloramiento de la Formación Méndez con las características lutitas masivas donde con casi imperceptibles los planos de estratificación. En este afloramiento se denota muy bien que en los horizontes de lutita la foliación está bien desarrollada (Coordenadas UTM: 14R 396091, 2741641).

La Formación Méndez aflora en el núcleo del sinclinal de Puerto Pastores, estructuralmente se encuentra en posición invertida con 80° de inclinación en el flanco trasero del sinclinal, presenta una fracturamiento importante con el desarrollo de superficies irregulares por su alto contenido arcilloso. En el flanco normal de la estructura muestra menos desarrollo de fracturas, presentando una posición estructural normal con 60° de buzamiento en su contacto normal con la Formación San Felipe.

CAPÍTULO 3 – GEOLOGÍA APLICADA

3.1 TEORÍA SOBRE GEOLOGÍA APLICADA

De acuerdo con González de Vallejo et al. (2002) la ingeniería geológica es una disciplina científica que se enfoca en estudiar y resolver problemas de ingeniería y ambientales generados por la interacción entre las actividades humanas y el entorno geológico. Su objetivo se centra en integrar los factores geológicos en el desarrollo de proyectos de infraestructura para prevenir o minimizar posibles desastres, como aquellos asociados a eventos sísmicos, inundaciones, construcción en montaña o en zonas sujetas a colapso, túneles, entre otros.

La relevancia de la ingeniería geológica se manifiesta en dos áreas principalmente, según González de Vallejo et al. (2002):

1. Proyectos y obras de ingeniería: Esta área abarca aquellas construcciones en las que el terreno juega un papel crucial como base de soporte (cimiento), material de excavación, espacio de almacenamiento o elemento constructivo. Ejemplos de estas obras incluyen infraestructura de transporte, edificaciones, presas, instalaciones industriales, minas y centrales de energía.
2. El segundo campo de actuación se refiere a la prevención, mitigación y control de riesgos geológicos.

El aporte de la ingeniería geológica es fundamental para garantizar la seguridad y eficiencia económica de estas iniciativas, asegurando que las estructuras se diseñen y construyan con una comprensión profunda del terreno y sus posibles riesgos.

En la ingeniería geológica es fundamental comprender 3 tipos de modelos, los cuales son:

- A. **MODELO GEOLÓGICO:** Este consiste en la representación de las características y estructuras del subsuelo de una región específica. Este modelo integra datos geológicos, geofísicos y geoquímicos para proporcionar una visión detallada de la distribución y

disposición de las diferentes unidades litológicas, estructuras tectónicas y otros elementos geológicos relevantes. Las componentes de un modelo geológico son:

1. **La Litología:** Identificación y distribución de los diferentes tipos de rocas presentes en el área de estudio.
2. **Las Estructuras geológicas:** Mapeo de fallas, pliegues, fracturas, vetas y otros elementos estructurales que afectan a las rocas.
3. **La Estratigrafía:** Análisis de la secuencia y relación temporal de las capas de roca sedimentaria.
4. **Las Propiedades físicas y mecánicas:** Datos sobre densidad, porosidad, permeabilidad y resistencia de las rocas.
5. **La Hidrogeología:** Información sobre la presencia y movimiento de aguas subterráneas.

B. **MODELO GEOMECÁNICO:** Este es una representación detallada de las propiedades mecánicas y estructurales de un macizo rocoso o formación geológica. Este modelo integra datos geológicos, geofísicos, geotécnicos y de ingeniería para simular y analizar el comportamiento del macizo rocoso y/o suelo bajo diversas condiciones de estrés y presión. Su principal objetivo es predecir y garantizar la estabilidad de taludes escarpados y estructuras subterráneas como: túneles, pozos de petróleo y gas, así como tiros y túneles en minas, optimizando así la seguridad y eficiencia en su diseño y operación. Las componentes de un modelo geomecánico son:

1. **La caracterización de propiedades del macizo y/o suelos:** Incluye la determinación de parámetros como resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, cohesión y ángulo de fricción interna. Estos datos se obtienen mediante ensayos de laboratorio y pruebas *in situ*.
2. **El estado de esfuerzos in situ:** Evaluación de los esfuerzos tectónicos y de sobrecarga presentes en la formación geológica, los cuales influyen en el comportamiento mecánico del terreno.
3. **La presión de poro:** Medición de la presión de los fluidos dentro de los poros de las rocas, factor que afecta la estabilidad y resistencia del macizo rocoso.
4. **La Geometría y estructura geológica:** Mapeo de fallas, fracturas, capas y otras discontinuidades que puedan influir en la integridad de las estructuras proyectadas.

C. **MODELO GEOTÉCNICO:** Este describe cómo los materiales geológicos como suelos y rocas responden a diversas condiciones de carga y estrés. Este tipo de modelo es esencial en campos como la ingeniería civil, la minería y la exploración de hidrocarburos, ya que permite predecir y analizar la estabilidad y deformación de estructuras geológicas y artificiales. Las componentes clave de un modelo de comportamiento geotécnico son:

1. **Las propiedades mecánicas de los materiales:** Incluyen parámetros como la resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad, la cohesión y el ángulo de fricción interna. Estos datos se obtienen mediante ensayos de laboratorio y pruebas *in situ*.
2. **El estado de esfuerzos *in situ*:** Evaluación de las tensiones naturales presentes en el terreno debido a factores geológicos y tectónicos.
3. **Las condiciones de contorno y cargas aplicadas:** Consideración de las fuerzas externas e internas que afectan al sistema geológico, como el peso de estructuras, presión de fluidos y cambios térmicos.
4. **El comportamiento tenso-deformacional:** Análisis de cómo los materiales se deforman y fluyen bajo diferentes condiciones de carga, incluyendo comportamientos elásticos, plásticos y viscoelásticos.

3.2 CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA

Los macizos rocosos, al ser medios discontinuos, exhiben un comportamiento geomecánico complejo. Este comportamiento puede analizarse y clasificarse según su idoneidad para diversas aplicaciones. Con este propósito, se desarrollaron las clasificaciones geomecánicas, que proporcionan parámetros basados en la observación directa de las características de los macizos rocosos.

3.3 CLASIFICACIÓN RMR (ROCK MASS RATING)

Bieniawski (1976) desarrolló una clasificación geomecánica que integraba el índice RQD de Deere (1964) con otros factores como la presencia de agua y la alteración de las fracturas, para evaluar el comportamiento del macizo rocoso. Esta fue la primera clasificación en proporcionar datos cuantitativos, incluyendo ángulos de fricción y tiempos de soporte para claros activos.

González de Vallejo et al. (2002) definieron que los parámetros que se consideran en la clasificación de RMR son:

- Resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta.
- Designación de la calidad de la roca (RQD).
- Espaciamiento de las discontinuidades.
- Condiciones de las discontinuidades.
- Condiciones hidrogeológicas.

3.4 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAXIAL DE LA ROCA

Este parámetro lo obtenemos con una metodología que se desarrolla en campo en cada estación de toma de datos para la clasificación de un macizo rocoso, como herramienta principal implementamos el martillo de Schmidt, también conocido como esclerómetro (Figura 3.1)

Antes de comenzar las mediciones, es esencial verificar la calibración del martillo de Schmidt utilizando un yunque de referencia, lo que asegura un funcionamiento correcto del dispositivo y la obtención de lecturas precisas. Durante la realización de los impactos, se deben efectuar una serie de mediciones en diferentes puntos de la superficie preparada. Según las recomendaciones de la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM), es aconsejable registrar al menos 20 valores de rebote en cada área de ensayo.

De los valores obtenidos se descartan los 5 valores más bajos y se calcula el promedio de los otros 15 valores restantes, a esto se le conoce como índice de rebote, y representa la dureza superficial de la roca. Como trabajo de gabinete, estos valores se analizan en una gráfica la cual relaciona este valor con la resistencia a la compresión uniaxial de la roca (Figura 3.2).



Figura 3.1; - Martillo de Schmidt o Esclerómetro.

3.5 RQD (ROCK QUALITY DESIGNATION)

Esta es la metodología que se implementa para representar la calidad de la roca aun cuando no se tiene testigos de barrenación como es el caso de la presente tesis. Se implementa una fórmula en la que se contemplan todas las discontinuidades que se tienen en un metro cúbico, posteriormente se clasifica en una escala de 1 a 100 el índice de calidad de la roca (Tabla 3.1).

$$RQD = 115 - 33 \times J_v \quad (1)$$

J_v es el resultado de la suma de todas las discontinuidades que se encuentran en el metro cúbico.

Resistencia al corte de las discontinuidades de la roca

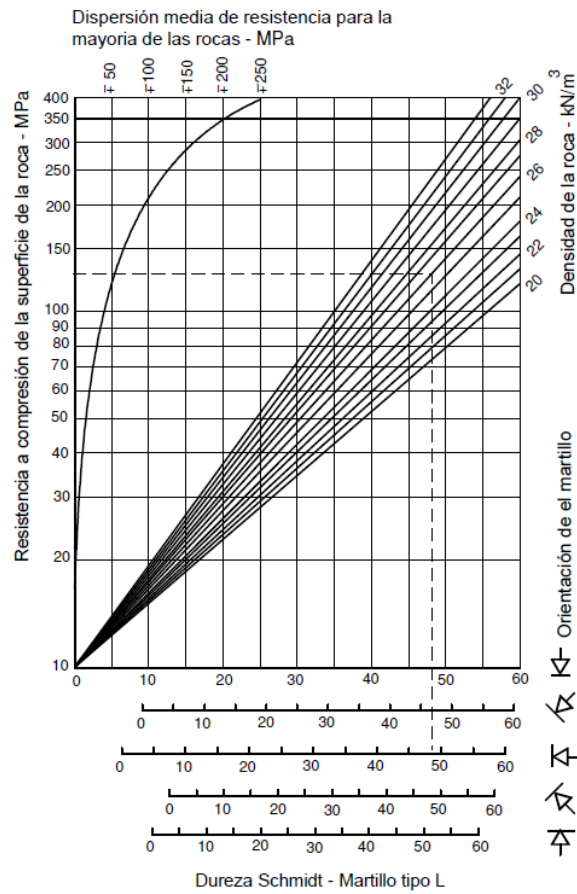


Figura 3.2; - Gráfico de Miller para la determinación de la resistencia a la compresión simple.

Tabla 3.1; -Índice de calidad de la roca (Tomado de González de Vallejo et al., 2002).

ÍNDICE DE CALIDAD RQD (%)	CALIDAD	VALORACIÓN
0-25	Muy mala	3
25-50	Mala	8
50-75	Regular	13
75-90	Buena	17
90-100	Excelente	20

3.6 CONDICIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES

Una superficie o también conocido como plano de discontinuidad en un macizo rocoso condiciona de forma definitiva las propiedades y la resistencia, así como también su comportamiento deformacional e hidráulico. Los planos de discontinuidad imprimen un carácter discontinuo y anisótropo a todos los macizos rocosos, lo que les aporta una característica que recae en un comportamiento débil, lo cual impacta en la dificultad de hacer un análisis del comportamiento mecánico para el desarrollo de las obras civiles.

Su reconocimiento, caracterización y descripción son parámetros fundamentales para comprender el comportamiento de un macizo rocoso, ya sea que hablemos del comportamiento mecánico o hidrogeológico.

Existen 4 parámetros fundamentales a reconocer durante el análisis de discontinuidades, estos son: longitud de las discontinuidades, abertura, rugosidad y relleno.

3.7 LONGITUD DE LAS DIACLASAS

González de Vallejo (2002) definió que la separación entre diaclasas influye directamente en el comportamiento total del macizo rocoso y determina el tamaño de los bloques de matriz rocosa que conforman las diferentes familias. Si en un macizo rocoso tenemos que el espaciado entre fracturas es muy pequeño, la resistencia del macizo rocoso desciende de una forma importante, pudiendo comportarse en un caso muy extremo como un material granular sin cohesión.

Para la evaluación de este parámetro se utilizan los criterios designados en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2.; - Valores para la clasificación de la separación de las diaclasas (Tomado de González de Vallejo et al., 2002).

DESCRIPCIÓN	ESPACIADO DE LAS JUNTAS	TIPO DE MACIZO ROCOSO	VALORACIÓN
MUY SEPARADAS	>2 m	Sólido	20
SEPARADAS	0.6-2 m	Masivo	15
MODERADAMENTE JUNTAS	200-600 mm	En bloques	10
JUNTAS	60-200mm	Fracturado	8
MUY JUNTAS	< 60 mm	Machacado	5

3.8 ABERTURA DE LAS DISCONTINUIDADES

Se define como la distancia que está separada una pared con respecto a otra de las diaclasas, cuando no existe un relleno. Este es un parámetro que depende mucho de la zona en la que se encuentra el macizo rocoso. En superficie, la apertura de las diaclasas puede ser mucho más notoria y a medida que la profundidad aumenta la apertura de las diaclasas puede llegar a un punto en el que se puedan cerrar.

Para este parámetro podemos usar el criterio de la Tabla 3.3.

Tabla 3.3; - Clasificación de la apertura de las diaclasas (Tomado de González de Vallejo et al., 2002).

GRADO	DESCRIPCIÓN	SEPARACIÓN DE LAS CARAS	VALORACIÓN
1	Abierta	> 5 mm	0
2	Moderadamente abierta	1-5 mm	1
3	Cerrada	0.1–1 mm	4
4	Muy cerrada	< 0.1 mm	5
5	Ninguna	0	6

3.9 RUGOSIDAD DE LAS DISCONTINUIDADES

Este parámetro está dado por el tipo de superficie que se presenta en una discontinuidad ya que la rugosidad determina la resistencia al corte, mientras más rugosa es la superficie hay una mayor resistencia al desplazamiento tangencial por corte a favor de las discontinuidades. En la Tabla 3.4 se presenta la clasificación de la rugosidad de las discontinuidades propuesta por González de Vallejo et al. (2002).

Tabla 3.4; - Clasificación de la rugosidad en las diaclasas (Tomado de González de Vallejo et al., 2002).

GRADO	DESCRIPCIÓN	VALORACIÓN
1	Muy rugosa	6
2	Rugosa	5
3	Ligeramente rugosa	3
4	Lisa	1
5	Plana (espejo de falla)	0

3.10 RELLENO DE LAS DISCONTINUIDADES

El relleno de las discontinuidades puede ser por diferentes tipos de minerales, acumulación de materiales arcillosos o hasta por materiales rocosos de una naturaleza distinta a la de las paredes; por lo tanto, es de suma importancia definir las características principales del relleno como son: naturaleza, espesor, resistencia al corte y permeabilidad.

Para el análisis de las condiciones de relleno de las discontinuidades del macizo rocoso se puede considerar la referencia de la Tabla 3.5.

Tabla 3.5; - Clasificación para el tipo de relleno presente en las diaclasas (Tomado de González de Vallejo et al., 2002).

GRADO	DESCRIPCIÓN	VALORACIÓN
1	Blando > 5 mm	0
2	Blando < 5 mm	2
3	Duro > 5 mm	2
4	Duro < 5 mm	4
5	Ninguno	6

3.11 ALTERACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES

Este parámetro se refiere al grado de alteración que ha sufrido la superficie por factores que pueden ser tanto químicos, geológicos o climáticos. Su escala de clasificación va desde una superficie no alterada hasta una superficie altamente alterada, donde podemos encontrar materiales con mucho intemperismo o meteorización. La Tabla 3.6 muestra los valores que se asignan según el grado de alteración.

Tabla 3.6; - Clasificación de las diaclasas según su grado de alteración (Tomado de González de Vallejo et al., 2002).

GRADO	DESCRIPCIÓN	VALORACIÓN
1	Descompuesta	0
2	Muy alterada	1
3	Moderadamente alterada	3
4	Ligeramente alterada	5
5	No alterada	6

3.12 CONDICIONES HIDROGEOLÓGICAS

Este parámetro principalmente evalúa la influencia de agua en el macizo rocoso bajo el criterio de la clasificación RMR, ya que la influencia de agua puede reducir de gran manera la resistencia de los materiales, facilitar el desplazamiento de bloques y afectar de manera general a la estructura de un macizo rocoso.

Algunos de los aspectos importantes a evaluar son: a) cantidad de agua presente y, b) la continuidad del flujo en el macizo rocoso; es por eso por lo que los criterios de clasificación de este parámetro van desde completamente seco hasta flujo intenso de agua (Tabla 3.7).

Tabla 3.7; - Valores de la clasificación del macizo rocoso según las condiciones hidrogeológicas (Tomado de González de Vallejo et al., 2002).

CAUDAL POR 10 M DE TÚNEL	RELACIÓN PRESIÓN AGUA- TENSIÓN PRINCIPAL MAYOR	DESCRIPCIÓN	VALORACIÓN
NULO	0	Seco	15
< 10 LITROS/MIN	<0.1	Ligeramente húmedo	10
10-25 LITROS/MIN	0.1 – 0.2	Húmedo	7
25-125 LITROS/MIN	0.2 – 0.5	Goteando	4
> 125 LITROS/MIN	> 0.5	Fluyendo	0

Una vez que se tiene la evaluación de los distintos parámetros, se hace una suma de los resultados con la que podemos obtener el valor de RMR. González de Vallejo et al., (2002) designaron valores de cohesión y ángulo de rozamiento de las rocas basándose en la evaluación clasificatoria RMR que se le otorga a un macizo rocoso (Tabla3.8).

Para un mayor valor de RMR las condiciones de cohesión aumentan y el ángulo de rozamiento crece, dando esto una mejor estabilidad a un macizo rocoso.

Tabla 3.8; - Clasificación de los valores de RMR y valores de cohesión y ángulo de rozamiento (González de Vallejo et al., 2002).

CLASE	CALIDAD	VALORACIÓN RMR	COHESIÓN	ÁNGULO DE ROZAMIENTO
I	Muy buena	100-81	$>4 \text{ kg/cm}^2$	$>45^\circ$
II	Buena	80-61	$3-4 \text{ kg/cm}^2$	$35^\circ - 45^\circ$
III	Media	60-41	$2-3 \text{ kg/cm}^2$	$25^\circ - 35^\circ$
IV	Mala	40-21	$1-2 \text{ kg/cm}^2$	$15^\circ - 25^\circ$
V	Muy mala	<20	$<1 \text{ kg/cm}^2$	$<15^\circ$

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS

4.1 CLASIFICACIÓN RMR PARA LA DETERMINACIÓN DE ZONAS HOMOGÉNEAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO

Con base en 6 estaciones de análisis (figura 4.1) se determinaron los valores de RMR para las unidades litológicas de composición arcillosa, rocas carbonatadas intercaladas con arcilla y las rocas carbonatadas.

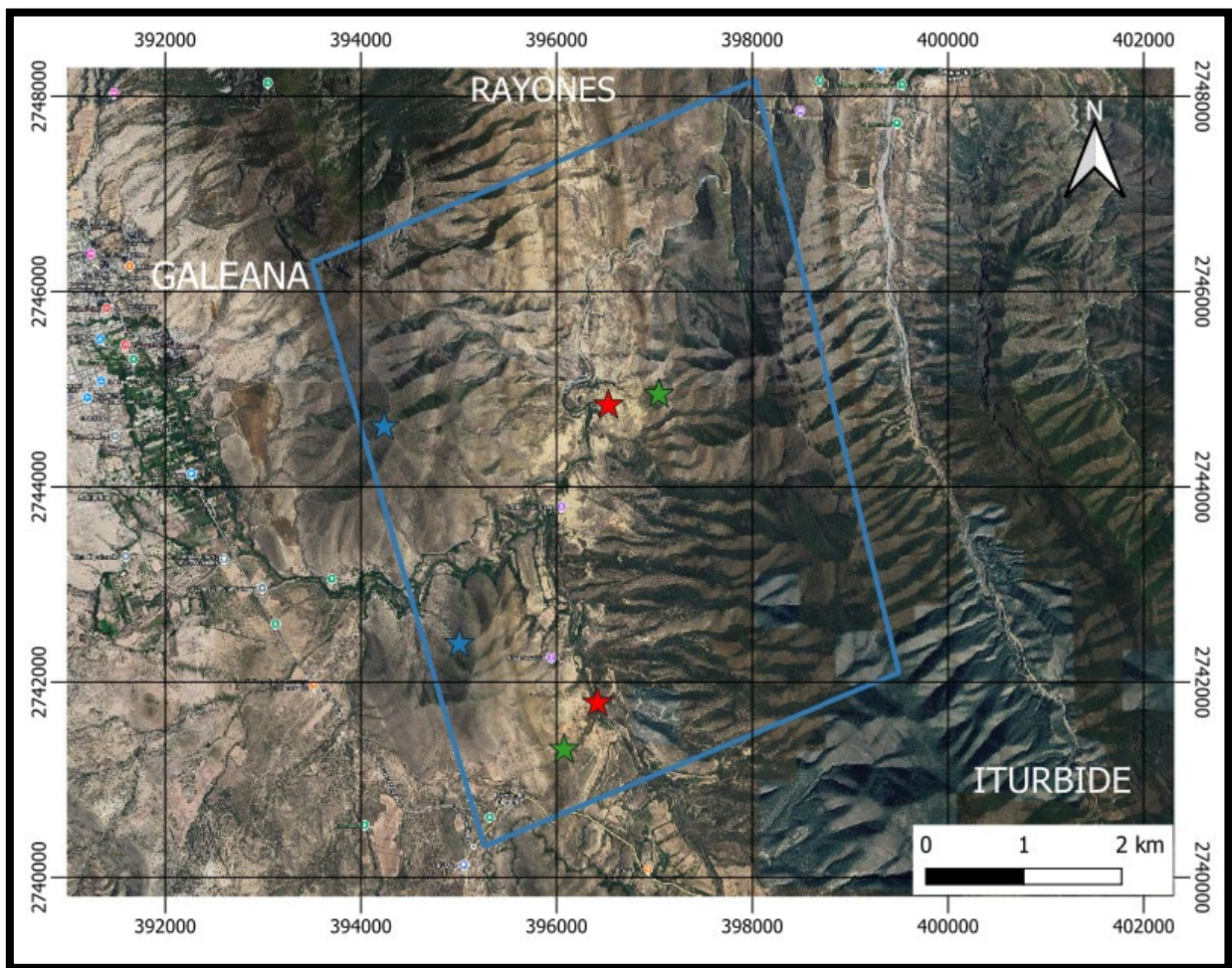


Figura 4.1; - Mapa de localización de las distintas estaciones en las que se estuvieron recabando los datos necesarios para la clasificación RMR, estrellas rojas corresponden a las estaciones donde las rocas son arcillosas, estrellas verdes son las estaciones donde se recabaron datos de roca caliza- arcillosa, estrellas azules son las estaciones que se tomaron en roca caliza.

4.1.1 FORMACIÓN TAMAULIPAS INFERIOR

La Formación Tamaulipas Inferior está compuesta por calizas masivas con espesores en algunos sectores de estratificación de más de 2m. Presenta una resistencia a la compresión uniaxial de 250 MPa, lo que indica que su competencia a la compresión es excelente pues es el valor más alto como referencia. En cuanto al índice de calidad de la roca (RQD), los valores oscilan entre 100 % y 90 %, reflejando una roca de excelente calidad, clasificación RMR con un valor de 98 de clase I, muy buena (Tabla 4.1 y Figura 4.2).

Tabla 4.1; - Clasificación RMR (Formación Tamaulipas Inferior).

