

Universidad Autónoma de San Luis Potosí



Facultad de Ingeniería

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

Instituto de Geología

**Evaluación del peligro por inestabilidad de taludes en los
márgenes izquierda y derecha de la Presa de San José, San Luis
Potosí.**

T E S I S

Para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias en Geología Aplicada

Presenta:

I.F. Nick Antonio Rodríguez Rodríguez

Asesor:

Dr. Lorenzo Borselli

Co- Asesora:

Dra. Azalea Judith Ortiz Rodríguez

San Luis Potosí, S. L. P. Febrero 2026

18 de septiembre de 2025

**ING. NICK ANTONIO RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por los **Dres. Lorenzo Borselli y Azalea Judith Ortiz Rodríguez**, Asesor y Coasesora de la Tesis que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestro en Ciencias en Geología Aplicada**. Me es grato comunicarle que en la sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 18 de septiembre del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

"Evaluación del peligro por inestabilidad de taludes en los márgenes izquierda y derecha de la Presa de San José, San Luis Potosí"

Introducción.

Capítulo 1. Marco geológico y geográfico de la Presa San José.

Capítulo 2. Metodología y levantamiento de modelado en el estudio de estabilidad de taludes.

Capítulo 3. Resultados del modelado de estabilidad de laderas de la Presa de San José.

Capítulo 4. Discusión.

Conclusiones.

Bibliografía.

Anexos-

"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"

ATENTAMENTE



DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN
DIRECTOR
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN

www.uaslp.mx

Ccp. Archivo
-bvlg

Av. Manuel Nava 8
Zona Universitaria • CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al39
fax (444) 826 2336

"1945-2025: 80 años formando profesionales de la Ingeniería en beneficio de la sociedad"



UASLP
Universidad Autónoma
de San Luis Potosí



FACULTAD DE
INGENIERÍA



CENTRO DE
**INVESTIGACIÓN
Y ESTUDIOS
DE POSGRADO**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
Área de Investigación y Estudios de Posgrado

DECLARACIÓN

El presente trabajo que lleva por título:

“Evaluación del peligro por inestabilidad de taludes en los márgenes izquierda y derecha de la Presa de San José, San Luis Potosí.”

se realizó en el periodo 02 de 2024 a 02 de 2026 bajo la dirección del Dr. Lorenzo Borselli y co-asesor Azalea Judith Ortiz Rodríguez.

Originalidad

Por este medio aseguro que he realizado el trabajo reportado, y la escritura de este documento de tesis para fines académicos sin ayuda indebida de terceros y sin utilizar otros medios más que los indicados.

Las referencias e información tomadas directa o indirectamente de otras fuentes se han definido en el texto como tales y se ha dado el debido crédito a las mismas.

El autor exime a la UASLP de las opiniones vertidas en este trabajo escrito y asume la responsabilidad total del mismo.

Este trabajo no ha sido sometido como tesis o trabajo terminal a ninguna otra institución nacional o internacional en forma parcial o total, exceptuando el caso cuando existe un convenio específico de doble titulación celebrado entre ambas instituciones.

Se autoriza a la UASLP para que divulgue este documento para fines académicos.

El autor del trabajo escrito, Nick Antonio Rodríguez Rodríguez.

Dedicatoria

**Dedico este trabajo a mis padres, Ma. de la Paz y Antonio,
de manera especial, a la memoria de mi padre,
cuya presencia, amor, cuidado, enseñanzas y ejemplo
siguen guiando mi camino.**

Gracias por todo, viejo.

***“Sé tú el cambio que quieres ver en el mundo;
sé ese rayo que cayó y retumbó en lo más profundo.”***

— Ignacio Fornés Olmo (*Nach*)

Contenido

Dedicatoria.....	i
Índice de Figuras	v
Índice de tablas	ix
Índice de fórmulas	x
Agradecimientos.....	xi
Resumen.....	xiii
Abstract.....	xv
Introducción	1
Planteamiento del problema	7
Antecedentes	9
1. Estudios relacionados con estabilidad de taludes y análisis geotécnicos con el software SSAP	9
2. Estudios ambientales, hidrológicos y geológicos en la presa de San José y su región	10
Hipótesis.....	12
Objetivos	12
Objetivo principal.....	12
Objetivos específicos:	12
Justificación	13
1. Marco geológico y geográfico de la Presa de San José.....	15
1.1. Antecedentes históricos.....	15
1.2. Localización del área de estudio	16
1.3. Características de la presa de San José	17
1.4. Fisiografía.....	18
1.5. Geología Regional.....	19
1.6. Geología de la zona de estudio	23
1.6.1. Estratigrafía	25
1.7. Información sísmica	28
1.8. Geomorfología.....	30

1.9. Clima	33
1.10. Hidrografía	34
2. Metodología y levantamiento de modelado en el estudio de la estabilidad de los taludes.....	36
2.1. Trabajo de campo	39
2.2. Trabajo de gabinete	43
2.2.1. Fuentes bibliográficas	44
2.2.1. Fuentes cartográficas.....	44
2.2.2. Cálculos previos para la estimación del factor de seguridad	45
2.2.3. Validación y control de calidad de los datos	47
2.3. Contextualización de la zona de estudio	48
2.4. Construcción de secciones mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG).....	48
2.5. Adecuación de datos para incorporar a modelado numérico.....	52
2.5.1. Filtrado de las capas internas del perfil.....	52
2.5.2. Construcción de las capas internas del perfil.....	54
2.5.3. Integración de datos de UCS y GSI.....	57
2.6. Modelado de trayectorias de caída de rocas	63
2.7. Construcción de modelado numérico con el software SSAP	65
2.7.1. Configuración de modelo	66
2.7.2. Método de equilibrio límite (Morgenstern-Price)	67
2.7.3. Método de dovelas y formulación general	68
2.7.4. Método Morgenstern-Price: Formulación Rigurosa	69
2.8. Representación cartográfica de factores de seguridad	71
2.9. Integración de resultados esperados y representación cartográfica	72
3. Resultados del modelado de estabilidad de laderas de la Presa de San José.....	74
3.1. Resultados del trabajo de campo	74
3.2 Resultados del modelado de caída de rocas	78
3.3. Resultados de la contextualización geomorfológica de la zona de estudio	82
3.4. Ladera derecha (zona sur)	83
3.4.1 Perfiles de ladera derecha	83
3.4.2. Resultados de procesamiento en gabinete	85

3.4.3. Resultados de adecuación de datos para incorporar a modelado numérico	87
3.4.4. Resultados del modelado numérico con el software SSAP	88
3.4.5. Resultados de representación cartográfica de factores de seguridad	92
3.5. Ladera izquierda (zona norte)	97
3.5.1. Perfiles de ladera izquierda	97
3.5.2. Resultados de procesamiento en gabinete	100
3.5.3. Resultados de adecuación de datos para incorporar a modelado numérico	103
3.5.4. Resultados del modelado numérico con el software SSAP	104
3.5.5. Resultados de representación cartográfica de factores de seguridad	108
4. Discusión	113
4.1 Control geológico, estructural y geotécnico de la estabilidad de los taludes	113
4.2 Procesos superficiales de inestabilidad: caída de bloques	113
4.3 Estabilidad aparente bajo condiciones estáticas y sus implicaciones	114
4.4 Influencia dominante de la saturación y de la presión de poros	115
4.5 Respuesta del macizo bajo condiciones dinámicas y escenarios no ideales	115
4.6 Correspondencia entre modelado numérico y evidencias de campo	116
4.7 Alcances, limitaciones e implicaciones para la gestión del peligro	117
Conclusiones	118
Bibliografía.	120
Anexos	129
Anexo A. Ajuste y construcción de perfiles topográficos a partir de mediciones con distanciómetro láser y DEM.	129
A.1 Medición de puntos en campo	129
A.2 Construcción de la geometría vertical del perfil	129
A.3 Interpolación y ajuste espacial sobre el DEM	131
Anexo B. Perfiles de estabilidad – Ladera derecha	133
Anexo C. Perfiles de estabilidad – Ladera izquierda	138

Índice de Figuras

Figura 1. Ubicación geográfica del estado de San Luis Potosí en el territorio nacional y delimitación de sus municipios.	16
Figura 2. Zona de estudio ubicada en los márgenes de la presa de San José, en San Luis Potosí, S.L.P.	17
Figura 3. Mapa de las provincias fisiográficas de México.	19
Figura 4. Columna geológica simplificada correspondiente a la Carta Geológica Tepetate F14-A83 (SGM, 2004), elaborada por el Servicio Geológico Mexicano (SGM).	22
Figura 5. Mapa de las provincias geológicas de México.	23
Figura 6. Mapa geológico de la zona de estudio en los márgenes de la Presa de San José, San Luis Potosí.	24
Figura 7. Se muestre la acumulación por año de los sismos que van desde el año 1990.	29
Figura 8. Mapa de pendientes (en grados) de la zona de estudio ubicada en los márgenes de la Presa de San José, San Luis Potosí.	33
Figura 9. Diagrama de flujo del proceso metodológico seguido para evaluar la estabilidad de los taludes en los márgenes de la Presa de San José.	38
Figura 10. Vista panorámica de los márgenes de la Presa San José. a) Se observa la ladera derecha. b) Se muestra la ladera izquierda.	39
Figura 11. Medición de las dimensiones de un bloque inestable en la ladera derecha de la Presa San José mediante cinta métrica.	40
Figura 12. Medición de rumbos y de echados de discontinuidades mediante una brújula geológica durante el trabajo de campo en la zona de estudio.	41
Figura 13. Exposición del macizo rocoso en la ladera derecha de la Presa San José, conformada por ignimbritas riolíticas con alto grado de fracturamiento y por bloques de distintas dimensiones.	41
Figura 14. Medición de la resistencia a la compresión del macizo rocoso mediante el ensayo de martillo de rebote tipo Schmidt (modelo N). En esta toma se observa que la medición se realiza de forma horizontal.	42
Figura 15. Distanciómetro laser configurado en campo.	43
Figura 16. Perfiles elaborados sobre el Modelo Digital de Elevación (MDE) en las laderas izquierda y derecha de la Presa de San José.	49
Figura 17. Perfil comparativo de la ladera izquierda (Perfil-02).	50

Figura 18. Esquema del flujo de trabajo para la transferencia de información topográfica desde el entorno SIG hacia el software SSAP.	51
Figura 19. Código en Python empleado para graficar y optimizar los perfiles topográficos mediante la reducción de vértices y la exportación de los datos en formato Excel.....	53
Figura 20. Perfil LD-6 topográfico del talud obtenido a partir de 126 tomado con el DEM, junto con una versión reconstruida a partir de 75 puntos. (Ladera Derecha).	55
Figura 21. Perfil LI-5 obtenido a partir de 106 puntos obtenidos con el DEM, junto con una versión suavizada construida a partir de 75 puntos. (Ladera izquierda)	55
Figura 22. Perfil topográfico de la Sección LD-6 de la Presa de San José.	56
Figura 23. Perfil topográfico de la Sección LI-5 de la Presa de San José.....	56
Figura 24. Índice Geológico de Resistencia (GSI).	62
Figura 25. Afloramientos representativos evaluados durante el trabajo de campo para la estimación del índice GSI en la ladera izquierda.	63
Tabla 3. Coeficientes de restitución (R_n y R_t) utilizados en la simulación de trayectorias de caída de bloques.	64
Figura 26. Ubicación de los puntos de medición con el martillo de Schmidt y el test de Leeb.	75
Figura 27. Estaciones estructurales ubicadas dentro de la ladera izquierda.	76
Figura 28. Macizo rocoso del margen derecho	77
Figura 29. Socavones identificados en el vertedero de la margen izquierda.....	77
Tabla 5. Resultados máximos de altura de rebote, velocidad y energía derivados de la simulación de caída de bloques, diferenciando entre todas las trayectorias modeladas y aquellas que registraron impacto.....	78
Figura 30. Imagen 3D de simulacro de caída de bloques de 10 Ton de puntos de alto Peligro de caída Bloques.	79
Figura 31. Distribución espacial del número de bloques detenidos (n° massi fermi) obtenidos a partir de la simulación de caída de bloques.....	80
Figura 32. Ubicación de los perímetros de la zona de peligro por caída de bloques, basado en el programa IS GeoMassi.	81
Figura 33. Evidencia del bloque caído en la ladera izquierda registrada durante la visita de campo del 3 de junio de 2025.....	81
Figura 34. Mapa de localización de indicadores de inestabilidad de laderas en el vertedero de la Presa de San José	82
Figura 35. Ubicación de los perfiles topográficos en la ladera derecha.	84

Figura 36. Perfil interpolado del LD_1 de la ladera derecha generado con el DEM de 1.5 m.	84
Figura 37. Distribución log normal del martillo de Schmidt, comparación entre zonas de interés del sitio.....	86
Figura 38. Sectores representativos de la ladera derecha de la Presa de San José.	88
Figura 39. Perfil LD_1 representativo de la ladera derecha y escenarios de análisis considerados.....	89
Figura 40. Perfil LD_5 representativo de la ladera derecha y escenarios de análisis considerados.....	90
Figura 41. Perfil LD_10 representativo de la ladera derecha y escenarios de análisis considerados.....	91
Figura 42. Mapa del factor de seguridad (FS) en condición estática para los márgenes derecho.	93
Figura 43. Mapa del factor de seguridad (FS) para el escenario FTC, correspondiente a la condición de carga adicional modelada para la presa.....	94
Figura 44. Mapa del factor de seguridad (FS) bajo condición dinámica, considerando la acción sísmica especificada para la zona.....	95
Figura 45. Mapa del factor de seguridad (FS) para el escenario saturado, asociado al incremento de presión de poros dentro del macizo rocoso.	96
Figura 46. Ubicación de los perfiles topográficos en la ladera izquierda.....	97
Figura 47. Perfil interpolado del LI_1 de la ladera izquierda generado con el DEM de 1.5 m.	98
Figura 48. Distribución log normal del martillo de Schmidt, diferentes puntos en la ladera izquierda.....	101
Figura 49. Distribución lognormal del leeb test, comparación entre zonas de interés del sitio	102
Figura 50. Sectores representativos de la ladera izquierda de la Presa de San José que no forman parte de las secciones modeladas.	104
Figura 51. Perfil LI_1 representativo de la ladera izquierda y escenarios de análisis considerados.....	105
Figura 52. Perfil LI_14 representativo de la ladera izquierda y escenarios de análisis considerados.....	106
Figura 53. Perfil LI_22 representativo de la ladera izquierda y escenarios de análisis considerados.....	107

