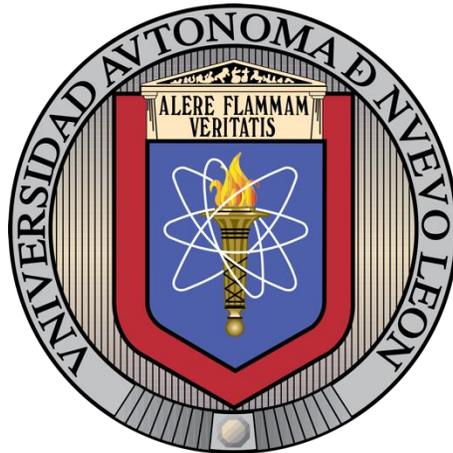


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**INVESTIGACIÓN DE FILTRACIONES EN LAS OBRAS
SUBTERRÁNEAS. CASO DE ESTUDIO: TÚNEL LOMA LARGA, SAN
PEDRO GARZA GARCÍA, N.L.**

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL

PRESENTA

ING. SUIZA RODRÍGUEZ MARTÍNEZ

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N.L.

AGOSTO 2024



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**INVESTIGACIÓN DE FILTRACIONES EN LAS OBRAS
SUBTERRÁNEAS. CASO DE ESTUDIO: TÚNEL LOMA LARGA, SAN
PEDRO GARZA GARCÍA, N.L.**

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL

PRESENTA

ING. SUIZA RODRÍGUEZ MARTÍNEZ

Vo.Bo.

Dr. Héctor de León Gómez

Director de Tesis

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N.L.

AGOSTO 2024



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



INVESTIGACIÓN DE FILTRACIONES EN LAS OBRAS SUBTERRÁNEAS. CASO DE ESTUDIO: TÚNEL LOMA LARGA, SAN PEDRO GARZA GARCÍA, N.L.

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL

PRESENTA

ING. SUIZA RODRÍGUEZ MARTÍNEZ

Vo.Bo.

Comité de Revisión de Tesis

Dr. Héctor de León Gómez

Director de Tesis

MC. Efraín Alva Niño

Asesor Externo

Dr. Carlos Alberto Charles Cruz

Co-Director de Tesis

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N.L.

AGOSTO 2024

**“INVESTIGACIÓN DE FILTRACIONES EN LAS OBRAS SUBTERRÁNEAS. CASO
DE ESTUDIO: TÚNEL LOMA LARGO, SAN PEDRO GARZA GARCÍA, N.L.”**

Aprobación de la tesis

DR. HÉCTOR DE LEÓN GÓMEZ

M.C. EFRAÍN ALVA NIÑO

DR. CARLOS ALBERTO CHARLES CRUZ

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

2024/09/13

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
PRESENTE.-

Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de **TESIS**, cuyo título es **“INVESTIGACIÓN DE FILTRACIONES EN LAS OBRAS SUBTERRÁNEAS. CASO DE ESTUDIO: TÚNEL LOMA LARGA, SAN PEDRO GARZA GARCÍA, N. L.”**, que presenta la **ING. SUIZA RODRÍGUEZ MARTÍNEZ**, como requisito parcial para obtener el grado de **MAESTRA EN CIENCIAS**, del programa **MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL**.

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento **CUENTA** con la calidad y nivel **CIENTÍFICO**, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea **APROBADO**.

Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,

DR. HÉCTOR DE LEÓN GÓMEZ

Evaluador



Av. Universidad S/N Cd. Universitaria Apdo. Postal 17
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66455
Tels. (81) 14424400 ext. 4448, 8329 4000 ext. 7216, 7234
www.ingenieriacivil.uanl.mx

FECHA: 2024/septiembre/24

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL

SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

PRESENTE. -

Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de **TESIS**, cuyo título es **"INVESTIGACIÓN DE FILTRACIONES EN LAS OBRAS SUBTERRÁNEAS. CASO DE ESTUDIO: TÚNEL LOMA LARGA, SAN PEDRO GARZA GARCÍA, N. L."**, que presenta la **ING. SUIZA RODRÍGUEZ MARTÍNEZ**, como requisito parcial para obtener el grado de **MAESTRA EN CIENCIAS**, del programa **MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL**.

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento **CUENTA** con la calidad y nivel **CIENTÍFICO**, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea **APROBADO**.

Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,



M. C. Efraín Alva Niño

Evaluador



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N.L. A 27 DE SEPTIEMBRE 2024

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
PRESENTE.-

Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de **TESIS**, cuyo título es **“INVESTIGACIÓN DE FILTRACIONES EN LAS OBRAS SUBTERRÁNEAS. CASO DE ESTUDIO: TÚNEL LOMA LARGA, SAN PEDRO GARZA GARCÍA, N. L.”**, que presenta la **ING. SUIZA RODRÍGUEZ MARTÍNEZ**, como requisito parcial para obtener el grado de **MAESTRA EN CIENCIAS**, del programa **MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL**.

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento **CUENTA** con la calidad y nivel **CIENTÍFICO**, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea **APROBADO**.

Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,

DR. CARLOS ALBERTO CHARLES CRUZ

PROFESOR TITULAR

Evaluador



Av. Universidad S/N Cd. Universitaria
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P.66455
Tels. (81) 14424400 ext. 4448 | 83294000 ext. 7216, 7234
correo electrónico: spi.fic@uanl.mx



Comprobante de corrección de escritos

ESTUDIANTE PROFESOR

NOMBRE: SUIZA RODRÍGUEZ MARTÍNEZ

TIPO DE DOCUMENTO: ARTÍCULO TESIS PI OTRO

TÍTULO DEL DOCUMENTO A REVISAR:
INVESTIGACIÓN DE FILTRACIONES EN LAS OBRAS
SUBTERRÁNEAS. CASO DE ESTUDIO: TUNEL LOMA CARGA,
SAN PEDRO GARZA GARCIA, N.L.

RECOMENDACIONES ADICIONALES:

REALIZAR LAS CORRECCIONES QUE APAREZCAN
EN LA TESIS IMPRESA.

*Este documento certifica la corrección DEFINITIVA del trabajo arriba identificado, en los aspectos: ortográfico, metodológico y estilístico.

Nombre y firma de quien corrigió:

Arq. Ramón Longoria Ramírez
Asesor Profesional de Apoyo

Dr. Gerardo Fajardo San Miguel
Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación
Ciudad Universitaria, 27 de septiembre de 2024



SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



*“La roca es el archivo del mundo, en ella
se conservan las huellas de lo que fuimos
y las claves de lo que seremos”*

- Henri Poincaré

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mi familia, por ser mi mayor fuente de inspiración y apoyo. A mi hermana Aurora, por su constante aliento y sabiduría; a mi hermano Martín, por su compañía y aportes valiosos; a mi mamá, por su amor incondicional y paciencia, y, a mi papá, por su firme apoyo y orientación, que me han permitido alcanzar esta meta.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi agradecimiento a todos y todas las personas e instituciones que me acompañaron y apoyaron a lo largo de este camino. Agradezco al universo por haberme guiado al lugar indicado, permitiéndome seguir mis sueños e intereses, incluso en momentos difíciles como los que vivimos durante la pandemia.

En primer lugar, a mi familia, cuya presencia y apoyo incondicional han sido fundamentales para la realización de esta tesis. A mi hermana Aurora, gracias por tus ánimos, consejos y por inspirarme con tu ejemplo a ser una mejor investigadora. A mi hermano Martín, por tu compañía constante durante la maestría en Monterrey y por tus valiosas observaciones sobre redacción. A mi papá, Martín, por haberme brindado su apoyo incondicional para estudiar fuera de casa, y por los consejos técnicos que, como ingeniero, me ayudaron a tener una mejor perspectiva de mi trabajo. Y, sobre todo, a mi mamá, Suiza, quien con su compañía y apoyo moral inquebrantable me permitió concluir esta tesis; sin tus acertadas observaciones y tu aliento constante, no habría logrado finalizar este trabajo con la misma calidad y rapidez. Gracias, de corazón, a todos ustedes; sin su apoyo, esto no habría sido posible.

Mi más sincero agradecimiento al Dr. Héctor de León Gómez, director de esta tesis, por su apoyo constante durante la maestría y en la redacción de este trabajo. Gracias por su paciencia, por compartir su experiencia y conocimientos, por sus sabios consejos y por las buenas ideas que enriquecieron esta investigación.

Al Dr. Francisco Medina Barrera, quien fue mi profesor en la facultad, por su orientación y por resolver mis dudas con claridad, así como por sus comentarios y observaciones que resultaron cruciales para mi investigación.

Al M.C. Efraín Alba Niño, mi asesor externo, a quien conozco desde la facultad. Le agradezco por la guía y enseñanza continua que me ha brindado desde entonces.

Al Dr. Carlos Alberto Charles Cruz, co – director de esta tesis, le expreso mi gratitud por sus valiosos consejos técnicos, que fueron de gran utilidad para el desarrollo de este trabajo.

Quiero expresar un agradecimiento especial al Ing. René Contreras, cuyo apoyo y colaboración fueron sumamente valiosos para mi investigación. Su generosidad y disposición a compartir sus conocimientos marcaron una gran diferencia en mi trabajo.

A todos mis profesores durante la maestría, quienes me enseñaron tanto y a quienes recuerdo con mucho cariño.

Al Departamento de Verificación y Control de Materiales de Construcción, en especial al M.C. Javier Rocha, por su amabilidad y por facilitarme las instalaciones necesarias para esta investigación, y a los técnicos Arturo Ferriño, Mario Siller y Jaime Luna, por su invaluable ayuda en la preparación de las muestras.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León, mi alma mater, y al Instituto de Ingeniería Civil de la UANL, por ser el hogar académico que me acogió durante estos años y por brindar el espacio para mi formación.

Finalmente, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por la beca que me permitió realizar este posgrado y enfocarme plenamente en mis estudios.

Este trabajo es el resultado del esfuerzo conjunto de muchas personas e instituciones a quienes les debo un sincero agradecimiento. Sin ustedes, esta tesis no habría sido posible.

RESUMEN

La presente tesis aborda la problemática de las filtraciones en las obras subterráneas, centrándose en el caso específico del Túnel Loma Larga en San Pedro Garza García, Nuevo León. El trabajo se enfoca en evaluar las condiciones geológico - estructurales, geomecánicas e hidrogeológicas del anticlinal Loma Larga, con el fin de identificar los mecanismos de inestabilidad que están afectando la seguridad de la estructura del túnel.

Mediante una metodología que combina la cartografía geológica-estructural, el análisis cinemático, la caracterización geomecánica y la creación de cartas piezométricas, se busca explicar el origen de las filtraciones que están deteriorando tanto la roca circundante como el recubrimiento de concreto lanzado del túnel. Los resultados revelan que la presencia de fracturas y fallas geológicas, junto con la litología permeable del anticlinal Loma Larga, favorecen el flujo de agua subterránea hacia el interior del túnel, así como la carga extra de edificaciones y desarrollo urbano sobre el área del túnel, han provocado el deterioro progresivo de la estructura.

Se concluye que las condiciones actuales del macizo rocoso son desfavorables para la estabilidad del túnel, y se propone la implementación de medidas correctivas que mitiguen los efectos negativos de estas filtraciones. El estudio también subraya la importancia de un monitoreo continuo y de un mantenimiento adecuado para prevenir futuros colapsos y garantizar la seguridad de la infraestructura. Este trabajo contribuye al conocimiento geológico del área metropolitana de Monterrey, con aplicaciones potenciales en otros proyectos subterráneos futuros en regiones similares.

ABSTRACT

This thesis addresses the issue of water seepage in underground structures, focusing on the specific case of the Loma Larga Tunnel in San Pedro Garza García, Nuevo León. The study aims to evaluate the geological-structural, geomechanical and hydrogeological conditions of the Loma Larga anticline, with the objective of identifying instability mechanisms that are compromising the security of the tunnel structure.

Through a methodology that combines geological-structural mapping, kinematic analysis, geomechanical characterization, and piezometric mapping, the research seeks to explain the origin of the seepage that is deteriorating both the surrounding rock and the tunnel's shotconcrete lining. The findings reveal that the presence of fractures and geological faults, along with the permeable lithology of the Loma Larga anticline, facilitates the flow of groundwater into the tunnel. Additionally, the extra load from buildings and urban development over the tunnel area has caused the progressive deterioration of the structure.

It is concluded that the current conditions of the rock mass are unfavorable for the tunnel's stability, and corrective measures are proposed to mitigate the negative effects of these seepages. The research also emphasizes the importance of continuous monitoring and proper maintenance to prevent future collapses and ensure the infrastructure's safety. This study contributes to the geological knowledge of the Monterrey metropolitan area, with potential applications in future underground projects in similar regions.

CONTENIDO

CAPÍTULO 1 GENERALIDADES	1
1.1 Introducción	1
1.2 Problemática y justificación	2
1.3 Hipótesis	4
1.4 Objetivos	4
1.4.1 Objetivo general	4
1.4.2 Objetivos específicos	4
1.5 Metodología general	5
1.5.1 Revisión bibliográfica	5
1.5.2 Metodología de campo	6
1.5.2.1 Cartografía geológica – estructural	6
1.5.2.2 Caracterización geomecánica	7
1.5.2.3 Medición de nivel freático	8
1.5.2.4 Recolección de muestras para laboratorio	11
1.5.3 Metodología de gabinete	12
1.5.3.1 Creación de mapas y perfiles geológico- estructurales	12
1.5.3.2 Análisis estructural y clasificación geomecánica	13
1.5.3.3 Análisis cinemático	15
1.5.3.4 Cartas piezométricas	15
1.5.4 Metodología de laboratorio	17
CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES	22
2.1 Ciclo hidrológico	22
2.2 El agua subterránea y los procesos geológicos	23
2.2.1 La importancia del agua subterránea	23
2.2.2 El agua subterránea y el medio geológico	24
2.2.3 Karstificación	26
2.3 El agua subterránea y su efecto en túneles	27

2.4 Túneles de México	30
2.5 Túneles Loma Larga	32
2.5.1 Historia	32
2.5.2 Noticias	33
CAPÍTULO 3 MARCO GEOLÓGICO	44
3.1 Clima	44
3.1.1 Temperatura	44
3.1.2 Vegetación	45
3.2 Fisiografía	45
3.3 Geología regional	47
3.3.1 Sierra Madre Oriental	47
3.4 Estratigrafía del Noreste de México	50
3.5 Geología local	53
3.5.1 Anticlinal Loma Larga	53
3.5.2 Formación Agua Nueva	54
3.5.3 Formación San Felipe	55
3.5.4 Formación Méndez	56
3.6 Localización y vías de acceso	56
3.7 Geología estructural	57
3.7.1 Proyecciones estereográficas	57
3.7.1.1 Generalidades	57
3.7.1.2 Aplicaciones en Geología	58
3.7.1.3 Representación de planos y líneas en redes estereográficas	58
3.7.2 Área de estudio	60
3.7.2.1 Corte de la Diana Cazadora	62
3.7.2.2 Otros sitios	72
3.7.3 Sistemas de Fracturamiento	74
3.7.4 Análisis estructural	76
3.7.4.1 Diana Cazadora	76

3.7.4.2 Hyundai Penta	77
3.7.4.3 Calle Parteaguas	78
3.7.4.4 Excavación Cimientos	79
3.7.4.5 Torre Zafiro	80
CAPÍTULO 4 CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA	81
4.1 Descripción de macizos rocosos	81
4.1.1 Descripción de discontinuidades	81
4.1.2 Parámetros del macizo rocoso	83
4.1.3 Cálculo y análisis de Índice de Bloque (I_b) y de Volumen de Fractura (J_v) en el área de estudio	85
4.1.3.1 Índice de tamaño de Bloque	85
4.1.3.2 Volumen de Fractura (J_v)	88
4.2 Clasificaciones geomecánicas	91
4.2.1 Sistema Rock Mass Rating	91
4.2.2 Sistema Geological Strength Index	94
4.3 Caracterización geomecánica del anticlinal Loma Larga	95
4.3.1 Diana Cazadora	96
4.3.2 Hyundai Penta	101
4.3.3 Calle Parteaguas	102
4.3.4 Excavación Cimientos	103
4.3.5 Torre Zafiro	104
4.4 Ensayos de compresión uniaxial	105
CAPÍTULO 5 ANÁLISIS CINEMÁTICO	114
5.1 Mecanismos de falla	114
5.1.1 Falla planar	114
5.1.2 Falla en cuña	115
5.1.3 Falla por vuelco	115
5.2 Envolverte Markland	116
5.3 Cono de fricción	118

5.4 Análisis cinemático del área de estudio	119
5.4.1 Diana Cazadora	120
5.4.2 Hyundai Penta	121
5.4.3 Calle Parteaguas	122
5.4.4 Excavación Cimientos	123
5.4.5 Torre Zafiro	124
5.5 Factor de Seguridad	125
CAPÍTULO 6 HIDROGEOLOGÍA	133
6.1 Hidrología	133
6.1.1 Precipitaciones	133
6.1.2 Escorrentía Superficial	140
6.2 Agua subterránea	143
6.2.1 Acuífero del Área Metropolitana de Monterrey	143
6.2.2 Evaluación hidrogeológica del área de estudio	146
CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	154
7.1 Conclusiones	154
7.2 Contribuciones y Limitaciones	159
7.3 Recomendaciones	160
BIBLIOGRAFÍA	164
ANEXOS	171
Anexo 1.	171
Anexo 2.	173
Anexo 3	178
Anexo 4.	181

CAPÍTULO 1 Generalidades

1.1 Introducción

La construcción de obras subterráneas en áreas urbanas es una alternativa cada vez más usada para satisfacer las necesidades de espacio y transporte en las ciudades. No obstante, las condiciones del subsuelo suelen representar un desafío durante la excavación y construcción de un túnel y pueden causar daños a lo largo de su vida útil; por lo que, conocer las características del terreno es de vital importancia para mitigar riesgos. Los riesgos geológicos más típicos asociados en la construcción de túneles en áreas urbanas son: malas condiciones del subsuelo y la presencia de agua subterránea (Ghorbani et al., 2012). Sin embargo, (S. P. Huang & Guo, 2015) opinan que la principal causa de los daños causados en túneles es el agua subterránea. La existencia de agua subterránea está influenciada esencialmente por la litología, los sistemas de fracturamiento y la disponibilidad de fuentes de recarga para los acuíferos. En macizos rocosos es común tener sistemas de fracturas interconectadas entre sí (porosidad y permeabilidad) que proveen de canales para la infiltración natural y el flujo subterráneo que tienden a ser precursoras de disolución (Li et al., 2012). La disolución o karstificación se da principalmente en las rocas carbonatadas como las calizas. Esta puede ensanchar y alargar fisuras en las rocas aumentando la conductividad del agua, lo que acelera la fragmentación mecánica y genera espacios de almacenamiento, condición ideal para que ocurra disolución.

Los Túneles de Loma Larga (TLL) fueron construidos de 1994 a 1998 y se desconoce si se les ha dado algún tipo de mantenimiento a lo largo del tiempo. Hoy en día, se puede observar la presencia de filtraciones de agua que, con los años, han deteriorado la estructura y su recubrimiento de concreto lanzado, precipitación de carbonatos, dejando manchas y formando pequeñas estalactitas. Asimismo, la humedad ha provocado desprendimientos de la cubierta y bloques rocosos, los cuales han caído sobre las vialidades, poniendo en riesgo tanto la carga vehicular como la seguridad de los

conductores. Por otro lado, no se han evaluado las condiciones geológicas, estructurales ni ambientales actuales.

En este trabajo se aborda el conocimiento del papel del agua subterránea como factor modificante de las condiciones mecánicas y de estabilidad del macizo rocoso, centrándose en el estudio geológico, estructural, geomecánico e hidrogeológico del anticlinal Loma Larga, con la finalidad de dar explicación y obtener una visión lo más completa posible de los elementos que condicionan las filtraciones actuales hacía el túnel Loma Larga y de esta forma evaluar la estabilidad y el estado de seguridad de la estructura, lo que permitirá proponer soluciones de mejoramiento, esperando que las autoridades competentes las tomen en cuenta.

1.2 Problemática y justificación

Los túneles, al igual que otras edificaciones, sufren cambios significativos en sus características mecánicas y estructurales a lo largo de su vida útil. Los factores que contribuyen al fenómeno de deterioro y debilitamiento de los túneles están relacionados con el medio ambiente (físicos, químicos y biológicos), las condiciones del subsuelo (litología, fracturamiento, composición mineralógica) y a las características de los materiales empleados en su construcción. Por otro lado, la presencia de agua subterránea en los túneles es muy común (ITA, 1991) y se ha comprobado que es una de las causas principales del deterioro y pérdida de estabilidad en estas estructuras, por lo que la ausencia de un sistema de aislamiento o de drenaje adecuado para el agua subterránea, deriva en problemas que afectan al revestimiento y a la roca circundante a la infraestructura (S. P. Huang & Guo, 2015). También el agua es una de las principales causas de intemperismo en las rocas y es considerada como un factor negativo que disminuye la resistencia del macizo rocoso, produce ensanchamiento de grietas, disminuye la fricción entre bloques y genera presiones hidrostáticas (González de Vallejo et al., 2002).

Hay mucha evidencia de los problemas que el agua puede ocasionar durante la excavación y construcción de túneles. Sin embargo, aún no se ha investigado lo suficiente sobre los efectos posteriores a largo plazo una vez que la obra es concluida. Por su parte, el recubrimiento también es parte importante del sostén del túnel y si se deteriora y se estropea por la humedad ya no cumple su función y aumenta la posibilidad de caída de bloques rocosos a las vialidades, deformaciones y, en el peor de los casos, colapso parcial o total de un túnel.

Los túneles del Cerro Loma Larga ya presentan daños por las filtraciones y humedad en su interior. El concreto de los portales, que sostienen las entradas, posee una coloración verdosa y se puede ver expuesto el interior de acero en varias zonas. En el interior, los muros están dañados y se observa la precipitación de carbonatos de calcio por el goteo y filtración de agua. El techo del túnel es la zona que presenta mayores alteraciones, con manchas blancas visibles en toda su extensión, indicativas de filtraciones. En algunas áreas, se observan pequeñas estalactitas formadas por la precipitación de carbonatos debido a la disolución de las rocas, tal como ocurriría en una caverna. Además, se ha identificado el afloramiento de un manantial sobre la carpeta asfáltica en el sentido Monterrey – San Pedro. La falta de un sistema de drenaje y de ventilación adecuada dentro de los túneles de Loma Larga ha permitido que la humedad y el agua dañen con mayor facilidad y rapidez a la estructura. Además, debido a las malas condiciones del recubrimiento de concreto, éste ya se ha caído sobre las vialidades en varias ocasiones y ha causado bloqueo del tráfico, aunque afortunadamente no han habido accidentes viales hasta el momento.

La finalidad e importancia de este trabajo radica en la evaluación de las condiciones geológicas, estructurales, geomecánicas e hidrogeológicas actuales, para detectar los posibles mecanismos de falla dentro del túnel y explicar el origen de las filtraciones. La metodología de estudio utilizada en este trabajo también podrá aplicarse al monitoreo de las condiciones de túneles ya construidos o que están por construirse. Además, se enriquecerá el repertorio geológico del Área Metropolitana de Monterrey, ya que existe

poca información del anticlinal Loma Larga, quizá en parte porque se le ha subestimado por su tamaño.

1.3 Hipótesis

La existencia de sistemas de fracturamiento, fallas geológicas, y formaciones geológicas permeables que se encuentran en el anticlinal Loma Larga están favoreciendo el flujo de agua subterránea hacia el túnel, lo que se demostrará con el análisis estructural de dichos sistemas de fracturamiento. Igualmente, se espera obtener datos geomecánicos que comprueben que las condiciones del macizo rocoso son desfavorables y por lo tanto influyen negativamente en la estabilidad del túnel, lo cual se complementará con información geológica-estructural e hidrogeológica que brindará información sobre los mecanismos de falla dentro del túnel.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Evaluar las condiciones geológico-estructurales, hidrogeológicas y geomecánicas del anticlinal y túnel Loma Larga para analizar y ubicar los mecanismos de inestabilidad dentro del túnel, así como definir la relación entre las condiciones geológicas y las filtraciones, para predecir el impacto de éstas en la estructura del túnel y en las vialidades.

1.4.2 Objetivos específicos

- I. Realizar una cartografía geológica-estructural del cerro Loma Larga para caracterizar la litología de las formaciones ahí presentes y los sistemas de fracturamiento.

- II. Medir los niveles freáticos de pozos y norias cercanos al área de estudio para realizar una carta piezométrica que permita determinar la dirección de los flujos subterráneos.
- III. Realizar mediciones en campo (espaciamiento de las fracturas, rugosidad, etc.) para la clasificación geomecánica del macizo rocoso, así como la obtención de datos estructurales de discontinuidades para analizar los mecanismos de falla.
- IV. Analizar la dirección del fracturamiento del macizo rocoso para conocer el flujo preferencial del agua subterránea en el área de estudio y determinar las zonas más afectadas.
- V. Obtener núcleos de cada una de las formaciones geológicas presentes en el túnel para calcular la resistencia a la compresión uniaxial del macizo rocoso en laboratorio.
- VI. Obtener y ubicar los tipos de mecanismos de falla dentro del túnel tomando en cuenta la información recopilada en campo como las mediciones de datos estructurales, la clasificación geomecánica y los datos de los ensayos de compresión uniaxial.

1.5 Metodología general

1.5.1 Revisión bibliográfica

Durante todo el proceso de investigación se recopiló información relacionada con los temas centrales de la tesis que incluyen: hidrogeología, geología, geología estructural, geomecánica, túneles, etc. Para una mejor comprensión de los fenómenos y factores que contribuyen al debilitamiento del macizo rocoso y al deterioro de los túneles del cerro Loma Larga se examinaron bases de datos, artículos científicos, libros de texto, tesis, y mapas, entre otros.

1.5.2 Metodología de campo

1.5.2.1 Cartografía geológica – estructural

Se realizó una cartografía geológica del Cerro Loma Larga, para conocer la distribución y las características litológicas y estructurales de las formaciones geológicas ahí presentes.

Los materiales básicos que se utilizaron fueron una libreta de campo, una carta topográfica (INEGI) del área de estudio a una escala que satisfizo las necesidades de detalle que se deseaba lograr, una brújula geológica tipo Brunton, GPS Garmin, lupa 10x y un martillo geológico.

Se recorrió alrededor de 1 km², que corresponde al área de estudio, para identificar los afloramientos más significativos y obtener de ellos los siguientes datos:

- Ubicación en el mapa y coordenadas UTM.
- Datos estructurales de discontinuidades (estratificación, diaclasas, fracturas, fallas, etc.)
- Formación geológica a la que pertenece.
- Descripción de las rocas presentes (color, alteraciones, grado de intemperismo, fracturamiento, humedad, presencia de vegetación, etc.)

Los datos estructurales se midieron con una brújula geológica azimutal tipo Brunton bajo la convención de rumbo y buzamiento con base en la regla de la mano derecha. Para que los datos estructurales fueran estadísticamente correctos se tomaron múltiples mediciones de cada uno de los afloramientos de interés, al menos 50 datos por cada punto. Al final se recabaron cientos de datos. Los datos geológicos y estructurales obtenidos fueron de utilidad más adelante para la construcción de mapas y perfiles geológicos y la realización del análisis estructural, cinemático y geomecánico.

1.5.2.2 Caracterización geomecánica

Para la caracterización geomecánica se utilizaron los parámetros establecidos por la clasificación Rock Mass Rating (RMR) de Bieniawski (1989), (Tabla 1.1.). Este tipo de clasificación toma en cuenta los siguientes parámetros del macizo rocoso:

- Valores de resistencia a la compresión uniaxial de la matriz rocosa.
- Grado de fracturamiento según el RQD (Rock Quality Designation).
- Espaciamiento y condiciones de las familias de discontinuidades (separación, persistencia, relleno, rugosidad, apertura, alteraciones, etc.).
- Condiciones hidrogeológicas.
- Orientación de las discontinuidades según el tipo de excavación (túnel, talud, cimentaciones).

El levantamiento de los parámetros geomecánicos se llevó a cabo en campo a través de una serie de observaciones y mediciones *in situ* las cuales describen las condiciones del macizo rocoso.

CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA RMR (Bieniawski, 1989)									
Parámetros de clasificación									
1	Resistencia de la matriz rocosa (Mpa)	Ensayo de carga puntual	>10	10-4	4-2	2-1	Compresión simple (Mpa)		
		Compresión simple (Uniaxial)	>250	250-100	100-50	50-25	25-5	5-1	<1
	Puntuación		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90%-100%	75%-90%	50%-75%	25%-50%	<25%		
	Puntuación		20	17	13	6	3		
3	Separación entre diaclasas		>2 m	0.6 - 2 m	0.2 - 0.6 m	0.06 - 0.2 m	<0.06 m		
	Puntuación		20	15	10	8	5		
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	<1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m		
		Puntuación		6	4	2	1	0	
		Abertura	Nada	<0.1 mm	0.1-1.0 mm	1-5 mm	>5 mm		
		Puntuación		6	5	3	1	0	
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
		Puntuación		6	4	2	2	0	
		Relleno	Ninguno	Relleno duro <5 mm	Relleno duro >5 mm	Relleno blando < 5 mm	Relleno blando >5 mm		
		Puntuación		6	4	2	2	0	
		Alteración	inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta		
		Puntuación		6	5	3	1	0	
5	Agua subterránea	Caudal por 10m de túnel	Nulo	< 10 L/min	10-25 L/min	25-125 L/min	> 125 L/min		
		Relación: Presión de agua/Tensión principal mayor	0	0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	> 0.5		
		Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo		
	Puntuación		15	10	7	4	0		

Tabla 1.1. Tabla de clasificación geomecánica Rock Mass Rating de Bieniawski (1989).

1.5.2.3 Medición de nivel freático

Se realizó una búsqueda de pozos y norias dentro del área de estudio para realizar la medición de los niveles freáticos. Sin embargo, debido a que se trata de una zona urbana solo se localizó una noria y un pozo. Se midieron y se registraron sus niveles freáticos,

pero no fueron suficientes para la construcción de una carta piezométrica. Por lo tanto, se utilizaron los datos históricos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) de los cuales sólo se tiene registro público del año 2000 al 2012.

El nivel piezométrico en los acuíferos libres aflora en pozos y norias como espejo de agua y en acuíferos confinados el espejo corresponde al nivel de presión del acuífero. El nivel piezométrico h se toma como una altura con referencia al nivel del mar (Werner, 1996). La Figura 1.1. muestra los parámetros de medición del nivel piezométrico:

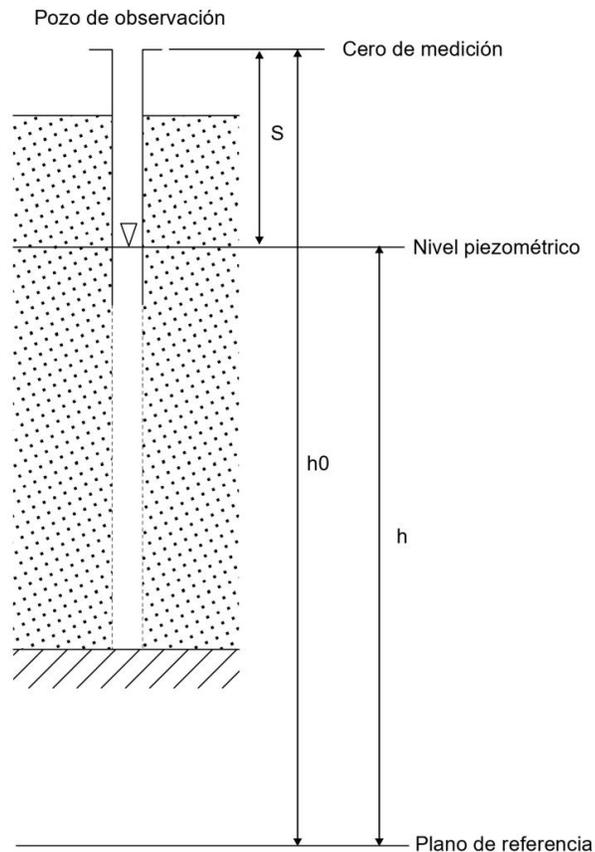


Figura 1.1. Medición del nivel piezométrico. Modificada de Werner (1996).

$$h(\text{msnm}) = h_0(\text{msnm}) - s (m)$$

h_0 : altura del punto de medición sobre el plano de referencia (nivel del mar).

s : profundidad del nivel piezométrico.

El nivel freático en el pozo de Agua y Drenaje y la noria se midieron utilizando una sonda hidrogeológica acústica de operación manual marca Solinst®. Se introdujo en el pozo hasta que la sonda hizo contacto con el agua y mandó una señal, en ese momento se registró la profundidad del nivel freático.



Figura 1.2. Medición del nivel freático de la noria cercana a Punto Valle.

Para la construcción de las cartas piezométricas se utilizó la información obtenida de la base de datos de CONAGUA.

1.5.2.4 Recolección de muestras para laboratorio

Se recolectaron muestras de roca en múltiples puntos dentro de los sitios de interés para poder extraer núcleos y posteriormente realizar el ensaye de compresión uniaxial. Los bloques de macizo rocoso se extrajeron *in situ* tomando en cuenta lo siguiente:

- Seleccionar bloques lo más sanos posible, poco fracturados e intemperizados de las formaciones geológicas más representativas del área, debido al mal estado de las lutitas y la bentonita solo fue posible la extracción de bloques de calizas y margas.
- Cada bloque debe tener dimensiones no menores a 20 x 20 x 20 cm para permitir la extracción de los núcleos.
- Antes de la recolección, medir el rumbo y buzamiento del estrato donde se encuentra y marcar la dirección de buzamiento en la muestra, así como la ubicación de la base y techo de este. Tomar registro fotográfico con escala.
- Utilizar martillo y cincel para facilitar la extracción.
- Asignar una clave y número de muestra, así como información básica del sitio de extracción como formación geológica y ubicación en coordenadas UTM.



Figura 1.3. Fotografías de las actividades realizadas en campo para la extracción de bloques de roca.

Se llevó a cabo este proceso varias veces ya que se descartaron muestras muy meteorizadas por no ser útiles para la obtención de núcleos de roca, el problema principal fue que la roca se encuentra naturalmente muy fracturada en la zona de estudio. Finalmente, las mejores muestras recolectadas fueron llevadas al Laboratorio de Verificación y Control de Materiales de Construcción (VCMC) del Instituto de Ingeniería Civil (IIC) para su preparación y para la realización de las pruebas de compresión uniaxial.

1.5.3 Metodología de gabinete

1.5.3.1 Creación de mapas y perfiles geológico- estructurales

Con la información recopilada en campo se crearon mapas y perfiles geológicos utilizando software de dibujo y sistemas de información geográfica (SIG). Para el mapa de geología regional se tomó como base la geología reportada por Padilla y Sánchez (1982). Información digital sobre la zona urbana y parte de la topografía del área de estudio fue obtenida del INEGI, sin embargo, la mayoría se extrajo de Google Earth®

como archivo kmz y kml. Posteriormente, se le dio formato utilizando el programa Global Mapper® con el cual se obtuvo un modelo digital del terreno y se exportaron las curvas de nivel para dibujar el mapa y unificar la información utilizando ArcGIS®. Para los perfiles geológicos se siguió prácticamente la misma metodología utilizando los datos geológicos y estructurales de campo.

1.5.3.2 Análisis estructural y clasificación geomecánica

Los datos estructurales (rumbo y buzamiento) de estratificación y diaclasas medidos en campo se analizaron utilizando el programa Dips de Rocscience®. Este programa permite dibujar los círculos máximos y los polos de cada uno de los planos medidos en campo utilizando redes estereográficas, en este caso se utilizó la falsilla de Schmidt o también conocida como red de áreas iguales. Las proyecciones estereográficas nos permiten representar y analizar información tridimensional en dos dimensiones.

Los datos estructurales de cada sitio se analizaron por separado, una vez que se plasmaron los planos y polos de estratificación y diaclasas se prosiguió a determinar las familias principales de estas últimas. Las orientaciones de las discontinuidades tienen cierta variación incluso si se trata de la misma familia, una función de Dips nos permite observar claramente las áreas con menor y mayor concentración de polos utilizando una escala de grises, por lo que las áreas con mayor concentración se determinaron como las principales familias.

Con los estereogramas se realizó el análisis estructural de cada uno de los puntos medidos utilizando la clasificación de fracturas asociadas a pliegues de (Hancock, 1985a). Se definieron los principales tipos de fracturas según su orientación en un sistema coordinado tridimensional a , b y c , el cual no depende de una orientación absoluta: el eje a es paralelo al rumbo de la estratificación, b es paralelo al eje del pliegue y el eje c la vertical (Figura 1.4.). Según la posición de los planos de fracturamiento se pueden clasificar como ab , ac , bc o OkI , $h0I$ y $hk0$.

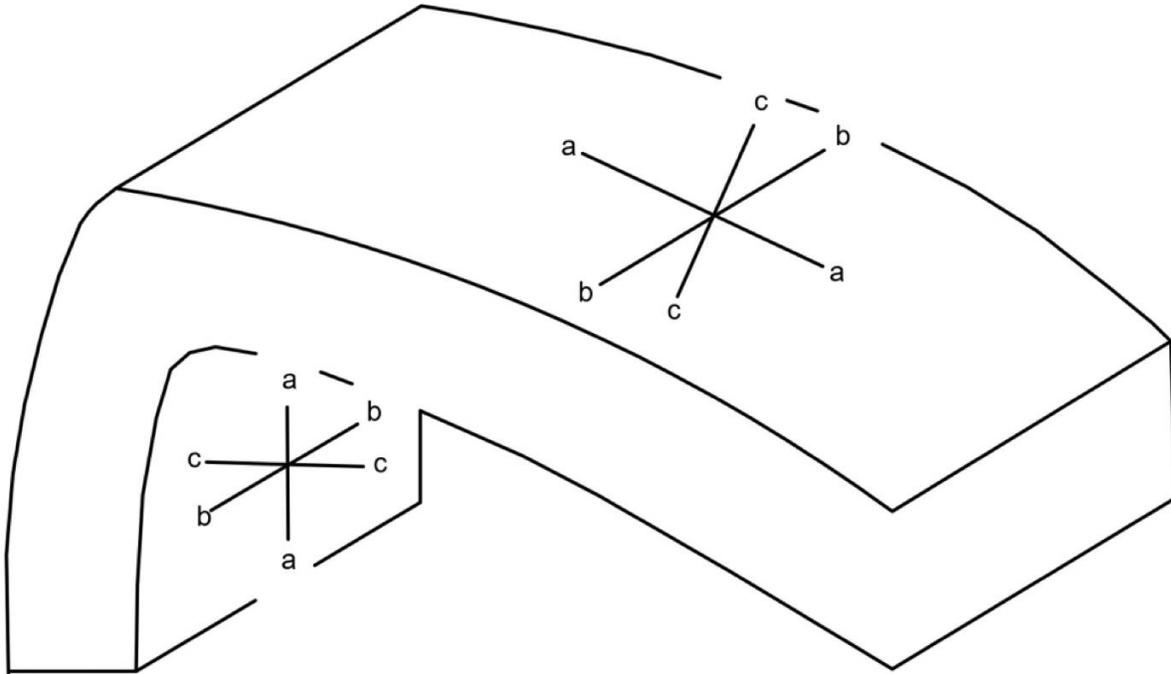


Figura 1.4. Sistema de coordenadas a , b y c para clasificación de fracturas en pliegues. Modificada de Hancock (1985).

Por otro lado, con los datos de la caracterización geomecánica de campo se obtuvo una clasificación de los sitios de interés basándose en el Rock Mass Rating de Bieniawski (1989). Cada parámetro del RMR posee un puntaje según sus características y condiciones, la puntuación de cada parámetro se suma y se realiza una corrección según la orientación de las discontinuidades con respecto al tipo de excavación, el puntaje final es un valor numérico que va de 0 a 100 y se conoce como índice RMR. Finalmente, este índice permite clasificar a la roca según sus parámetros mecánicos en cinco categorías diferentes; las cuales, a su vez, poseen una calidad y características geotécnicas específicas (Tabla 1.2.).

Clasificación geomecánica					
Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy mala
Puntuación	100-81	80-61	60-41	40-21	< 20
Características geotécnicas					
Clase	I	II	III	IV	V
Tiempo de mantenimiento y longitud	10 años con 15 m de vano	6 meses con 8 m de vano	1 semana con 5 m de vano	10 horas con 2.5 m de vano	30 min con 1 m de vano
Cohesión	> 4 Kp/cm ²	3-4 Kp/cm ²	2-3 Kp/cm ²	1-2 Kp/cm ²	< 1 Kp/cm ²
Ángulo de rozamiento	> 45°	35°-45°	25°-35°	15°-25°	< 15°

Tabla 1.2. Clases y calidad de roca según índice Rock Mass Rating.

1.5.3.3 Análisis cinemático

Se utilizó la información estructural previamente obtenida y se agregó la información estructural de rumbo y buzamiento del Túnel Loma Larga, en este caso se analizaron las paredes laterales como si fueran taludes. Al igual que el análisis estructural, el análisis cinemático se realizó por separado en cada uno de los sitios de interés. El análisis cinemático examina la relación entre los planos libres de una excavación (túnel, talud, cimentación) y los planos de discontinuidad en un macizo rocoso a través de redes estereográficas y consta de tres etapas generales:

1. Identificar el tipo de mecanismo de falla según sus características estructurales, pudiendo ser: planar, en cuña y por vuelco.
2. Según el tipo de mecanismo de falla se determinan los planos inestables y la dirección preferencial de deslizamiento de los bloques utilizando el método de la envolvente *Daylight* y el cono de fricción según (Wyllie & Mah, 2005).
3. Determinación del factor de seguridad según el tipo de mecanismo de falla igualmente utilizando la metodología de Wyllie & Mah (2005).

1.5.3.4 Cartas piezométricas

El nivel del agua subterránea puede representarse a través de una carta piezométrica donde el nivel freático se muestra como curvas de nivel las cuales son llamadas isopiezas. Para la construcción de una carta piezométrica se emplea el concepto del

triángulo hidrológico (Figura 1.5.) el cual consta de formar triángulos entre cada punto de medición (pozos), como su nombre lo indica, y es lo mismo que realizar una interpolación lineal, que, con la ayuda de una regla de tres simple, se obtienen las alturas intermedias entre los vértices.

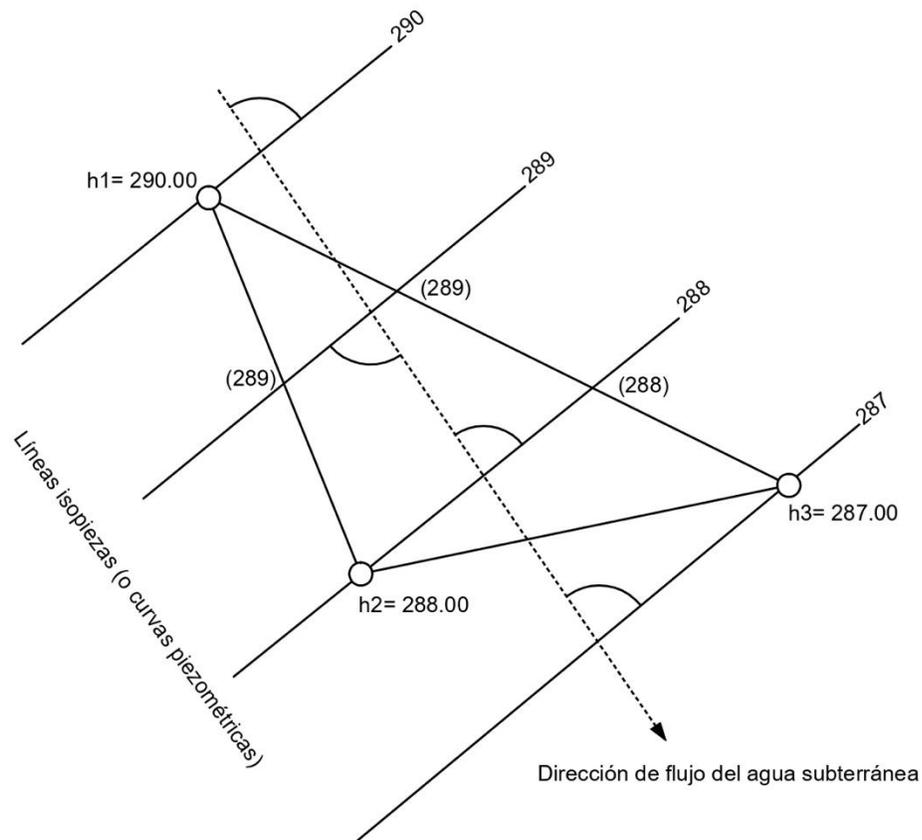


Figura 1.5. Representación del triángulo hidrológico. Modificado de Werner (1996)

Una carta piezométrica nos brinda información gráfica del nivel freático y permite determinar las direcciones del flujo subterráneo que son perpendiculares a las isopiezas. También, se puede calcular el gradiente piezométrico, el cual es la superficie del nivel freático en un acuífero libre y el nivel de presión en un acuífero confinado (Figura 1.6.).

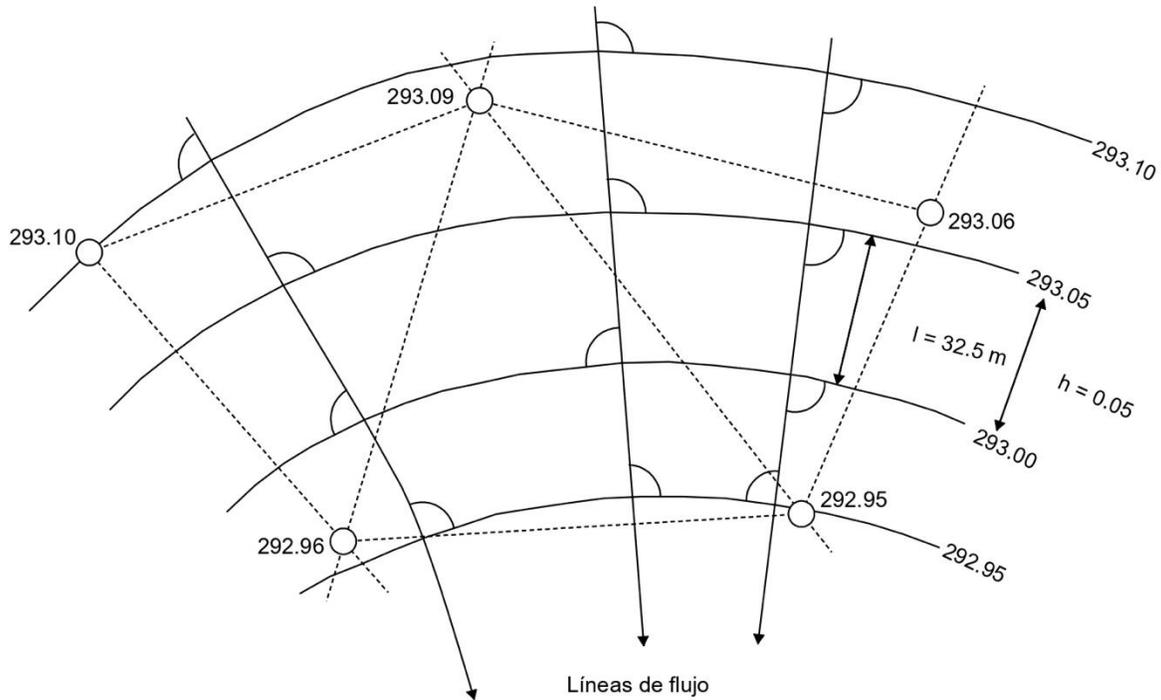


Figura 1.6. Construcción de una carta piezométrica a partir de triángulos hidrológicos. Modificada de Werner (1996)

El cálculo del gradiente piezométrico (i) está dado por la siguiente fórmula:

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta l}$$

Δh : diferencia de alturas (m) entre dos puntos

Δl : distancia horizontal (m) entre dos isopiezas a lo largo de una misma línea de flujo

1.5.4 Metodología de laboratorio

Una vez que las muestras de roca llegaron al laboratorio del Departamento de Verificación y Control de Materiales de Construcción VCMC, del Instituto de Ingeniería

Civil, se prosiguió con la extracción y preparación para la elaboración de las pruebas de compresión uniaxial, el proceso fue el siguiente:

1. Los núcleos fueron extraídos en dirección perpendicular al plano de estratificación con una nucleadora Milwaukee Modelo 4115 – 22 (Figura 1.7.) tomando en cuenta la norma D4543 – 04 de prácticas para la preparación de muestras de testigos de roca de la (ASTM, 2005), tomando en cuenta las siguientes especificaciones:
 - Los núcleos deben ser cilindros rectos dentro de las tolerancias establecidas (0.5mm en todo el largo de la muestra).
 - Los especímenes deben tener una relación longitud – diámetro (L/D) de 2.0 a 2.5 y un diámetro mínimo de $1\frac{7}{8}$ pulgadas (47mm).
 - Los lados del testigo deben ser lisos y sin irregularidades abruptas.
 - Los finales deben ser cortados paralelos entre sí y perpendiculares al eje longitudinal del núcleo previo a los ensayos de compresión.
 - La nucleadora debe tener una potencia mínima de 10 caballos de fuerza.



Figura 1.7. Fotografías de la extracción de núcleos de roca en el departamento de VCMC.

De todos los núcleos que se extrajeron, sólo se seleccionaron 10 que cumplieron con las especificaciones y que no presentaban fracturamiento debido a las condiciones naturales de la roca, como se muestra en la Figura 1.8.



Figura 1.8. Núcleos naturalmente fracturados los cuales no pudieron ensayarse.

2. Se tomaron las medidas de diámetro y longitud con un mínimo de tres lecturas en cada uno de los núcleos previamente al cabeceo. Posteriormente, se preparó el mortero de azufre para las muestras tomando como base las especificaciones de la norma ASTM C 617-98 (ASTM, 2012) para cabeceo de especímenes de roca (Figura 1.8.):

- Verificar que la base de los núcleos no tenga una desviación con respecto a la perpendicular de su eje vertical mayor a 0.5° .
- El mortero de azufre debe calentarse a una temperatura de alrededor $130^\circ \pm 10^\circ$.
- La superficie de las placas superior e inferior deben estar limpias y la muestra tiene que estar alineada y nivelada adecuadamente. Luego se vierte el azufre fundido.
- Permitir que el azufre se enfríe lentamente a temperatura ambiente y esperar a manipular la muestra hasta que se haya solidificado completamente.
- Verificar que el grosor del cabeceo de azufre sea uniforme y adecuado.



Figura 1.9. Proceso de realización de cabeceo con azufre para los núcleos de roca.

3. Para la realización de los ensayos de compresión uniaxial se utilizó como referencia la norma de la ASTM D 2938 – 95 (ASTM, 1995) la cual establece las especificaciones del instrumento a utilizar y los procedimientos a seguir que se resumen a continuación:

- El instrumento que se utilice debe tener la capacidad de mantener una velocidad de aplicación de carga constante sin producir impactos ni pérdida de carga y con un error máximo de medición de máximo $\pm 3\%$. Se utilizó una máquina de ensayos de tensión INSTRON 600DX.
- Se colocó la muestra entre las dos placas de la prensa y se ajustó hasta que hiciera contacto suave y uniforme con la muestra.
- Se aplicó una carga constante hasta que el núcleo se fracturó y se observó en la pantalla de registro de carga una disminución de esta (Figura 1.10.).

- Se registró la carga máxima soportada y el tiempo en el que se alcanzó.
- Para calcular la resistencia a la compresión simple de cada muestra se utilizó la siguiente fórmula:

$$\sigma_{uC} = \frac{F}{A}$$

σ_{uC} : resistencia a la compresión

F : carga máxima

A : área del espécimen

Con la información obtenida se realizaron gráficas de esfuerzo – deformación de cada una de las muestras.



Figura 1.10. Fotografía de ensaye uniaxial al núcleo de roca caliza y gráfica de esfuerzo deformación obtenida durante en ensaye.

CAPÍTULO 2 Antecedentes

2.1 Ciclo hidrológico

Hiscock & Bense (2014) definen al ciclo hidrológico (Figura 2.1.) como una circulación continua de agua desde el océano a la atmósfera, que a través de la precipitación, escurrimiento y flujo subterráneo regresa al mar.

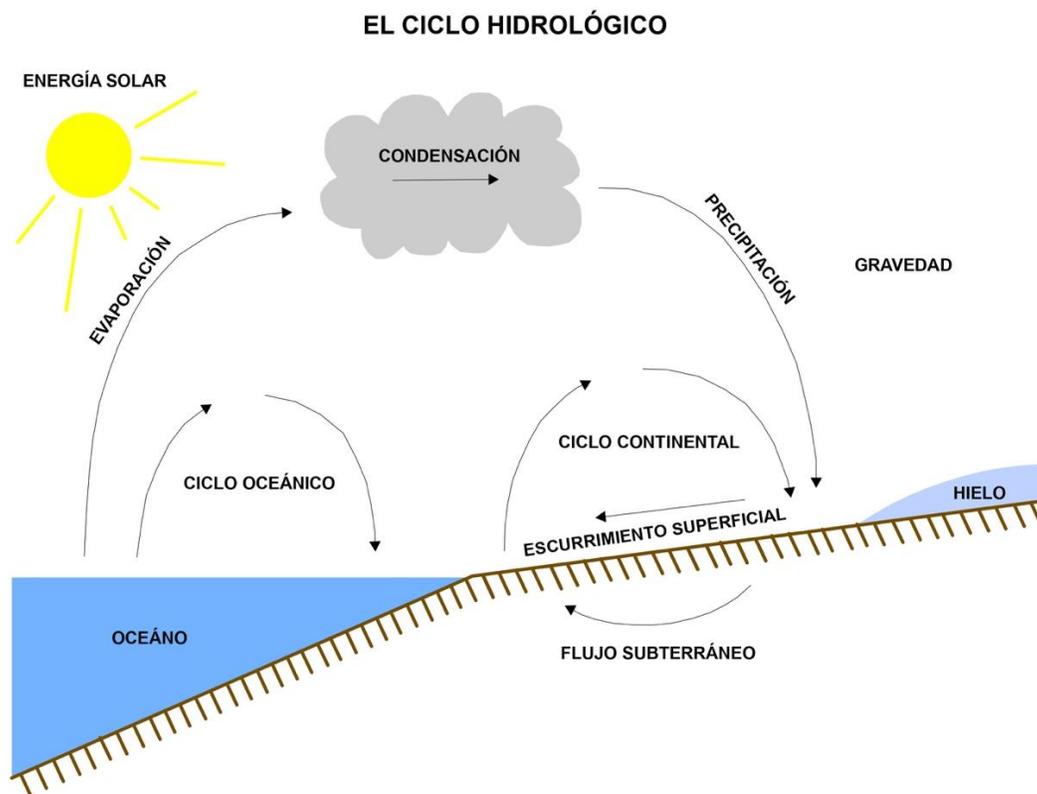


Figura 2.1. El ciclo hidrológico. Modificada de Werner (1996).