Formación Tamaulipas Inferior		
Resistencia a la compresión uniaxial	250 MPa	Valor = 15
Índice de calidad de la roca (RQD)	90-100%	Valor = 20
Espaciamiento entre discontinuidades	2.00 – 0.6m	Valor = 20
Flujo de agua	seco	Valor = 15
Estado de las discontinuidades		
Continuidad	>20m	Valor = 6
Separación de plano de juntas	<0.1mm	Valor = 5
Rugosidad de los planos	Muy Rugosa	Valor = 6
Relleno de las juntas	Duro (< 5mm)	Valor = 5
Grado de alteración	Inalterado	Valor =6
Valor de RMR		98

4.1.2 FORMACIÓN TAMAULIPAS SUPERIOR

La Formación Tamaulipas Superior está compuesta por calizas macizas con bandas de pedernal. Presenta una resistencia a la compresión uniaxial de 250 MPa, lo que indica una roca de alta competencia, una propiedad muy destacable es su rugosidad entre discontinuidades. En cuanto al índice de calidad de la roca (RQD), los valores oscilan entre 100 % y 90 %, reflejando una roca de excelente calidad, clasificación RMR con un valor de 93 de clase I, muy buena (Tabla 4.2 y Figura 4.2b).

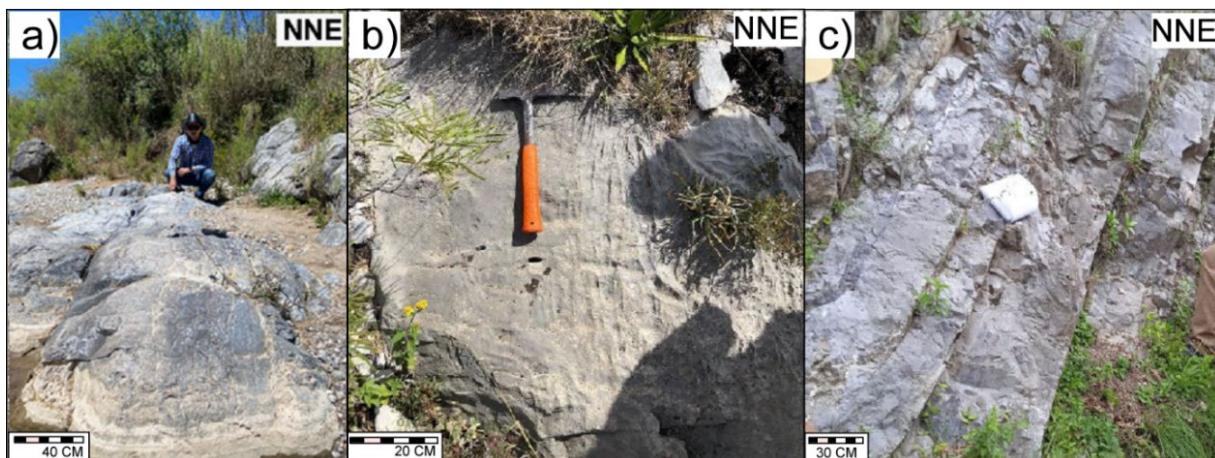


Figura 4.2; - a) Afloramiento de la Formación Tamaulipas Inferior; b) Calizas de la Formación Tamaulipas Superior con estructuras de karren y, c) afloramiento en la Formación Cuesta del Cura, calizas estratificadas con alternancias de bandas de pedernal.

Tabla 4.2; - Clasificación RMR para la Formación Tamaulipas Superior en el área de estudio.

Formación Tamaulipas Superior		
Resistencia a la compresión uniaxial	250 MPa	Valor = 15
Índice de calidad de la roca (RQD)	90-100%	Valor = 20
Espaciamiento entre discontinuidades	2m– 0.6 m	Valor = 20
Flujo de agua	seco	Valor = 15
Estado de las discontinuidades		
Continuidad	>20m	Valor = 0
Separación de plano de juntas	<0.1mm	Valor = 5
Rugosidad de los planos	Muy Rugosa	Valor = 6
Relleno de las juntas	Ninguno	Valor = 6
Grado de alteración	Inalterado	Valor =6
Valor de RMR		93

4.1.3 FORMACIÓN CUESTA DEL CURA

La Formación Cuesta del Cura está compuesta por calizas macizas con bandas de pedernal y capas delgadas a laminares de lutitas. Presenta una resistencia a la compresión uniaxial de 240 MPa, lo que indica una roca de alta competencia. En cuanto al índice de calidad de la roca (RQD), los valores oscilan entre 75 % y 90 %, reflejando una roca de excelente calidad, clasificación RMR con un valor de 81, correspondiendo a la clase I de muy buena calidad (Tabla 4.3 y Figura 4.2c).

Tabla 4.3; - Clasificación RMR de la Formación Cuesta del Cura en el área de estudio.

Formación Cuesta del Cura		
Resistencia a la compresión uniaxial	240 MPa	Valor = 15
Índice de calidad de la roca (RQD)	75-90%	Valor = 17
Espaciamiento entre discontinuidades	0.6– 0.2 m	Valor = 15
Flujo de agua	seco	Valor = 15
Estado de las discontinuidades		
Continuidad	>20m	Valor = 0
Separación de plano de juntas	<0.1mm	Valor = 1
Rugosidad de los planos	Muy Rugosa	Valor = 6
Relleno de las juntas	Ninguno	Valor = 6
Grado de alteración	Inalterado	Valor =6
Valor de RMR		81

4.1.4 FORMACIÓN AGUA NUEVA

La Formación Agua Nueva se compone principalmente de margas intercaladas con horizontes arcillosos ricos en materia orgánica. Los valores de resistencia a la compresión uniaxial alcanzan los 59 MPa. En cuanto al índice de calidad de la roca (RQD) en nuestras estaciones de muestreo, la calidad es relativamente baja, con valores que oscilan entre el 25 % y el 50 %. Sumando los otros parámetros que se señalan en la Tabla 4.10, tenemos un valor de RMR de 35, lo cual hace que esta sea una unidad clase IV, clase mala (Tabla 4.4 y Figura 4.3a).

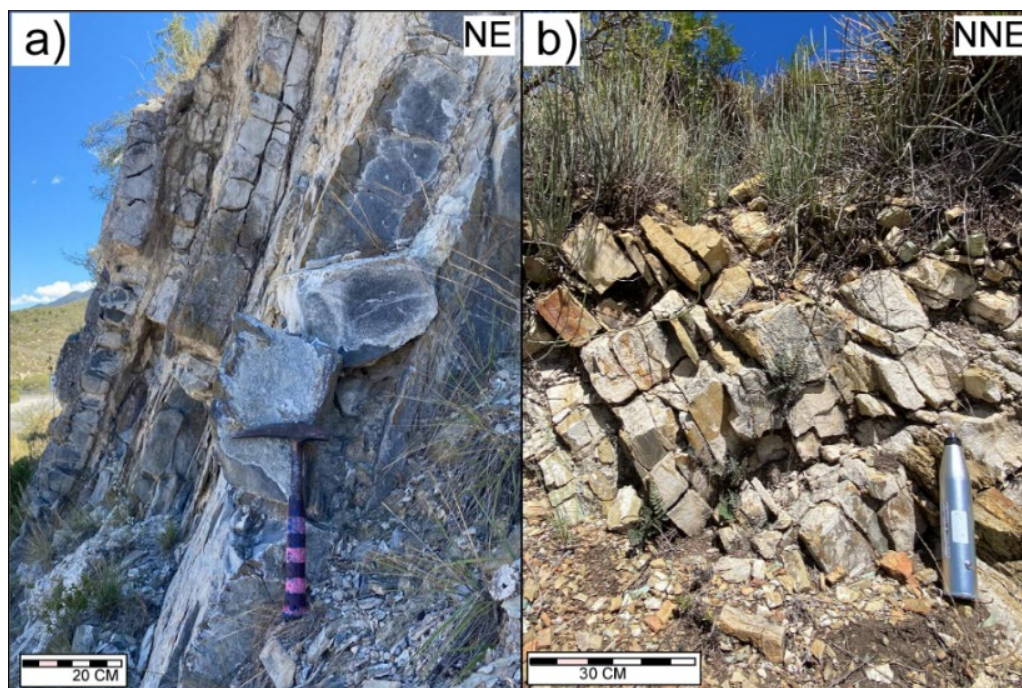


Figura 4.3; - a) Afloramiento de la Formación Agua Nueva donde se aprecia la intercalación de los horizontes de margas y los horizontes arcillosos; b) Afloramiento de la Formación San Felipe con horizontes de caliza silicificada, arenisca de grano fino, limolitas y lutitas con un alto grado de meteorización.

Tabla 4.4; - Clasificación RMR de la Formación Agua Nueva en el área de estudio.

Formación Agua Nueva		
Resistencia a la compresión uniaxial	59 MPa	Valor = 7
Índice de calidad de la roca (RQD)	25-50%	Valor = 6
Espaciamiento entre discontinuidades	<0.06m	Valor = 5
Flujo de agua	Seco	Valor = 7
Estado de las discontinuidades		
Continuidad	10-20 m	Valor = 1
Separación de plano de juntas	0.1 – 1.0mm	Valor = 3
Rugosidad de los planos	Ondulada	Valor = 1
Relleno de las juntas	Relleno Blando	Valor = 2
Grado de alteración	Moderadamente Alterada	Valor =3
Valor de RMR		35

4.1.5 FORMACIÓN SAN FELIPE

La Formación San Felipe se compone principalmente de rocas clásticas como arenisca de grano fino, limolita, lutita y caliza silicificada intercaladas con horizontes arcillosos bentoníticos. Los valores de resistencia a la compresión uniaxial alcanzan los 66 MPa. En cuanto al índice de calidad de la roca (RQD) en nuestras estaciones de muestreo, la calidad también es relativamente baja, con valores que oscilan entre el 25 % y el 50 %, esto junto con los valores de la Tabla 4.5 nos da un resultado de clasificación RMR de 48, por lo que la roca es de clase III, media (Tabla 4.5 y Figura 4.3).

Tabla 4.5; - Clasificación RMR para la Formación San Felipe en el área de estudio.

Formación San Felipe		
Resistencia a la compresión uniaxial	66 MPa	Valor = 7
Índice de calidad de la roca (RQD)	25-50%	Valor = 6
Espaciamiento entre discontinuidades	0.06-0.2 m	Valor = 8
Flujo de agua	Seco	Valor = 15
Estado de las discontinuidades		
Continuidad	10-20 m	Valor = 1
Separación de plano de juntas	0.1 – 1.0mm	Valor = 3
Rugosidad de los planos	Ligeramente Rugosa	Valor = 3
Relleno de las juntas	Relleno Blando	Valor = 2
Grado de alteración	Moderadamente Alterada	Valor =3
Valor de RMR		48

4.1.6 FORMACIÓN MÉNDEZ

La Formación Méndez presenta de manera general rocas clásticas de grano fino doblemente foliadas, en donde los valores a la compresión uniaxial son los más bajos recabados (35MPa). En cuanto al índice de calidad de la roca, en las estaciones de muestreo la calidad de la roca es bastante baja oscilando entre un 0 y 25 de RQD, el fracturamiento y la foliación son

factores que contribuyen a tener valores tan bajos en esta unidad, la clasificación RMR por ser de un valor de 26 cae en una roca de clase IV de calidad Mala (Tabla 4.6 y Figura 4.4).

Tabla 4.6; - Clasificación RMR para la Formación Méndez en el área de estudio.

Formación Méndez		
Resistencia a la compresión uniaxial	35 MPa	Valor = 4
Índice de calidad de la roca (RQD)	0-25%	Valor = 3
Espaciamiento entre discontinuidades	<0.06 m	Valor = 5
Flujo de agua	Seco	Valor = 7
Estado de las discontinuidades		
Continuidad	>20 m	Valor = 1
Separación de plano de juntas	0.10 – 1mm	Valor = 3
Rugosidad de los planos	Suave	Valor = 0
Relleno de las juntas	Relleno Blando	Valor = 2
Grado de alteración	Muy Alterada	Valor =1
Valor de RMR		26

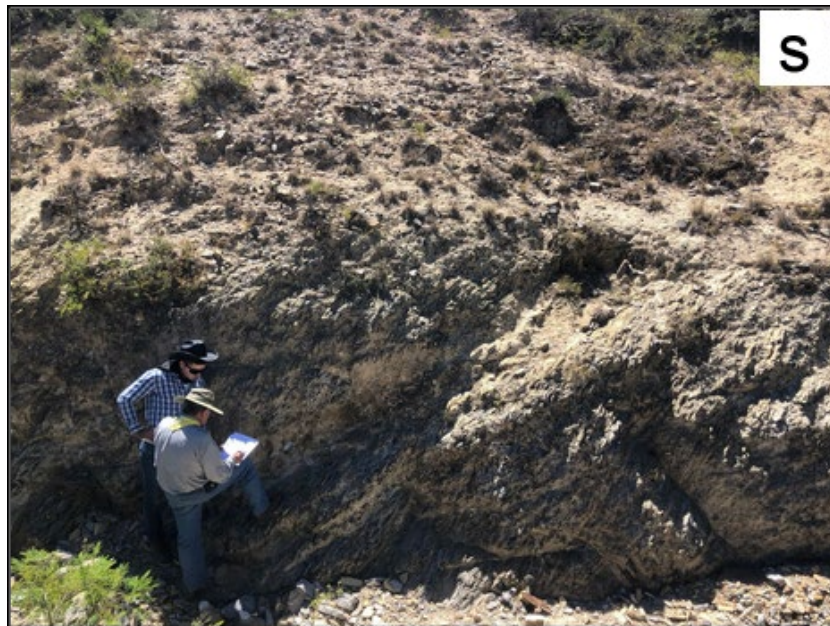


Figura 4.4; - Afloramiento de lutitas masivas alteradas de la Formación Méndez.

Nota: Cabe aclarar que la clasificación se tomó en condiciones donde el agua freática no estuvo presente. En el caso de las unidades donde los valores de la clasificación RMR están en el límite, según la Tabla 3.8, en condiciones donde el agua se hace presente por condiciones climáticas, los valores decaen a la clasificación de menor valor.

4.2 CLASIFICACIÓN DE ZONAS HOMOGÉNEAS

La clasificación de zonas homogéneas es un aspecto clave en la elaboración de cartas de riesgos geológicos, ya que permite analizar y sectorizar el área de estudio según sus características geológicas, estructurales y del sitio. Chapa Guerrero (1993) destaca la importancia de este proceso para evaluar correctamente los riesgos en una zona determinada.

En este sentido, varios autores han señalado los beneficios de esta metodología. Tiedemann (1983), Heitfeld (1992) y Prinz (1992) sostienen que delimitar zonas homogéneas facilita la identificación de las propiedades mecánicas del suelo, así como también del macizo rocoso. Esto permite comprender mejor la influencia del macizo en la estabilidad de taludes durante la construcción de túneles y de manera general en cualquier proyecto de construcción.

Un aspecto importante para destacar es la influencia que pueden tener las obras civiles en las propiedades de un macizo rocoso, pues en muy poco tiempo pueden llegar a alterar su estado tensional. Como resultado, se generan interacciones entre la redistribución de esfuerzos naturales y las estructuras, lo que puede afectar la estabilidad y seguridad de las construcciones (González de Vallejo et al., 2002).

Por lo tanto, para la identificación de zonas homogéneas en nuestra área de estudio, hemos analizado los resultados de la clasificación geomecánica en diferentes sitios, así como también los resultados del análisis estructural. Este enfoque nos da la capacidad de delimitar 7 zonas homogéneas, las cuales representamos en un mapa (ANEXO II. Mapa de Zonas Homogéneas), estas distintas zonas tienen características geológicas y geotécnicas particulares, así como también estructurales.

Es importante señalar que, si bien existe una variedad amplia de criterios para definir y clasificar las zonas homogéneas, en el presente trabajo se aplica la metodología utilizada por Chapa Guerrero (1993), donde se consideran parámetros como:

- Análisis estructural,
- Litología y
- Geomecánica.

4.3 CLASIFICACIÓN DE ZONAS HOMOGÉNEAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO

Para la clasificación de Zonas Homogéneas (ZH) en el área de estudio, se tomó como base la metodología de Chapa Guerrero (1993 y 1996), determinada para el Área Metropolitana de Monterrey. Aquí se describen las diferentes Zonas Homogéneas para la región de Monterrey, de acuerdo con el tipo de rocas y sus facies:

Z.H. 1: Rocas carbonatadas: las Formaciones que la integran son: Cupido, La Peña y Aurora.

Z.H. 2: Rocas carbonatadas con intercalaciones de rocas margosas y arcillosas, integradas por las Formaciones: Cuesta del Cura, Agua Nueva y San Felipe.

Z.H. 3: Rocas margosas y arcillosas, integrada por la Formación Méndez.

Es importante aclarar que, para el área de estudio de la presente tesis, se determinaron las 3 Zonas Homogéneas antes mencionadas, con la variante de que en la ZH 1 se integra con las Formaciones: Tamaulipas Inferior, La Peña, Tamaulipas Superior y se incluye aquí la Formación Cuesta del Cura con facies carbonatadas.

Z.H. 1: Rocas carbonatadas: las Formaciones que la integran son: Tamaulipas Inferior, La Peña, Tamaulipas Superior y Cuesta del Cura,

Z.H. 2: Rocas carbonatadas con intercalaciones de rocas margosas y arcillosas, integradas por las Formaciones: Agua Nueva y San Felipe.

Z.H. 3: Rocas margosas y arcillosas, integrada por la Formación Méndez.

4.3.1 ZONA HOMOGÉNEA 1 (ZH I): ROCA CALIZA

En nuestra zona de estudio, las unidades litológicas compuestas predominantemente por caliza que constituyen la Zona Homogénea 1 son: Formación Tamaulipas Inferior, La Peña,

Formación Tamaulipas Superior y Formación Cuesta del Cura. Estas formaciones conforman las rocas que tienen una respuesta geomecánica con un índice de calidad más alto; cabe aclarar que la Formación La Peña, al ser una unidad compuesta por intercalaciones de caliza arcillosa y lutitas, no tiene las mismas propiedades geomecánicas, pero es muy poco representativa por presentar un espesor total muy delgado en la secuencia (10- 15 m), se queda formando parte de esta Zona Homogénea al encontrarse en la parte central de estas formaciones.

Estructuralmente, esta ZH comprende el flanco trasero de un anticlinal en donde la secuencia estratigráfica se encuentra en posición normal; es decir, las rocas más jóvenes sobreyacen a las más antiguas. Cabe señalar que esta ZH tiene una complejidad más alta a la hora de hacer la caracterización, pues tiene una densa capa de materia orgánica. En la Figura 4.5 se encuentra la relación estructural de las capas en una proyección estereográfica.

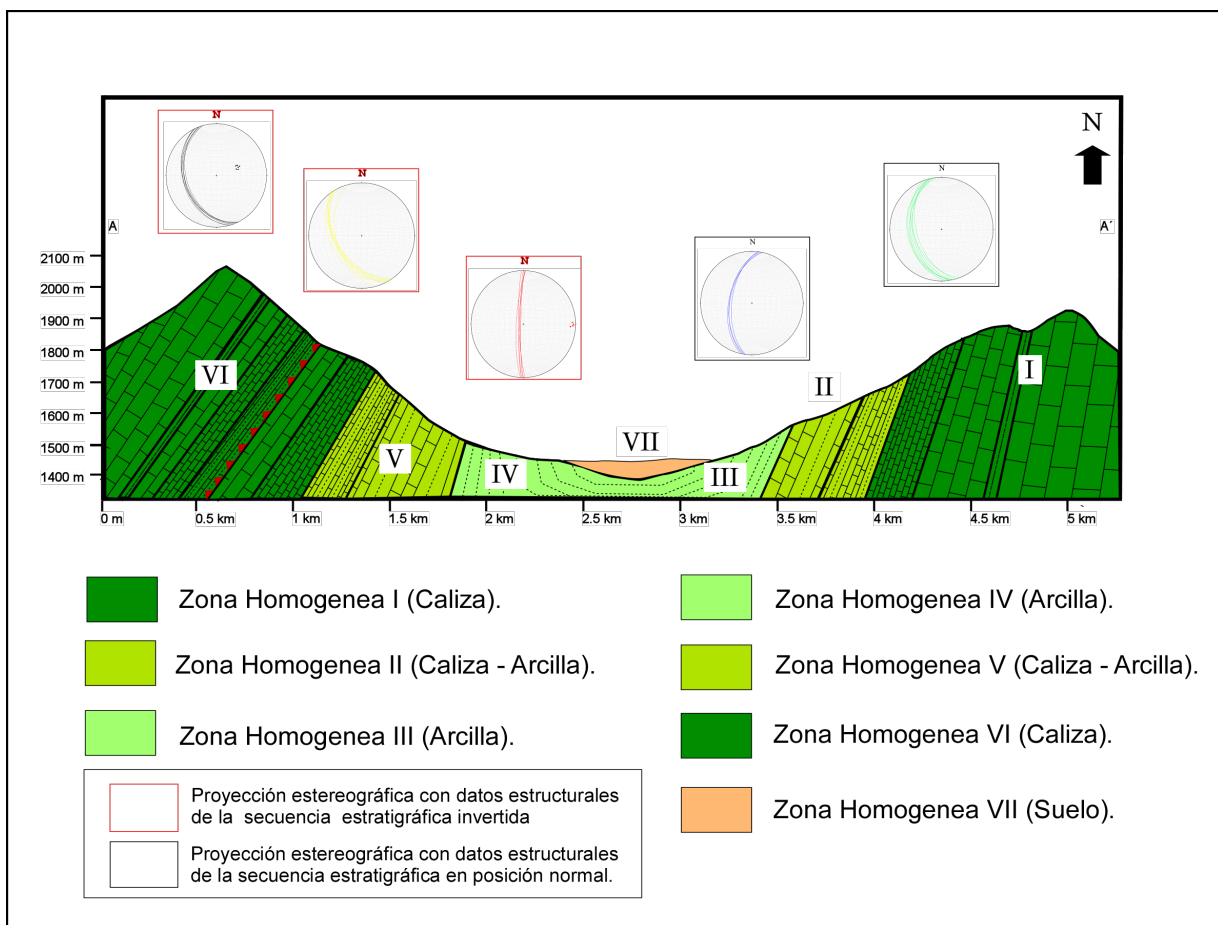


Figura 4.5; - Sección geológica correspondiente al mapa de Zonas Homogéneas, con la relación estructural.

4.3.2 ZONA HOMOGÉNEA 2 (ZH II): ROCA CALIZA – ARCILLOSA

La Zona Homogénea ZH II está conformada por las formaciones Agua Nueva y San Felipe, dos unidades que debido a su intercalación de margas con arcillas baja de manera considerable parámetros clave para un valor alto en la clasificación RMR, como es el índice RQD, así como también su resistencia a la compresión uniaxial. Estructuralmente, como se muestra en la Figura 4.5, se encuentran en el flanco trasero de un anticlinal y su relación estratigráfica se encuentra en posición normal.