Figura 54. Mapa del factor de seguridad (FS) en condición estática para los márgenes derecho.	109
Figura 55. Mapa del factor de seguridad (FS) para el escenario FTC, correspondiente a la condición de carga adicional modelada para la presa.....	110
Figura 56. Mapa del factor de seguridad (FS) bajo condición dinámica, considerando la acción sísmica especificada para la zona.....	111
Figura 57. Mapa del factor de seguridad (FS) para el escenario saturado, asociado al incremento de presión de poros dentro del macizo rocoso.	112
Figura A. 1. Perfil LI-19 construido a partir de mediciones con distanciómetro láser, previo al ajuste con el DEM.	131
Figura A. 2. Perfil topográfico LI-19 transpuesto y anclado espacialmente al DEM a partir de mediciones de campo con distanciómetro láser.	132
Figura B. 1. Perfil LD_3 representativo de la ladera derecha y escenarios de análisis considerados.....	133
Figura B. 2. Perfil LD_4 representativo de la ladera derecha y escenarios de análisis considerados.....	134
Figura B. 3. Perfil LD_6 representativo de la ladera derecha y escenarios de análisis considerados.....	135
Figura B. 4. Perfil LD_8 representativo de la ladera derecha y escenarios de análisis considerados.....	136
Figura B. 5. Perfil LD_8 representativo de la ladera derecha y escenarios de análisis considerados.....	137
Figura C. 1. Perfil LI_4 representativo de la ladera derecha y escenarios de análisis considerados.....	138
Figura C. 2. Perfil LI_8 representativo de la ladera derecha y escenarios de análisis considerados.....	139
Figura C. 3. Perfil LI_10 representativo de la ladera derecha y escenarios de análisis considerados.....	140
Figura C. 4. Perfil LI_12 representativo de la ladera derecha y escenarios de análisis considerados.....	141
Figura C. 6. Perfil LI_19 representativo de la ladera derecha y escenarios de análisis considerados.....	143
Figura C. 7. Perfil LI_21 representativo de la ladera derecha y escenarios de análisis considerados.....	144

Índice de tablas

Tabla 1. Fases generales de la metodología empleada para la evaluación de la estabilidad de los taludes en los márgenes de la Presa de San José.	37
Tabla 2. Modelos empíricos de correlación entre el índice de dureza Leeb (LHD) y la resistencia a compresión uniaxial (UCS), propuestos por diferentes autores.	59
Tabla 4. Modelos rigurosos de equilibrio límite (LEM) implementado en SSAP. Modificado de (Borselli, 2024)	70
Tabla 6. Valores de interpolación para la ladera derecha obtenidos a partir de los perfiles.	85
Tabla 7. Valores obtenidos con el martillo de Schmidt para la ladera derecha, haciendo una comparación directa con la ladera izquierda.	87
Tabla 8. Valores estimados del índice de resistencia del macizo rocoso (GSI), ladera derecha.	87
Tabla 9. Resume los factores de seguridad calculados para cada sección modelada, bajo condiciones estáticas, dinámicas, saturadas y de falla por FTC. Margen derecho (LD).	92
Tabla 10. Valores de interpolación para la ladera izquierda obtenidos a partir de los perfiles.	99
Tabla 11. Valores obtenidos Martillo de Schmidt para las zonas y sectores de la ladera izquierda	102
Tabla 12. Valores obtenidos con leeb test para las zonas y sectores de la ladera izquierda	103
Tabla 13. Valores estimados del índice de resistencia del macizo rocoso (GSI), ladera izquierda.	103
Tabla 14. Resume los factores de seguridad calculados para cada sección modelada, bajo condiciones estáticas, dinámicas, saturadas y de falla por FTC. Margen izquierdo (LI).	108
Tabla A. 1. Datos de medición con distanciómetro láser y cálculo de incrementos espaciales (Δx , Δy) utilizados para la construcción y ajuste del perfil topográfico sobre el DEM.	130

Índice de fórmulas

Fórmula 1	57
Fórmula 2	58
Fórmula 3	58
Fórmula 4	59
Fórmula 5	60
Fórmula 6.	65
Fórmula 7	68
Fórmula 8	68
Fórmula 9	70
Formula A. 1	130
Formula A. 2	130

Agradecimientos

Primeramente, agradezco a Dios por poner en mi camino a las personas adecuadas en el momento preciso; por abrirme paso aun en la incertidumbre y por sostenerme cuando el panorama no era claro. Por recordarme que incluso en los procesos más complejos siempre existe dirección y propósito.

A mi padre, Antonio Rodríguez Romero, por ser la piedra angular de mi vida: mi apoyo, mi amigo y mi guía. Gracias por enseñarme que el trabajo digno y el compromiso silencioso construyen carácter; por confiar plenamente en mí incluso cuando yo dudaba; por las desveladas y el esfuerzo constante. Tu ejemplo continúa marcando mi camino, aun cuando ya no estés físicamente.

A mi madre, Ma. de la Paz Rodríguez Flores, por el empuje constante, la fortaleza y el ejemplo de resiliencia. Gracias por sostener el hogar con amor firme; por cada desayuno, cada comida y cada palabra que me recordó que rendirse no era opción. Tu presencia ha sido sostén y dirección en cada etapa de mi formación.

A mi hermana, Juana María Rodríguez, por el cariño y la solidaridad incondicional. Por demostrar que la familia no solo se dice, se ejerce.

A mi cuñado, Luis Guillermo Hernández, por la unión, el respaldo y la entereza mostrada en momentos clave, recordándome el valor de la cohesión familiar.

A mis sobrinos, Luis Antonio y Jahir Hernández Rodríguez, porque sus risas fueron pausa y energía cuando el cansancio pesaba. Ustedes me recordaron que el esfuerzo también debe tener alegría.

A mi asesor, el Dr. Lorenzo Borselli, por la confianza desde el inicio y por su exigencia académica, que me impulsó a no conformarme. Gracias por enseñarme que la rigurosidad y la pasión por el detalle no son opcionales, sino parte del oficio científico.

A mi asesora, la Dra. Azalea Judith Ortiz Rodríguez, por su acompañamiento crítico y humano; por señalar errores con firmeza y reconocer avances con generosidad. Gracias por recordarme que el investigador también es persona.

Al Dr. Damiano Sarocchi, por su disposición constante y respaldo académico durante este proceso, así como por su participación en mi comité.

Al Dr. Luis Ángel Rodríguez Sedano y al Dr. José Juan Francisco Castillo Rivera, por su tiempo, observaciones y compromiso en la evaluación de este trabajo.

A la institución, al programa de posgrado y al CONAHCYT, por el respaldo económico (No. de beca: 65fd0b8828d4d46dd0d7aa54; CVU: 1326313) y por proporcionar las condiciones que hicieron posible esta investigación.

A mi familia, especialmente a mi madrina Gloria María Hattori y a mi tío Larry Hattori, por el acompañamiento, el apoyo constante y la confianza depositada en mí.

A mi padrino Nicanor Rodríguez (Nico), cuyo legado sigue presente. Su recuerdo no solo representa afecto, sino también responsabilidad y continuidad. Parte de este logro también lleva su nombre.

A mis compañeros de posgrado: el Arquitecto Christopher Rentería, el Ingeniero David Morales Basurto, las Ingenieras Linneth González, Shaila Moreno y Daria Barboza, la Licenciada Karina Rentería, por el apoyo mutuo y las conversaciones que enriquecieron esta etapa.

A mis amigos Estefania Díaz de León, Edgar Vázquez, Evgeny de Jesús Capetillo; a mis compañeros de boxeo (TZ), de gimnasio y de trote; a mi psicóloga, la Licenciada Lilia Berenice de la Garza; al profesor Alfonso Urbano; y a quien me acompañó al parque, por ayudarme a sostener el equilibrio mental y emocional cuando el proceso se volvía demandante. Este logro también es resultado de aprender a cuidar la mente y el cuerpo.

Finalmente, a Ariana Fuentes Mata y a su hijo Santiago, por acompañarme con sensibilidad y cariño en una etapa significativa de este proceso; por las conversaciones compartidas y por recordarme que, aun en medio de los desafíos personales, el afecto sincero puede convertirse en impulso, la resiliencia en fortaleza y el aprendizaje en una forma más consciente de crecer.

Resumen

La Presa de San José es una infraestructura de gran importancia para la ciudad de San Luis Potosí, tanto por su función hidráulica como por el uso recreativo que se realiza en sus márgenes. La presencia constante de personas en el área, junto con taludes formados por macizos rocosos volcánicos fracturados y la ocurrencia de procesos geomorfológicos activos, hace necesario evaluar el peligro asociado a posibles procesos de inestabilidad, como la caída de rocas o el deslizamiento de material.

El objetivo de este trabajo fue evaluar el peligro relacionado con la inestabilidad de taludes y la caída de rocas en los márgenes de la Presa de San José, mediante un estudio geotécnico que permitiera identificar los factores que intervienen en estos procesos, su distribución espacial y los factores de seguridad asociados. Para ello, se desarrolló un enfoque integral que combinó trabajo de campo, análisis espacial y modelado numérico.

Durante la etapa de campo se realizó un reconocimiento detallado de la zona de estudio, que incluyó el mapeo geológico, la identificación de evidencias de inestabilidad y la estimación de la resistencia del macizo rocoso mediante el martillo de Schmidt, así como la caracterización de su calidad a través del sistema GSI. Posteriormente, esta información fue procesada en un entorno de Sistemas de Información Geográfica, donde se generaron modelos digitales de elevación y se trazaron perfiles representativos que permitieron describir de manera más realista la geometría de las laderas.

Con base en estos perfiles se llevaron a cabo simulaciones numéricas de estabilidad utilizando el software SSAP, considerando distintos escenarios de análisis, que incluyeron condiciones estáticas, dinámicas, saturadas y con carga adicional. Este análisis permitió evaluar cómo responden los taludes ante cambios en las condiciones externas y cómo varía el factor de seguridad a lo largo de los márgenes de la presa.

Los resultados muestran que, bajo condiciones estáticas, la mayoría de los perfiles presentan factores de seguridad dentro de rangos aceptables. Sin embargo, al incorporar escenarios dinámicos y, sobre todo, condiciones de saturación, se observa una disminución importante del factor de seguridad, lo que evidencia que la geometría de las laderas, el grado

de fracturamiento y la calidad del macizo rocoso juegan un papel determinante en los procesos de inestabilidad. El análisis espacial de los resultados permitió, además, identificar zonas con mayor peligro relativo dentro de los márgenes de la presa.

Abstract

San José Dam is an important hydraulic infrastructure for the city of San Luis Potosí, Mexico, not only because it contributes to water supply, but also because it is a recreational space frequently visited by the local population. The slopes surrounding the reservoir are formed by fractured volcanic rock masses, where natural geomorphological processes and human presence coexist. In this context, evaluating the hazard associated with slope instability and rockfall becomes essential for both infrastructure safety and public protection.

The aim of this study was to assess the hazard related to slope instability and rockfall along the left and right margins of San José Dam through a detailed geotechnical approach. The research focused on identifying the main factors controlling instability, understanding their spatial distribution, and estimating the corresponding factors of safety.

The methodology combined field observations, spatial analysis using Geographic Information Systems (GIS), and numerical modeling. Fieldwork included geological mapping, identification of instability indicators, and estimation of rock mass strength using the Schmidt hammer and Leeb hardness test, together with rock mass quality assessment through the Geological Strength Index (GSI). This information was integrated into Digital Elevation Models and representative slope profiles to realistically describe the geometry of the terrain.

Slope stability analyses were carried out using the Slope Stability Analysis Program (SSAP) under different scenarios, including static, pseudo-static seismic, saturated, and additional loading conditions. The results show that, although most slopes remain stable under static conditions, stability decreases significantly under saturated and dynamic scenarios. These findings highlight the strong influence of slope geometry, rock mass quality, and fracturing on instability processes.

By integrating numerical results into a spatial framework, areas with relatively higher hazard levels were identified. This study provides a clearer understanding of slope behavior in fractured volcanic environments and offers technical support for risk management and preventive decision-making in the San José Dam area.

Introducción

La inestabilidad de taludes y caída de rocas constituyen un proceso natural potencialmente peligroso (Ferrari et al., 2016). El primero hace referencia a la pérdida de persistencia de una pendiente natural o artificial (Nkpadobi et al., 2015). Este proceso suele estar relacionado a caídos o derrumbes, flujos, deslizamientos y expansiones o movimientos laterales, así como combinaciones de ellos, conocidos como movimientos complejos (U.S. Geological Survey, 2004).

A pesar de estar relacionados, cada uno describe un comportamiento distinto: los caídos implican el derribo libre de bloques desde una pendiente; los derrumbes, el colapso repentino de una masa de suelo o roca; los flujos, el movimiento de material en estado semifluido, como lodo o escombros; los deslizamientos, el desplazamiento coherente de una masa a lo largo de una superficie de falla; y las expansiones o movimientos laterales, el desplazamiento horizontal de materiales, común en terrenos saturados o sensibles (Tarbuck et al., 2017). Los movimientos complejos combinan dos o más de estos procesos en un mismo evento (Alcántara Ayala et al., 2008)

A nivel mundial, los estudios sobre inestabilidad de taludes y caída de rocas han crecido debido a que estos fenómenos pueden impactar áreas densamente pobladas dañando infraestructura crítica (Sarro et al., 2021). Según Záruba & Mencl (2014) los taludes son estructuras naturales que, bajo la influencia de agentes externos, pueden perder su estabilidad. Investigaciones en México y en otros países han demostrado que los deslizamientos de tierra y caídas de rocas son los eventos geológicos más comunes en áreas montañosas (Hutchinson, 1989) como las que rodean la capital del estado de San Luis Potosí, zona de estudio de la presente investigación.

Entre las problemáticas más importantes que se enfrentan en la capital potosina, se encuentra el abastecimiento de agua para la población y sus actividades (Cardenas-Tristan et al., 2025). El 92% del agua necesaria para las actividades

humanas es proporcionada por pozos distribuidos en la mancha urbana, no obstante, el 8% restante se obtiene por almacenamiento superficiales como las presas Gonzalo N. Santos mejor conocida como El Peaje, Álvaro Obregón nombrada como Las Palomas y, la que comprende el presente estudio, presa de San José (Ortiz Rodríguez, 2010).

Esta última, situada al W de la capital, abastece de agua a algunos sectores de la ciudad y se encuentra rodeada de taludes susceptibles a procesos de inestabilidad, así como a la caída de rocas (Laussin, 2024). Este tipo de eventos pone en peligro la infraestructura y las personas que frecuentan la zona, por lo que resulta esencial identificar y mitigar la problemática geotécnica en el sitio (Agliardi et al., 2009).

La caída de rocas en los taludes que rodean la presa no solo podría dañar su infraestructura, sino que también amenazaría la vida de las personas que transitan o visitan la zona; por tanto, es necesario que las autoridades y actores locales cuenten con estudios detallados que permitan mitigar estos peligros (Reyes-Hernández et al., 2022). La urgencia de implementar medidas preventivas en las presas ha sido respaldada por estudios previos que señalan que distintas características geológicas pueden provocar incidentes destructivos derivados del deslizamiento de laderas (González de Vallejo et al., 2004). Uno de los incidentes señalados a nivel mundial es el ocurrido en la presa de Vajont, en Italia, donde un deslizamiento hacia el vaso de la presa provocó un desastre que costó la vida a 1,910 personas en 1963 (Raccanello et al., 2022).