La radiación solar es la principal causa de la evaporación del agua, luego una vez en la atmósfera es transportada por el aire donde se condensa y precipita. La precipitación puede tomar caminos distintos: volver directamente al mar; ser interceptada por la vegetación y regresar a la atmósfera por evapotranspiración; o tomar un camino más largo y escurrir superficialmente por el terreno e infiltrarse al subsuelo donde tanto flujos

superficiales como subterráneos contribuyen a ríos y lagos que eventualmente desembocan al mar. El ciclo hidrológico debe de estudiarse de manera holística, ya que existen muchos factores que influyen en él y para comprenderlo es mejor estudiar a todas sus partes como un conjunto (Hiscock & Bense, 2014b)

2.2 El agua subterránea y los procesos geológicos

2.2.1 La importancia del agua subterránea

El agua ha hecho posible el desarrollo de la vida en el planeta Tierra y parece ser un compuesto muy abundante, ya que cubre alrededor del 70% de la superficie terrestre. Sin embargo, la mayor parte de ésta (97.5%) es salada, y se encuentra en los océanos. Solamente el 2.5% es agua dulce; de la cual, el 70% se encuentra inaccesible en los glaciares o es del 29% de difícil acceso en los acuíferos. Únicamente menos del 1% está disponible para consumo humano y para el resto de los ecosistemas. Aproximadamente el 14% del agua dulce aprovechable en el mundo se encuentra como agua subterránea y representa el reservorio más grande de agua para consumo humano (Tarbuck & Lutgens, 2008).

Durante las precipitaciones, el agua que no sigue su camino superficialmente se infiltra en el subsuelo y viaja a través de poros, grietas y cavidades, hasta llegar al acuífero donde se almacena y fluye lentamente siguiendo a la topografía; en su camino, generalmente interacciona con las escorrentías superficiales y suele aportar al flujo de éstas, incluso cuando no llueve.

El trabajo geológico del agua como agente erosivo es de gran importancia en la modificación del relieve y los paisajes, a través de la meteorización mecánica y química de las rocas. Los flujos de agua superficiales y subterráneos poseen la capacidad de erosionar a las rocas para luego transportar y depositar a las partículas sueltas; las cuales tienen un efecto abrasivo sobre el macizo rocoso. De igual forma, bajo ciertas condiciones, el agua puede disolver los componentes de las rocas cambiando su composición química y destruyéndolos (Thrailkill, 1968).

Un ejemplo de erosión hídrica es el Gran Cañón en Arizona (Figura 2.2.), formado por el cauce del Río Colorado que a lo largo de millones de años ha erosionado a las rocas hasta 1.6 km de profundidad a lo largo de 446 km de longitud y que ha formado un cañón de 16 a 28.8 km de ancho a causa de los flujos tributarios de la cuenca del Colorado.



Figura 2.2. Fotografía del Gran Cañón, Arizona, E.E.U.U.

2.2.2 El agua subterránea y el medio geológico

El agua subterránea es considerada un factor adverso en el macizo rocoso influenciando negativamente su comportamiento mecánico: reduce la resistencia en suelos y

materiales meteorizados, rellena discontinuidades, causa erosión y reacciones químicas (González de Vallejo et al., 2002). También, puede transportar grandes cantidades de material suelto con el tiempo, dejando huecos y causando el reacomodo de partículas o bloques generando inestabilidad. De igual forma, disminuye la resistencia de la matriz en rocas porosas y fracturadas debido a la presión hidrostática.

El agua subterránea se mueve a través del suelo y de la roca que conforman al medio geológico, a través de espacios vacíos entre partículas, fracturas, grietas u oquedades, lo que se conoce como porosidad. Sin embargo, para que el flujo de agua sea posible es necesario que estos espacios se encuentren interconectados. De manera general a esta propiedad se le conoce como permeabilidad. Por lo que las zonas meteorizadas, alteradas, fracturadas, falladas, etc. favorecen el flujo de agua subterránea (Figura 2.3.).



Figura 2.3. Fotografía de flujo de agua a través de grietas en formación Tamaulipas Superior, Allende, N.L.

Existe una relación íntima entre los factores estructurales del macizo rocoso y el flujo subterráneo, así como la tectónica ejerce una influencia en la evolución de estructuras como sinclinales, anticlinales, fracturas, fallas, etc., el fracturamiento por su parte facilita

la penetración del agua (González Amuchastegui, 1998), favorece la erosión, la disolución y con ella la formación de cavidades especialmente en rocas carbonatadas.

Por otro lado, los cambios del nivel freático pueden impactar negativamente en la estabilidad del subsuelo cuando el nivel de agua desciende y la carga se transfiere al terreno pudiendo causar asentamientos. Estos niveles son susceptibles a cambios estacionales, es decir, fluctúan a lo largo del año, aumentando con las precipitaciones y alcanzando sus niveles más bajos en las épocas de sequía, sin embargo, la sobreexplotación humana de los acuíferos suele ser una causa del abatimiento del nivel freático teniendo consecuencias negativas en la estabilidad del suelo.

2.2.3 Karstificación

La mayoría de los minerales son insolubles en agua pura; sin embargo, la adición de algunos compuestos presentes en la atmósfera y el suelo pueden propiciar la creación de ácidos que aumentan la capacidad corrosiva del agua. La calcita (CaCO_3) presente en rocas carbonatadas como las calizas, dolomías, margas, travertinos y otras, son especialmente propensas a sufrir disolución cuando el dióxido de carbono en la atmósfera reacciona con el agua formando ácido carbónico (H_2CO_3), (Freeze & Cherry, 1979).

El carbonato de calcio (CaCO_3) y la dolomita ($\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$) son prácticamente insolubles en agua pura, sin embargo, la solubilidad del carbonato de calcio está relacionada con el pH del agua siendo los ácidos favorecedores de la disolución. El compuesto que condiciona este fenómeno es el dióxido de carbono (CO_2) presente en la atmósfera, que cuando se disuelve en el agua reacciona de la siguiente manera (Fernández et al., 1995):



La *karstificación* es el fenómeno asociado a la disolución de las rocas. El agua subterránea disuelve a las rocas mientras se mueve a través de las discontinuidades preexistentes en la roca.

Fernández et al., (1995) menciona que la mayoría de los materiales susceptibles a ser disueltos por el agua presentan una red de fisuras interconectadas lo suficientemente densa como para que el agua pueda moverse en ellas. Grietas de tamaños entre 10 y 25 μm ya permiten una lenta circulación del agua, la disolución avanza dando lugar a conductos de disolución de diámetros mayores que 5-15 mm que con el tiempo pueden formar cavidades en el subsuelo, algunas veces transformándose en cavernas y grandes depresiones como las dolinas.

Las cavernas suelen formarse debajo del nivel freático en rocas con alta porosidad y permeabilidad, o con un sistema de fracturamiento favorable que dé libre paso al agua, aumentando el tamaño de los pasajes, permitiendo el paso de más agua y continuando con el proceso de disolución. Los procesos de disolución operan más eficientemente durante inundaciones, y la estructura de algunas cavernas sugiere que el mayor agrandamiento ocurrió durante niveles bajos o muy altos del nivel freático (Thraillkill, 1968).

2.3 El agua subterránea y su efecto en túneles

Con el aumento de la población en áreas urbanas, la demanda de espacio crece día con día y las obras subterráneas, especialmente los túneles carreteros y ferroviarios, se han convertido en una opción para satisfacer las necesidades de vías de comunicación en las ciudades. Sin embargo, las condiciones del subsuelo pueden hacer del proceso de excavación y construcción un verdadero reto e incluso, generar problemas continuos a lo largo de la vida útil de un túnel.

Existen diversos factores que resultan perjudiciales a la estabilidad del macizo rocoso durante la excavación de túneles, como lo menciona (Ghorbani et al., 2012); los cuales,

están relacionados a los siguientes riesgos geológicos: malas condiciones del subsuelo, presencia de nivel freático, sobrecarga superficial, subsidencia del terreno con potencial de dañar a las estructuras existentes sobre el túnel, entre otros. Sin embargo, (S. P. Huang & Guo, 2015) opinan que la principal causa de los daños causados en túneles es el agua subterránea.

En su reporte de los efectos del agua en túneles durante su vida útil la (ITA, 1991) dice “el agua es el enemigo de los túneles” y señala que la filtración de agua subterránea en túneles es muy común a lo largo del mundo, y es causante de dificultades durante la excavación, construcción y con demasiada frecuencia, la causante de daños en la roca circundante, el revestimiento del túnel, además, algunas veces a las estructuras y accesorios dentro de él. De los 48 casos reportados, distribuidos en 13 países incluyendo a Cuba, Austria, Egipto, Francia, Suiza, Estados Unidos, Japón y otros, se observó que los daños predominantes por el agua se centran en el deterioro, erosión, disolución, degradación y pérdida de resistencia del recubrimiento y del subsuelo, así como daños al refuerzo de acero a causa de la corrosión por acción química de ésta.

Por su parte, (S. P. Huang & Guo, 2015) en su estudio describen que de los 7384 túneles en China en 2010, el 60% sufre de erosión del revestimiento, hundimiento y flujos de lodo, relacionados a la presencia de agua subterránea; además, clasifican a los problemas más comunes en: a) erosión del revestimiento, principalmente a causa del agua, la cual corroe el acero y produce hinchazón del concreto, originando la formación de pequeños agujeros que luego se expanden y crean fracturas, y erosión por la emisión de gases de los vehículos que transitan el túnel; b) hundimiento a causa del agua corrosiva que suaviza el concreto en la base del túnel; c) disolución del recubrimiento de concreto y de la roca circundante por la filtración de agua a largo plazo, lo que puede desencadenar en deformaciones, inestabilidad, e incluso colapso parcial o total del túnel. La filtración de agua a través de las grietas puede inducir inestabilidad en un túnel debido a las presiones diferenciales en el revestimiento, las cuales pueden detonar en deformación como ocurrió en el caso de estudio de (L. Huang et al., 2020).

China se ha posicionado como el país con más túneles carreteros y ferroviarios en el mundo. En 2017 alcanzó el increíble número de 16229 túneles, dando un total de 15285.1 km de largo en construcción; además, se espera que en 2020 haya un total de 17000 túneles y 20000 km sumados (Wang et al., 2020). Por lo tanto, los eventos relacionados a daños por riesgos geológicos en túneles chinos, son bastante relevantes para comprender el efecto de la interacción del agua y otros factores con este tipo de estructuras.

Desde 2002 hasta 2018, en China ocurrieron 97 eventos durante la etapa de construcción relacionados a los siguientes riesgos geológicos: colapso o derrumbe, inundación por agua subterránea, deslizamiento de tierra en el portal, explosión por presencia de gas natural, avalanchas y sofocación por falta de aire. En dichos siniestros se registraron 393 muertes, 467 heridos y 51 perdidos. Los eventos de colapso y flujo de agua subterránea son dos de los riesgos geológicos más frecuentes y con más decesos. (Wang et al., 2020) también menciona que el colapso estuvo influenciado principalmente por la calidad de la roca, las condiciones geológicas y la acción del agua subterránea, ya que el nivel freático es considerado un factor adverso que puede desencadenar el colapso. Es importante resaltar que, de 55 colapsos ocurridos, 33 ocurrieron en zonas de karstificación relacionadas a procesos de disolución por agua subterránea. Por otro lado, la inundación en túneles se atribuye a las altas presiones hidrostáticas que afectan la resistencia del macizo rocoso.

Las características geológico-estructurales del macizo rocoso determinarán su capacidad para permitir el paso de agua. Por ejemplo, en el túnel Serones- Salida Guaro, en España el fracturamiento intenso y la presencia de fallas, facilitaron la circulación de agua hacia el túnel, y de igual forma la topografía de la zona favoreció el escurrimiento superficial y esto condicionó la existencia de zonas susceptibles a la inestabilidad por las filtraciones, inundaciones parciales o derrumbes, debido a la pérdida de resistencia en las rocas, o por lavado del relleno de las grietas (Cuesta Recio et al., 2009).

Los túneles sufren cambios significativos en sus características mecánicas y estructurales durante su vida útil. Los soportes primarios y las rocas que rodean las excavaciones subterráneas están particularmente sujetos a efectos ambientales a largo plazo, como acciones mecánicas, físicas, químicas y biológicas de numerosos agentes ambientales agresivos (Idris et al., 2009). Igualmente, conocer la probabilidad y potencial de que ocurran filtraciones a través de la masa rocosa circundante y del revestimiento hacia el túnel es esencial para su evaluación y diseño (Tan et al., 2016) para asegurar un buen desempeño a largo plazo.

2.4 Túneles de México

El famoso túnel de Ogarrío (Figura 2.4.) en la Ciudad de Real de Catorce, en el Estado de San Luis Potosí, construido entre 1897 y 1901 por el ingeniero español Vicente Irizar, el túnel tiene una longitud de aproximadamente 2.3 kilómetros, lo que lo convierte en uno de los más antiguos y largos de su tipo en México. Su propósito original era facilitar el transporte de minerales desde las minas.

Sin embargo, fue hasta finales de la década de los 80's y principios de los 90's que en México se comenzó la construcción de las primeras obras subterráneas de importancia, marcando un avance significativo en la infraestructura vial del país. Los túneles de la Autopista México-Toluca fueron pioneros en la aplicación de técnicas más modernas de diseño, excavación y construcción, estableciendo un nuevo estándar para los proyectos subterráneos en México. Más tarde, entre 1989 y 1993, en la carretera Cuernavaca-Acapulco se construyeron los túneles Tierra Colorada, con 400 metros de longitud, y Agua de Obispo, con 450 metros de longitud, ambos representando logros importantes en la ingeniería de túneles del país.

Posteriormente, en el año 1994, se construyó en la carretera a Acapulco el llamado "Maxitúnel", una obra monumental de tres carriles y 2953 metros de longitud, que no sólo mejoró significativamente la conectividad entre Acapulco y el resto del país, sino que también destacó por su complejidad técnica y su capacidad para soportar un alto volumen de tráfico. Este túnel se convirtió en un hito en la historia de la infraestructura

mexicana, demostrando la capacidad del país para emprender y completar proyectos subterráneos de gran envergadura (SCT, 2016).



Figura 2.4. Túnel Ogarrío, Real de Catorce, San Luis Potosí.

Más recientemente, en 2013, se concluyó la construcción de la Autopista Durango-Mazatlán, con 61 túneles y entre ellos, el más largo “El Sinaloense”, de 2795 m y que según la (SCT, 2016) en su Manual de Diseño y Construcción de Túneles de Carretera, es el único que cuenta con una galería de emergencia con salidas de conexión y está equipado con todos los sistemas de seguridad, además de suponer un reto para la ingeniería mexicana, tanto por la complejidad de la geología de la Sierra Madre Occidental y porque se tuvieron que integrar nuevos criterios de diseño, secciones geométricas y procedimientos constructivos.

Asimismo, en la carretera México-Tuxpan, en 2012 se construyeron 6 túneles gemelos con más de 8 km de longitud conjunta, que cruzan la Sierra Madre Oriental al norte del Estado de Puebla, equipados con sistemas de control y supervisión, sistemas de ventilación, contra-incendio y de comunicación. Sin embargo, durante la excavación la sección media superior del túnel izquierdo del tramo Xicoteppec I se colapsó y el plano de falla alcanzó la superficie causando también un deslizamiento de la ladera. Los factores que provocaron el colapso fueron las condiciones geológicas desfavorables y el agua. Un estrato arcilloso entre calizas y columnas basálticas (Figura 2.5.) creó un plano de falla el cual comenzó a moverse durante la excavación, aunque se logró estabilizar la zona por un tiempo, tras un periodo de lluvias intensas la filtración de agua hacia la excavación saturó y debilitó a las arcillas detonando el colapso (Sánchez Reyes, 2016).

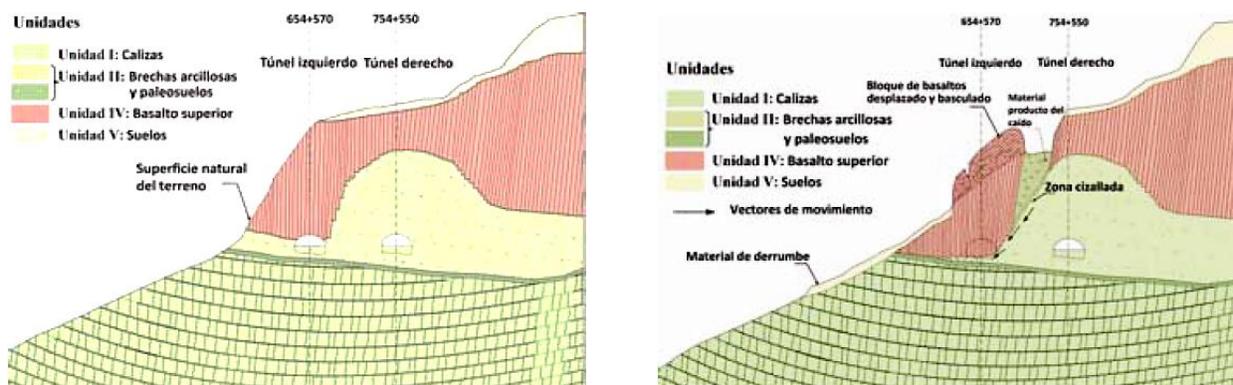


Figura 2.5. Colapso del túnel Xicoteppec I. Interpretación geológica anterior al colapso (Izquierda). Esquema del colapso (Derecha). Tomada de Sánchez Reyes (2016).

2.5 Túneles Loma Larga

2.5.1 Historia

Los túneles Loma Larga se ubican en el cerro con el mismo nombre al sur-poniente de la Ciudad de Monterrey. El proyecto se construyó para conectar las avenidas Venustiano Carranza del Municipio de Monterrey y José Vasconcelos y Lázaro Cárdenas de San Pedro Garza García, que se concluyó el 20 de agosto de 1998. Hoy en día el túnel Loma Larga presenta importantes filtraciones las cuales atraviesan la roca circundante y al

remanente del recubrimiento de concreto, el cual se encuentra en mal estado a causa de la erosión y falta de mantenimiento.

Existe relativamente poca información acerca del Cerro Loma Larga y su geología; uno de los estudios más detallados del anticlinal fue realizado en 1994 por la empresa encargada por parte del gobierno del Estado de Nuevo León para realizar el proyecto ejecutivo de ambos túneles. Lamentablemente, dicho documento es privado, pero estuvo disponible para la presente investigación para sentar las bases de la exploración geológica, geotécnica y estructural.

2.5.2 Noticias

Los túneles del cerro Loma Larga han estado en el foco de la prensa en diversas ocasiones, principalmente a causa de las filtraciones, caídas del recubrimiento de concreto del techo y por el deterioro que muestra la estructura en general.

A continuación, se muestra una compilación de algunas noticias de los túneles de Loma Larga:

“Dejan túnel a media luz”

Con decenas de lámparas apagadas, la vialidad que une a Monterrey y San Pedro presenta una iluminación deficiente en ambos cuerpos de circulación. La mayoría de las luminarias afectadas se ubican del lado del municipio regio, en las secciones nororiente y norponiente del túnel, presentándose el problema en menor grado en la parte de San Pedro, en las zonas suroriente y surponiente. Los conductores que ingresan al túnel en la circulación de Monterrey a San Pedro se topan inmediatamente con las fallas en el alumbrado. Aparatos de doble luz exhiben una o las dos lámparas apagadas, sobre todo en el costado izquierdo de esta sección vial. En la otra sección, en

el sentido de San Pedro a Monterrey, la mayoría de las luminarias dañadas se ubican casi a la salida del túnel.

*El túnel también cuenta con otro tipo de lámparas, que son más alargadas, pero que también presentan afectaciones. La deficiente iluminación se suma a otros descuidos en el túnel, como las **goteras por filtraciones** que invaden la vialidad pese a las cubiertas que fueron colocadas en la parte superior de la obra. Los barandales que protegen los andadores también muestran deterioro en su pintura, y en los acotamientos o zonas de emergencia ya desaparecieron algunas boyas.*

*El Túnel de la Loma Larga fue inaugurado el 24 de septiembre de 1997 por el ex Presidente Ernesto Zedillo y el ex Gobernador Benjamín Clariond Reyes. Desde entonces **han sido contadas las labores de mantenimiento a fondo** en la obra, al menos las dadas a conocer públicamente, lo cual se refleja claramente en las fallas señaladas (Villasáez, 2014).*



Figura 2.6. “Dejan túnel a media luz” Tomada de El Norte (2014).

“Elevan las goteras riesgo en el túnel”

El Túnel de la Loma Larga volvió a hacer agua, elevando el riesgo para los conductores. A la par de las recientes lluvias, y pese a las cubiertas

impermeables colocadas en algunas zonas, **múltiples goteras invaden ambas secciones del túnel**, en Monterrey y San Pedro. Por los escurrimientos de agua el pavimento de algunos carriles se tornó ayer resbaladizo. Una de las áreas más afectadas fue la sección del túnel con el sentido hacia San Pedro, en su tramo dentro del municipio regio, en donde el agua cayó hasta en chorros.

El acotamiento en esta zona lució incluso con charcos, extendiéndose el agua hasta el carril contiguo. Por este mismo cuerpo del túnel, las goteras también afectaban, aunque en menor grado, la parte sur, en el tramo sampetrino. La otra sección del túnel, en el sentido hacia Monterrey, también registró múltiples goteras, principalmente del lado del municipio regio. **Las filtraciones de agua tienen manchados los techos** en ambos cuerpos de la obra vial en la Loma Larga.

El túnel fue inaugurado el 24 de septiembre de 1997 por el ex Presidente Ernesto Zedillo y el ex Gobernador Benjamín Clariond Reyes. Desde su apertura, la obra ha **registrado goteras**, que ante la **falta de mantenimiento** y el paso del tiempo se han agravado. Luego de que **especialistas advirtieran que los escurrimientos podrían provocarle un daño estructural al túnel**, en febrero del 2002 el municipio de San Pedro realizó trabajos de impermeabilización. Pero las cubiertas colocadas desde entonces ya fueron rebasadas por las goteras, sin que a la fecha se haya realizado algún otro trabajo preventivo, tanto en San Pedro como en Monterrey (Villasáez, 2015)



Figura 2.7. “Elevan las goteras riesgo en el túnel” Tomada de El Norte (2015).

“Túnel Loma Larga registra fugas de agua”

Desde el pasado lunes, distintas fugas de agua se han registrado en el Túnel de la Loma Larga en el municipio de San Pedro. En un recorrido realizado se encontró que en al menos cuatro puntos del túnel se presentan fuertes escurrimientos. Los encharcamientos que se registran a lo largo del túnel representan un riesgo para los automovilistas y para la misma infraestructura que podría colapsar. Hasta el momento las autoridades sampetrinas no se han presentado en el sitio para revisar la situación (Solheim, 2015).

Túnel de la Loma Larga registra fugas de agua

En al menos cuatro puntos del túnel se presentan fuertes escurrimientos, lo cual representa un riesgo para los automovilistas.



Los escurrimientos se registran desde el pasado lunes.

Figura 2.8. “Túnel de la Loma Larga registra fugas de agua” Tomada de Milenio (2015).

“Caen pedazos del túnel de la Loma Larga”

*Parte del **techo del Túnel de la Loma Larga cayó sobre el carril** que va de Monterrey a San Pedro Garza García, en el límite de estos municipios. Los pedazos de concreto, de tamaño de hasta medio metro, quedaron sobre el pavimento y bloquearon la vialidad en dicha circulación. Afortunadamente no se reportaron personas lesionadas ni daños a vehículos. Personal de Protección Civil y Tránsito resguardaron el área, mientras que personal de Servicios Públicos retiró el concreto (Vanegas, 2016).*

Caen pedazos del Túnel de la Loma Larga

Pedazos de concreto que conforman el techo cayeron sobre el pavimento, ocasionando el cierre del carril que va de Monterrey a San Pedro Garza García.



No se reportaron personas lesionadas.

Figura 2.9. “Caen pedazos del Túnel de la Loma Larga” Tomada de Milenio (2016).

“Descarta Adrián De La Garza riesgo en túnel de la Loma Larga”

El alcalde de Monterrey señaló que trabajarán coordinadamente con San Pedro y el gobierno del estado para determinar las acciones a seguir tras una evaluación. Comenzaban las actividades del martes, cuando los automovilistas que circulaban por el túnel de la Loma Larga, se llevaron la sorpresa de observar la caída de varios pedazos de concreto de la parte alta del túnel.

Las autoridades municipales de Monterrey descartaron un riesgo mayor en el lugar. Lo que podemos determinar ahorita es que no es más que humedecimiento de la loza que desprendió algunos pedazos, se tiene que

reparar y al mismo tiempo vamos a evaluar que no haya una condición de riesgo, hasta ahorita no hay una condición de riesgo, señaló Adrián De La Garza.

El incidente ocurrió cerca de las 7:00 de la mañana de este martes, en la dirección de la capital del estado a San Pedro, en jurisdicción aún de Monterrey, las autoridades regias, señalaron que trabajarán coordinadamente con San Pedro y el gobierno del estado para determinar la situación del túnel y sobre todo las acciones a seguir. “Se va a evaluar y se va a invitar al municipio de San Pedro para que se pueda hacer esta evaluación con estos órdenes de gobierno”, explicó el alcalde de Monterrey (Alanís, 2016).



LOCAL

Descarta Adrián de la Garza riesgo en túnel de la Loma Larga

Por: Carlos Campos Silva ■ Octubre 25, 2016, 0:00



f El alcalde de Monterrey señaló que trabajarán coordinadamente con San Pedro y el gobierno del estado para determinar las acciones a seguir tras una evaluación

Figura 2.10. “Descarta alcalde de Monterrey riesgo en túnel de la Loma Larga” Tomada de El Horizonte (2016).

“Cierran túnel por obras de remediación”

Para evitar que más pedazos de concreto del techo del Túnel de la Loma Larga se desprendieran, anoche iniciaron trabajos de remediación, lo que provocó el cierre parcial de la vía. Poco después de las 23:10 horas, trabajadores de Servicios Públicos y de Rescate 911 de San Pedro comenzaron los trabajos en el área que delimita Monterrey y San Pedro. "Se iniciaron trabajos de remediación para evitar riesgos, hoy se presentó caída de material del recubrimiento del túnel y en la mañana se hizo un picado de manera precautoria para tratar de cascarsear material que pudo tener riesgo de caer, pero por la hora se prefirió continuar de noche. "La idea es detectar un tipo de falla, de riesgo, picando en varios tramos, y ya después hacer estudios geológicos y técnicos", explicó el coordinador general de Rescate 911, Ismael Contreras. En medio del cierre parcial del túnel, en dirección de Monterrey a San Pedro, los trabajadores iniciaron una evaluación a bordo de una canastilla, golpeando las partes del concreto. "Si se siente hueco, se hace el esfuerzo para tratar de que caiga, es después de los estudios mecánicos, para ver cuál será la solución total, si con un parche del mismo concreto se pueda corregir", dijo. Contreras agregó que distintas causas pudieron generar que parte del techo se desgajara. "Pueden ser por filtraciones en el interior del túnel, algunos sistemas de riego pueden debilitar, pueden ser fallas de concreto, las mismas condiciones de lluvia, de humedad, pueden provocar el problema". El tramo del recubrimiento de concreto que cayó fue en un área de 4 metros cuadrados. El incidente fue reportado a las 6:30 horas, cuando la circulación vehicular todavía no era mucha. Personal de la Secretaría de Infraestructura del Estado y de Servicios Públicos de Monterrey y San Pedro supervisó los daños. El Alcalde de Monterrey, Adrián de la Garza, minimizó el desprendimiento de la losa del interior del Túnel de la Loma Larga y señaló que sólo fue "humedecimiento" (Mata, 2016).

EL NORTE | Local

MAR.17.2023 20.9°

AVISOS DE OCASIÓN SUSCRÍBETE video

NOTICIAS OPINIÓN SEMANALES SOCIALES ESQUELAS GUÍAS DIVERSIÓN LO MÁS CONTACTO CONECTAR

LOCAL SEGURIDAD NACIONAL CDMX NEGOCIOS INTERNACIONAL CANCHA GENTE VIDA CIENCIA AUTOMOTRIZ GADGETS

Cierran túnel por obras de remediación

Iván Mata
Monterrey, México(26 octubre 2016).- Para evitar que más pedazos de concreto del techo del Túnel de la Loma Larga se desprendieran, anoche iniciaron trabajos de remediación, lo que provocó el cierre parcial de la vía.

Poco después de las 23:10 horas, trabajadores de Servicios Públicos y de Rescate 911 de San Pedro comenzaron los trabajos en el área que delimita Monterrey y San Pedro.

Notas Relacionadas

-  Alarma en Túnel caída de concreto
-  Cae losa en Túnel de la Loma Larga

Figura 2.11. “Cierran túnel por obras de remediación”. Tomada de El Norte (2016).

“Túnel de la Loma Larga se ha deteriorado con los años”

Desde su creación, el túnel de la loma larga ha sido una vía muy usada por los automovilistas, pero el paso del tiempo en su infraestructura empieza a dar problemas a los conductores porque existen diversas anomalías en su composición que pudieran ponerlos en una situación de riesgo. En un recorrido hecho por Telediario se pudo constatar que sus condiciones no son las más adecuadas, pues incluso se ha reportado que caen trozos de concreto en plena vía. Incluso ya ha sido molestia para aquellos peatones que tienen que transitar por ahí a un costado. Durante el recorrido no se constató si en el lugar realizan algún tipo de trabajo (Amao, 2017).



Figura 2.12. “Túnel de la Loma Larga se ha deteriorado con los años” Tomada de Telediario Canal 6 (2017).

El 20 de junio de 2024, la tormenta tropical Alberto, trajo consigo fuertes precipitaciones que se reflejaron en el día siguiente como importantes filtraciones en el Túnel Loma Larga (Figura 2.13.). Se observa que las filtraciones en el techo emergen con presión, lo que se debe a la alta saturación del macizo rocoso que rodea a los túneles de Loma Larga.

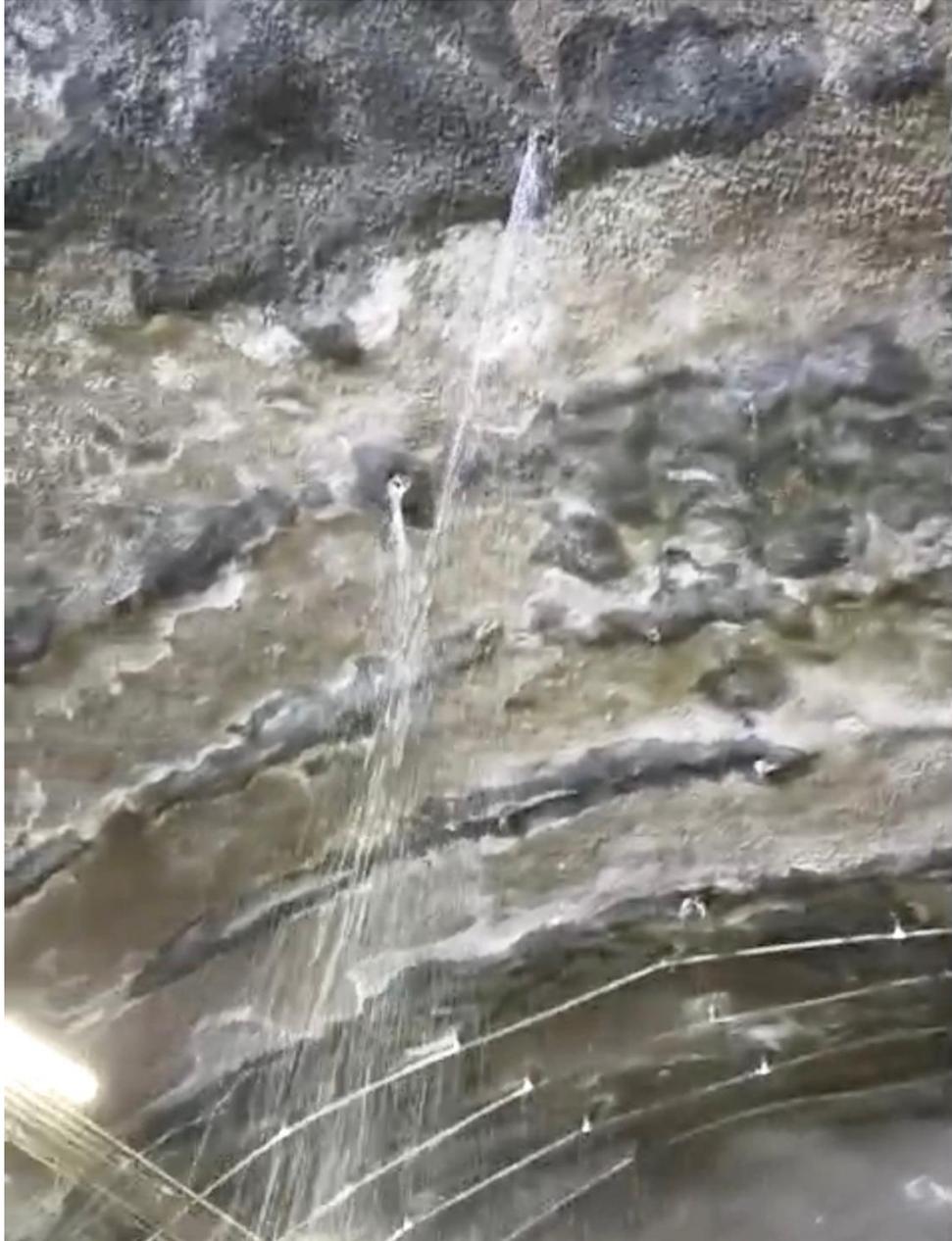


Figura 2.13. Fotografía de las filtraciones que emergen dentro del Túnel Loma Larga después de la tormenta tropical Alberto.

CAPÍTULO 3 Marco Geológico

3.1 Clima

3.1.1 Temperatura

El clima predominante en Nuevo León suele ser seco extremo con precipitaciones muy escasas a lo largo del año. Sin embargo, existe una gran variedad de climas lo cuales principalmente son secos, semisecos, semicálidos y subhúmedos (Figura 3.1.).

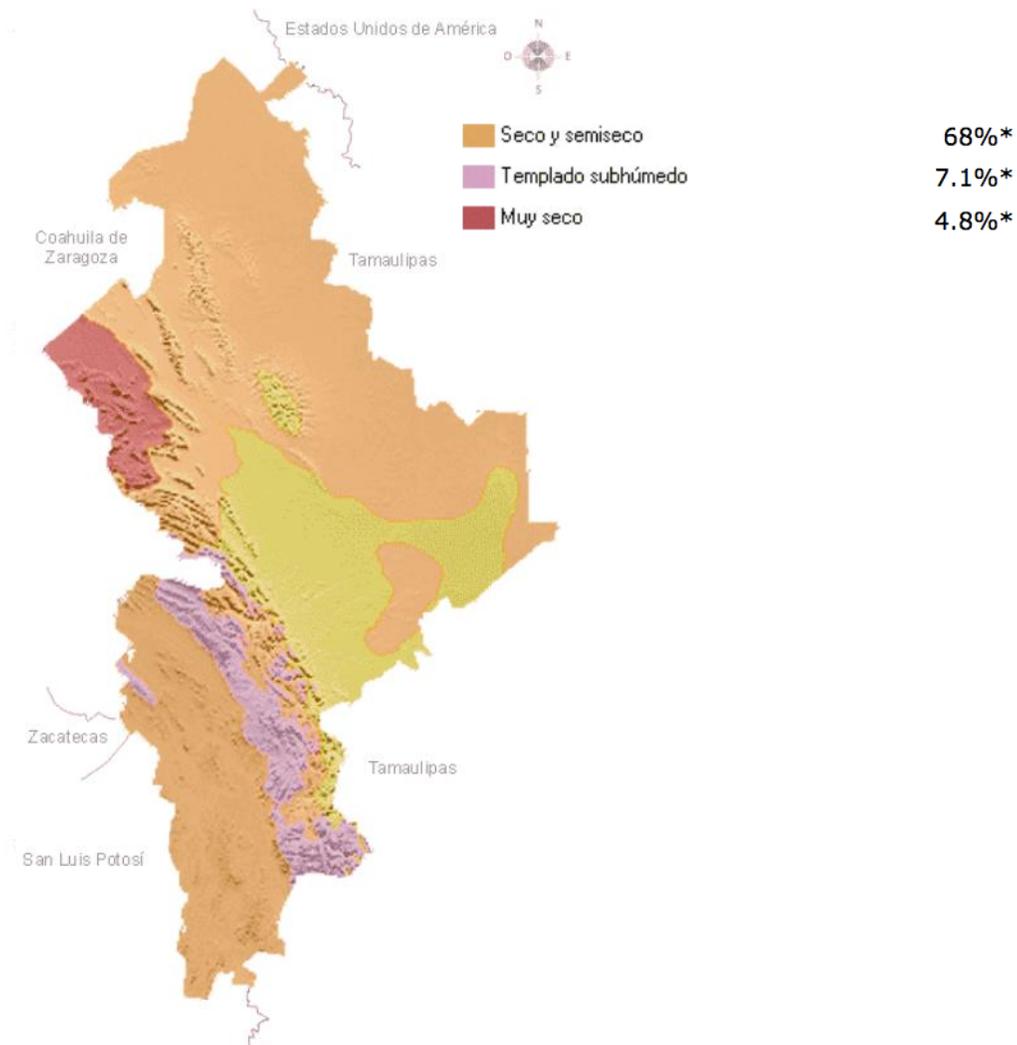


Figura 3.1. Carta climatológica de Nuevo León. Tomado de INEGI (2006).

Según los datos del clima que reporta INEGI, en la parte norte del estado la evaporación sobrepasa a la precipitación haciendo propicios los climas secos con variantes con lluvias en verano y muy escasas el resto del año. Los climas semisecos son más comunes en la parte central del estado y son muy parecidos a los climas secos del norte con lluvias en verano y escasas todo el año y algunas veces con lluvias escasas durante todo el año. Hacia la llanura costera del Golfo y al sur de la entidad son comunes los climas semicálidos que, debido a la mayor humedad suelen ser las zonas con mayor precipitación con hasta 800 mm al año y temperaturas medias anuales de 18°C. Los climas subhúmedos se pueden encontrar principalmente en los municipios de Montemorelos, General Terán y Linares donde la época con mayor precipitación suele ser el mes de septiembre. En la provincia de la Sierra Madre Oriental hay una variedad compleja de climas siendo el principal el semiseco templado con lluvias leves todo el año, temperaturas medias de entre 20°C y en los meses de invierno temperaturas de 9°C.

3.1.2 Vegetación

La vegetación xerófitas como los matorrales desérticos, espinosos y cactus son comunes, así como arbustos de hojas pequeñas. La gobernadora (*Larrea divaricata*), lechuguilla (agave lechuguilla), mezquite (*Prosopis grandulosa*), nopales (*Opuntia*) y otros. También se pueden encontrar matorrales submontanos característicos de arbustos altos y árboles bajos de entre 3 a 5 m donde predomina el huizache (*Acacia tortuosa*), encinos bajos (*Quercus*), anacahuita (*Cordia boissieri*) y barreta (*Helietta parvifolia*). En las zonas altas pueden encontrarse diversas especies de pinos (INEGI, 1986).

3.2 Fisiografía

El territorio del estado de Nuevo León se encuentra dentro de tres regiones fisiográficas (Figura 3.2.) las cuales se describen a continuación:

Provincia de la Gran Llanura de Norteamérica: fuera del territorio mexicano se extiende de norte a sur desde las provincias canadienses de Alberta hasta el norte de México cubriendo a Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas. En México, limita al norte y al este con el río Bravo, al oeste con la Sierra Madre Oriental y al sureste con la Llanura Costera del Golfo Norte. En Nuevo León abarca cerca de 23138.39 km² de su superficie y se caracteriza principalmente por la presencia de llanos interrumpidos por lomeríos dispersos suaves (INEGI, 1986).

Provincia de la Llanura Costera del Golfo Norte: se extiende por la costa del Golfo de México desde el río Bravo, en el tramo que va de Reynosa, Tamaulipas, a su desembocadura hasta la zona de Nautla, Veracruz. Dentro del Territorio Nacional limita al noroeste con la provincia de la Gran Llanura de Norteamérica, al oeste con la Sierra Madre Oriental, al este con el Golfo de México y al sur con la provincia del Eje Neovolcánico. Se trata de un margen de costa en emersión con altitudes que van de los 150 a máximo 500 m.s.n.m en la zona de Monterrey. Predominan los sedimentos marinos no consolidados como las arcillas, arenas y conglomerados cuya edad aumenta conforme se alejan de la costa desde el cuaternario hasta el cretácico superior cerca de la Sierra Madre Oriental. Los principales ríos que desembocan en sus costas son el Río Bravo, Soto la Marina, Tamesí, Pánuco, Tuxpan y otros. Esta provincia se compone por 4 subprovincias: Llanura Costera Tamaulipeca, Sierra de San Carlos, Sierra de Tamaulipas, Llanuras y Lomeríos la cual se encuentra dentro de la parte central de Nuevo León ocupando 9602.69 km² (INEGI, 1986).

Provincia de la Sierra Madre Oriental: colinda al norte y noreste con la provincia de las Sierras y Bolsones; al oeste con la Mesa Central y, en una pequeña franja del extremo noroeste con la Sierra Madre Occidental; al sur con el Eje Neovolcánico y al este con la Llanura Costera del Golfo Norte y la Gran Llanura Norteamericana (INEGI, 1986). La Sierra Madre Oriental es un conjunto de rocas sedimentarias de edades jurásicas – cretácicas que se encuentran plegadas y que forman una serie de anticlinales apretados y alargados que alcanzan grandes alturas, el Cerro el Potosí en Galeana es el más alto con 3713 m.s.n.m. INEGI (2006).



Figura 3.2. Mapa de las regiones fisiográficas de Nuevo León. Tomado de INEGI (2006).

3.3 Geología regional

3.3.1 Sierra Madre Oriental

El área de estudio pertenece a la región fisiográfica de la Sierra Madre Oriental (SMO) la cual se define como una cadena montañosa formada por el plegamiento de una secuencia sedimentaria mesozoica y parte de su basamento durante la Orogenia

Laramide (Eguiluz, S. et al. 2000; Tardy, M. et al. 1975; Padilla y Sánchez, R. 1985) dando lugar a cumbres que sobrepasan los 2500 m sobre el nivel del mar y que desaparecen en la planicie costera del Golfo de México. La SMO tiene más de 800 km de longitud y entre 80 y 100 km de amplitud. Las rocas que la componen son de diversas edades y litología que van desde el precámbrico y paleozoico hasta el cretácico y cuaternario. Su basamento es heterogéneo: hay gneises del precámbrico, esquistos preoxfordianos y sedimentos del paleozoico y sobre este descansa una secuencia sedimentaria mesozoica de rocas principalmente carbonatadas (Eguiluz de Antuñano, Samuel (PEMEX Exploración et al., 2000).

En el Triásico tardío – Jurásico inferior, con el inicio de la apertura del Golfo de México durante el *rifting* se definieron una serie de altos y bajos estructurales que influenciarían la manera en la que se depositarían los sedimentos más adelante. Alrededor del Jurásico medio se depositaron sedimentos terrígenos provenientes del continente que rellenaron a las fosas tectónicas (horst y grabens) con capas o lechos rojos. Posteriormente, durante el Jurásico superior (Oxfordiano) aumentó la intrusión marina y el bajo nivel del mar provocó el depósito de evaporitas y carbonatos marcando un cambio deposicional de sedimentación continental a marina. Los altos estructurales como el Bloque de Coahuila y el Archipiélago de Tamaulipas definieron las condiciones de depósito y los paleoambientes, así como la evolución de cuencas marinas (Padilla y Sánchez, 1982)

Con el constante aumento del nivel del mar se depositó una secuencia de rocas carbonatadas y lutitas según su posición en la plataforma y la profundidad de la columna de agua, por otro lado, los ambientes arrecifales cercanos a las paleoislas dieron lugar a calizas fosilíferas. Cuando el nivel del mar alcanzó a los altos estructurales se depositaron nuevas plataformas evaporíticas - carbonatadas. Según Eguiluz (2000) todas estas diferencias en la sedimentación y los cambios de facies determinarían en el futuro el estilo de deformación en la secuencia sedimentaria. Además, la acreción de terrenos durante la subducción de la antigua placa de Farallón provocó el comienzo del plegamiento que dio lugar a la Sierra Madre Oriental alrededor del Cenomaniano – Campaniano.

El Anticlinal Loma Larga pertenece al sector de la SMO llamado Curvatura de Monterrey refiriéndose a la zona donde la dirección preferente que lleva toda la cadena montañosa cambia, haciendo una especie de curva en dirección E-W (Padilla y Sánchez, 1985). Se caracteriza por tener anticlinales bifurcados, disarmónicos, angostos y alargados con planos axiales verticales y que se levantan de manera escalonada debido a la presencia de fallas inversas (Eguiluz de Antuñano, Samuel (PEMEX Exploración et al., 2000).

A continuación, se observa un mapa de la geología regional de la zona de estudio en la cual se observa parte de la Curvatura de Monterrey, el Anticlinal de las Mitras, la Sierra de la Silla y el Anticlinal Loma Larga en el cual se ubica el túnel, el tema central de esta investigación.

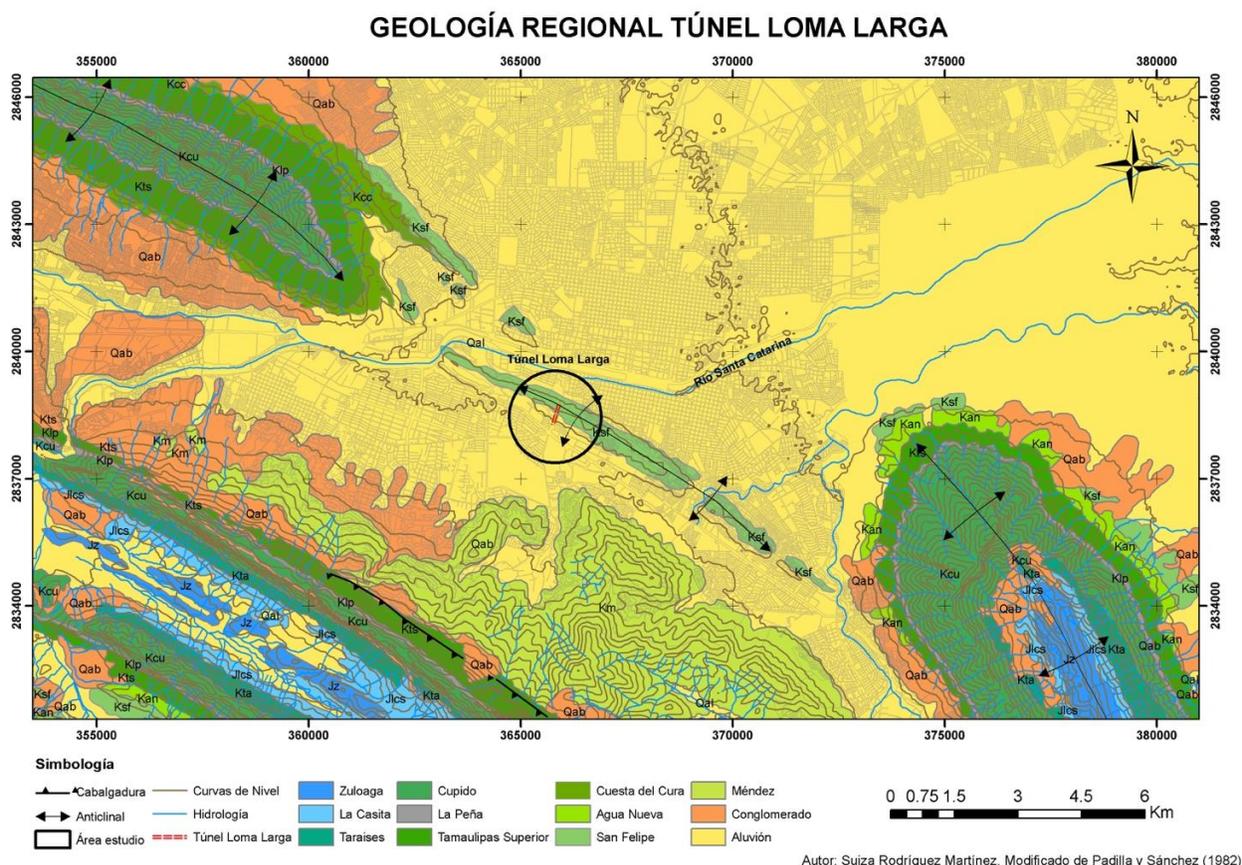


Figura 3.3. Geología Regional del área de estudio. Modificado de (Padilla y Sánchez, 1982).

3.4 Estratigrafía del Noreste de México

La Sierra Madre Oriental está conformada por capas gruesas de sedimentos mesozoicos de edades desde el Triásico tardío hasta el Cretácico Tardío. Las formaciones que conforman la estratigrafía del noreste de México (Figura 3.4.) son las siguientes:

Triásico:

- Grupo Huizachal (Nórico – Hettangiano): rocas clásticas de origen continental, descrito por Imlay (1938) como una intercalación de lutitas, limolitas, areniscas y conglomerados de color rojizo.

Jurásico:

- Grupo La Joya: conglomerado de rocas ígneas, areniscas de color rojizo, caliza de estratos delgados.
- Formación Minas Viejas: de manera general consta de evaporitas como anhidrita, lutitas calcáreas y algunas calizas.
- Formación Zuloaga: calizas color gris oscuro gruesas y masivas.
- Formación La Casita: según la descripción de Imlay (1943) es una secuencia de calizas arenosas, arcillosas, margas y lutitas con nódulos que contienen ammonites.

Cretácico:

- Formación Taraises: definida por Imlay (1936) como una caliza color gris oscuro con intercalaciones de lutitas de color gris oscuro, contiene fósiles escasos como belemnites y ammonites.

- Formación Tamaulipas Inferior: calizas color gris oscuro muy masivas con horizontes arcillosos y calcita cristalizada color blanco.
- Formación Cupido: equivalente en edad a Tamaulipas Inferior, se distingue por su contenido fosilífero.
- Formación La Peña: capas de lutita y caliza interestratificadas de estratos delgados, contiene nódulos de pirita.
- Formación Tamaulipas Superior: calizas de color gris con nódulos y horizontes de pedernal negro, calcita cristalizada color blanco y capas muy delgadas de arcilla.
- Formación Aurora: equivalente en edad a Tamaulipas Superior, se distingue por su contenido fosilífero.
- Formación Cuesta del Cura: estratos delgados de caliza color gris oscuro con capas de margas con lentes y horizontes de pedernal, una característica muy distintiva es que los estratos presentan ondulación (boudinage).
- Formación Agua Nueva: intercalación de calizas de estratos delgados con lutitas laminares de color negro a gris y margas de color grisáceo.
- Formación San Felipe: estratos delgados de calizas margosas laminadas y lutitas muy laminares de color gris que intemperiza a pardo con horizontes de bentonita color verde.
- Formación Méndez: principalmente formada por lutitas laminares color gris verdoso que intemperizan a color amarillo.

Cuaternario:

- Coluvión: fragmentos angulosos y subangulosos de tamaños variados de rocas carbonatadas en matriz arcillo-arenosa pobremente cementada.
- Aluvión: fragmentos redondeados y subredondeados de calizas principalmente y otras rocas, de origen aluvial que rellenan los bajos topográficos.

A continuación, se muestra la columna estratigráfica del noreste del país algunas formaciones geológicas también pueden encontrarse en el área de la Curvatura de Monterrey en el AMM.

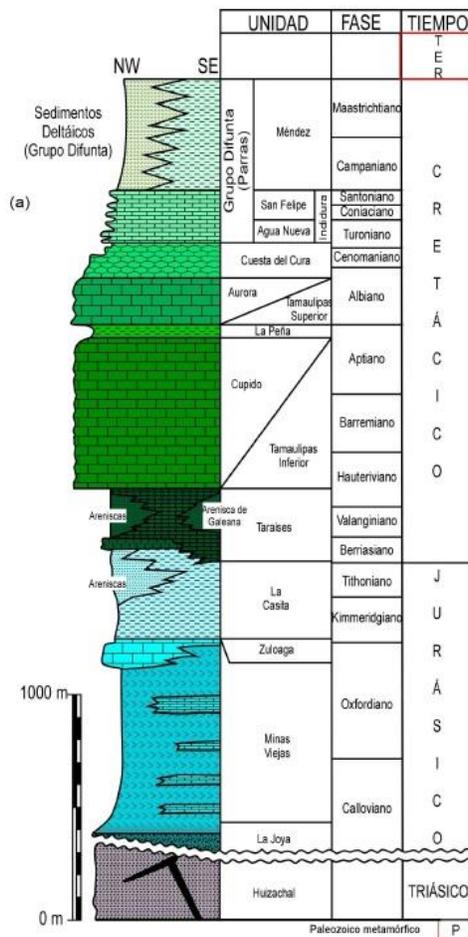


Figura 3.4. Columna estratigráfica del Noreste de México (Michalzik, 1988)

3.5 Geología local

3.5.1 Anticlinal Loma Larga

La estructura llamada Loma Larga separa al municipio de Monterrey de San Pedro y se caracteriza principalmente por ser un anticlinal apretado y simétrico, con un plano axial casi vertical en dirección NW-SE, una ligera vergencia hacia el NE y una longitud aproximada de 15 km. Tanto el anticlinal Loma Larga y del Obispado son una bifurcación del anticlinal de las Mitras (Chapa Arce, 2016). El cerro Loma Larga está conformado por sedimentos marinos del Cretácico Superior y las formaciones geológicas que afloran en él son: Agua Nueva, San Felipe y Méndez las cuales se encuentran plegadas y falladas durante la formación de la Sierra Madre Oriental.

Para la realización del proyecto de los túneles de Loma Larga en 1994 se realizó una exploración mediante sondeos mecánicos para la caracterización de los materiales que conforman al anticlinal, para ello se realizaron sondeos con barril y broca de diamante distribuidos a lo largo del trazo de proyecto con profundidades variables entre 25 y 130 m los cuales reportan a las formaciones geológicas Méndez, San Felipe y Agua Nueva.

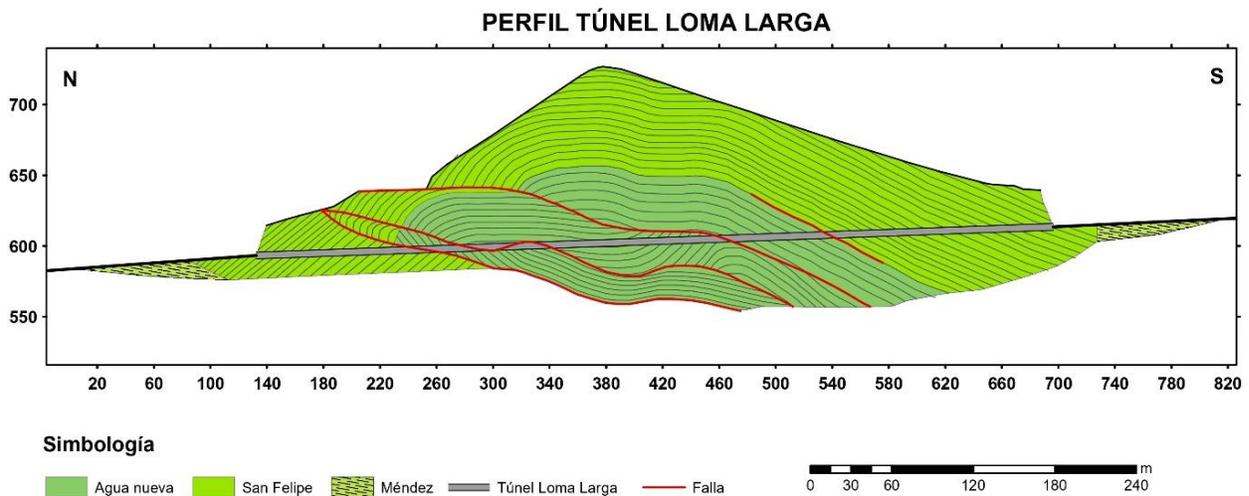


Figura 3.5. Perfil geológico del túnel Loma Larga. Modificado de (Santoyo Villa et al., 2014).