4.3.3 ZONA HOMOGÉNEA 3 (ZH III): ROCAS ARCILLOSAS

La Zona Homogénea ZH III comprende únicamente a la Formación Méndez, la cual en la zona de estudio corresponde a horizontes de lutita masivos. Si bien es muy importante tener una buena clasificación de esta zona, gran parte de la obra de construcción de la autopista interserrana se desplantará en esta unidad. Estructuralmente, como se muestra en la Figura 4.5, la Zona Homogénea ZH3 forma parte del núcleo de un sinclinal, donde las capas de la Formación Méndez se encuentran en posición normal.

4.3.4 ZONA HOMOGÉNEA 4 (ZH IV): ROCA ARCILLOSA

La Zona Homogénea ZH IV está constituida por rocas arcillosas de la formación Méndez, en contraste con la Zona Homogénea ZH III, esta tiene un carácter estructural distinto, pues se encuentra invertida la sección; es decir, las rocas más antiguas sobreyacen a las más jóvenes con ángulos que van hasta los 80° de buzamiento de las capas, como se muestra en la Figura 4.5.

4.3.5 ZONA HOMOGÉNEA 5 (ZH V): ROCA CALIZA – ARCILLOSA

Al igual que la Zona Homogénea ZH II, se presentan rocas que tienen una composición de alternancias de caliza y arcilla, conformada por las formaciones Agua Nueva y San Felipe. En este punto, estructuralmente, al igual que la Zona Homogénea ZH IV, la secuencia esta invertida.

4.3.6 ZONA HOMOGÉNEA 6 (ZH VI): ROCA CALIZA

Esta Zona Homogénea ZH VI está constituida por calizas masivas de las formaciones Tamaulipas Inferior, La Peña, Tamaulipas Superior y Cuesta del Cura. Al igual que la Zona Homogénea ZH I, corresponde a rocas de mayor competencia a los procesos de erosión y de una respuesta geomecánica alta. Estructuralmente, como se muestra en la Figura 4.5, la sección se encuentra invertida.

4.3.7 ZONA HOMOGÉNEA 7 (ZH VII): SUELOS

De acuerdo con la metodología de zonificación geotécnica propuesta por Chapa Guerrero (1993), las zonas homogéneas de materiales superficiales se clasifican en cuatro unidades principales: coluvión, derrubio, proluvión y aluvión. Esta clasificación se fundamenta en el origen, mecanismo de transporte y características granulométricas de los depósitos.

Particular mente en el área de estudio esta ZH está constituida por suelo cuaternario, con la predominancia de grandes paquetes de aluviones depositados por la esorrentía de la zona.

4.4 CLASIFICACIÓN DE ZONAS MORFOLÓGICAS

En los sistemas de información geográfica (SIG), un mapa de zonas morfológicas o también conocido como mapa geomorfológico, es aquel que representa y clasifica las formas del relieve considerando factores tales como la litología, la estructura geológica, así como los procesos de meteorización. Su objetivo principal es darnos un contexto tanto de la evolución de las formas del terreno, así como sobre la información espacial para estudios de planificación de evaluación de riesgos naturales, gestión ambiental y planificación territorial.

Realizar un mapa geomorfológico apoyado en SIG, implica la integración de diversas capas de información geográfica, como lo es tratar con los datos de modelos digitales de elevación, datos topográficos y geológicos. Esto nos permite al final tener una representación más precisa de las unidades geomorfológicas, lo cual nos facilita el análisis espacial y la toma de decisiones informadas en diversos ámbitos.

Implementando la metodología de Chapa Guerrero (1993) en nuestra área de estudio, generamos un mapa geomorfológico o de pendientes (ANEXO III), en el cual sectorizamos de

acuerdo con la clasificación de la Tabla 4.7, y también delimitando con la representación de colores a manera de semáforo las pendientes con mayor inclinación.

Tabla 4.7; - Clasificación de las pendientes según su grado de inclinación (Chapa Guerrero, 1993).

Clasificación de pendientes	Ángulo de inclinación (pendiente).
Baja	Entre 0 y 5 grados
Mediana	Entre 5 y 15 grados
Alta	Mayores de 15 grados

4.5 ANÁLISIS CINEMÁTICO Y DETERMINACIÓN DE FACTOR DE SEGURIDAD (FS).

El análisis de la estabilidad de taludes en macizos rocosos fracturados es un proceso fundamental en la ingeniería geotécnica (Geología Aplicada, G.A.), especialmente en zonas montañosas donde las discontinuidades estructurales pueden comprometer la integridad de los cálculos en obras civiles. Este análisis se desarrolla en dos etapas principales:

1. **Análisis cinemático:** Consiste en evaluar la orientación de las discontinuidades presentes en el macizo rocoso para determinar si su disposición geométrica respecto al talud puede generar condiciones desfavorables que propicien inestabilidades. Este estudio se realiza mediante la representación de los datos estructurales en una red estereográfica, permitiendo identificar posibles mecanismos de falla como roturas planas, en cuña o por vuelco.
2. **Análisis de estabilidad mediante métodos de equilibrio límite:** Una vez identificadas las posibles superficies de falla, se procede a cuantificar la estabilidad del talud calculando el factor de seguridad (FS), que es la relación entre las fuerzas resistentes y las fuerzas desestabilizadoras actuantes sobre el talud.

Para realizar el análisis cinemático, es necesario proyectar las orientaciones de las discontinuidades y del talud en una red estereográfica, que es una representación bidimensional de datos tridimensionales. El análisis cinemático permite identificar las condiciones geométricas que pueden conducir a diferentes tipos de fallas en taludes.

4.6 CONO DE FRICCIÓN

El concepto de cono de fricción fue introducido por Talobre (1957) como una herramienta gráfica para representar el ángulo entre una dirección dada de fuerza y la normal a un plano, en función del ángulo de fricción o ángulo de rozamiento del material. Esta representación permite estimar gráficamente la posibilidad de deslizamiento a lo largo de una superficie, bajo la acción de una fuerza activa que puede actuar en cualquier dirección.

En el ámbito del análisis cinemático de estabilidad de taludes, este cono de fricción se proyecta en una red estereográfica en forma de un círculo. Tal como lo desarrolló Markland (1972), dicho círculo se construye desde el borde de la red estereográfica (representando el talud) hacia el centro del círculo de proyección. Así, se establece que cualquier polo de una discontinuidad (plano o línea) cuya orientación se ubique dentro del área delimitada por el círculo del cono de fricción puede ser considerada potencialmente inestable, ya que cumple con la condición geométrica para deslizarse bajo el efecto de la gravedad.

Por lo tanto, el cono de fricción constituye un criterio geométrico esencial para la evaluación preliminar de la estabilidad estructural en macizos rocosos (Figura 4.6), particularmente útil en estudios de campo y análisis estereográficos de posibles fallas planas o en cuña.

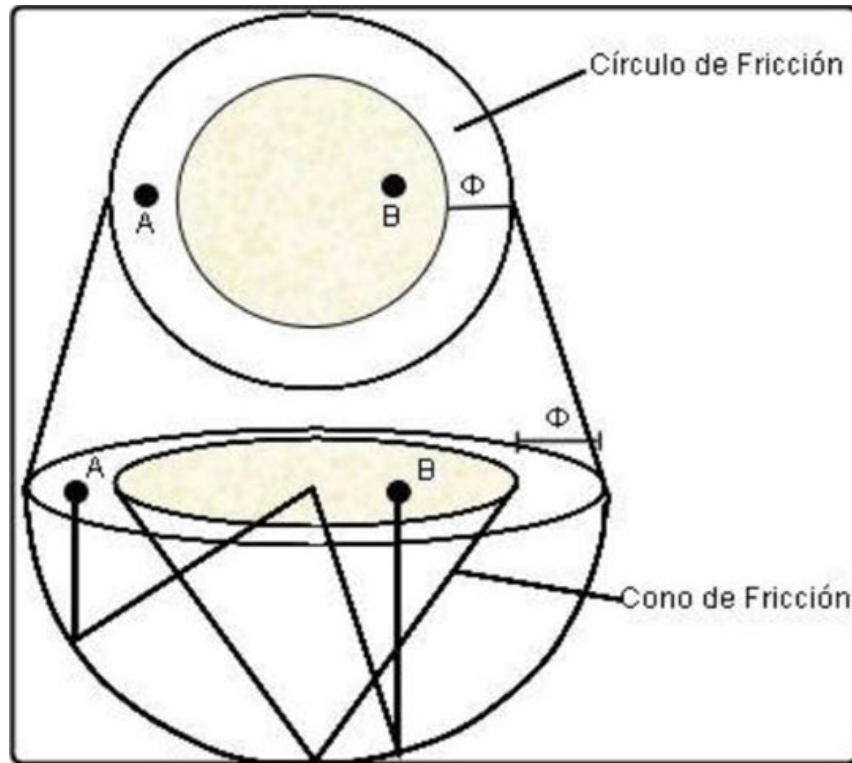


Figura 4.6; - Se muestra la proyección estereográfica del cono de fricción: la intersección del cono con el hemisferio delimita el ángulo de fricción ϕ . El punto B, cuya proyección queda dentro de dicho círculo, presenta una inclinación menor que ϕ y, por tanto, permanece cinemáticamente estable. En contraste, el punto A, más inclinado, proyecta fuera del círculo de fricción y genera condiciones de inestabilidad (modificado de Armas-Zagoya, 2004).

4.7 MECANISMOS DE INESTABILIDAD EN TALUDES Y LADERAS

4.7.1 DESPRENDIMIENTO

Todas las caídas de bloques se inician con un desprendimiento de suelo o roca de una ladera muy empinada, a lo largo de una superficie en la que poco o ningún desplazamiento cortante se desarrolla (Figura 4.7). El material desprendido descende en caída libre, saltando o rodando. Solo cuando la masa desplazada es socavada, las caídas son precedidas por pequeños deslizamientos o movimientos de basculamiento que separan el material de la masa no perturbada (Cruden & Varnes, 1996).

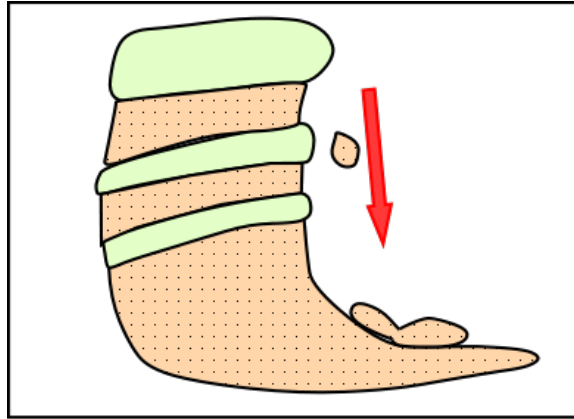


Figura 4.7; - Representación esquemática del proceso cinemático asociado a un desprendimiento, donde bloques individuales se separan y caen libremente desde una pendiente empinada.

4.7.2 DESLIZAMIENTO PLANAR (TRASLACIONAL)

La masa se desplaza a lo largo de una superficie de ruptura plana o suavemente ondulada, superponiéndose a la superficie original del terreno (Figura 4.8). La superficie de ruptura usualmente se orienta según discontinuidades del macizo (fallas, diaclasas, planos de estratificación o contactos entre roca y suelo residual), a lo largo de las cuales ocurre el deslizamiento (Cruden, & Varnes, 1996).

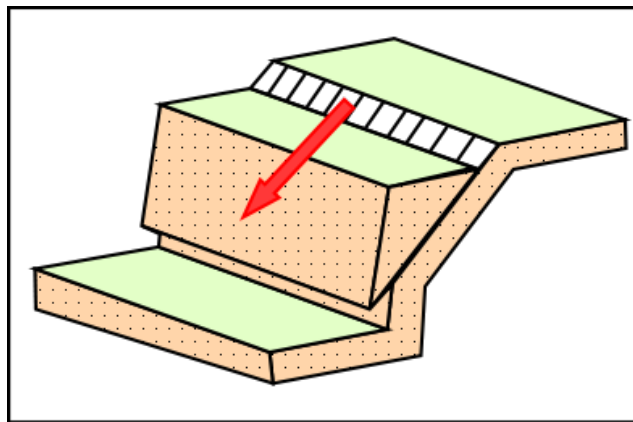


Figura 4.8; - Ilustración conceptual que muestra el comportamiento cinemático característico de un deslizamiento planar, con desplazamiento del material a lo largo de una superficie de debilidad inclinada.

4.7.3 DESLIZAMIENTO EN CUÑA

El deslizamiento en cuña es un tipo de movimiento en el cual el cuerpo del deslizamiento está delimitado por dos planos de discontinuidad que se intersectan entre sí e interceptan la cara de la ladera o talud (Figura 4.9). En consecuencia, la masa se desliza siguiendo la dirección de

la línea de intersección de ambos planos, o el buzamiento (pendiente) de uno de ellos (Hoek, & Bray, 1981).

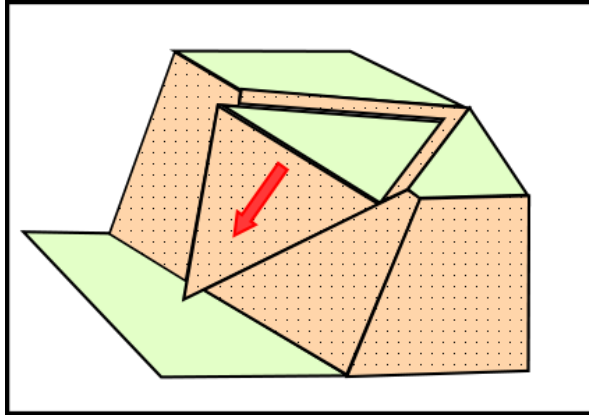


Figura 4.9; - Esquema explicativo que representa la interacción estructural que origina un deslizamiento en cuña, producto de la intersección de dos planos de discontinuidad.

4.7.4 VUELCO (VOLCAMIENTO)

Se denomina volcamiento a un tipo de movimiento en masa en el cual ocurre una rotación, generalmente hacia delante, de uno o varios bloques de roca o suelo alrededor de un punto o pivote en su parte inferior. Este movimiento puede ser inducido solo por la gravedad, por el empuje de masas adyacentes o incluso por la presión de agua y/o hielo en grietas, figura 4.10. (Varnes, 1978)

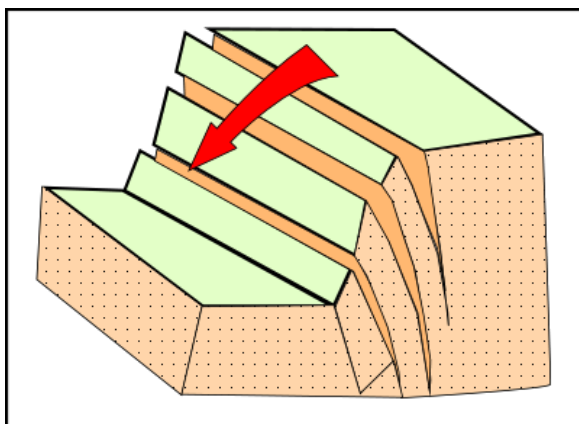


Figura 4.10; - Modelo esquemático que describe el mecanismo de inestabilidad por vuelco, en el que bloques rotan hacia adelante a partir de una base fija por efecto de la gravedad.

4.7.5 DESLIZAMIENTO ROTACIONAL

Estos deslizamientos se mueven a lo largo de superficies de ruptura curvas y cóncavas, con muy poca deformación interna de la masa desplazada. La cabeza del material deslizado se mueve prácticamente en caída vertical, mientras la porción superior de la masa bascula hacia atrás (en dirección al talud original). El escarpe principal resultante es casi vertical y sin soporte, por lo que pueden esperarse movimientos posteriores que provoquen el retroceso (retrogresión) del deslizamiento hacia la zona de la corona, figura 4.11 (Cruden, & Varnes, 1996).

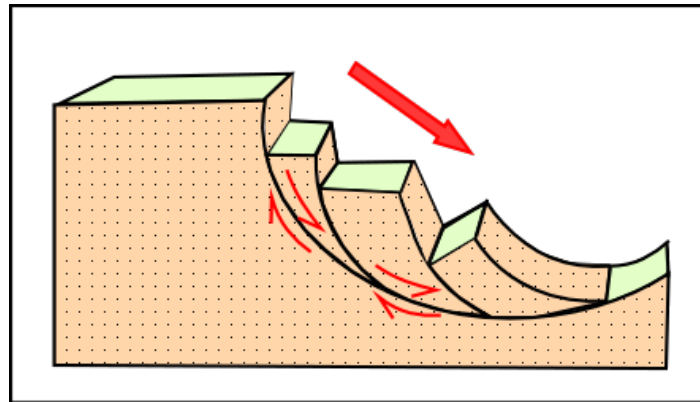


Figura 4.11; - Diagrama simplificado que ejemplifica el desplazamiento de una masa en un deslizamiento rotacional, siguiendo una superficie de ruptura curva típica de materiales cohesivos.

4.7.6 FLUJOS

Los flujos (Figura 4.12), son movimientos continuos en los cuales las superficies de corte internas son casi nulas y por lo general, en épocas de abundante agua, no se preservan teniendo el aspecto de un suelo. La distribución de velocidades dentro de la masa desplazada tiende a asemejarse a la de un líquido viscoso, presentando un comportamiento fluidificado del material durante el movimiento (Cruden, & Varnes, 1996).

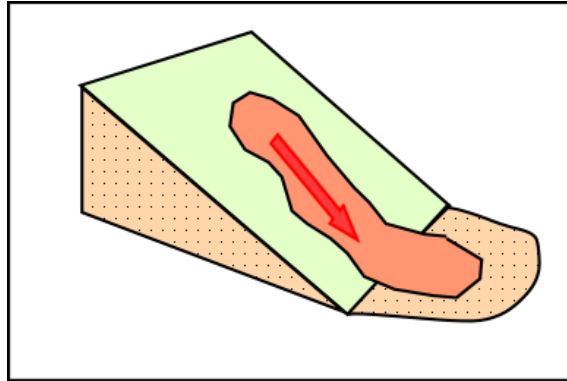


Figura 4.12; - Modelo esquemático que representa la dinámica de un flujo, en el cual el material saturado se moviliza con comportamiento viscoso, generando un desplazamiento caótico y continuo a lo largo de la pendiente.

4.7.7 DESLIZAMIENTOS COMPUESTOS

Algunos deslizamientos presentan superficies de falla que no son ni puramente rotacionales ni puramente planares. Este tipo de fenómeno es denominado *deslizamiento compuesto* según Hutchinson, combinando segmentos curvos y planos en la superficie de ruptura. Por ejemplo, la superficie de ruptura puede desarrollarse a lo largo de planos de plegamiento, intersecciones de múltiples discontinuidades planas, o una combinación de planos curvos y planos de debilidad en la roca. El movimiento sobre una superficie de deslizamiento compuesta típicamente requiere deformación interna adicional, pues no puede ocurrir únicamente mediante deslizamiento rígido de un bloque sin cierta cizalla interna significativa en el cuerpo de la masa (Hutchinson, 1988).

4.8 ANÁLISIS DE TALUDES EN EL ÁREA DE ESTUDIO

Mediante el levantamiento de datos estructurales en la zona, se realizó un análisis cinemático para determinar cuál es el mecanismo de inestabilidad (falla) que se puede desencadenar en diferentes taludes del área de estudio (Figura 4.13).

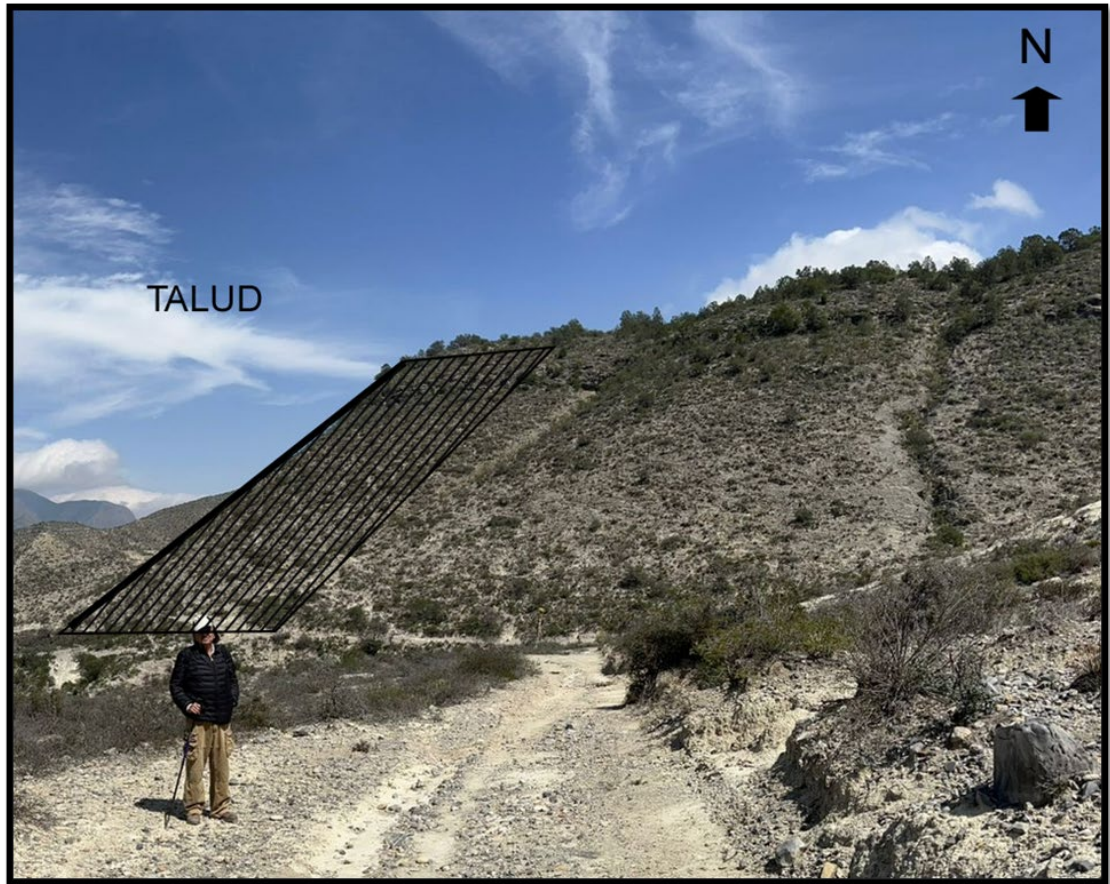


Figura 4.13; - Talud de análisis, las líneas proyectan la dirección relativa de buzamiento de la estratificación.

4.9 CARACTERIZACIÓN DE FRACTURAS

Para la caracterización de fracturas es esencial hacer estaciones para obtener bancos de datos estructurales *in situ* de diferentes puntos del área de estudio y así evaluar de manera general, todas las discontinuidades que se han desarrollado por el acortamiento tectónico en la zona. Con la ayuda de estos bancos de datos estructurales y los datos de la cartografía geológica pudimos determinar mediante una sección estructural (Figura 4.14) que, particularmente, en esta zona nos encontramos en el núcleo de un sinclinal. Twiss y Moores (1992) presentan un modelo para entender de forma geométrica como se desarrollan las fracturas y la relación que existe entre la zona que se deforma, sin dejar de resaltar que siempre los mecanismos de plegamiento están condicionados fuertemente por el tipo de litología y el tipo de pliegue según se propaga la cizalla.