En tiempos recientes, se ha hecho un esfuerzo por mejorar la predicción y prevención de procesos relacionados con la inestabilidad de los taludes mediante análisis geotécnicos y geológicos avanzados (Zhu et al., 2025). El desarrollo de modelos numéricos y el uso de tecnologías de imagen y simulación han permitido una evaluación más precisa de la estabilidad de taludes (Karakas, 2008).

En los últimos años, el uso de modelos numéricos y simulaciones se ha vuelto fundamental para el análisis de la estabilidad de los taludes (Stead & Coggan, 2012). Herramientas como el software *Slope Stability Analysis Program* (SSAP) permiten realizar simulaciones detalladas para evaluar el factor de seguridad de los taludes y predecir su comportamiento bajo distintas condiciones geotécnicas (Borselli, 2024a). SSAP, en particular, ha sido ampliamente utilizado para analizar la estabilidad de flancos en volcanes (Di Traglia, Calvari, et al., 2023), estabilidad de taludes mediante bioingeniería convencional (Uzielli et al., 2025), fallas de bordes en cráteres volcánicos (Di Traglia, Borselli, et al., 2023), modelado y monitoreo de deslizamientos de tierra (Tunini et al., 2024), modelado y reconstrucción de fases de deslizamiento (Innocenti et al., 2023) y deslizamientos de tierra en valles Marineris, Marte (Brunetti et al., 2014).

Todos estos estudios tienen como objetivo analizar la estabilidad de los taludes mediante la simulación de diversos escenarios, lo que proporciona una visión detallada de los posibles deslizamientos y favorece una planificación efectiva de estrategias de prevención (Borselli, 2024). Uno de los elementos de evaluación obtenidos a través de este software es el factor de seguridad, un concepto que relaciona la resistencia de un material o estructura con la carga que debe soportar, lo que permite obtener un valor cuantitativo que evidencia la inestabilidad de un talud e identificar superficies que puedan deslizarse (Xiao et al., 2024).

Más recientemente, se ha propuesto la ejecución automatizada de Slope Stability Analysis Program mediante su implementación en línea de comandos (Command-line SSAP, CSSAP), lo que permite preparar, ejecutar y espacializar de forma sistemática análisis bidimensionales de estabilidad a partir de Modelos Digitales de Elevación y parámetros geotécnicos distribuidos espacialmente (Borselli, 2023; Mevoli et al., 2026). Este enfoque permite transformar los resultados puntuales del análisis en mapas continuos del factor de seguridad y de la profundidad potencial de falla, interpretando el factor de seguridad no como un valor absoluto, sino como un

índice de inestabilidad útil para la zonificación de la susceptibilidad y el análisis del peligro (Mevoli et al., 2026).

De esta manera, el uso de CSSAP fortalece el carácter reproducible y físicamente basado de la cartografía resultante, reduciendo la subjetividad inherente a métodos puramente cualitativos y aportando información clave para la gestión de peligro en zonas con inestabilidad potencial (Borselli, 2023; Stead & Coggan, 2012).

Además del análisis de estabilidad global mediante equilibrio límite, en laderas rocosas fracturadas es importante considerar procesos superficiales como la caída de bloques (Borselli, 2024).

Este fenómeno no responde al mismo comportamiento que un deslizamiento masivo, ya que implica el desprendimiento individual de bloques que descienden por la pendiente mediante fases de caída libre, rebote y rodadura (Volkwein et al., 2011). Su dinámica ha sido ampliamente descrita en estudios especializados sobre taludes rocosos (Wyllie, 2014).

Para estimar el alcance potencial y la energía de impacto de estos bloques, en los últimos años se han desarrollado modelos cinemáticos basados en el enfoque *lumped-mass*, que representan el bloque como una masa puntual cuya trayectoria depende de la geometría del terreno y de la disipación de energía en cada impacto (Volkwein et al., 2011; Wyllie, 2014).

En esta investigación, dicho análisis se implementó mediante el software IS GeoMassi (Dolmen S.r.l., 2024), lo que permitió simular trayectorias sobre el modelo digital del terreno y complementar la evaluación de estabilidad global realizada con SSAP.

La incorporación de este enfoque aporta una visión más completa del peligro geológico en las laderas que rodean la Presa de San José, al integrar tanto la estabilidad del macizo como el posible alcance de bloques desprendidos.

En la última década se ha avanzado en la comprensión de los factores que contribuyen a la inestabilidad de los taludes rocosos. Karakas (2008) señala que los análisis tradicionales, basados únicamente en mediciones de campo y estudios topográficos, resultan insuficientes para predecir con precisión las amenazas asociadas a deslizamientos y caídas de rocas. En este sentido, se ha enfatizado el uso de herramientas especializadas como el análisis por elementos finitos, martillo Schmidt y sistema de clasificación índice de resistencia geológica (GSI), que permiten estimar la resistencia de los macizos rocosos (Hoek et al., 2013a)

La estabilidad de un talud depende, entre otros factores, de la dureza del material geológico que lo constituye. En este trabajo, dicha dureza se estimó mediante el índice GSI conforme a Hoek, (1994). Esta metodología ha evolucionado a través de cinco momentos clave: su propuesta inicial en 1994, el primer refinamiento metodológico en 1995, la ampliación para macizos heterogéneos en 2000, la actualización de tablas y curvas en 2013 y la revisión integral del criterio Hoek–Brown en 2019. Estos avances han incrementado su precisión y su campo de aplicación (Hoek, 1994; Hoek et al., 1995, 2013; Hoek & Brown, 2019; P. Marinos & Hoek, 2000).

El propósito del método es estimar la resistencia y deformación del macizo rocoso a partir de observaciones visuales directas, con la consideración de dos variables principales:

- La estructura del macizo (bloques, columnas, fragmentos)
- La condición superficial de las discontinuidades (rugosidad, alteración, relleno).

A diferencia de otros sistemas, como el *índice de clasificación del macizo rocoso* (RMR), Clasificación del macizo rocoso o el *Índice de Calidad del Macizo Rocosos Q*, el GSI no requiere mediciones en laboratorio, su método consiste en la observación y mediciones en campo que son identificadas en esquemas propuestos por Marinos y Hoek, (2000).

Una de las principales utilidades del GSI es ser clave para el criterio Hoek-Brown, que permite estimar la resistencia y la deformabilidad del macizo rocoso; asimismo, permite calcular parámetros de resistencia clásicos, como la cohesión y el ángulo de fricción equivalentes, necesarios para los análisis de estabilidad de taludes.

En estudios recientes como los de Russo (2009) y Villaseñor (2019) Se ha observado que el GSI es una herramienta confiable en rocas volcánicas fracturadas, como las presentes en la Presa de San José, donde se evidencia la variabilidad estructural generada por el enfriamiento, la retracción y el fallamiento.

El martillo de Schmidt según & Basu (2005) es una herramienta desarrollada en los años 40 por el ingeniero suizo Ernest Schmidt, que se utiliza para estimar la resistencia en compresión uniaxial (UCS).

Esta herramienta mide la dureza superficial relativa de un material de rocas intactas, basándose en el índice de rebote (R) en una masa o pistón que es lanzado por un resorte contra la superficie, la energía resultante es clave para la interpretación de la dureza de la roca, si el rebote es mayor, mayor es la dureza, por lo tanto, mayor es la resistencia a compresión del material (Basu & Aydin, 2004).

En este contexto, los ensayos de dureza tipo Leeb han sido ampliamente utilizados como método no destructivo para estimar la resistencia a compresión simple de la roca intacta, especialmente en campo, donde la obtención de muestras cilíndricas puede ser limitada (J. S. Lee et al., 2014). De acuerdo con Ulusay et al. (2025), el índice de rebote obtenido mediante el Leeb Test presenta correlaciones empíricas consistentes con la resistencia a compresión uniaxial (UCS), constituyendo una herramienta confiable para la evaluación preliminar de propiedades mecánicas en macizos rocosos fracturados.

En conjunto, los parámetros geomecánicos obtenidos mediante el GSI, el martillo de Schmidt y la estimación de la resistencia del macizo rocoso constituyen la base para el desarrollo de los análisis de estabilidad de taludes. Estos insumos

permiten definir con mayor precisión las condiciones mecánicas del macizo, ajustar los modelos de resistencia y establecer escenarios realistas de falla. A partir de esta caracterización es posible integrar los datos al modelado numérico y evaluar el comportamiento del talud bajo distintas condiciones de carga.

El objetivo del presente estudio es proporcionar un diagnóstico detallado sobre la estabilidad de los taludes de la Presa de San José mediante la obtención de datos en campo, los cuales se integrarán en un análisis numérico basado en métodos de equilibrio límite (LEM) implementado en el software SSAP, e identificar su distribución espacial con base en sistemas de información geográfica (SIG). Todo lo anterior permitirá mostrar áreas con factor de seguridad bajo que presentan una alta probabilidad de caída de rocas. Esta información será valiosa no solo para la protección de la infraestructura y de la población, sino también para futuras investigaciones sobre la estabilidad de los taludes en áreas con características geológicas similares.

Planteamiento del problema

La presa de San José constituye una infraestructura estratégica para la región, cuyo funcionamiento y seguridad dependen, entre otros factores, de la estabilidad de los taludes que la rodean. Estos taludes están sometidos a condiciones ambientales variables, en las que la interacción entre las características geomorfológicas, las propiedades geotécnicas de los materiales, el régimen de precipitaciones y las fluctuaciones en el nivel del agua del embalse influye directamente en su comportamiento mecánico y estabilidad a corto y mediano plazo.

Diversos estudios han señalado que los procesos de inestabilidad de taludes asociados a presas y embalses representan un riesgo significativo, particularmente en contextos donde los materiales presentan heterogeneidad estructural y los cambios en el contenido de humedad pueden modificar sustancialmente las condiciones de resistencia al corte (Abramson et al., 2002; Duncan & Wright, 2005). No obstante, en

muchos casos, el análisis de estabilidad se ha basado en aproximaciones simplificadas o en parámetros obtenidos a partir de información limitada, lo que introduce incertidumbres importantes en la evaluación del comportamiento real de los taludes.

En el caso específico de la Presa de San José, si bien existen antecedentes de estudios técnicos y observaciones de campo, persisten vacíos de conocimiento respecto a la caracterización detallada de las condiciones que controlan la estabilidad de sus taludes. La variabilidad espacial de los materiales, la influencia de los procesos hidrológicos y la respuesta de los taludes ante escenarios de saturación parcial o fluctuaciones del nivel del embalse no han sido analizadas de manera integrada y sistemática. Esta situación limita la capacidad para identificar zonas potencialmente inestables y anticipar escenarios de falla bajo condiciones ambientales cambiantes.

La literatura especializada reconoce que la evaluación de la estabilidad de los taludes en este tipo de infraestructuras requiere enfoques que consideren explícitamente la complejidad del sistema, integrando información geotécnica, geomorfológica e hidrológica, y evitando la extrapolación directa de parámetros obtenidos en otros contextos (Beven, 2006; Duncan & Wright, 2005). La ausencia de este tipo de análisis puede conducir a interpretaciones parciales del estado de estabilidad de los taludes y, en consecuencia, a una subestimación de los riesgos asociados.

En este contexto, el problema central que aborda esta investigación radica en la limitada comprensión de los factores que determinan la estabilidad de los taludes de la Presa de San José, considerando las condiciones ambientales y geotécnicas específicas del sitio. Existe la necesidad de realizar un análisis detallado que permita reducir las incertidumbres existentes, mejorar la evaluación del comportamiento de los taludes y aportar información científica que contribuya a la gestión y seguridad de esta infraestructura.

Antecedentes

Los antecedentes se presentan en dos secciones: primero, los relacionados con la estabilidad de los taludes y los análisis geotécnicos; posteriormente, los estudios ambientales, hidrológicos y geológicos realizados específicamente en la Presa de San José y su entorno dentro de San Luis Potosí y en otras partes de México.

1. Estudios relacionados con estabilidad de taludes y análisis geotécnicos con el software SSAP

En la Sierra de San Miguelito, Puente Castillo (2014) Analizó el peligro geomorfológico mediante la caracterización geomecánica con los sistemas RMR y GSI y el análisis en SIG. El estudio incluyó sectores de la Presa de San José e identificó procesos como caída y volcadura de bloques vinculados a la morfología y al fracturamiento del macizo rocoso.

En Escalerillas y la Presa de San José, Ramírez Rodríguez (2016) Estudió el riesgo por caída de rocas mediante análisis geomorfológico y simulación de trayectorias con CRSP4. El trabajo generó un mapa de peligro considerando la estabilidad de los bloques y los factores naturales y antrópicos asociados. Ortiz López (2017) Realizó un estudio sobre la estabilidad de los taludes en la carretera Tierra Nueva-El Realito; identificó las zonas de mayor inestabilidad mediante la cuantificación del factor de seguridad. El análisis reveló áreas con riesgo de caída de bloques y flujos que podrían obstruir la vía, así como escenarios de colapso que afectarían la infraestructura, incluido el acueducto que abastece a diversas ciudades.

En la presa El Realito, Sosa Davila (2019) Evaluó la estabilidad de los taludes mediante la clasificación de los macizos rocosos con los sistemas RMR y GSI. La investigación incluyó el análisis de materiales tipo *Bimrock* y el desarrollo de un modelo geotécnico que permitió evaluar la estabilidad tanto en condiciones actuales como en vaciado rápido.

En Teziutlán, Puebla, Baltazar Martínez (2022) Desarrolló una metodología cuantitativa para evaluar el peligro de inestabilidad en laderas, utilizando el software SSAP y simulaciones con Titan2D. La investigación analizó la estabilidad de los taludes en condiciones saturadas y no saturadas, generando mapas de peligro que permiten predecir deslizamientos a partir de escenarios críticos.

2. Estudios ambientales, hidrológicos y geológicos en la presa de San José y su región

De manera específica, en la presa de San José se han realizado diferentes estudios, entre los cuales destacan el de Uc Castillo (2020), quien analizó la función de la presa como un área de recarga del acuífero profundo del valle de San Luis Potosí. Los resultados indicaron que, aunque las condiciones climáticas y geológicas limitan su eficacia para la recarga profunda, la sierra desempeña un papel importante en otros procesos hidrológicos, como el flujo subhipodérmico. Este flujo contribuye al llenado de bordos y presas, así como a apoyar servicios ecosistémicos esenciales.

Torres Sánchez (2020), habla sobre la geoquímica y petrogenía del Complejo Volcánico Sierra de San Miguelito (CVSSM) y revela que esta región está formada por rocas volcánicas de composición máfica, intermedia y félsica. Las rocas máficas se originaron a partir de la fusión parcial del manto, mientras que las rocas intermedias y félsicas evolucionaron a partir de componentes de la corteza terrestre. Mediante dataciones obtenidas mediante el método $40\text{Ar}/39\text{Ar}$, se identificaron tres periodos volcánicos: el primero se caracterizó por la formación de domos de lava félsica y depósitos piroclásticos; el segundo fue predominantemente explosivo, con flujos de lava intermedios y piroclásticos. El tercero incluyó flujos de lava máfica asociados a fallas geológicas. Los análisis geoquímicos también mostraron un enriquecimiento en tierras raras ligeras y anomalías negativas de Nb y Ta, lo que evidencia procesos de fraccionamiento de minerales.