3.5.2 Formación Agua Nueva

La formación Agua Nueva inicialmente fue asignada a la formación San Felipe por Jeffreys en 1910 y posteriormente, Stephenson en 1922 que propuso separar la parte inferior de la formación San Felipe y nombrarla Agua Nueva.

El Cañón de la Borrega en la Sierra de Tamaulipas fue designada como la localidad tipo donde se encuentran 100 m de calizas con horizontes de pedernal intercaladas con lutitas carbonosas color negro con alto contenido fósil de *labiatus*. También se clasifica en 3 miembros: a) Inferior, capas delgadas de caliza y lutita; b) Medio, alto contenido arcilloso con intercalaciones de estratos delgados de caliza; c) Superior, intercalaciones de caliza y lutita color negro (Muir, 1936). (Padilla y Sánchez, 1982) la describe como una secuencia de estratos delgados de calizas tipo *wackstone* con moderado a abundante contenido de nódulos de pedernal color negro intercalado con lutitas negras y a veces lutitas carbonosas. Se le asignó una edad del Cenomaniano Superior al Turoniano (López Ramos, 1982) de acuerdo con su posición estratigráfica y contenido faunístico (SGM, 2007).

En el área de estudio (Chapa Arce, 2016) reporta la presencia del miembro inferior de Agua Nueva el cual presenta estratos medianos a gruesos (30 a 60 cm) de calizas intercaladas con estratos delgados (5 a 15 cm) de lutitas color gris oscuro en muestra fresca y gris claro y marrón como color de intemperismo para calizas y lutitas respectivamente.

Dentro del área de estudio aflora levemente en el flanco norte del ALL cerca de la Torre Zafiro. Se observan estratos de calizas color gris de menos de 50 cm de espesor en promedio y algunos estratos más gruesos de hasta 1 m, las calizas están intercaladas con estratos muy delgados de 10 – 15 cm de lutitas altamente fracturadas e intemperizadas color beige.



Figura 3.6. Fotografía de la formación Agua Nueva en el área de estudio TLL.

3.5.3 Formación San Felipe

La formación San Felipe fue introducida por primera vez por Jeffreys en 1910 pero fue definida formalmente por Muir (1936). Litológicamente consiste en calizas arcillosas en estratos delgados de color gris claro a verde con frecuentes intercalaciones de lutita calcárea y lutita bentonítica de colores verde y amarillo grisáceo Aguilar en (SGM, 2006).

La formación San Felipe sobreyace a las formaciones Indidura y Agua Nueva y subyace a las formaciones Parras y Lutita Méndez. En el área de la curvatura de Monterrey consiste en 110 a 350 m de estratos delgados, laminares y ligeramente grises de *wackstone* intercalada con limolita, lutita y bentonita color verde. Se le asigna una edad tentativa de Coniaciano – Santoniano (Padilla y Sánchez, 1982).

En el área de estudio consiste principalmente en estratos de calizas medianos a gruesos de entre 30 cm a 2 m de espesor con fracturas rellenas de calcita e intercalados con margas y lutitas laminares y horizontes color verde de bentonita.



Figura 3.7. Fotografía de la formación San Felipe en el área de estudio TLL.

3.5.4 Formación Méndez

La lutita Méndez fue descrita por primera vez en 1910 en un reporte inédito de Jeffreys (Muir, 1936). (Padilla y Sánchez, 1982) reporta a Méndez como una lutita laminar color gris oscuro y marrón como color de intemperismo.

En el área de estudio Méndez aflora en las partes bajas del anticlinal Loma Larga y consiste en una lutita laminar fuertemente fracturada e intemperizada color beige - verdoso.

3.6 Localización y vías de acceso

Los túneles de Loma Larga se encuentran en el cerro Loma Larga al sur-poniente de la Ciudad de Monterrey entre los límites territoriales del Municipio de Monterrey y de San Pedro Garza García en Nuevo León. Estos túneles conectan a ambos municipios a través

de Av. Venustiano Carranza y Av. Real San Agustín. Consiste en dos túneles para uso vehicular con sentidos opuestos (norte-sur, Monterrey-San Pedro y sur-norte, San Pedro-Monterrey), y cada uno con tres carriles, 10.5 m de ancho, 558 m de longitud y 4.5 m de galibo.



Figura 3.8. Túneles de la Loma Larga (TLL).

3.7 Geología estructural

3.7.1 Proyecciones estereográficas

3.7.1.1 Generalidades

Las proyecciones estereográficas son métodos geométricos utilizados para proyectar puntos y líneas de una esfera sobre un plano. En geología, estas proyecciones son esenciales para analizar y representar datos estructurales, como orientaciones de fallas, estratos, pliegues y lineaciones. La proyección estereográfica permite transformar datos tridimensionales en dos dimensiones, facilitando su interpretación y análisis (Lisle & Leyshon, 2004). Existen diferentes tipos de diagramas, redes o falsillas estereográficas. En la red de Wulff (equiangular), los ángulos se preservan, lo cual es útil para medir y analizar ángulos entre planos y líneas. En la red de Schmidt (equiareal), es especialmente útil en análisis de fallas y esfuerzos porque las áreas se conservan, lo que permite representar distribuciones estadísticas de orientaciones con mayor precisión.

3.7.1.2 Aplicaciones en Geología

En geología estructural, la esfera de referencia es imaginaria y se denomina esfera estereográfica. Todos los datos estructurales de planos y líneas se proyectan en esta esfera.

Un plano en geología puede representar superficies como estratificación, diaclasas, fallas o cualquier otra superficie plana. La orientación de un plano se describe mediante su rumbo, que es su dirección con respecto al norte y su buzamiento, el ángulo que forma el plano con la horizontal, medido en la dirección perpendicular al rumbo, es decir a 90° de este. En una proyección estereográfica, un plano se puede representar por su polo, que es una línea normal al plano. Este polo se proyecta como un punto en la esfera estereográfica y también la traza del plano se proyecta como un círculo máximo en la esfera estereográfica.

Una línea en geología representa la intersección de dos planos, una lineación mineral, una estría de falla, o cualquier otra característica lineal dentro de la roca. La orientación de una línea se describe mediante su dirección y su plunge que es el ángulo que forma la línea con la horizontal. En una proyección estereográfica, una línea se proyecta directamente como un punto en la esfera estereográfica, representando su orientación espacial.

3.7.1.3 Representación de planos y líneas en redes estereográficas

Para representar planos y líneas en una red estereográfica se puede seguir la siguiente metodología:

1. Materiales necesarios:

- Red estereográfica de preferencia (Wulff o Schmidt)
- Papel traslúcido

- Lápiz, colores y borrador

2. Preparación de la red estereográfica:

- Imprimir la red estereográfica
- Colocar una chincheta en el centro de la falsilla para luego superponer la hoja de papel traslúcido encima y marcar el perímetro exterior de la red con un plumón y en la parte superior el norte (N)

3. Dibujo de un plano:

- Determinar los datos estructurales del plano (rumbo y buzamiento). Por ejemplo: 107/26NW
- Hacer una marca en el borde exterior del círculo dibujado, para marcar la posición del rumbo del plano. Es decir, a los 107°.
- Girar el papel traslúcido hasta que el rumbo del plano coincida con el norte de la red estereográfica.
- Desde el punto marcado a los 107° en el borde exterior del círculo, contar 26° hacia el interior de la red a lo largo del ecuador, en este caso inicia el conteo desde el noroeste que es la dirección del buzamiento (26° NW).
- Una vez que se tiene marcado el punto de buzamiento, trazar una línea siguiendo el meridiano hasta formar un semicírculo, al cual se llamará círculo máximo.
- Cuando se tenga el círculo máximo, contar 90° hacia el interior del círculo máximo, en sentido opuesto al buzamiento. Marcar un punto que representa el polo del plano.

4. Determina los datos estructurales de la línea:

- Determinar los datos estructurales de la línea (dirección y plunge). Por ejemplo: 120/45
- Realizar una marca en el borde exterior del círculo en la posición de la dirección de la línea. Es decir, a los 120°.
- Girar el papel traslúcido hasta que la dirección de la línea coincida con el eje E-W de la falsilla y contar hacia el interior de la red el plunge, en el ejemplo sería 45° y marcar el punto.
- El punto marcado representa a la línea en la red estereográfica.

Aunque tradicionalmente los diagramas estereográficos se realizaban de manera manual, hoy en día se emplean diversos softwares que facilitan este proceso y mejoran la precisión del análisis geológico y estructural. Herramientas como Stereonet, GEOrient y Dips de Rocscience se destacan en este campo. En esta tesis se utilizó el programa Dips para generar y analizar los diagramas estereográficos, cuya explicación se desarrollará en este capítulo.

3.7.2 Área de estudio

El área de estudio comprende un radio de 1.5 Km alrededor de los túneles donde se prestó especial atención a cinco afloramientos (Figura 3.9.):

1. Afloramiento Diana Cazadora (DC), ubicado sobre la Av. Ricardo Margain a un kilómetro de distancia de los túneles, hacia el extremo occidental del anticlinal Loma Larga. Se trata de un corte carretero con dirección N-S el cual es paralelo al eje de los túneles y permite observar la litología de manera que se pueden hacer comparaciones con los túneles.
2. Afloramiento Hyundai Penta (HP), ubicado sobre la calle Valle Sol y Diagonal Santa Engracia detrás de la tienda automotriz de Hyundai.

3. Afloramiento Calle Parteaguas (CP), ubicado precisamente en el parteaguas del cerro Loma Larga, este afloramiento se encuentra a todo lo largo de la Av. Parte Aguas y la Calle Parteaguas en la parte central de la cima del anticlinal.
4. Afloramiento Excavación Cimientos (EC), se accede al sitio sobre la Av. Lázaro Cárdenas en dirección oeste a unos 400 m de los túneles de Loma Larga. Se trata de una excavación inconclusa de unos cimientos que permiten observar a las formaciones ahí presentes.
5. Afloramiento Torre Zafiro (TZ), situado al extremo noroeste del TLL este afloramiento se ubica junto a la Torre Zafiro de la Av. San Francisco.

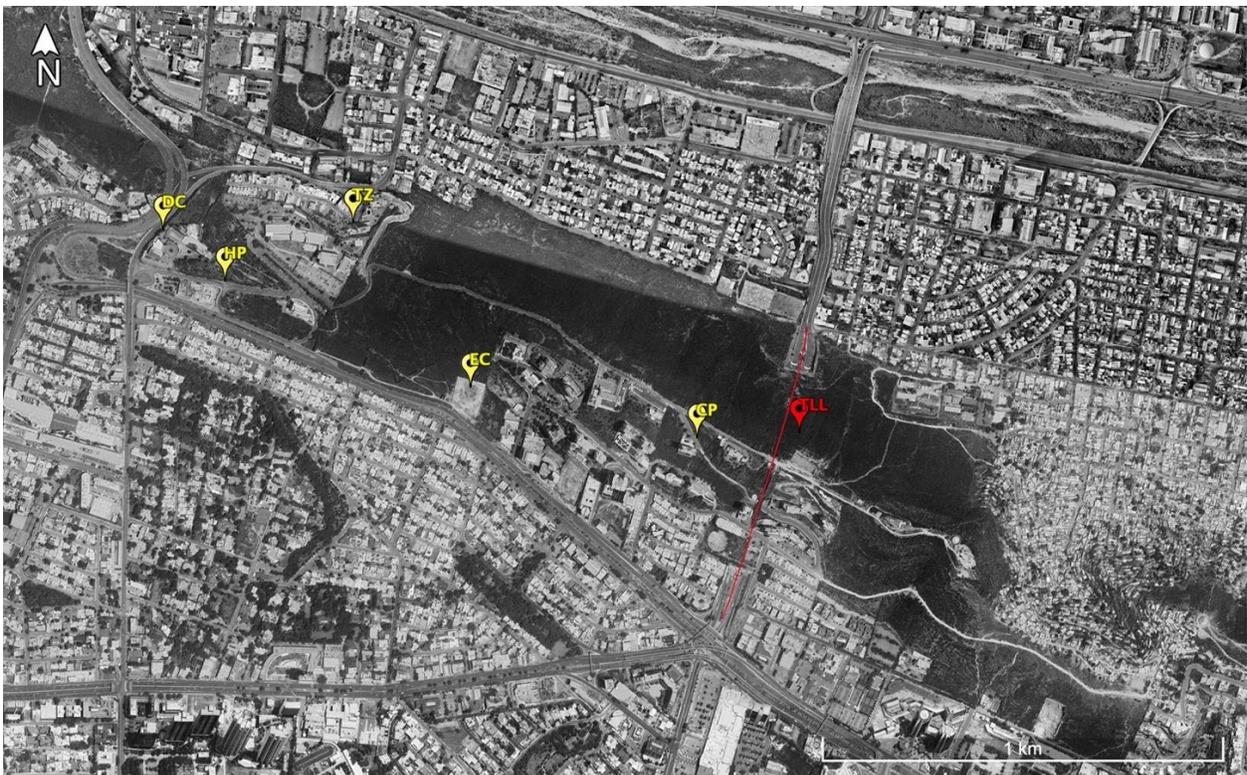


Figura 3.9. Ubicación de los principales afloramientos del área de estudio. Obtenido de Google Earth.

3.7.2.1 Corte de la Diana Cazadora

En campo se realizó el levantamiento del afloramiento geológico del corte de la avenida Ricardo Margain, de la conocida Diana Cazadora. Este corte es de vital importancia para este trabajo debido a su orientación paralela al trazado del túnel. Esta alineación nos permite observar y correlacionar las estructuras geológicas visibles en el corte con aquellas presentes en el túnel, que no son directamente accesibles. Aunque no están en proximidad inmediata, la información obtenida del corte de la Diana Cazadora es fundamental para inferir y analizar la continuidad y comportamiento de las estructuras dentro de los túneles de la Loma Larga, proporcionando una valiosa herramienta para su estudio geológico-estructural y geotécnico.



Figura 3.10. Corte de la avenida Ricardo Margain: Diana Cazadora.

Se obtuvo información estructural de 14 puntos, donde se obtuvo información estructural de 14 puntos a lo largo del corte, donde se midió la estratificación (E) y las familias de diaclasas (D_1 , D_2 , D_n) con una brújula geológica siguiendo el criterio de la mano derecha.

Además, se describió la litología en cada punto. Los datos recolectados fueron graficados y analizados utilizando el software Dips de Rocscience, lo que permitió representar los datos estructurales en el estereograma usando la red de Wulff, destacando las variaciones en la estratificación y las orientaciones predominantes de las familias de diaclasas. Este análisis facilitó la identificación de patrones estructurales y posibles zonas de debilidad en el afloramiento.

A continuación, se presenta la información recopilada y los gráficos resultantes:

PUNTO 1				
COORDENADAS UTM		ELEVACIÓN (m)	DATOS ESTRUCTURALES	
E	N		ESTRATIFICACIÓN	FAMILIAS DE DIACLASAS
364490	2839270	619	303/21NE	208/90SW
				123/72SW
				205/90SW
				127/71SE
DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA			DIAGRAMAS ESTEREOGRÁFICOS	
<p>Se observaron estratos gruesos de calizas margosas con intercalaciones de estratos delgados de lutita laminar intemperizada. El afloramiento muestra en general un color café amarillento por el intemperismo y moderadamente fracturado.</p>				

Tabla 3.1. Datos estructurales Diana Cazadora, punto 1.

PUNTO 2				
COORDENADAS UTM		ELEVACIÓN (m)	DATOS ESTRUCTURALES	
E	N		ESTRATIFICACIÓN	FAMILIAS DE DIACLASAS
364486	2839259	620	304/25NE	213/71NW
				122/67SW
				299/29NE
				297/31NE
				208/82NW
DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA			DIAGRAMAS ESTEREOGRÁFICOS	
Estratos gruesos de margas con intercalación de lutitas laminares color café amarillento, intemperizadas y moderadamente fracturadas.				

Tabla 3.2. Datos estructurales Diana Cazadora, punto 2.

PUNTO 3				
COORDENADAS UTM		ELEVACIÓN (m)	DATOS ESTRUCTURALES	
E	N		ESTRATIFICACIÓN	FAMILIAS DE DIACLASAS
364465	2839258	621	283/22NE	208/72NW
				137/73SW
DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA			DIAGRAMAS ESTEREOGRÁFICOS	
Estratos gruesos de margas con intercalación de lutitas color café amarillento.				

Tabla 3.3. Datos estructurales Diana Cazadora, punto 3.

PUNTO 4				
COORDENADAS UTM		ELEVACIÓN (m)	DATOS ESTRUCTURALES	
E	N		ESTRATIFICACIÓN	FAMILIAS DE DIACLASAS
364413	2839221	623	304/03NE	207/87NW
				208/87NW
				122/81SW
DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA			DIAGRAMAS ESTEREOGRÁFICOS	
<p>Calizas margosas de estratificación gruesa entre 90 cm a 2 m con intercalación de capas verdes de bentonita de alrededor 4 cm de espesor. Poco fracturadas con pátinas de oxidación y calcita en planos de fracturamiento</p>				

Tabla 3.4. Datos estructurales Diana Cazadora, punto 4.

PUNTO 5				
COORDENADAS UTM		ELEVACIÓN (m)	DATOS ESTRUCTURALES	
E	N		ESTRATIFICACIÓN	FAMILIAS DE DIACLASAS
364403	2839221	623	295/15NE	137/85SW
				198/82NW
DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA			DIAGRAMAS ESTEREOGRÁFICOS	
<p>Estratos gruesos de calizas de 1 a 2 m de espesor y estratos más delgados de margas con intercalación de lutitas y horizontes de calcita.</p>				

Tabla 3.5. Datos estructurales Diana Cazadora, punto 5.

PUNTO 6				
COORDENADAS UTM		ELEVACIÓN (m)	DATOS ESTRUCTURALES	
E	N		ESTRATIFICACIÓN	FAMILIAS DE DIACLASAS
364393	2839196	626	295/13NE	208/87NW 114/65SW
DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA			DIAGRAMAS ESTEREOGRÁFICOS	
Margas de 50 cm de espesor con intercalaciones de lutitas y horizontes de calcita y capas color verde de bentonita hacia el techo. Se observa mucho intemperismo y oxidación.				

Tabla 3.6. Datos estructurales Diana Cazadora, punto 6.

PUNTO 7				
COORDENADAS UTM		ELEVACIÓN (m)	DATOS ESTRUCTURALES	
E	N		ESTRATIFICACIÓN	FAMILIAS DE DIACLASAS
364377	2839184	625	307/13NE	207/89NW 304/77NE
DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA			DIAGRAMAS ESTEREOGRÁFICOS	
Se mantiene la misma litología que el punto anterior				

Tabla 3.7. Datos estructurales Diana Cazadora, punto 7.

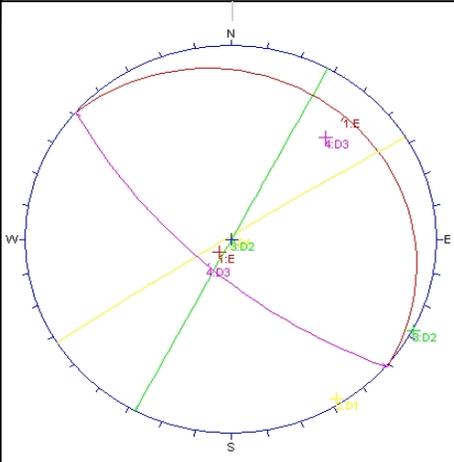
PUNTO 8				
COORDENADAS UTM		ELEVACIÓN (m)	DATOS ESTRUCTURALES	
E	N		ESTRATIFICACIÓN	FAMILIAS DE DIACLASAS
364365	2639164	625	311/10NE	238/88NW 208/90NW 131/70SW
DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA			DIAGRAMAS ESTEREOGRÁFICOS	
<p>Se mantiene la misma litología que el punto anterior, solamente se observa mucha oxidación externa. Este punto corresponde a la zona anterior al plegamiento y fracturamiento intenso</p>				

Tabla 3.8. Datos estructurales Diana Cazadora, punto 8.

PUNTO 9				
COORDENADAS UTM		ELEVACIÓN (m)	DATOS ESTRUCTURALES	
E	N		ESTRATIFICACIÓN	FAMILIAS DE DIACLASAS
364350	2839161	628	100/51SE	209/90NW
			119/51SW	121/82SW
			115/70SW	211/90NW
			300/27NE	117/83SW
			309/37NE	206/89NW
DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA			DIAGRAMAS ESTEREOGRÁFICOS	
<p>1a zona de falla: área donde inicia el plegamiento y posteriormente sigue un área de intenso fracturamiento. La litología consta de estratos delgados de margas con intercalaciones de lutitas muy fracturadas y con calcita relleno de fracturas a causa de los esfuerzos compresivos. La zona de milonitización tiene aproximadamente 2.5 m de espesor</p>				

Tabla 3.9. Datos estructurales Diana Cazadora, punto 9.

PUNTO 10				
COORDENADAS UTM		ELEVACIÓN (m)	DATOS ESTRUCTURALES	
E	N		ESTRATIFICACIÓN	FAMILIAS DE DIACLASAS
364326	2839127	625	300/10NE	127/85SW 205/86NW
DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA			DIAGRAMAS ESTEREOGRÁFICOS	
<p>Eje del pliegue: Estratos de alrededor de 30 cm a 1 m de espesor de calizas margosas con intercalación de lutitas y horizontes de calcita. La intercalación de estratos más competentes y gruesos con los menos resistentes y delgados ocasiona erosión irregular, lo que deja grandes huecos entre los estratos más pesados.</p>				

Tabla 3.10. Datos estructurales Diana Cazadora, punto 10.

PUNTO 11				
COORDENADAS UTM		ELEVACIÓN (m)	DATOS ESTRUCTURALES	
E	N		ESTRATIFICACIÓN	FAMILIAS DE DIACLASAS
364321	2839122	614	119/75SW	295/17NE 209/87NW
DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA			DIAGRAMAS ESTEREOGRÁFICOS	
<p>2ª Zona de falla: área de intenso plegamiento y fracturamiento, se observan múltiples fracturas rellenas de calcita. El espesor de la zona de milonitización es de 4.5 m.</p>				

Tabla 3.11. Datos estructurales Diana Cazadora, punto 11.

PUNTO 12				
COORDENADAS UTM		ELEVACIÓN (m)	DATOS ESTRUCTURALES	
E	N		ESTRATIFICACIÓN	FAMILIAS DE DIACLASAS
364318	2839118	617	118/67SW	210/87NW
			293/12NE	115/85SW
			292/23NE	
DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA			DIAGRAMAS ESTEREOGRÁFICOS	
<p>Zona de intenso plegamiento, se observa estratificación en zig-zag a causa de los esfuerzos compresivos.</p>				

Tabla 3.12. Datos estructurales Diana Cazadora, punto 12.

PUNTO 13				
COORDENADAS UTM		ELEVACIÓN (m)	DATOS ESTRUCTURALES	
E	N		ESTRATIFICACIÓN	FAMILIAS DE DIACLASAS
364315	2839112	613	298/74NE	295/1NE
			296/5NE	121/84SW
DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA			DIAGRAMAS ESTEREOGRÁFICOS	
<p>Pliegue ubicado posterior a la zona de falla. Se observan margas de entre 40 a 50 cm de espesor con intercalación de lutitas de 15 a 20 cm de espesor y horizontes de calcita color blanco lechoso.</p>				

Tabla 3.13. Datos estructurales Diana Cazadora, punto 13.

PUNTO 14				
COORDENADAS UTM		ELEVACIÓN (m)	DATOS ESTRUCTURALES	
E	N		ESTRATIFICACIÓN	FAMILIAS DE DIACLASAS
364298	2839088	612	130/27SW	297/70NE 118/86SW
DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA			DIAGRAMAS ESTEREOGRÁFICOS	
Margas con intercalación de lutitas y horizontes de bentonita color verde, buzamiento suave				

Tabla 3.14. Datos estructurales Diana Cazadora, punto 14.

Se identificaron dos familias de diaclasas principales de tipo *ac*, perpendiculares al eje del anticlinal y *bc*, paralelas al eje. Estas fracturas, junto con la estratificación, forman bloques en forma de prisma rectangular los cuales se separan del macizo rocoso generando inestabilidad.

Se encontraron dos sistemas de falla en el corte de la Diana Cazadora, uno hacía el flanco norte del anticlinal y otro hacía el sur. Ambas fallas son de tipo inversa a causa de los esfuerzos compresivos que crearon el plegamiento de la Sierra Madre Oriental.

En la primera falla se midió un desplazamiento de entre 1.5 a 2 m con una dirección E-W ligeramente hacia el NW-SE; en la segunda, se observa un desplazamiento más grande con un escalón de 3.5 a 4 m con una dirección E-W y ligeramente al NE-SW.



Figura 3.11. Perfil geológico de la avenida Ricardo Margain de la Diana Cazadora.

3.7.2.2 Otros sitios

Se recolectaron datos estructurales de los demás sitios antes mencionados complementar la información del área de estudio. Los datos recabados se muestran en las siguientes tablas:

HYUNDAI PENTA						
COORDENADAS UTM		ELEVACIÓN (m)	DATOS ESTRUCTURALES			
E	N		ESTRATIFICACIÓN	FAMILIAS DE DIACLASAS		
365652.51	2838589.78	626	130/31	125/73	032/90	029/90
			102/28	035/89	131/89	033/90
			123/38	121/82	025/90	126/73
			104/34	028/90	135/90	129/88
			109/27	124/75	134/83	027/89
DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA			DIAGRAMAS ESTEREOGRÁFICOS			
<p>Estratos de calizas café claro, de 50-70 cm de espesor, intercalados con capas delgadas de lutita blanda, alterada y fracturada. Las calizas son bien cementadas pero fracturadas, mientras que las lutitas presentan laminación, mostrando signos de alteración y fracturación. Esta alternancia sugiere un ambiente de deposición con energía variable. Se trata de la formación San Felipe.</p>						

Tabla 3.15. Datos estructurales del sitio Hyundai Penta.

CALLE PARTE AGUAS						
COORDENADAS UTM		ELEVACIÓN (m)	DATOS ESTRUCTURALES			
E	N		ESTRATIFICACIÓN	FAMILIAS DE DIACLASAS		
365652.51	2838589.78	690	152/24	116/78	201/85	134/85
			145/22	207/83	198/84	204/85
				210/80	126/78	200/80
			151/04	118/85	205/66	120/83
				125/72	120/84	121/90
			121/23	205/87	200/84	204/80
122/73	126/82	203/84				
DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA			DIAGRAMAS ESTEREOGRÁFICOS			
<p>Formación San Felipe. Se observa una alternancia de estratos de calizas café claro a beige, con espesores no mayores a 50 cm, y capas delgadas de lutitas marrón claro, alteradas y fracturadas. Las calizas están fracturadas, mientras que las lutitas están intensamente fracturadas y aleteradas, con evidente desintegración. Las fracturas indican eventos tectónicos posteriores a la sedimentación.</p>						

Tabla 3.16. Datos estructurales del sitio Calle Parteaguas.

EXCAVACIÓN CIMIENTOS						
COORDENADAS UTM		ELEVACIÓN (m)	DATOS ESTRUCTURALES			
E	N		ESTRATIFICACIÓN	FAMILIAS DE DIACLASAS		
365089.67	2838720.57	621	120/25	121/88	030/73	130/22
			111/23	105/83	124/90	125/24
				130/22	023/90	130/34
			131/26	045/77	029/72	133/86
				140/22	034/89	026/66
			160/24	135/36	200/90	028/87
DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA			DIAGRAMAS ESTEREOGRÁFICOS			
<p>Estratos intercalados de calizas y lutitas de color beige claro, con buzamiento ligero y orientación prácticamente horizontal. Las calizas presentan fracturación moderada, mientras que las lutitas están intensamente fracturadas y meteorizadas, volviéndose quebradizas. Los estratos tienen un espesor promedio de hasta 60 cm en la base, adelgazándose hacia la cima. Las lutitas se presentan en estratos delgados de hasta 30 cm. Corresponde a la formación San Felipe.</p>						

Tabla 3.17. Datos estructurales del sitio Excavación Cimientos.

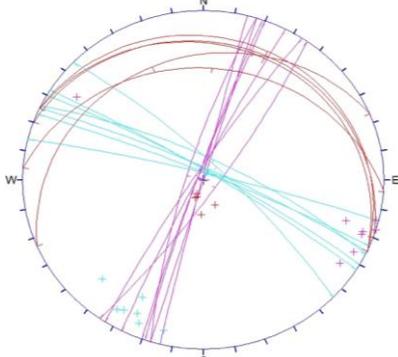
TORRE ZAFIRO						
COORDENADAS UTM		ELEVACIÓN (m)	DATOS ESTRUCTURALES			
E	N		ESTRATIFICACIÓN	FAMILIAS DE DIACLASAS		
364802.09	2839130.62	622	290/12	035/81	207/86	200/86
			295/13	314/78	296/75	295/82
			274/23	197/90	213/84	199/86
			295/10	300/83	197/79	284/85
			247/18	213/84	293/85	302/84
DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA			DIAGRAMAS ESTEREOGRÁFICOS			
Estratos de color gris claro de calizas moderadamente fracturadas, con espesores que varían de 40 cm a 1.5 m, intercalados con estratos delgados de lutitas muy fracturadas, de aproximadamente 2 a 20 cm. Esta descripción corresponde a la Formación Agua Nueva.						

Tabla 3.18. Datos estructurales del sitio Torre Zafiro.

En primera instancia, se observan en todos los afloramientos, al igual que en la Diana Cazadora, que hay dos familias de diaclasas preferenciales, con orientaciones casi perpendiculares entre sí, lo que forma un sistema conjugado de fracturas. Con respecto a la estratificación se observan dos tipos de fracturas *ac* y *bc*. EL primer tipo es perpendicular al rumbo de la estratificación, sugiriendo tensiones tectónicas normales a los estratos, mientras que el segundo es paralelo a este, indicando esfuerzos en la misma dirección que los estratos. Estas fracturas proporcionan información valiosa sobre el régimen de esfuerzos tectónicos y las condiciones geológicas que han afectado al Anticlinal Loma Larga.

3.7.3 Sistemas de Fracturamiento

Como se mencionó anteriormente se recopilaron datos estructurales del Anticlinal Loma Larga (ALL), de los cinco afloramientos principales que incluyen: Diana Cazadora (DC), Hyundai Penta (HP), Calle Parteaguas (CP), Excavación Cimientos (EC) y Torre Zafiro

(TZ). Se observó en la mayoría de los sitios que aflora la Formación San Felipe, excepto en TZ, donde aflora la Formación Agua Nueva.

Se proyectaron los datos estructurales en una falsilla de Wulff, también conocida como *equiangular*, utilizando el software Dips, y de acuerdo con la clasificación de Hancock, (1985), se definieron los principales tipos de fracturas según su orientación en un sistema de coordenadas tridimensional *a*, *b* y *c*, el cual no depende de una orientación absoluta. El eje *b* siempre es paralelo al plano axial del pliegue y paralelo, en la mayoría de los casos, al rumbo de la estratificación; el eje *a* es perpendicular al eje del pliegue y paralelo al buzamiento de la estratificación y el eje *c* es en todas partes perpendicular a la capa (Twiss & Moores, 1992). Según su posición en el sistema coordenado, los planos perpendiculares a un eje y que contienen a los otros dos se clasifican como: *ab*, *ac* y *bc*; mientras que los planos oblicuos a dos ejes, pero que contienen a uno, se clasifican como: *OkI*, *h0I* y *hk0*, refiriéndose *h*, *k* y *l* a los ejes que intercepta *a*, *b* y *c*, respectivamente y 0 indicando paralelismo a un eje dado (Hancock, 1985b). En la Figura 3.12. se muestra la clasificación de sistemas de fracturas:

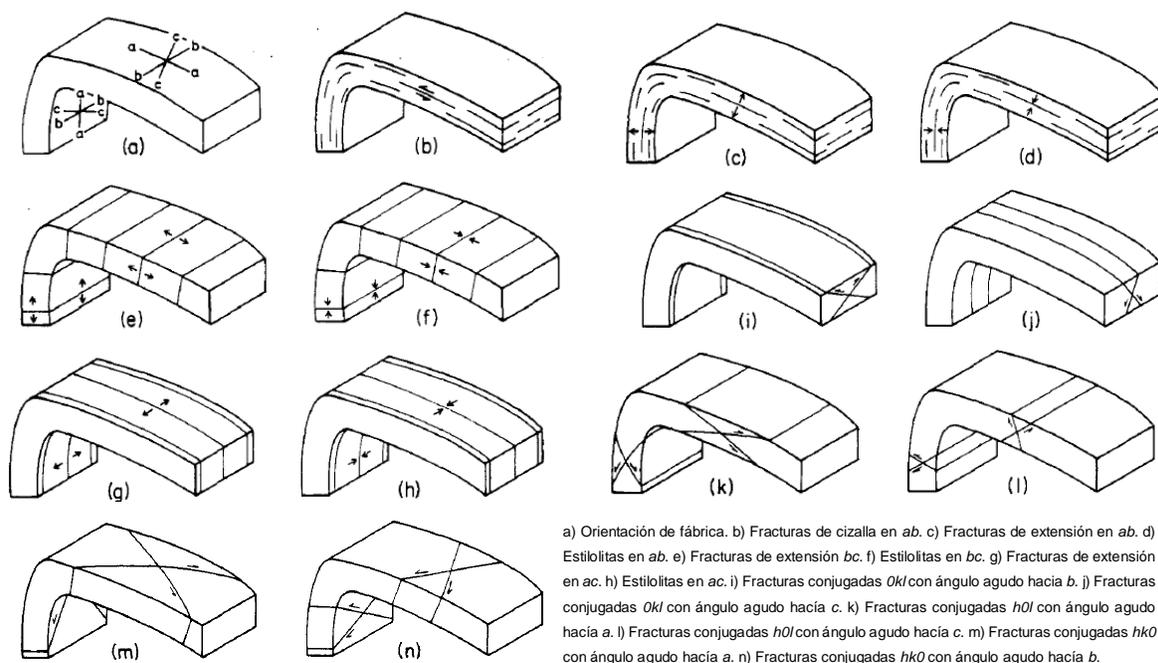


Figura 3.12. Diagramas de bloque ilustrando los sistemas de fracturamiento asociados a pliegues. Tomada de Hancock (1985).

3.7.4 Análisis estructural

3.7.4.1 Diana Cazadora

Con los datos estructurales se identificaron dos familias principales de diaclasas con una orientación preferencial de $J_1= 207/86$ y $J_2= 120/75$ (Figura 3.13.). La fractura J_1 se clasifica como *ac*, ya que es perpendicular al eje *b* y a la estratificación y tiene un buzamiento casi vertical. La otra fractura J_2 , se clasifica como *bc* porque es paralela a la estratificación y guarda una posición mayormente vertical.

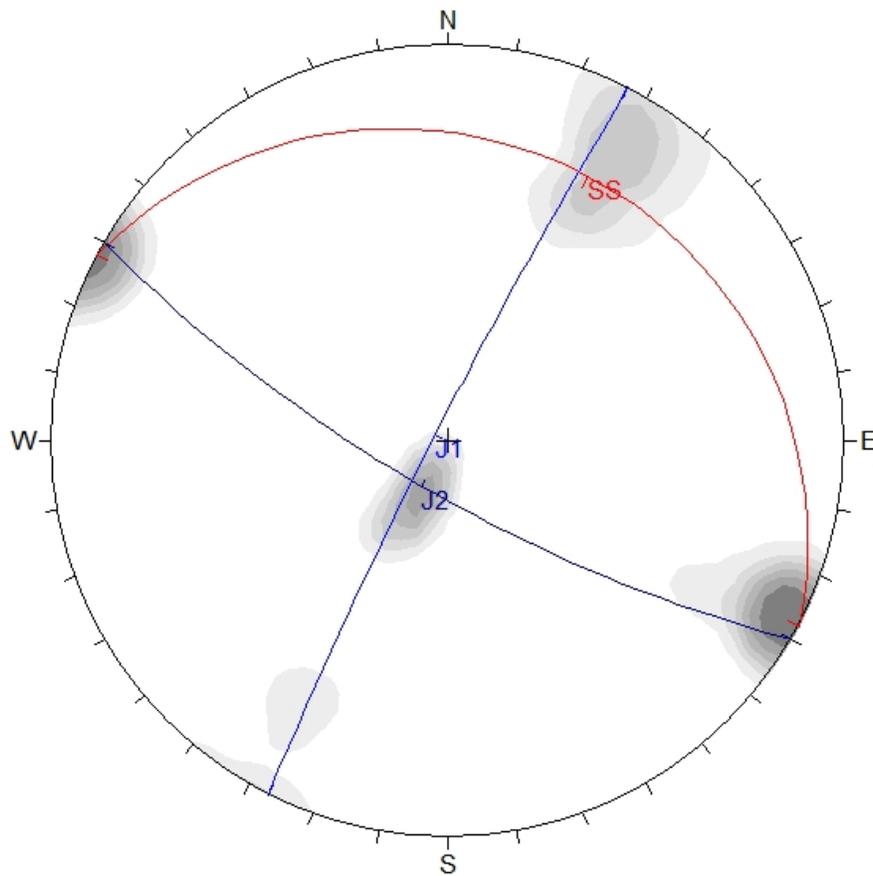


Figura 3.13. Proyección estereográfica del sitio DC. SS= 298/16. Formación San Felipe.

3.7.4.2 Hyundai Penta

En este punto se identificaron dos familias de fracturas con una orientación preferencial de $J_1= 027/86$ y $J_2= 127/76$ (Figura 3.14.). J_1 se clasificó como *ac*, ya que es paralelo al eje *a* y perpendicular a la estratificación, además el plano es prácticamente vertical. J_2 , se clasifica como *bc*, aunque atraviesa ligeramente el plano de estratificación, es casi paralelo al eje *b* y guarda una posición mayormente vertical.

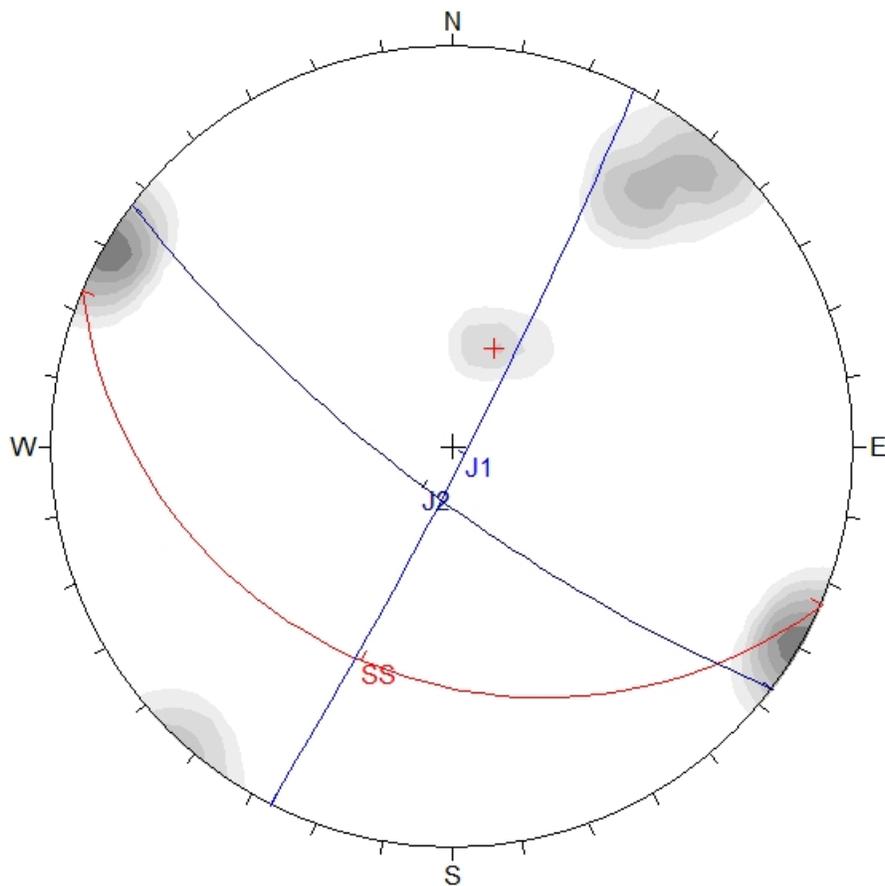


Figura 3.14. Proyección estereográfica del sitio HP. SS= 113/30. Formación San Felipe.

3.7.4.3 Calle Parteaguas

Al igual que en los sitios anteriores se identificaron dos familias de fracturas con una orientación preferencial de $J_1= 122/82$ y $J_2= 203/82$ (Figura 3.15.). J_1 se clasificó como bc y J_2 como ac ya que ambos planos poseen una inclinación vertical y son paralelos al eje b y al eje a , respectivamente.

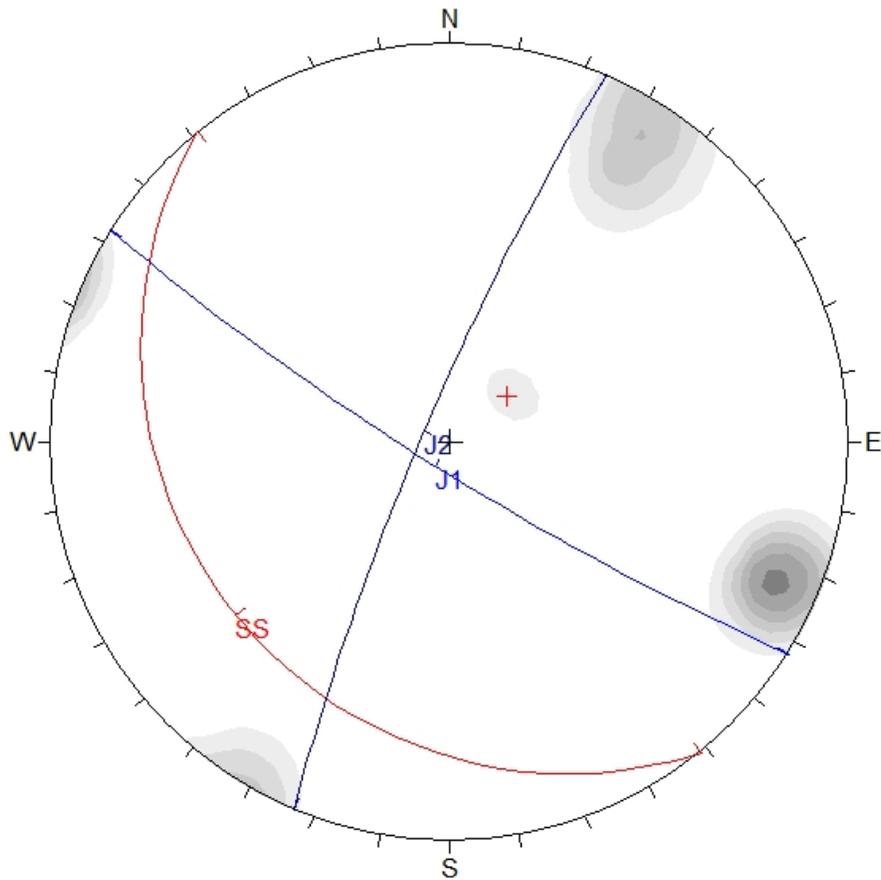


Figura 3.15. Proyección estereográfica del sitio CP. SS= 141/21. Formación San Felipe.

3.7.4.4 Excavación Cimientos

Con los datos estructurales de este sitio se identificaron dos familias de juntas con una orientación preferencial de $J_1= 126/85$ y $J_2= 024/85$ (Figura 3.16.). J_1 se clasificó como *bc* porque es paralela al rumbo de la estratificación y J_2 como *ac* ya que guarda una posición ortogonal con el plano de estratificación.

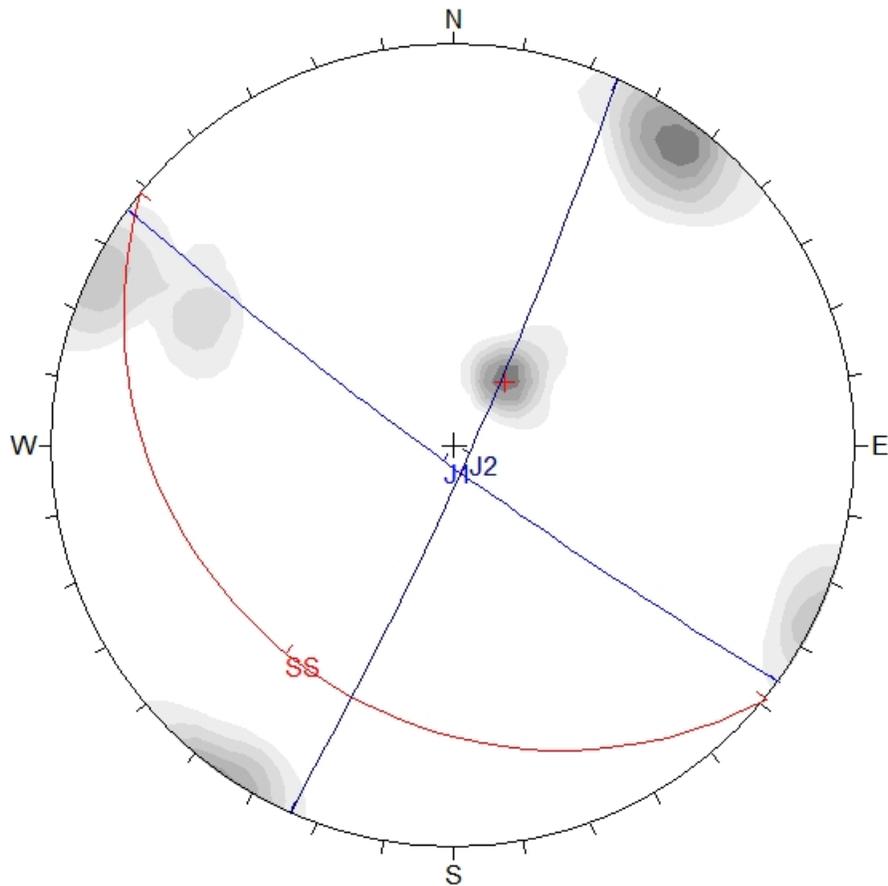


Figura 3.16. Proyección estereográfica del sitio EC. SS= 129/23. Formación San Felipe.

3.7.4.5 Torre Zafiro

Se identificaron dos familias de fracturas en este sitio con una orientación preferencial de $J_1 = 200/85$ y $J_2 = 296/80$ (Figura 3.17.). J_1 se trata de una fractura tipo *ac* por lo tanto va perpendicular al eje *b* y tiene un buzamiento casi vertical, mientras que J_2 es una fractura tipo *bc* que va paralela al rumbo de la estratificación y también es prácticamente vertical.

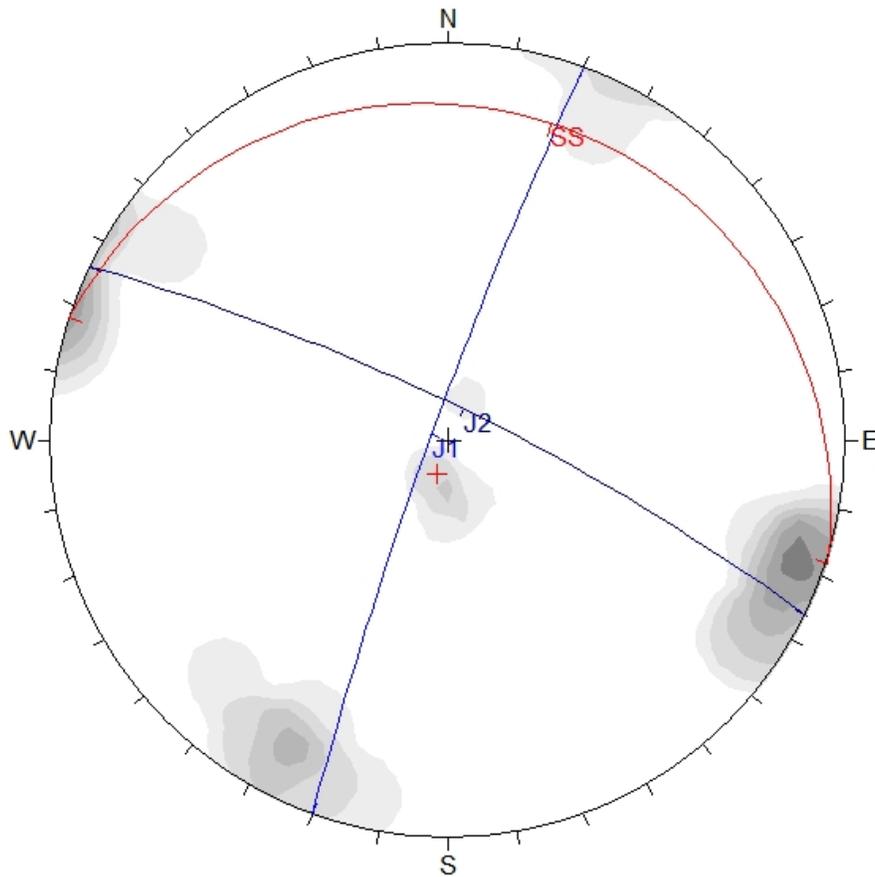


Figura 3.17. Proyección estereográfica del sitio TZ. SS= 288/10. Formación Agua Nueva.

CAPÍTULO 4 Caracterización Geomecánica

4.1 Descripción de macizos rocosos

4.1.1 Descripción de discontinuidades

La descripción de los afloramientos en campo es una herramienta muy útil a la hora de obtener información respecto a las características geológicas y estructurales ya que éstas condicionan el comportamiento de los macizos rocosos. Los componentes rocosos de una estructura geológica poseen un arreglo en el espacio-tiempo geológico y características específicas como orientación, forma, tamaño, color, edad, composición química, distribución geográfica, entre otros. Por otro lado, las discontinuidades estructurales como diaclasas, grietas, fisuras, fracturas y fallas influyen de manera importante en las propiedades mecánicas y de resistencia de las rocas. Las discontinuidades representan planos preferentes de debilidad y propician la alteración, meteorización y flujo de agua en el macizo rocoso lo que influye de manera negativa en su calidad. Para poder conocer el comportamiento mecánico e hidrogeológico de un sitio es importante detectar, describir y clasificar correctamente a los planos de discontinuidad presentes. Según (González de Vallejo et al., 2002), la resistencia al corte de las discontinuidades es el aspecto más importante en la determinación de la resistencia de los macizos rocosos fracturados y algunos de los parámetros más determinantes son la rugosidad, apertura y relleno.

A continuación, se describen los parámetros más importantes a la hora de describir discontinuidades en macizos rocosos fracturados:

1. Resistencia: este parámetro puede ser estimado *in situ* mediante ensayo de carga puntual (PLT), con el martillo de Schmidt o por medio de un ensayo de compresión uniaxial.
2. Orientación: de acuerdo con su rumbo y buzamiento las discontinuidades suelen mantener ciertas tendencias preferenciales lo que permite clasificarlas en familias.

La orientación con respecto a obras de ingeniería puede condicionar áreas de inestabilidad. Igualmente, la orientación y el espaciado suelen determinar la forma de los bloques rocosos.

3. Espaciado: la separación entre diaclasas determina el tamaño de bloque y esto tiene influencia directamente en el comportamiento mecánico. Según la definición de Vallejo (2002), se define como la distancia entre dos planos de discontinuidad de una misma familia, medida en la dirección perpendicular a dichos planos. Se calcula con la siguiente fórmula:

$$e = d \sin \alpha$$

d : distancia medida con la cinta

α : ángulo entre la línea de medición y la dirección de la familia

4. Continuidad: representa la extensión del plano en el espacio, también conocido como persistencia. Las familias con más continuidad definirán los principales planos de rotura. Las fallas son discontinuidades con continuidad a lo largo de muchos metros e incluso muchos kilómetros.
5. Rugosidad: se refiere a la ondulación de las superficies y a las irregularidades a pequeña escala, se utilizan perfiles tipo de (Barton, 1978) para compararlos visualmente con las discontinuidades. La rugosidad tiene influencia principalmente en la resistencia al corte de los planos de debilidad: entre más rugosidad más resistencia al corte.
6. Abertura: es la separación entre dos planos de discontinuidad cuando no hay relleno, tiene influencia en la resistencia al corte.

7. Relleno: el material que se encuentra entre las aberturas del macizo rocoso controla el comportamiento de las discontinuidades y también debe ser caracterizado.
8. Filtraciones: el agua puede fluir a través de los sistemas de fracturamiento de los macizos rocosos y otras veces a través de los poros de la matriz rocosa y está suele afectar la resistencia.

4.1.2 Parámetros del macizo rocoso

Para poder describir y clasificar correctamente a un afloramiento rocoso hay que considerar otros factores representativos además de la edad, la litología y las discontinuidades. Otros factores que influyen en el comportamiento de los macizos rocosos y que deben de evaluarse en campo y gabinete son:

1. Número y orientación de discontinuidades: tiene una influencia directa en el comportamiento mecánico y deformacional de un afloramiento rocoso, además de que determina el grado de fracturamiento y el tamaño de los bloques. En la zona de estudio persiste la presencia de tres familias principales ortogonales entre sí, siendo una de ellas la estratificación (González de Vallejo et al., 2002).
2. Tamaño de bloque: se puede describir de diferentes maneras:
 - Índice de tamaño de bloque (I_b): representa las dimensiones medias de los bloques tipo medidos en el afloramiento. Para la zona de estudio donde se identificaron tres familias, se calcula como:

$$I_b = \frac{(e_1 + e_2 + e_3)}{3}$$

$e_{1,2,3}$: valores medios del espaciamiento de las tres familias

- Parámetro J_v : representa el número de discontinuidades en una unidad de volumen (1m^3) de macizo rocoso. Se calcula contando las discontinuidades que interceptan una longitud determinada perpendicular a la dirección de las familias (González de Vallejo et al., 2002).

$$J_v = \sum_{i=1}^n \frac{1}{e_i}$$

J_v : índice de volumen de fractura

e_i : espaciamiento de la i -ésima familia de fracturas

n : número de familias de fracturas

El parámetro J_v se puede calcular de una forma más rápida pero menos exacta contando el número total de discontinuidades que interceptan una longitud (L) en cualquier dirección.

$$\lambda = \frac{\text{no. discontinuidades}}{L(m)}$$

$$\lambda = \frac{1}{e_m(m)}$$

e_m : espaciado medio entre discontinuidades

3. Grado de fracturamiento: es representado por el índice Rock Quality Designation (RQD) propuesto por (Deere, 1964) y también conocido como Índice de Calidad de Roca. Es un índice cuantitativo de la calidad de la roca basada en la recuperación de núcleos. Se puede calcular el RQD de la siguiente manera:

$$RQD = \frac{\sum \text{Testigos} > 10\text{cm}}{\text{Longitud total}} \times 100$$

Se puede relacionar el valor numérico RQD y la calidad de la roca:

ÍNDICE DE CALIDAD DE LA ROCA	
RQD	CALIDAD DE LA ROCA
< 25 %	Muy mala
25 - 50 %	Mala
50 - 75 %	Regular
75 - 90 %	Buena
90 - 100 %	Muy buena

Se puede estimar el RQD según la frecuencia (λ) de las discontinuidades:

$$RQD \approx 100 \exp^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1)$$

También puede estimarse en afloramientos a partir de correlaciones empíricas como la de Palmstrom (1975) :

$$RQD = 115 - 3.3J_v \text{ para } J_v > 4.5$$

$$RQD = 100 \text{ para } J_v \leq 4.5$$

4.1.3 Cálculo y análisis de Índice de Bloque (I_b) y de Volumen de Fractura (J_v) en el área de estudio

4.1.3.1 Índice de tamaño de Bloque

El Índice de tamaño de Bloque (I_b) es una medida utilizada en geología estructural y geotecnia para poder cuantificar el tamaño promedio de los bloques de una masa rocosa. Este índice se obtiene calculando el promedio del espaciamiento de las discontinuidades (fracturas, diaclasas y estratificación) que dividen la roca.