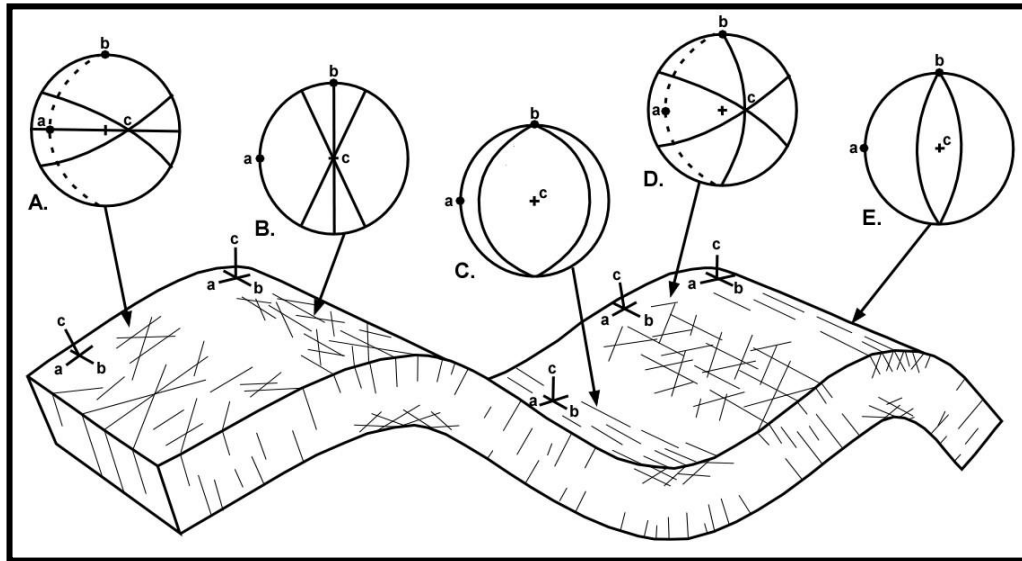


Figura 4.14; -Fracturas asociadas con pliegues. La proyección estereográfica muestra las orientaciones del sistema de coordenadas (a, b y c), el círculo máximo punteado de la red representa el rumbo y buzamiento de la estratificación en las zonas donde la capa no es horizontal. Las fracturas de extensión y de cizalla se representan por los círculos máximos sólidos; A: ac y $0kl > a$, B: bc y $hk0 > b$, C: $h0l > a$, D: bc y $hk0 > a$, E: $h0l > c$ (Twiss & Moores, 1992).

Para la representación de nuestros datos estructurales tomados en este talud (Figura 4.13), pudimos estimar la existencia de tres familias de juntas (Figura 4.15). En color azul se muestran las fracturas de tipo AC. Estas designaciones hacen referencia a la orientación relativa de los planos de fractura con respecto a los ejes principales de esfuerzo (a, b y c).

Las fracturas AC son planos que contienen a los ejes A y C, mostrando una orientación perpendicular al eje B; es decir, se alinean con el plano que contiene el esfuerzo principal máximo (σ_1) y son ortogonales a σ_3 . Este tipo de fracturas se forma típicamente en regímenes de extensión o tracción y se relaciona comúnmente con fracturas extensionales (diaclasas). Su desarrollo ocurre de manera perpendicular al eje del esfuerzo mínimo (σ_3), lo que implica que se abren paralelamente al eje del esfuerzo máximo (σ_1), este tipo de fracturas están asociadas a los procesos pre-flexurales de la generación de un pliegue y se definen como de carácter regional.

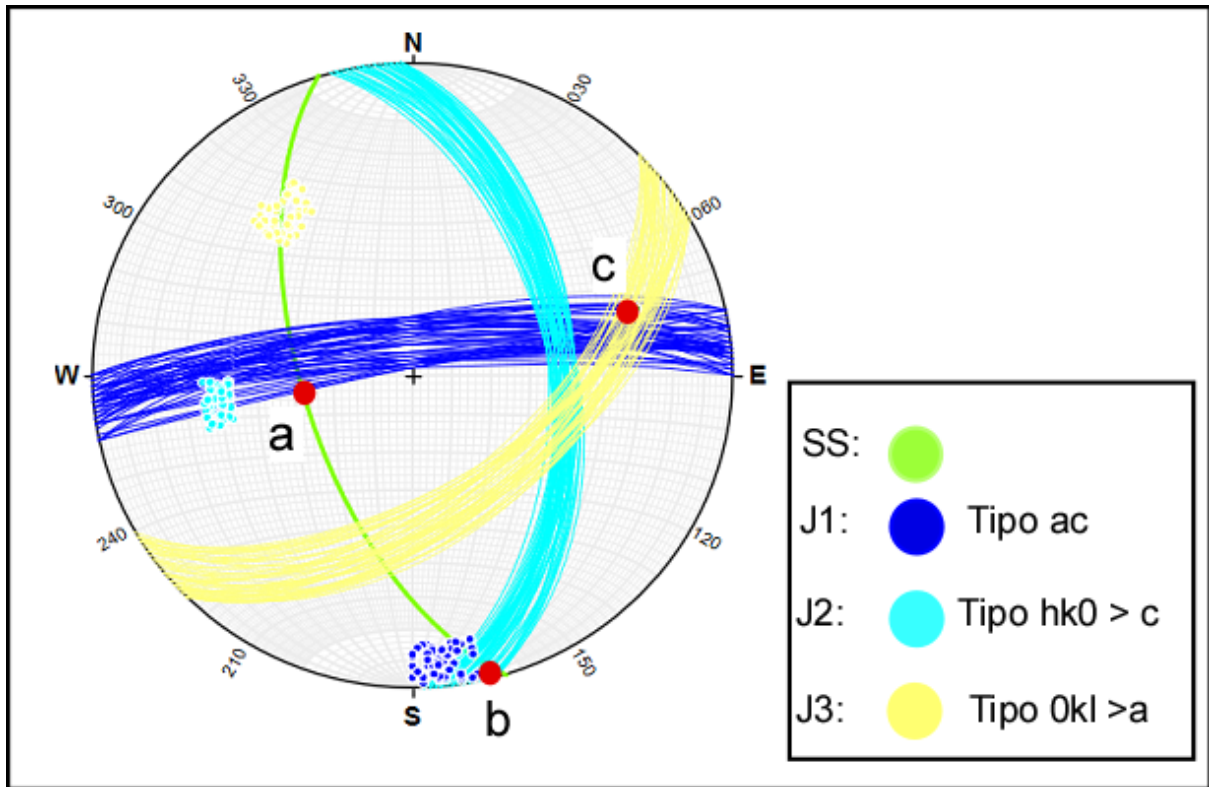


Figura 4.15;- Representación de los datos estructurales obtenidos en campo en proyección estereográfica tanto de estratificación como familias de juntas.

En la Figura 4.15 se muestran datos de fracturas de extensión de un sitio en particular (figura 4.18) del área de estudio. Las fracturas en color azul corresponden a fracturas AC perpendiculares al rumbo del plano de estratificación. Por otro lado, las fracturas en color celeste y amarillas tienen un comportamiento de fracturas de cizalla del tipo $hk0 > c$ (celestes) y $0kl > a$ (amarillas). Estos tipos de fracturas representan planos de debilidad o ruptura que se desarrollan en función de la orientación de los ejes principales de esfuerzo en un macizo rocoso. Estas designaciones hacen referencia a planos específicos dentro del sistema estructural tridimensional de esfuerzos, donde h, k, l, corresponden a los índices que definen el plano en relación con los ejes de esfuerzo A (σ_1), B (σ_2) y C (σ_3) (Twiss y Moores, 1992); si bien podríamos definir la familia de juntas $hk0 > c$ como fracturas de extensión de tipo BC, pero estrictamente no están contenidas en los dos ejes.

4.10 ANÁLISIS CINEMÁTICO DE UN TALUD.

Los procesos de desplazamientos potenciales que comprometen la estabilidad de un talud rocoso: planares, caídas, vuelcos, fallas en cuña o colapso circular, entre otros, se engloban bajo la denominación de mecanismos de falla (Hoek & Bray, 1981). Dichos procesos están determinados, en primera instancia, por la geometría, orientación y espaciado de los sistemas de discontinuidades que fragmentan el macizo rocoso, ya que estas superficies de debilidad pueden actuar como planos de falla preferentes (Goodman, 1989).

Para identificar de manera gráfica las combinaciones críticas de buzamiento y rumbo, se emplea la proyección estereográfica (Test de Markland) presentada en la figura 4.16 y relacionada con la Tabla 4.8. Aquí se muestra un ejemplo en donde se delimitan zonas de estabilidad y de peligro, según la posición de polos y líneas de intersección respecto al cono de fricción y al límite de sobre excavación (Markland, 1972 y Priest, 1993). Esta representación permite, con un solo vistazo, anticipar qué conjuntos de discontinuidades podrían activar un mecanismo de falla del talud (inestable) bajo las condiciones de esfuerzo y morfología (topografía) existentes.

Tabla 4.8; - Mecanismos de inestabilidad cinemática (Makland, J.T 1972).

Zona	Color	Ubicación	Interpretación cinemática
I	Rojo	Dentro del cono de fricción y detrás de la cara del talud.	Inerte: buzan hacia el interior; no deslizan.
II	Ocre	Dentro del cono, pero en el semiespacio del talud.	Estable por fricción: afloran, pero pendiente $\leq \phi$.
III	Verde	Fuera del cono de fricción en la zona del talud (líneas de intersección).	Falla en cuña potencial.
IV	Morado	Banda cercana al polo N por delante del talud.	Vuelco (toppling).
V	Beige	Entre círculo de fricción y gran círculo del talud (Polos de una familia).	Deslizamiento planar.

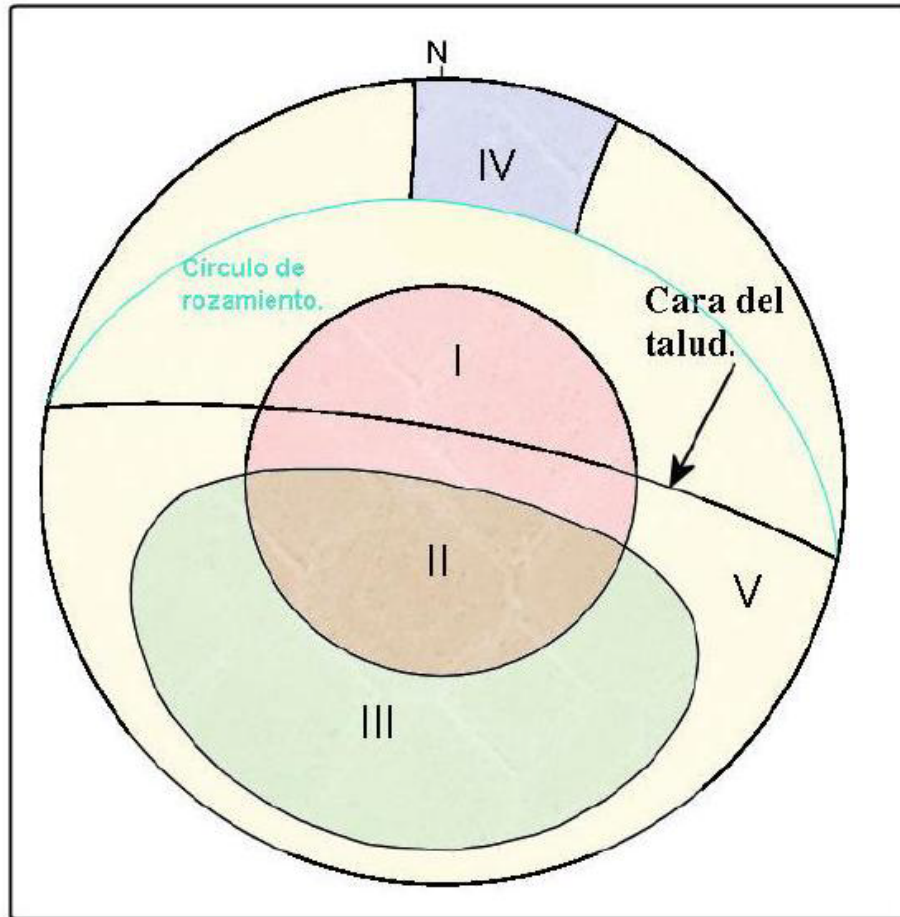


Figura 4.16; - “Test de Markland” para diagnosticar fallas cinemáticas en taludes rocosos (Markland, J.T 1972).

El análisis cinemático del talud, con base en el test de Markland, permitió distinguir cuatro familias de discontinuidades que condicionan distintos mecanismos de falla del talud (inestabilidad) respecto al talud orientado $180^{\circ}/40^{\circ}$. En la Figura 4.17 se observan las nubes de polos correspondientes a: estratificación SS (verde), J1 (azul oscuro), J2 (celeste) y J3 (amarillo), superpuestas al círculo máximo del talud y al círculo de fricción ($\phi \approx 15^{\circ}$). En base a la distribución de las concentraciones de líneas de cada familia se define los siguientes escenarios:

- Falla planar (principal). Los polos de la estratificación (SS, verde) se concentran dentro de la ventana de salida del talud y fuera del círculo de fricción, lo que indica superficies subparalelas al rumbo del talud con buzamientos suficientes para provocar un

deslizamiento. Esta geometría confiere alta susceptibilidad a deslizamiento planar cuando la continuidad y la persistencia de las capas lo permiten.

- Vuelco (caídos por toppling). La familia J2 (celeste) forma una nube de polos próxima al sector W del hemisferio y cercana al borde de la red. Esta disposición cae dentro de la zona cinemática de vuelco, por lo que se prevén caídos por vuelco.
- Resumen por familia
 - SS (verde): principal control de falla planar.
 - J2 (celeste): orientaciones favorables a vuelco.

En conjunto, las proyecciones mostradas en la figura 4.17 sustentan que el modo dominante de inestabilidad para este talud $180^\circ/40^\circ$ es el deslizamiento planar controlado por la estratificación (SS), y vuelcos asociados a J2 mientras que el conjunto de datos correspondiente a la familia J1 y J3 no se muestran involucrados dentro de las zonas del test de markland que desencadenen algún tipo de inestabilidad del talud. La Figura 4.18 muestra el afloramiento de rocas arcillosas donde se realizaron las mediciones, y el cual se localiza en el punto coordinado siguiente, 14R 396390, 2744239 UTM.

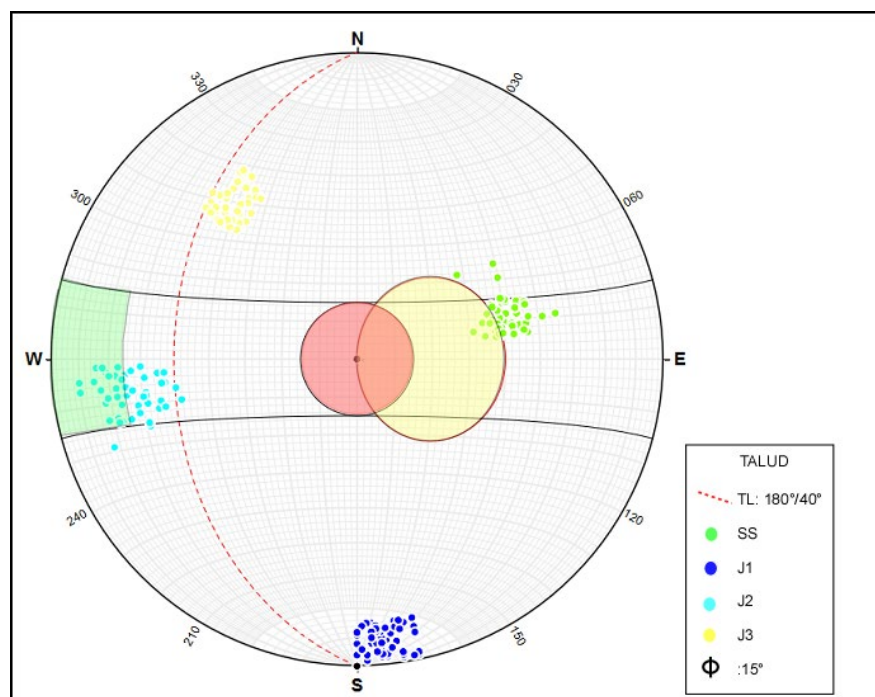


Figura 4.17; - Proyección estereográfica del análisis cinemático del talud $180^\circ/40^\circ$, donde se muestran las familias de discontinuidades J1, J2, J3 y SS, así como las zonas críticas asociadas a posibles mecanismos de falla en función del ángulo de fricción interna ($\phi = 15^\circ$).

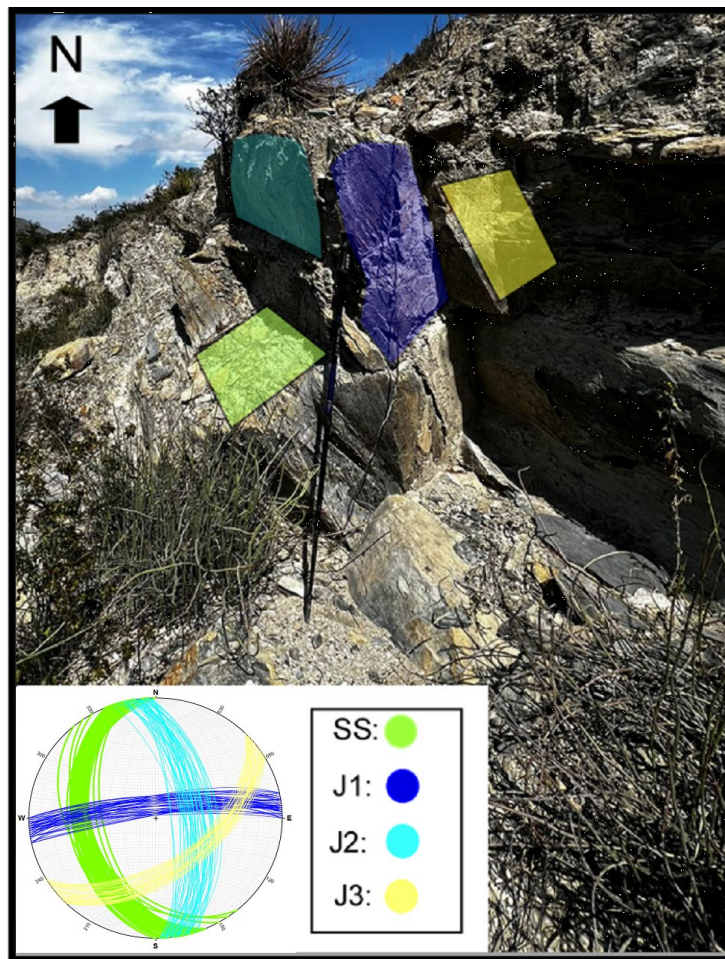


Figura 4.18; - Afloramiento en talud donde muestra la relación de las principales discontinuidades.

4.11 FACTOR DE SEGURIDAD

El **factor de seguridad (FS)** en el análisis de estabilidad de taludes se define, en términos generales, como la relación entre la capacidad resistente disponible a lo largo de una superficie potencial de falla y el esfuerzo cortante realmente movilizado. Sin embargo, distintos autores matizan esa idea según el enfoque metodológico y el tipo de material (suelo o roca).

Fellenius (1936) en el llamado método ordinario de rebanadas expresa el FS como el cociente entre la suma de los momentos resistentes (cohesión y fricción) y los momentos deslizantes (peso y cargas externas) respecto al centro de una superficie circular; asumiendo una fuerza entre rebanada horizontal nula. Ello simplifica el análisis, pero puede subestimar levemente la estabilidad, por lo que se recomienda un FS mínimo superior (Fellenius, 1936).

Terzaghi y Peck (1967) describen el FS como la relación entre la resistencia cortante disponible y el esfuerzo cortante actuante a lo largo de la superficie potencial de deslizamiento. Cuando $FS = 1.0$ la masa está en equilibrio límite y valores mayores proporcionan un margen adicional frente a la falla (Terzaghi y Peck, 1967).

En el método de dovelas de Bishop (1955), aplicado a superficies circulares en suelos, este método se formula como el cociente entre los momentos resistentes producidos por la cohesión y el esfuerzo normal efectivo multiplicado por la fricción y los momentos desestabilizadores generados por el peso propio y las cargas externas.

Para taludes en roca, Hoek y Bray (1981) definen el FS como la razón entre la suma de fuerzas estabilizadoras ($c + \sigma' \tan \phi'$) y las fuerzas deslizantes a lo largo del plano de falla, criterio que puede expresarse también en términos de momentos o energías equivalentes.

Es por lo tanto que, en nuestro análisis del Factor de Seguridad es esencial obtener el producto entre el valor de Fuerzas resistentes (Fr) en contraste contra las fuerzas actuantes (Fa), dado por la siguiente fórmula:

$$FS = Fr/Fa. \quad (2)$$

Con base en los resultados del análisis cinemático realizado sobre el conjunto de discontinuidades mapeadas, concluimos que el mecanismo de inestabilidad más probable es el deslizamiento planar. Las proyecciones estereográficas (test de Markland) mostraron que varias familias de planos de discontinuidad interceptan la ventana cinemática para falla planar; es decir, cumplen simultáneamente las condiciones de:

1. Paralelismo con la dirección de máxima pendiente del talud (lo que permite la liberación de esfuerzos a lo largo del plano).

2. Buzamiento del plano mayor que el ángulo de fricción interna, pero menor que el ángulo de inclinación del talud, requisito para que la masa rocosa pueda deslizarse sin que el talud la “atrape”.

Particularmente en el talud de análisis, existen dos factores que muestran la posible falla del mismo:

1) Las fracturas, que en nuestra prueba de Markland muestran una concentración en la zona de vuelco, pero afortunadamente para este talud de análisis, no se exhiben bloques con esta problemática geometría para fallar por vuelco y,

2) la Formación Méndez, al ser una unidad litológica que constantemente está en un proceso erosivo, posibilita la falla del talud, por lo que es necesario hacer una corrección con concreto lanzado y tela electro soldada.

4.12 COEFICIENTE DE SEGURIDAD POR RUPTURA PLANAR

Para obtener este factor de seguridad partimos de la siguiente ecuación:

$$FS = \frac{cA + (W \cos \psi_p - U - V \sen \psi_p) \tan \phi}{W \sen \psi_p + V \cos \psi_p} \quad (3)$$

Donde:

- cA =Fuerza debida a la cohesión actuante sobre la superficie de rotura (área A).
- $(W \cos \psi_p - U) \tan \phi$ = Resistencia por fricción movilizada, calculada con la tensión normal efectiva $(W \cos \psi_p - U)$ y el ángulo de fricción ϕ .
- $W \cos \psi_p$ = Componente estabilizadora (normal) del peso del bloque.
- U = Fuerza total debida a la presión del agua a lo largo del plano de deslizamiento.
- $W \sen \psi_p$ = componente del peso que actúa paralela al plano, tendiendo al deslizamiento.
- V = Empuje hidrostático ejercido por el agua en la grieta de tracción situada en el coronamiento.

Las variables A , U , V y W las obtenemos de las siguientes fórmulas:

$$A = \frac{H - Z}{\sen \psi_p} \quad (4)$$

$$U = \frac{1}{2} (\gamma)(Z_w)(Z) \left(\frac{H - Z}{\tan \psi_p} \right) \quad (5)$$

$$V = \frac{1}{2} (\gamma_w)(Z_w)^2 \quad (6)$$

$$W = \frac{1}{2} (\gamma)(H)^2 \left(\frac{1 - \left(\frac{Z}{H} \right)^2}{\tan \psi_p} - \frac{1}{\tan \psi_t} \right) \quad (7)$$

Donde:

W= peso de bloque de roca

Z= profundidad de la grieta de tracción.