Hernández et al., (2021) Presentan un análisis integral del Paisaje de Conservación de la Sierra de San Miguelito (SSM), geoforma en la que se encuentra la

presa de San José. Mediante una metodología de planificación territorial aplicada al diseño de áreas naturales protegidas, el estudio muestra que los bosques, matorrales xerófilos y pastizales naturales de la SSM albergan una alta biodiversidad, con 285 especies, de las cuales el 27 % son endémicas y el 5 % están protegidas, en un área que comprende apenas el 1.79 % del territorio estatal. A partir de estos hallazgos, se propuso declarar 109,638.95 ha como Área de Protección de Flora y Fauna, reconociendo los servicios ambientales que benefician a la ciudad de San Luis Potosí, lo que motivó el inicio de trámites para su establecimiento como PNA en 2021.

Sobre la calidad del agua en la presa de San José, Limones Carranza, (2024) Reveló que las concentraciones de fósforo total (PT) y de nitrógeno total (NT) superan los límites permitidos por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), lo que indica un estado de eutrofización avanzado. Este proceso ha sido acelerado por las emisiones contaminantes de fuentes puntuales y difusas, lo que afecta negativamente la calidad del agua.

Un estudio realizado por Herrera Ollachica et al. (2025), en el cual se realizó una identificación de *Eichhornia crassipes* mejor conocido como Jacinto de agua, especie invasora que genera daño ecológico y económico al impedir que la luz penetre el agua, privándola de sus propiedades, afectando a diversas especies acuáticas. En él se busca identificar esta especie mediante su comportamiento en el espectro electromagnético, captado con una cámara multiespectral de bajo costo. La cámara cuenta con dos filtros de espectro de luz infrarroja con longitudes de onda de 720 y 850 nanómetros.

En conjunto, los antecedentes evidencian la importancia de analizar la estabilidad de los taludes de la Presa de San José, integrando la caracterización geológica y geotécnica mediante herramientas numéricas y SIG.

Hipótesis

La caracterización geotécnica detallada del macizo rocoso —mediante la integración de GSI, mediciones de resistencia a compresión uniaxial estimada (UCS) y la geometría real de las laderas— permitirá identificar las áreas más susceptibles a la inestabilidad en los márgenes de la Presa de San José. Asimismo, se espera que la incorporación del análisis y la simulación numérica con SSAP muestre que la resistencia interna del macizo controla de manera significativa los factores de seguridad y los patrones de posible caída o deslizamiento de bloques.

Objetivos

Objetivo principal

Evaluar el peligro asociado a la inestabilidad de taludes y a la caída de bloques en las laderas izquierda y derecha de la Presa de San José, mediante un estudio geotécnico y modelación numérica que permita identificar los factores geomecánicos y geométricos involucrados, estimar el factor de seguridad bajo distintos escenarios y delimitar espacialmente las zonas más susceptibles.

Objetivos específicos:

- Realizar un reconocimiento detallado de la zona afectada, que incluya un mapeo geológico, mediciones de la resistencia a la compresión uniaxial del macizo rocoso mediante el martillo de Schmidt y una estimación de la calidad del macizo mediante el sistema GSI. (Etapa: trabajo de campo).
- Procesar y modelar la información espacial en un entorno de Sistemas de Información Geográfica (SIG), trazando perfiles y generando modelos digitales de elevación que representen la geometría real de las laderas de la presa. (Etapa: SIG y gabinete).
- Evaluar el comportamiento geotécnico de las laderas mediante modelación numérica, estimando el factor de seguridad con métodos de equilibrio límite

(SSAP) y analizando el alcance potencial de caída de bloques mediante modelado cinemático (IS GeoMassi). (Etapa: modelado numérico).

- Representar cartográficamente los factores de seguridad obtenidos e integrar los resultados del modelado en un entorno SIG para identificar las zonas más susceptibles a la inestabilidad dentro de los márgenes de la presa. (Etapa: Integración final y cartografía).

Justificación

La presente investigación se justifica por la importancia de evaluar rigurosamente la estabilidad de los taludes asociados a la Presa de San José, considerando las implicaciones que los procesos de inestabilidad pueden tener tanto en la seguridad de la infraestructura como en el entorno territorial inmediato. La literatura ha documentado ampliamente que las fallas de taludes en presas y embalses pueden tener consecuencias significativas, incluyendo daños a la infraestructura, afectaciones ambientales y riesgos para la población (Abramson et al., 2002; Duncan & Wright, 2005).

Desde una perspectiva científica, este estudio contribuye al entendimiento de los mecanismos que controlan la estabilidad de los taludes en contextos donde interactúan materiales heterogéneos y condiciones hidrológicas variables. Al centrarse en un caso de estudio específico, la investigación permite analizar cómo las características particulares del sitio influyen en el comportamiento mecánico de los taludes, atendiendo a la necesidad, señalada por diversos autores, de reducir la incertidumbre en los análisis de estabilidad mediante enfoques más detallados y contextualizados (Beven, 2006).

En el ámbito metodológico, la investigación resulta relevante al aplicar un enfoque sistemático para evaluar la estabilidad de taludes, integrando información de campo y análisis técnicos adecuados a las condiciones reales del sitio. La correcta estimación de parámetros y la consideración de escenarios representativos son

elementos clave para evitar simplificaciones excesivas que puedan conducir a diagnósticos incompletos o poco realistas del estado de estabilidad (Abramson et al., 2002; Duncan & Wright, 2005).

Desde una perspectiva aplicada y de gestión del riesgo, los resultados de este trabajo proporcionan información fundamental para apoyar la toma de decisiones sobre el manejo y la seguridad de la presa de San José. La identificación de zonas potencialmente inestables y la mejora de la comprensión del comportamiento de los taludes ante diferentes condiciones ambientales constituyen insumos valiosos para la planificación de medidas preventivas y de mitigación, lo que contribuye a una gestión más informada y responsable de la infraestructura.

En conjunto, esta investigación se justifica por su aporte al conocimiento sobre la estabilidad de los taludes de presas, por el fortalecimiento del análisis técnico aplicado al caso de la Presa de San José y por su relevancia práctica en términos de seguridad y gestión territorial, lo que la consolida como tesis de maestría.

1. Marco geológico y geográfico de la Presa de San José

1.1. Antecedentes históricos

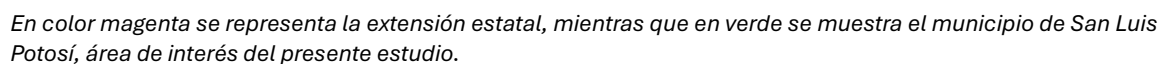
A diferencia de los antecedentes técnicos presentados en la sección previa, este apartado resume el contexto histórico específico de la Presa de San José, con el propósito de situar la obra en su desarrollo constructivo y su importancia regional.

La construcción de la Presa de San José inició en 1894, financiada por el gobierno estatal, cuando la Empresa de Aguas asignó el proyecto al ingeniero Guillermo Reitter, quien dirigió las obras hasta 1900. Posteriormente, la supervisión pasó a los ingenieros Sebastián Reyes y Francisco Gándara, este último responsable de concluir la presa en 1903 (Camacho Altamirano, 2000). El gobernador de la época, Carlos Díez Gutiérrez, impulsó su construcción debido a las necesidades sanitarias y a las sequías que afectaban a la capital potosina.

Reitter diseñó una cortina de 32.5 m de altura en la cuenca de Escalerillas, con una capacidad proyectada de 7,500,000 m³ destinada a abastecimiento urbano, riego y canalizaciones. Durante la cimentación se identificaron arcillas a 14 m de profundidad, lo que obligó a ampliar las excavaciones y realizar detonaciones; la base se construyó con un espesor de 38 m mediante mampostería y una mezcla hidráulica que endurecía según las condiciones ambientales (Camacho Altamirano, 2000).

La presa alcanzó por primera vez su nivel máximo el 3 de septiembre de 1903, lo que provocó una cascada de aproximadamente 30 m en los vertederos. Un evento histórico relevante ocurrió el 15 de septiembre de 1933, cuando la represa La Constanza colapsó tras intensas tormentas. La ruptura generó una inundación que afectó barrios como Morales, Santiago y Tlaxcala, causando entre 50 y 100 muertes según los reportes de la época (— (anon.), 1933; Plano Informativo, 2021).

La zona de estudio comprende los márgenes izquierdo y derecho de la Presa de San José, situada en el estado de San Luis Potosí, S.L.P. (Figura 1). Como eje de referencia se considera la cortina de la presa, ubicada en las coordenadas 22°09'01.03" N y 101°03'16.56" O (UTM X: 288112.00 m E, UTM Y: 2450892.00 m N) (Figura 2).



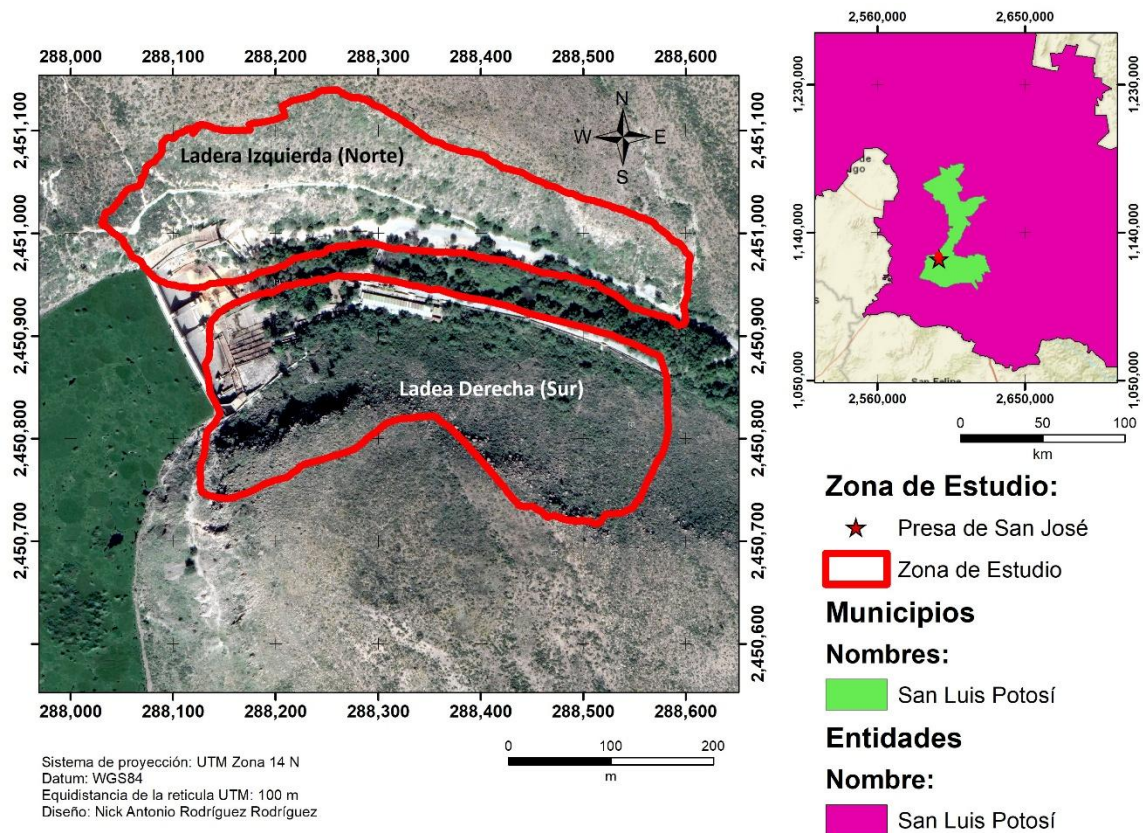


Figura 2. Zona de estudio ubicada en los márgenes de la presa de San José, en San Luis Potosí, S.L.P.

La línea roja delimita el área específica analizada en campo. En el recuadro se muestra la ubicación regional de la presa en el Estado de San Luis Potosí.

1.3. Características de la presa de San José

La presa de San José también cuenta con un área verde denominada “Parque Urbano Paseo de la Presa”, un espacio donde las familias potosinas suelen realizar diversas actividades de esparcimiento.

La cortina tiene una altura de 32 m y está revestida con cantera rosa, característica de la zona. La cortina se encuentra sobre dos laderas pertenecientes a la sierra de San Miguelito que presentan una altitud de 1955.5 metros sobre el nivel del mar (msnm) y un borde libre de 0.360 m (CONAGUA, 2025).

Su nivel de agua máximo ordinario (NAMO) es de 1933.3 msnm y tiene un almacenamiento de 5.223 hm³. El nivel de aguas máximas extraordinarias (NAME), corresponde a 1933.7 msnm y almacena a este nivel unos 5.656 hm³ (CONAGUA, 2025)

1.4. Fisiografía

De acuerdo con el Boletín Geológico Mexicano (Nieto-Samaniego, 2005) La Sierra de San Miguelito pertenece a la provincia fisiográfica IX, denominada Mesa Central (Figura 3). Esta provincia se divide en dos grandes regiones: la parte sur, de carácter montañoso, donde afloran rocas del Cenozoico y con cotas que superan los 2000 msnm; y la parte norte, que se encuentra a altitudes inferiores a los 2000 msnm, con un grado de erosión más elevado y con cuencas rellenas de sedimentos aluviales y lacustres.

Asimismo, la Sierra de San Miguelito se localiza dentro de tres subprovincias: Llanuras y Sierras Potosino-Zacatecanas, Sierras y Llanuras del Norte de Guanajuato y Llanuras de Ojuelos-Aguascalientes (Secretaría de Ecología y Gestión ambiental, 2015).

La subprovincia de Llanuras y Sierras Potosino-Zacatecanas, que abarca alrededor de 12,000 km², se caracteriza por contar con amplias zonas áridas. El piso suele estar constituido por caliche, que en las zonas de mayor altitud forma capas impermeables. La subprovincia de Sierras y Llanuras del Norte de Guanajuato se localiza en el sector sur de la Mesa Central y se extiende hasta la porción norte del estado de San Luis Potosí.

En esta región destaca la llanura aluvial de San Felipe, a unos 2100 msnm, conformada por rocas de lava ácida. El relieve está constituido por lomas y cerros, con orientación noroeste-sureste. La subprovincia de Llanuras de Ojuelos-Aguascalientes está formada por planicies de caliche cubiertas por depósitos aluviales dispuestos en estratos delgados. Su altitud ronda los 2000 msnm y, aunque las llanuras se conectan,

están separadas por una meseta disectada por rocas ígneas ácidas. Esta región carece de corrientes fluviales de importancia (IPICYT, 2018).