La fórmula para calcular I_b toma en cuenta a las tres familias principales de diaclasas y su espaciamiento promedio:

$$I_b = \frac{(e_1 + e_2 + e_3)}{3}$$

$e_{1,2,3}$: valores medios del espaciamiento de la estratificación y de las dos familias de diaclasas, respectivamente.

En el área de estudio se tomaron múltiples datos (ver Anexo 1) del espaciamiento de las dos familias principales de diaclasas y de la estratificación, siendo estos tres las discontinuidades que dividen al macizo rocoso en el Anticlinal Loma Larga.

Los valores promedios de espaciamiento de la estratificación $e_1 = 43 \text{ cm}$; primera familia de diaclasas, tipo *ac*, perpendicular al eje del anticlinal: $e_2 = 43.5 \text{ cm}$ y segunda familia de diaclasas, tipo *bc*, paralela al eje del anticlinal: $e_3 = 40.4 \text{ cm}$. Por lo tanto, sustituyendo los valores en la fórmula anterior:

$$I_b = \frac{(43 + 43.5 + 40.4)}{3}$$

$$I_b = 42.32 \text{ cm}$$

El I_b proporciona información clave sobre las propiedades mecánicas como la resistencia al corte y la compresibilidad, la permeabilidad y la estabilidad de una masa rocosa. Un I_b alto indica bloques más grandes, lo que generalmente contribuye a una mayor estabilidad en taludes y excavaciones. Los bloques más pequeños pueden ser más propensos a movimientos y desprendimientos. Conocer el tamaño de los bloques ayuda en el diseño de soportes adecuados, como anclajes y mallas, para prevenir caídas de rocas y garantizar la seguridad.

De acuerdo con el manual de la Sociedad internacional de Mecánica de Rocas (ISRM), se proporciona una tabla para la clasificación de macizos rocos según el tamaño y forma de los bloques. Basándonos en los resultados obtenidos del espaciamiento y del índice

de tamaño de bloque (I_b), podemos clasificar el macizo como clase II, tipo cúbico como se muestra en la Figura 4.1, con bloques equidimensionales de tamaño mediano y una masa rocosa moderadamente fracturada. Es importante aclarar que esta clasificación se basa en el promedio general de espaciamiento y no refleja la condición variable del macizo rocoso en cada sitio específico.

CLASIFICACIÓN DE MACIZOS ROCOSOS EN FUNCIÓN DEL TAMAÑO Y FORMA DE LOS BLOQUES		
Clase	Tipo	Descripción
I	Masivo	Pocas discontinuidades o con espaciado muy grande
II	Cúbico	Bloques aproximadamente equidimensionales
III	Tabular	Bloques con una dimensión considerablemente menor que las otras dos
IV	Columnar	Bloques con una dimensión considerablemente mayor que las otras dos
V	Irregular	Grandes variaciones en el tamaño y forma de los bloques
VI	Triturado	Macizo rocoso muy fracturado

(ISRM, 1981)



Figura 4.1. Bloques cúbicos con espaciamientos entre discontinuidades equidistantes.

En base a la tabla de volumen de fractura (J_v) de la ISRM (1981) se correlacionó una tabla propuesta para el índice de tamaño de bloque (I_b). Esta correlación permite clasificar los macizos rocosos según el tamaño y forma de los bloques, facilitando la evaluación de su estabilidad y propiedades mecánicas.

INTERPRETACIÓN GENERAL DEL ÍNDICE DE TAMAÑO DE BLOQUE (I_b)	
I_b cm	Descripción
$I_b \leq 10$	Masa rocosa muy fracturada, bloques muy pequeños
$10 < I_b \leq 30$	Masa rocosa fracturada, bloques pequeños
$30 < I_b \leq 100$	Masa rocosa moderadamente fracturada, bloques medianos
$100 < I_b \leq 300$	Masa rocosa poco fracturada, bloques grandes
$I_b > 300$	Masa rocosa masiva o muy poco fracturada, bloques muy grandes

*Propuesta de rangos de I_b de acuerdo a literatura y otras tablas de clasificaciones de tamaño de bloque como el parámetro J_v .

4.1.3.2 Volumen de Fractura (J_v)

El valor de J_v proporciona una indicación del grado de fracturamiento de la masa rocosa por unidad de volumen (m^3), valores bajos indican una masa rocosa menos fracturada, sugiriendo mayor estabilidad y menor permeabilidad, mientras que valores altos indican una masa rocosa más fracturada, sugiriendo menor estabilidad y mayor permeabilidad.

El volumen de fracturas (J_v) se puede calcular como se muestra a continuación:

$$J_v = \sum_{i=1}^n \frac{1}{e_i}$$

Se recabaron datos en campo del espaciamiento de las discontinuidades presentes en el Anticlinal Loma Larga (ver Anexo 1), y con ellos se realizó el cálculo del volumen de fracturamiento de la siguiente manera:

$$J_v = \frac{1}{e_1} + \frac{1}{e_2} + \frac{1}{e_3}$$

Los valores promedios de espaciamiento de la estratificación $e_1 = 0.43 \text{ m}$; primera familia de diaclasas, tipo *ac*, perpendicular al eje del anticlinal: $e_2 = 0.435 \text{ m}$ y segunda familia de diaclasas, tipo *bc*, paralela al eje del anticlinal: $e_3 = 0.404 \text{ m}$. Por lo tanto, sustituyendo los valores en la fórmula anterior:

$$J_v = \frac{1}{0.43} + \frac{1}{0.435} + \frac{1}{0.404}$$

$$J_v = 7.08 \frac{\text{fracturas}}{\text{m}^3}$$

Un J_v alto puede indicar mayor riesgo de deslizamiento o caídas de rocas en taludes y excavaciones. La cuantificación del fracturamiento ayuda a planificar soportes adecuados para túneles o excavaciones. En hidrogeología, un J_v alto puede indicar mayor capacidad de flujo de agua a través de la masa rocosa. La relación entre J_v y la permeabilidad se basa en que un mayor número de fracturas (J_v alto) proporciona más caminos para el movimiento de fluidos, aumentando así la permeabilidad.

El valor obtenido de J_v , según el ISRM (1981), nos indica que el tamaño de bloque promedio en el área de estudio es de tamaño mediano como podemos observar a continuación en la tabla.

TAMAÑO DE BLOQUE EN FUNCIÓN DE J_v	
Descripción	J_v (discontinuidades/ m^3)
Bloques muy grandes	< 1
Bloques grandes	1 - 3
Bloques medianos	3 - 10
Bloques pequeños	10 - 30
Bloques muy pequeños	> 30

(ISRM, 1981)

Es fundamental destacar que el resultado del cálculo del índice de volumen de fractura (J_v) es un promedio de todas las mediciones de espaciamiento a lo largo Anticlinal Loma

Larga. Este promedio representa el valor medio del tamaño de bloque predominante en el sitio, aunque no es el único valor presente. Como se ha observado en la descripción litológica de los sitios levantados hay zonas con mayor fracturamiento que otras. Por ejemplo, en las zonas de falla, es visible que la roca está intensamente fracturada e incluso triturada, asemejándose más a un suelo granular que a una roca sólida.

El cálculo del volumen de fracturas (J_v) y de otros parámetros referentes al fracturamiento no pueden ser los únicos métodos de evaluación de un afloramiento. Para obtener valores verdaderamente representativos, sería necesario zonificar y medir el macizo rocoso, lo cual podría resultar tedioso y complicado en áreas con mucho fracturamiento. Sin embargo, el valor promedio de J_v coincide con un bloque de tamaño mediano, similar a lo indicado por el índice de tamaño de bloque (I_b).

Estos parámetros nos proporcionan una idea general del estado de la zona de estudio y son útiles para complementar las clasificaciones geomecánicas. Estas clasificaciones caracterizan de manera más holística al macizo rocoso de los diferentes sitios de estudio que comprenden el Anticlinal Loma Larga, proporcionando valiosa información sobre el estado actual de los túneles.

Debido al fracturamiento moderado, podemos inferir que, al menos, la permeabilidad en la zona de estudio es moderada, como se refleja en el valor promedio de J_v . En otras zonas, como en las áreas de falla, la permeabilidad será esperadamente mayor debido al mayor fracturamiento. Además, las filtraciones observadas dentro de los túneles indican que el fracturamiento está suficientemente interconectado para permitir la infiltración de agua y su subsecuente filtración hacia los túneles de Loma Larga.

La integración de J_v y I_b con otros datos geomecánicos como la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad, permitirá una caracterización más completa del macizo rocoso.

4.2 Clasificaciones geomecánicas

4.2.1 Sistema Rock Mass Rating

La clasificación geomecánica de Bieniawski (1989) asigna una calidad al macizo rocoso basada en la valoración de los parámetros con mayor influencia en su comportamiento mecánico de acuerdo con las observaciones y mediciones realizadas en campo y laboratorio. Para aplicar el Rock Mass Rating (RMR) es necesario zonificar a un afloramiento dado de acuerdo con sus características geológicas-estructurales, procurando que conserven cierta homogeneidad de manera que cada unidad tipo se describa y se le asigne un índice RMR por separado. Los parámetros que se describen en el RMR son los siguientes:

- Resistencia a la compresión uniaxial de la matriz rocosa
- Rock Quality Designation o Índice de Calidad de la Roca (RQD)
- Separación entre diaclasas
- Estado de las discontinuidades
- Agua subterránea

Cada parámetro está dividido en cinco rangos de valores con una puntuación cada uno, donde el más alto indica mejores condiciones en el macizo rocoso. La Tabla 4.1. se muestran dichos parámetros y sus rangos de valores, por lo que en campo debe de recabarse esa información para luego asignarle la puntuación correspondiente de acuerdo con sus características. El parámetro de *estado de las discontinuidades* requiere de una observación y descripción más detallada de las diaclasas: su continuidad, espaciamiento, abertura, rugosidad, relleno y presencia de alteraciones.

Posterior a evaluar los cinco parámetros principales se hace una corrección de la puntuación de acuerdo con el tipo de obra civil que se está evaluando: talud, túnel o cimentación y su relación con respecto a la orientación de las discontinuidades (rumbo y buzamiento) De acuerdo con la Tabla 4.2. se restan los puntos correspondientes y con este se obtiene el índice RMR con el cual se puede clasificar la roca en 5 distintas clases

como se muestra en la Tabla 4.3 y obtener valores tipo de sus características geotécnicas.

CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA RMR (Bieniawski, 1989)								
Parámetros de clasificación								
1	Resistencia de la matriz rocosa (Mpa)	Ensayo de carga puntual	>10	10-4	4-2	2-1	Compresión simple (Mpa)	
		Compresión simple (Uniaxial)	>250	250-100	100-50	50-25	25-5	5-1
	Puntuación		15	12	7	4	2	1
2	RQD		90%-100%	75%-90%	50%-75%	25%-50%	<25%	
	Puntuación		20	17	13	6	3	
3	Separación entre diaclasas		>2 m	0.6 - 2 m	0.2 - 0.6 m	0.06 - 0.2 m	<0.06 m	
	Puntuación		20	15	10	8	5	
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	<1 m	1 -3 m	3 - 10 m	10 -20 m	> 20 m	
		Puntuación	6	4	2	1	0	
		Abertura	Nada	<0.1 mm	0.1-1.0 mm	1-5 mm	>5 mm	
		Puntuación	6	5	3	1	0	
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave	
		Puntuación	6	4	2	2	0	
		Relleno	Ninguno	Relleno duro <5 mm	Relleno duro >5 mm	Relleno blando < 5 mm	Relleno blando >5 mm	
		Puntuación	6	4	2	2	0	
		Alteración	inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta	
		Puntuación	6	5	3	1	0	
5	Agua subterránea	Caudal por 10m de túnel	Nulo	< 10 L/min	10-25 L/min	25-125 L/min	> 125 L/min	
		Relación: Presión de agua/Tensión principal mayor	0	0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	> 0.5	
		Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo	
	Puntuación		15	10	7	4	0	

Tabla 4.1. Clasificación geomecánica Rock Mass Rating de Bieniawski (1989).

Orientación de las discontinuidades en el túnel						
Dirección perpendicular al eje del túnel				Dirección paralela al eje del túnel		Buz. 0-20 cualquier dirección
Excavación con buzamiento		Excavación contra buzamiento		Buz. 45-90	Buz. 20-45	
Buz. 45-90	Buz. 20-45	Buz. 45-90	Buz. 20-45	Buz. 45-90	Buz. 20-45	
Muy Favorable	Favorable	Media	Desfavorable	Muy desfavorable	Media	Desfavorable
Corrección por la orientación de las discontinuidades						
Dirección y buzamiento		Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables
Puntuación	Túneles	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Tabla 4.2. Corrección del RMR según la orientación de las discontinuidades con respecto a obras de ingeniería civil. Bieniawski (1989).

Clasificación geomecánica					
Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy mala
Puntuación	100-81	80-61	60-41	40-21	< 20
Características geotécnicas					
Clase	I	II	III	IV	V
Tiempo de mantenimiento y longitud	10 años con 15 m de vano	6 meses con 8 m de vano	1 semana con 5 m de vano	10 horas con 2.5 m de vano	30 min con 1 m de vano
Cohesión	> 4 Kp/cm ²	3-4 Kp/cm ²	2-3 Kp/cm ²	1-2 Kp/cm ²	< 1 Kp/cm ²
Ángulo de rozamiento	> 45°	35°-45°	25°-35°	15°-25°	< 15°

Tabla 4.3. Clasificación del macizo rocoso en clases de acuerdo con el índice RMR y características geotécnicas de cada clase. Bieniawski (1989).

La clasificación RMR proporciona una manera simple de evaluar las condiciones mecánicas del macizo rocoso, sin embargo, hay que ser consciente de sus limitantes y tener criterio a la hora de utilizarla. Cuando se encuentran diferentes calidades de roca mezcladas en un mismo sitio y se obtienen diferentes valores de RMR para cada uno, para fines de diseño debe de tomarse en cuenta el valor más crítico (Bieniawski, 1989).

4.2.2 Sistema Geological Strength Index

El Geological Strength Index (GSI) es un sistema de clasificación geomecánica desarrollado por Ever Hoek en 1994. Su propósito es estimar las propiedades de resistencia y deformabilidad de los macizos rocosos, especialmente en aquellos que son demasiado heterogéneos para ser clasificados eficazmente mediante métodos más tradicionales como el Rock Mass Rating (RMR) y el Q-System. El GSI se basa en observaciones visuales y evaluaciones cualitativas de las estructuras del macizo rocoso y la calidad de las superficies de las discontinuidades (Hoek & Brown, 1997).

La función principal del GSI es proporcionar una evaluación rápida y sencilla de la calidad del macizo rocoso, lo cual es esencial para el diseño de soportes y la planificación de excavaciones en proyectos de ingeniería. Este sistema se utiliza comúnmente en combinación con el criterio de falla de Hoek-Brown para calcular las propiedades de resistencia y deformación de la roca, permitiendo así el diseño seguro y eficiente de túneles, taludes y otras estructuras (Hoek et al., 1998).

El GSI considera dos parámetros principales: la estructura del macizo rocoso y la condición de las superficies de las discontinuidades. La estructura del macizo rocoso evalúa la disposición y el grado de fracturamiento de la roca, clasificándola en categorías como maciza, bloques grandes, bloques pequeños y desorganizada. La condición de las superficies de las discontinuidades evalúa aspectos como la rugosidad, la apertura, el relleno y la alteración de las fracturas (Hoek, 1994).

El cálculo del GSI se realiza mediante una tabla o gráfico que combina estas características. Sus valores varían de 0 a 100, donde un valor más alto indica una mejor calidad del macizo rocoso. El proceso de cálculo implica una observación visual del afloramiento para identificar la estructura y la condición de las discontinuidades, la asignación de categorías a estas características y el uso de la tabla de GSI para encontrar el valor correspondiente (Hoek et al., 1998).

ÍNDICE GEOLÓGICO DE RESISTENCIA GSI (<i>geological strength index</i>) A partir de la clasificación obtenida en la Figura 3.94 seleccionar el cuadro correspondiente en este ábaco y obtener el valor medio del Índice GSI.		CONDICIÓN DEL FRENTE				
ESTRUCTURA		MUY BUENA (MB) Superficies muy rugosas sin alterar	BUENA (B) Superficies rugosas ligeramente alteradas, con patinas de oxidación	MEDIA (M) Superficies suaves moderadamente alteradas	POBRE (P) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos compactos conteniendo fragmentos rocosos	MUY POBRE (MP) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos arcillosos
	BLOQUES REGULARES (BR) Macizo rocoso sin alterar. Bloques en contacto de forma cúbica formados por tres familias de discontinuidades ortogonales, sin relleno.	80 70				
	BLOQUES IRREGULARES (BI) Macizo rocoso parcialmente alterado. Bloques en contacto de forma angular formados por cuatro o más familias de discontinuidades con rellenos con baja proporción de finos.		60 50			
	BLOQUES Y CAPAS (BC) Macizo alterado, plegado y fracturado con múltiples discontinuidades que forman bloques angulosos y con baja proporción de finos.			40	30	
	FRACTURACIÓN INTENSA (FI) Macizo rocoso muy fracturado formado por bloques angulosos y redondeados, con alto contenido de finos.				20	10

Figura 4.2. Tabla para la estimación del GSI. Tomada de González de Vallejo et al. (2002).

4.3 Caracterización geomecánica del anticlinal Loma Larga

Se realizó la evaluación de los parámetros geomecánicos de los mismos cinco sitios de los que se tomaron datos estructurales: Diana Cazadora (DC), Hyundai Penta (HP), Calle Parteaguas (CP), Excavación Cimientos (EC) y Torre Zafiro (TZ).

4.3.1 Diana Cazadora

El afloramiento de la Diana Cazadora presenta características geológicas y estructurales variadas y muy heterogéneas debido a que se trata de una zona de plegamiento y con presencia de fallas inversas. De acuerdo con esto, se dividió en tres unidades con características geológico - estructurales similares para clasificarlas según sus parámetros geomecánicos. El contraste entre las tres zonas es notable, la primera zona: los flancos norte y sur, están conformados por estratos gruesos de calizas margosas con intercalaciones de estratos delgados de lutitas y moderadamente fracturados; la segunda zona geomecánica: las dos zonas de fallas inversas, intensamente fracturadas; y tercera zona geomecánica: pliegue central del anticlinal con fracturamiento moderado a alto y presencia de huecos.

Flanco norte y sur					
Clasificación RMR Diana Cazadora					
	Parámetro	Valor	Puntaje	Comentarios	
1	Resistencia de la matriz rocosa Compresión Simple (Mpa)	50 -100 Mpa	7	Roca dura (R4) sin embargo se encuentra muy fracturada lo que disminuye su resistencia	
2	RQD (Rock Quality Designation)	75%	12	El fracturamiento en el esta área es relativamente menor que en otras zonas del mismo afloramiento, los estratos son más masivos	
3	Separación entre diaclasas	0.6 - 2 m	15	Existe una variación entre la distancia entre familias de diaclasas, pero se observan bloques de mayor tamaño con respecto a otras zonas del afloramiento	
4	Persistencia o longitud de las discontinuidades	3-10m	2	Se consideran los planos de estratificación como los más persistentes. Sin embargo, las familias de diaclasas se extienden a lo alto de todo el afloramiento.	
	Abertura de las discontinuidades	1 mm	3	Promedio a lo largo del flanco norte del afloramiento	
	Rugosidad de las discontinuidades	Ligeramente rugosa	2	Los planos de fracturamiento y los bordes tienen poco rugosidad y ondulación	
	Relleno de las discontinuidades	Relleno blando	2	Posee material blando entre las fracturas	
	Alteración de las discontinuidades	Ligeramente alterada	5	Se observa oxidación y pátinas de carbonatos en algunos planos de fracturamiento,	
5	Presencia de agua	Ligeramente húmedo	7	Durante la época seca se mantiene la humedad debido a la vegetación y entre los entratos de lutita que están muy alterados	
Corrección según orientación de las discontinuidades					
6	Buzamiento : 21°	Desfavorable	-10	El buzamiento de las discontinuidades no es favorable con respecto al túnel	
Clasificación del macizo rocoso según el RMR					
RMR	45	Clase	III	Calidad	Media o regular
Características geotécnicas					
	Ángulo de rozamiento	27		Cohesión	2-3 Kp/cm ²

Tabla 4.4. Primera zona geomecánica: flancos del anticlinal.

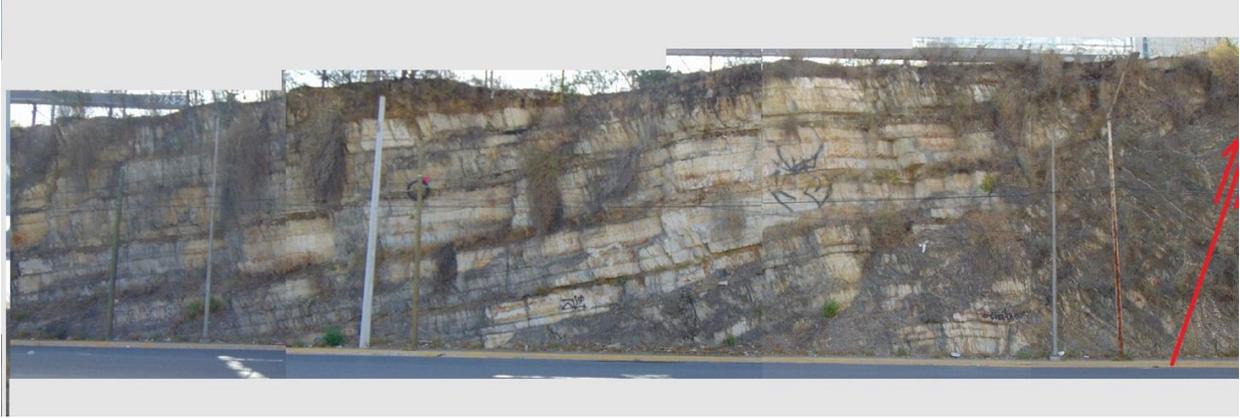


Figura 4.3. Primera zona geomecánica. Flanco norte del corte de la Diana Cazadora.



Figura 4.4. Primera zona geomecánica. Flanco sur del corte de la Diana Cazadora.

Zonas de falla					
Clasificación RMR Diana Cazadora					
	Parámetro	Valor	Puntaje	Comentarios	
1	Resistencia de la matriz rocosa Compresión Simple (Mpa)	50 -25 Mpa	2	Roca dura sin embargo se encuentra muy fracturada lo que disminuye su resistencia	
2	RQD (Rock Quality Designation)	< 25%	3	Esta zona se encuentra intensamente fracturada y no es posible recuperar casi nada de fragmentos mayores a 10cm	
3	Separación entre diaclasas	Zona de falla	5	Área intensamente fracturada	
4	Persistencia o longitud de las discontinuidades	> 20 m	0	Las discontinuidades singulares como las fallas pueden extenderse a lo largo de muchos metros. En esta zona se ha comprobado que existen al	
	Abertura de las discontinuidades	< 1mm	5	Es difícil diferencial entre bloques en esta zona ya que algunos se han convertido en fragmentos muy pequeños	
	Rugosidad de las discontinuidades	Rugosa	4	Superficies rugosas	
	Relleno de las discontinuidades	Relleno blando	2	Fracturas más antiguas están rellenas de calcita y más recientes poseen relleno blando a causa del intenso fracturamiento y meteorización de está	
	Alteración de las discontinuidades	Muy alterado	1	A causa del intenso fracturamiento la zona es más sensible al intemperismo y se encuentra más alterada que otras áreas del afloramiento	
5	Presencia de agua	Húmedo	7	Debido a los detritos de lutita y material blando se acumula la humedad	
Corrección según orientación de las discontinuidades					
6	Buzamiento :	Muy desfavorable	-12	La posición de los bloques es muy desfavorable con respecto al túnel	
Clasificación del macizo rocoso según el RMR					
RMR	17	Clase	V	Calidad	Muy mala
Características geotécnicas					
Ángulo de rozamiento		14	Cohesión		< 1 Kp/cm ²

Tabla 4.5. Segunda zona geomecánica: fallas inversas.

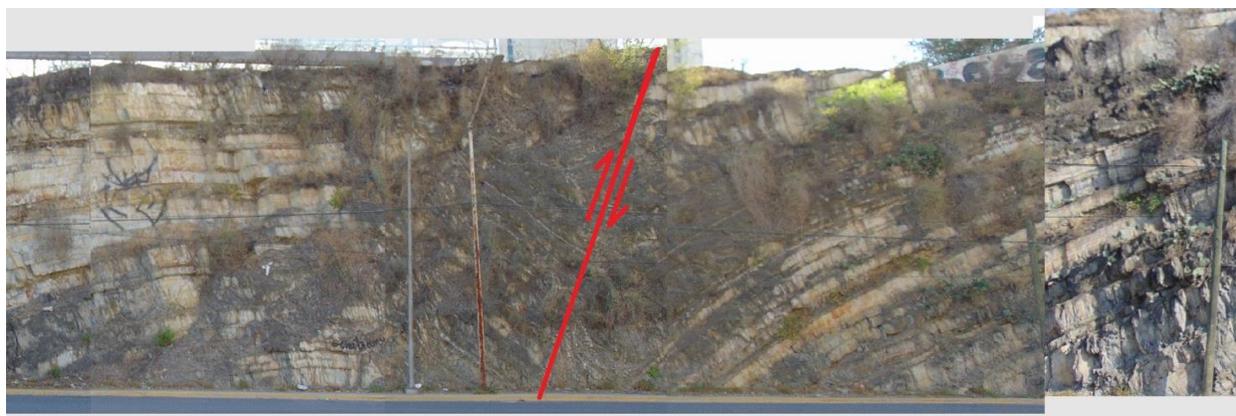


Figura 4.5. Segunda zona geomecánica. Falla inversa flanco norte de la Diana Cazadora.



Figura 4.6. Segunda zona geomecánica. Falla inversa flanco sur de la Diana Cazadora.

Zona central del pliegue					
Clasificación RMR Diana Cazadora					
	Parámetro	Valor	Puntaje	Comentarios	
1	Resistencia de la matriz rocosa Compresión Simple (Mpa)	50 -100 Mpa	4	Roca dura pero muy fracturada y lo que disminuye su resistencia	
2	RQD (Rock Quality Designation)	65%	10	Los estratos de lutita estan muy fracturados además de la presencia de oquedades donde hay muchos espacios vacios y material muy fracturado	
3	Separación entre diaclasas	0.2 - 0.6 m	7	Las diaclasas tienen pocos cm de separación a máx 50 cm de separación	
4	Persistencia o longitud de las discontinuidades	3 - 10 m	2	Las discontinuidades parecen extenderse a lo largo de todo el talud y probablemente hacia dentro del macizo rocoso	
	Abertura de las discontinuidades	± 0.60 m	0	La abertura entre bloques en el área central del pliegue es muy grande, hay un hueco de al menos 60 cm	
	Rugosidad de las discontinuidades	Ligeramente rugosa	2	Las orillas de los bloques y los planos están ligeramente rugosos, algunos terminan en orillas lisas y filosas	
	Relleno de las discontinuidades	Relleno duro	4	Se observa relleno duro entre algunas discontinuidades: carbonatos de calcio con grosores menores a 5mm	
	Alteración de las discontinuidades	Moderadamente alterada	3	Hay oxidación visible en todo el afloramiento además de carbonatos de calcio relleno de grietas	
5	Presencia de agua	Ligeramente húmedo	10	En época de sequía no se observa humedad, sin embargo durante las presipitaciones se acumula la humedad en los estratos de lutita los cuales están mucho más alterados	
Corrección según orientación de las discontinuidades					
6	Buzamiento :	Desfavorable	-10	La posición de los bloques con respecto al túnel es desfavorable	
Clasificación del macizo rocoso según el RMR					
RMR	32	Clase	IV	Calidad	Mala
Características geotécnicas					
Ángulo de rozamiento		22	Cohesión		1-2 Kp/cm ²

Tabla 4.6. Tercera zona geomecánica: pliegue central del anticlinal.



Figura 4.7. Tercera zona geomecánica: pliegue central del anticlinal.



Figura 4.8. Afloramiento completo de la Diana Cazadora (DC)

4.3.2 Hyundai Penta

Clasificación RMR Hyundai Penta				
	Parámetro	Valor	Puntaje	Comentarios
1	Resistencia de la matriz rocosa Compresión Simple (Mpa)	100 -50 Mpa (calizas)/ 5-25 Mpa (lutitas)	5	Calizas: roca dura tipo R4/ Lutitas: roca blanda tipo R2
2	RQD (Rock Quality Designation)	67.60%	7	Los estratos de lutita están fracturados e intemperizados por lo que no es posible recuperar fragmentos mayores a 10 cm
3	Separación entre diaclasas	60.02 cm	10	Promedio de separación a lo largo de 7 m de afloramiento
4	Persistencia o longitud de las discontinuidades	1.47 m	4	Persistencia promedio de discontinuidades visibles en el afloramiento
	Abertura de las discontinuidades	0.1 -1.0 mm	3	1mm de abertura en promedio a lo largo del afloramiento
	Rugosidad de las discontinuidades	Ligermente rugosa	2	Ligeramente rugosas y afiladas
	Relleno de las discontinuidades	Ninguno	6	Sin relleno entre las discontinuidades
	Alteración de las discontinuidades	Moderadamente alterada	3	Pátinas de carbonatos de calcio y oxidación en los planos de fractura
5	Presencia de agua	Seco	15	En la época del año en la que se hizo la clasificación no hay presencia de agua y tampoco se han visto filtraciones en esta zona durante las épocas de lluvia
Corrección según orientación de las discontinuidades				
6	Buzamiento: 30°	Desfavorable	-10	La orientación de los estratos con respecto al túnel son desfavorables
Clasificación del macizo rocoso según el RMR				
RMR	45	Clase	III	Calidad
				Media
Características geotécnicas				
	Ángulo de rozamiento	27		Cohesión
				2-3 Kp/cm ²

Tabla 4.7. Clasificación RMR de sitio HP.



Figura 4.4. Afloramiento Hyundai Penta (HP).

4.3.3 Calle Parteaguas

Clasificación RMR Calle Parteaguas					
	Parámetro	Valor	Puntaje	Comentarios	
1	Resistencia de la matriz rocosa Compresión Simple (Mpa)	5-25 Mpa	4	Roca blanda (R2) alterada e intemperizada, húmeda.	
2	RQD (Rock Quality Designation)	75%	7	Recuperación de material mayor a 10 cm de largo	
3	Separación entre diaclasas	30.5 cm	9	Separación promedio de discontinuidades a lo largo de 3.8 m de afloramiento	
4	Persistencia o longitud de las discontinuidades	75 cm	6	Persistencia promedio de las discontinuidades visibles en el afloramiento.	
	Abertura de las discontinuidades	1-5mm	1	Abertura de 5mm en promedio	
	Rugosidad de las discontinuidades	Ondulada	2	Terminaciones onduladas y ligeramente rugosas	
	Relleno de las discontinuidades	Relleno blando	2	Relleno arcilloso	
	Alteración de las discontinuidades	Moderadamente alterada	3	Pátinas de carbonato de calcio y oxidación en los planos de fracturamiento	
5	Presencia de agua	Húmedo	7	Durante la época seca se guarda la humedad en los estratos de lutita y en temporada de lluvias se observan goteos constantes	
Corrección según orientación de las discontinuidades					
6	Buzamiento : 21°	Desfavorable	-10	La orientación del buzamiento promedio es desfavorable con respecto al túnel	
Clasificación del macizo rocoso según el RMR					
RMR	31	Clase	IV	Calidad	Mala
Características geotécnicas					
	Ángulo de rozamiento	20		Cohesión	1-2 Kp/cm ²

Tabla 4.8. Clasificación RMR de sitio CP.



Figura 4.5. Afloramiento Calle Parteaguas (CP).

4.3.4 Excavación Cimientos

Clasificación RMR Excavación Cimentación				
	Parámetro	Valor	Puntaje	Comentarios
1	Resistencia de la matriz rocosa Compresión Simple (Mpa)	25 - 50 Mpa (calizas)/ 5-25 Mpa (lutitas)	3	Calizas: roca moderadamente dura (R3) Lutitas: roca blanda (R2)
2	RQD (Rock Quality Designation)	55.61%	13	Los estratos de lutita están muy fracturados e intemperizados, por lo cual no es posible recuperar material de estas zonas
3	Separación entre diaclasas	37.83 cm	9	Promedio de separación entre diaclasas a lo largo de 8.5 m de afloramiento
4	Persistencia o longitud de las discontinuidades	1.0 m	6	Persistencia promedio en el afloramiento
	Abertura de las discontinuidades	1 - 5 mm	1	Variación de 1 mm y 1 cm, promedio de entre 1 a 5 mm
	Rugosidad de las discontinuidades	Ondulada IV	2	Ondulada y ligeramente rugosa
	Relleno de las discontinuidades	Ninguno	6	La mayoría de las discontinuidades que se observan no tienen relleno
	Alteración de las discontinuidades	Oxidación	3	Se observa una alteración moderada además de que la roca está intemperizada
5	Presencia de agua	Ligeramente húmedo	10	Humedad pero no se observa flujo de agua (Clase IV)
Corrección según orientación de las discontinuidades				
6	Buzamiento : 23°	Desfavorable	-10	La orientación del buzamiento con respecto al túnel es desfavorable
Clasificación del macizo rocoso según el RMR				
RMR	43	Clase	III	Calidad Media
Características geotécnicas				
Ángulo de rozamiento		26	Cohesión	
			2-3 Kp/cm ²	

Tabla 4.9. Clasificación RMR sitio EC.



Figura 4.6. Afloramiento Excavación Cimientos (EC).

4.3.5 Torre Zafiro

Clasificación RMR Torre Zafiro				
	Parámetro	Valor	Puntaje	Comentarios
1	Resistencia de la matriz rocosa Compresión Simple (Mpa)	50-100 Mpa	7	Se utilizó como referencia los valores alternativos de: Ensayos de índice manual de resistencia de roca en campo (ISRM, 1981) el cual clasifica a la roca del punto como R4 -roca dura - más de un golpe con la pica para romper la muestra
2	RQD (Rock Quality Designation)	80%	17	Ya que no se cuenta con núcleos del área se hizo un cálculo aproximado tomando en cuenta la altura total de la pared (5.21 m) y los tramos que debido a su fracturamiento o al espesor de los estratos tenía una longitud menor a 10 cm (1.10 m aprox.)
3	Separación entre diaclasas	0.36 m	10	La separación entre diaclasas de 0.54 m a 0.18 m, se obtuvo un promedio para la clasificación
4	Persistencia o longitud de las discontinuidades	3 - 10 m	2	Aunque es difícil saber hasta donde se extienden las diaclasas se puede ver que continúan hacia el interior del macizo rocoso
	Abertura de las discontinuidades	1 mm	3	Abertura de aproximadamente 1 mm en promedio
	Rugosidad de las discontinuidades	Rugosa	5	Las discontinuidades tienen bordes rugosos y afilados
	Relleno de las discontinuidades	Relleno suave	2	Las fracturas están rellenas de material fino suave, salvo algunas fracturas rellenas de calcita
	Alteración de las discontinuidades	Ligeramente alterada	5	Se observa oxidación ligera en los planos de fracturamiento
5	Presencia de agua	Seco	15	Se observa poca humedad en el afloramiento, principalmente por la
Corrección según orientación de las discontinuidades				
6	Buzamiento : 14° - 21°	Desfavorable	-12	Dirección del buzamiento con respecto al túnel muy desfavorable
Clasificación del macizo rocoso según el RMR				
RMR	54	Clase	III	Calidad Media o regular
Características geotécnicas				
	Ángulo de rozamiento	32	Cohesión	2-3 Kp/cm ²

Tabla 4.10. Clasificación RMR sitio TZ.



Figura 4.7. Afloramiento de la Torre Zafiro (TZ).

4.4 Ensayos de compresión uniaxial

El ensayo de compresión uniaxial es comúnmente utilizado en la mecánica de rocas para evaluar la resistencia y deformación de una muestra de roca bajo la aplicación de una carga axial (Hoek, 1994). Durante el ensayo, se registra la carga aplicada y la deformación resultante en la muestra. La carga se aplica de manera controlada y continúa hasta que la muestra falla, momento en el cual se registra la carga máxima. Estos datos se utilizan para generar una curva de esfuerzo (σ) – deformación (ε), que proporciona información detallada sobre el comportamiento mecánico de la roca (Goodman, 1989).

Se obtuvieron diez núcleos de roca del área de estudio, eligiéndose únicamente estratos calizos ya que las lutitas estaban demasiado fracturadas y no fue posible extraer muestras sanas. En el laboratorio de Verificación y Control de Materiales de Construcción del Instituto de Ingeniería Civil de la UANL (VCMC), se realizó la preparación de los núcleos de roca para posteriormente llevar a cabo el ensayo de compresión uniaxial.

Para graficar el esfuerzo (σ) en el eje de las ordenadas (y) contra la deformación (ε) en el eje de las abscisas (x), se utilizaron los datos obtenidos del ensayo de compresión uniaxial. Los datos consisten en la carga aplicada (kg) y la posición (mm). A partir de estos datos se calcularon el esfuerzo y la deformación utilizando las siguientes fórmulas:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

σ : resistencia a la compresión

F : carga

A : área del espécimen

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

ε : deformación

ΔL : cambio en la longitud del núcleo de roca

L_0 : longitud transversal del núcleo de roca

Con los datos obtenidos (ver Anexo 2), se construyó la gráfica de esfuerzo (σ) – deformación (ε), para obtener otros parámetros importantes, como la resistencia a la compresión uniaxial (σ_{uc}), el módulo de elasticidad (E), la deformación en el límite elástico (ε_e), la deformación en el punto de rotura (ε_u), y la energía de deformación hasta el punto de rotura, entre otros (Hoek & Brown, 1997).

La gráfica de esfuerzo – deformación proporciona una visualización del comportamiento elástico y plástico del núcleo de la roca. La parte inicial de la curva, que es lineal, representa el comportamiento elástico, donde la deformación es proporcional al esfuerzo aplicado. A medida que se incrementa la carga, la curva puede volverse no lineal, indicando el inicio del comportamiento plástico hasta llegar al punto de fractura (Jaeger et al., 2007).

Se observó en las curvas de esfuerzo - deformación para los núcleos ensayados, que las muestras exhibieron comportamientos de rotura frágil y frágil-dúctil en las pruebas de compresión uniaxial. González de Vallejo (2002) menciona que según el tipo de roca la relación esfuerzo – deformación será diferente, pudiéndose distinguir tres modelos de comportamiento principales, véase Figura 4.8:

1. Frágil: es típico de rocas duras con alta resistencia. Se observa una pérdida casi instantánea de la resistencia de la roca a través de un plano sin ninguna o muy poca deformación plástica.

2. Frágil – dúctil: la resistencia de la roca decrece hasta un cierto valor después de haberse alcanzado deformaciones importantes.
3. Dúctil: la deformación sigue aumentando sin que se pierda la resistencia, esta se mantiene constante después de grandes deformaciones.

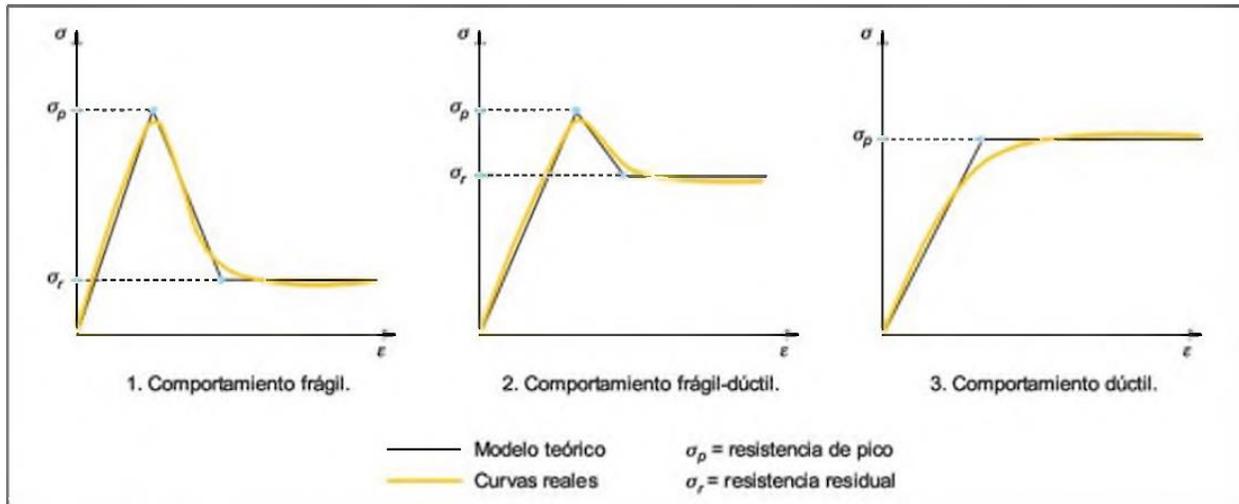


Figura 4.8. Modelos de comportamiento esfuerzo – deformación. Tomado de González de Vallejo et al. (2002)

A continuación, se presentan dos ejemplos representativos de las curvas esfuerzo – deformación de las muestras ensayadas, mientras que el resto de las gráficas se pueden consultar en el Anexo 2.

En la Figura 4.9. se puede observar un comportamiento frágil típico, ya que se muestra el momento en el que se alcanza la máxima resistencia y como la pérdida de esta es prácticamente inmediata. Se trata de rocas calizas, que suelen ser más resistentes y presentan un comportamiento frágil esperado. Por otro lado, en la Figura 4.10. se muestra una gráfica con un comportamiento frágil - dúctil, donde la roca exhibe cierta deformación incluso después de haber alcanzado la resistencia máxima.

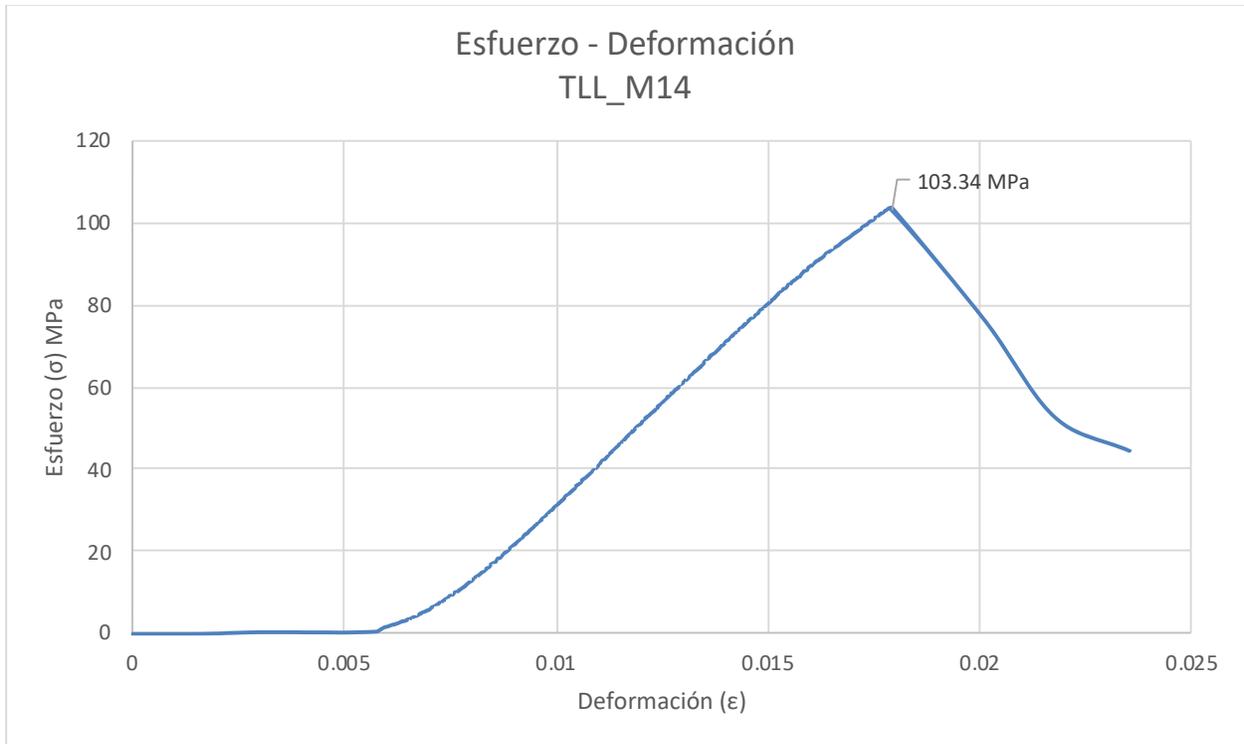


Figura 4.9. Gráfica de esfuerzo – deformación de la muestra TLL_M14, que muestra un comportamiento frágil.

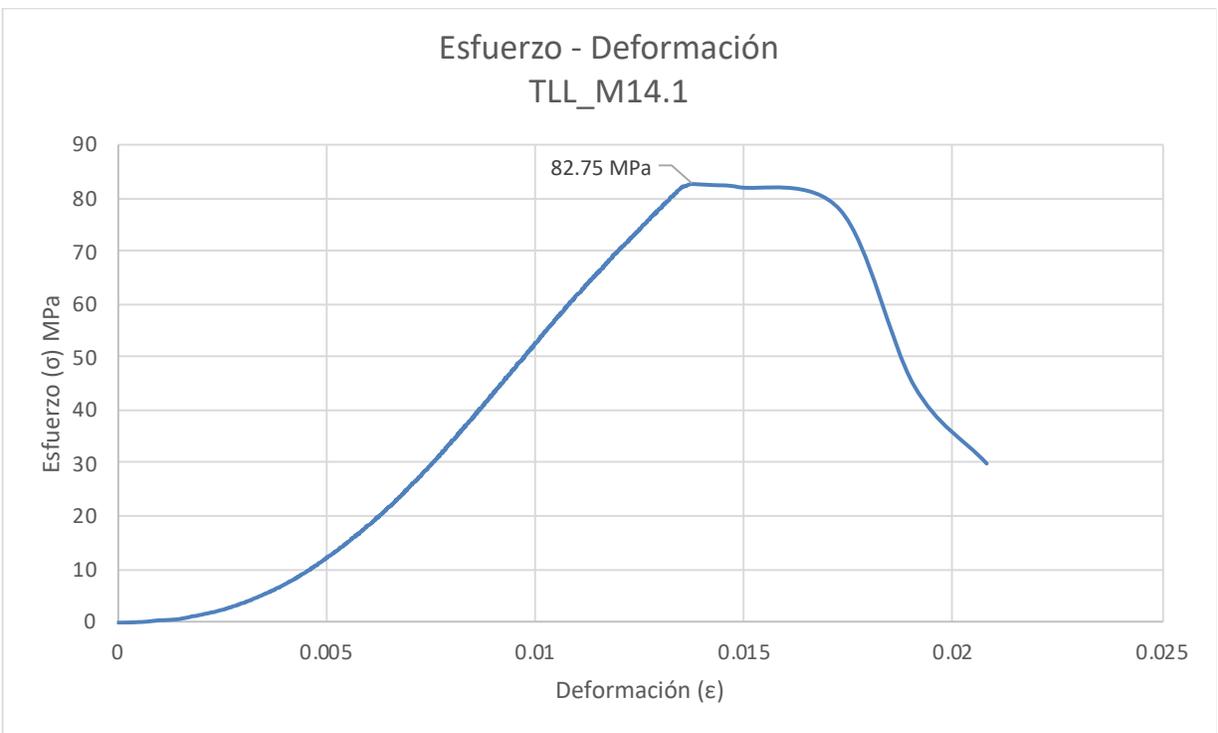


Figura 4.10. Gráfica de esfuerzo – deformación de la muestra TLL_14.1, que muestra un comportamiento frágil-dúctil.

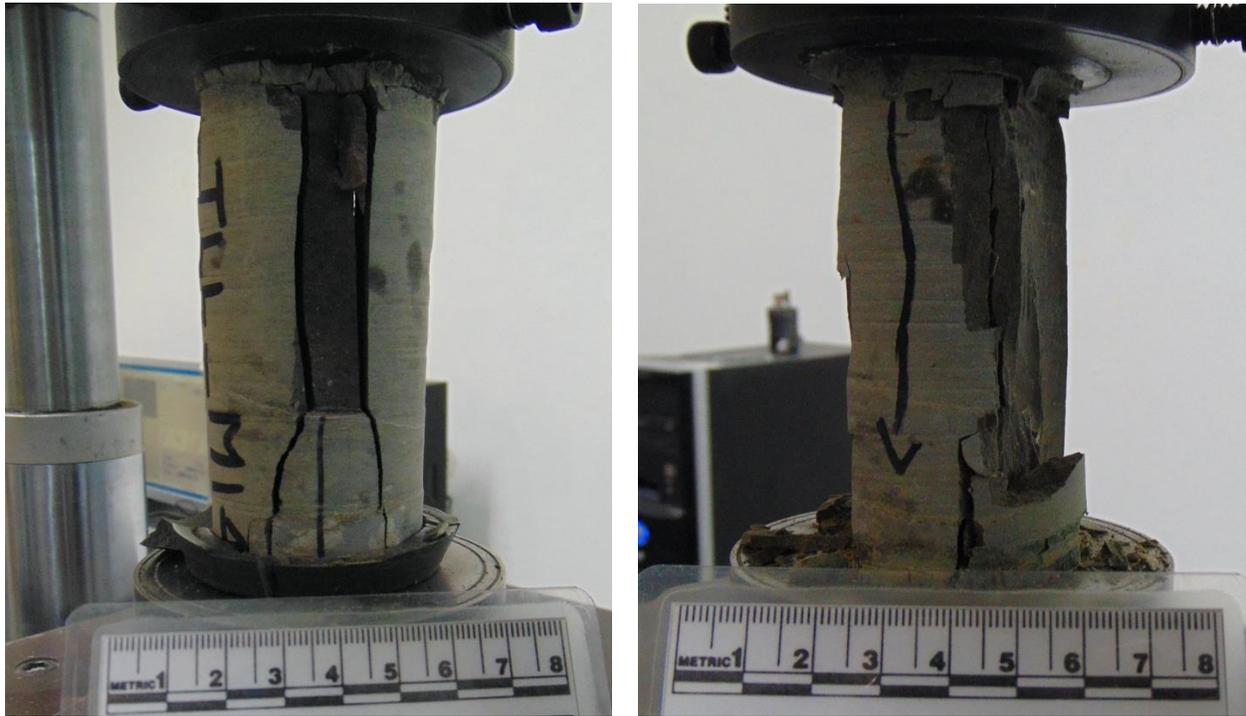


Figura 4.11. Fotografías de las muestras falladas durante en ensayo de compresión uniaxial.

La resistencia a la compresión uniaxial (σ_{uc}) representa la capacidad de la muestra de roca para resistir la carga axial aplicada hasta llegar a una carga máxima que la hace fracturarse. Se calcula dividiendo a la carga máxima entre el área de la base del cilindro de roca, como se muestra a continuación:

$$\sigma_{uc} = \frac{F}{A}$$

σ_{uc} : resistencia a la compresión

F : carga máxima

A : área del espécimen

Las muestras cilíndricas de roca poseen un diámetro promedio de 4.5 cm por lo que se calculó el área de la base:

$$A = \pi r^2$$

$$A = \pi(2.25\text{cm})^2$$

$$A = 15.9\text{cm}^2$$

De los ensayos de compresión uniaxial, se obtuvo la carga máxima para cada una de las muestras y se calculó la resistencia a la compresión uniaxial (σ_{uc}) sustituyendo los valores en la fórmula anterior, dando como resultado lo siguiente:

Muestra	Carga máxima (kg)	Área (cm ²)	σ_{uc} (kg/cm ²)	σ_{uc} (MPa)
TLL_M06	13584	15.9	854.34	83.76
TLL_M07	6605	15.9	415.41	40.73
TLL_M08.1	13271	15.9	834.65	81.83
TLL_M08.2	10700	15.9	672.96	65.98
TLL_M09	8753	15.9	550.50	53.97
TLL_M10.1	11510	15.9	723.90	70.97
TLL_M10.2	11388	15.9	716.23	70.22
TLL_M12	16645	15.9	1046.86	102.63
TLL_M14	16759	15.9	1054.03	103.34
TLL_M14.1	13421	15.9	844.09	82.75

Tabla 4.11. Resultados de carga máxima y resistencia a la compresión uniaxial.

Los resultados se interpretan en términos de la capacidad de carga de la roca. Un valor alto de σ_{uc} indica que la roca es fuerte y puede soportar cargas elevadas sin fallar, lo cual es deseable en aplicaciones estructurales. Por otro lado, un valor bajo de σ_{uc} sugiere que la roca es débil y puede fracturarse fácilmente con cargas relativamente bajas, lo cual puede requerir medidas de refuerzo o soporte adicional en proyectos de construcción y excavación (Bieniawski, 1984).

CLASIFICACIÓN DE LAS ROCAS A PARTIR DE SU RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAXIAL				
Resistencia a la compresión uniaxial (Mpa)	ISRM (1981)	Geological Society of London (1973)	Bieniawski (1989)	Ejemplos
< 1	Suelos			
1 - 5	Muy blanda	Blanda > 1.25	Muy baja	Sal, lutita, limolita, marga, toba, carbón
5 - 12.5	Blanda	Moderadamente blanda		
12.5 - 25		Moderadamente dura		
25 - 50	Moderadamente dura	Dura	Baja	Esquisto, pizarra
50 - 100	Dura	Dura	Media	Rocas metamórficas, esquistosas, mármol, granito, gneiss, arenisca, caliza porosa
100 - 200	Muy dura	Muy dura	Alta	Rocas ígneas y metamórficas duras, arenisca muy cementada, caliza, dolomía
> 200		Extremadamente dura	Muy alta	Cuarcita, gabro, basalto
> 250	Extremadamente dura			

Gonzalez de Vallejo, L. et al., (2002)

Tabla 4.12. Clasificación de las rocas según su compresión uniaxial.

De acuerdo con González de Vallejo et al., (2002), en su tabla de clasificación de las rocas según su resistencia a la compresión uniaxial, se observan diferentes tipos de clasificación de diversos autores. Sin embargo, en este trabajo, se utilizó la clasificación geomecánica Rock Mass Rating (RMR) de Bieniawski (1989). Los resultados obtenidos del ensayo uniaxial se encuentran dentro del rango de rocas de baja a media resistencia, lo cual coincide con la clasificación RMR obtenida en campo en el subtema anterior.