Zw= profundidad del agua en la grieta de tracción.

γ = peso específico de la roca.

ψ_p = buzamiento preferencial de la estratificación.

ψ_t = buzamiento del talud.

ϕ = ángulo de fricción interna.

H= altura del talud.

Los valores de cohesión y ángulo de rozamiento son obtenidos de la literatura, que autores como González de Vallejo et al. (2002) proponen para distintos tipos de roca, según sus valores de RMR (Tabla 3.8). Los valores determinados para el buzamiento del plano y buzamiento de talud son datos directamente de campo.

El peso específico fue determinado de una muestra que se tomó en el sitio de análisis de talud. Todo este proceso se realizó en el laboratorio (Figura 4.19) y a continuación se describe:

1. Pesar la muestra de roca en la báscula.
2. Llenar la probeta de agua de forma que, al introducir la muestra, la cubra en su totalidad 300 ml.

3. Medir la cantidad de agua vaciada en el recipiente.
4. Introducir la roca en el recipiente con agua.
5. Medir el volumen que subió el agua al introducir la roca.
6. Calcular la densidad de la roca.
7. Sustituir los valores en la siguiente fórmula.

$$\gamma = mg/V \quad (8)$$

Sustitución de la fórmula con los valores de la muestra de roca inalterada:

$$\gamma = \frac{\left((0.08820 \text{ kg}) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) \right)}{3.0 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3} = 28,812.00 \frac{\text{N}}{\text{m}^3} \quad (9)$$



Figura 4.19; - a) Peso de la muestra en una balanza de precisión, b) llenado de la probeta previamente la inserción de las muestras, c) y d) relación del aumento de volumen posterior a la inmersión de la muestra en el agua.

Las Tablas 4.9 y 4.10 presentan, respectivamente, datos de campo y cálculos realizados a partir de las fórmulas (4) a (7).

Tabla 4.9; - Datos de talud para su análisis.

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	VALOR
Zw	Profundidad de agua en la grieta de tracción	No se presentan, 0
Z	Profundidad de la grieta de tracción	No se presentan, 0
γ	Peso específico de muestra de roca (Prueba de Laboratorio)	28812.00 N/m ³
ψp	Buzamiento del plano	43°
ψt	Buzamiento del talud	40°

ϕ	Ángulo de fricción	<15°
H	Altura	90 m
γ_w	Peso específico del Agua	9.8 kN/m ³
C	Cohesión	98 kN/m ² (González de Vallejo & Ferrer, 2002)

Tabla 4.10; - Cálculos para obtener A, U, V, W, utilizando el peso específico de 28.81 kN/m³.

FÓRMULA	SUSTITUCIÓN	RESULTADO
$A = \frac{H - Z}{\text{sen } \psi_p}$	$A = \frac{90 - 0}{\text{sen } 43^\circ}$	131.96 m
$U = \frac{1}{2} (\gamma)(Z_w)(Z) \left(\frac{H - Z}{\text{sen } \psi_p} \right)$	$U = \frac{1}{2} (28.81)(0)(0) \left(\frac{80 - 0}{\text{sen } 50^\circ} \right)$	0 kN/m ³
$V = \frac{1}{2} (\gamma_w)(Z_w)^2$	$V = \frac{1}{2} (2881)(0)^2$	0 kN/m ³
$W = \frac{1}{2} (\gamma)(H)^2 \left(\frac{1 - \left(\frac{Z}{H} \right)^2}{\tan \psi_p} - \frac{1}{\tan \psi_t} \right)$	$W = \frac{1}{2} (28.81)(90)^2 \left(\frac{1 - \left(\frac{0}{90} \right)^2}{\tan 43^\circ} - \frac{1}{\tan 40^\circ} \right)$	13951.70 kN/m ³

Con base en los resultados anteriores, se calcula el Factor de Seguridad utilizando la fórmula (3)

$$FS = \frac{(98)(131.96) + ((13951.70) (\cos 43 - 0 - 0 \text{ sen} 43)) \tan 15}{13951 \text{ sen} 43 + 0 \cos 43} \quad (10)$$

Una vez realizadas las operaciones se simplifica a

$$FS = \frac{15666.27}{9519.58} \quad (11)$$

Finalmente se obtiene:

$$FS = 1.65 \quad (12)$$

4.13 FACTOR DE SEGURIDAD MEDIANTE EL MÉTODO DE DOVELAS

En laderas y taludes, en donde la calidad del macizo rocoso es muy mala, es común que ocurran deslizamientos rotacionales; es decir se da la inestabilidad por medio de la propagación de una falla circular. Esta es la situación del macizo rocoso del talud que estamos analizando, ya que su componente rocoso es Lutita de la Formación Méndez y es un material muy deleznable, intemperizándose muy rápidamente, con los cambios de temperatura y precipitaciones, tendiendo a comportarse como un suelo.

Para la comprobación del factor de seguridad en laderas naturales y taludes se puede recurrir a la comprobación de un método de dovelas desarrollado por el sueco Fellenius (1927). Este método constituye la primera formulación de equilibrio límite que emplea la subdivisión de la masa deslizante en “dovelas” o rebanadas verticales para estimar la estabilidad de taludes con superficie de falla circular.

Pasos para la obtención del factor de seguridad según el método Fellenius (1927):

- Se reúnen datos geotécnicos y de carga, como lo son: peso específico (γ), la cohesión (c) y el ángulo de fricción (ϕ); en algunos de los casos identificar el nivel freático para calcular el peso específico con saturación de agua.
- Se selecciona la geometría de la falla circular eligiendo un centro y radio hipotéticos que describen la línea de deslizamiento y la cual sirve como base para el resto del análisis.
- Se subdivide el bloque en n rebanadas verticales de ancho (b), uniformes, con el fin de simplificar los cálculos posteriores.
- Se determina el valor de la variable (a), entendida como la distancia horizontal desde el centro (C) de la superficie de falla, hasta la proyección del peso de cada dovela. (a) se mide positivo a la derecha de C y negativo a la izquierda de C , si la dirección de falla es de derecha a izquierda. Si la dirección de falla es de izquierda a derecha, se invierte el sentido de a .
- Se determina para cada dovela, la inclinación de su base con la horizontal (α) y su longitud (Δl). α podrá ser positivo o negativo, dependiendo de la dirección de la variable a . Δl siempre será positivo porque el coseno siempre será mayor a cero y

$$\alpha = \text{sen}^{-1}(a/r) \quad (13)$$

$$\Delta l = \frac{b}{\cos \alpha} \quad (14)$$

- Se calculan los momentos: resistente (Mr) y actuante (Ma) para cada una de las dovelas.

$$Ma = W_n * \text{sen}(\alpha_n) \quad (15)$$

$$Mr = C * \Delta L + W_n * \cos(\alpha_n) * \tan(\phi) \quad (16)$$

- Se obtiene el valor resultante del Factor de Seguridad.

$$FS = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} [C * \Delta L + W_n * \cos(\alpha_n) * \tan(\phi)]}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n * \text{sen}(\alpha_n)} = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} Mr}{\sum_{n=1}^{n=p} Ma} \quad (17)$$

En la Tabla 4.11 se describen los parámetros que representan cada variable de la ecuación.

Tabla 4.11: -Símbolos y parámetros empleados en el cálculo del factor de seguridad.

Símbolo	Descripción	Unidad típica	Significado físico
FS	Factor de seguridad global	Adimensional	Relación entre fuerzas resistentes y fuerzas actuantes. Valores > 1 indican estabilidad.
C	Cohesión del material	kN/m ² o kPa	Fuerza de unión interna del material, independiente de la presión normal.
ΔL	Longitud de la base de la dovela	m	Longitud de contacto entre la dovela y la superficie potencial de falla.
W_n	Peso de la dovela n	kN	Fuerza debida al peso propio de la dovela.
α_n	Ángulo de inclinación de la base de la dovela	° (grados)	Inclinación de la base de la dovela respecto a la horizontal.
Φ	Ángulo de fricción interna	° (grados)	Capacidad del material para resistir el deslizamiento por fricción.

4.14 MÉTODO APLICADO

A partir de la metodología de Fellenius previamente descrita, se procedió a su aplicación en el talud objeto de estudio, considerando una geometría de 90 metros de altura y una inclinación general de 40°. Para ello, se planteó una superficie de falla circular con un radio de 110.04 metros, discretizando el cuerpo del talud en cinco dovelas delimitadas por radios equis espaciados desde un centro de rotación definido. A cada dovela se le asignaron propiedades geotécnicas constantes como: peso unitario, cohesión y ángulo de fricción interna (Tabla 4.12), Para definir de manera geométrica las condiciones del talud, procedemos a modelarlo mediante

el software AutoCAD 2025 para sacar las proporciones correctas según nuestros datos recopilados de campo (Figura 4.20)

Tabla 4.12; - Parámetros geotécnicos de resistencia (γ - c - ϕ) empleados en el análisis de estabilidad.

Parámetros geotécnicos de resistencia	Valores utilizados
γ	28 kN/m ³ (Prueba de Laboratorio)
c	98 kN/m ² (González de Vallejo <i>et al.</i> , 2004)
ϕ	15° (González de Vallejo <i>et al.</i> , 2004)

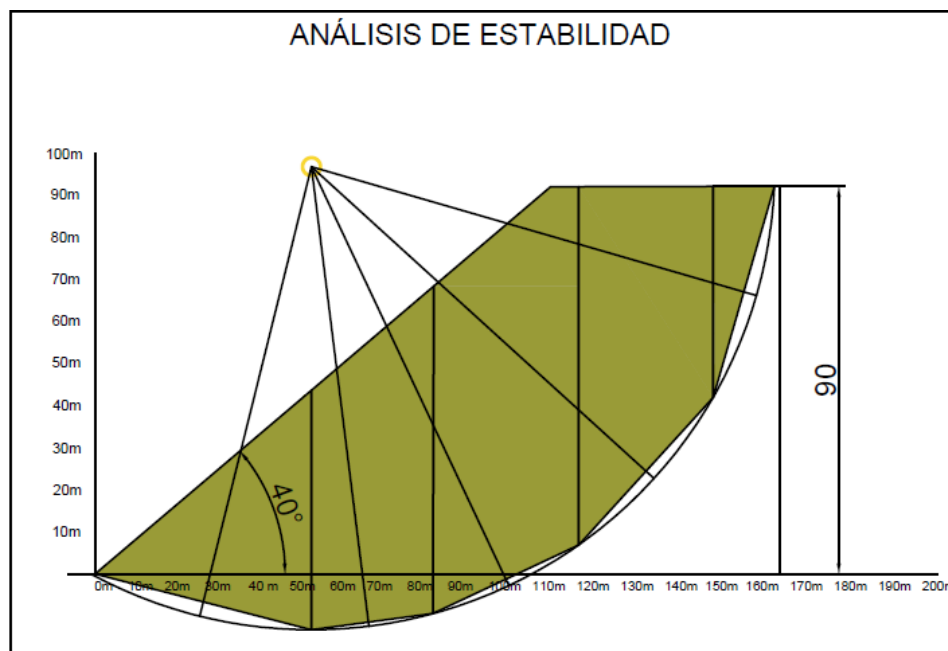


Figura 4.20. Modelo geométrico del talud empleado en el análisis de estabilidad, mostrando las dimensiones y geometría definida en AutoCAD.

Una vez que tenemos el modelo a escala de las dimensiones geométricas de nuestro talud, procedemos con fines prácticos a programar todos los parámetros necesarios para obtener nuestro factor de seguridad.

La Tabla 4.13 muestra los cálculos programados en Excel. En primer lugar, a partir del modelo geométrico se miden los valores de b , lo que representa el ancho de cada dovela, y a (distancia horizontal desde el centro de rotación), con lo que se prosigue a calcular en ángulo α de cada dovela empleando la relación:

$$\alpha = \text{sen}^{-1}(a/R) \quad (18)$$

Posteriormente determinamos la longitud de la dovela (Δl) aplicando:

$$\Delta l = \frac{b}{\cos(\alpha)} \quad (19)$$

Cuando tenemos la geometría definida procedemos a calcular el área de cada dovela, la cual multiplicando por el peso específico nos da como resultado el peso (W), y estos datos junto con la cohesión reflejados en la Tabla 4.13 constituyen la base para obtener la relación de equilibrio entre el momento actuante (MA) y el momento resistente (MR).

Tabla 4.13; - Método de dovelas programado en Excel.

Dovela	Radio (m)	110.04	$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{a}{r}\right)$	$\Delta L = b/\cos$		$W=(A)(\gamma)$				
	b (m)	a	α	Δl	Área (m2)	γ (kN/m³)	C (kN/m²)	ϕ	[°]	W (kN/m)
1	51	-25.66	-13.48	52.45	1459.99	28	98.0	15		40879.72
2	29.13	12.92	6.74	29.33	1949.87	28	98.0	15		54596.36
3	38.28	46.19	24.82	42.18	2887.09	28	98.0	15		80838.52
4	47.36	79.45	46.22	68.45	1840.96	28	98.0	15		51546.88
5	52.24	102.67	68.91	145.19	365.09	28	98.0	15		10222.52

Una vez integradas todas las fórmulas necesarias en las celdas de la hoja de cálculo, se procede a la programación de las expresiones correspondientes al momento actuante (MA) y al momento resistente (MR) como se ilustra en la Tabla 4.14, con base en los principios del equilibrio de momentos alrededor del centro de rotación.

$$Ma = W_n * \text{sen}(\alpha_n) \quad (20)$$

$$Mr = C * \Delta L + W_n * \cos(\alpha_n) * \tan(\phi) \quad (21)$$

Posteriormente, se realiza la sumatoria de los momentos desestabilizadores y estabilizadores para cada uno de los segmentos en que se ha discretizado el talud. Finalmente, se calcula la relación entre el momento resistente y el momento actuante, obteniendo así el factor de seguridad global (FS), conforme a la metodología de Fellenius.

$$FS = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} Mr}{\sum_{n=1}^{n=p} Ma} \quad (22)$$

Tabla 4.14; - Relación entre equilibrio límite del momento resistente y momento actuante.

Dovela	FELLENIOUS	
	MA	MR
1	-9532.66	15791.41
2	6410.26	17402.49
3	33932.49	23793.17
4	37217.37	16264.43
5	9537.86	15213.84
	77565.32	88465.34
	FS	1.14

El resultado obtenido del análisis de estabilidad mediante el método de Fellenius (1927) arroja un **factor de seguridad (FS) de 1.14**, valor que representa la relación entre las fuerzas resistentes y las fuerzas desestabilizadoras que actúan sobre el talud. Este resultado indica que el talud en cuestión está un poco por arriba del punto de equilibrio y el cual favorece al esfuerzo resistente.

Es importante mencionar que, para obtener una mayor certeza en la evaluación de la estabilidad del talud, una vez determinado un factor de seguridad preliminar asociado a una superficie de falla rotacional, es recomendable utilizar software especializado para modelar múltiples superficies de falla potenciales. Esta metodología permite identificar la distribución de aquellas superficies más críticas; es decir, las que presentan los valores más bajos del factor de seguridad y distinguirlas de aquellas que no representan un riesgo significativo. De este modo, se puede establecer un diagnóstico más robusto sobre el comportamiento del talud y definir con mayor precisión las zonas que requieren medidas de estabilización.

4.15 APLICACIÓN DE GEOSTUDIO

Con el fin de obtener una evaluación más cercana a la realidad de la potencial falla del talud en cuestión, se optó por realizar el modelado numérico mediante el software GeoStudio – módulo SLOPE/W, incorporando las características geométricas reales de la sección analizada

ya mencionadas, así como los parámetros de cohesión, ángulo de fricción y peso específico. A partir de este modelo, se generó un análisis con 405 superficies de deslizamiento (mecanismos de falla) potencial, distribuidas sobre el perfil del talud, evaluando para cada una el factor de seguridad (ANEXO IV), lo que nos acerca más a la realidad.

En la Figura 4.21 se presenta la distribución de las superficies de falla simuladas, en donde los colores indican la magnitud del factor de seguridad:

- Rojo: superficies con FS notablemente bajos, representando condiciones críticas de inestabilidad.
- Amarillo: superficies con FS intermedios, con riesgo moderado.
- Verde: superficies con FS elevados, que no representan un riesgo inmediato.
- Azul: superficies que están con valores altos de estabilidad y lejos de la probabilidad de la propagación de una falla rotacional.

Los resultados muestran que una proporción significativa de las superficies analizadas presenta valores de FS inferiores a 1.0, con un promedio general cercano a 0.78, lo que implica que la resistencia al corte es menor que las fuerzas estabilizadoras en gran parte del talud. Según el Manual de Diseño Geotécnico de Obras de Terracerías de la SCT (2008), este rango de valores indica inestabilidad inaceptable para condiciones de operación en carreteras, por lo que el talud requiere medidas de estabilización.

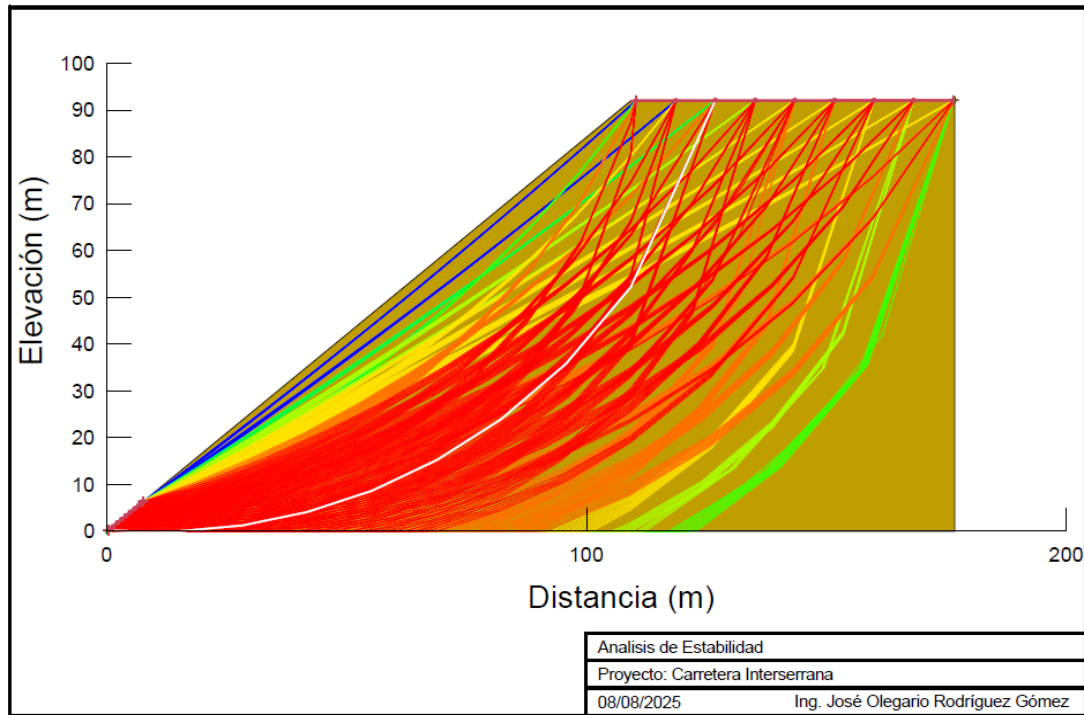


Figura 4.20; - Simulación de 405 superficies potenciales de falla rotacional empleadas para evaluar la estabilidad del talud mediante el análisis del factor de seguridad. Las trayectorias representadas en color rojo corresponden a las superficies de falla con menor factor de seguridad, indicando condiciones de mayor inestabilidad y probabilidad de deslizamiento. Los tonos amarillos representan condiciones intermedias de estabilidad, mientras que las trayectorias en color verde y azul indican superficies con factores de seguridad más altos, asociadas a condiciones relativamente estables del talud. La distribución de las superficies de falla permite identificar las zonas críticas y el comportamiento geomecánico del macizo ante posibles mecanismos de falla rotacional.

CAPÍTULO 5 – DICUSIÓN

5.1 INTRODUCCIÓN

En el presente estudio se elaboró una carta de Riesgos Geológicos de un área ubicada en el trayecto de la carretera interserrana entre Iturbide y Galeana, N.L., como uno de los objetivos principales del presente estudio. La metodología empleada para la realización de dicha carta de Riesgos Geológicos se fundamenta con el traslape de dos cartas elaboradas, una carta morfológica y otra de Zonas Homogéneas (ZH) (Chapa Guerrero (1993)).

Es importante señalar, que para una buena toma de decisión del análisis de la estabilidad de taludes se realizó una caracterización geomecánica de las unidades geológicas presentes en el área de estudio.

Del análisis geomecánico se observó, como referencia, que la Formación Méndez en la zona está constituida en su mayoría por lutita masiva. Esta formación es la más vulnerable a los procesos de meteorización y procesos erosivos y se localiza en las partes bajas de los taludes.

Contrastante a esta formación, la roca de mayor competencia (resistencia) es la Formación Tamaulipas Inferior. Esta formación se encuentra coronando las crestas de las montañas, por lo que se puede apreciar desde lejos su gran variación topográfica, por su alta resistencia a los procesos de degradación ya mencionados.

Con el traslape de la carta de zonas homogéneas y la carta morfológica, que considera macizos rocosos y suelo con grandes variaciones topográficas, se obtuvieron once (12) diferentes zonas de Riesgos Geológicos. A continuación, de manera detallada, se describen las distintas zonas de Riesgos Geológicos identificadas bajo la metodología de Chapa Guerrero (1993).

5.2 ZONAS DE RIESGOS GEOLÓGICOS

Con base a la metodología de Chapa Guerrero (1993) separamos el área de estudio en 11 Zonas de Riesgos Geológicos (ZRG), que a continuación se describen (ANEXO V. Carta de Riesgos Geológicos del Área de Estudio):

- ZRG 1: Calizas, con pendiente $>15^\circ$, estratificación no invertida.
- ZRG 2: Carbonatos-arcillas, con pendiente $>15^\circ$, estratificación no invertida.
- ZRG 3: Arcillas, con pendiente $>15^\circ$, estratificación no invertida.
- ZRG 4: Arcillas, con pendiente $>15^\circ$, estratificación invertida.
- ZRG 5: Carbonatos-arcillas, con pendiente $>15^\circ$, estratificación invertida.
- ZRG 6: Calizas, con pendiente $>15^\circ$, estratificación invertida.
- ZRG 7: Suelos terciarios con pendiente $< 5^\circ$.
- ZRG 8: Arcillas con una pendiente entre 5° - 15° , estratificación invertida.
- ZRG 9: Caliza intercalada con arcilla que presenta pendientes entre 5° - 15° , estratificación invertida.
- ZRG 10: Arcillas, con pendiente de entre 5° - 15° , estratificación no invertida
- ZRG 11: Caliza intercalada con arcilla que presenta pendientes entre 5° - 15° , estratificación no invertida.
- ZRG De ríos y arroyos.

A continuación, se describe para cada ZRG, el tipo de formación o formaciones que la constituyen y el riesgo geológico que presenta. Además, se enumeran las recomendaciones pertinentes.