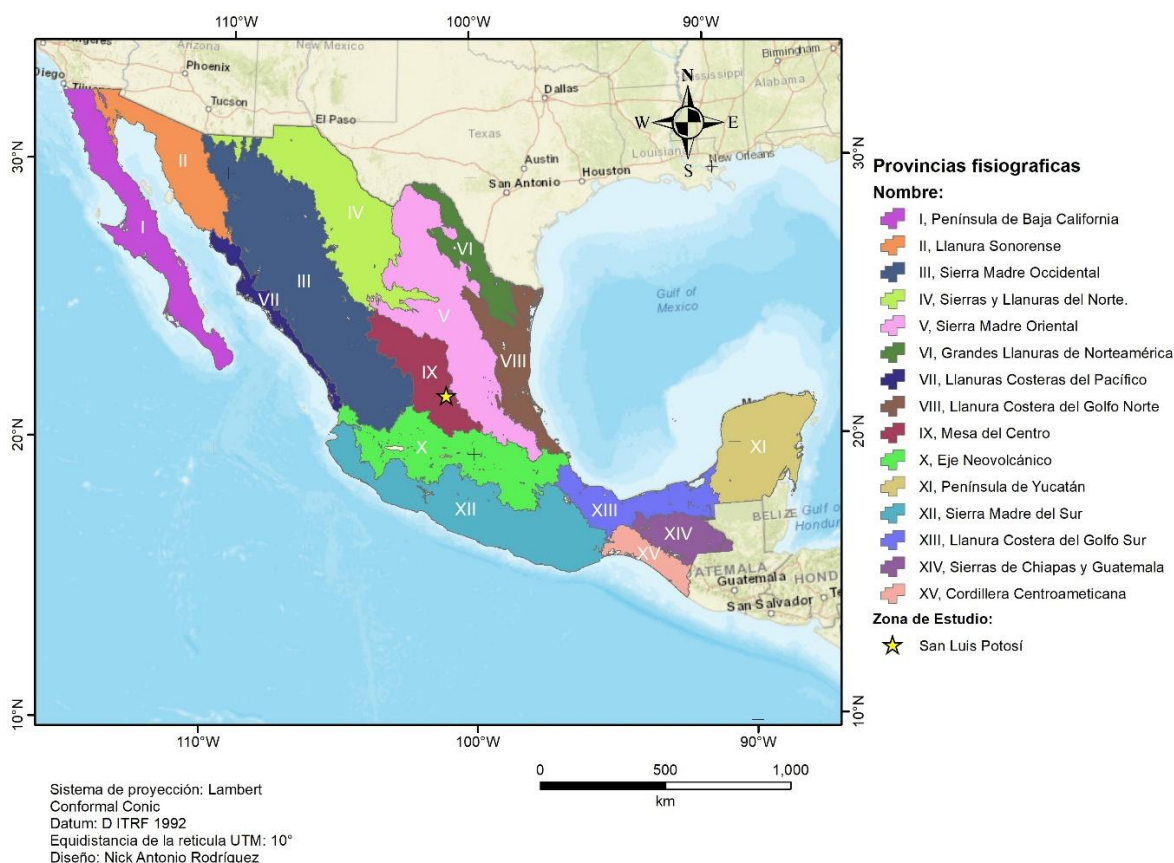


Figura 3. Mapa de las provincias fisiográficas de México

La imagen muestra la ubicación del estado de San Luis Potosí en la provincia IX: Mesa del Centro, marcada con una estrella amarilla.

1.5. Geología Regional

La zona de estudio forma parte del Campo Volcánico de San Luis Potosí (CVSLP) (Tristán-González et al., 2009) (Figura 4). En esta región se identifica un conjunto de unidades volcánicas cuyo origen se remonta al Eoceno medio (44 Ma), cuando se produjeron extensos derrames de lava andesítica depositados sobre sedimentos lacustres del Paleoceno tardío al Eoceno temprano-medio. Dichos depósitos alcanzan un espesor de hasta 1,000 m y cubren aproximadamente 40,000 km² en la porción centro-sur del estado (Labarthe-Hernández et al., 1982).

Durante el Oligoceno se registró la emisión de un nuevo conjunto de lavas y depósitos piroclásticos de composición intermedia a riolítica. En este lapso se concentró el mayor volumen de rocas félsicas, con edades de ~32 y 26 Ma. Posteriormente, entre 22 y 20 Ma, la actividad volcánica se redujo, limitándose a la extrusión casi simultánea de basaltos y riolitas, de carácter bimodal. Finalmente, en el Plio-Cuaternario, la actividad continuó de manera intermitente con la aparición de lavas basaníticas (Tristán-González et al., 2009).

De manera estructurada esto fue clasificado en 5 etapas por Tristán-González et al. (2009) y descritas por Serna Bafún (2018). Ambos autores afirman que la primera etapa consiste en la emisión de derrames andesíticos aislados que fueron pertenecientes al Eoceno medio (44 Ma) (Labarthe-Hernández et al., 1982). En la segunda etapa (32-28 Ma) se registró la emisión de materiales volcánicos, iniciando con episodios de actividad efusiva que dieron lugar a alineamientos de domos exógenos, estos cuerpos presentaron composiciones que abarcan desde dacitas hasta riolitas con alto contenido de sílice y estuvieron anteccedidos por eventos de carácter piroclástico (Serna Bafún, 2018).

La tercera etapa (28 – 25 Ma), corresponde a un volcanismo intermitente, asociadas a fallas normales que se atribuyen a la extensión tectónica, que dio lugar a rocas félsicas y erupciones riolíticas, en algunos sectores estas fallas se acompañaron de basaltos, lo que indica un carácter bimodal en la actividad volcánica (Tristán-González et al., 2009). En la cuarta etapa (23 – 21 Ma) de este volcanismo, estuvo caracterizada por erupciones fisúrales esporádicas de basaltos que también se relacionan con el proceso de extensión (Wark, 1991). La quinta y última etapa (24 – 20 Ma), se relaciona con un volcanismo intraplaca ocurrido en el Cuaternario, caracterizado por centros eruptivos que produjeron rocas de composición basanítica (Aguillón-Robles et al., 2014).

La zona de estudio se localiza dentro del Complejo Volcánico Sierra San Miguelito (CVSSM) (Tristán-González et al., 2009), descrito como un complejo cuyos productos son de origen volcánico, de edad Oligoceno medio y Mioceno, se localiza en el sur y el occidente de la ciudad de San Luis Potosí. Los Cerros Grande y El Potosí se formaron a partir de domos grandes y depósitos piroclásticos que separaron los flujos de lava (Labarthe-Hernández & Jiménez-López, 1992, 1993, 1994; Tristán-González, 1986).

San Miguelito y el Zapote son domos riolíticos que comparten espacio con un paquete grueso de ignimbrita Cantera y San José que tienen una edad media de 29 Ma. Alrededor de 27 y 28 Ma. hubo actividad volcánica a través de las fallas, que siguieron una orientación NW-SE, lo que emplazó ignimbritas de alto grado, así como la riolita de Panalillo. Toda la Sierra de San Miguelito tiene multitud de fallas normales con ángulo alto y basculaciones NE, formando fosas tectónicas estrechas (Labarthe-Hernández et al., 1982; Labarthe-Hernández & Jiménez-López, 1992).

Según Ortega-Gutiérrez et al. (2008), el campo volcánico forma parte de la provincia ignimbrítica más grande del mundo, denominada La Faja Ignimbrítica mexicana (Figura 5), que se caracteriza por volúmenes de ignimbritas que están intercaladas de riolitas, andesitas y basaltos, cuyos espesores rondan entre 1,000 y 2,000 m con extensiones de hasta 1,600 km².

SIMBOLOGÍA CUATERNARIO

Qhoal	ALUVIÓN
QhoPu	PUMICITA
Qhoco	COLUVIÓN
Qpitho-ar-lm	ARENA - LIMO

TERCIARIO NEÓGENO

Tp1Qpt Cgp-ar	CONGLOMERADO POLIMÍCTICO - ARENA
------------------	----------------------------------

PALEÓGENO

To Ig-Vi	IGNIMBRITA - VITRÓFIDO
ToA-B	ANDESITA - BASALTO
ToTR	TOBA RIOLÍTICA
To R-BvR	RIOLITA - BRECHIA RIOLÍTICA
To Ig-TR	IGNIMBRITA - TOBA RIOLÍTICA
ToR	RIOLITA
ToTq	TRAQUITA

COLUMNA GEOLÓGICA

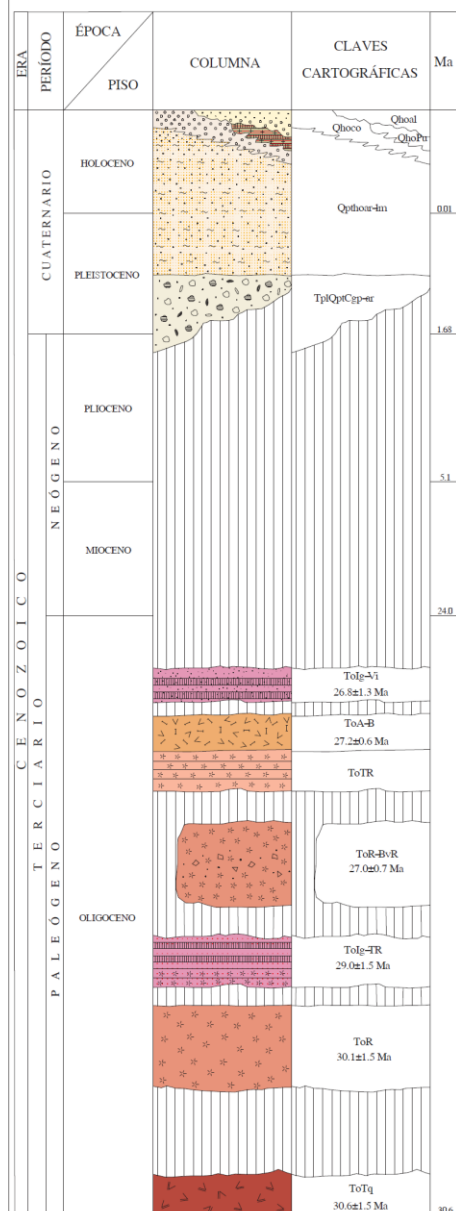


Figura 4. Columna geológica simplificada correspondiente a la Carta Geológica Tepetate F14-A83 (SGM, 2004), elaborada por el Servicio Geológico Mexicano (SGM).

Se observan las principales unidades litoestratigráficas desde el Paleógeno hasta el Cuaternario, incluyendo secuencias volcánicas riolíticas e ignimbríticas, así como depósitos recientes como aluvión, coluvión y arena-limo.

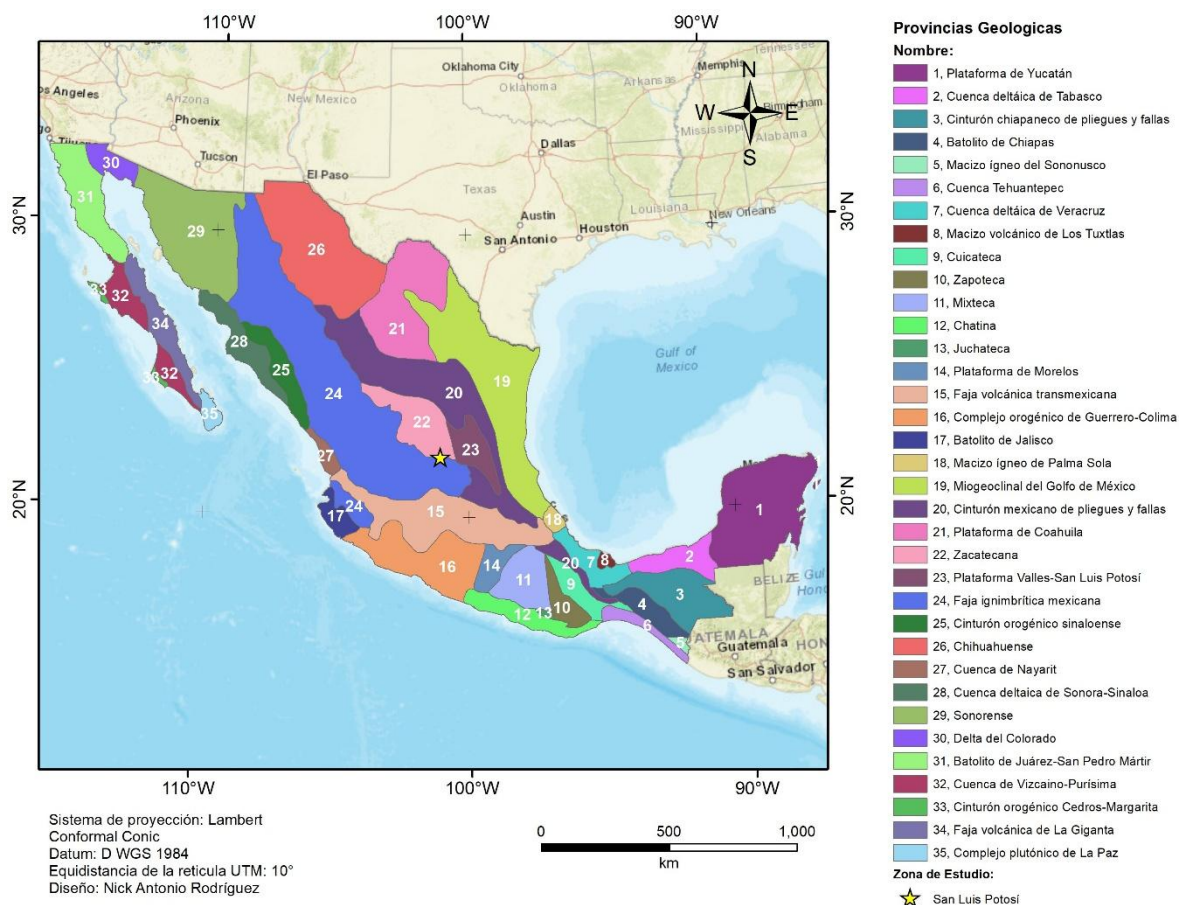


Figura 5. Mapa de las provincias geológicas de México

La imagen muestra la ubicación del estado de San Luis Potosí en la Plataforma Valles–San Luis Potosí (provincia 23) y su relación con la Faja Ignimbrítica mexicana (provincia 24). Estas provincias forman parte del sector central del país y están dominadas por secuencias volcánicas del Cenozoico y por unidades sedimentarias mesozoicas.

1.6. Geología de la zona de estudio

Las dos laderas que conforman la zona de estudio (Figura 6) están dominadas por depósitos piroclásticos de composición riolítica, principalmente por ignimbritas y tobas riolíticas densamente soldadas en el sitio. Estos materiales pueden observarse al pie de las laderas y, en algunos sectores, se identifican afloramientos de domos riolíticos, acompañados de depósitos aluviales compuestos por arenas limosas y aluvión. La cartografía geológica correspondiente, conocida como “El Tepetate”, evidencia un apilamiento riolítico-ignimbrítico afectado por un sistema de fallas con orientación noroeste-sureste (NW-SE), que segmenta las laderas y condiciona el patrón de escurrimiento superficial (SGM, 2004).