Con los datos obtenidos del ensayo de compresión uniaxial y de la gráfica de esfuerzo - deformación se calculó el Módulo de Elasticidad (E), que nos brinda información sobre la rigidez de la roca y se define como la relación entre el esfuerzo y la deformación en la región elástica de la curva esfuerzo – deformación. Este parámetro se obtiene de la pendiente de la parte lineal de la gráfica durante el ensayo de compresión uniaxial (Hoek & Brown, 1997). Esta pendiente representa la tasa de cambio del esfuerzo con respecto a la deformación cuando esta es proporcional al esfuerzo aplicado y puede volver a su

forma original al eliminar la carga (Jaeger et al., 2007). El módulo de elasticidad se representa de la siguiente manera:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$$

E : módulo de elasticidad

$\Delta\sigma$: cambio en el esfuerzo

$\Delta\varepsilon$: cambio en la deformación

Se calculó la pendiente de la gráfica de esfuerzo – deformación de cada una de las muestras ensayadas, obteniendo de esta manera el módulo de elasticidad (E):

Muestra	Módulo de Elasticidad (E) GPa
TLL_M06	9.51
TLL_M07	6.77
TLL_M08.1	6.84
TLL_M08.2	5.67
TLL_M09	7.35
TLL_M10.1	9.53
TLL_M10.2	9.28
TLL_M12	8.61
TLL_M14	8.69
TLL_M14.1	7.40

Tabla 4.13. Resultados del módulo de elasticidad de las muestras ensayadas.

Los valores obtenidos del Módulo de Elasticidad (E) para las muestras ensayadas varían entre 5.67 GPa y 9.53 GPa, a mayor (E) menor será la deformación. Comparando los resultados con la literatura, las calizas del área de estudio poseen una rigidez baja a moderada con respecto a otras calizas. Esto sugiere que, aunque son capaces de soportar carga, pueden necesitar refuerzos adicionales en proyectos que requieran una alta rigidez estructural (Briševac et al., 2017) , (Karagianni et al., 2017).

Finalmente, los valores de resistencia a la compresión uniaxial y el módulo de elasticidad obtenidos del ensayo fueron determinados en la matriz sana de la roca, ya que muchas muestras no pudieron ser ensayadas debido a su fracturamiento natural. Es importante señalar que las lutitas de las formaciones San Felipe y Agua Nueva estaban tan fracturadas y alteradas que resultó imposible extraer núcleos para su análisis. Las calizas de la formación San Felipe, en cambio, presentaban un tamaño de bloque más grande, lo que facilitó la extracción de núcleos sanos para los ensayos.

Sin embargo, es fundamental entender que las rocas que conforman el anticlinal y que rodean los túneles de Loma Larga ya presentan deformación y fracturamiento debido a los esfuerzos tectónicos responsables del plegamiento.

Además, es probable que exista microfracturamiento en la matriz rocosa (Hancock, 1985), lo cual, aunque permanece unida muestra cierta deformación que puede disminuir su capacidad de carga y su resistencia a la deformación en comparación con rocas no plegadas ni fracturadas. Por tanto, los datos obtenidos del ensayo de compresión uniaxial representan la roca en su estado óptimo.

Es crucial tener en cuenta el estado general de fracturamiento y la diferencia de resistencia entre calizas sanas, calizas fracturadas y lutitas intensamente fracturadas y alteradas. Estas condiciones en conjunto representan el verdadero estado de resistencia del macizo rocoso del anticlinal de Loma Larga y deber ser consideradas en cualquier análisis geotécnico o de ingeniería en la región.

CAPÍTULO 5 Análisis Cinemático

5.1 Mecanismos de falla

Los diferentes tipos de rotura están condicionados por el grado de fracturamiento del macizo rocoso y por la orientación y distribución de las discontinuidades con respecto a un plano (talud, túnel). Los diferentes tipos de rotura están condicionados por el grado de fracturamiento del macizo rocoso y por la orientación y distribución de las discontinuidades con respecto a un plano. La estabilidad queda definida por los parámetros resistentes de las discontinuidades y de la matriz rocosa. Los modelos de rotura más comunes son la rotura plana, en cuña y por vuelco (Hoek & Bray, 1977).

5.1.1 Falla planar

Para que la superficie se pueda deslizar debe cumplir con al menos estas condiciones: tener un rumbo paralelo o casi paralelo a la cara del talud dentro de $\pm 20^\circ$ ($\alpha_p = \alpha_c \pm 20^\circ$). El buzamiento de la cara del talud (ψ_c) debe ser mayor al del plano (ψ_p) y el buzamiento del plano debe ser mayor al ángulo de fricción de este (ϕ) (Figura 5.1.). (Wyllie & Mah, 2005). Para la evaluación de la estabilidad, la cara del talud debe incluirse en el estereograma ya que el deslizamiento solo puede ocurrir como resultado de un movimiento hacia la cara libre creada por el corte.

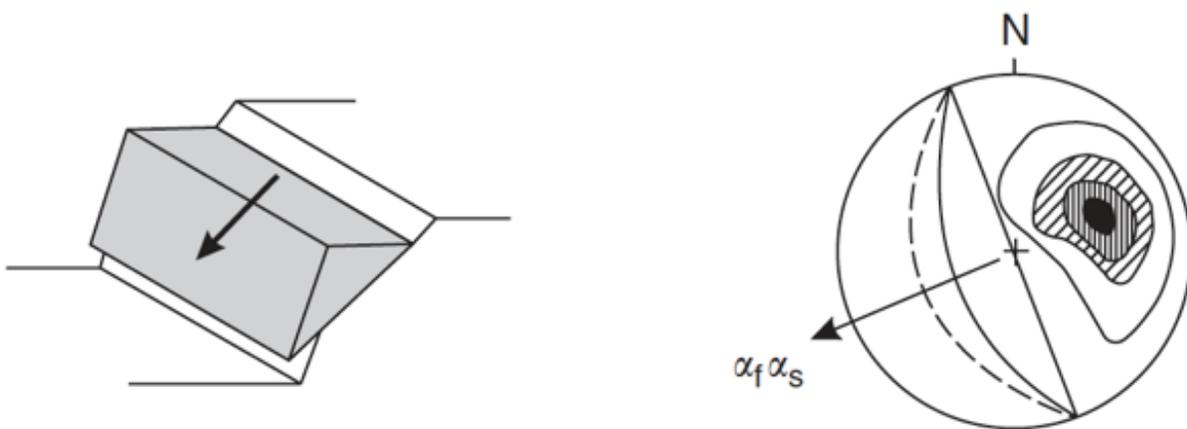


Figura 5.1. Modelo de mecanismo de falla planar y estereograma representativo. Tomado de Wyllie & Mah (2005).

5.1.2 Falla en cuña

Este tipo de deslizamiento ocurre cuando un bloque de roca está formado por la intersección de dos planos de discontinuidad que buzanan hacia la cara del talud en forma oblicua. El buzamiento de la cara del talud (ψ_c) es mayor al plunge de la línea de intersección (ψ_i) y este debe ser mayor que el ángulo de rozamiento (ϕ), es decir: $\psi_c > \psi_i > \phi$ (Figura 5.2.).

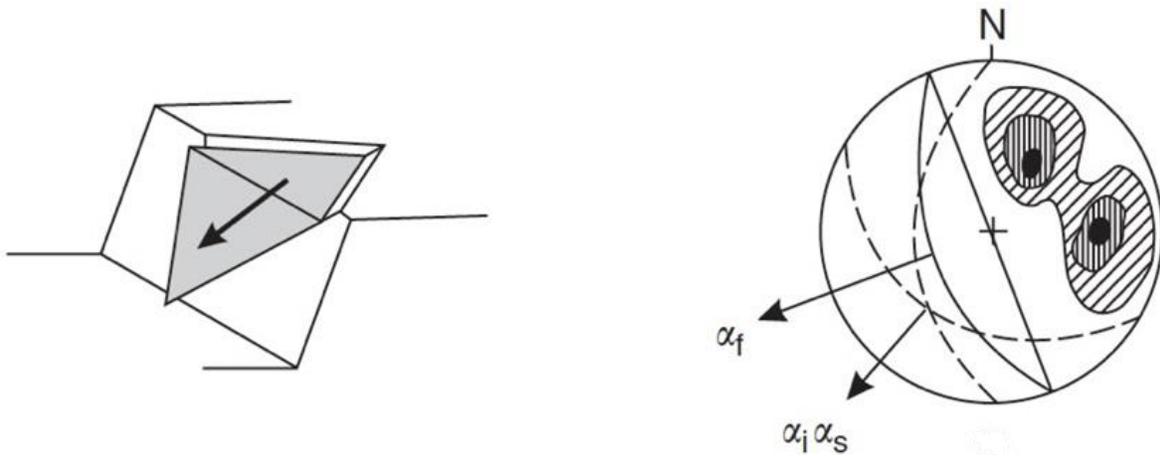


Figura 5.2. Modelo de mecanismo de falla en cuña y estereograma representativo. Tomado de Wyllie & Mah (2005).

5.1.3 Falla por vuelco

Este tipo de falla se da en taludes de macizo rocoso donde los estratos presentan buzamiento contrario a la inclinación del talud y dirección paralela o subparalela al mismo. La dirección de las discontinuidades debe estar dentro del rango de $\pm 10^\circ$ del talud. Además, la dirección del mayor esfuerzo principal es paralela a la cara del talud (ψ_c) entonces el deslizamiento entre capas y la falla ocurrirán en planos con buzamiento ψ_p cuando las siguientes condiciones se cumplan: $(90^\circ - \psi_c) + \phi < \psi_p$. (Figura 5.3.)

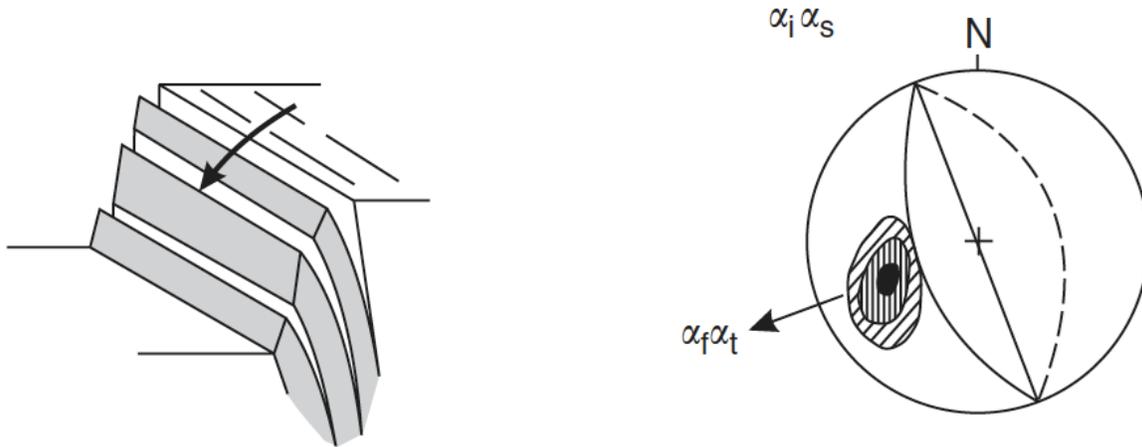


Figura 5.3. Modelo de mecanismo de falla por vuelco. Tomado de Wyllie & Mah (2005).

5.2 Envolverte Markland

John T. Markland fue un investigador destacado en el campo de la mecánica de rocas y la geotecnia. Su trabajo se centró en el análisis de la estabilidad de taludes y el estudio de las discontinuidades en macizos rocosos. Es conocido por desarrollar el concepto de la envolvente de Markland o Daylight envelope, una técnica muy útil para evaluar gráficamente la inestabilidad de bloques y predecir posibles fallas por deslizamiento.

Markland definió este concepto en su informe de investigación en 1972 titulado: "A useful technique for estimating the stability of rock slopes when the rigid wedge sliding type of failure is expected".

La envolvente de Markland, es una herramienta gráfica utilizada en el análisis cinemático de macizos rocosos. Esta envolvente permite determinar si una discontinuidad está orientada de tal manera que puede provocar una falla por deslizamiento.

Se utiliza un estereograma para proyectar las orientaciones de las discontinuidades y la pendiente de la superficie a analizar. Los planos se representan con los círculos máximos y sus polos.

La envolvente de Markland, se traza a 90 grados de varios puntos a lo largo del círculo máximo que representa la superficie estudiada. Dependiendo de la orientación de este plano, la envolvente de Markland suele ser parecida a un círculo o a un óvalo. Esta área representa todas las orientaciones de los planos de discontinuidad que podrían fallar por deslizamiento si interceptan la superficie que se está analizando, ya sea un talud o en este caso las paredes y techo del túnel. Así que todos los polos de los planos que caen dentro de la envolvente tienen un alto potencial a deslizarse o desprenderse del macizo rocoso (Figura 5.4).

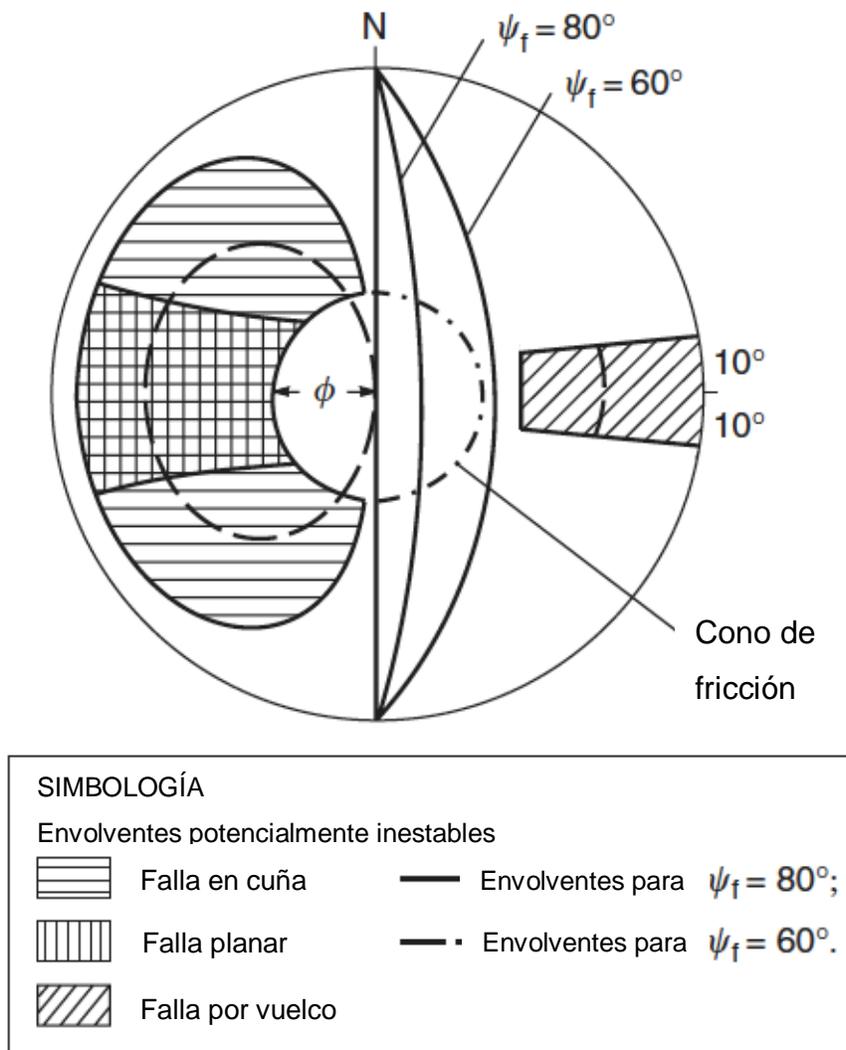


Figura 5.4. Análisis cinemático utilizando el concepto de cono de fricción y envolventes de Markland. Tomado de Wyllie & Mah (2005).

5.3 Cono de fricción

El cono de fricción es un concepto fundamental en el análisis de estabilidad de macizos rocosos. Se refiere a una representación gráfica del ángulo de fricción interno de la roca, que es el ángulo máximo al que los materiales pueden resistir el deslizamiento sin fallar.

El ángulo de fricción interno (ϕ) es una propiedad inherente de cualquier material rocoso, que depende de la composición mineralógica, la textura y las condiciones de las discontinuidades en la roca. Este ángulo es crucial para evaluar la estabilidad de los macizos rocosos y diseñar estructuras de soporte (Hoek, 1994; Hoek & Bray, 1977; Hoek & Brown, 1985, 1997).

En el análisis cinemático, el cono de fricción se representa gráficamente en un estereograma como un círculo al centro de este con un radio que corresponde al ángulo de fricción interno (ϕ). Una vez que se utilizó la envolvente de Markland para analizar cinemáticamente los mecanismos de falla, se puede llevar a cabo un análisis adicional asumiendo que la fuerza de cizalla de la superficie de deslizamiento está comprendida solamente por fricción y que la cohesión es cero (Hoek & Bray, 1977).

Considerando a un bloque en reposo en un plano inclinado con un ángulo de fricción (ϕ) entre el bloque y el plano (Figura 5.5). Para una condición en *reposo* el vector de fuerza normal al plano debe encontrarse dentro del cono de fricción (Wyllie & Mah, 2005).

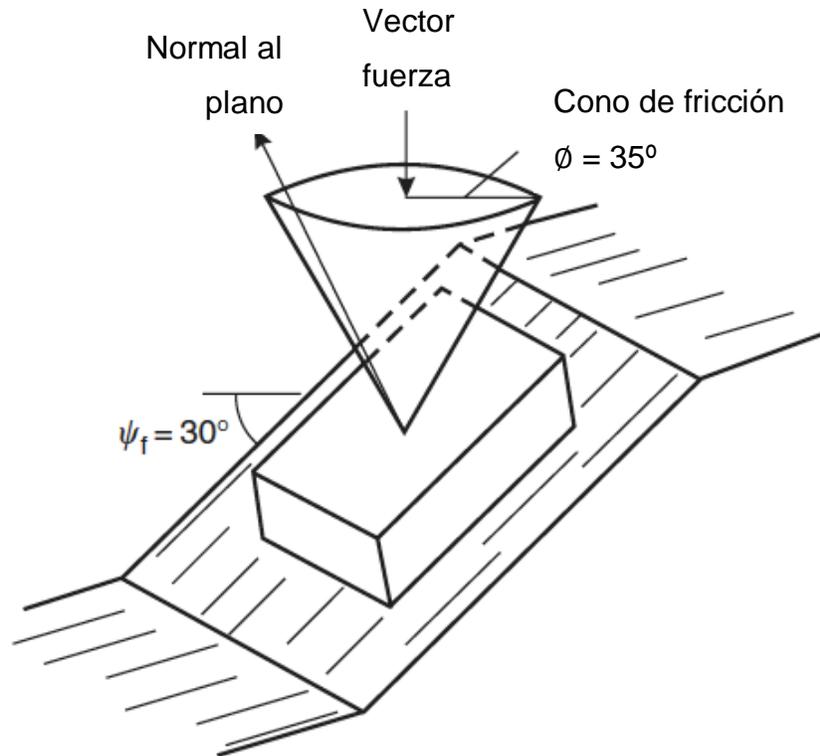


Figura 5.5. Concepto de cono de fricción. Tomado de Wyllie & Mah (2005).

Cuando la única fuerza que actúa sobre el bloque es la gravedad, el polo del plano se encuentra en la misma posición que la normal, así que el bloque será estable cuando el polo esté dentro del cono de fricción.

5.4 Análisis cinemático del área de estudio

Se utilizaron los datos de los puntos DC, HP, CP, EC y TZ para realizar el análisis de estabilidad de los bloques de cada sitio con respecto al Túnel Loma Larga, esto porque directamente no se pudieron medir datos estructurales dentro del TLL, pero se correlacionaron de acuerdo con su posición en el Anticlinal. El TLL fue considerado como un talud completamente vertical con un rumbo y buzamiento de 196/ 90. Se tomó en cuenta la posición de los polos en relación con el túnel ya que todos los que afloran hacia las paredes son bloques potencialmente inestables, en la falsilla esta área es conocida como envolvente de Markland o “Daylight envelope” la cual puede ser utilizada para

identificar rápidamente bloques inestables. Adicionalmente, se puede utilizar el cono de fricción en el centro para los polos o el círculo de fricción a partir del círculo primitivo para los planos. El concepto de cono de fricción se utiliza considerando que la fricción es la única fuerza actuando sobre el plano inclinado y que la cohesión es igual a cero.

5.4.1 Diana Cazadora

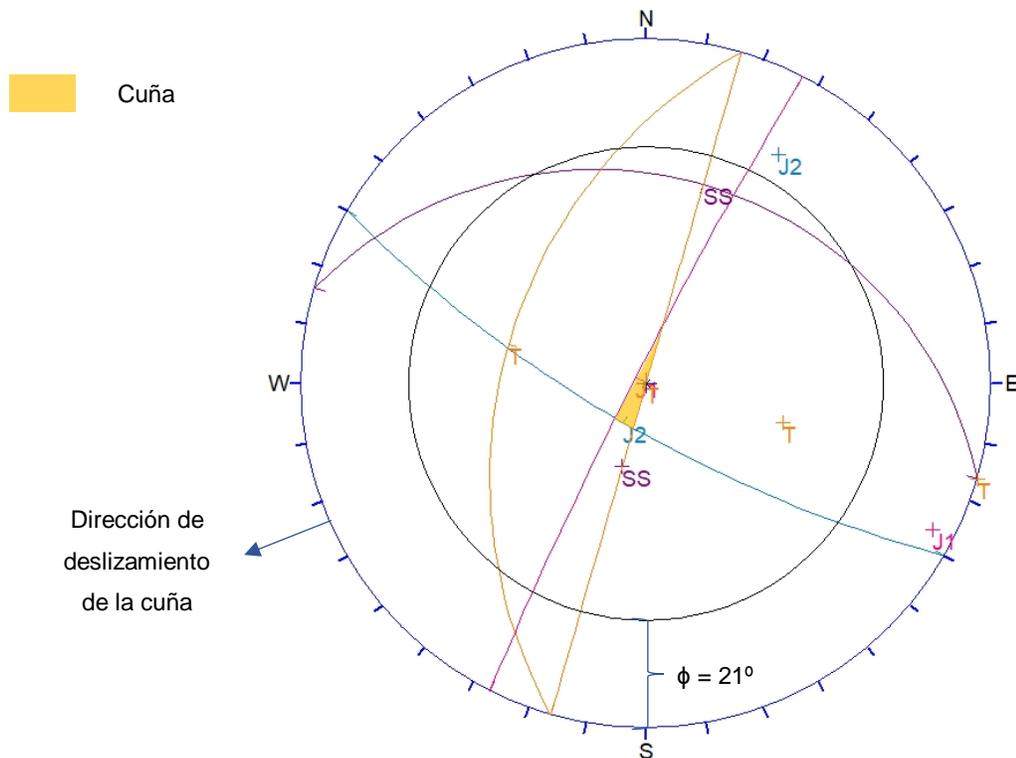


Figura 5.6. Proyección estereográfica y análisis cinemático del sitio DC.

Se identificaron a dos familias principales de diaclasas: $J_1 = 207/86$ y $J_2 = 120/75$ tipo *ac* y *bc*, respectivamente y plano de estratificación: $SS = 298/16$, pertenecientes a la Formación San Felipe. El ángulo de fricción: $\phi = 21^\circ$, que se colocó desde el círculo primitivo. Se analizó el mecanismo de falla con respecto al Túnel: $T = 196/90 // 196/45$. Se puede ver que se cumple con las condiciones para la falla en cuña: $\psi_c > \psi_i > \phi$. El punto de intersección entre J_1 y J_2 queda fuera del área del ángulo de fricción y tiene un buzamiento menor a la pared del túnel. La dirección potencial de deslizamiento es hacia el suroeste y principalmente desde el lado izquierdo del túnel, viendo hacia el norte.

5.4.2 Hyundai Penta

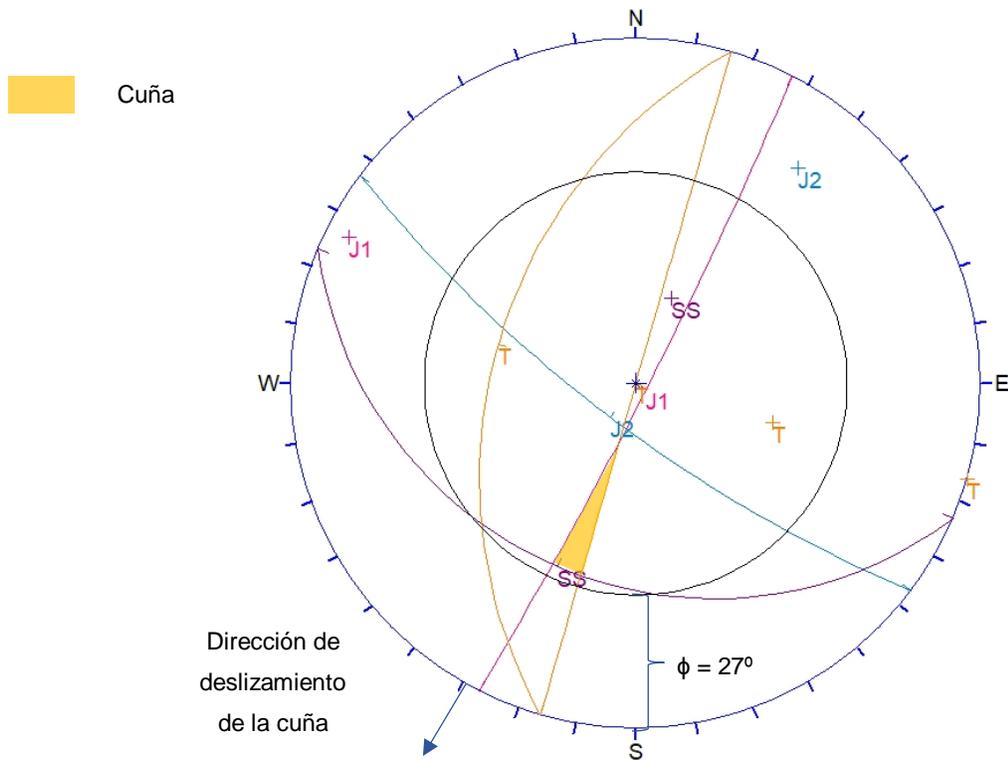


Figura 5.7. Proyección estereográfica y análisis cinemático del sitio HP.

Se identificaron dos familias de diaclasas: $J_1= 027/86$, tipo *ac* y $J_2= 127/76$, tipo *bc*, y una estratificación: $SS=113/30$, estos datos pertenecientes a la Formación San Felipe. El ángulo de fricción: $\phi = 27^\circ$, fue obtenido de la clasificación geomecánica. El túnel es representado por un talud vertical y una tangente $T= 196/90 // 196/45$.

En este punto también la falla en cuña es el mecanismo de inestabilidad más probable entre la discontinuidad J_1 y la estratificación, se observa que los polos de los planos entran dentro de la envolvente y fuera del cono de fricción. Y se cumple la condición de $\psi_c > \psi_i > \phi$.

5.4.3 Calle Parteaguas

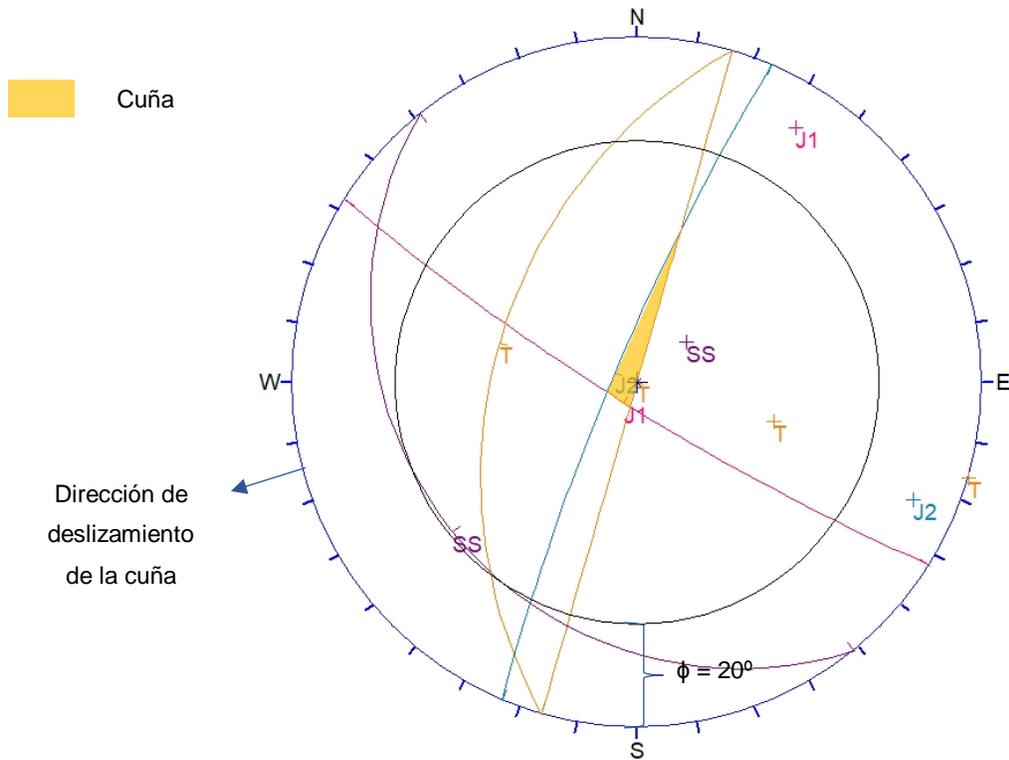


Figura 5.8. Proyección estereográfica y análisis cinemático del sitio CP.

Al igual que en los sitios anteriores se identificaron dos familias de fracturas bc y ac con una orientación preferencial de $J_1= 122/82$ y $J_2= 203/82$ y estratificación $SS= 141/21$, en la Formación San Felipe. El ángulo de fricción: $\phi = 20^\circ$ y el túnel de Loma Larga representado por $T=196/90$ y $T=196/45$.

Se comienza a observar que hay una tendencia en el área de estudio a que se presente el mecanismo de falla en cuña. Al igual que en los otros sitios, se cumplen las condiciones descritas en el apartado 9.2 para cuñas: $\psi_c > \psi_i > \phi$. Al igual que los sitios anteriores se observa que el deslizamiento potencial ocurre desde el lado izquierdo de ambos túneles viendo en dirección San Pedro – Monterrey.

5.4.4 Excavación Cimientos

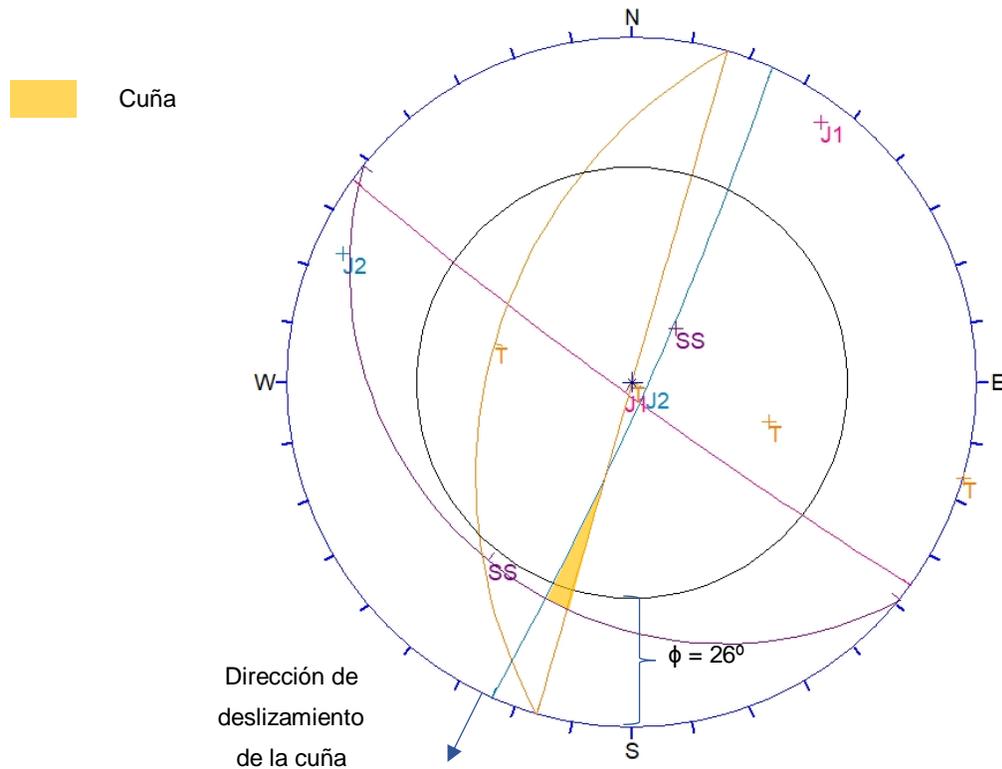


Figura 5.9. Proyección estereográfica y análisis cinemático del sitio EC.

Las familias de diaclasas predominantes son *bc* $J_1 = 126/85$ y *ac* $J_2 = 024/85$: con estratificación: $SS = 129/23$, en un afloramiento de la Formación San Felipe. El ángulo de fricción: $\phi = 26^\circ$, obtenido de acuerdo con la clasificación geomecánica y el túnel Loma Larga $T = 196/90$ y $196/45$. En este sitio se observa una cuña que se forma con la intersección de los planos J_2 y SS . Sin embargo, es menos probable de presentar estabilidad ya que se encuentra en el área del ángulo de fricción. Pero, debido a que la fricción (ϕ), puede tener una variación a lo largo del mismo afloramiento debe considerarse la posibilidad de deslizamiento y/o desprendimiento de bloques. Al igual que en los demás puntos, la falla en cuña es el mecanismo más probable de ocurrir y se definirá su factor de seguridad (FS) más adelante.

5.4.5 Torre Zafiro

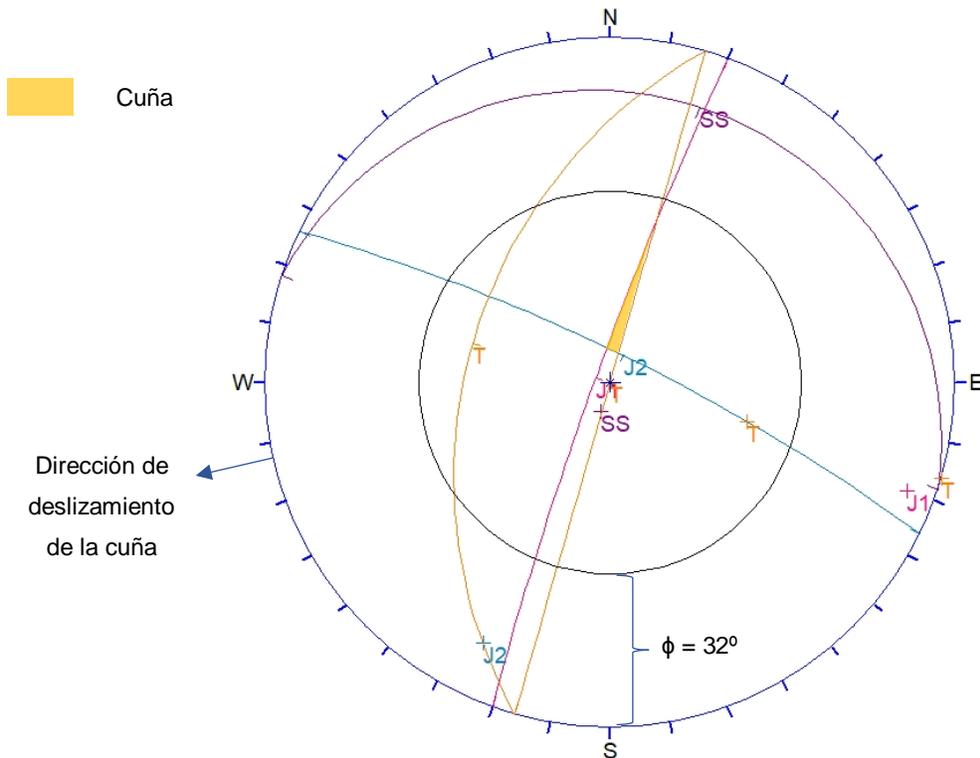


Figura 5.10. Proyección estereográfica y análisis cinemático del sitio TZ.

Se identificaron dos familias de fracturas en este sitio con una orientación preferencial de $J_1 = 200/85$ y $J_2 = 296/80$, tipo *ac* y *bc* respectivamente. El plano de estratificación está representado por: $SS = 288/10$. Este afloramiento pertenece a la Formación Agua Nueva. El ángulo de fricción: $\phi = 32^\circ$, fue obtenido a partir de la clasificación geomecánica.

El mecanismo de falla probable en este punto también es en cuña, ya que el plunge de la línea de intersección es menor al buzamiento del TLL y mayor que el ángulo de fricción. Sin embargo, la cuña es muy pequeña y debe de evaluarse el FS para determinar con mayor precisión si es estable o inestable.

5.5 Factor de Seguridad

El factor de seguridad (FS) es un parámetro clave en el análisis de estabilidad de macizos rocosos, que cuantifica la relación entre las fuerzas resistentes al deslizamiento, como la fricción (ϕ) y la cohesión (c) y las fuerzas desestabilizadoras como la gravedad, el peso de la roca y la presencia de agua. En términos generales, un $FS > 1$ indica que la cuña es estable, mientras que un $FS < 1$ sugiere que la cuña es potencialmente inestable y podría requerir intervención para evitar fallos estructurales (Hoek & Bray, 1977).

El análisis cinemático de cuñas se basa en la evaluación de la geometría de las discontinuidades en un macizo rocoso y su interacción con la estructura del talud o túnel en este caso de estudio. En este contexto, se consideran factores como la cohesión de los planos de discontinuidad, el ángulo de fricción interno de los materiales, y la presencia de agua dentro de las fracturas, que puede generar presiones adicionales y reducir la estabilidad del sistema.

La fórmula de Hoek & Bray, es ampliamente utilizada en la geotecnia, permite calcular el FS considerando todos estos factores de manera integrada como se muestra a continuación:

$$FS = \frac{3}{\gamma_r H} (c_A X + c_B Y) + \left(A - \frac{\gamma_w}{2\gamma_r} X \right) \tan \phi_A + \left(B - \frac{\gamma_w}{2\gamma_r} Y \right) \tan \phi_B$$

Donde:

C_A y C_B representan la cohesión en los planos de discontinuidad A y B, respectivamente.

ϕ_A y ϕ_B son los ángulos de fricción en esos mismos planos.

γ_r es el peso unitario de la roca, mientras que γ_w es el peso unitario del agua

H es la altura total de la cuña

X, Y, A y B son parámetros derivados de la geometría específica de la cuña, los cuales dependen de los ángulos de intersección entre los planos de discontinuidad.

$$X = \frac{\sin \theta_{24}}{\sin \theta_{45} \cos \theta_{2na}}$$

$$Y = \frac{\sin \theta_{13}}{\sin \theta_{35} \cos \theta_{1nb}}$$

$$A = \frac{\cos \psi_a - \cos \psi_b \cos \theta_{nanb}}{\sin \psi_5 \sin \theta_{nanb}^2}$$

$$B = \frac{\cos \psi_b - \cos \psi_a \cos \theta_{nanb}}{\sin \psi_5 \sin \theta_{nanb}^2}$$

Estos parámetros se determinan a partir de un estereograma (Figura 5.11.), que permite visualizar y analizar la geometría tridimensional del macizo rocoso y las posibles superficies de falla.

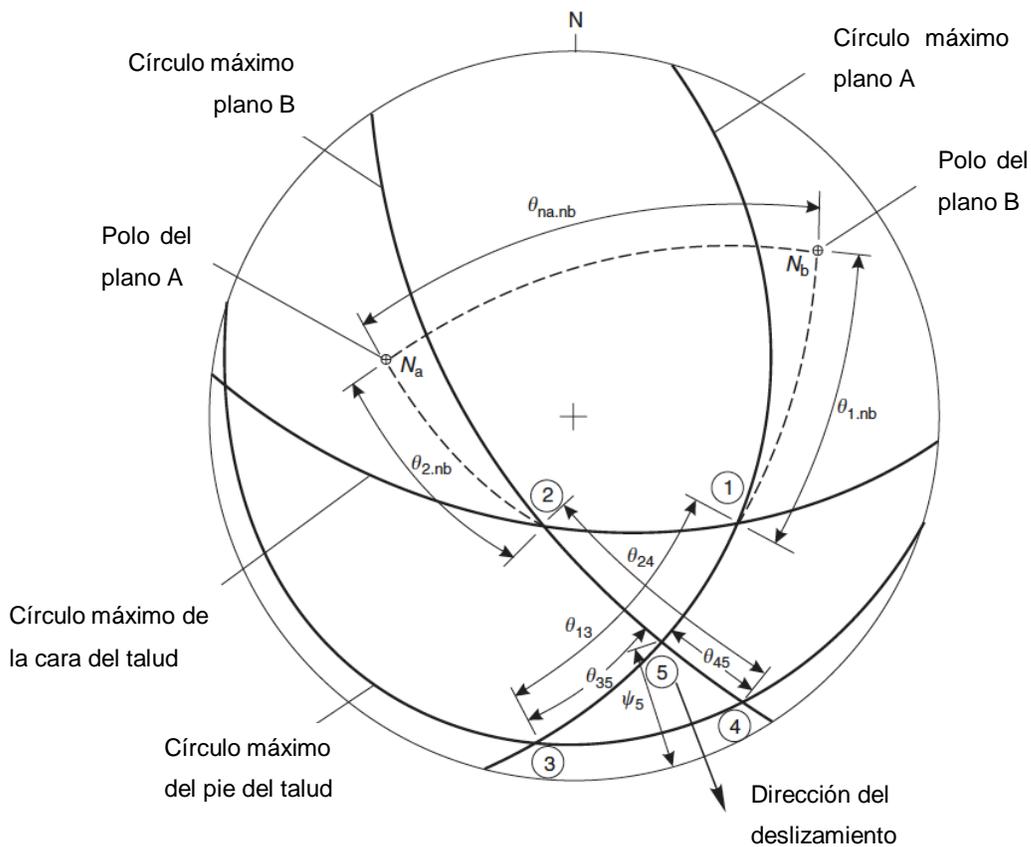


Figura 5.11. Estereograma con los datos requeridos para el análisis de estabilidad de cuñas. Tomado de Wyllie & Mah (2005).

Este enfoque metodológico se aplicó específicamente para el análisis de las cuñas formadas a lo largo del Túnel de Loma Larga. Dado que el túnel atraviesa a un anticlinal plegado y fallado, fue esencial evaluar la estabilidad de las cuñas potencialmente inestables que podrían formarse a partir de las discontinuidades presentes en el área de estudio. El análisis realizado permitió identificar las zonas a lo largo del túnel donde las cuñas mostraban un FS inferior a 1, lo que indica una inestabilidad potencial. Estas zonas fueron catalogadas como de riesgo, lo que sugiere la necesidad de intervenciones como el refuerzo con anclajes, mallas y drenes para controlar la presión del agua para mejorar su estabilidad. Por otro lado, las cuñas con un FS superior a 1 fueron consideradas estables bajo las condiciones actuales, pero se recomienda monitoreo continuo para asegurar que las condiciones no cambien con el tiempo o con la evolución de factores externos como la variabilidad climática.

DIANA CAZADORA			
Datos		Valores	
θ_{nanb}	86 °	$\cos\theta_{nanb}$	0.0698
θ_{2na}	58 °	$\sin\theta_{nanb}$	0.9976
θ_{1nb}	83 °	$\cos\psi_a$	0.2588
θ_{24}	92 °	$\cos\psi_b$	0.0698
θ_{13}	47 °	$\sin\psi_5$	0.9613
θ_{35}	50 °	$\sin\theta_{24}$	0.9994
θ_{45}	62 °	$\sin\theta_{45}$	0.8829
ψ_a	75 °	$\sin\theta_{13}$	0.7314
ψ_b	86 °	$\sin\theta_{35}$	0.7660
ψ_5	74 °	$\cos\theta_{2na}$	0.5299
\emptyset	21 °	$\cos\theta_{1nb}$	0.1219
H	8.35 m	$\tan\emptyset_A$	0.3839
γ_r	25 kN/m ³	$\tan\emptyset_B$	0.3839
γ_w	9.81 kN/m ³	$3/\gamma_r H$	0.0144
$c_{A,B}$	10 kPa	$\gamma_w/2\gamma_r$	0.1962

A	0.2648
B	0.0539
X	2.1359
Y	7.8339

FS
0.8043

Tabla 5.1. Parámetros para cálculo de factor de seguridad y FS de sitio DC.

La cuña evaluada en el afloramiento de la **Diana Cazadora** es potencialmente inestable ya que su FS es menor a 1 bajo las condiciones obtenidas de la clasificación geomecánica y del análisis cinemático.

HYUNDAI PENTA			
Datos		Valores	
θ_{nanb}	83 °	$\cos\theta_{nanb}$	0.1219
θ_{2na}	46 °	$\sin^2\theta_{nanb}$	0.9851
θ_{1nb}	101 °	$\cos\psi_a$	0.8660
θ_{24}	62 °	$\cos\psi_b$	0.0698
θ_{13}	27 °	$\sin\psi_5$	0.4848
θ_{35}	18 °	$\sin\theta_{24}$	0.8829
θ_{45}	19 °	$\sin\theta_{45}$	0.3256
ψ_a	30 °	$\sin\theta_{13}$	0.4540
ψ_b	86 °	$\sin\theta_{35}$	0.3090
ψ_5	29 °	$\cos\theta_{2na}$	0.6947
\emptyset	27 °	$\cos\theta_{1nb}$	-0.1908
H	8.35 m	$\tan\emptyset_A$	0.5095
γ_r	25 kN/m ³	$\tan\emptyset_B$	0.5095
γ_w	9.81 kN/m ³	$3/\gamma_r H$	0.0144
c_{AB}	10 kPa	$\gamma_w/2\gamma_r$	0.1962

A	1.7955
B	-0.0749
X	3.9041
Y	-7.6996

FS	0.7106
----	--------

Tabla 5.2. Parámetros para cálculo de factor de seguridad y FS de sitio HP.

La cuña evaluada en el afloramiento **Hyundai Penta** es potencialmente inestable ya que su FS es menor a 1 bajo las condiciones obtenidas de la clasificación geomecánica y del análisis cinemático.

CALLE PARTEAGUAS			
Datos		Valores	
θ_{nanb}	78 °	$\cos\theta_{nanb}$	0.2079
θ_{2na}	26 °	$\sin^2\theta_{nanb}$	0.9568
θ_{1nb}	78 °	$\cos\psi_a$	0.1392
θ_{24}	139 °	$\cos\psi_b$	0.1392
θ_{13}	47 °	$\sin\psi_5$	0.9816
θ_{35}	36 °	$\sin\theta_{24}$	0.6561
θ_{45}	73 °	$\sin\theta_{45}$	0.9563
ψ_a	82 °	$\sin\theta_{13}$	0.7314
ψ_b	82 °	$\sin\theta_{35}$	0.5878
ψ_5	79 °	$\cos\theta_{2na}$	0.8988
\emptyset	20 °	$\cos\theta_{1nb}$	0.2079
H	8.35 m	$\tan\emptyset_A$	0.3640
γ_r	25 kN/m ³	$\tan\emptyset_B$	0.3640
γ_w	9.81 kN/m ³	$3/\gamma_r H$	0.0144
$c_{A,B}$	10 kPa	$\gamma_w/2\gamma_r$	0.1962

A	0.1174
B	0.1174
X	0.7633
Y	5.9845

FS	0.5733
----	--------

Tabla 5.3. Parámetros para cálculo de factor de seguridad y FS de sitio CP.

La cuña evaluada del afloramiento de la **Calle Parteaguas** es potencialmente inestable ya que su FS es menor a 1 bajo las condiciones obtenidas de la clasificación geomecánica y del análisis cinemático.

El afloramiento del sitio llamado **Excavación Cimientos** mostraba la formación de una cuña entre el plano de estratificación y una familia de discontinuidades.

Sin embargo, la intersección de estos planos se encontraba dentro del área del cono de fricción por lo que su posibilidad de deslizamiento es menor.

EXCAVACIÓN CIMIENTOS			
Datos		Valores	
θ_{nanb}	101 °	$\cos\theta_{nanb}$	-0.1908
θ_{2na}	88 °	$\sin^2\theta_{nanb}$	0.9636
θ_{1nb}	86 °	$\cos\psi_a$	0.0872
θ_{24}	104 °	$\cos\psi_b$	0.0872
θ_{13}	47 °	$\sin\psi_5$	0.9925
θ_{35}	42 °	$\sin\theta_{24}$	0.9703
θ_{45}	85 °	$\sin\theta_{45}$	0.9962
ψ_a	85 °	$\sin\theta_{13}$	0.7314
ψ_b	85 °	$\sin\theta_{35}$	0.6691
ψ_5	83 °	$\cos\theta_{2na}$	0.0349
\emptyset	26 °	$\cos\theta_{1nb}$	0.0698
H	8.35 m	$\tan\emptyset_A$	0.4877
γ_r	25 kN/m ³	$\tan\emptyset_B$	0.4877
γ_w	9.81 kN/m ³	$3/\gamma_r H$	0.0144
$C_{A,B}$	10 kPa	$\gamma_w/2\gamma_r$	0.1962

A	0.1085
B	0.1085
X	27.9088
Y	15.6687

FS	2.1984
----	--------

Tabla 5.4. Parámetros para cálculo de factor de seguridad y FS de sitio EC.

El afloramiento del sitio llamado **Excavación Cimientos** mostraba la formación de una cuña entre el plano de estratificación y una familia de discontinuidades.

Sin embargo, la intersección de estos planos se encontraba dentro del área del cono de fricción por lo que su posibilidad de deslizamiento es menor.

Existía la posibilidad de formación de otra cuña con la intersección de las dos familias de diaclasas, pero, uno de los planos se encontraba casi paralelo al eje del túnel y las condiciones son menos favorables para que ocurra un deslizamiento y se puede ver

reflejado en el cálculo del FS, que, en este punto, es mayor a 1 indicando que la cuña es estable. Aunque cabe resaltar que si las condiciones de fricción, cohesión y principalmente de agua subterránea cambiasen, esto podría afectar la estabilidad y aumentar las posibilidades de deslizamiento para la orientación de estos planos con respecto al túnel.

TORRE ZAFIRO			
Datos		Valores	
θ_{nanb}	105 °	$\cos\theta_{nanb}$	-0.2588
θ_{2na}	162 °	$\sin^2\theta_{nanb}$	0.9330
θ_{1nb}	83 °	$\cos\psi_a$	0.1736
θ_{24}	170 °	$\cos\psi_b$	0.0872
θ_{13}	45 °	$\sin\psi_5$	0.9563
θ_{35}	36 °	$\sin\theta_{24}$	0.1736
θ_{45}	97 °	$\sin\theta_{45}$	0.9925
ψ_a	80 °	$\sin\theta_{13}$	0.7071
ψ_b	85 °	$\sin\theta_{35}$	0.5878
ψ_5	73 °	$\cos\theta_{2na}$	-0.9511
\emptyset	32 °	$\cos\theta_{1nb}$	0.1219
H	8.35 m	$\tan\emptyset_A$	0.6249
γ_r	25 kN/m ³	$\tan\emptyset_B$	0.6249
γ_w	9.81 kN/m ³	$3/\gamma_r H$	0.0144
$c_{A,B}$	10 kPa	$\gamma_w/2\gamma_r$	0.1962

A	0.2199
B	0.1481
X	-0.1840
Y	9.8712

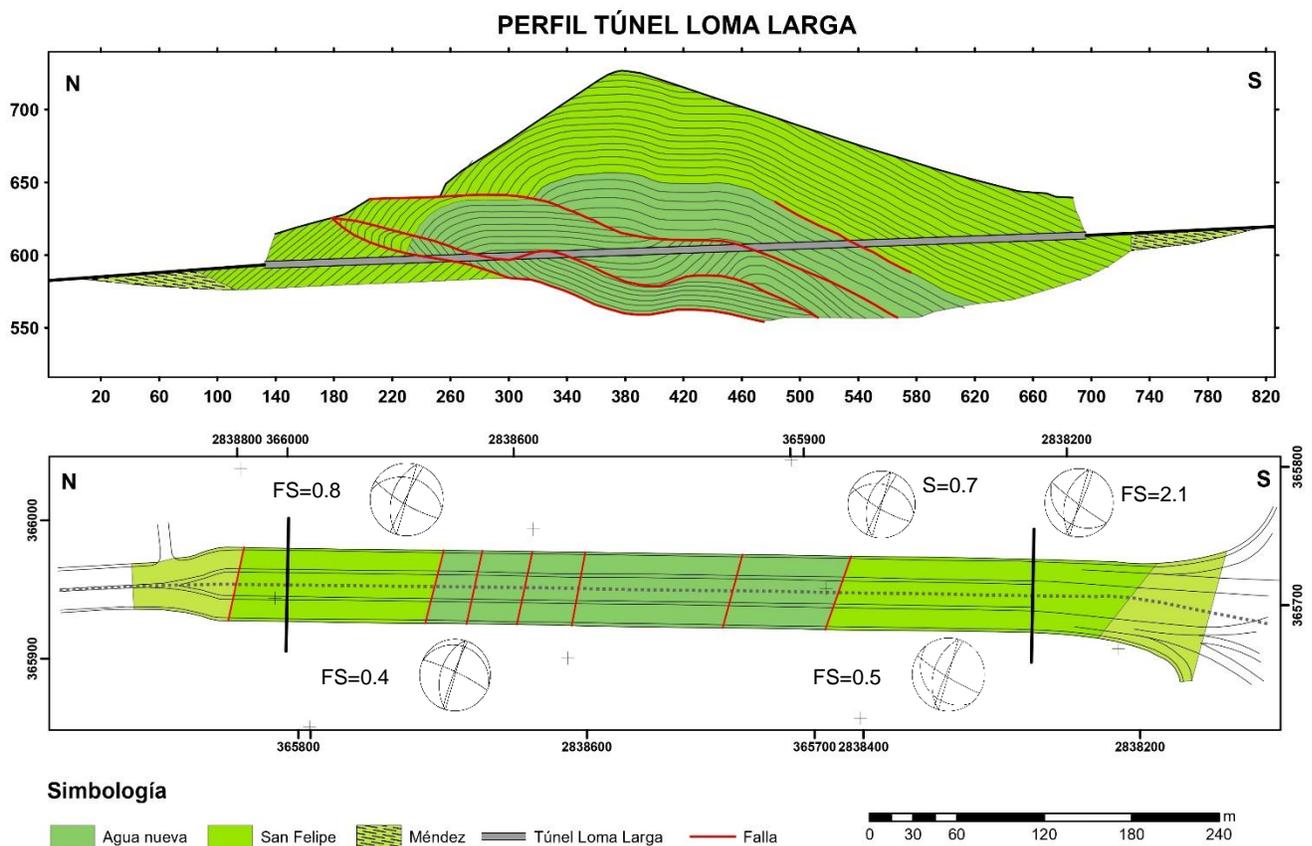
FS
0.4345

Tabla 5.5. Parámetros para cálculo de factor de seguridad y FS de sitio TZ.

La cuña perteneciente al afloramiento de la **Torre Zafiro** es potencialmente inestable para la formación Agua Nueva en este punto, ya que su FS es menor a 1 bajo las condiciones obtenidas de la clasificación geomecánica y del análisis cinemático.

El análisis del factor de seguridad (FS) en el área de estudio, utilizando el método de Hoek & Bray, proporcionó información valiosa para evaluar la posibilidad de inestabilidad de las cuñas formadas por las discontinuidades en el anticlinal de Loma Larga, en relación con el túnel.

El análisis cinemático, confirmó la formación de cuñas y su potencial de deslizamiento. Sin embargo, el cálculo del FS no solo refuerza esta evidencia, sino que también permite cuantificar, en función de las condiciones particulares de cada afloramiento, la probabilidad de que ocurra un deslizamiento en diferentes segmentos del túnel, observándose que el **factor determinante** es el **agua subterránea**, ya que influye negativamente en los parámetros que controlan la estabilidad como la fricción y la cohesión de las discontinuidades. Esto es crucial para proponer medidas de mitigación de riesgos que incrementen la seguridad estructural de los Túneles de Loma Larga.