5.2.1 ZRG 1: CALIZAS CON PENDIENTE $>15^\circ$, ESTRATIFICACIÓN NO INVERTIDA

En esta ZRG se engloba una zona homogénea constituida por las formaciones: Tamaulipas Inferior, La Peña, Tamaulipas Superior y Cuesta del Cura. Estas formaciones se componen de caliza autóctona con estratos que varían de espesores medianos, gruesos hasta potentes, coronando estos últimos las partes topográficas más altas de las montañas.

5.2.1.1 Riesgo

Esta zona es la de menor problemática aparente, se encuentra en las charnelas de los pliegues y presenta la pendiente más alta, representando un riesgo a caídos de grandes bloques (de 30 m³, 80 toneladas) y, en tiempos de grandes precipitaciones, a flujo de grandes bloques por las zonas de drenaje (arroyos salvajes).

5.2.1.2 Recomendaciones

En esta ZRG es fundamental implementar un diseño eficiente de obras de drenaje superficial, con base en lo establecido por el Manual de Drenaje Carretero de la SCT. Esto con la finalidad de garantizar la recolección (material pétreo) y la conducción adecuada del escurrimiento pluvial. Lo anterior permitirá mitigar el arrastre de material detrítico, fragmentos rocosos o rodamiento de bloques de grandes dimensiones, metaestables, que pudieran comprometer la funcionalidad y seguridad de la infraestructura vial. **Recomendación: libre de construcción.** En caso de ser necesario la construcción, carreteras, túneles, entre otros, llevar a cabo un análisis de la estabilidad de la ladera, de cortes, así como de túneles y el material de corte alejarlo del lugar si no se va a usar en la construcción de lo proyectado.

5.2.2 ZRG 2: CARBONATOS-ARCILLAS CON PENDIENTE >15°, ESTRATIFICACIÓN NO INVERTIDA

Esta Zona de Riesgo Geológico (ZRG 2) comprende la presencia de las formaciones Agua Nueva y San Felipe, las cuales están constituidas por intercalaciones de caliza con rocas arcillosas. Estas unidades presentan espesores que varían desde horizontes delgados hasta estratificaciones de tipo laminar en determinadas secciones de algunos afloramientos.

5.2.2.1 Riesgo

En esta ZRG, debido a sus rasgos topográficos elevados, parte media de la montaña, y a la presencia de cañadas que actúan como corredores naturales de escurrimiento, existe un riesgo significativo de aporte de flujos de detritos, lodo o bloques transportados por eventos de lluvia intensa (torrenciales).

5.2.2.2 Recomendaciones

En zonas de alto aporte de material suelto, se sugiere incorporar bermas o fosas de retención. Complementariamente, se plantea la instalación de instrumentación geotécnica para monitoreo continuo de posibles desplazamientos, así como la evaluación periódica y mantenimiento preventivo de las estructuras de drenaje.

En caso de cortes para la construcción en general, se recomienda hacer un análisis de la estabilidad de las laderas y cortes, y el material de corte alejarlo del lugar si no se va a usar en la construcción de lo proyectado, ya que pone en riesgo todo lo existente aguas abajo.

5.2.3 ZRG 3: ARCILLAS CON PENDIENTE $>15^\circ$, ESTRATIFICACIÓN NO INVERTIDA

Esta Zona de Riesgo Geológico está constituida por la Formación Méndez y es de particular relevancia, ya que coincide directamente con el área de construcción en donde se proyecta el desplante de la obra carretera. Se caracteriza por la presencia predominante de materiales arcillosos, pendientes superiores a 15° ; lo que incrementa su susceptibilidad a procesos de inestabilidad y deformación bajo condiciones de carga o saturación.

5.2.3.1 Riesgo

Como se expuso en el Capítulo 5, el análisis cinemático permitió identificar una alta susceptibilidad a la ocurrencia de mecanismos de inestabilidad en la zona evaluada. Esta condición se ve favorecida por la presencia de macizos rocosos con sistemas de discontinuidades orientados de forma crítica respecto a la pendiente del talud. Aunado a ello, las propiedades geomecánicas del material, en particular el bajo valor de cohesión de las rocas presentes, especialmente en unidades arcillosas o fuertemente meteorizadas, reducen significativamente la resistencia al corte disponible, lo que incrementa el potencial de falla por deslizamiento planar por discontinuidades asociadas a los planos de estratificación.

5.2.3.2 Recomendaciones

Para esta ZRG se recomienda ajustar el diseño del talud, reduciendo el ángulo del mismo y aplicando terraceo (bermas) y/o bancos intermedios para mejorar la estabilidad del talud global. Será necesario complementar con medidas de estabilización como anclajes, concreto lanzado y mallas metálicas electrosoldadas en áreas críticas.

5.2.4 ZRG 4, 5 y 6: ARCILLAS, CARBONATOS- ARCILLAS, CARBONATOS CON PENDIENTE $>15^\circ$, ESTRATIFICACIÓN INVERTIDA

Las tres zonas (ZRG 4, 5 y 6) señaladas en el ANEXO V no presentan interacción directa con la traza del proyecto carretero dentro del área de estudio. Estas áreas comprenden unidades estratigráficas que incluyen la Formación Méndez, Formación San Felipe, Formación Agua Nueva, Formación Cuesta del Cura, Formación Tamaulipas Superior, Formación La Peña y Formación Tamaulipas Inferior. Dichas formaciones conforman laderas con pendientes superiores a 15° y presentan una secuencia estratigráfica invertida.

5.2.4.1 Riesgo

Estas ZRG no representan un riesgo aparente; pero cabe señalar que durante precipitaciones intensas, la captación de agua de toda esta ladera desarrolla su cauce hacia los arroyos que conectan con la traza del proyecto carretero.

5.2.4.2 Recomendaciones

Para estas ZRG se debe tener un buen control a través de registros inventariados de la capacidad máxima del cauce de ríos y arroyos. Para lo anterior, se deberá realizar una estadística de los diferentes eventos de precipitación extraordinarios, esto con el fin de que el proyecto no se vea comprometido durante las lluvias torrenciales extremas que se hacen presentes en el estado.

5.2.5 ZRG 7: SUELOS TERCIARIOS CON PENDIENTE $< 5^\circ$

En esta ZRG dentro del área de estudio, se presenta una amplia distribución y concentra la mayor parte de los asentamientos rurales, ya que sus condiciones son favorables para el uso agrícola. Predominan materiales clasificados como proluviones, producto de la meteorización natural y fracturación de las rocas aguas arriba y, posteriormente, transportado por los flujos torrenciales y depositados en las partes bajas al perder fuerza de arrastre el agua.

5.2.5.1 Riesgos

Esta ZRG, al encontrarse en la cota más baja dentro del área de estudio, presenta una alta susceptibilidad a inundaciones. Además, el aporte constante de material aluvial ha dado origen a la formación de terrazas fluviales, algunas de ellas alcanzan alturas de hasta 15 metros. Estas terrazas son progresivamente socavadas por la acción erosiva de los cauces de arroyos y ríos, lo que favorece la generación de movimientos en masa en sus laderas.

5.2.5.2 Recomendaciones

En esta zona de riesgo geológico, resulta fundamental considerar la distribución de las áreas de descarga fluvial, así como la identificación de los arroyos con mayor capacidad de aporte sedimentario. Un manejo adecuado de las zonas inundables es esencial para mitigar los riesgos asociados a procesos de socavación, acumulación de sedimentos y desbordamientos durante eventos hidrometeorológicos extremos.

5.2.6 ZRG 8: ARCILLAS CON UNA PENDIENTE ENTRE 5° - 15° , ESTRATIFICACIÓN INVERTIDA

Esta zona de riesgos geológicos está constituida por rocas de arcilla de la Formación Méndez que, a diferencia de la ZRG 4, en esta área la morfología se atenúa teniendo una pendiente de ángulo más bajo y relieves más homogéneos.

5.2.6.1 Riesgos

Se trata de una Zona de Riesgo Geológico caracterizada por una pendiente general moderada, que oscila entre los 5° y 15°, lo cual favorece en términos generales la estabilidad natural del terreno. Sin embargo, la intervención mediante la generación de taludes artificiales puede inducir condiciones de inestabilidad, especialmente si no se consideran adecuadamente los parámetros geomecánicos del macizo rocoso, como la cohesión y el ángulo de fricción interna

5.2.6.2 Recomendaciones

Para esta ZRG es fundamental implementar controles geotécnicos durante las etapas de diseño y excavación, como una revisión estructural para análisis cinemático y también el análisis de estabilidad de taludes.

5.2.7 ZRG 9: CALIZA INTERCALADA CON ARCILLA, CON UNA PENDIENTE ENTRE 5°-15° ESTRATIFICACIÓN INVERTIDA.

Esta ZRG corresponde a la ZH de rocas carbonatadas con intercalaciones de rocas margosas y arcillosas. Está constituida por las formaciones Agua Nueva y San Felipe. Aquí se aprecian horizontes de carbonato intercalados con arcilla. Estratigráficamente, se observa una secuencia invertida con echados de capas sub-horizontales.

5.2.7.1 Riesgo

Al ser una ZRG con una pendiente que va de 5° a 15°, la susceptibilidad a procesos de inestabilidad es menos vulnerable, pero siempre es conveniente contar con la revisión de un análisis geomecánico de la estabilidad del talud o cortes, ya que, aquí se cuenta con macizos rocosos que tienen una cohesión baja e intercalaciones de arcillas que funcionan como superficies de despegue.

5.2.7.2 Recomendaciones

Tener un buen control del análisis de estabilidad de taludes en las zonas que tienen una interacción directa con el proyecto o al hacer cortes en esta ZRG.

5.2.8 ZRG 10: ARCILLAS, CON PENDIENTE DE ENTRE 5°-15°, ESTRATIFICACIÓN NO INVERTIDA

Esta ZRG pertenece litológicamente a la formación Méndez que a diferencia de la ZRG 8 tiene su secuencia estratigráfica en no invertida también podemos mencionar que morfológicamente en esta zona las pendientes no son tan inclinadas y hay una mayor homogeneidad del ángulo de inclinación de las superficies.

5.2.8.1 Riesgos

A pesar de que en esta zona predominan laderas con pendientes considerables, el análisis de las condiciones geológicas, geomorfológicas y geotécnicas permite inferir que la susceptibilidad a la ocurrencia de movimientos de ladera es relativamente baja. Por lo tanto, la probabilidad de que se presenten fenómenos que representen un riesgo o peligro geológico significativo para la infraestructura o la población es reducida.

No obstante, debido a que las rocas presentes muestran una elevada susceptibilidad a los procesos de meteorización física y química, es indispensable mantener un adecuado control y monitoreo de las discontinuidades estructurales, así como de las condiciones de drenaje superficial y subterráneo. Estas medidas permitirán prevenir la degradación progresiva del macizo rocoso y minimizar posibles afectaciones a las obras de infraestructura existentes o futuras.

5.2.8.2 Recomendaciones

Se recomienda implementar inspecciones geotécnicas periódicas, especialmente después de eventos de precipitación intensa, con el fin de identificar oportunamente la aparición de grietas, desprendimientos menores o evidencias de erosión. Asimismo, es conveniente realizar labores de mantenimiento preventivo, tales como la limpieza de obras de drenaje, retiro de material suelto y estabilización localizada de bloques potencialmente inestables, contribuyendo así a mantener condiciones adecuadas de seguridad y estabilidad en la zona de estudio.

5.2.9 ZRG 11: CALIZA INTERCALADA CON ARCILLA QUE PRESENTA PENDIENTES ENTRE 5°-15°, ESTRATIFICACIÓN NO INVERTIDA.

La unidad geológica correspondiente a la Formación San Felipe está constituida principalmente por calizas estratificadas con intercalaciones de material arcilloso. En la zona analizada predominan pendientes suaves a moderadas (5°–15°), así como una disposición estratigráfica normal, condiciones que favorecen una adecuada estabilidad general del terreno.

5.2.9.1 Riesgo

Aunque actualmente no se observan indicios de inestabilidad significativa, la construcción de infraestructura, cortes de talud o modificaciones al drenaje natural podrían alterar las condiciones de equilibrio existentes. En estos escenarios, la exposición de materiales arcillosos y la concentración de escurrimientos superficiales pueden incrementar la susceptibilidad a procesos de erosión y degradación del terreno.

5.2.9.2 Recomendaciones

Se recomienda mantener un adecuado control de las condiciones de drenaje superficial y subsuperficial para evitar la acumulación de agua en los niveles arcillosos presentes dentro de la Formación San Felipe. La correcta conducción de los escurrimientos contribuirá a preservar la resistencia mecánica de los materiales y a reducir la posibilidad de procesos erosivos o deformaciones superficiales

5.2.10 ZRG: RÍOS Y ARROYOS

Esta zona de riesgos geológicos está constituida por la red de drenaje superficial del área de estudio, esta red ramifica por las laderas de manera perpendicular al eje de pliegue del sinclinal por el cual se conducen todos los flujos (agua y material).

5.2.10.1 Riesgo

En el diseño y localización de infraestructura carretera, en esta ZRG, resulta fundamental evitar la construcción dentro de cauces de ríos y arroyos, ya que estas zonas están sujetas a la conducción de grandes volúmenes de agua durante eventos de precipitación de gran intensidad. Además de representar un riesgo elevado de inundación, estos cauces transportan cantidades significativas de sedimentos y detritos, los cuales pueden provocar socavación, erosión de taludes, obstrucción de obras hidráulicas y daños estructurales graves a la vía.

Por otra parte, el contacto prolongado con aguas superficiales y subterráneas puede inducir procesos de degradación química en los materiales constructivos, como la corrosión del acero de refuerzo y el ataque químico a cementos en estructuras de concreto. En particular, las aguas subterráneas enriquecidas con ácidos húmicos y elementos metálicos disueltos (como hierro o manganeso), provenientes de la lixiviación de suelos y rocas, pueden resultar altamente agresivas para cimentaciones profundas, túneles y obras de paso.

5.2.10.2 Recomendaciones

En esta ZRG es importante realizar un estudio hidrológico exhaustivo para cuantificar el caudal del río, a partir de las precipitaciones máximas extraordinarias, con la finalidad de hacer más eficientes los diseños de obras encargadas para canalizar el drenaje y que no comprometa la estructura principal de la obra de construcción, específicamente en este caso la Autopista Interserrana que está en construcción actualmente. Es importante mencionar que en zonas con una pendiente importante es bueno considerar canales disipadores, con el objetivo de reducir el caudal de la escorrentía.

Con la finalidad de ilustrar el efecto del ángulo de inclinación de las estructuras geológicas, en la Figura 5.1 se representa un esquema de un arroyo o un río. La zona del margen del río hasta 45° es inestable (libre de construcción). La zona del margen del río de 45° a 33° es relativamente estable (se puede construir, con problemas a futuro al socavarse el río).

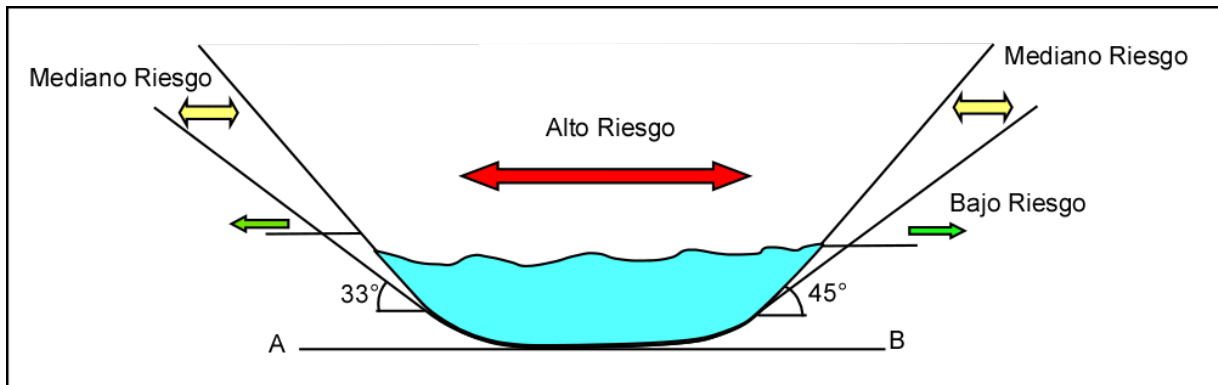


Figura 5.1; -Relación entre el ángulo de inclinación de las márgenes de un cauce y el nivel de vulnerabilidad asociado a procesos de socavación e inestabilidad de taludes. Pendientes cercanas a 45° indican condiciones de alto riesgo, mientras que pendientes menores a 33° representan zonas relativamente estables y de menor susceptibilidad geomorfológica.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Derivado del trabajo realizado en la zona de estudio, se presentan conclusiones relacionadas con la Zonificación de Riesgos y Estabilidad de Taludes; presentando además recomendaciones y resultados adicionales.

6.1 ZONIFICACIÓN DE RIESGOS

La zona de estudio se dividió aplicando la metodología de zonificación de riesgos, integrando:

- Análisis litológico y estructural para determinar las diferentes Zonas Homogéneas.
- Análisis geomorfológico: Subdivisión del área según rangos de pendiente: 0–5°, 5–15° y >15°.
- Clasificación geomecánica RMR (*Rock Mass Rating*): Caracterización del macizo rocoso para asignar una categoría que refleja su calidad y estabilidad potencial.

La combinación de ambos enfoques permitió obtener una zonificación integral, identificando áreas con distintos niveles de susceptibilidad, útil para la toma de decisiones en proyectos de infraestructura y manejo territorial.

6.2 ESTABILIDAD DEL TALUD – MÉTODO DE FELLENIOUS.

El análisis de estabilidad arrojó un factor de seguridad (FS) de 1.14, que representa la relación entre las fuerzas resistentes y las desestabilizadoras en el talud. Según el Manual de Diseño Geotécnico de Obras de Terracerías – SCT (2008), los valores mínimos recomendados para taludes en carreteras son:

- Materiales consolidados: $FS \geq 1.3$
- Materiales no consolidados o condiciones desfavorables: $FS \geq 1.5$
- Condiciones críticas: $FS \geq 1.5 - 1.7$

Bajo este criterio, el $FS = 1.14$ no cumple con los requerimientos de estabilidad, implicando riesgo de falla y necesidad de intervención. Dado lo anterior se presentan varias recomendaciones.

6.2.1 MEDIDAS RECOMENDADAS

Como medidas de recomendación se plantea lo siguiente, tomando en consideración el talud analizado:

- Rediseñar la geometría del talud.
- Incorporar elementos de refuerzo (anclajes, muros, drenes y malla electrosoldada).
- Mejorar el drenaje superficial.

6.2.2 RESULTADOS ADICIONALES DEL MODELADO

El modelado numérico evidenció que una parte significativa de las superficies analizadas presenta $FS < 1.0$, con un promedio general de 0.78. Este valor indica que la resistencia al corte es insuficiente frente a las fuerzas desestabilizadoras, lo que según la SCT corresponde a inestabilidad inaceptable para condiciones operativas en carreteras, requiriendo acciones correctivas inmediatas.

6.3 CONCLUSIÓN

La metodología aplicada permitió integrar información geológica, geomorfológica y geomecánica para generar una zonificación de riesgos que identifica áreas con distintos niveles de susceptibilidad a movimientos de ladera dentro del tramo analizado de la Carretera Interserrana entre Galeana e Iturbide, Nuevo León. La utilización de zonas homogéneas, combinada con el análisis de pendientes y la clasificación geomecánica RMR, proporcionó una base sólida para evaluar las condiciones de estabilidad y el comportamiento potencial de los taludes presentes en el área de estudio.

Los resultados obtenidos mediante el método de Fellenius indican que el talud analizado presenta un factor de seguridad de 1.14, valor inferior a los criterios mínimos recomendados por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes para obras carreteras. Esta condición evidencia que el talud no satisface los requisitos de estabilidad establecidos para garantizar un desempeño

adecuado a largo plazo, por lo que resulta necesaria la implementación de medidas de mitigación y estabilización.

6.4 TRABAJO A FUTURO

Asimismo, se considera necesario realizar campañas de muestreo y ensayos de laboratorio específicos para cada uno de los grupos litológicos identificados en la zona de estudio, incluyendo rocas arcillosas, carbonatos intercalados con arcilla y calizas masivas. La obtención de parámetros geomecánicos mediante pruebas de compresión uniaxial y triaxial permitiría determinar con mayor precisión la resistencia, deformabilidad y comportamiento mecánico de los materiales bajo diferentes condiciones de esfuerzo. Estos resultados contribuirían a reducir la incertidumbre en los análisis de estabilidad y a generar modelos geotécnicos más representativos de las condiciones reales del terreno.

BIBLIOGRAFÍA

- Ángeles-Villeda, M. E., Hinojosa-Espinosa, J. J., López-Oliva, J. G., Valdés-González, A., & Livas-Vera, M. (2005). Estratigrafía y microfacies de la parte sur del Cañón La Boca, Santiago, Nuevo León, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 22(2), 272–28.
- Aranda-Gómez et al., (1993). Geología de volcanes cuaternarios portadores de xenolitos provenientes del manto y de la base de la corteza en el Estado de San Luis Potosí. *Boletín 106, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México*, 1–22.
- Aranda-Gómez et al., (2000). *Evolución tectonomagmática post-paleocénica de la Sierra Madre Occidental y de la porción meridional de la provincia tectónica de Cuencas y Sierras, México*. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 53(1), 59–71.
- Armas-Zagoya, J. M. (2004). Cartografía geológica estructural del Valle de Huizachal como base para el análisis de estabilidad de taludes de la carretera Rumbo Nuevo, Cd. Victoria, Tamaulipas, México (Tesis de maestría). Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL.
- Barboza-Gudiño et al., (2004). *La estratigrafía y evolución geológica del Altiplano Potosino y la Sierra Madre Oriental en San Luis Potosí, México*. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(2), 83–103.
- Bieniawski (1976). Rock Mass Classification in Rock Engineering. *En Proceedings of the Symposium on Exploration for Rock Engineering, Vol. 1, Johannesburg, Sudáfrica*, pp. 97–106.
- Bishop, A. W. (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Géotechnique*, 5(1), 7–17.
- Blanco-Piñón, A., Frey, E., Stinnesbeck, W., & López-Oliva, J. G. (2002). Late Cretaceous (Turonian) fish assemblage from Vallecillo, northeastern Mexico. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abhandlungen*, 225(1), 39–54.
- Bryan et al., (2013). *Large Igneous Provinces and Silicic Large Igneous Provinces: Progress in our understanding over the last 25 years*. *Geological Society of America Bulletin*, 125(7–8), 1053–1078.
- Bunge, H.-P., & Grand, S. P. (2000). Mesozoic subduction beneath the North American plate and implications for Laramide uplift. *Science*, 287(5457), 1227–1230.
- Campa, M. F., & Coney, P. J. (1983). Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distributions in Mexico. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 20(6), 1040–1051.