En el área de la presa se observa que, en el flanco derecho, afloran unidades litológicas correspondientes a ignimbritas densamente soldadas en la porción inferior, sobre las cuales se disponen bloques de gran tamaño con morfología subcolumnar, que, hacia la parte superior, presentan un mayor grado de fracturamiento. En el flanco izquierdo se observa una mayor heterogeneidad litológica, con zonas de material arcilloso que podrían asociarse a brechas de falla, así como intercalaciones de ignimbrita Panalillo. En ambos flancos predomina la ignimbrita Cantera, característica que no se representa en la cartografía geológica oficial, aunque sí se mantiene coherente con la geología regional previamente descrita.

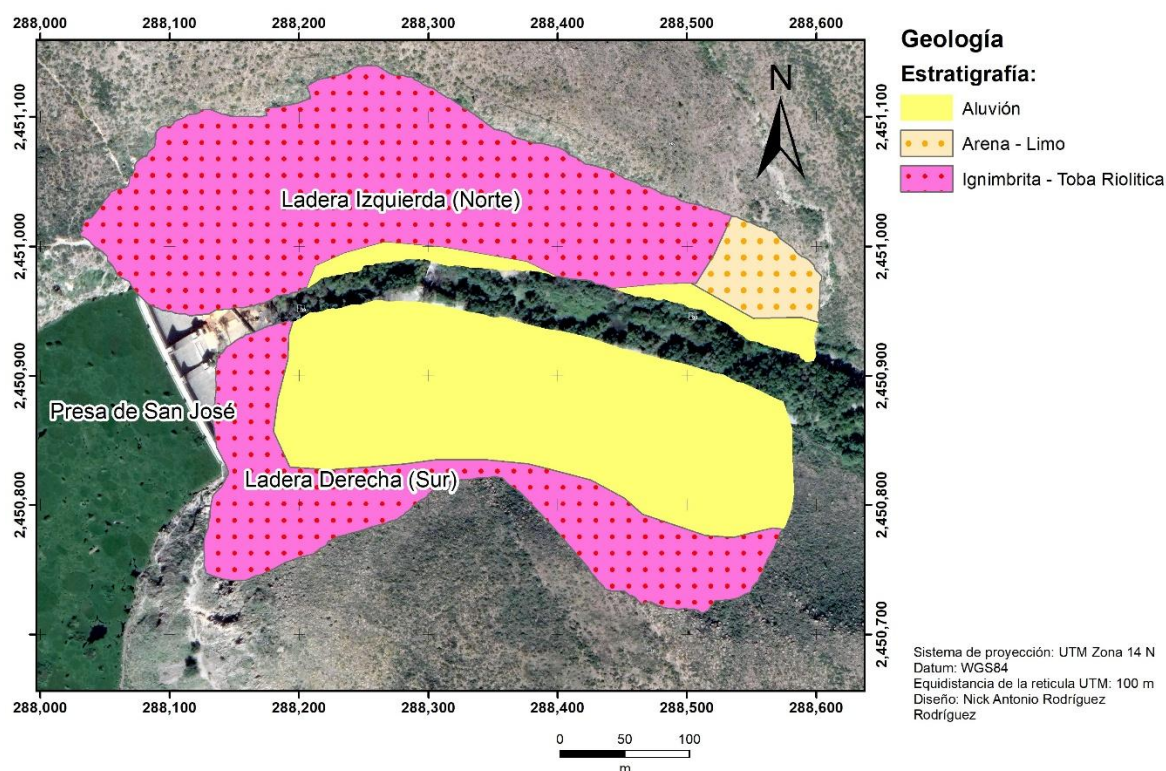


Figura 6. Mapa geológico de la zona de estudio en los márgenes de la Presa de San José, San Luis Potosí.

Se distinguen tres unidades principales: depósitos de aluvión (amarillo), materiales de arena-limo (ocre) y afloramientos de ignimbrita-toba riolítica (rosa con puntos rojos), presentes en las laderas izquierda y derecha del embalse.

1.6.1. Estratigrafía

La zona de estudio exhibe tres unidades estratigráficas diferenciadas, con predominio de ignimbrita Cantera y depósitos aluviales, en los cuales se identifican fracciones menores de material arenoso y limoso (SGM, 2004).

La unidad de ignimbrita Cantera (Tol-TR) aflora predominantemente en los sectores oriental y suroriental del área cartografiada, donde se observa en posición estratigráfica superior a la Riolita San Miguelito y subyacente a la Riolita El Zapote (SGM, 2004).

Labarthe-Hernández y Jiménez-López (1993), afirman que la ignimbrita cantera es un flujo de ceniza con una base sin soldar (Tic) y una soldada (TIC).

La parte inferior de la Ignimbrita Cantera (Tic) está compuesta por una capa de cenizas volcánicas que no llegó a soldarse por completo. Su espesor varía entre 2 y 30 metros y presenta tonalidades que van del blanco al rosado. No se distinguen estratos visibles, y en su matriz se observan abundantes fragmentos de piedra pómez de aproximadamente 2 centímetros de diámetro, así como pequeños cristales de cuarzo y otros minerales accesorios. En algunos sectores pueden encontrarse inclusiones de rocas volcánicas de tonos verdes, rojizos y cafés. En general, la unidad no presenta grietas ni fracturas significativas (Labarthe-Hernández & Jiménez-López, 1992;1993 ;1994).

La ignimbrita cantera soldada (TIC) corresponde a una capa de roca consolidada a partir de materiales piroclásticos que se soldaron y endurecieron por el calor posterior a una erupción volcánica de gran magnitud. Presenta tonalidades que van del gris rosado al café grisáceo y está compuesta principalmente por una mezcla de minerales como cuarzo y sanidino, con menores proporciones de biotita, magnetita y otros minerales accesorios. En su matriz se observan fragmentos de pómez deformados y aplanados por la acción térmica durante el proceso de soldadura (Labarthe-Hernández & Jiménez-López, 1992;1993 ;1994).

Esta roca se caracteriza por su alto grado de compactación y por fracturas verticales que le confieren un aspecto columnar. Debido a su dureza, color y textura homogénea, se utiliza ampliamente como piedra ornamental en la ciudad de San Luis Potosí. En algunos afloramientos se distinguen dos niveles diferenciados: una capa inferior, más consolidada, y una superior, igualmente endurecida, aunque con ligeras variaciones texturales. En general, el espesor promedio de la unidad es de aproximadamente 350 metros. En el valle de San Luis, el pozo de agua de IMMSA, ubicado al oeste de la capital, atravesó 343 metros de esta ignimbrita, registrando un echado de 15° hacia el noreste, lo que permite estimar un espesor real de aproximadamente 331 metros (Labarthe-Hernández & Jiménez-López, 1992;1993 ;1994) .

El material arena-limo se compone de una mezcla de partículas de arena —de grano medio a fino— y de limo —de grano muy fino—. Se trata de un sedimento depositado en ambientes de energía variable, caracterizado por su buena cohesión al humedecerse y por una permeabilidad moderada. Este tipo de material suele acumularse a lo largo de márgenes de corrientes, en abanicos aluviales o en ambientes lacustres someros, presentando una textura intermedia (Moreno-Maroto & Alonso-Azcárate, 2022).

El aluvión, por su parte, está compuesto por una mezcla de gravas, arenas, limos y arcillas. Corresponde al Cuaternario y conforma los valles de San Luis, especialmente hacia el norte y el noreste. Estos materiales fueron posiblemente transportados y depositados por corrientes aluviales, y su composición y granulometría dependen directamente de la dinámica del flujo que los generó (Labarthe-Hernández & Jiménez-López, 1992, 1993, 1994).

La zona de estudio se localiza en un contexto geológico caracterizado por la presencia de unidades volcánicas y volcanosedimentarias, cuya disposición, grado de alteración y estructura influyen directamente en el comportamiento mecánico de los

materiales que conforman los taludes asociados a la presa. Estas unidades presentan una heterogeneidad litológica significativa, tanto lateral como vertical, lo que constituye un factor determinante en la respuesta geotécnica del macizo ante cambios en las condiciones de carga y humedad.

Desde una perspectiva geotécnica, los materiales geológicos presentes en la zona muestran propiedades mecánicas variables, asociadas a diferencias en su origen, textura, grado de consolidación y estado de alteración. Las rocas volcánicas, comúnmente fracturadas y afectadas por procesos de intemperismo, pueden presentar una reducción progresiva de su resistencia al corte, particularmente en zonas donde la alteración ha favorecido la formación de suelos residuales o de materiales poco cementados. Este comportamiento ha sido ampliamente documentado en estudios geotécnicos realizados en contextos volcánicos, donde la transición roca-suelo constituye una condición crítica para la estabilidad de los taludes (Abramson et al., 2002; Duncan & Wright, 2005).

Asimismo, la estructura geológica del área, expresada mediante fracturas, discontinuidades y contactos litológicos, constituye un elemento clave para la definición de posibles superficies de falla. La orientación y continuidad de estas discontinuidades pueden controlar mecanismos de inestabilidad, especialmente en taludes excavados o modificados durante la construcción y operación de la presa. En este sentido, la geología estructural del sitio no solo condiciona la geometría de los taludes, sino que también influye en la anisotropía del comportamiento mecánico de los materiales, aspecto fundamental en los análisis de estabilidad (Hoek & Bray, 1981).

Por otro lado, la interacción entre la geología del sitio y los procesos hidrológicos adquiere especial relevancia en la zona de estudio. La infiltración de agua, favorecida por la presencia de fracturas y materiales de alta permeabilidad relativa, puede modificar significativamente las presiones de poro y, en consecuencia, reducir la resistencia efectiva de los materiales que conforman los taludes. Este fenómeno es

particularmente crítico en el entorno de presas, donde las fluctuaciones del nivel del embalse generan condiciones de saturación parcial y transitoria que deben considerarse en la evaluación de la estabilidad (Terzaghi et al., 1996; Duncan & Wright, 2005).

En conjunto, la geología de la zona de estudio no debe entenderse únicamente como un marco descriptivo, sino también como un factor activo que condiciona la estabilidad de los taludes. La heterogeneidad litológica, el grado de alteración de los materiales, la presencia de discontinuidades estructurales y su interacción con los procesos hidrológicos configuran un escenario geotécnicamente complejo, que justifica la necesidad de realizar un análisis detallado y específico de la estabilidad de los taludes asociados a la Presa de San José, como el que se desarrolla en los capítulos posteriores de esta investigación.

1.7. Información sísmica

Según el Servicio Sismológico Nacional, la actividad sísmica asociada al estado de San Luis Potosí se caracteriza por eventos de baja magnitud (generalmente $M_w < 5.0$) y baja recurrencia, relacionados principalmente con fallas locales o con la propagación de ondas sísmicas de eventos regionales (SSN, s/f).

La presa de San José se emplaza sobre un macizo rocoso fracturado, con discontinuidades estructurales que, bajo ciertos escenarios dinámicos, podrían comportarse como planos de debilidad. No obstante, de acuerdo con el Atlas de Riesgos del Estado de San Luis Potosí, la zona se clasifica en una franja de bajo índice sísmico.

Con base en los registros del U.S. Geological Survey (USGS) (2025), se analizó la sismicidad ocurrida desde 1990 considerando un radio de búsqueda centrado en el estado de San Luis Potosí. Los resultados indican que la mayoría de los eventos corresponde a sismos de baja magnitud y que solo una fracción ocurrió en las

inmediaciones de la capital o a cortas distancias de la Presa de San José, por lo que podrían haber generado algún efecto dinámico en el sitio.

En contraste, los sismos localizados en municipios alejados del área de estudio representan principalmente el contexto sísmico regional, ya que la atenuación de las ondas con la distancia disminuye su intensidad en el sitio. No obstante, aun cuando los eventos registrados dentro de un radio aproximado de 50 km no superan magnitudes cercanas a Mw 5.0 (Figura 7), es importante considerar que en zonas de relieve elevado y macizos rocosos fracturados pueden presentarse efectos de amplificación topográfica o concentraciones locales de deformación.

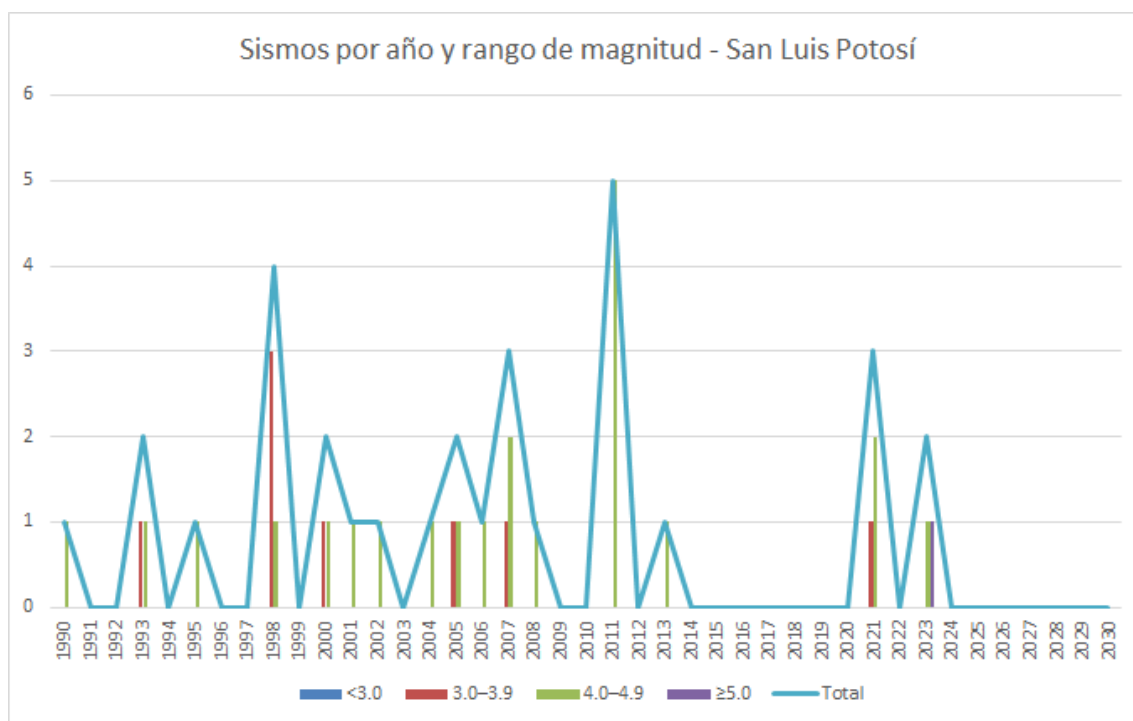


Figura 7. Se muestra la acumulación por año de los sismos que van desde el año 1990

La línea azul muestra el total, y las barras de colores los sismos y su intensidad. Fuente: USGS ComCat (consulta: 26/09/2025); filtros: 1990–2025, círculo 22.12°-101.03°, 60–100 km; $M \geq 1.5$.