CAPÍTULO 6 Hidrogeología

6.1 Hidrología

6.1.1 Precipitaciones

Se realizó el análisis de las precipitaciones en el Área Metropolitana de Monterrey (AMM) y de en el estado de Nuevo León, para entender cómo los eventos climáticos extremos pueden afectar la estabilidad de infraestructuras críticas, cómo los túneles de Loma Larga. Estos túneles, desempeñan un papel importante en la conectividad vial del AMM y se encuentran situados en una zona montañosa por lo que están expuestos a riesgos asociados con la infiltración de agua sujeta a cambios estacionales.

Este estudio abarca un periodo desde el inicio de la construcción de los túneles, en 1994 hasta el año 2022, prestando especial atención a los años y meses con mayor precipitación y relacionándolos con eventos meteorológicos extraordinarios como huracanes y tormentas tropicales. Los datos fueron obtenidos del Servicio Meteorológico Nacional y CONAGUA (Anexo 3).

Se identificaron los años y meses con precipitaciones significativamente superiores al promedio, los cuales están directamente relacionados con la ocurrencia de eventos climáticos extraordinarios. Se exploró cómo estos picos de lluvia pueden influir en la integridad estructural del túnel, el aumento de las filtraciones y a la disminución de la resistencia de la roca circundante.

El análisis de los datos de precipitación anual revela años con precipitaciones mayores a la media, los que tiene implicaciones directas para el mantenimiento y la estabilidad de los Túneles Loma Larga.

- **1988, huracán Gilberto:**
 - **Precipitación anual total:** 777.7 mm
 - **Detalles:** este año se caracterizó por una precipitación extremadamente alta en septiembre (258.7 mm), debido al Huracán Gilberto. Este fue uno de los huracanes más devastadores en la historia de México, afectando gravemente el noreste del país, incluyendo Nuevo León. Aunque en esta época los túneles de Loma larga todavía no se construían, las lluvias intensas habrían aumentado las filtraciones de agua en el Túnel de Loma Larga, generando una presión hidrostática significativa, afectando negativamente la resistencia de la roca, favoreciendo la erosión y formación de grietas.



Figura 6.1. Río Santa Catarina después del huracán Gilberto. Tomada de Periódico El Mañana.

- **2005, huracanes Emily y Stan:**

- **Precipitación anual total:** 919.2 mm

- **Detalles:** en este año, Nuevo León experimentó dos huracanes significativos: Emily en julio y Stan en octubre. Emily contribuyó a la alta precipitación en julio (329.9 mm), mientras que Stan lo hizo en octubre (235.8 mm). Estos eventos pudieron haber generado condiciones críticas en el túnel de Loma Larga como erosión de la roca y de los materiales de construcción.



Figura 6.2. Daños causados en Monterrey por huracán Emily. Tomada de Periódico Hoy.

- **2010, huracán Alex:**

- **Precipitación anual total:** 1,231.2 mm

- **Detalles:** el huracán Alex que impactó en junio de 2010, es responsable de la mayor precipitación anual registrada en el periodo de estudio. Con 209.6 mm en junio y 322.2 mm en septiembre, Alex provocó inundaciones masivas y

daños en la infraestructura de Monterrey. Las consecuencias para el túnel de Loma Larga habrían incluido un aumento en las filtraciones y una posible reducción en la estabilidad de las rocas circundantes debido a la saturación y la presión hidrostática adicional.

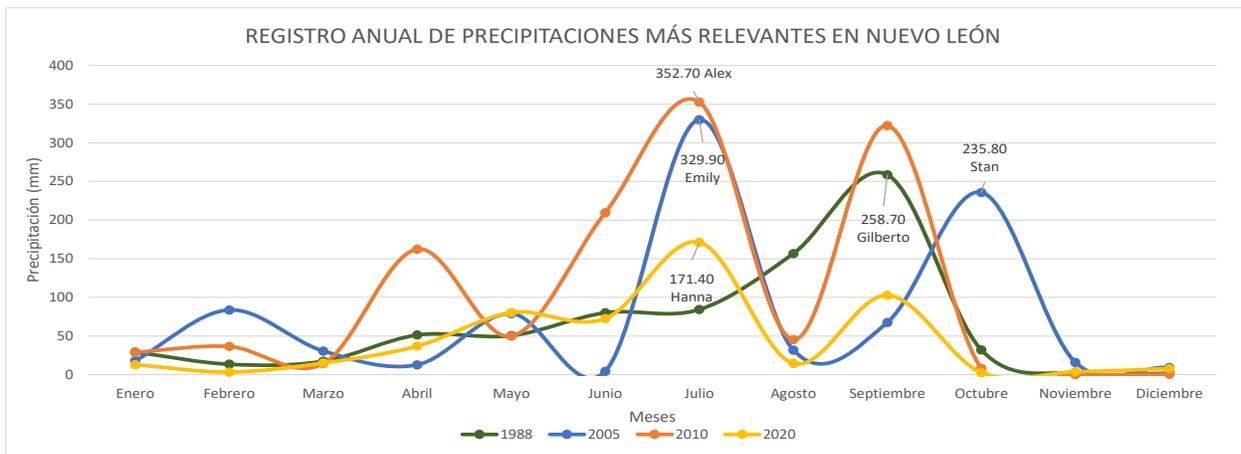


Figura 6.3. Daños causados por el huracán Alex en 2010. Tomada de Centro Nacional de Prevención de Desastres: Gobierno de México.

- **2020, tormenta tropical Hanna:**
 - **Precipitación anual total:** 525.4 mm
 - **Detalles:** la tormenta tropical Hanna causó una precipitación significativa de 171.4 mm en julio, aunque menos intensa que los huracanes mencionados, todavía representó un riesgo considerable para la infraestructura del AMM incluyendo al Túnel de Loma Larga, especialmente en términos de filtraciones y la saturación de las rocas, lo que puede comprometer la estabilidad a largo plazo.



Figura 6.4. Río Santa Catarina al 40% de su capacidad después del paso de la tormenta tropical Hanna.



AÑOS CON MAYOR PRECIPITACIÓN EN NUEVO LEÓN													
Año / Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Annual
1988	29.3	13.60	17.50	51.40	50.60	80.20	84.40	156.70	258.70	32.20	1.20	1.90	777.70
2005	18.10	83.70	30.60	12.80	78.90	4.50	329.90	31.90	67.50	235.80	16.10	9.40	919.20
2010	29.10	36.50	14.30	162.40	49.90	209.60	352.70	45.50	322.20	8.40	0.00	0.60	1,231.20
2020	13.00	3.50	15.20	37.00	80.50	72.70	171.40	14.80	102.80	2.70	3.80	8.00	525.40
Promedio histórico	2.98	4.58	2.59	8.79	8.66	12.23	31.28	8.30	25.04	9.30	0.70	0.66	115.12

Figura 6.5. Gráfica de años con mayor precipitación histórica en Nuevo León

A partir del análisis anual, se observó que las precipitaciones mensuales revelan patrones importantes en diferentes meses del año, destacando la influencia de eventos meteorológicos extraordinarios y variabilidad climática de la región. A continuación, se detallan los meses con mayores precipitaciones y eventos asociados:

- **Junio:** este mes marca el inicio de la temporada de lluvias en Nuevo León, y en años como 1999, 2007 y 2010, registró precipitaciones significativas. En junio de 2010, se registraron 209.6 mm lo que contribuyó a un año de precipitaciones altas además del huracán Alex. Aunque no fue el mes más lluvioso, junio establece las condiciones para las fuertes lluvias que típicamente ocurren en los meses siguientes.
- **Julio:** es un mes crítico debido a la alta frecuencia de huracanes y tormentas tropicales que afectan la región. En el 2010, el huracán Alex causó 352.7 mm de precipitación, lo que lo convierte en uno de los meses más lluviosos en la historia reciente de Nuevo León. De manera similar, en el 2005, el huracán Emily trajo 329.9 mm, lo que tuvo un impacto significativo en la infraestructura local.
- **Agosto:** aunque no siempre es el mes con la precipitación más alta, ha registrado eventos significativos como en 1988, donde las lluvias acumuladas alcanzaron 156.7 mm antes del impacto del huracán Gilberto en septiembre. Este mes suele preparar el terreno para las fuertes precipitaciones de finales de verano, saturando los suelos y aumentando el riesgo de deslizamientos en áreas montañosas.
- **Septiembre:** este es tradicionalmente el mes con las precipitaciones más altas, principalmente debido a la temporada de huracanes. En 1988, septiembre fue el mes más lluvioso con 258.7 mm debido al huracán Gilberto. Este patrón se repite en otros años, desde 1994 hasta la fecha suele ser el mes más lluvioso. Este mes representa un desafío considerable para la infraestructura debido a la alta acumulación de agua que puede llevar a inundaciones y problemas de estabilidad en estructuras como carreteras, puentes y los túneles.

- Octubre:** aunque generalmente menos intenso que septiembre, este mes puede registrar precipitaciones significativas, especialmente en años donde la temporada de huracanes se extiende. En 2005, el huracán Stan trajo 235.8 mm, lo que exacerbó los problemas de drenaje y erosión ya presentes debido a las lluvias anteriores.

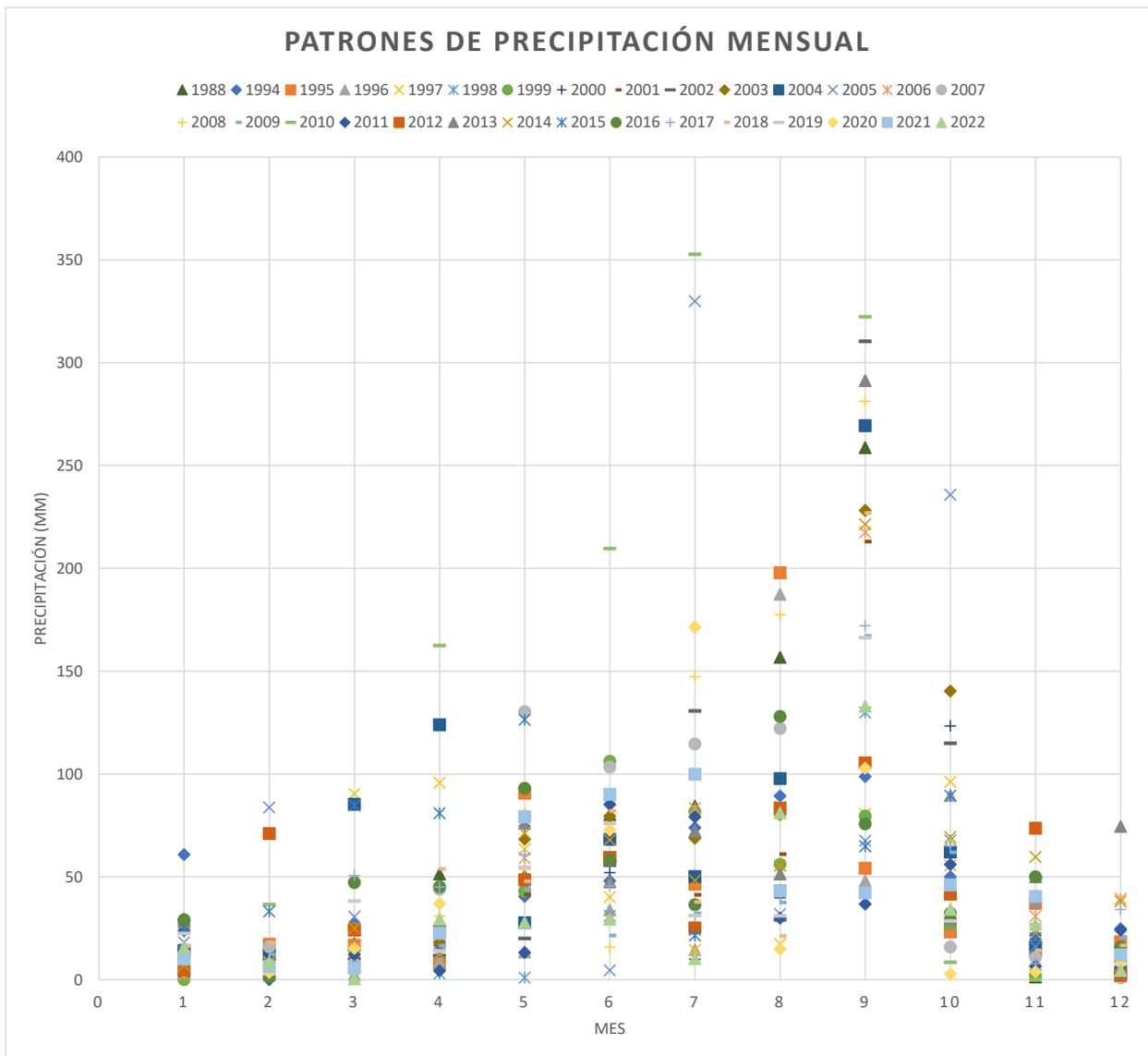


Figura 6.6. Gráfica de patrones de precipitación mensual a lo largo de los años.

REGISTRO DE PRECIPITACIONES DE NUEVO LEÓN 1994 - 2022													
Año / Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Anual
1988	29.3	13.60	17.50	51.40	50.60	80.20	84.40	156.70	258.70	32.20	1.20	1.90	777.70
1994	60.80	9.00	27.10	16.70	40.40	48.00	73.80	89.30	98.70	50.00	21.50	24.70	560.00
1995	12.00	17.20	16.80	8.00	90.70	59.20	46.40	197.80	54.10	23.20	37.10	18.40	580.90
1996	3.40	2.60	2.40	8.30	13.50	33.80	14.50	187.40	48.00	89.50	7.20	2.70	413.30
1997	9.80	12.60	90.30	95.70	63.50	40.10	14.40	17.30	80.60	96.20	22.70	4.40	547.60
1998	1.90	15.90	23.90	2.90	0.90	31.00	24.00	84.00	129.80	67.70	37.40	2.40	421.80
1999	0.00	1.50	24.80	20.50	43.00	106.20	81.70	56.10	79.50	26.90	2.00	9.20	451.40
2000	7.80	13.50	8.70	18.60	74.90	52.00	9.90	39.80	75.80	123.30	19.80	8.90	453.00
2001	14.00	16.60	22.00	25.80	41.40	57.60	41.20	61.00	213.00	41.00	49.60	6.90	590.10
2002	2.30	5.90	10.10	11.70	20.00	55.60	130.60	29.10	310.40	114.90	11.90	1.40	703.90
2003	26.60	7.70	13.80	18.10	68.30	79.40	68.70	80.20	228.10	140.30	17.70	15.40	764.30
2004	14.20	12.20	85.30	123.90	27.70	68.20	50.10	97.70	269.30	62.00	16.10	3.50	830.20
2005	18.10	83.70	30.60	12.80	78.90	4.50	329.90	31.90	67.50	235.80	16.10	9.40	919.20
2006	2.10	8.60	14.90	21.70	59.10	29.40	83.40	52.00	217.50	55.50	30.80	39.30	614.30
2007	28.10	16.00	7.60	43.90	130.30	103.30	114.60	122.10	105.20	15.80	10.80	0.80	698.50
2008	29.40	5.20	7.50	30.90	53.60	15.90	147.30	177.50	281.10	66.50	6.20	3.00	824.10
2009	13.50	12.30	7.90	16.50	43.90	21.50	32.20	37.50	167.10	61.90	48.10	20.70	483.10
2010	29.10	36.50	14.30	162.40	49.90	209.60	352.70	45.50	322.20	8.40	0.00	0.60	1,231.20
2011	23.80	0.00	12.10	4.30	13.20	85.10	79.10	29.90	36.80	55.90	6.50	24.10	370.80
2012	4.90	71.00	24.00	23.40	48.50	59.40	25.20	83.30	105.40	41.60	73.60	2.10	562.40
2013	28.00	2.50	6.60	27.20	76.00	47.50	72.10	51.30	291.30	29.70	50.00	74.50	756.70
2014	7.00	8.10	24.90	12.20	71.10	68.00	48.20	55.40	221.40	69.30	59.70	38.10	683.40
2015	24.90	33.20	84.70	80.90	126.40	89.70	21.50	42.90	64.80	89.40	20.10	3.60	682.10
2016	29.10	1.50	47.20	45.20	93.00	58.00	36.40	128.00	75.70	32.20	50.00	15.90	612.20
2017	10.20	7.40	50.60	45.00	60.70	45.60	31.00	40.60	172.10	64.90	7.80	34.20	570.10
2018	16.50	18.00	3.60	53.80	47.90	82.00	37.80	21.30	226.90	46.60	14.20	16.60	585.20
2019	22.50	2.80	38.20	13.90	54.60	75.90	31.10	31.00	166.20	28.60	26.70	7.50	499.00
2020	13.00	3.50	15.20	37.00	80.50	72.70	171.40	14.80	102.80	2.70	3.80	8.00	525.40
2021	10.00	6.40	5.50	22.60	79.20	90.10	99.90	43.20	42.10	46.10	40.40	12.00	497.50
2022	15.70	8.50	0.30	29.40	27.80	29.30	10.20	81.10	132.90	34.20	26.90	4.40	400.70
Promedio histórico	16.93	15.12	24.61	36.16	57.65	63.29	78.79	72.86	154.83	61.74	24.53	13.82	620.34

*Datos de CONAGUA y Servicio Meteorológico Nacional

Tabla 6.1. Datos históricos de precipitaciones en el Área Metropolitana de Monterrey.

Este análisis mensual de las precipitaciones muestra la variabilidad y los patrones que se repiten cada año, subrayando la importancia de comprender cómo estos eventos afectan la distribución de agua y la estabilidad de la infraestructura de la región.

6.1.2 Escorrentía Superficial

El Área metropolitana de Monterrey (AMM), es una región caracterizada por su topografía montañosa y un clima semiárido que presenta precipitaciones estacionales, principalmente concentradas entre los meses de junio y septiembre.

La escorrentía superficial en el AMM es influenciada significativamente por su geografía donde la Sierra madre Oriental juega un papel crucial en la captación de agua y la dirección de los flujos superficiales. Las precipitaciones intensas a menudo asociadas con huracanes y tormentas tropicales generan flujos de agua considerables que se

movilizan rápidamente hacia los sistemas fluviales, lo que puede llevar a situaciones de inundación en áreas urbanas.

Entre los ríos más importantes que atraviesan el AMM se encuentran el Río Santa Catarina y el Río Pesquería.

- **Río Santa Catarina:** es el más emblemático de Monterrey ya que atraviesa toda la ciudad y ha sido testigo de numerosos eventos de escorrentía extrema, particularmente durante los huracanes. A pesar de ser un cause seco la mayor parte del año, durante eventos extremos como el huracán Gilberto en 1988, ha alcanzado caudales de hasta 4,000 metros cúbicos sobre segundo (m^3/s).

Se tiene registro histórico de una de las inundaciones más catastróficas en Monterrey, ocurrida el 27 de agosto de 1909, que después de fuertes lluvias, el caudal del río Santa Catarina aumentó alrededor de 6,500 m^3/s y haber inundado un área urbana de al menos 200 m^2 que causó la destrucción de construcciones, caminos, puentes y servicios públicos. La tragedia causó la muerte de 6 mil personas aproximadamente (CICNL, 2021).



Figura 6.7. La gran inundación, 28 de agosto de 1909. Tomada de CICNL, 2021.



Figura 6.8. Daños causados por la inundación de 1909, Barrio Antigo. Tomada de CICNL, 2021.

- **Río Pesquería:** este río atraviesa la parte oriental del AMM, también juega un papel importante en la escorrentía superficial de la región. Al igual que el río Santa Catarina, puede experimentar crecidas rápidas durante eventos de lluvias intensas, lo que representa un riesgo para las comunidades asentadas a lo largo de su curso.

La escorrentía superficial en Monterrey no solo afecta a los ríos y cauces naturales, sino que también impacta considerablemente en la infraestructura urbana. El crecimiento rápido de la ciudad ha reducido la capacidad de infiltración del suelo, incrementando la cantidad de agua que fluye sobre la superficie, lo que, a su vez, aumenta la frecuencia y severidad de las inundaciones. Este fenómeno es particularmente evidente en zonas donde el drenaje pluvial no es adecuado para manejar la creciente cantidad de flujo superficial generado por el desarrollo urbano.

La información del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) señala que la urbanización descontrolada y la falta de planificación adecuada en el manejo de agua pluviales ha empeorado los problemas de drenaje superficial en Monterrey, convirtiendo a las lluvias intensas en una amenaza recurrente para la ciudad. Además, el cambio climático y la modificación de los patrones de precipitación sugieren que los eventos hidrológicos extremos podrían volverse más frecuentes y severos, lo que subraya la necesidad de mejorar las estrategias de gestión de aguas pluviales en la región.

6.2 Agua subterránea

6.2.1 Acuífero del Área Metropolitana de Monterrey

El acuífero del AMM se localiza en la porción centro -occidental del estado de Nuevo León, en la región hidrológica 24 *Bravo-Conchos*. Este acuífero cubre aproximadamente 905 km² y es una fuente crucial de agua subterránea para una de las áreas más densamente pobladas e industrializadas de México. Su extensión geopolítica incluye municipios clave como San Pedro Garza García, Monterrey, San Nicolás de los Garza, Guadalupe, Juárez y Apodaca, con porciones menores en General Escobedo (CONAGUA, 2024).

El acuífero se encuentra en una región geológicamente diversa, como ya se ha explicado en el Capítulo 3, del Marco Geológico de este trabajo, donde predominan formaciones sedimentarias principalmente de lutitas y calizas del cretácico, y menor proporción del jurásico. Además de sedimentos aluviales que cubren los valles y zonas bajas de la Sierra Madre Oriental. Estas rocas definen dos tipos principales de acuíferos:

1. Acuífero superficial:

Este acuífero libre, es decir que no se encuentra confinado en su parte superior, está compuesto por sedimentos aluviales como arenas y gravas, con una alta permeabilidad que permite la recarga rápida a través de la infiltración de agua de

lluvia y escurrimientos. Sin embargo, su cercanía a la superficie lo hace más susceptible a la contaminación.

2. Acuífero profundo:

Este acuífero se caracteriza por ser semiconfinado o confinado, debido a que está cubierto en base y techo por lutitas y lutitas calcáreas que limitan su recarga. Las fracturas y cavernas en las calizas facilitan el almacenamiento y circulación del agua subterránea, aunque su recarga es más lenta comparada con el acuífero superficial.

Los parámetros hidráulicos del acuífero varían considerablemente según el tipo de material geológico. Los valores medios de transmisividad van desde 2.3×10^{-4} hasta 13.1×10^{-3} m²/s. La conductividad hidráulica también muestra variaciones, desde 1.15×10^{-3} hasta 1.16×10^{-1} m/s en depósitos aluviales, y de uno 1.15×10^{-7} a 9.5×10^{-4} m/s en las lutitas fracturadas (CONAGUA, 2024)

El análisis piezométrico de CONAGUA revela que, en 2014, la profundidad del nivel estático oscilaba entre 5 y 40 metros, dependiendo de la topografía de la región. Las elevaciones de nivel estático varían entre 360 y 650 m.s.n.m., con un flujo subterráneo predominante en dirección W-E y SW-NE, principalmente hacia el acuífero vecino El Carmen-Salinas-Victoria.

Por otro lado, la calidad del agua subterránea ha sido influenciada por la geología local, presentando una concentración de sólidos totales disueltos (STD) que oscila entre 850 y 7300 mg/l (CONAGUA, 2024), con valores superiores al límite permisible de 1000 mg/l según la NOM-127-SSA1-2021. Las aguas se clasifican en tres familias principales según su composición química: sódica-sulfatada, sódico-clorurada y cálcica-bicarbonatada. Estas variaciones están relacionadas con la composición de las rocas que constituyen el acuífero.

El acuífero del AMM es principalmente explotado para uso industrial y en menor cantidad para otros usos como agua potable, servicios, agricultura y entre otros.

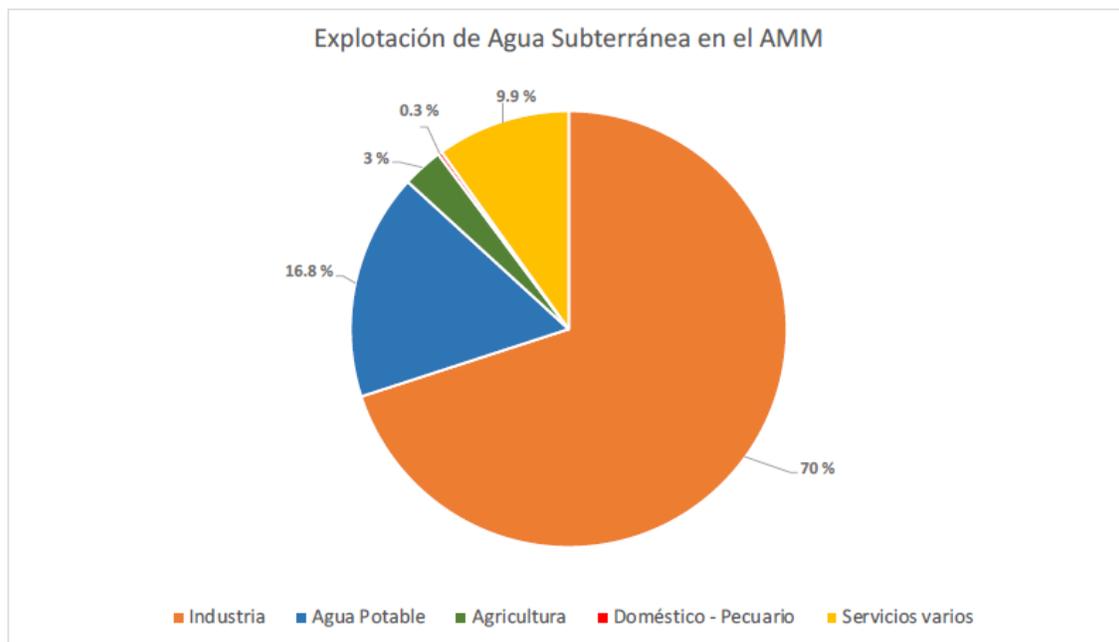


Figura 6.9. Gráfica de extracción de agua del agua subterránea del Área Metropolitana de Monterrey. Datos de CONAGUA.

El balance hídrico que reporta CONAGUA en sus fuentes reporta para el periodo entre 2000 a 2012 la recarga total media anual del acuífero del AMM es de 143.7 hm³/año, mientras que la descarga natural comprometida es de 45.8 hm³/año. El volumen de extracción de aguas subterráneas se estima en 110.3 hm³/año. Esto da como resultado una disponibilidad media anual de agua subterránea negativa, con un déficit de 12.4 hm³/año, lo que indica una sobreexplotación del acuífero.

De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua, las zonas de recarga más importantes del acuífero AMM se encuentran en las áreas de alta permeabilidad, como las planicies aluviales y las estribaciones de las sierras. Sin embargo, la creciente urbanización ha reducido la capacidad de recarga natural. Para mitigar este problema se han propuesto estrategias como la recarga artificial, la regulación más estricta de la extracción y la conservación de las áreas de recarga.

6.2.2 Evaluación hidrogeológica del área de estudio

La evaluación hidrogeológica del Área Metropolitana de Monterrey (AMM) se ha basado en un análisis detallado de las cartas piezométricas elaboradas para los años 2000, 2006, 2010 y 2012. Estos mapas fueron desarrollados utilizando datos piezométricos obtenidos de Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), que ha monitoreado de manera sistemática el comportamiento del acuífero del AMM a lo largo de los años. Aunque CONAGUA ha realizado estudios más recientes del acuífero, los datos públicos disponibles de pozos en el área de estudio se limitan hasta el año 2012.

El análisis de estas cartas piezométricas permite observar la evolución del nivel piezométrico en diferentes periodos, lo que es esencial para comprender la dinámica del flujo subterráneo en la región. La comparación de los datos a lo largo de los años seleccionados ofrece una visión detallada de las tendencias en el descenso o ascenso del nivel freático, así como de los posibles impactos de la extracción intensiva de agua subterránea.

Las cartas piezométricas se elaboraron para los años 2000, 2006, 2010 y 2012 muestran las variaciones en las direcciones de flujo subterráneo en el área del Túnel Loma Larga, véase el Anexo 4 para más detalle sobre los datos piezométricos.

Estas cartas piezométricas muestran cómo el nivel freático ha variado a lo largo de los años, con una tendencia general hacia el descenso en ciertas áreas, lo que indica una posible sobreexplotación del acuífero en algunos puntos críticos. Las direcciones de flujo subterráneo, corresponden en gran medida a los sistemas de fracturamiento que dominan la geología estructural de la sierra de Loma Larga.

Año 2000:

- **Nivel piezométrico:** muestra un nivel freático relativamente elevado, con valores que varían entre aproximadamente 453.5 y 571.8 m.s.n.m. Los pozos muestran una distribución de isolíneas que indican áreas de recarga y descarga, con gradientes piezométricos moderados.
- **Flujo subterráneo:** se observa que sigue las fracturas principales del área, con un movimiento predominante hacia el noreste, siguiendo direcciones de flujo preferenciales controladas por el sistema de fracturamiento tipo *ac*.

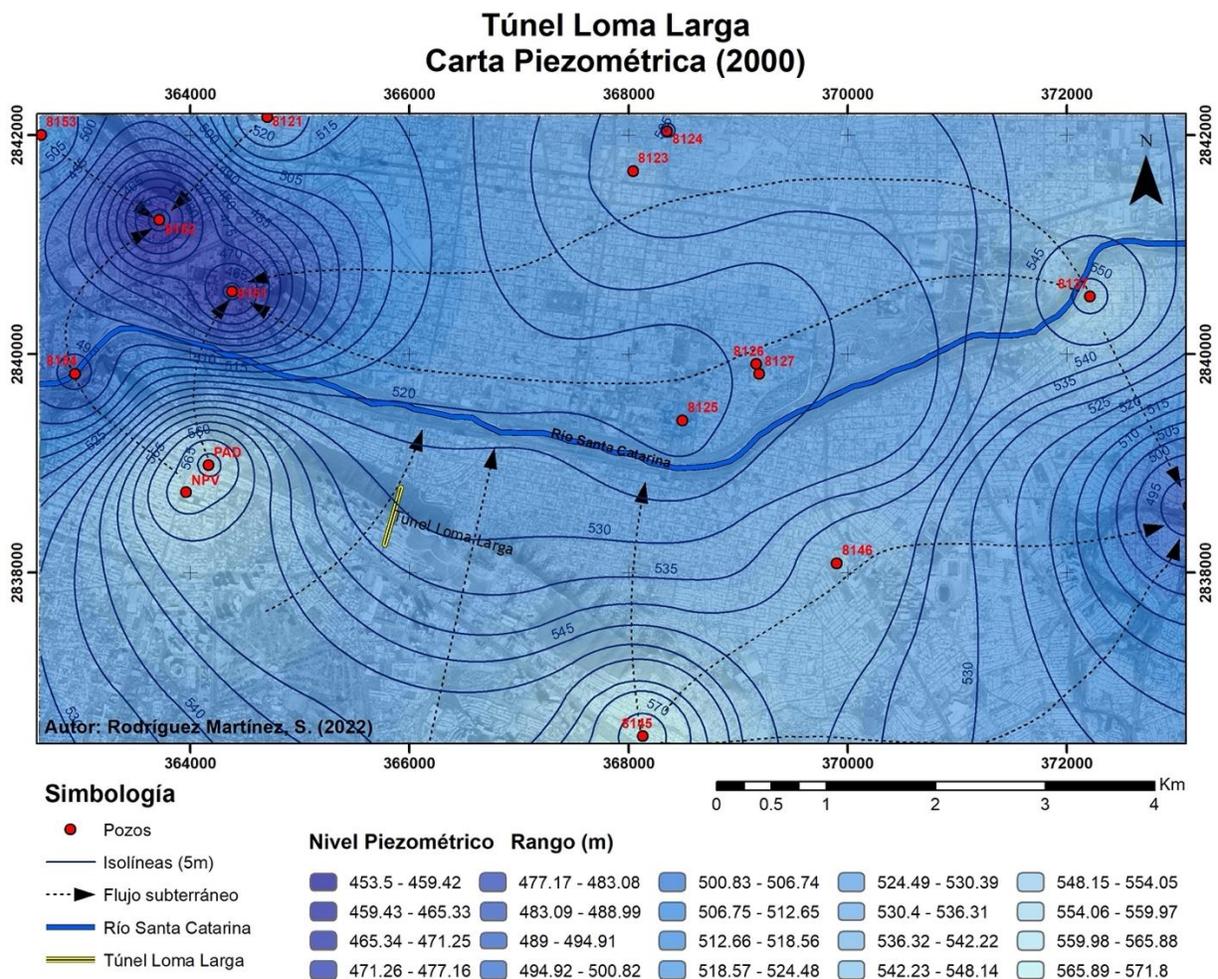


Figura 6.10. Carta piezométrica del año 2000 del área de estudio.

Año 2006:

- **Nivel piezométrico:** en comparación con el año 2000, la carta piezométrica de este año muestra un leve descenso en los niveles piezométricos en algunas áreas, aunque los valores generales se mantienen en un rango similar, de 399.27 a 627.57 m.s.n.m.
- **Flujo subterráneo:** sigue mostrando una clara dirección noreste, con algunas variaciones locales debidas a las estructuras geológicas. La influencia del río Santa Catarina es evidente en el desvío de algunas líneas de flujo hacia el cauce y conos de abatimiento por extracción de agua en pozos.

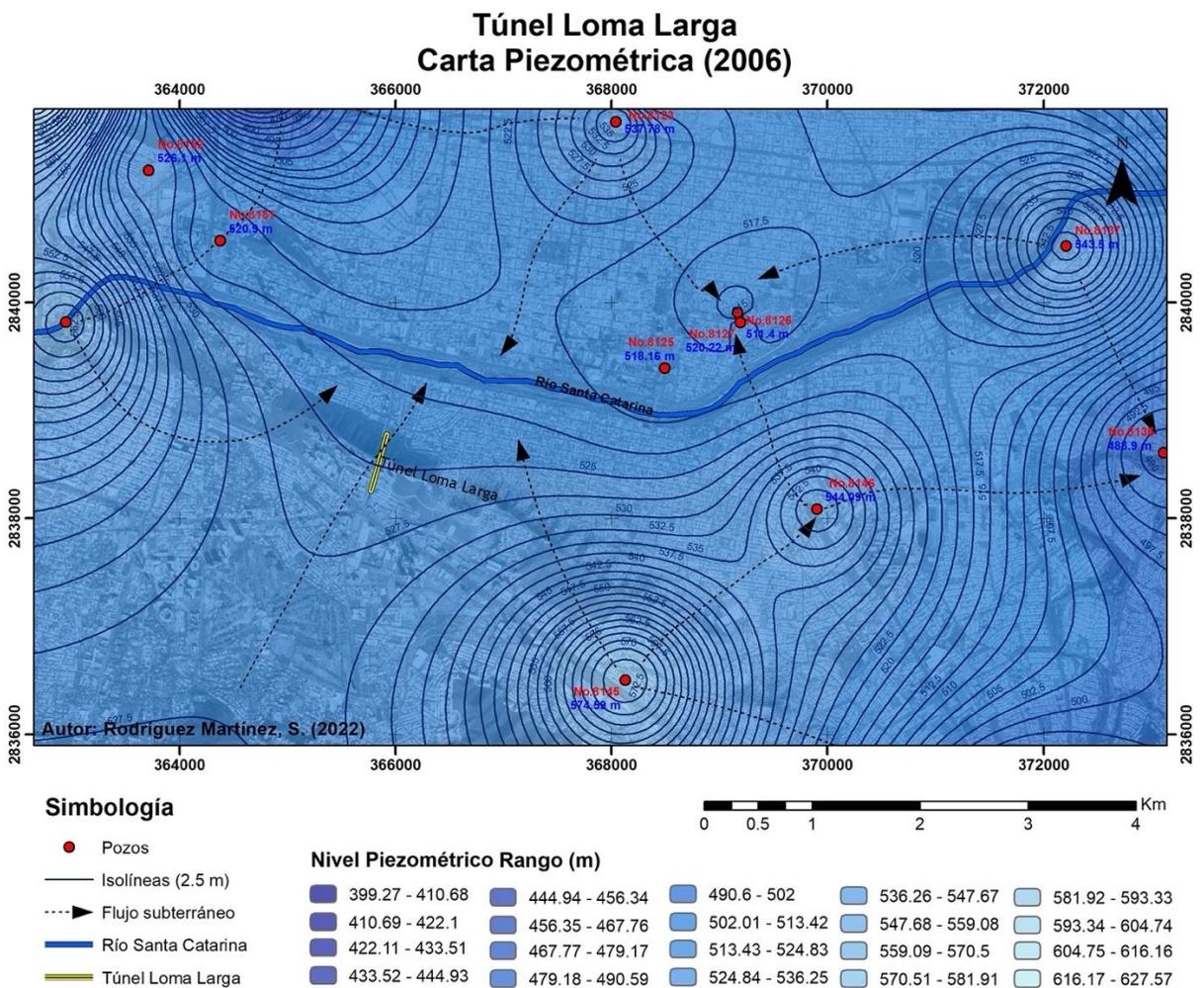


Figura 6.11. Carta piezométrica del año 2006 del área de estudio.

Año 2010:

- **Nivel piezométrico:** se observa un patrón piezométrico que indica un descenso adicional en los niveles de agua subterránea en ciertas áreas, particularmente en la parte oriental del área de estudio. Los niveles piezométricos varían entre 1.01 y 35.98 m de profundidad respecto a la superficie del terreno.
- **Flujo subterráneo:** las direcciones muestran un patrón general hacia el noreste, alineado con los sistemas de fracturas principales. Hay indicios de zonas de descarga cerca del río Santa Catarina, donde las isolíneas se acercan, sugiriendo una posible interacción entre el acuífero y el cuerpo de agua superficial.

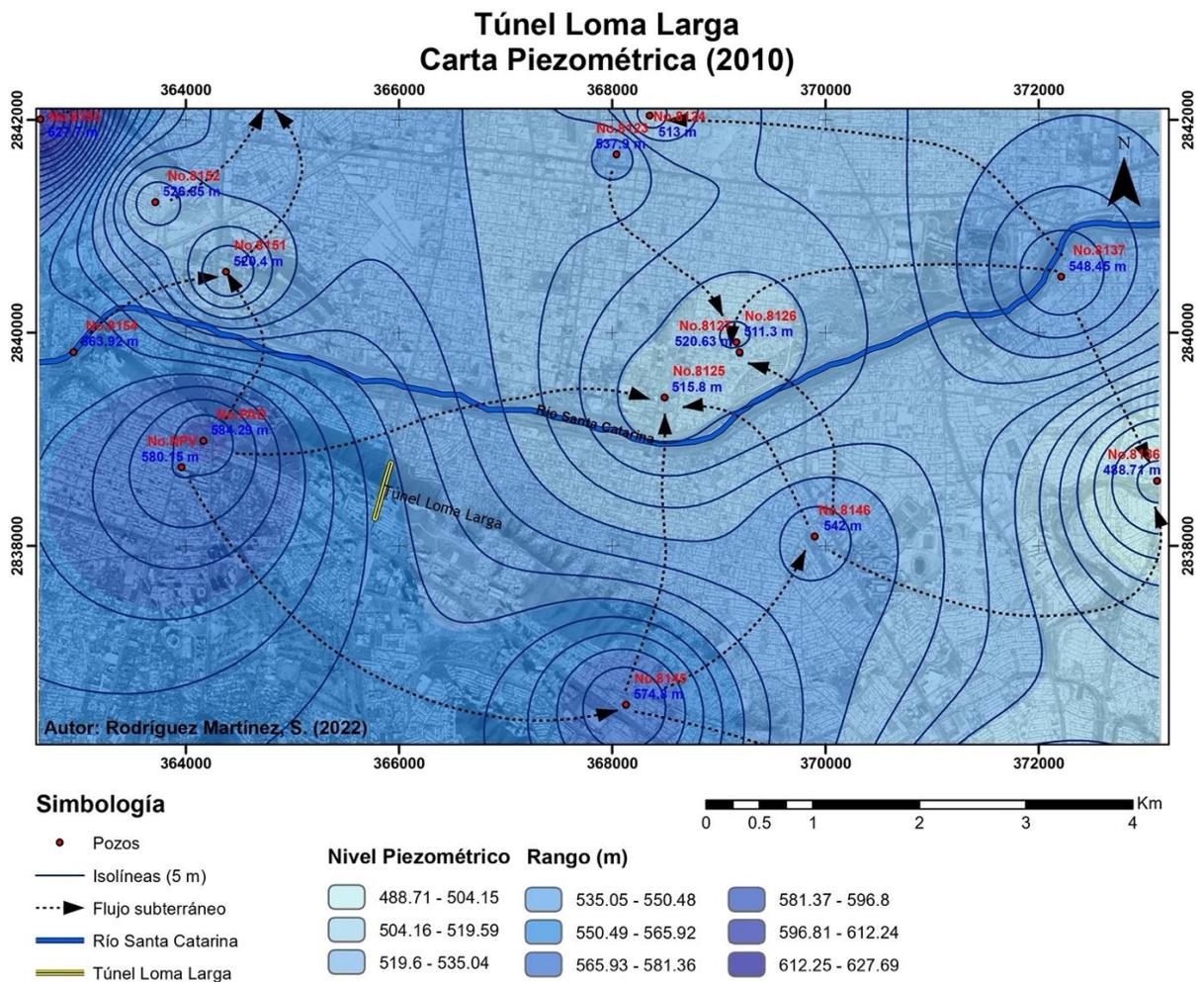


Figura 6.12. Carta piezométrica del año 2010 del área de estudio.

Año 2012:

- **Nivel piezométrico:** la carta piezométrica del año 2012 refleja una mayor consolidación de los descensos observados en años anteriores, con niveles piezométricos que van de 1.01 a 29.99 m de profundidad respecto a la superficie.
- **Flujo subterráneo:** el flujo subterráneo mantiene su dirección preferencial hacia el noreste, continuando la tendencia observada en años anteriores. El gradiente piezométrico en esta carta sugiere un flujo más rápido en ciertas áreas, posiblemente debido a la mayor presión ejercida por la extracción de agua.

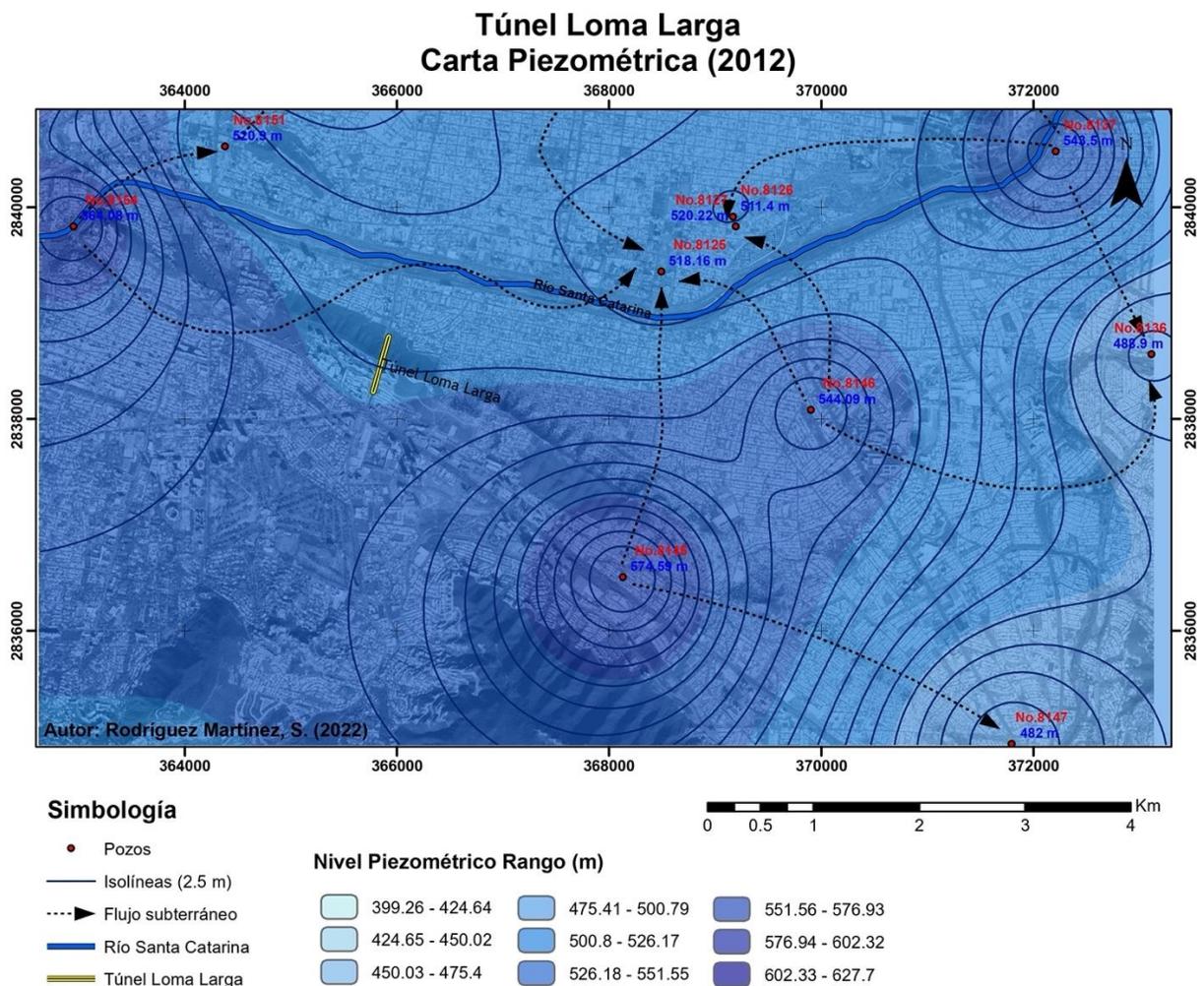


Figura 6.13. Carta piezométrica del año 2012 del área de estudio.

El análisis de las cartas piezométrica indica una tendencia de descenso en los niveles piezométricos a lo largo del tiempo, lo que puede estar asociado a la sobreexplotación del acuífero en ciertas áreas alrededor del Túnel Loma Larga, confirmado por la presencia de conos de abatimiento en todas las cartas analizadas, lo que indica la extracción de agua en los pozos de la región, lo cual es especialmente común en acuíferos de zonas urbanas como el del Área Metropolitana de Monterrey.

Según los datos disponibles, el Túnel Loma Larga se encuentra a una elevación que varía entre los 590 y 660 m.s.n.m. Las cartas piezométricas elaboradas para los años 2000, 2006, 2010 y 2012 muestran que, en condiciones normales, el nivel freático en las áreas circundantes se sitúa generalmente por debajo del túnel. Sin embargo, durante la época de lluvias se ha observado que el nivel freático puede subir significativamente, alcanzando casi el nivel de la carpeta asfáltica del túnel, lo cual se ha confirmado en visitas a campo, y se ha observado el brote de un pequeño manantial (Figura 6.14.) en la sección central del túnel, especialmente el de sentido Monterrey – San Pedro. Esto sugiere que el túnel puede estar parcialmente sumergido durante periodos de lluvias, especialmente en las secciones de menos elevación, lo que incrementa el riesgo de filtraciones.

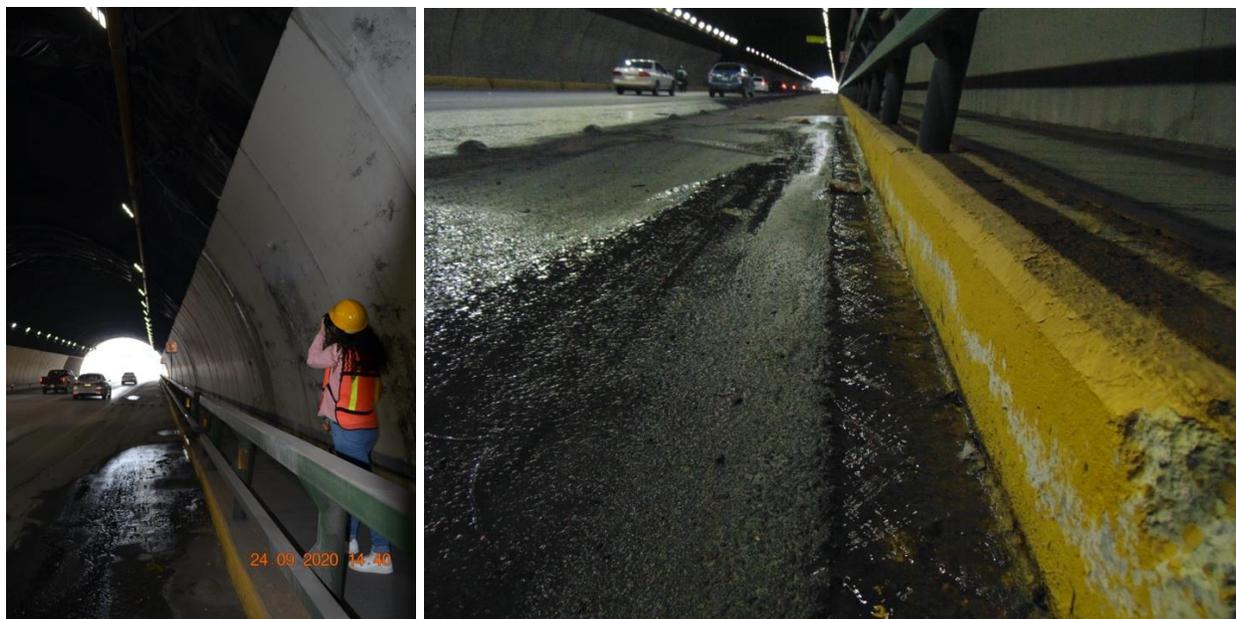


Figura 6.14. Fotografía del manantial que brota a nivel de carpeta asfáltica en el TLL.

El análisis de las direcciones de flujo subterráneo revela que, aunque el túnel se encuentra por encima del nivel freático en condiciones normales, el flujo subterráneo durante las lluvias podría facilitar la infiltración de agua. Este fenómeno es especialmente relevante en áreas donde los sistemas de fracturamiento tipo ac, que son perpendiculares al eje del anticlinal de Loma Larga, actúan como conductos preferenciales para el agua subterránea. Estas fracturas podrían conectar el acuífero superficial con el túnel, permitiendo la entrada de agua durante periodos de alta recarga.

Además, se ha registrado que un pozo cercano al túnel, operado por Agua y Drenaje de San Pedro Garza García, ha experimentado derrames de agua durante precipitaciones intensas (Figura 6.15), lo que indica que el nivel freático puede subir hasta alcanzar el nivel del terreno natural. Estos hechos subrayan la importancia de un monitoreo constante y la necesidad de implementar medidas de mitigación efectivas para controlar las infiltraciones y proteger la infraestructura del túnel.



Figura 6.15. Derrame del pozo de Agua y Drenaje durante periodos de abundante precipitación en época de tormentas

El río Santa Catarina, que fluye cerca del túnel, también puede influir en el comportamiento del nivel freático durante eventos de lluvia intensa en épocas de huracanes, como ocurrió durante Alex en 2010. El aumento temporal del nivel del río puede incrementar el nivel freático en las áreas adyacentes al túnel, agravando las condiciones de infiltración, especialmente en zonas donde las fracturas subterráneas están conectadas al cauce del río.

CAPÍTULO 7 Conclusiones y recomendaciones

El propósito de esta investigación fue evaluar las condiciones geológicas, geomecánicas e hidrogeológicas que afectan la estabilidad del Túnel Loma Larga, ubicado en San Pedro Garza García, Nuevo León, México. Esta tesis se enfoca en la comprensión del papel que desempeñan factores como la litología, los sistemas de fracturamiento y la presencia de agua subterránea en la estabilidad de la estructura del túnel, además, se explora cómo eventos climáticos, como las precipitaciones influyen en la infiltración de agua, exacerbando los riesgos para la seguridad del túnel.

La investigación está guiada por la hipótesis de que la existencia de sistemas de fracturamiento, fallas y formaciones geológicas permeables en el anticlinal Loma Larga favorecen el flujo de agua subterránea hacia el túnel. Este flujo de agua no solo deteriora el macizo rocoso y el revestimiento del túnel, sino que también compromete su estabilidad estructural. Se espera que los datos geomecánicos y geológicos obtenidos demuestren que las condiciones actuales del macizo rocoso son desfavorables para la estabilidad actual del túnel, lo cual se complementa con análisis hidrogeológicos que brindan información crítica sobre los mecanismos de falla dentro de la estructura.

7.1 Conclusiones

Las investigaciones previas subrayan la influencia significativa del agua subterránea en los procesos geológicos y en la estabilidad de estructuras subterráneas como los túneles de Loma Larga. La karstificación, especialmente en rocas carbonatadas como las calizas, es un proceso que influye negativamente en la formación de fracturas y cavidades que comprometen la integridad de obras subterráneas. La interacción entre el agua subterránea y los sistemas de fracturamiento facilita la infiltración de agua, acelerando el deterioro tanto del macizo rocoso como del recubrimiento de los túneles.

La presencia de calizas, lutitas y margas en estas formaciones es crucial para entender los procesos de karstificación y la permeabilidad del terreno, lo que afecta directamente la estabilidad del túnel.

El análisis estructural mediante proyecciones estereográficas y la caracterización detallada de los afloramientos, permitió identificar sistemas de fracturamiento que condicionan la estabilidad del túnel. Se reconocieron fracturas tipo *bc*, con una orientación paralela al eje del pliegue, y tipo *ac*, perpendiculares al eje del pliegue, que son las más predominantes y que juegan un papel crucial en la conducción de agua subterránea hacia el Túnel Loma Larga. Además, la presencia de fallas geológicas inversas, causadas por esfuerzos tectónicos compresivos, indica puntos críticos de inestabilidad, y rutas preferenciales de infiltración de agua que se extienden a lo largo de la parte central del anticlinal Loma Larga y que deben ser considerados en cualquier evaluación geológica – geotécnica. Estas estructuras condicionan la respuesta del macizo rocoso a los esfuerzos y son clave en la planificación de medidas de mitigación.

El análisis del macizo rocoso en los sitios estudiados que incluyen Diana Cazadora (DC), Hyundai Penta (HP), Calle Parteaguas (CP), Excavación Cimientos (EC) y Torre Zafiro (TZ), reveló que la calidad de la roca varía de regular a muy mala. En DC, se identificaron dos fallas inversas que han provocado un fracturamiento muy intenso en estos sectores del afloramiento y que se extienden por el centro del anticlinal y cortan a ambos túneles. Este fracturamiento intenso, ha degradado significativamente la calidad del macizo rocoso en esta área reduciendo el tamaño de los bloques y aumentando el riesgo de inestabilidad.

El tamaño de bloque promedio del anticlinal es de tamaño mediano y es equidimensional, de forma prismática o cúbica, aunque hay zonas muy fracturadas donde esta condición no se mantiene y es menor. El valor promedio de J_v es de 7 fracturas/ m^3 , coincidiendo con un tamaño de bloque mediano promedio y una densidad de fractura media, lo que influye en la filtración y flujo de agua subterránea.

La clasificación geomecánica RMR, obtenida fue muy desfavorable en zonas intensamente fracturadas y falladas, y media a regular en zonas de moderado fracturamiento. Sin embargo, los afloramientos del Anticlinal Loma Larga no sobrepasan los 50 puntos de índice RMR y muestran una calidad de la roca muy mala a regular.