- Chapa, Guerrero, J. R. (1993):** Massenbewegungen an Steilhängen der Sierra Madre Oriental im Grossraum Monterrey, Mexiko. Tesis Doctoral, RWTH- Aachen, 164 p.
- Chapa Guerrero, J. R. (1996):** Estabilidad de taludes escarpados, Sierra Madre Oriental N. L., México., Zbl. Geol. Paläontol.- Teil 1, 1994: 1019 – 1026 p.
- Chávez-Cabello, G., Aranda-García, M., & Eguiluz de Antuñano, S. (2011).** Evolución estructural del frente tectónico de la Sierra Madre Oriental entre Monterrey y Saltillo, NE de México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 63(2), 309–323.
- Clemons y McLeroy, (1962). *Geology of Torreón and Pedriceñas Quadrangles, Coahuila and Durango, Mexico*. Tesis de maestría, Department of Earth and Planetary Sciences, The University of New Mexico, Albuquerque, New Mexico, 171 p.
- Coney, P. J. (1976).** Plate tectonics and the Laramide Orogeny. *Geology*, 4(1), 21–24.
- Coney, P. J. (1985).** The regional tectonic setting and possible causes of Cretaceous–Early Tertiary orogeny in the North American Cordillera. En C. J. H. Monger & J. O. Wheeler (Eds.), *Plate tectonic terrane analysis and processes* (Geological Association of Canada, Special Paper 27, pp. 177–187).
- Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996).** Landslide types and processes. En A. K. Turner & R. L. Schuster (Eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation* (TRB Special Report 247, pp. 36–75). National Academy Press.
- Dávalos-Álvarez, (2003). Caracterización geológica y geotécnica de la Formación Cuesta del Cura en el noreste de México. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- DeCelles, P. G. (2004).** Late Jurassic to Eocene evolution of the Cordilleran thrust belt and foreland basin system, western U.S.A. *Geological Society of America Bulletin*, 116(1–2), 131–152.
- Deere, D. U. (1964).** Technical description of rock cores for engineering purposes. *Rock Mechanics and Engineering Geology*, 1(1), 17–22.
- Dickinson, W. R. (2004).** Evolution of the North American Cordillera. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 32, 13–45.

- Dickinson, W. R., Klute, M. A., Hayes, M. J., Janecke, S. U., Lundin, E. R., McKittrick, M. A., & Olivares, M. D. (1988).** Paleogeographic and paleotectonic setting of Laramide sedimentary basins in the central Rocky Mountain region. *GSA Bulletin*, 100(7), 1023–1039.
- Dickinson, W. R., & Lawton, T. F. (2001).** Carboniferous to Cretaceous assembly and fragmentation of Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 113(9), 1142–1160.
- Echánove-Echánove, (1986). *Geología Petrolera de México*. Fondo de Cultura Económica, México.
- Eguiluz de Antuñano, S. (2000).** Tectonic evolution of México: Triple junction of the Caribbean, Cocos and North American plates. ***Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana***, 53(1), 1–26.
- Eguiluz de Antuñano, S. (2001).** Geologic evolution and gas resources of the Sabinas Basin in northeastern Mexico. En C. Bartolini, R. T. Buffler & A. Cantú-Chapa (Eds.), *The Western Gulf of Mexico Basin (AAPG Memoir 75)*, 241–270.
- Eguiluz et al., (2000). Tectónica de la Sierra Madre Oriental, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 53(1), 1–26
- Fellenius (1927). *Erdstatische Berechnungen mit Reibung und Kohäsion (Adhäsion) und unter Annahme kreiszylindrischer Gleitflächen*. Ernst & Sohn, Berlin.
- Fellenius, W. (1936).** Calculation of the stability of earth dams. *Transactions of the 2nd Congress on Large Dams*, 4, 445–462.
- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Manea, V., & Manea, M. (2012).** The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone. *Tectonophysics*, 522–523, 122–149.
- Fitz Díaz et al., (2011). *The Cretaceous–Paleogene Mexican Fold-Thrust Belt: Structure, Basin Development and Tectonic Evolution*. Geological Society of America Special Papers
- Fitz-Díaz, E., Lawton, T. F., Juárez-Arriaga, E., & Chávez-Cabello, G. (2018).** The Cretaceous-Paleogene Mexican orogen: Structure, basin development, magmatism and tectonics. *Earth-Science Reviews*, 183, 56–84.
- Fortunato 1982. *Estudio geológico-estructural de la Sierra Madre Oriental en el noreste de México*. Instituto de Geología, UNAM.
- Fortunato y Ward, 1987. Stratigraphy and structure of the Sierra Madre Oriental, northeastern Mexico. *Geological Society of America Bulletin*.

Goldhammer, R. K. (1999b). Mesozoic sequence stratigraphy and paleogeography of northeast Mexico and the northwest Gulf of Mexico. En C. Bartolini, R. T. Buffler & A. Cantú-Chapa (Eds.), *The Western Gulf of Mexico Basin: Tectonics, Sedimentary Basins, and Petroleum Systems* (AAPG Memoir 75), 159–216.

Goldhammer, R. K., Lehmann, P. J., Todd, R. G., Wilson, J. L., Ward, W. C., & Johnson, C. R. (1991). Sequence stratigraphy and cyclostratigraphy of the Mesozoic of the Sierra Madre Oriental (NE Mexico).

Goldhammer, R. K., Osleger, D. A., (1993). Correlación/estratigrafía de plataformas del Cretácico inferior en NE México.

Goldhammer, R. K., & Wilson, J. L. (1991). Hierarchy of stratigraphic forcing in carbonate settings. *Kansas Geological Survey Bulletin* 233.

Goldhammer, R. K. (1999b). Mesozoic sequence stratigraphy and paleogeographic evolution of northeast Mexico. En C. Bartolini, J. L. Wilson y T. F. Lawton (Eds.), *Mesozoic sedimentary and tectonic history of north-central Mexico* (Geological Society of America Special Paper 340, pp. 1–58). Geological Society of America.

González de Vallejo & Ferrer, 2002. *Ingeniería Geológica*. Pearson Educación. Madrid. 744 p.

Goodman, R. E. (1989). *Introduction to Rock Mechanics* (2nd ed.). John Wiley & Sons.

González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. Pearson–Prentice Hall.

Guerra-Roel, R., Chávez-Cabello, G., Aranda-Gómez, J. J., Dekkers, M. J., Patiño-Méndez, G., & Pastor-Galán, D. (2025). Bending the Sierra Madre Oriental: A Paleocene orocline.

Guerra-Roel, R., Pastor-Galán, D., Chávez-Cabello, G., Ramírez-Peña, C.F., Aranda-Gómez, J.J., Patiño-Méndez, G., Nova, R.G., Rodríguez-Parra, A., y Molina-Garza, R.S., (2024), The Sierra Madre Oriental Orocline: Paleomagnetism of the Nazas Province in NE Mexico: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v. 129.

Heitfeld (1992). *Metodología para la evaluación de riesgos geológicos en carreteras de montaña*. Universidad de Karlsruhe, Alemania.

- Hoek, E., & Bray, J. W. (1981).** Rock Slope Engineering (3.^a ed.). Institution of Mining and Metallurgy.
- Hutchinson, J. N. (1988).** General report: Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. En C. Bonnard (Ed.), Proc. 5th International Symposium on Landslides (Vol. 1, pp. 3–35).
- Humphrey, W. E. (1949).** Geology of the Sierra de los Muertos area, Mexico (with descriptions of Aptian cephalopods from the La Peña Formation). Geological Society of America Bulletin, 60(1), 89–176.
- Imlay, R. W. (1936–1940).** Serie de trabajos clásicos sobre Jurásico/Cretácico de Coahuila. Imlay (1944). *Neocomian Faunas of Northern Mexico*. Geological Society of America Bulletin, 51, 177–210.
- Jones, D. K. C., Lee, E. M., Griffiths, J. S., & Chambers, J. G. (1995).** Slope stability and erosion processes. En Slope instability and erosion control: Ecotechnological solutions. Ledezma-Guerrero, (1967). Estudio geológico de la región de Galeana, Nuevo León. Instituto de Geología, UNAM.
- López-Ramos, E. (1985).** Geología general (Vol. 2, 6.^a ed.). México: Instituto de Geología, UNAM.
- Markland, J. T. (1972).** A useful technique for estimating the stability of rock slopes when the rigid wedge slide type of failure is expected. Imperial College Rock Mechanics Research Reprints, No. 19.
- Martini, M., & Ortega-Gutiérrez, F. (2018).** Tectono-stratigraphic evolution of eastern Mexico during the break-up of Pangea: A review. Earth-Science Reviews, 183, 38–55
- Michalzik, (1988). *Facies, Diagenesis and Sedimentary Evolution of the Cretaceous Carbonate Platform of Northeastern Mexico*. Universität Heidelberg, Alemania
- Michalzik, D., & Schumann, D. (1994).** Lithofacies relations and palaeoecology of a Late Jurassic–Early Cretaceous fan-delta to shelf system in the Sierra Madre Oriental, NE Mexico. Sedimentology, 41(3), 463–477.
- Mitre-Salazar, (1989). *Geología de la Sierra Madre Oriental entre Galeana e Iturbide, Nuevo León, México*. Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México.
- Muir, J.M., (1936).** Geology of the Tampico Region, Mexico: American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, Oklahoma, 280 p

- Ocampo-Díaz, Y. Z., Gray, G. G., & Chávez-Cabello, G. (2008).** [Trabajo sobre estratigrafía y evolución sedimentaria del noreste de México / Formación Taraises–Galeana]. Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Padilla y Sánchez, R. J. (1978).** Geología y estratigrafía (Cretácico Superior) del límite suroeste del Estado de Nuevo León. *Revista del Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)*, 2(1), 37–44.
- Padilla y Sánchez, R. J. (1982).** *Geologic evolution of the Sierra Madre Oriental between Linares, Concepción del Oro, Saltillo and Monterrey, México*. PhD Thesis, University of Texas at Austin, 217 p.
- Padilla y Sánchez, R. J. (1985).** *Las estructuras de la Curvatura de Monterrey, estados de Coahuila, Nuevo León, Zacatecas y San Luis Potosí*. **Revista del Instituto de Geología, UNAM**, 6(1), 1–20.
- Padilla y Sánchez, R. J. (1986).** Post-Paleozoic tectonics of northeast Mexico and its role in the evolution of the Gulf of Mexico. *Geofísica Internacional*, 25(1), 157–206.
- Padilla y Sánchez, R. J. (1992).** Suspensive tectonics of the Sierra Madre Oriental fold belt in northeastern Mexico. *Tectonophysics*, 208(1–3), 31–40.
- Pérez-Rul, (1967). Pérez-Rul, F. (1967). *Geología de la Sierra Madre Oriental en el Estado de Nuevo León*. Instituto Mexicano del Petróleo.
- Pindell, J. L. (1985).** Alleghenian reconstruction and subsequent evolution of the Gulf of Mexico, Bahamas, and proto-Caribbean. *Tectonics*, 4(1), 1–39.
- Priest, S. D. (1993).** *Discontinuity Analysis for Rock Engineering*. Springer.
- Prinz (1992). *Geowissenschaftliche Kartieranleitung*. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- Ramírez-Peña, C. F., & Chávez-Cabello, G. (2017).** Age and evolution of thin-skinned deformation in Zacatecas, Mexico: Sevier orogeny evidence in the Mexican Fold-Thrust Belt. *Journal of South American Earth Sciences*, 76, 101–114.
- Rogers, C. L., De Cserna, Z., Tavera, A., & Ulloa, F. (1957). *Reconocimiento geológico de parte de los estados de Coahuila y Nuevo León*. Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, Boletín.
- Salvador, A. (Ed.). (1991).** The Gulf of Mexico Basin (The Geology of North America, Vol. J). Geological Society of America.

SCT (2008). *Manual para la evaluación y mitigación de riesgos geológicos en carreteras*. Dirección General de Servicios Técnicos, México.

Sedlock, R. L., Ortega-Gutiérrez, F., & Speed, R. C. (1993). Tectonostratigraphic terranes and tectonic evolution of Mexico. Geological Society of America Special Paper, 278.

Sedlock, R. L., Ortega-Gutiérrez, F., & Speed, R. C. (1994). Trabajos relacionados con la reinterpretación tectónica y límites de terrenos del sur de México dentro del proyecto GEOLIMEX.

Seibertz, E. (1988). Estratigrafía y sedimentología de la Formación San Felipe en el noreste de México (Tesis doctoral). Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Talobre, J. (1957). La mécanique des roches. Dunod.

Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1967). Soil Mechanics in Engineering Practice (2.^a ed.). Wiley.

Tiedemann (1983). Design and Construction of Stable Slopes. En: Proceedings of the 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Helsinki, Finlandia, Vol. 3, pp. 65–74.

Torres-Ramos, R. (2011). *Estructura y evolución tectónica de la Sierra Madre Oriental en el noreste de México*. (Tesis o publicación técnica, muy citada en SMO).

Torres, R., Ruiz, J., Patchett, P. J. (1999). Permo-Triassic continental arc in eastern Mexico: Tectonic implications for reconstructions of southern North America. GSA Special Paper 340, 191–196.

Twiss, R. J., & Moores, E. M. (1992). Structural Geology (2.^a ed.). W. H. Freeman.

Valencia-Moreno, M., & Ortega-Rivera, A. (2011). Revisión sobre el arco magmático mexicano/Laramide en el noroeste de México. Revista Mexicana de ciencias Geológicas, 28(3), 389-405.

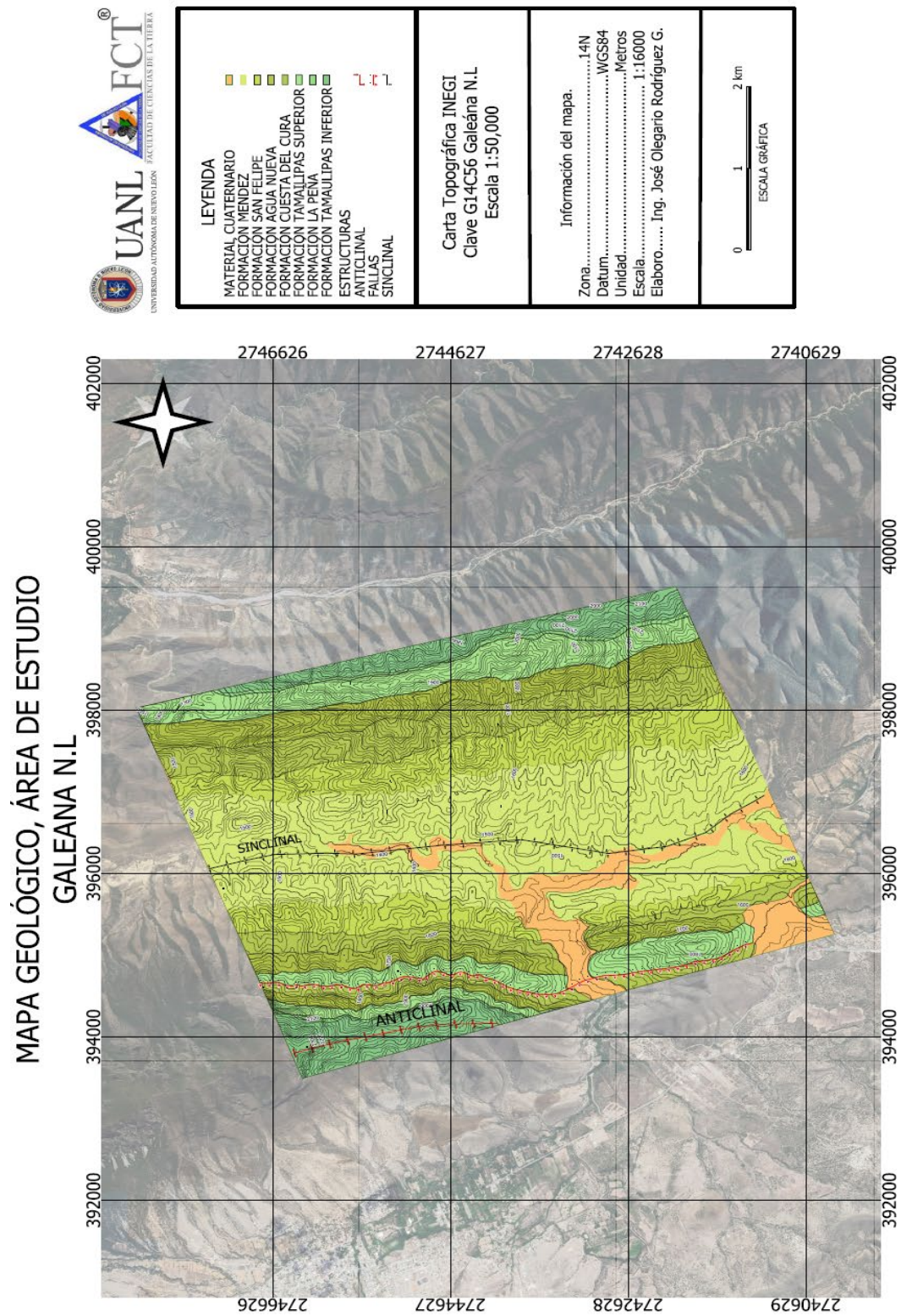
Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. En R. L. Schuster & R. J. Krizek (Eds.), Landslides: Analysis and Control (TRB Special Report 176, pp. 11–33). National Academy of Sciences.

Wilson, J. L. (1990). Carbonate platforms of northeastern and east-central Mexico. En: Geology of the Monterrey area and Cuatrociénegas Basin, Coahuila, Mexico (GSA Field Guide 4), 41–54.

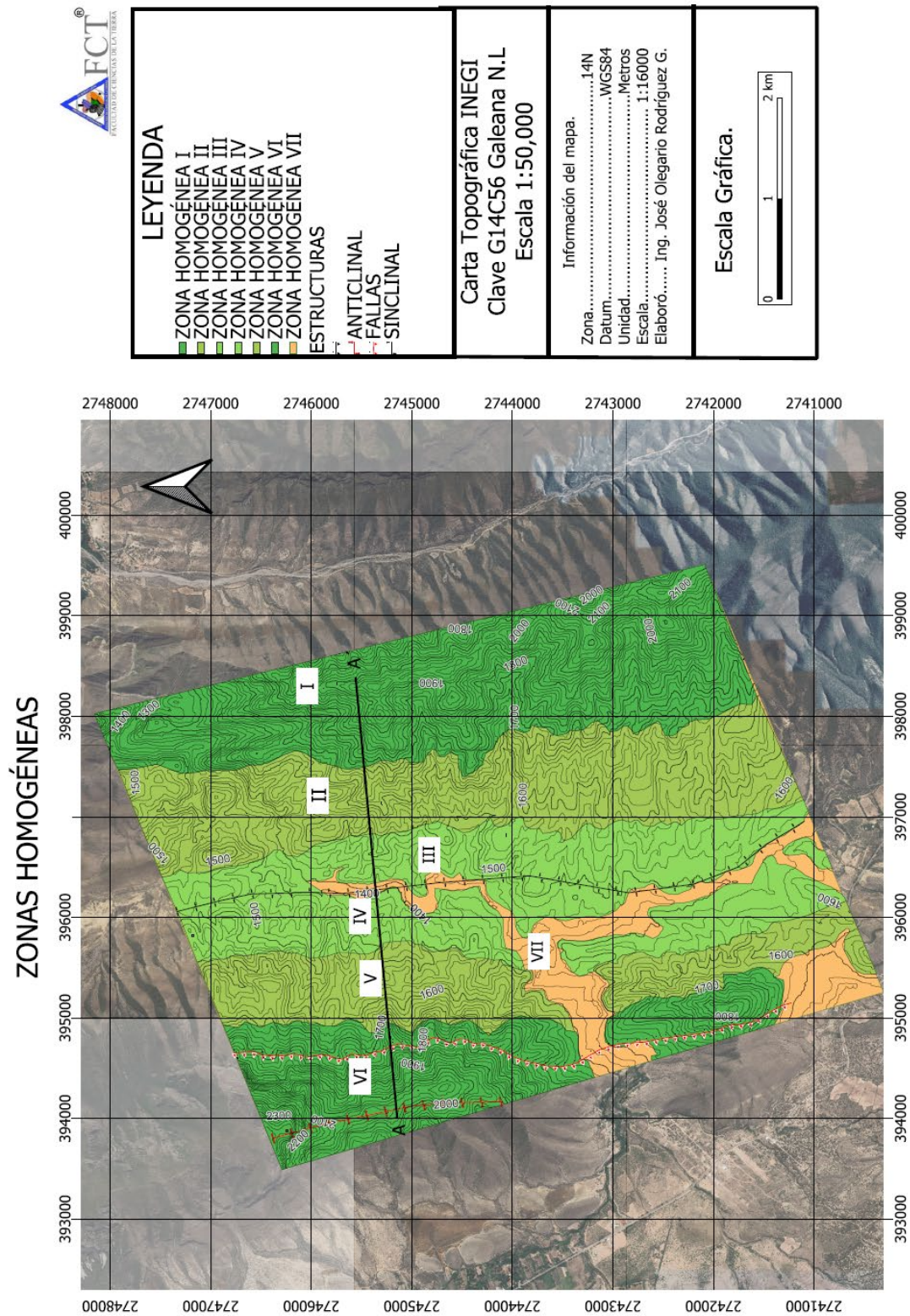
Yonkee, W. A., & Weil, A. B. (2015). Reviews of Sevier–Laramide tectonics of the U.S. Cordillera. Earth-Science Reviews, 145, 1–70.

ANEXOS

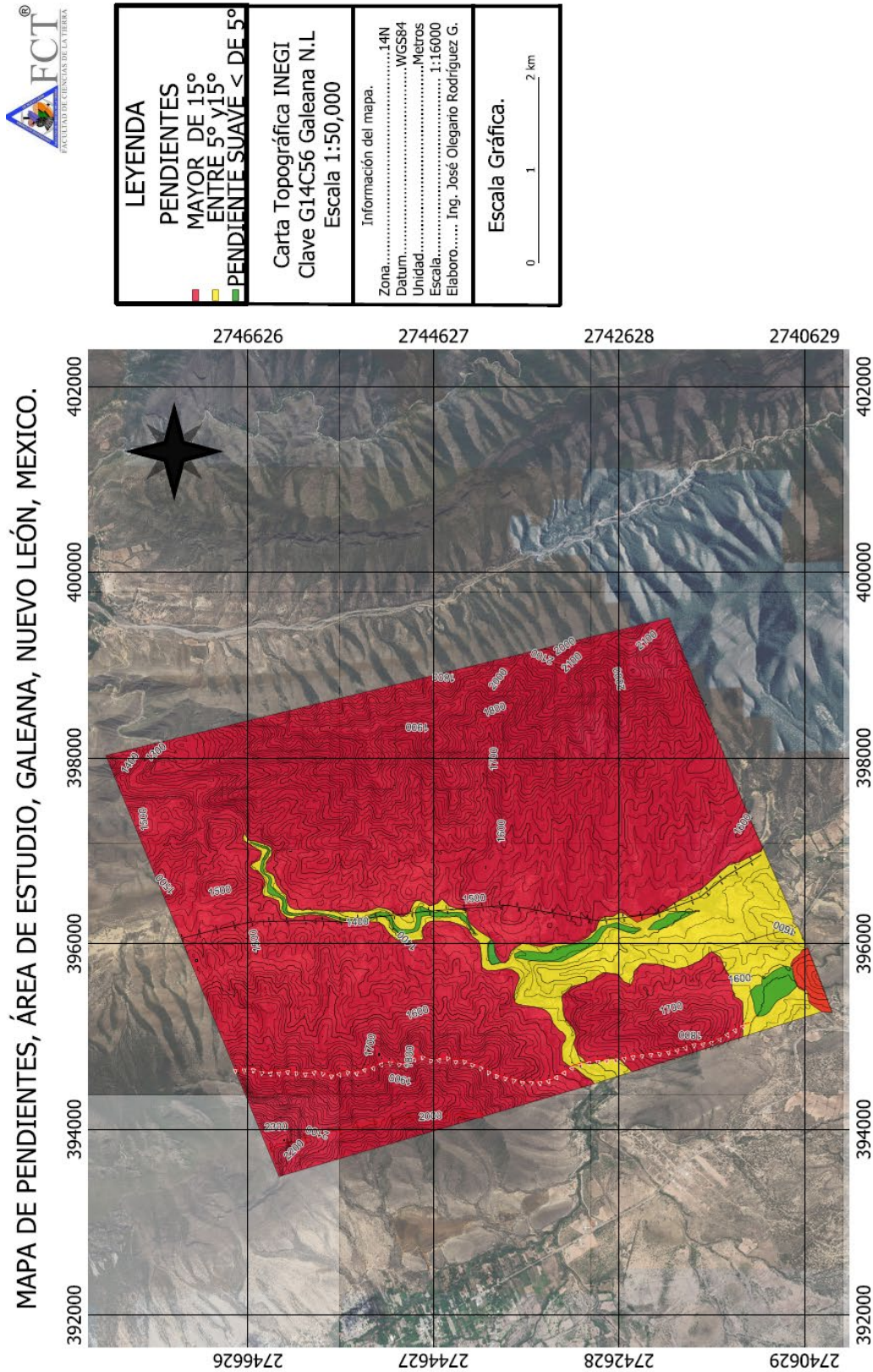
8.1 ANEXO I – MAPA GEOLÓGICO



8.2 ANEXO II – MAPA DE ZONAS HOMOGÉNEAS



8.3 ANEXO III – MAPA GEOMORFOLÓGICO.



8.4 ANEXO IV – RESULTADOS DE ENE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES MEDIANTE EL MÉTODO DE FELLENIOUS IMPLEMENTANDO GEOSTUDIO.