1.8. Geomorfología

La geomorfología de la zona de estudio está fuertemente condicionada por la evolución volcánica, tectónica y erosiva de la Sierra de San Miguelito, lo que configura un relieve complejo que influye directamente en la estabilidad de los taludes asociados a la Presa de San José. Desde una perspectiva geotécnica, la distribución de formas del terreno, la geometría de las pendientes y el grado de desarrollo edáfico controlan el comportamiento mecánico de los materiales y la susceptibilidad a procesos de inestabilidad.

En las partes altas de la sierra predominan suelos poco desarrollados, afloramientos rocosos y pendientes pronunciadas, mientras que en las zonas bajas, asociadas a lomeríos y cauces fluviales, se presentan suelos de profundidad media y distribución más continua (Figura 8);. En este entorno se identifican principalmente suelos de tipo Feozem, Litosol y Regosol. Los Feozem, caracterizados por horizontes superficiales oscuros ricos en materia orgánica, suelen presentar una mayor cohesión aparente en condiciones secas, aunque su resistencia puede disminuir significativamente en escenarios de saturación.

Por su parte, los Litosoles y Regosoles, someros y frecuentemente asociados a caliche, tepetate y abundante roca, constituyen materiales particularmente susceptibles a procesos de inestabilidad superficial, debido a su escaso espesor, a la limitada continuidad del suelo y a la presencia de planos de contacto suelo-roca que pueden actuar como superficies de falla preferenciales (Secretaría de Ecología y Gestión Ambiental, 2015).

La morfología del relieve responde en gran medida a una compleja historia volcánica. De acuerdo con Puente Castillo (2014), en la región se desarrollaron procesos volcánicos entre aproximadamente 31 y 25 Ma, durante los cuales se emitieron lavas riodacíticas y riolíticas que dieron origen a domos exógenos y extensos depósitos piroclásticos. Posteriormente, entre 22 y 20 Ma, eventos de vulcanismo

interplaca de composición basáltica y, de manera intermitente, basanítica, modificaron parcialmente la morfología preexistente.

En las coladas volcánicas, el enfriamiento diferencial generó una base vítrea frágil, un núcleo masivo y un techo con juntas de enfriamiento, condiciones que favorecen la meteorización, la termoclastia y la fragmentación progresiva del relieve. Desde el punto de vista geotécnico, esta estructura interna condiciona una marcada anisotropía mecánica, con zonas de debilidad preferenciales que influyen en los mecanismos de falla de los taludes.

En los depósitos piroclásticos, el perfil típico presenta una base de flujo de ceniza no soldada, de carácter blando, sobre la cual se disponen niveles parcialmente soldados y, en el techo, niveles bien soldados con sistemas de juntas. Esta disposición estratigráfica genera contrastes significativos en las propiedades mecánicas y la permeabilidad, lo que favorece la concentración de esfuerzos y la generación de superficies de falla en los contactos entre niveles. Asimismo, la construcción de domos volcánicos indujo una foliación superficial —fracturamiento delgado y laminar— que produjo lajamiento concordante con la topografía, favoreciendo la desagregación de las laderas y la evolución geomorfológica del relieve, con implicaciones directas en la estabilidad de los taludes.

La configuración geomorfológica del área también está controlada por la tectónica extensional del Terciario medio, expresada en un sistema de fallas con rumbo aproximado N40°W y buzamientos de 65–45° hacia el SW, parcialmente lístricas, que provocaron el basculamiento de la secuencia volcánica entre 15 y 35° hacia el NE. Este arreglo estructural generó saltos de falla, condicionó la geometría de las pendientes y favoreció el desarrollo de redes de drenaje de tipo rectangular, estructuralmente controladas (Puente Castillo, 2014). Desde el punto de vista geotécnico, la orientación de estas estructuras constituye un factor crítico para la

definición de posibles mecanismos de inestabilidad, especialmente en taludes excavados o modificados.

Desde su formación, el relieve ha sido modificado por procesos de meteorización, dinámica fluvial, erosión eólica localizada y movimientos de masa. Predominan los procesos de meteorización física sobre los de naturaleza química y biológica (Gutiérrez Elorza, 2008). El termoclastismo asociado a la insolación induce dilataciones y contracciones diferenciales que originan microfisuras y favorecen la disgregación granular, mientras que el hidroclastismo genera procesos de descamación vinculados a ciclos de humedecimiento y secado, que frecuentemente aprovechan planos de debilidad preexistentes (A.K. Lobeck, 1939). Estos procesos contribuyen a la degradación progresiva de los materiales y a la reducción de su resistencia al corte. La meteorización química, aunque subordinada, actúa de manera continua mediante hidratación, hidrólisis, oxidación y disolución, debilitando las matrices vítreas y los cementos (Gutiérrez Elorza, 2008).

El sistema fluvial presenta un régimen marcadamente intermitente, altamente sensible a los pulsos de precipitación y a las variaciones del nivel de base, tanto naturales como inducidas por la dinámica tectónica y climática. Las intervenciones antrópicas —modificación del uso del suelo, construcción de presas, encauzamientos y extracciones— constituyen forzantes adicionales que alteran la conectividad hidrosedimentaria y la capacidad de respuesta del sistema fluvial (Pavlopoulos et al., 2009). En el área se reconocen valles en “V”, asociados a roca aflorante y disección vertical, así como valles en “U” en dominios con mayor desarrollo edáfico, donde predomina la erosión lateral y la acumulación de sedimentos. También se identifican meandros trenzados, llanuras de inundación, barras, terrazas aluviales y abanicos aluviales, que reflejan una dinámica fluvial activa y variable.

Este arreglo morfoestructural condiciona directamente la conectividad hidrosedimentaria y la evolución de los procesos de ladera. Ante eventos de

precipitación intensa, las laderas meteorizadas y fracturadas incrementan su susceptibilidad a procesos de caída y vuelco de bloques, así como a la generación de flujos de detritos, lo que evidencia una fuerte interacción entre la morfodinámica de ladera y la respuesta fluvial del sistema. Desde una perspectiva geotécnica, estas condiciones constituyen un escenario particularmente sensible para la estabilidad de los taludes asociados a la Presa de San José, lo que refuerza la necesidad de integrar el análisis geomorfológico como componente esencial de la evaluación desarrollada en esta investigación.

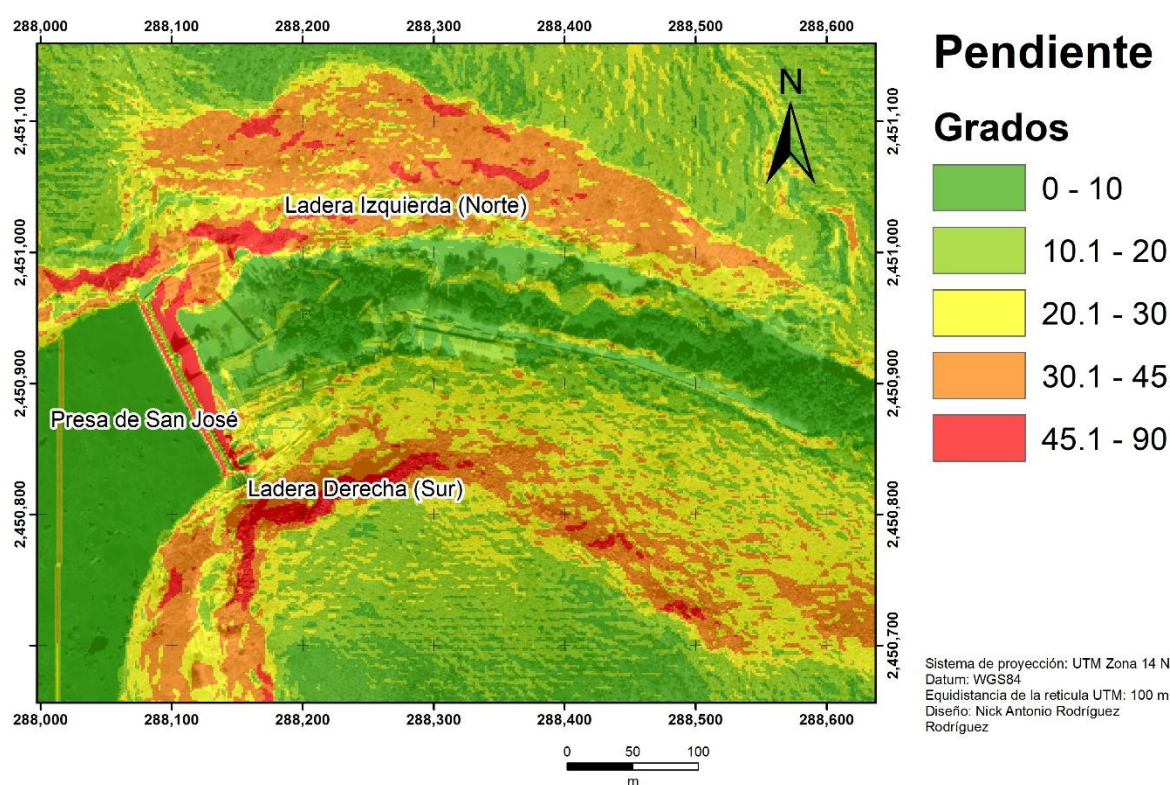


Figura 8. Mapa de pendientes (en grados) de la zona de estudio ubicada en los márgenes de la Presa de San José, San Luis Potosí.

1.9. Clima

El clima predominante es semiárido templado, caracterizado por una marcada estacionalidad. Las precipitaciones se concentran principalmente durante el verano

(junio a septiembre), con un máximo en julio y agosto, mientras que el resto del año prevalece el estiaje. El aporte pluvial ocurre principalmente a través de chubascos convectivos breves e intensos, que generan respuestas hidrológicas rápidas en los cauces, evidenciadas por picos de gasto y aumentos del transporte de sedimentos. A escala regional, la lámina media anual de escurrimiento en la cuenca de la Presa San José es reducida, a pesar de la ocurrencia de estos eventos de tormenta (Limonés Carranza, 2024). Durante la estación seca, el flujo superficial es prácticamente nulo y la evapotranspiración potencial supera con amplitud a la precipitación, por lo que el llenado del vaso depende de un número limitado de eventos pluviales de alta magnitud (CONAGUA, 2021).

Según Highland y Bobrowsky, (2008) mencionan que para estabilidad de laderas, los escenarios críticos corresponden a diferentes escenarios entre ellos, tormentas de alta intensidad precedidas por periodos prolongados de sequía, los cuales el suelo adquiere propiedades hidrofóbicas reduciendo su capacidad de infiltración y secuencias de varios días con condiciones húmedas que incrementan la saturación del terreno, favoreciendo la ocurrencia de deslizamientos someros y caídas de bloques en taludes fracturados.

1.10. Hidrografía

La Presa de San José forma parte de la Región Hidrológica No. 37 “El Salado” (RH-37), que abarca aproximadamente el 54.2% de la superficie total del territorio potosino. Dentro de esta región, la cuenca denominada Presa de San José–Los Pilares y Otras ocupa el 17.95% de la extensión del sector centro-occidental del estado.

En esta cuenca se localizan diversas sierras que constituyen las principales zonas de captación, alimentando una red de arroyos intermitentes entre los que destacan Las Magdalenas, Cañada Verde, Palmas, Potrilleros, Ojo de Agua, El Laurel, El Tepozán, El Tule, Bocas, Calabacillas, San Pedro e Independencia. Hacia el sur, contribuyen adicionalmente los escurrimientos de los ríos Mexquitic, Santiago y

Españita, así como de los arroyos San Antonio y Paisanos. La Presa de San José se sitúa aguas abajo del río Santiago, inmediatamente por debajo de la Presa Gonzalo N. Santos, también conocida como El Peaje. (INEGI, 2002).

En cuanto a sus características hidrológicas, la cuenca Presa de San José–Los Pilares y Otras presenta un rango de escurrimiento superficial inferior a 10 mm. La salinidad del agua exhibe una notable variabilidad espacial: es de media a alta en la porción norte de la cuenca y de media a baja hacia el sector sur (IPICYT, 2018).

De acuerdo con el Sistema de Seguridad de Presas de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), la cuenca San José–Los Pilares, perteneciente a la Región Hidrológica El Salado, abarca un área de 13.48 km², con un volumen anual de escurrimiento estimado en 2,019,000 m³/año y un volumen medio de escurrimiento de 649,000 m³/año (CONAGUA, s/f).

Las características geográficas y geológicas descritas para la presa de San José configuran un entorno particularmente relevante desde el punto de vista de la estabilidad de taludes. La combinación de pendientes naturales y artificiales, la presencia de materiales geológicamente heterogéneos y la influencia de condiciones hidrológicas variables asociadas al embalse generan un sistema complejo en el que los procesos de inestabilidad pueden verse favorecidos por cambios en el estado de esfuerzos y en el contenido de humedad de los materiales.

Asimismo, la naturaleza litológica y estructural de las unidades presentes condiciona las propiedades mecánicas del macizo, influyendo en la resistencia al corte y en la posible aparición de superficies de falla. En este contexto, la interacción entre la geología del sitio, la geomorfología local y la dinámica hidrológica constituye un factor clave para comprender el comportamiento de los taludes en la zona de estudio, lo que justifica la necesidad de realizar un análisis específico y detallado de su estabilidad, como el que se desarrolla en los capítulos posteriores de esta investigación.

2. Metodología y levantamiento de modelado en el estudio de la estabilidad de los taludes

La metodología empleada en este estudio se organizó en cuatro fases que permiten integrar de manera sistemática la información geológica, geotécnica y espacial necesaria para evaluar la estabilidad de los taludes en los márgenes de la Presa de San José. Estas fases comprenden: (1) el reconocimiento de campo y la identificación preliminar de las condiciones estructurales de las laderas; (2) la adquisición de datos geotécnicos mediante mediciones directas de resistencia y clasificación del macizo rocoso; (3) el procesamiento y análisis de la información espacial mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG); y (4) el modelado numérico en el software SSAP, orientado a estimar el factor de seguridad bajo diferentes condiciones de estabilidad. Este enfoque secuencial permite vincular las observaciones de campo con los análisis espaciales y las simulaciones geotécnicas que se presentan a continuación (Tabla 1).

Tabla 1. Fases generales de la metodología empleada para la evaluación de la estabilidad de los taludes en los márgenes de la Presa de San José.