Los ensayos de compresión uniaxial realizados en las muestras de cada sitio mostraron que la resistencia a la compresión no varía mucho entre muestras, ya que todas fueron calizas de la Formación San Felipe; no se recuperaron muestras de lutitas por estar demasiado fracturadas. Aun así, muchas muestras estaban naturalmente fracturadas y no pudieron ensayarse.

Las gráficas de esfuerzo – deformación muestran un comportamiento mecánico frágil y frágil – dúctil, como se esperará de rocas rígidas y duras como la caliza. Los valores de resistencia a la compresión uniaxial varían desde 40 MPa hasta 104 MPa, lo que indica una resistencia baja a media de la roca. No obstante, es importante señalar que estas pruebas se realizaron en la matriz sana de la roca, mientras que, en un medio natural, la roca está mucho más fracturada y frágil, lo cual reduce aún más su capacidad de carga.

El módulo de elasticidad obtenido en las muestras, que oscila entre 5.67 GPa y 9.53 GPa, indica que las calizas del área de estudio poseen una rigidez baja a moderada en comparación con otras calizas reportadas en la literatura. Esto sugiere que pueden necesitarse refuerzos adicionales en proyectos que requieren una alta rigidez y mayor resistencia a la deformación. Aunque presentan una elasticidad moderada, esta es insuficiente para absorber grandes deformaciones sin riesgos de falla.

Para el análisis cinemático de los mecanismos de falla y del factor de seguridad (FS), se utilizaron valores unificados de fricción, cohesión, contenido de agua y peso volumétrico de la roca, y revela que todos los afloramientos evaluados del área de estudio muestran una tendencia a formar cuñas inestables.

Los afloramientos DC, HP, CP y TZ mostraron en el análisis cinemático la formación de cuñas inestables con respecto al Túnel Loma Larga (TLL) con una dirección potencial de deslizamiento hacia el SW desde la sección derecha del túnel, orientados hacia el norte. Los factores de seguridad calculados de estos sitios confirman esa posibilidad ya que son menores que 1, lo que indica que son inestables: FS= 0.8, 0.7, 0.6 y 0.4, respectivamente. El sitio de EC, mostraba una posibilidad más baja de formación de cuñas y el FS obtenido fue mayor a 1, FS= 2.1, lo que indica que es estable bajo las condiciones dadas, pero se recomienda monitoreo para verificar que estas condiciones no empeoren.

El análisis de los factores de seguridad y los mecanismos de falla en estos sitios indican que el túnel está en una situación de riesgo ante desprendimientos o deslizamientos de bloques, especialmente en su sección derecha, orientado hacia el norte, debido a la inestabilidad potencial del macizo rocoso en varias áreas clave. Se observó que el factor determinante que controla el comportamiento de otros parámetros que influyen en la estabilidad, es la presencia de agua. Durante épocas de alta precipitación influye negativamente en la fricción y la cohesión de las discontinuidades, aumentando la posibilidad de deslizamiento. Además, la combinación de baja calidad de la roca, alta densidad de fracturamiento, y factores de seguridad marginales o críticos subraya la necesidad de implementar medidas de estabilización para mitigar los riesgos geotécnicos. Estas medidas pueden incluir refuerzos estructurales, monitoreo continuo, y principalmente drenaje como drenes y control de escurrimientos superficiales para asegurar la integridad del TLL a largo plazo.

Por otro lado, el análisis de las precipitaciones en el área de estudio revela que las lluvias intensas pueden generar una escorrentía significativa, afectando la estabilidad de la infraestructura del Área Metropolitana de Monterrey (AMM), edificios, carreteras, puentes y también los túneles de Loma Larga. La creciente urbanización ha reducido la capacidad de infiltración del suelo, aumentando la escorrentía superficial y la posibilidad de inundaciones.

El acuífero AMM es una fuente crucial de agua subterránea y presenta variaciones en los niveles piezométricos, influenciados por el sistema de fracturamiento de la región y la extracción de agua por el consumo industrial y doméstico. Durante eventos de lluvia intensa, el nivel freático puede elevarse, incrementando el riesgo de infiltración de agua en el túnel a través de fracturas conectadas al acuífero superficial, lo que se ha observado como el brote de agua a nivel de la carpeta asfáltica.

La infiltración subterránea es un fenómeno crítico en el área del TLL. Se identificó que las fracturas tipo *ac*, perpendiculares al eje del anticlinal actúan como conductos preferenciales para el flujo de agua subterránea hacia el túnel y para la infiltración de agua de lluvia en la parte superior, lo que ha generado problemas que afectan la integridad estructural del túnel.

Igualmente, el Río Santa Catarina, ubicado cerca del túnel, también puede influir en el nivel freático durante eventos de lluvias intensas, agravando las condiciones de infiltración. La elevación temporal del nivel del río puede incrementar el riesgo de entrada de agua al túnel, especialmente en zonas donde las fracturas subterráneas están conectadas al cauce del río.

Las condiciones hidrológicas actuales del área de estudio representan un desafío significativo para la estabilidad del Túnel Loma Larga. Se recomienda la implementación de estrategias de mitigación para controlar la infiltración y proteger la infraestructura del túnel, así como un monitoreo continuo del nivel freático y las condiciones de escorrentía para prevenir futuros problemas.

En conclusión, la investigación confirma que la estabilidad del Túnel Loma Larga está fuertemente influenciada por la interacción de factores geológico – estructurales, geomecánicos, hidrogeológicos y climáticos, especialmente la presencia de agua subterránea y la calidad del macizo rocoso. Los hallazgos destacan la importancia de evaluar continuamente estos factores para garantizar la integridad a largo plazo del túnel. El estudio refuerza la necesidad de adoptar un enfoque preventivo y multidisciplinario en

la gestión de la estabilidad de infraestructura subterránea, especialmente en entornos urbanos con condiciones geológicas complejas.

7.2 Contribuciones y Limitaciones

Este estudio aporta una evaluación detallada que destaca la interrelación entre los factores geológicos y climáticos y su impacto en la estabilidad de infraestructuras subterráneas en áreas urbanas. Los hallazgos subrayan la necesidad de un enfoque preventivo en la gestión de la estabilidad del Túnel Loma Larga, recomendando la implementación de medidas de estabilización y monitoreo continuo para mitigar los riesgos geotécnicos. La investigación contribuye al campo de la geología aplicada y la ingeniería civil al proporcionar conocimientos aplicables a otros proyectos de infraestructura en regiones con condiciones geológicas y climáticas similares.

Una de las limitaciones de este estudio radica en que los ensayos de compresión uniaxial se realizaron en muestras que, aunque representativas, no capturan completamente la variabilidad natural del macizo rocoso en un entorno altamente fracturado. Para futuras investigaciones, sería beneficioso llevar a cabo estudios más amplios que incluyan un mayor número de muestras y el uso de técnicas avanzadas de modelado numérico para simular con mayor precisión el comportamiento del macizo rocoso bajo diferentes condiciones de carga y presencia de agua subterránea.

Adicionalmente, se recomienda realizar estudios a largo plazo que monitoreen la evolución de las condiciones geológicas e hidrogeológicas del macizo rocoso en respuesta a eventos climáticos extremos como huracanes y cambios en el nivel freático, lo que permitirá ajustar las estrategias de mitigación y manejo de riesgos geológicos en el túnel.

7.3 Recomendaciones

Con base en los problemas más significativos identificados en el Túnel Lomar Larga, se proponen las siguientes recomendaciones para mejorar sus condiciones estructurales y operativas:

1. Instalación de drenes verticales:

- Se recomienda la colocación de drenes verticales en el techo del túnel con un espaciado adecuado para controlar la infiltración de agua a través de las fracturas. Estos drenes permitirán descargar el flujo de agua, reduciendo las presiones hidrostáticas que se generan cuando la roca está muy saturada.
- Esta medida también disminuirá el goteo dentro del túnel, lo que a su vez reducirá la acumulación de carbonatos y la formación de estalactitas en el techo del túnel.

2. Remoción y sustitución del recubrimiento de concreto:

- En las zonas donde el recubrimiento de concreto este dañado, se recomienda su remoción y sustitución con material de alta calidad.
- En las áreas de falla, se sugiere el uso de malla electrosoldada y anclajes para la fijación, complementando con la aplicación de concreto lanzado con una resistencia a la compresión mínima de $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$. Esto aumentará la resistencia del revestimiento en los puntos críticos.
- Prolongar de manera definitiva la losa de bóveda armada con concreto y acero, en toda la longitud de los 2 túneles

3. Mejoras en la ventilación:

- Implementar un sistema de ventilación adecuado para prevenir la acumulación de gases como el monóxido de carbono (CO) y el dióxido de carbono (CO₂), que provienen de los vehículos que transitan por el túnel.
- Estos gases, además de ser peligrosos para la salud, contribuyen al deterioro del recubrimiento del túnel y acidifican el agua infiltrada, lo que aumenta su capacidad de disolución y deterioro de las estructuras.

4. Control de escurrimientos superficiales:

- Se recomienda la implementación de cunetas adecuadas para el control de los escurrimientos superficiales. Estas cunetas deben diseñarse para canalizar eficientemente el agua de lluvia y prevenir su infiltración hacia el interior del túnel.
- Además, se sugiere el uso de subdrenes debajo de las cunetas para facilitar y aumentar la velocidad de paso del agua subterránea en la sección correspondiente al túnel, evitando así que se acumule o brote en la carpeta asfáltica.

5. Monitoreo continuo de los niveles piezométricos:

- Es crucial implementar un sistema de monitoreo continuo de los niveles piezométricos en el área del túnel, especialmente durante eventos de lluvia intensa y periodos de sequías.
- Esto permitirá detectar de manera temprana cualquier aumento en los niveles de agua subterránea que pudiera comprometer la estabilidad del túnel, y así tomar acciones preventivas oportunas.

6. Revisión y mantenimiento periódico del sistema de drenaje:

- Se debe llevar a cabo una revisión y mantenimiento periódico del sistema de drenaje, tanto interno como externo para asegurar su correcto funcionamiento y evitar la acumulación de agua que pueda afectar la estabilidad del túnel.

7. Implementación de medidas de refuerzo estructural:

- En las áreas más vulnerables del túnel donde se han identificado factores de seguridad bajos se recomienda la implementación de medidas de refuerzo estructural adicionales, como el uso de anclaje, concreto reforzado y sistemas de soporte complementarios.

8. Monitoreo geotécnico y estructural:

- Se sugiere establecer un programa de monitoreo geotécnico y estructural continuo que incluya la medición de espaciamientos, deformaciones y otros indicadores de estabilidad del macizo rocoso y del túnel.
- Este monitoreo puede incluir sensores de presión, inclinómetros, extensómetros y otros instrumentos que permitan evaluar el comportamiento de la estructura bajo diferentes condiciones operativas y ambientales.

9. Implementación de planes de contingencia:

- Se recomienda desarrollar e implementar planes de contingencia que incluyan acciones específicas para la gestión de riesgos relacionadas con

la infiltración de agua, desprendimiento de bloques o del recubrimiento de concreto, entre otros.

- Estos planes deben de estar respaldados por simulacros periódicos y la capacitación del personal encargado del mantenimiento y operación del túnel.

BIBLIOGRAFÍA

- Alanís, R. (2016, October 25). *Descarta Adrián De La Garza riesgo en túnel de la Loma Larga. Milenio*. <https://www.milenio.com/estados/descartan-riesgos-en-tunel-de-la-loma-larga>
- Amao, A. (2017, June 1). *Túnel de la Loma Larga se ha deteriorado con los años. Telediario*. <https://www.multimedios.com/telediario/local/tunel-loma-larga-deteriorado-anos.html>
- ASTM. (1995). D2938-95: Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Intact Rock Core. *ASTM International*, 1–3.
- ASTM. (2005). D4543-04 Standard practices for preparing rock core specimens and determining dimensional and shape tolerances. *ASTM International*, 1–5.
- ASTM. (2012). C 617 – 98:Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens. *ASTM International*, 1–6.
- Barton, N. R. (1978). Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 15, 319–368.
- Bieniawski, Z. T. (1984). *Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling*.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering Rock Mass Clasificacions. A complete manual for engineers and geologist in mining, civil and petroleum engineering*. (John Wiley & Sons, Ed.).

- Briševac, Z., Hrženjak, P., & Cotman, I. (2017). Estimate of Uniaxial Compressive Strength and Young's Modulus of the Elasticity of Natural Stone Giallo d'Istria. *Procedia Engineering*, 191, 434–441.
- Chapa Arce, R. I. (2016). *Análisis de estabilidad de taludes mediante la revisión cinemática del macizo rocoso en la zona poniente de Monterrey (Cerro de la Loma Larga y Mitras Nuevo León, México)*. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Colegio de Ingenieros Civiles de Nuevo León. (2021). *Estudio hidrológico del Área Metropolitana de Monterrey*.
- Comisión Nacional del Agua. (2024). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Área metropolitana de Monterrey (1906), Estado de Nuevo León*.
- Cuesta Recio, A., Almaguer Carmenate, Y., & Otaño Nogueel, J. (2009). Delimitación de zonas susceptibles a filtraciones en el túnel Serones-Salida Guaro del Trascase Este-Oeste. *Minería y Geología*, 25(3), 19.
- Deere, D. U. (1964). Technical description of rock cores for engineering purposes. *Rock Mechanics and Engineering Geology*, 1(1), 16–22.
- Eguiluz de Antuñano, Samuel (PEMEX Exploración, R. R., Aranda García, Mario (PEMEX Exploración, R. R., & Marrett, R. (University of T. at A. (2000). Tectónica de la Sierra Madre Oriental, México. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 53, 1–26.
- Fernández, E., Herrero, N., Lairó, J., Ortiz, I., Peiro, R., & Rossi, C. (1995). Introducción a la Geología Kárstica. In *Federación Española de Espeleología*. Federación Española de Espeleología.

Freeze, R. A. (University of B. C. of G. S., & Cherry, J. A. (University of W. D. of E. S. (1979). *Groundwater* (1st ed.). Prentice Hall, Inc.

Ghorbani, M., Sharifzadeh, M., Yasrobi, S., & Daiyan, M. (2012). Geotechnical, structural and geodetic measurements for conventional tunnelling hazards in urban areas - The case of Niayesh road tunnel project. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 31, 1–8.

González Amuchastegui, M. J. (1998). Geomorfología y etapas de karstificación en la rama Castellana del sistema Ibérico. *Estudios Geograficos*, 59(232), 423–441.

González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002a). *Ingeniería Geológica* (1a ed.). Pearson Prentice Hall.

González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002b). *Ingeniería Geológica* (1a ed.). Pearson Prentice Hall.

Goodman, R. E. (1989). *Introduction to Rock Mechanics* (2nd Edition).

Hancock, P. L. (1985). Brittle microtectonics: principles and practice. In *University of California at Davis* (Vol. 7).

Hiscock, K. M., & Bense, V. F. (2014a). *Hydrogeology: principles and practice* (2nd ed., Vol. 148). Wiley Blackwell.

Hiscock, K. M., & Bense, V. F. (2014b). *Hydrogeology: principles and practice* (2nd ed., Vol. 148). Wiley Blackwell.

Hoek, E. (1994). Strength of rock and rock masses. *ISRM News Journal*, 2(2), 4–16.

Hoek, E., & Bray, J. (1977). *Rock Slope Engineering* (Second Edition).

Hoek, E., & Brown, E. T. (1985). *Excavaciones Subterráneas en Roca*. McGraw Hill.

Hoek, E., & Brown, E. T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(8), 1165–1186.

Hoek, E., Marinos, P., & Benissi, M. (1998). Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist formation. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 57(2), 151–160.

Huang, L., Ma, J., Lei, M., Liu, L., Lin, Y., & Zhang, Z. (2020). Soil-water inrush induced shield tunnel lining damage and its stabilization: A case study. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 97(January 2019).

Huang, S. P., & Guo, M. L. (2015). Analysis and Strategies of the Common Tunnel Problems. *Proceedings of the 2015 International Conference on Artificial Intelligence and Industrial Engineering*, 312–314.

Idris, J., Al-Heib, M., & Verdel, T. (2009). Numerical modelling of masonry joints degradation in built tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(6), 617–626.

ITA, I. T. A. (1991). Report on the damaging effects of water on tunnels during their working life. *Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless*, 6(1), 11–76.

Jaeger, J. C., Cook, N. G. W., & Zimmerman, R. W. (2007). *Fundamentals of Rock Mechanics*. (Blackwell Publishing, Ed.; 4th Edition).

- Karagianni, A., Karoutzos, G., Ktena, S., Vagenas, N., Vlachopoulos, I., Sabatakakis, N., & Koukis, G. (2017). ELASTIC PROPERTIES OF ROCKS. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 43(3), 1165–1168.
- Li, X., Cao, L., & Zhao, X. (2012). Assessment of potential impact of tunneling on the groundwater in Epi-Fissure-Karst-Zone and ecological environment. *Environmental Earth Sciences*, 66(3), 967–976.
- Lisle, R. J., & Leyshon, P. R. (2004). Stereographic Projection Techniques for Geologists and Civil Engineers Second Edition. In Cambridge University Press (Ed.), *Geological Strain Analysis* (Second).
- Mata, I. (2016, October 26). *Cierran túnel por obras de remediación. El Norte*. https://www.elnorte.com/aplicacioneslibre/preacceso/articulo/default.aspx?__rval=1&urlredirect=https://busquedas.gruporeforma.com/buscar/elnorte/documentos/VisorVisorArti.aspx?idComptto=6&slIdIdentificadorParm=1s2075069d&idproducto=2&id=971046&tipoElemento=/articulo/&text=todo&imgUrl=https://img.gruporeforma.com/ii magene/ElementoRelacionado/6/234/5233290.jpg
- Padilla y Sánchez, R. J. (1982). *Geologic Evolution of the Sierra Madre Oriental between Linares, Concepción del Oro, Saltillo and Monterrey, Mexico*. The University of Texas at Austin.
- Padilla y Sánchez, R. J. (1985). Las Estructuras de La Curvatura de Monterrey, estados de Coahuila, Nuevo León, Zacatecas y San Luis Potosi. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 6(1), 1–20.
- Palmstrom, A. (1975). *Characterization of degree of jointing and rock mass quality (Internal Report)*. .

- Sánchez Reyes, F. (2016). El colapso del túnel Xicotepec I: una investigación sobre sus causas y un estudio para su reconstrucción. *Revista de Obras Públicas: Organo Profesional de Los Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos*, 3579, 92–106.
- Santoyo Villa, E., Bermúdez González, E., & Contreras Galván, R. (2014). La aplicación del método Tamez en cinco túneles mexicanos. *Geotecnia. Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica*, 230, 32–36.
- Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT), (2016). *Manual de diseño y construcción de túneles de carretera*.
- Servicio Geológico Mexicano. (2006). *San Felipe, Formación. Cenomaniano Superior - Campaniano Inferior* (pp. 1–5).
- Servicio Geológico Mexicano. (2007). *Agua Nueva, Formación. Cretácico Tardío, Cenomaniano-Turoniano* (pp. 1–6).
- Solheim, E. (2015, April 1). *Túnel Loma Larga registra fugas de agua. Milenio*.
<https://www.milenio.com/estados/tunel-loma-larga-registra-fugas-agua>
- Tan, Y. Q., Smith, J. V., Li, C. Q., & Dauth, J. (2016). Water infiltration estimation in tunnels: With reference to the Melbourne underground. *Transforming the Future of Infrastructure through Smarter Information - Proceedings of the International Conference on Smart Infrastructure and Construction, ICSIC 2016, June*, 597–602.
- Tarbuck, E. J., & Lutgens, F. K. (2008). *Earth: an introduction to physical geology* (9th ed.). Pearson Prentice Hall.
- Thrailkill, J. (Department of G. of K. (1968). Chemical and Hydrologic Factors in the Excavation of Limestone Caves. *Geological Society of America Bulletin*, 79(January), 19–45.

- Twiss, R. J., & Moores, E. M. (1992). *Structural Geology*. W.H. Freeman and Company.
- Vanegas, Z. (2016, October 25). *Caen pedazos del Túnel Loma Larga*. *Milenio*.
<https://www.milenio.com/estados/caen-pedazos-del-tunel-de-la-loma-larga>
- Villasáez, J. (2014, November 7). *Dejan túnel a media luz*. *El Norte*.
<https://www.elnorte.com/aplicacioneslibre/articulo/default.aspx?id=387362&md5=0d1c233d2a20d8f900f711baaabfc63d&ta=0dfdbac11765226904c16cb9ad1b2efe>
- Villasáez, J. (2015, February 16). *Elevan las goteras riesgo en Túnel*. *El Norte*.
<https://www.elnorte.com/aplicacioneslibre/articulo/default.aspx?id=466100&md5=778f5452ed243c020cc3f60e61697dae&ta=0dfdbac11765226904c16cb9ad1b2efe>
- Wang, X., Lai, J., Qiu, J., Xu, W., Wang, L., & Luo, Y. (2020). Geohazards, reflection and challenges in Mountain tunnel construction of China: a data collection from 2002 to 2018. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 11(1), 766–784.
- Werner, J. (1996). *Introducción a la hidrogeología* (1a Ed.). Facultad de Ciencias de la Tierra. UANL.
- Wyllie, D. C., & Mah, C. W. (2005). *Rock Slope Engineering Civil and Mining* (T. and F. Group, Ed.; 4th ed.). Spon Press.

ANEXOS

Anexo 1.

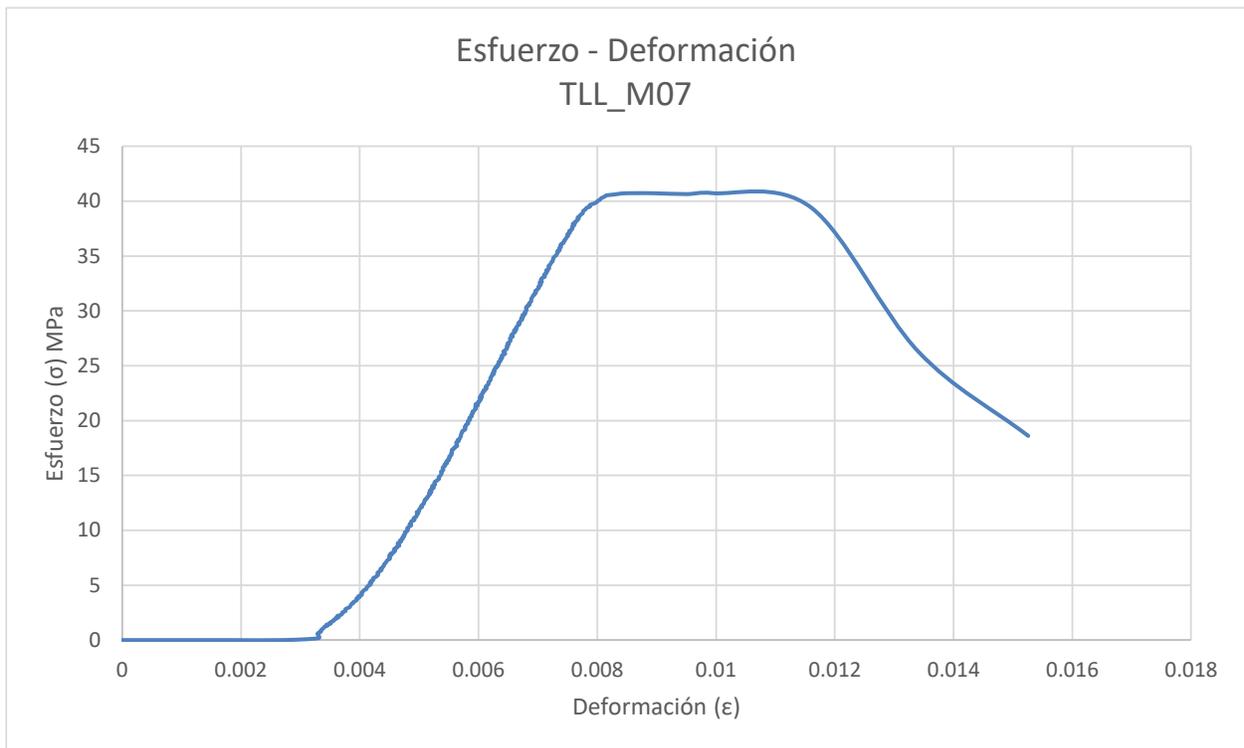
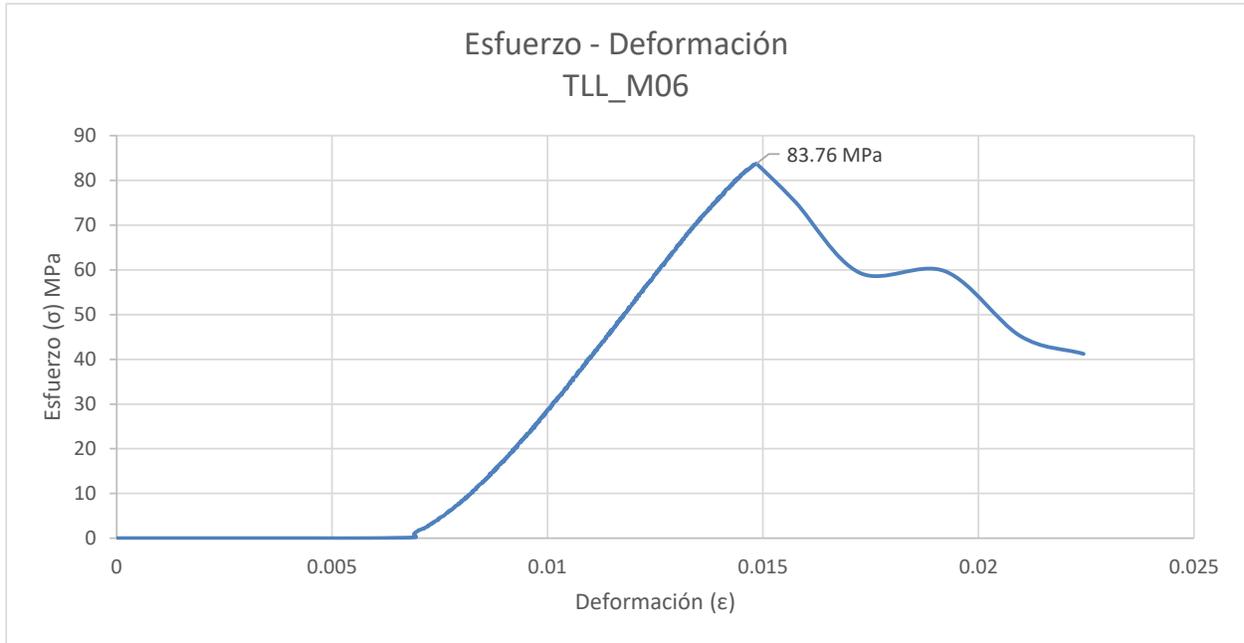
Tabla de valores de espaciamento de estratificación y familia de diaclasas D_1 y D_2 .
Medidas tomadas en campo de los sitios del área de estudio.

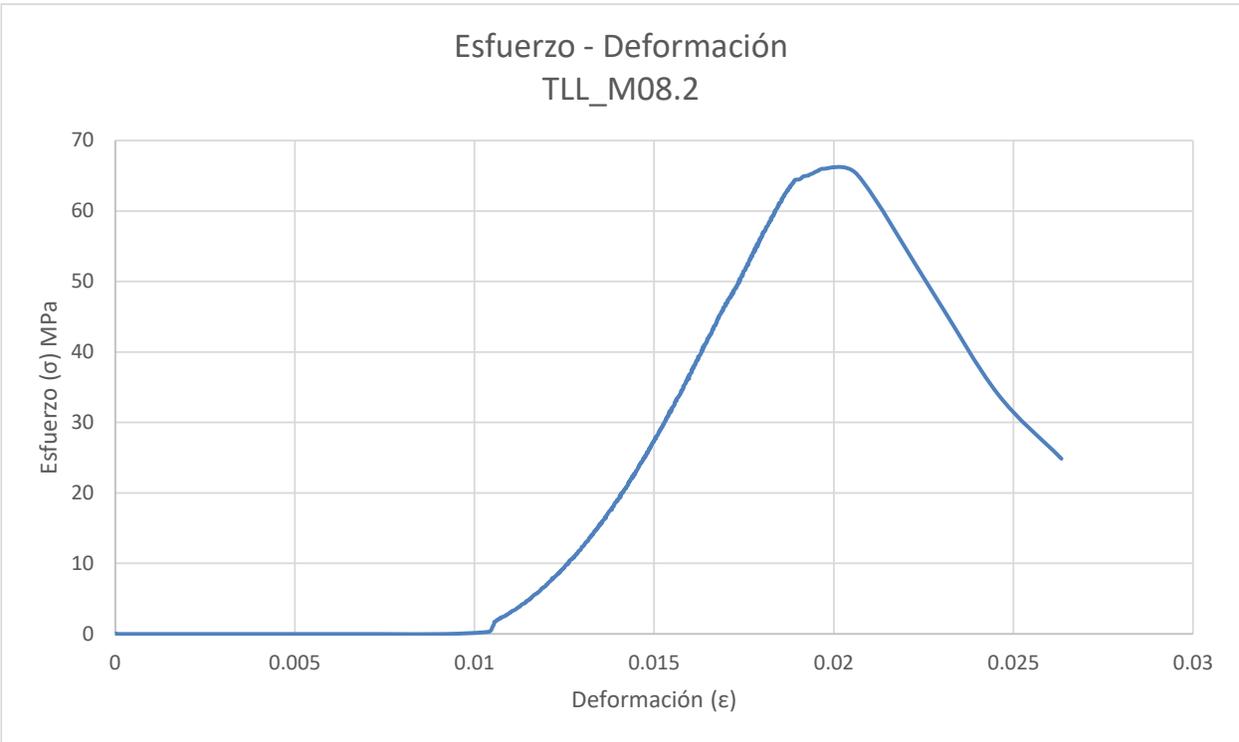
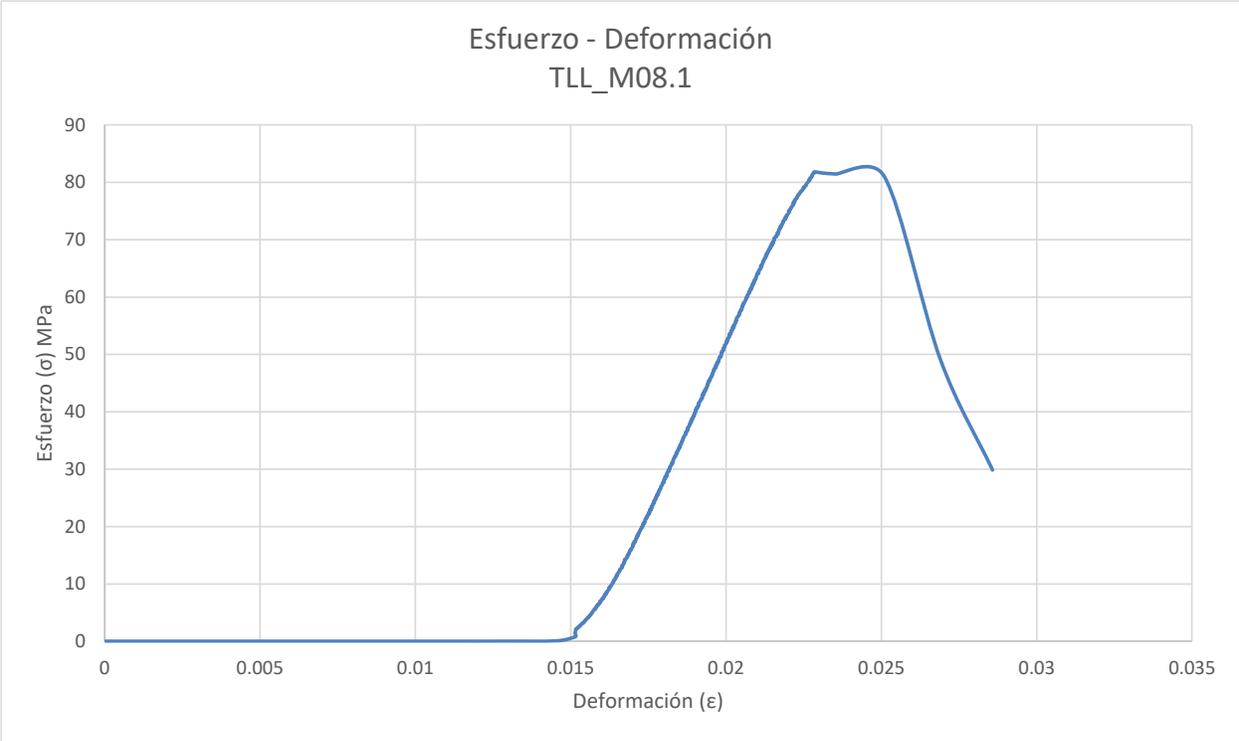
ESPACIAMIENTO							
No.	E (cm)	No.	E (cm)	No.	D_1 (cm)	No.	D_1 (cm)
1	61.3	26	46.2	1	26.1	26	13.8
2	35.6	27	29.5	2	23.0	27	43.1
3	23.9	28	29.5	3	26.1	28	13.8
4	10.8	29	48.7	4	73.4	29	17.2
5	107.7	30	35.9	5	75.7	30	17.2
6	15.3	31	25.6	6	25.2	31	17.2
7	30.6	32	38.5	7	43.7	32	13.8
8	122.4	33	28.2	8	23.0	33	17.2
9	82.8	34	91.0	9	46.8	34	17.2
10	56.9	35	10.3	10	95.0	35	34.5
11	56.9	36	84.6	11	46.8	36	34.5
12	17.2	37	42.3	12	26.6	37	43.1
13	70.7	38	78.2	13	53.4	38	36.2
14	36.2	39	1.0	14	31.0	39	13.8
15	167.2	40	1.0	15	48.3	40	119.0
16	127.6	41	1.0	16	25.9	41	56.9
17	48.3	42	1.0	17	53.4	42	6.9
18	59.0	43	1.0	18	96.6	43	169.0
19	52.6	44	1.0	19	144.8	44	70.7
20	59.0	45	1.0	20	110.3	45	13.8
21	25.6	46	1.0	21	70.7	46	63.8
22	32.1	47	37.4	22	167.2	47	65.5
23	52.6	48	18.2	23	98.3	48	56.9
24	19.2	49	52.8	24	74.1	49	44.8
25	32.1	50	26.4	25	34.5	50	48.3

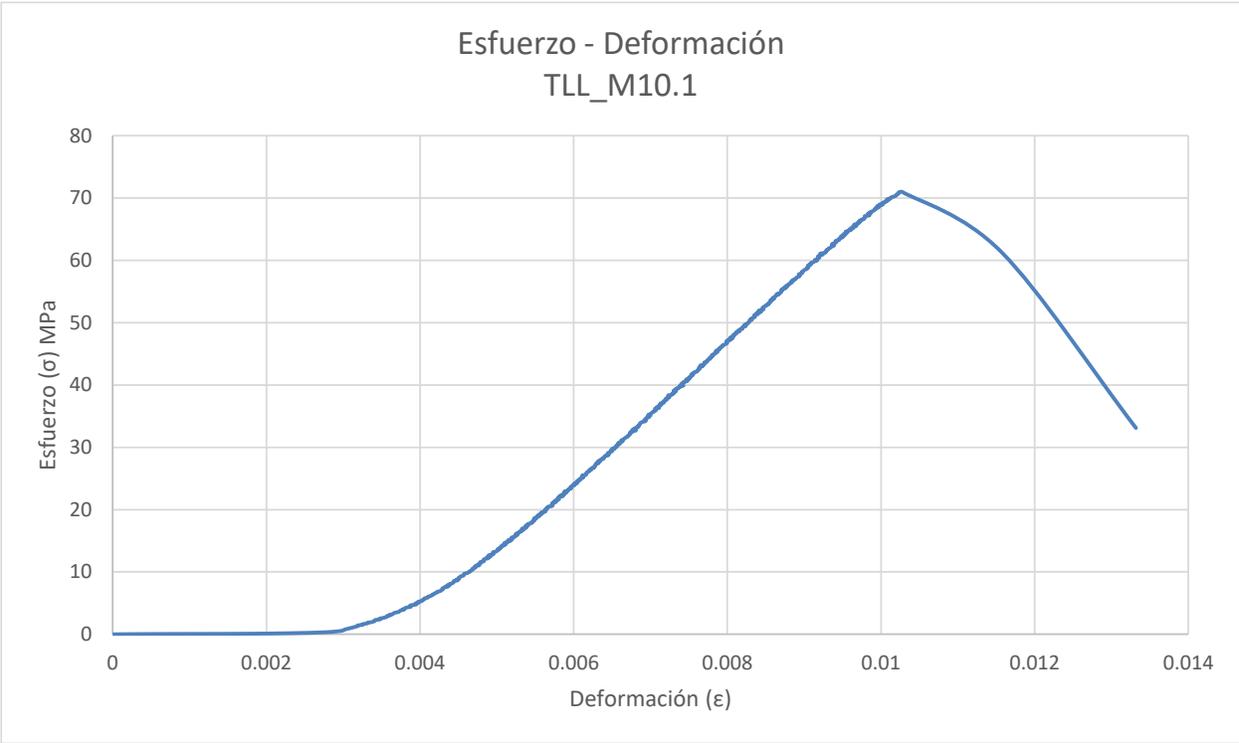
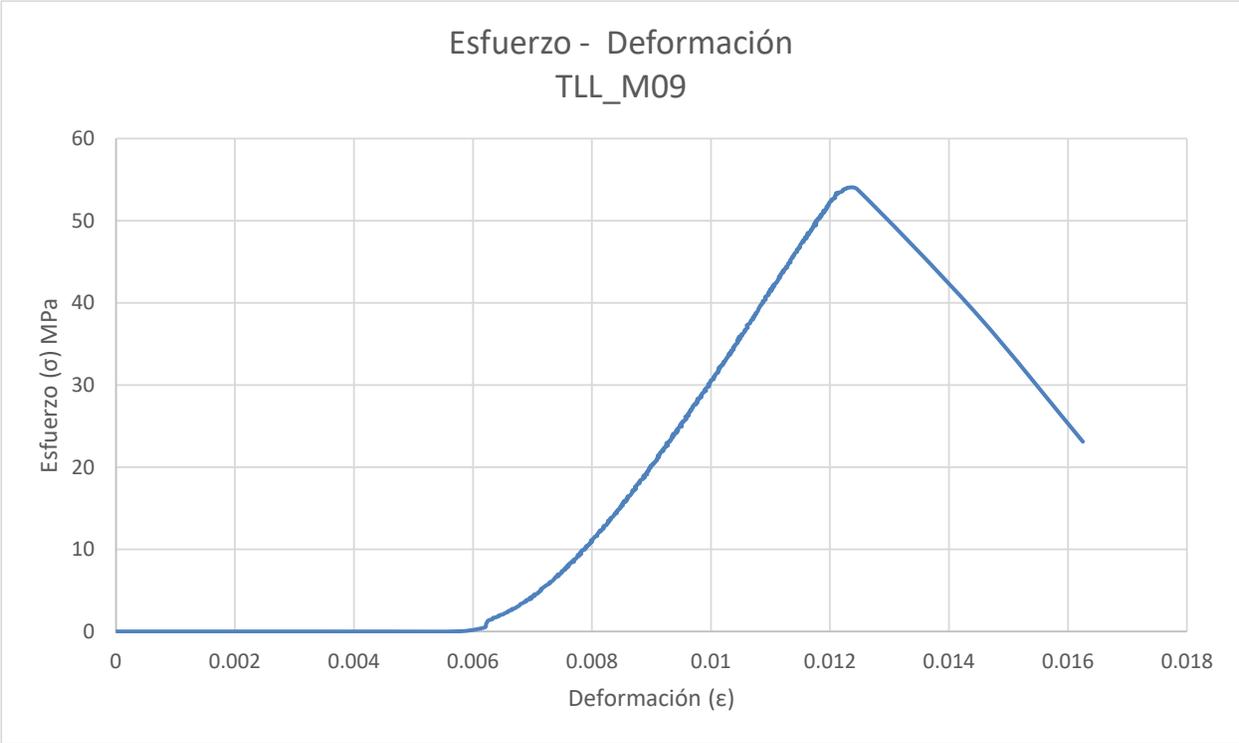
ESPACIAMIENTO							
No.	D ₁ (cm)	No.	D ₂ (cm)	No.	D ₂ (cm)	No.	D ₂ (cm)
51	34.8	1	43.1	26	101.3	51	107.7
52	21.7	2	26.7	27	42.3	52	61.5
53	23.7	3	17.2	28	32.1	53	74.4
54	50.4	4	21.6	29	32.1	54	16.7
55	9.3	5	32.8	30	82.1	55	19.2
56	21.1	6	28.4	31	91.0	56	16.7
57	29.4	7	21.6	32	224.4	57	19.2
58	32.0	8	15.5	33	94.9	58	16.7
59	22.7	9	19.8	34	42.3	59	25.6
60	14.4	10	24.1	35	39.7	60	19.2
61	24.1	11	24.1	36	52.6	61	25.6
62	18.0	12	19.8	37	32.1	62	12.8
63	20.6	13	34.5	38	78.2	63	23.1
64	44.7	14	63.8	39	29.5	64	19.2
65	26.3	15	24.1	40	19.2	65	12.8
66	27.3	16	21.6	41	42.3	66	32.1
67	21.3	17	39.7	42	15.4	67	29.5
68	14.0	18	47.4	43	16.7	68	32.1
69	16.0	19	65.4	44	19.2	69	94.9
70	27.3	20	46.2	45	12.8	70	12.8
71	24.1	21	25.6	46	29.5	71	16.7
72	22.1	22	47.4	47	29.5	72	42.3
72	24.5	23	29.5	48	55.1	73	19.2
74	23.1	24	110.3	49	32.1	74	16.7
75	14.6	25	35.9	50	23.1	75	55.1

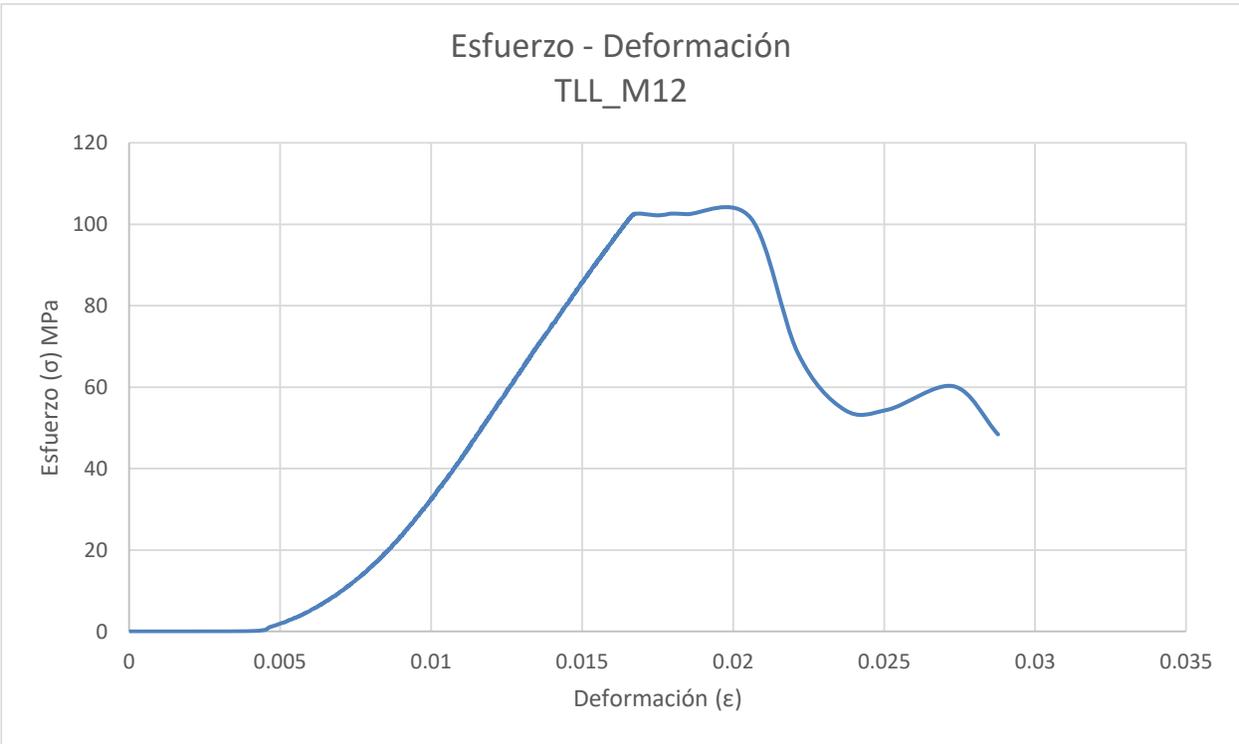
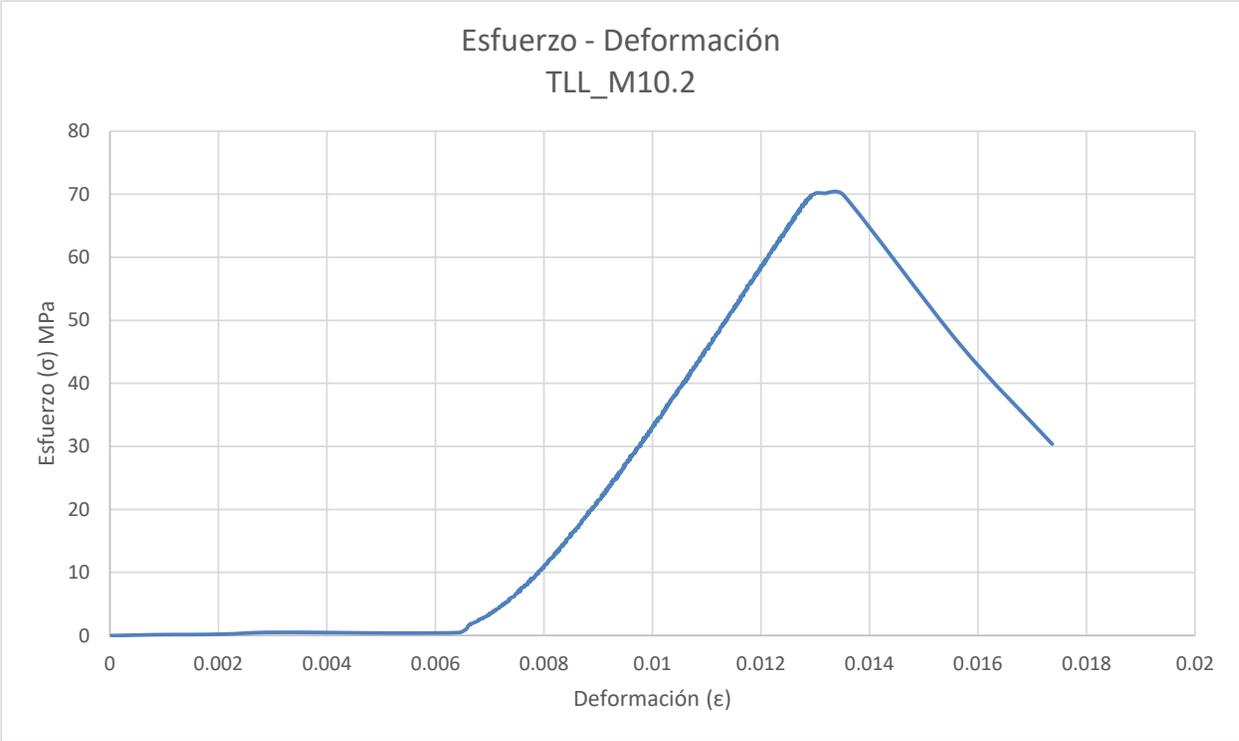
Anexo 2.

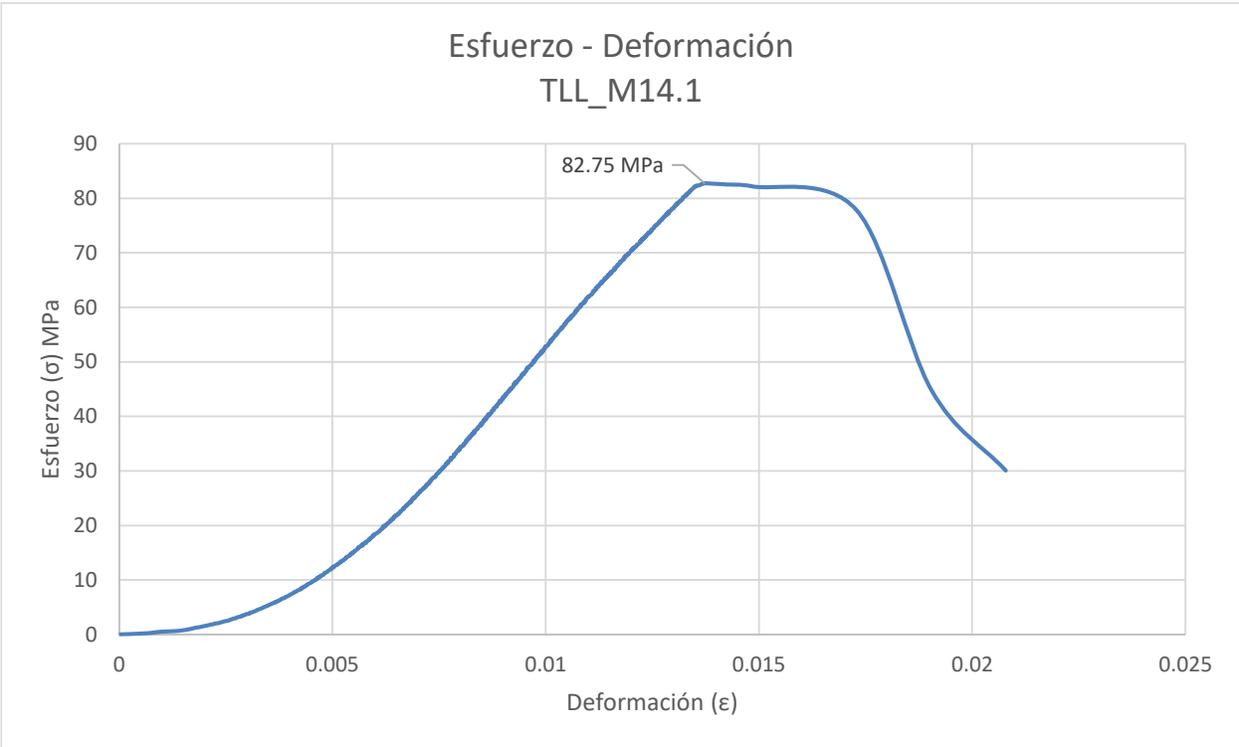
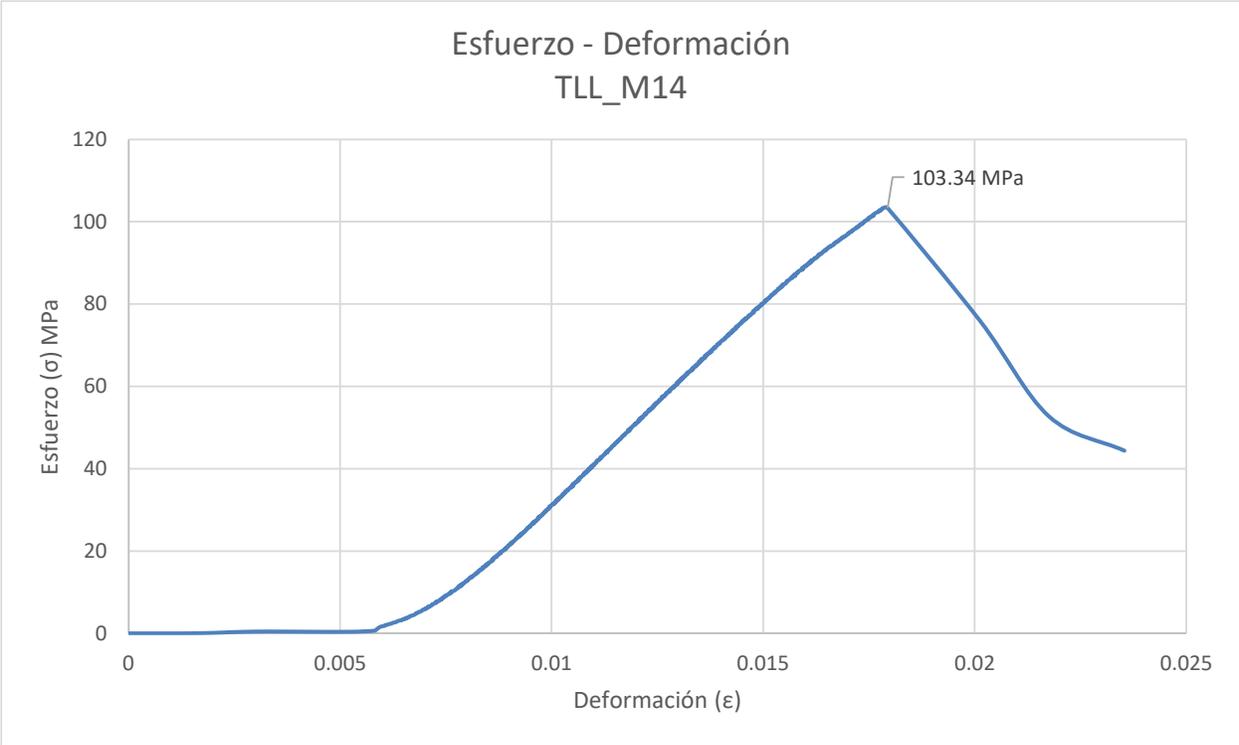
Gráficas de esfuerzo – deformación del ensayo de compresión uniaxial.