Resultados del análisis de estabilidad del talud mediante el método de Fellenious implementado en GeoStudio, donde se muestran las superficies de deslizamiento evaluadas y sus respectivos factores de seguridad (FS). Asimismo, se reportan los parámetros geométricos asociados a cada superficie circular de falla, incluyendo coordenadas del centro de rotación y radio, con el propósito de identificar la condición más crítica del talud.

Núm Sup de deslizamiento	FS	Centro X (m)	Centro Y (m)	Radios (m)
1	4.019	-923.77481	1,220.15357	1,530.4
2	1.193	-119.81862	256.19554	282.71
3	0.865	-37.24928	157.19341	161.33
4	0.773	-4.43076	117.84341	117.64
5	0.761	13.98620	95.76113	96.424
6	1.721	-876.30894	1,252.39350	1,528.5
7	0.943	-107.67340	261.63437	282.78
8	0.770	-28.53498	159.62620	161.92
9	0.728	3.05191	118.91119	118.64
10	0.754	20.87388	95.93895	97.809
11	1.270	-835.13231	1,285.48746	1,532.9
12	0.842	-96.68070	267.21711	284.01
13	0.732	-20.46640	162.12321	163.15
14	0.720	10.07636	120.00699	120.1
15	0.779	27.39841	96.12116	99.558
16	1.093	-799.01692	1,319.33141	1,542.3
17	0.797	-86.61653	272.92621	286.16
18	0.721	-12.91940	164.67660	164.91
19	0.725	16.72923	121.12738	121.93
20	0.802	33.62698	96.30722	101.6
21	1.007	-767.02787	1,353.83570	1,555.9
22	0.779	-77.31023	278.74657	289.07
23	0.724	-5.79923	167.27965	167.09
24	0.747	23.07683	122.26944	124.06
25	0.854	39.61120	96.49669	103.89
26	0.964	-738.44206	1,388.92304	1,572.9
27	0.776	-68.62970	284.66517	292.61
28	0.737	0.96759	169.92654	169.62
29	0.777	29.17073	123.43061	126.45
30	0.908	45.39136	96.68915	106.38
31	0.944	-712.69231	1,424.52673	1,592.8
32	0.783	-60.47124	290.67077	296.67
33	0.757	7.43884	172.61224	172.45
34	0.816	35.05162	124.60872	129.05
35	0.986	50.99938	96.88427	109.05
36	0.938	-689.32810	1,460.58907	1,615
37	0.797	-52.75241	296.75364	301.17
38	0.780	13.66058	175.33244	175.53
39	0.861	40.75200	125.80187	131.84
40	1.083	56.46086	97.08175	111.86
41	0.940	-667.98749	1,497.06008	1,639.2
42	0.814	-45.40691	302.90537	306.04
43	0.809	19.66989	178.08336	178.82
44	0.917	46.29815	127.00843	134.77
45	1.179	61.79657	97.28133	114.8
46	4.042	-915.13430	1,210.81769	1,517.7
47	1.200	-117.90128	254.83778	280.36
48	0.869	-36.02220	156.65475	159.99
49	0.776	-3.47788	117.63012	116.66
50	0.764	14.78534	95.73029	95.624
51	1.725	-867.70485	1,243.06241	1,515.8
52	0.946	-105.76274	260.27742	280.44
53	0.773	-27.31164	159.08790	160.58
54	0.730	4.00215	118.69806	117.66
55	0.753	21.67092	95.90813	97.012
56	1.273	-826.60436	1,276.16726	1,520.3
57	0.845	-94.78400	265.86199	281.68
58	0.735	-19.25089	161.58573	161.82
59	0.723	11.02103	119.79421	119.13
60	0.777	28.19102	96.09040	98.765
61	1.095	-790.58872	1,310.02666	1,529.8
62	0.800	-84.73814	271.57370	283.85
63	0.723	-11.71419	164.14028	163.59
64	0.726	17.66654	120.91512	120.97

65	0.801	34.41371	96.27654	100.82
66	1.010	-758.71267	1,344.54975	1,543.5
67	0.782	-75.45261	277.39723	286.78
68	0.727	-4.60574	166.74475	165.78
69	0.748	24.00575	122.05778	123.11
70	0.852	40.39119	96.46611	103.11
71	0.968	-730.24641	1,379.65829	1,560.6
72	0.779	-66.79408	283.31940	290.34
73	0.740	2.14864	169.39322	168.33
74	0.776	30.09070	123.21965	125.51
75	0.905	46.16414	96.65868	105.61
76	0.947	-704.61838	1,415.28483	1,580.6
77	0.786	-58.65803	289.32884	294.42
78	0.760	8.60719	172.08065	171.17
79	0.815	35.96241	124.39851	128.12
80	0.983	51.76473	96.85392	108.28
81	0.941	-681.37524	1,451.37112	1,602.9
82	0.800	-50.96153	295.41575	298.95
83	0.784	14.81624	174.80265	174.26
84	0.860	41.65359	125.59245	130.91
85	1.078	57.21872	97.05152	111.1
86	0.944	-660.15329	1,487.86670	1,627.3
87	0.818	-43.63793	301.57163	303.84
88	0.812	20.81307	177.55541	177.57
89	0.915	47.19066	126.79981	133.86
90	1.175	62.54700	97.25123	114.05
91	4.065	-906.49380	1,201.48181	1,504.9
92	1.206	-115.98395	253.48002	278.01
93	0.873	-34.79512	156.11609	158.65
94	0.779	-2.52499	117.41683	115.68
95	0.766	15.58447	95.69945	94.824
96	1.729	-859.10133	1,233.73139	1,503.1
97	0.950	-103.85218	258.92049	278.1
98	0.776	-26.08835	158.54960	159.25
99	0.733	4.95234	118.48493	116.69
100	0.754	22.46793	95.87732	96.214
101	1.276	-818.07803	1,266.84729	1,507.7
102	0.847	-92.88760	264.50692	279.35
103	0.738	-18.03555	161.04826	160.5
104	0.725	11.96557	119.58145	118.16
105	0.777	28.98354	96.05964	97.972
106	1.098	-782.16337	1,300.72237	1,517.3
107	0.802	-82.86028	270.22126	281.54
108	0.726	-10.50928	163.60400	162.27
109	0.729	18.60364	120.70286	120
110	0.799	35.20028	96.24587	100.03
111	1.013	-750.40156	1,335.26450	1,531.1
112	0.784	-73.59574	276.04800	284.49
113	0.730	-3.41266	166.20989	164.48
114	0.749	24.93436	121.84616	122.16
115	0.850	41.17095	96.43553	102.33
116	0.971	-722.05599	1,370.39450	1,548.4
117	0.782	-64.95941	281.97379	288.08
118	0.743	3.32915	168.85998	167.04
119	0.776	31.01027	123.00873	124.56
120	0.903	46.93661	96.62821	104.84
121	0.951	-696.55072	1,406.04415	1,568.4
122	0.789	-56.84599	287.98713	292.18
123	0.763	9.77488	171.54915	169.89
124	0.815	36.87272	124.18835	127.19
125	0.980	52.52968	96.82357	107.52
126	0.945	-673.42959	1,442.15462	1,590.9
127	0.804	-49.17198	294.07811	296.72
128	0.788	15.97114	174.27296	173

129	0.859	42.55463	125.38308	129.99
130	1.075	57.97613	97.02129	110.34
131	0.948	-652.32709	1,478.67502	1,615.4
132	0.822	-41.87043	300.23817	301.64
133	0.816	21.95540	177.02760	176.31
134	0.914	48.08256	126.59125	132.94
135	1.172	63.29694	97.22113	113.3
136	4.089	-897.85331	1,192.14593	1,492.2
137	1.213	-114.06662	252.12226	275.66
138	0.878	-33.56805	155.57743	157.31
139	0.783	-1.57211	117.20354	114.71
140	0.769	16.38360	95.66861	94.025
141	1.733	-850.49840	1,224.40045	1,490.4
142	0.954	-101.94173	257.56356	275.75
143	0.779	-24.86513	158.01132	157.91
144	0.736	5.90250	118.27180	115.72
145	0.757	23.26490	95.84650	95.416
146	1.279	-809.55337	1,257.52758	1,495.1
147	0.850	-90.99150	263.15189	277.02
148	0.740	-16.82038	160.51082	159.17
149	0.728	12.91000	119.36869	117.19
150	0.777	29.77595	96.02888	97.178
151	1.101	-773.74093	1,291.41854	1,504.8
152	0.805	-80.98294	268.86891	279.23
153	0.728	-9.30467	163.06775	160.95
154	0.732	19.54053	120.49062	119.04
155	0.799	35.98667	96.21519	99.241
156	1.016	-742.09461	1,325.97997	1,518.8
157	0.787	-71.73963	274.69890	282.21
158	0.733	-2.22003	165.67509	163.17
159	0.752	25.86266	121.63455	121.21
160	0.848	41.95045	96.40495	101.55
161	0.974	-713.87091	1,361.13168	1,536.1
162	0.785	-63.12573	280.62834	285.81
163	0.747	4.50911	168.32682	165.74
164	0.778	31.92945	122.79784	123.62
165	0.901	47.70874	96.59775	104.07
166	0.954	-688.48946	1,396.80471	1,556.3
167	0.793	-55.03512	286.64562	289.94
168	0.767	10.94190	171.01774	168.61
169	0.815	37.78255	123.97822	126.25
170	0.977	53.29425	96.79322	106.75
171	0.949	-665.49127	1,432.93962	1,578.9
172	0.807	-47.38378	292.74072	294.5
173	0.792	17.12527	173.74339	171.73
174	0.859	43.45511	125.17375	129.06
175	1.058	58.73308	96.99108	109.59
176	0.952	-644.50901	1,469.48506	1,603.5
177	0.826	-40.10443	298.90500	299.44
178	0.820	23.09688	176.49991	175.06
179	0.913	48.97383	126.38275	132.03
180	1.169	64.04636	97.19104	112.55
181	4.113	-889.21283	1,182.81005	1,479.5
182	1.221	-112.14929	250.76451	273.31
183	0.882	-32.34097	155.03877	155.97
184	0.786	-0.61922	116.99025	113.73
185	0.772	17.18273	95.63777	93.225
186	1.738	-841.89607	1,215.06960	1,477.8
187	0.957	-100.03139	256.20665	273.41
188	0.782	-23.64196	157.47303	156.58
189	0.738	6.85261	118.05868	114.74
190	0.759	24.06184	95.81569	94.619
191	1.282	-801.03039	1,248.20811	1,482.5
192	0.853	-89.09571	261.79690	274.69

193	0.743	-15.60538	159.97339	157.84
194	0.731	13.85430	119.15594	116.22
195	0.778	30.56827	95.99813	96.386
196	1.104	-765.32145	1,282.11519	1,492.3
197	0.808	-79.10616	267.51663	276.92
198	0.731	-8.10036	162.53153	159.64
199	0.735	20.47720	120.27840	118.08
200	0.799	36.77289	96.18452	98.454
201	1.019	-733.79190	1,316.69617	1,506.4
202	0.790	-69.88431	273.34991	279.92
203	0.736	-1.02783	165.14035	161.86
204	0.755	26.79065	121.42297	120.25
205	0.847	42.72970	96.37438	100.77
206	0.977	-705.69126	1,351.86986	1,523.9
207	0.789	-61.29305	279.28306	283.55
208	0.750	5.68850	167.79373	164.45
209	0.780	32.84821	122.58697	122.68
210	0.899	48.48055	96.56729	103.29
211	0.958	-680.43470	1,387.56653	1,544.2
212	0.796	-53.22544	285.30432	287.7
213	0.770	12.10824	170.48643	167.33
214	0.816	38.69188	123.76813	125.32
215	0.975	54.05841	96.76289	105.99
216	0.953	-657.56037	1,423.72613	1,566.9
217	0.811	-45.59695	291.40359	292.29
218	0.796	18.27862	173.21393	170.46
219	0.859	44.35503	124.96447	128.14
220	1.058	59.48957	96.96087	108.83
221	0.956	-636.69918	1,460.29686	1,591.6
222	0.830	-38.33996	297.57212	297.25
223	0.825	24.23749	175.97235	173.8
224	0.913	49.86446	126.17430	131.11
225	1.167	64.79526	97.16096	111.8
226	4.137	-880.57236	1,173.47418	1,466.8
227	1.228	-110.23196	249.40675	270.96
228	0.887	-31.11390	154.50011	154.63
229	0.790	0.33366	116.77696	112.75
230	0.775	17.98186	95.60693	92.425
231	1.742	-833.29435	1,205.73883	1,465.1
232	0.961	-98.12116	254.84976	271.07
233	0.785	-22.41886	156.93476	155.24
234	0.741	7.80268	117.84556	113.77
235	0.762	24.85874	95.78488	93.821
236	1.285	-792.50915	1,238.88891	1,469.9
237	0.856	-87.20024	260.44195	272.37
238	0.746	-14.39056	159.43599	156.51
239	0.733	14.79848	118.94319	115.26
240	0.781	31.36049	95.96737	95.593
241	1.107	-756.90500	1,272.81233	1,479.8
242	0.811	-77.22993	266.16444	274.61
243	0.734	-6.89637	161.99536	158.32
244	0.738	21.41364	120.06619	117.12
245	0.799	37.55893	96.15385	97.667
246	1.023	-725.49350	1,307.41312	1,494
247	0.793	-68.02978	272.00106	277.63
248	0.739	0.16392	164.60566	160.56
249	0.758	27.71831	121.21141	119.3
250	0.847	43.50869	96.34381	99.991
251	0.981	-697.51714	1,342.60906	1,511.6
252	0.792	-59.46139	277.93796	281.28
253	0.753	6.86731	167.26071	163.16
254	0.783	33.76656	122.37615	121.74
255	0.898	49.25202	96.53683	102.52
256	0.962	-672.38655	1,378.32963	1,532

257	0.800	-51.41699	283.96325	285.46
258	0.774	13.27389	169.95521	166.05
259	0.818	39.60072	123.55809	124.39
260	0.973	54.82217	96.73255	105.22
261	0.957	-649.63703	1,414.51419	1,554.9
262	0.815	-43.81152	290.06671	290.07
263	0.800	19.43118	172.68459	169.2
264	0.860	45.25436	124.75525	127.22
265	1.055	60.24559	96.93066	108.07
266	0.961	-628.89771	1,451.11046	1,579.7
267	0.834	-36.57703	296.23955	295.05
268	0.829	25.37721	175.44493	172.55
269	0.913	50.75446	125.96591	130.2
270	1.165	65.54363	97.13089	111.05
271	4.162	-871.93191	1,164.13830	1,454.1
272	1.235	-108.31464	248.04900	268.61
273	0.891	-29.88683	153.96145	153.29
274	0.793	1.28654	116.56367	111.78
275	0.778	18.78099	95.57609	91.625
276	1.747	-824.69326	1,196.40814	1,452.4
277	0.965	-96.21104	253.49288	268.73
278	0.788	-21.19583	156.39649	153.9
279	0.744	8.75270	117.63244	112.79
280	0.765	25.65560	95.75406	93.024
281	1.288	-783.98969	1,229.56997	1,457.3
282	0.859	-85.30509	259.08705	270.04
283	0.749	-13.17593	158.89860	155.18
284	0.736	15.74252	118.73046	114.29
285	0.784	32.15260	95.93662	94.8
286	1.110	-748.49164	1,263.50997	1,467.3
287	0.814	-75.35426	264.81233	272.31
288	0.737	-5.69269	161.45922	157
289	0.741	22.34985	119.85400	116.16
290	0.800	38.34479	96.12318	96.881
291	1.026	-717.19951	1,298.13083	1,481.6
292	0.796	-66.17605	270.65233	275.35
293	0.742	1.35522	164.07103	159.26
294	0.761	28.64564	120.99988	118.35
295	0.847	44.28741	96.31325	99.212
296	0.984	-689.34863	1,333.34930	1,499.4
297	0.795	-57.63076	276.59302	279.02
298	0.756	8.04554	166.72777	161.87
299	0.787	34.68449	122.16535	120.8
300	0.898	50.02315	96.50638	101.75
301	0.966	-664.34512	1,369.09405	1,519.9
302	0.803	-49.60977	282.62239	283.22
303	0.777	14.43884	169.42409	164.77
304	0.821	40.50905	123.34809	123.45
305	0.972	55.58551	96.70223	104.46
306	0.961	-641.72137	1,405.30382	1,542.9
307	0.819	-42.02750	288.73010	287.85
308	0.804	20.58293	172.15537	167.93
309	0.861	46.15311	124.54608	126.29
310	1.053	61.00113	96.90047	107.32
311	0.965	-621.10474	1,441.92587	1,567.8
312	0.838	-34.81567	294.90728	292.86
313	0.833	26.51604	174.91764	171.3
314	0.913	51.64380	125.75759	129.29
315	1.164	66.29146	97.10083	110.3
316	4.187	-863.29147	1,154.80243	1,441.3
317	1.243	-106.39731	246.69124	266.26
318	0.896	-28.65975	153.42279	151.95
319	0.797	2.23942	116.35038	110.8
320	0.782	19.58012	95.54525	90.826

321	1.751	-816.09282	1,187.07755	1,439.7
322	0.969	-94.30105	252.13601	266.38
323	0.791	-19.97286	155.85823	152.57
324	0.747	9.70267	117.41932	111.82
325	0.768	26.45243	95.72325	92.226
326	1.291	-775.47203	1,220.25130	1,444.7
327	0.862	-83.41028	257.73219	267.71
328	0.751	-11.96148	158.36123	153.86
329	0.739	16.68643	118.51773	113.32
330	0.787	32.94461	95.90587	94.007
331	1.113	-740.08143	1,254.20812	1,454.9
332	0.817	-73.47918	263.46031	270
333	0.739	-4.48935	160.92312	155.69
334	0.744	23.28583	119.64183	115.2
335	0.803	39.13046	96.09252	96.095
336	1.029	-708.91001	1,288.84933	1,469.3
337	0.800	-64.32316	269.30374	273.06
338	0.745	2.54604	163.53646	157.95
339	0.762	29.57264	120.78837	117.4
340	0.839	45.06586	96.28269	98.432
341	0.988	-681.18586	1,324.09060	1,487.1
342	0.798	-55.80119	275.24827	276.76
343	0.759	9.22317	166.19492	160.58
344	0.791	35.60198	121.95460	119.85
345	0.897	50.79393	96.47594	100.98
346	0.969	-656.31051	1,359.85980	1,507.8
347	0.807	-47.80381	281.28176	280.98
348	0.781	15.60307	168.89307	163.5
349	0.825	41.41685	123.13813	122.52
350	0.971	56.34843	96.67191	103.7
351	0.965	-633.81350	1,396.09505	1,530.9
352	0.823	-40.24492	287.39376	285.64
353	0.808	21.73386	171.62626	166.67
354	0.863	47.05127	124.33696	125.37
355	1.051	61.75618	96.87028	106.56
356	0.969	-613.32038	1,432.74314	1,556
357	0.842	-33.05590	293.57533	290.67
358	0.838	27.65396	174.39050	170.05
359	0.914	52.53248	125.54932	128.37
360	1.162	67.03876	97.07078	109.55
361	4.212	-854.65104	1,145.46656	1,428.6
362	1.250	-104.47999	245.33349	263.91
363	0.900	-27.43268	152.88413	150.61
364	0.800	3.19230	116.13709	109.82
365	0.785	20.37924	95.51441	90.026
366	1.756	-807.49303	1,177.74704	1,427
367	0.973	-92.39117	250.77916	264.04
368	0.794	-18.74996	155.31997	151.23
369	0.750	10.65260	117.20621	110.85
370	0.771	27.24922	95.69244	91.429
371	1.294	-766.95622	1,210.93291	1,432.1
372	0.866	-81.51581	256.37738	265.38
373	0.754	-10.74722	157.82389	152.53
374	0.742	17.63021	118.30502	112.35
375	0.790	33.73651	95.87512	93.215
376	1.116	-731.67444	1,244.90680	1,442.4
377	0.820	-71.60468	262.10837	267.69
378	0.742	-3.28633	160.38705	154.37
379	0.747	24.22157	119.42967	114.25
380	0.806	39.91593	96.06185	95.309
381	1.033	-700.62508	1,279.56862	1,456.9
382	0.803	-62.47110	267.95528	270.78
383	0.748	3.73639	163.00195	156.65
384	0.766	30.49930	120.57689	116.45
385	0.841	45.84404	96.25213	97.654

386	0.991	-673.02892	1,314.83298	1,474.9
387	0.802	-53.97269	273.90370	274.5
388	0.763	10.40019	165.66214	159.29
389	0.794	36.51904	121.74387	118.91
390	0.898	51.56436	96.44550	100.21
391	0.973	-648.28286	1,350.62692	1,495.7
392	0.810	-45.99914	279.94135	278.74
393	0.785	16.76657	168.36215	162.22
394	0.829	42.32413	122.92822	121.59
395	0.970	57.11092	96.64160	102.93
396	0.969	-625.91355	1,386.88792	1,518.9
397	0.826	-38.46380	286.05770	283.42
398	0.812	22.88395	171.09728	165.4
399	0.866	47.94882	124.12789	124.45
400	1.049	62.51074	96.84011	105.81
401	0.974	-605.54478	1,423.56230	1,544.1
402	0.847	-31.29775	292.24370	288.48
403	0.842	28.79096	173.86350	168.8
404	0.916	53.42048	125.34111	127.46
405	1.148	67.78550	97.04073	108.8

8.5 ANEXO V – CARTA DE RIESGOS GEOLÓGICOS