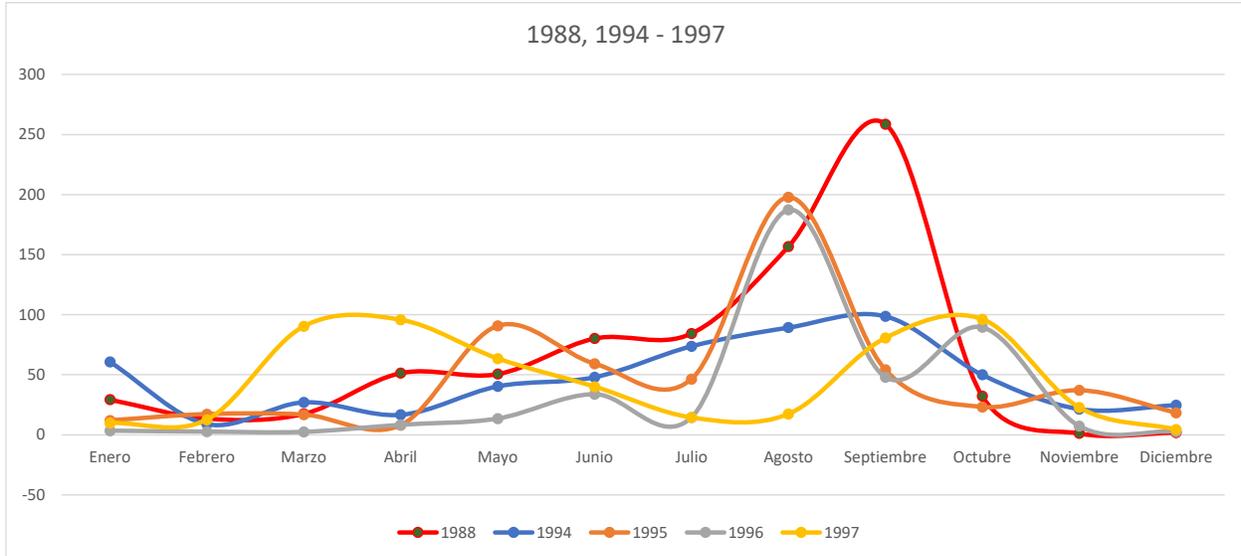




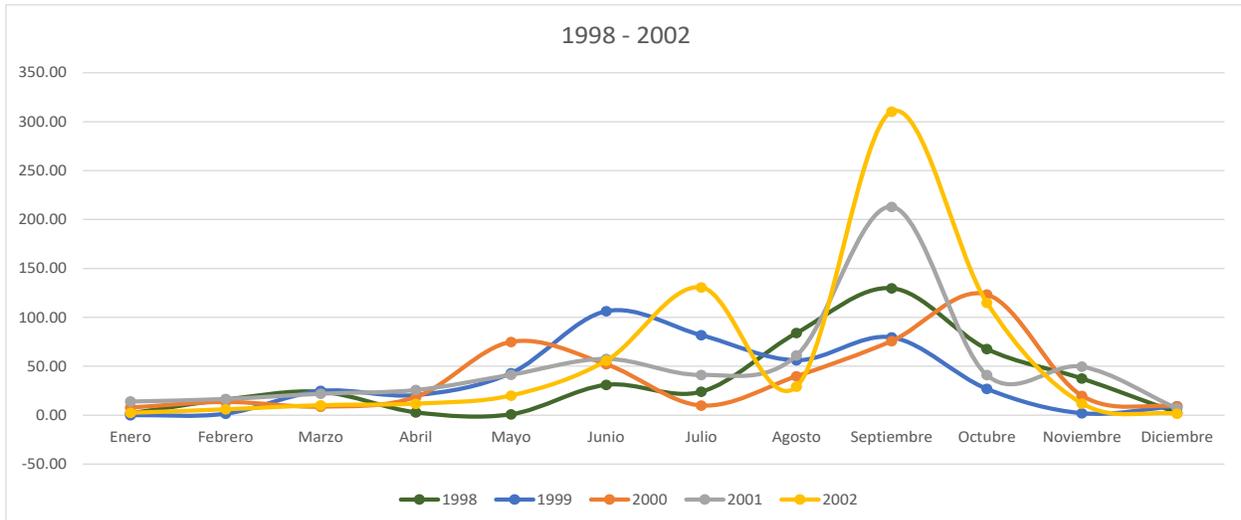


Anexo 3

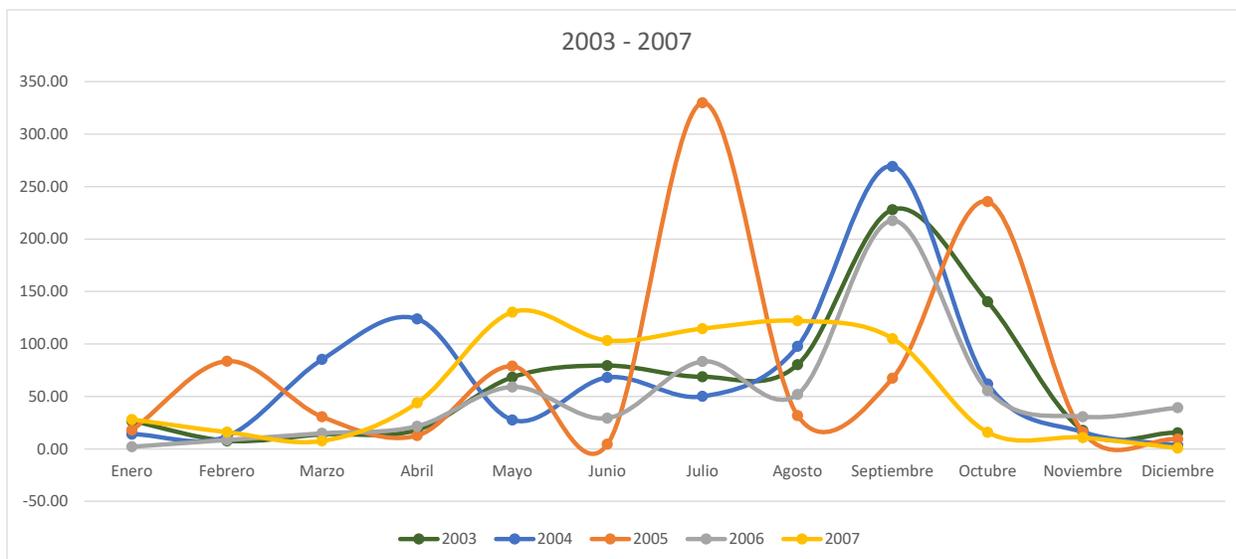
Gráficas de precipitación anual.



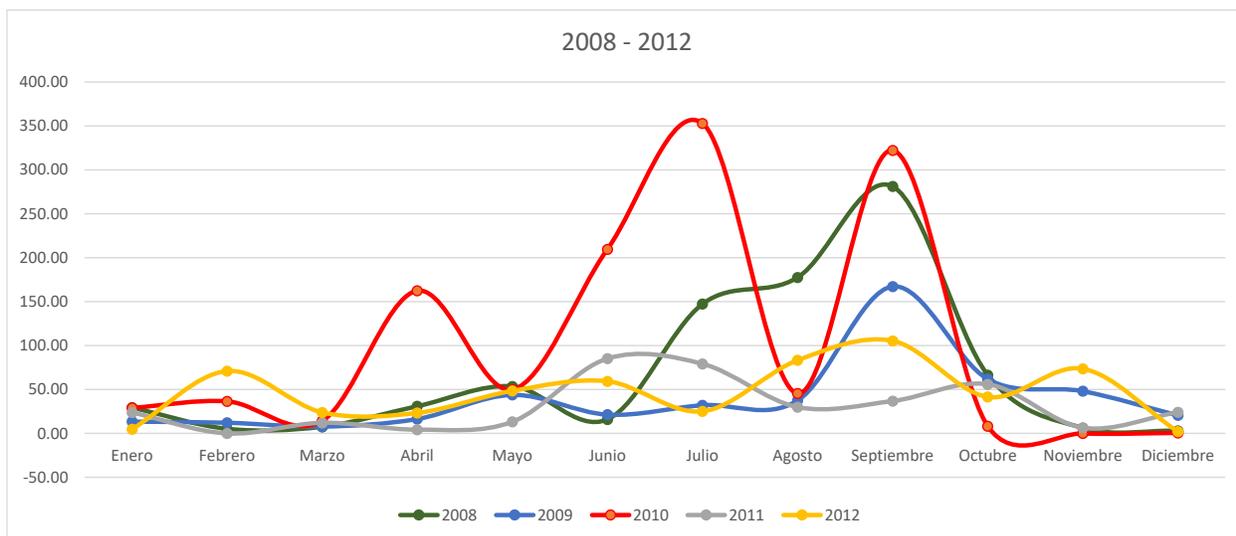
REGISTRO DE PRECIPITACIONES DE NUEVO LEÓN 1988, 1994 - 1997													
Año / Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Anual
1988	29.3	13.60	17.50	51.40	50.60	80.20	84.40	156.70	258.70	32.20	1.20	1.90	777.70
1994	60.80	9.00	27.10	16.70	40.40	48.00	73.80	89.30	98.70	50.00	21.50	24.70	560.00
1995	12.00	17.20	16.80	8.00	90.70	59.20	46.40	197.80	54.10	23.20	37.10	18.40	580.90
1996	3.40	2.60	2.40	8.30	13.50	33.80	14.50	187.40	48.00	89.50	7.20	2.70	413.30
1997	9.80	12.60	90.30	95.70	63.50	40.10	14.40	17.30	80.60	96.20	22.70	4.40	547.60
Promedio histórico	23.06	11.00	30.82	36.02	51.74	52.26	46.70	129.70	108.02	58.22	17.94	10.42	575.90



REGISTRO DE PRECIPITACIONES DE NUEVO LEÓN 1998 - 2002													
Año / Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Anual
1998	1.90	15.90	23.90	2.90	0.90	31.00	24.00	84.00	129.80	67.70	37.40	2.40	421.80
1999	0.00	1.50	24.80	20.50	43.00	106.20	81.70	56.10	79.50	26.90	2.00	9.20	451.40
2000	7.80	13.50	8.70	18.60	74.90	52.00	9.90	39.80	75.80	123.30	19.80	8.90	453.00
2001	14.00	16.60	22.00	25.80	41.40	57.60	41.20	61.00	213.00	41.00	49.60	6.90	590.10
2002	2.30	5.90	10.10	11.70	20.00	55.60	130.60	29.10	310.40	114.90	11.90	1.40	703.90
Promedio histórico	5.20	10.68	17.90	15.90	36.04	60.48	57.48	54.00	161.70	74.76	24.14	5.76	524.04

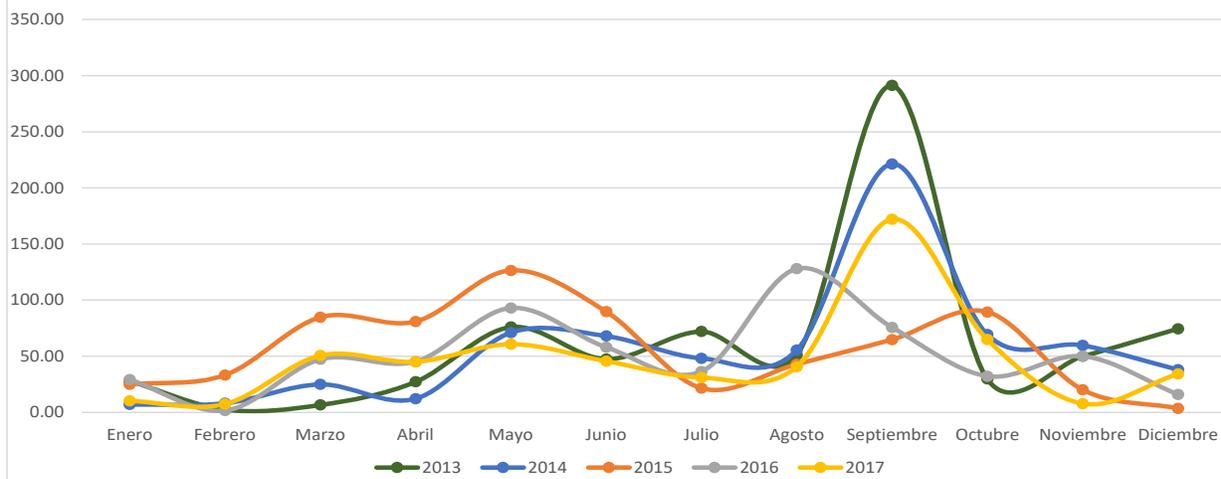


REGISTRO DE PRECIPITACIONES DE NUEVO LEÓN 2003 - 2007													
Año / Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Annual
2003	26.60	7.70	13.80	18.10	68.30	79.40	68.70	80.20	228.10	140.30	17.70	15.40	764.30
2004	14.20	12.20	85.30	123.90	27.70	68.20	50.10	97.70	269.30	62.00	16.10	3.50	830.20
2005	18.10	83.70	30.60	12.80	78.90	4.50	329.90	31.90	67.50	235.80	16.10	9.40	919.20
2006	2.10	8.60	14.90	21.70	59.10	29.40	83.40	52.00	217.50	55.50	30.80	39.30	614.30
2007	28.10	16.00	7.60	43.90	130.30	103.30	114.60	122.10	105.20	15.80	10.80	0.80	698.50
Promedio histórico	17.82	25.64	30.44	44.08	72.86	56.96	129.34	76.78	177.52	101.88	18.30	13.68	765.30



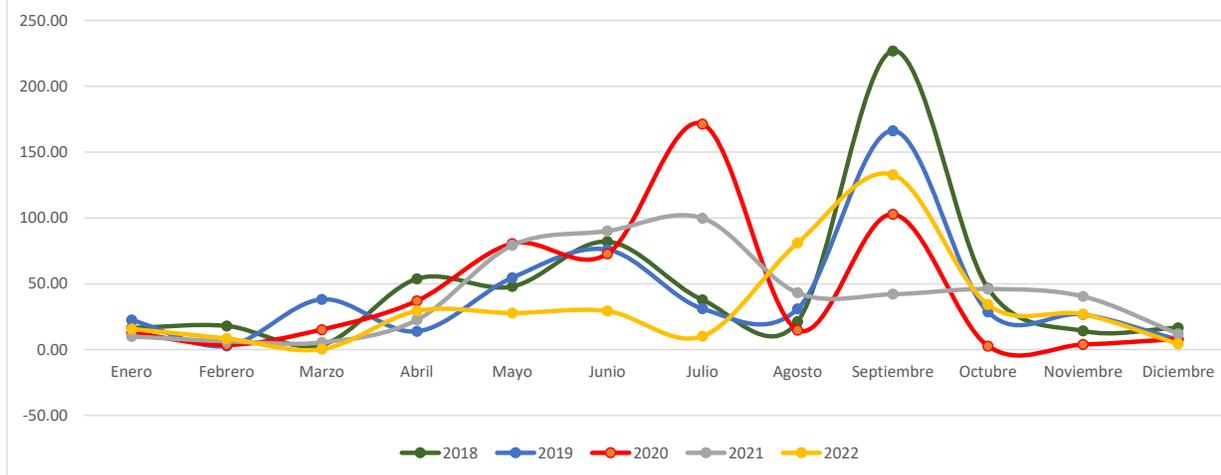
REGISTRO DE PRECIPITACIONES DE NUEVO LEÓN 2008 - 2012													
Año / Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Annual
2008	29.40	5.20	7.50	30.90	53.60	15.90	147.30	177.50	281.10	66.50	6.20	3.00	824.10
2009	13.50	12.30	7.90	16.50	43.90	21.50	32.20	37.50	167.10	61.90	48.10	20.70	483.10
2010	29.10	36.50	14.30	162.40	49.90	209.60	352.70	45.50	322.20	8.40	0.00	0.60	1,231.20
2011	23.80	0.00	12.10	4.30	13.20	85.10	79.10	29.90	36.80	55.90	6.50	24.10	370.80
2012	4.90	71.00	24.00	23.40	48.50	59.40	25.20	83.30	105.40	41.60	73.60	2.10	562.40
Promedio histórico	20.14	25.00	13.16	47.50	41.82	78.30	127.30	74.74	182.52	46.86	26.88	10.10	694.32

2013 - 2017



REGISTRO DE PRECIPITACIONES DE NUEVO LEÓN 2013 - 2017													
Año / Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Annual
2013	28.00	2.50	6.60	27.20	76.00	47.50	72.10	51.30	291.30	29.70	50.00	74.50	756.70
2014	7.00	8.10	24.90	12.20	71.10	68.00	48.20	55.40	221.40	69.30	59.70	38.10	683.40
2015	24.90	33.20	84.70	80.90	126.40	89.70	21.50	42.90	64.80	89.40	20.10	3.60	682.10
2016	29.10	1.50	47.20	45.20	93.00	58.00	36.40	128.00	75.70	32.20	50.00	15.90	612.20
2017	10.20	7.40	50.60	45.00	60.70	45.60	31.00	40.60	172.10	64.90	7.80	34.20	570.10
Promedio histórico	19.84	10.54	42.80	42.10	85.44	61.76	41.84	63.64	165.06	57.10	37.52	33.26	660.90

2018 - 2022



REGISTRO DE PRECIPITACIONES DE NUEVO LEÓN 2018 - 2022													
Año / Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Annual
2018	16.50	18.00	3.60	53.80	47.90	82.00	37.80	21.30	226.90	46.60	14.20	16.60	585.20
2019	22.50	2.80	38.20	13.90	54.60	75.90	31.10	31.00	166.20	28.60	26.70	7.50	499.00
2020	13.00	3.50	15.20	37.00	80.50	72.70	171.40	14.80	102.80	2.70	3.80	8.00	525.40
2021	10.00	6.40	5.50	22.60	79.20	90.10	99.90	43.20	42.10	46.10	40.40	12.00	497.50
2022	15.70	8.50	0.30	29.40	27.80	29.30	10.20	81.10	132.90	34.20	26.90	4.40	400.70
Promedio histórico	15.54	7.84	12.56	31.34	58.00	70.00	70.08	38.28	134.18	31.64	22.40	9.70	501.56

*Datos de CONAGUA y Servicio Meteorológico Nacional

Anexo 4.

NIVELES FREÁTICOS ACUÍFERO AMM (2000)								
No	ID	E	N	Elevación Brocal	Nivel Piezométrico	Nivel Estático	Acuífero	Cuenca
1	8119	365517.7031	2845512.879	544	532.7	11.3	AMM	Río Bravo
2	8120	366575.8533	2845409.903	541	529.85	11.15	AMM	Río Bravo
3	8121	364703.1997	2842167.282	546	525.15	20.85	AMM	Río Bravo
4	8122	366136.9484	2843352.692	548	529.05	18.95	AMM	Río Bravo
5	8123	368043.7395	2841672.045	546	533.25	12.75	AMM	Río Bravo
6	8124	368354.0994	2842038.261	537	524.87	12.13	AMM	Río Bravo
7	8125	368495.0674	2839390.729	532	517.45	14.55	AMM	Río Bravo
8	8126	369169.4233	2839907.109	527	521.7	5.3	AMM	Río Bravo
9	8127	369196.4171	2839814.574	533	525.58	7.42	AMM	Río Bravo
10	8128	374294.295	2842257.531	496	482.75	13.25	AMM	Río Bravo
11	8129	373389.7535	2843866.044	494	477.57	16.43	AMM	Río Bravo
12	8130	377513.0938	2843642.751	473	456.62	16.38	AMM	Río Bravo
13	8131	378379.9449	2843942.359	468	452.27	15.73	AMM	Río Bravo
14	8132	380342.2973	2851339.578	448	440.9	7.1	AMM	Río Bravo
15	8133	380250.9757	2853555.697	444	435.82	8.18	AMM	Río Bravo
16	8135	373573.989	2848571.859	485	470.7	14.3	AMM	Río Bravo
17	8136	373116.3828	2838607.276	498	492.95	5.05	AMM	Río Bravo
18	8137	372214.6674	2840523.537	562	550.7	11.3	AMM	Río Bravo
19	8138	383437.9822	2848573.618	408	387.75	20.25	AMM	Río Bravo
20	8139	383622.1403	2847341.202	412	400.98	11.02	AMM	Río Bravo
21	8140	383283.4647	2846851.956	410	394.7	15.3	AMM	Río Bravo
22	8141	364750.1507	2844043.798	560	548.44	11.56	AMM	Río Bravo
23	8142	364674.4234	2844813.759	561	553.36	7.64	AMM	Río Bravo
24	8143	363057.3972	2847476.589	566	548.17	17.83	AMM	Río Bravo
25	8145	368131.8073	2836502.079	580	571.8	8.2	AMM	Río Bravo
26	8146	369904.4193	2838084.523	557	542.5	14.5	AMM	Río Bravo
27	8147	371798.2173	2834927.779	549	526.6	22.4	AMM	Río Bravo
28	8148	375605.8436	2839414.455	480	470.95	9.05	AMM	Río Bravo
29	8149	377770.0342	2838255.921	525	511.25	13.75	AMM	Río Bravo
30	8150	377179.9525	2840784.348	476	462.3	13.7	AMM	Río Bravo
31	8151	364380.1567	2840570.623	538	464.3	73.7	AMM	Río Bravo
32	8152	363717.6424	2841223.533	535	453.5	81.5	AMM	Río Bravo
33	8153	362638.3759	2842003.857	636	508.5	127.5	AMM	Río Bravo
34	8154	362950.3023	2839816.015	578	493.8	84.2	AMM	Río Bravo

*Datos de CONAGUA

NIVELES FREÁTICOS ACUÍFERO AMM (2006)								
No	ID	E	N	Elevación Brocal	Nivel Piezométrico	Cuenca	Acuífero	Cuenca
1	8119	365517.7031	2845512.879	544	517.4	26.6	AMM	Río Bravo
2	8120	366575.8533	2845409.903	541	507.3	33.7	AMM	Río Bravo
3	8121	364703.1997	2842167.282	546	467	79	AMM	Río Bravo
4	8122	366136.9484	2843352.692	548	538.75	9.25	AMM	Río Bravo
5	8124	368354.0994	2842038.261	537	520.6	16.4	AMM	Río Bravo
6	8125	368495.0674	2839390.729	532	518	14	AMM	Río Bravo
7	8127	369196.4171	2839814.574	533	520.92	12.08	AMM	Río Bravo
8	8128	374294.295	2842257.531	496	484.6	11.4	AMM	Río Bravo
9	8129	373389.7535	2843866.044	494	488.3	5.7	AMM	Río Bravo
10	8130	377513.0938	2843642.751	473	469.96	3.04	AMM	Río Bravo
11	8132	380342.2973	2851339.578	448	432.5	15.5	AMM	Río Bravo
12	8133	380250.9757	2853555.697	444	425.35	18.65	AMM	Río Bravo
13	8135	373573.989	2848571.859	485	472.3	12.7	AMM	Río Bravo
14	8136	373116.3828	2838607.276	498	489	9	AMM	Río Bravo
15	8137	372214.6674	2840523.537	562	554	8	AMM	Río Bravo
16	8138	383437.9822	2848573.618	408	394.82	13.18	AMM	Río Bravo
17	8139	383622.1403	2847341.202	412	406.7	5.3	AMM	Río Bravo
18	8140	383283.4647	2846851.956	410	400.15	9.85	AMM	Río Bravo
19	8143	363057.3972	2847476.589	566	554.2	11.8	AMM	Río Bravo
20	8145	368131.8073	2836502.079	580	574.25	5.75	AMM	Río Bravo
21	8146	369904.4193	2838084.523	557	542.5	14.5	AMM	Río Bravo
22	8147	371798.2173	2834927.779	549	512.5	36.5	AMM	Río Bravo
23	8148	375605.8436	2839414.455	480	461.12	18.88	AMM	Río Bravo
24	8149	377770.0342	2838255.921	525	516.83	8.17	AMM	Río Bravo
25	8150	377179.9525	2840784.348	476	463	13	AMM	Río Bravo
26	8151	364380.1567	2840570.623	538	519.95	18.05	AMM	Río Bravo
27	8152	363717.6424	2841223.533	535	525.7	9.3	AMM	Río Bravo
28	8153	362638.3759	2842003.857	636	626.7	9.3	AMM	Río Bravo
29	8154	362950.3023	2839816.015	578	564.7	13.3	AMM	Río Bravo

*Datos de CONAGUA

NIVELES FREÁTICOS ACUÍFERO AMM (2010)								
No	ID	E	N	Elevación Brocal	Nivel Piezométrico	Nivel Estático	Acuífero	Cuenca
1	8119	365517.7031	2845512.879	544	481.42	48.58	AMM	Río Bravo
2	8120	366575.8533	2845409.903	541	477	57	AMM	Río Bravo
3	8121	364703.1997	2842167.282	546	435	106	AMM	Río Bravo
4	8122	366136.9484	2843352.692	548	539.03	9.2	AMM	Río Bravo
5	8123	368043.7395	2841672.045	546	537.78	8.1	AMM	Río Bravo
6	8124	368354.0994	2842038.261	537	515.87	24	AMM	Río Bravo
7	8125	368495.0674	2839390.729	532	518.16	16.2	AMM	Río Bravo
8	8126	369169.4233	2839907.109	527	511.4	15.7	AMM	Río Bravo
9	8127	369196.4171	2839814.574	533	520.22	12.37	AMM	Río Bravo
10	8128	374294.295	2842257.531	496	484.3	13	AMM	Río Bravo
11	8129	373389.7535	2843866.044	494	489.02	6.97	AMM	Río Bravo
12	8130	377513.0938	2843642.751	473	466.5	7.05	AMM	Río Bravo
13	8131	378379.9449	2843942.359	468	457.35	10.4	AMM	Río Bravo
14	8132	380342.2973	2851339.578	448	433.3	17	AMM	Río Bravo
15	8133	380250.9757	2853555.697	444	429.62	14	AMM	Río Bravo
16	8135	373573.989	2848571.859	485	472.6	13.65	AMM	Río Bravo
17	8136	373116.3828	2838607.276	498	488.9	9.29	AMM	Río Bravo
18	8137	372214.6674	2840523.537	562	543.5	13.55	AMM	Río Bravo
19	8139	383622.1403	2847341.202	412	406.87	5.3	AMM	Río Bravo
20	8140	383283.4647	2846851.956	410	399.25	10.75	AMM	Río Bravo
21	8143	363057.3972	2847476.589	566	542	15.38	AMM	Río Bravo
22	8145	368131.8073	2836502.079	580	574.59	5.2	AMM	Río Bravo
23	8146	369904.4193	2838084.523	557	544.09	15	AMM	Río Bravo
24	8147	371798.2173	2834927.779	549	482	48.7	AMM	Río Bravo
25	8148	375605.8436	2839414.455	480	461.2	25	AMM	Río Bravo
26	8150	377179.9525	2840784.348	476	462.4	13.55	AMM	Río Bravo
27	8151	364380.1567	2840570.623	538	520.9	17.6	AMM	Río Bravo
28	8152	363717.6424	2841223.533	535	526.1	8.15	AMM	Río Bravo
29	8153	362638.3759	2842003.857	636	627.7	8.3	AMM	Río Bravo
30	8154	362950.3023	2839816.015	578	564.08	14.08	AMM	Río Bravo

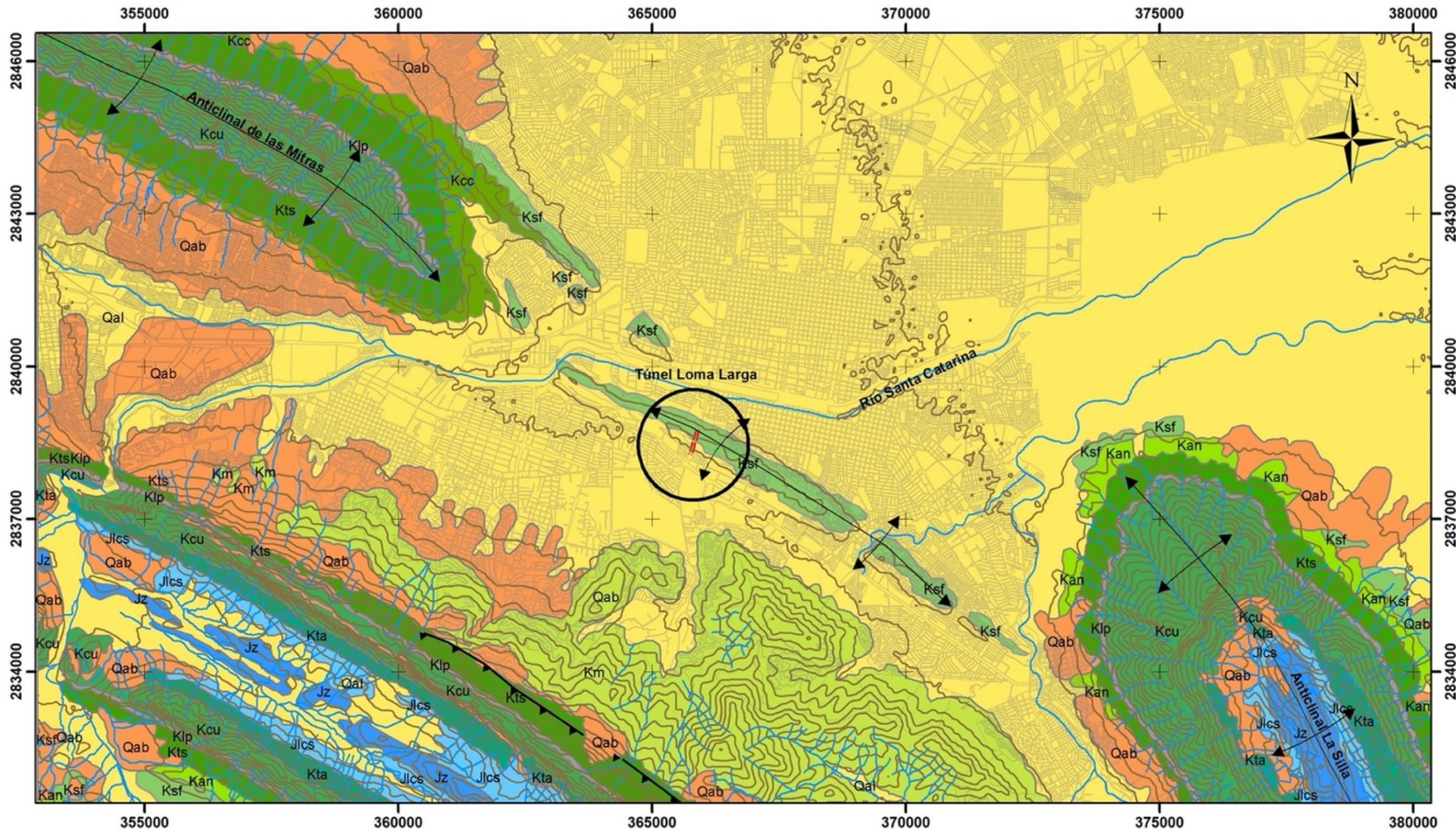
*Datos de CONAGUA

NIVELES FREÁTICOS ACUÍFERO AMM (2012)								
No	ID	E	N	Elevación Brocal	Nivel Piezométrico	Nivel Estático	Acuífero	Cuenca
1	8119	365517.7031	2845512.879	544	481.42	62.58	AMM	Río Bravo
2	8120	366575.8533	2845409.903	541	477	64	AMM	Río Bravo
3	8121	364703.1997	2842167.282	546	435	111	AMM	Río Bravo
4	8122	366136.9484	2843352.692	548	539.03	8.97	AMM	Río Bravo
5	8123	368043.7395	2841672.045	546	537.78	8.22	AMM	Río Bravo
6	8124	368354.0994	2842038.261	537	515.87	21.13	AMM	Río Bravo
7	8125	368495.0674	2839390.729	532	518.16	13.84	AMM	Río Bravo
8	8126	369169.4233	2839907.109	527	511.4	15.6	AMM	Río Bravo
9	8127	369196.4171	2839814.574	533	520.22	12.78	AMM	Río Bravo
10	8128	374294.295	2842257.531	496	484.3	11.7	AMM	Río Bravo
11	8129	373389.7535	2843866.044	494	489.02	4.98	AMM	Río Bravo
12	8130	377513.0938	2843642.751	473	466.5	6.5	AMM	Río Bravo
13	8131	378379.9449	2843942.359	468	457.35	10.65	AMM	Río Bravo
14	8132	380342.2973	2851339.578	448	433.3	14.7	AMM	Río Bravo
15	8133	380250.9757	2853555.697	444	429.62	14.38	AMM	Río Bravo
16	8135	373573.989	2848571.859	485	472.6	12.4	AMM	Río Bravo
17	8136	373116.3828	2838607.276	498	488.9	9.1	AMM	Río Bravo
18	8137	372214.6674	2840523.537	562	543.5	18.5	AMM	Río Bravo
19	8139	383622.1403	2847341.202	412	406.87	5.13	AMM	Río Bravo
20	8141	364750.1507	2844043.798	560	538.73	21.27	AMM	Río Bravo
21	8143	363057.3972	2847476.589	566	542	24	AMM	Río Bravo
22	8145	368131.8073	2836502.079	580	574.59	5.41	AMM	Río Bravo
23	8146	369904.4193	2838084.523	557	544.09	12.91	AMM	Río Bravo
24	8147	371798.2173	2834927.779	549	482	67	AMM	Río Bravo
25	8148	375605.8436	2839414.455	480	461.2	18.8	AMM	Río Bravo
26	8149	377770.0342	2838255.921	525	518.3	6.7	AMM	Río Bravo
27	8150	377179.9525	2840784.348	476	462.4	13.6	AMM	Río Bravo
28	8151	364380.1567	2840570.623	538	520.9	17.1	AMM	Río Bravo
29	8152	363717.6424	2841223.533	535	526.1	8.9	AMM	Río Bravo
30	8154	362950.3023	2839816.015	578	564.08	13.92	AMM	Río Bravo

*Datos de CONAGUA

MAPAS Y PERFILES

GEOLOGÍA REGIONAL TÚNEL LOMA LARGA



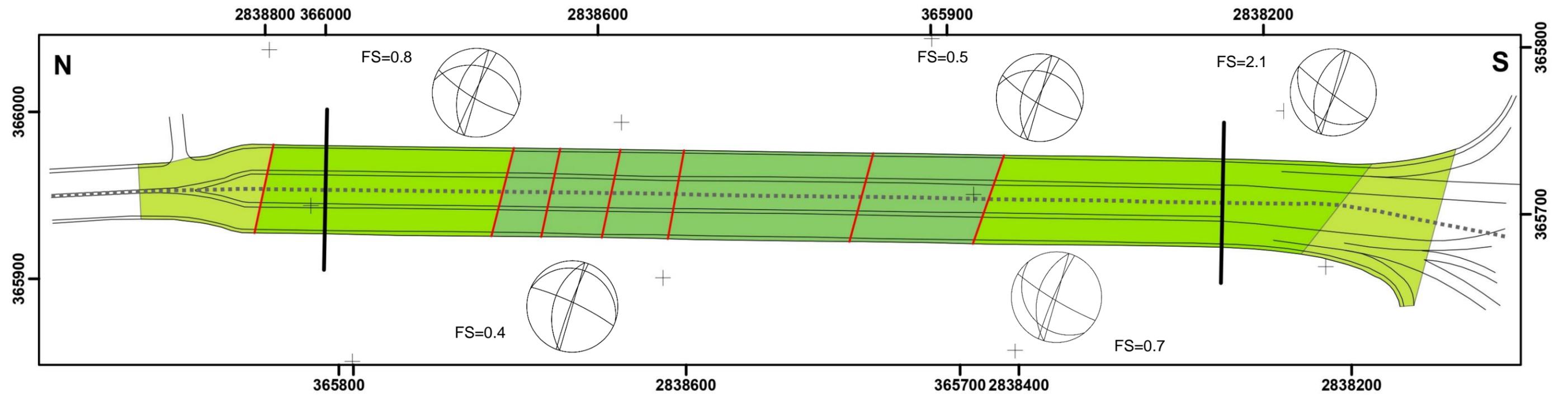
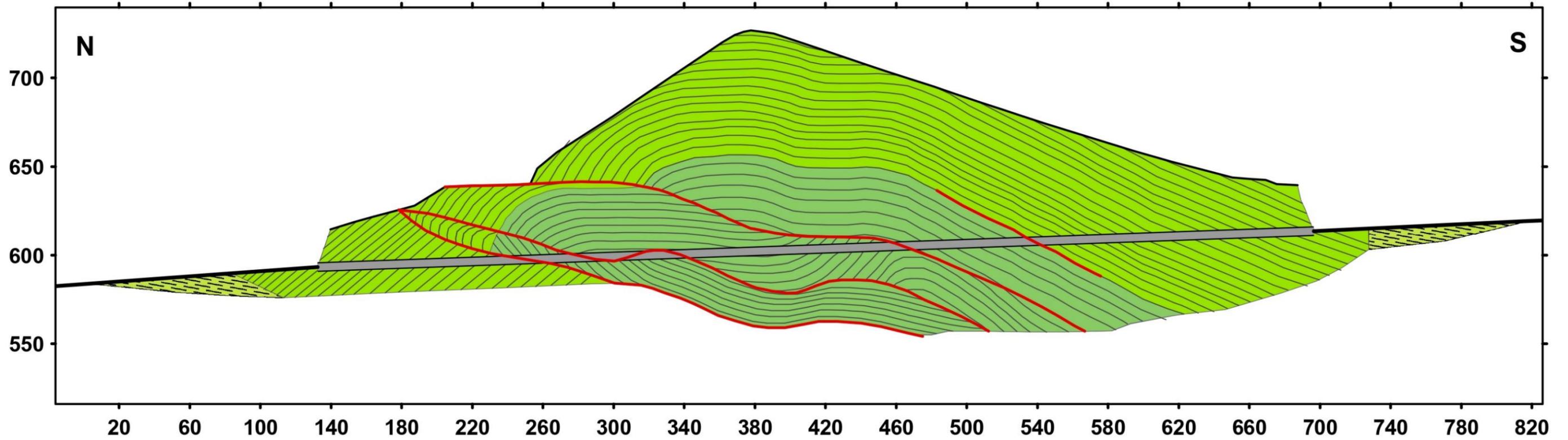
Simbología

▲ Cabalgadura	— Curvas de Nivel	Jz Zuloaga	Kcu Cupido	Kcc Cuesta del Cura	Km Méndez
↔ Anticlinal	— Hidrología	Jlcs La Casita	Klp La Peña	Kan Agua Nueva	Qab Conglomerado
□ Área estudio	- - - Túnel Loma Larga	Kta Taraises	Kts Tamaulipas Superior	Ksf San Felipe	Qal Aluvión



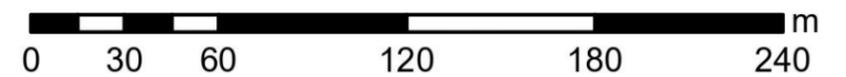
Modificado de Padilla y Sánchez (1982)

PERFIL TÚNEL LOMA LARGA

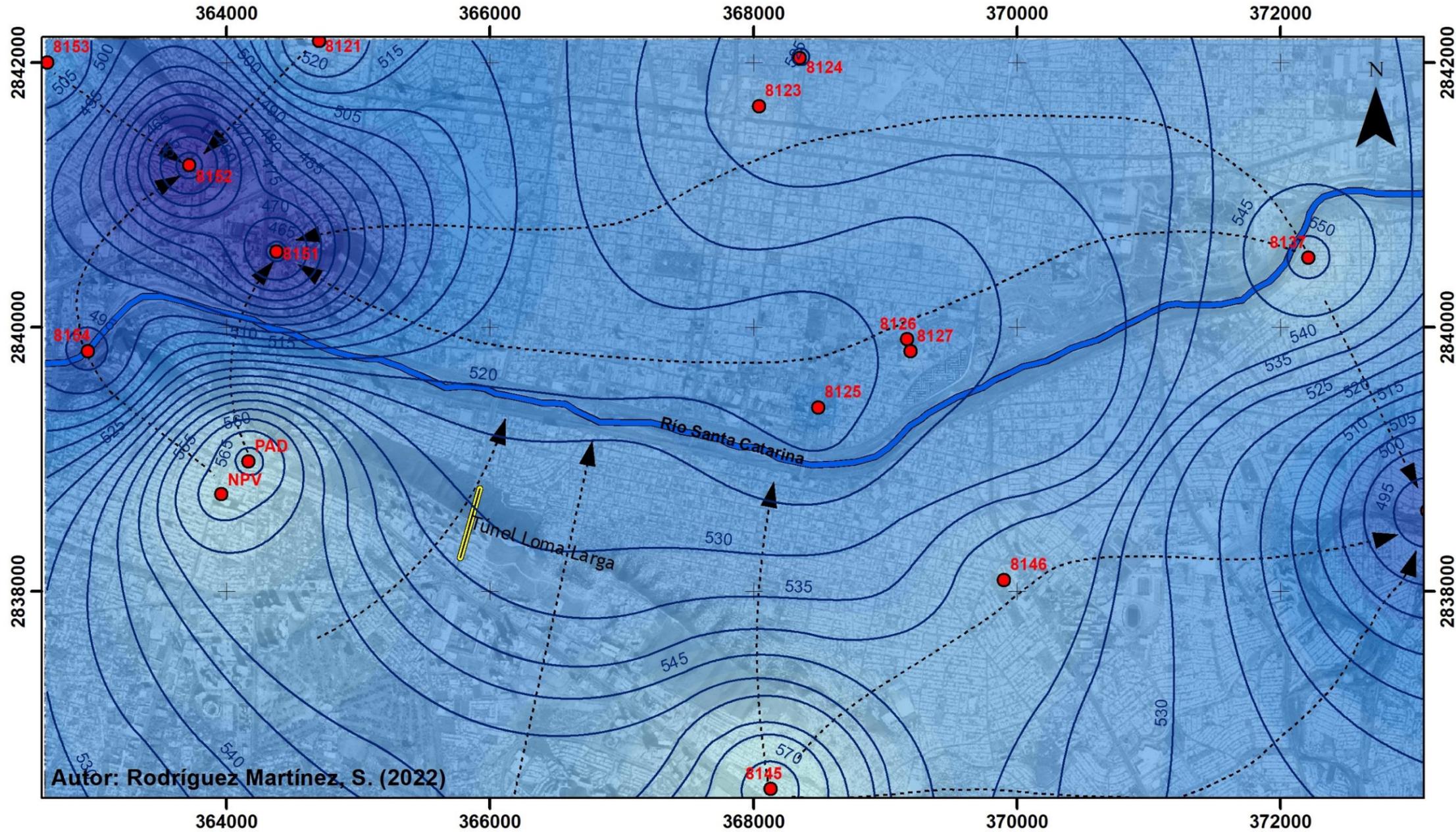


Simbología

- Agua nueva
- San Felipe
- Méndez
- Túnel Loma Larga
- Falla



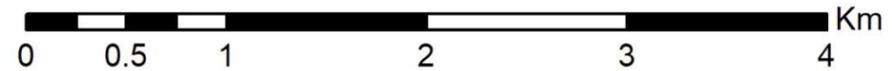
Túnel Loma Larga Carta Piezométrica (2000)



Autor: Rodríguez Martínez, S. (2022)

Simbología

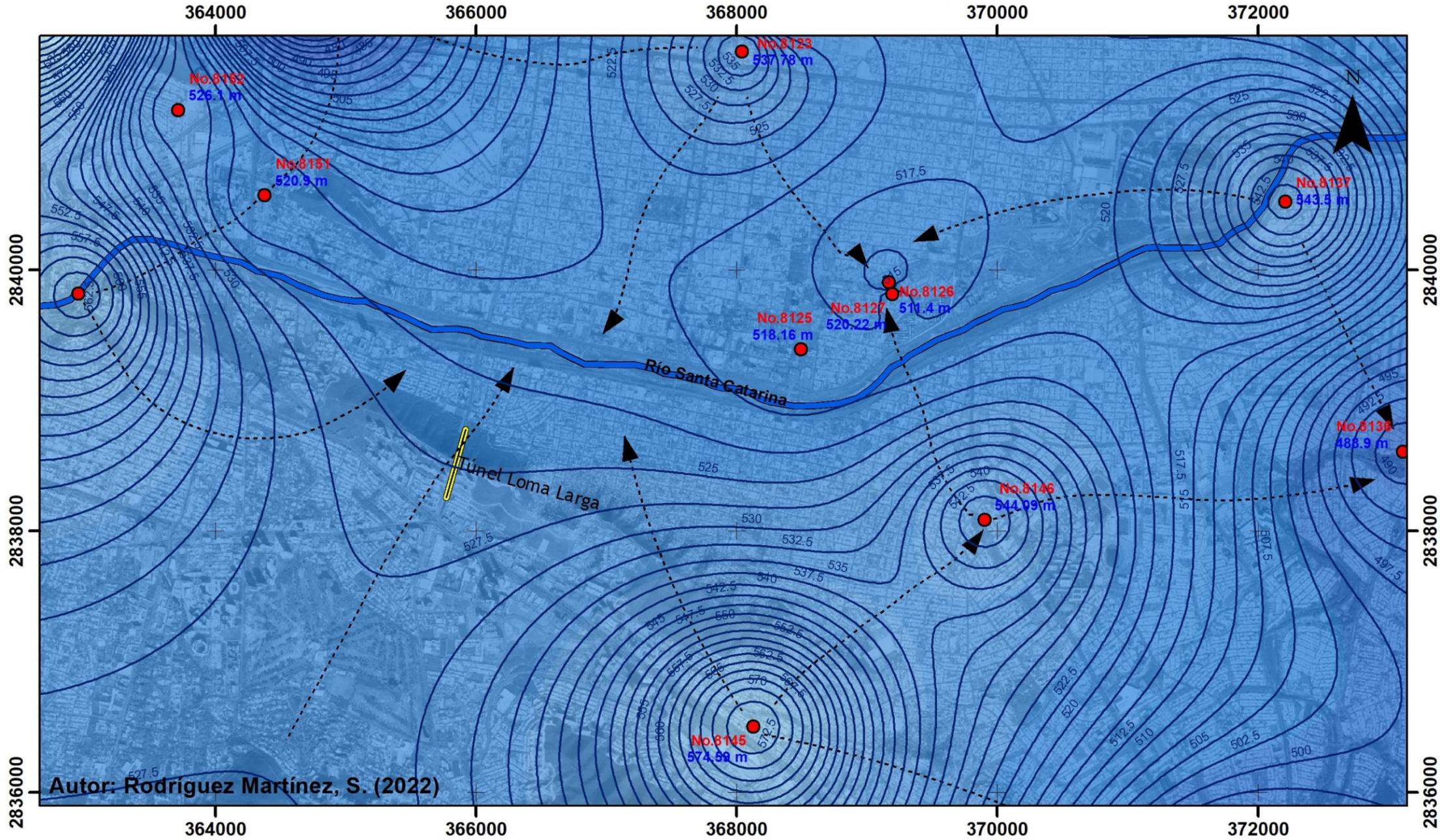
- Pozos
- Isolíneas (5m)
- - -> Flujo subterráneo
- Río Santa Catarina
- == Túnel Loma Larga



Nivel Piezométrico Rango (m)

453.5 - 459.42	477.17 - 483.08	500.83 - 506.74	524.49 - 530.39	548.15 - 554.05
459.43 - 465.33	483.09 - 488.99	506.75 - 512.65	530.4 - 536.31	554.06 - 559.97
465.34 - 471.25	489 - 494.91	512.66 - 518.56	536.32 - 542.22	559.98 - 565.88
471.26 - 477.16	494.92 - 500.82	518.57 - 524.48	542.23 - 548.14	565.89 - 571.8

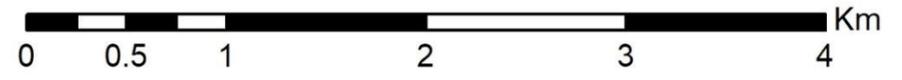
Túnel Loma Larga Carta Piezométrica (2006)



Autor: Rodríguez Martínez, S. (2022)

Simbología

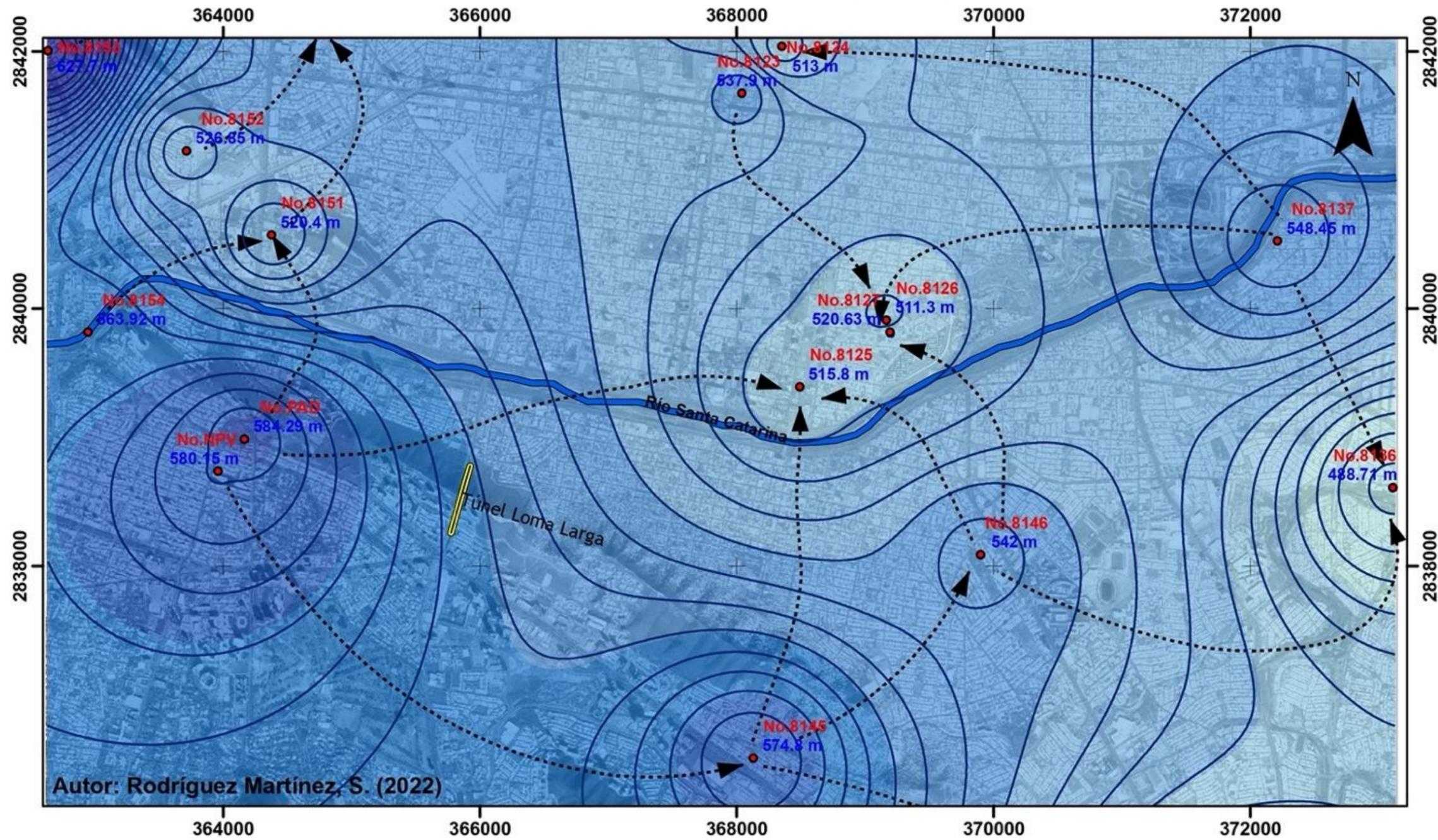
- Pozos
- Isolíneas (2.5 m)
- - - ▶ Flujo subterráneo
- Río Santa Catarina
- = Túnel Loma Larga



Nivel Piezométrico Rango (m)

399.27 - 410.68	444.94 - 456.34	490.6 - 502	536.26 - 547.67	581.92 - 593.33
410.69 - 422.1	456.35 - 467.76	502.01 - 513.42	547.68 - 559.08	593.34 - 604.74
422.11 - 433.51	467.77 - 479.17	513.43 - 524.83	559.09 - 570.5	604.75 - 616.16
433.52 - 444.93	479.18 - 490.59	524.84 - 536.25	570.51 - 581.91	616.17 - 627.57

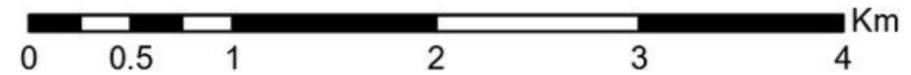
Túnel Loma Larga Carta Piezométrica (2010)



Autor: Rodríguez Martínez, S. (2022)

Simbología

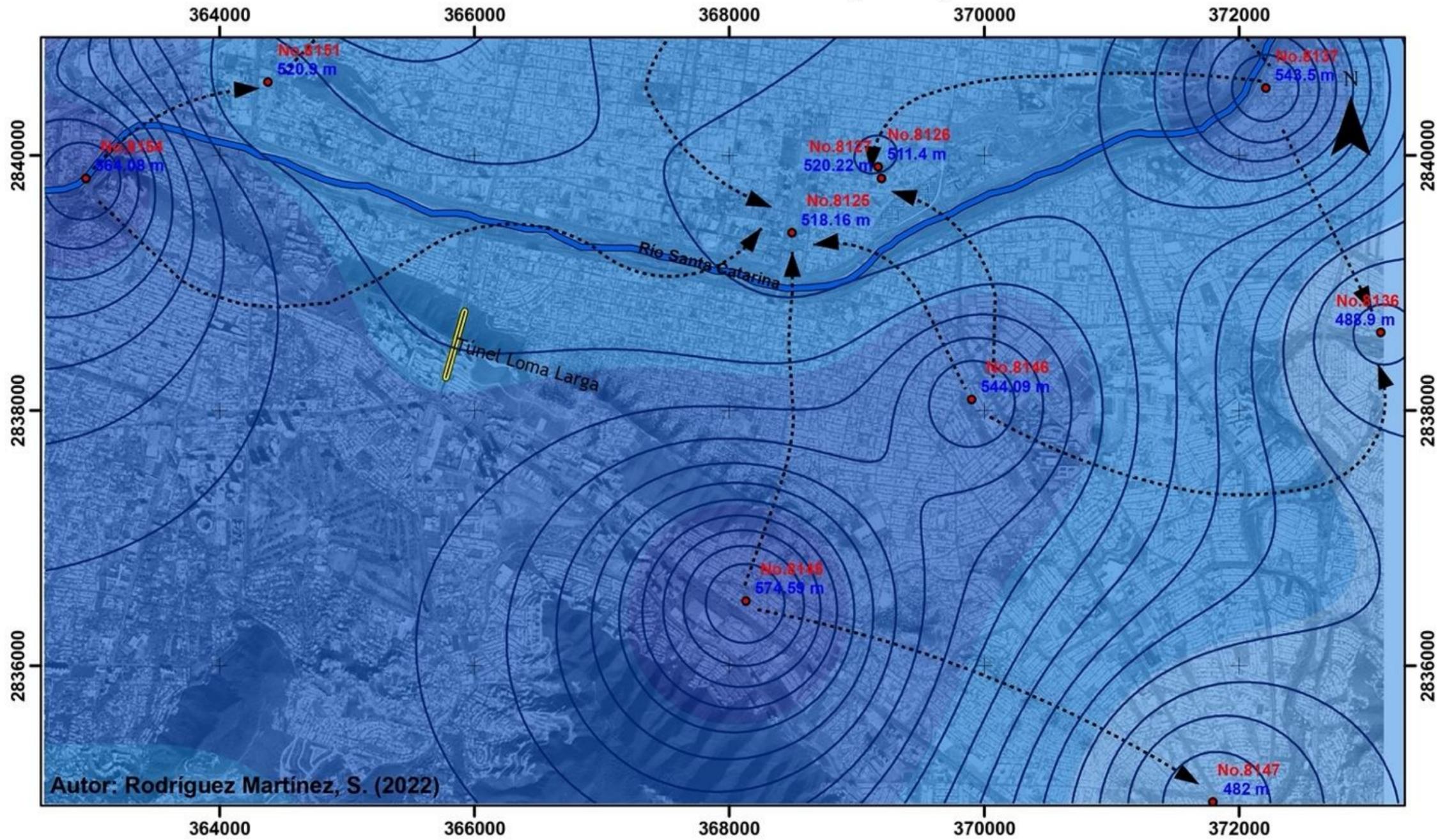
- Pozos
- Isolíneas (5 m)
- - - ► Flujo subterráneo
- Río Santa Catarina
- Túnel Loma Larga



Nivel Piezométrico Rango (m)

488.71 - 504.15	535.05 - 550.48	581.37 - 596.8
504.16 - 519.59	550.49 - 565.92	596.81 - 612.24
519.6 - 535.04	565.93 - 581.36	612.25 - 627.69

Túnel Loma Larga Carta Piezométrica (2012)

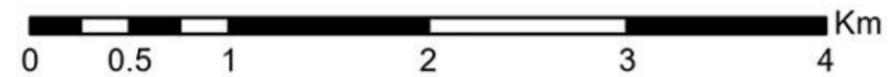


Simbología

- Pozos
- Isolíneas (2.5 m)
- ▶ Flujo subterráneo
- Río Santa Catarina
- == Túnel Loma Larga

Nivel Piezométrico Rango (m)

399.26 - 424.64	475.41 - 500.79	551.56 - 576.93
424.65 - 450.02	500.8 - 526.17	576.94 - 602.32
450.03 - 475.4	526.18 - 551.55	602.33 - 627.7



Autor: Rodríguez Martínez, S. (2022)