Fase	Objetivo	Actividades principales	Resultados esperados
1. Reconocimiento de campo	Identificar condiciones estructurales y geomorfológicas de las laderas.	Observación directa, mapeo preliminar, registro fotográfico, medición de discontinuidades y geometría del terreno.	Delimitación de zonas clave, definición de perfiles y comprensión inicial del macizo rocoso.
2. Adquisición de datos geotécnicos	Obtener parámetros del macizo rocoso para evaluaciones de estabilidad.	Medición de resistencia mediante martillo de Schmidt, estimación del índice GSI, registro de características litológicas y estructurales.	Parámetros geomecánicos (UCS estimada, GSI, condición del macizo) para su uso en SSAP.
3. Procesamiento espacial en SIG	Representar la geometría real y las variaciones topográficas.	Generación de MDE, extracción de perfiles, construcción de capas temáticas y depuración de datos.	Perfiles exportables, capas listas para modelado y mapas base para análisis.
4. Modelado numérico en SSAP	Evaluar la estabilidad de los taludes mediante simulación.	Integración de perfiles, parámetros geomecánicos y configuración del modelo; cálculo del factor de seguridad.	Valores de FS, superficies potenciales de falla y resultados espacializados para su representación cartográfica.

Posteriormente, la Figura 9 detalla la secuencia operativa que integra cada una de estas fases dentro del flujo completo de trabajo.

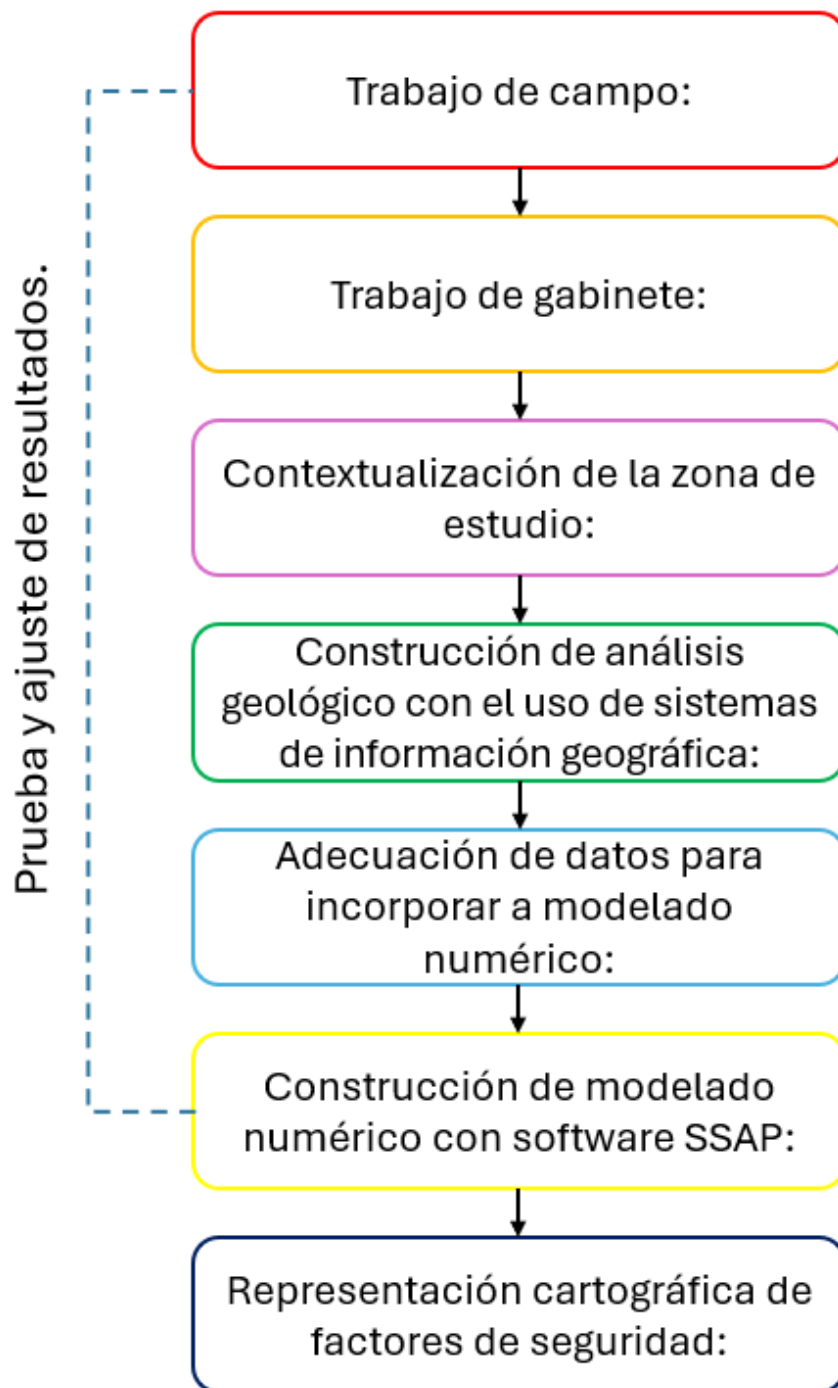


Figura 9. Diagrama de flujo del proceso metodológico seguido para evaluar la estabilidad de los taludes en los márgenes de la Presa de San José.

2.1. Trabajo de campo

Las actividades de campo permitieron observar, reconocer y registrar las condiciones estructurales de las laderas, lo que permitió obtener la información necesaria para la etapa de modelado numérico.

Se identificaron las zonas de mayor afectación y peligro en las laderas de la presa, así como las condiciones generales del terreno. Esta observación permitió identificar los detalles necesarios para definir los objetivos del estudio, determinar las herramientas adecuadas, establecer las zonas de acceso y delimitar con claridad el área final de análisis (Figura 10).

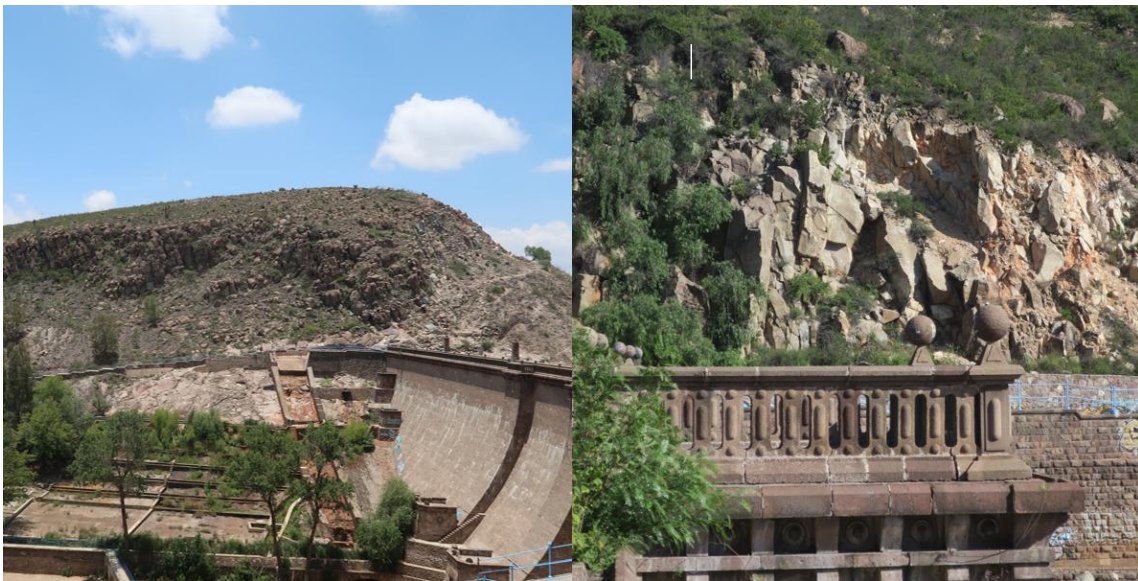


Figura 10. Vista panorámica de los márgenes de la Presa San José. a) Se observa la ladera derecha. b) Se muestra la ladera izquierda.

Se obtuvieron mediciones de las rocas de mayor tamaño en las laderas, con el propósito de estimar su peso y evaluar el riesgo potencial de deslizamiento o de caída de bloques sobre zonas afectadas (Figura 11).

Se utilizó una brújula azimutal para realizar mediciones en el terreno y determinar las pendientes, los rumbos y los echados de las capas rocosas (Figura 12). Con esta herramienta se identificaron fracturas de enfriamiento que evidenciaron los niveles de fracturación presentes en el macizo rocoso y permitió establecer una

orientación estructural de las discontinuidades principales (S. Lee et al., 2013). De igual manera, se reconocieron sectores de mayor susceptibilidad a desprendimiento a través del Índice de Resistencia Geológica (GSI) (Hoek & Brown, 2019).

Se tomaron fotografías panorámicas con cámara de alta definición, cuyo enfoque principal fue en las zonas de mayor afectación, fracturación e intemperismo (Figura 13). Además, se realizaron diversos vuelos en dron para obtener imágenes y videos aéreos que ofrecieron una vista general y detallada de la zona de estudio.



Figura 11. Medición de las dimensiones de un bloque inestable en la ladera derecha de la Presa San José mediante cinta métrica.



Figura 12. Medición de rumbos y de echados de discontinuidades mediante una brújula geológica durante el trabajo de campo en la zona de estudio.



Figura 13. Exposición del macizo rocoso en la ladera derecha de la Presa San José, conformada por ignimbritas riolíticas con alto grado de fracturamiento y por bloques de distintas dimensiones.

En cada margen se realizaron mediciones con el martillo de Schmidt tipo N (Figura 14). Este instrumento posee una energía de impacto de 2.207 Nm y se utiliza en materiales de alta dureza como rocas ígneas o concretos (Kahraman et al., 2002).

Se efectuaron más de cien mediciones por ladera y, en los puntos de interés, más de veinte. El objetivo fue identificar variaciones en la resistencia superficial de la ignimbrita de la cantera. La toma de datos con el martillo de Schmidt debe realizarse preferentemente de manera horizontal; en caso de que la toma sea vertical hacia arriba, se deben sumar 5 unidades al resultado obtenido por efecto de la gravedad; si la toma es vertical hacia abajo, se restan 5 unidades por el mismo motivo.



Figura 14. Medición de la resistencia a la compresión del macizo rocoso mediante el ensayo de martillo de rebote tipo Schmidt (modelo N). En esta toma se observa que la medición se realiza de forma horizontal.

Se utilizó el *Leeb test* como método complementario para estimar indirectamente la resistencia a la compresión uniaxial de rocas en las que el martillo de Schmidt arrojaba mediciones inferiores a 10. Éstas se realizaron en zonas de falla que afloran en la ladera

izquierda, en sectores de mayor intemperismo y en áreas con afectación visible. El uso del *Leeb* se justificó por la precisión en la evaluación de rocas blandas y/o alteradas con alta porosidad (Ulusay et al., 2025a).

En la ladera izquierda se establecieron siete estaciones en las que se realizaron las mediciones mencionadas anteriormente. En la ladera derecha se realizó un reconocimiento general, ya que presentó una estructura más homogénea.

Asimismo, se complementó las mediciones por medio de un distanciómetro laser, con el cual se trabajó en la ladera izquierda (Figura 15).



Figura 15. Distanciómetro laser configurado en campo.

2.2. Trabajo de gabinete

El trabajo de gabinete abarcó la organización, sistematización y análisis de la información obtenida en campo, complementados con fuentes bibliográficas y

cartográficas especializadas. Esta etapa permitió otorgar validez a los datos recolectados, establecer correlaciones entre las observaciones y las unidades litológicas, y definir los parámetros necesarios para el modelado numérico de la estabilidad.

2.2.1. Fuentes bibliográficas

Se realizó una revisión bibliográfica sobre la estabilidad de los taludes, la caracterización de los macizos rocosos y la aplicación de métodos de equilibrio límite. La investigación incluyó tesis de posgrado (Baltazar Martínez, 2022; Limones Carranza, 2024; Sosa Davila, 2019), artículos indexados, manuales especializados como el uso del *Slope Stability Analysis Program* (SSAP) (Borselli, 2024a), metodologías de clasificación geotécnica (Aydin & Basu, 2005; Bolla & Paronuzzi, 2021; Hoek, 1994; Hoek et al., 2002; Hoek & Brown, 2019), publicaciones del Servicio Geológico Mexicano (SGM, 2004), así como folletos técnicos de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí como los de Labarthe-Hernández & Jiménez-López (1992, 1993, 1994).

La revisión bibliográfica tuvo como propósito identificar metodologías aplicadas no solo en la zona de estudio, sino también en estructuras geológicas similares, con el fin de establecerlas en un marco comparativo. La información recopilada permitió seleccionar los criterios más adecuados para caracterizar el macizo rocoso. También se revisaron estudios sobre la influencia del intemperismo y de la fracturación en la pérdida de resistencia de los taludes.

2.2.1. Fuentes cartográficas

Se hizo una recopilación de mapas geológicos, litológicos y de uso de suelo emitidos por el Servicio Geológico Mexicano (SGM, 2004), el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2002) y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2025). Estos documentos permitieron ubicar la zona de estudio en el contexto regional y conocer las unidades litológicas predominantes, las principales estructuras tectónicas, la morfología del relieve y los elementos de drenaje superficial.

Para el análisis topográfico, se utilizó el Modelo Digital de Elevación (DEM o MDE) tipo LIDAR de 1.5 metros de resolución disponible en la página del INEGI (<https://www.inegi.org.mx/temas/relieve/continental/#descargas>), correspondiente a las hojas cartográficas F1483 C1, C2, C3, C4, F1, F2, F3 y F4. El DEM se generó a partir de las ocho secciones mencionadas, las cuales fueron unidas y georreferenciadas al sistema de coordenadas UTM Zona 14N, con el datum WGS84, con el fin de garantizar la compatibilidad con los demás mapas cartográficos. El modelo sirvió de base para la generación de curvas de nivel, mapas de pendientes y perfiles o dovelas.

La información geológica se obtuvo de la Carta Geológica-Minera F14A83 “El Tepetate”, publicada por el Servicio Geológico Mexicano (SGM, 2004) Escala 1:50000, que se homologó con el sistema de coordenadas proyectadas. La carta permitió caracterizar los componentes litológicos sobresalientes y las principales estructuras de la región, como fracturas y fallas. Adicionalmente, se integraron capas vectoriales de redes hidrológicas, zonas y vías de acceso provenientes del INEGI.

Todo el material cartográfico se digitalizó, depuró y procesó mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) con el software *ArcGIS*, versión 10.8. Se construyeron mosaicos con imágenes de alta resolución disponibles en *Google Earth Pro* correspondientes a los años 2020, 2021, 2022, 2023, 2024 y 2025, que sirvieron como mapas base para delimitar los márgenes de la presa, identificar zonas con pendientes pronunciadas, reconocer sectores potencialmente inestables y analizar los cambios temporales en la zona de estudio.

2.2.2. Cálculos previos para la estimación del factor de seguridad

Con la información estructural y geotécnica obtenida en campo, se realizaron cálculos preliminares para establecer los parámetros básicos necesarios para estimar el factor de seguridad.

Se realizaron estimaciones de las propiedades del macizo rocoso, como el peso unitario, la cohesión, el ángulo de fricción interna y la altura de los taludes, mediante

la integración de los valores promedio. Además, se consideraron las condiciones geométricas observadas en campo, como la pendiente, las discontinuidades y la naturaleza del material.

La información resultante sirvió para definir los rangos de resistencia y rigidez empleados en la configuración de los modelos de estabilidad, garantizando que las simulaciones numéricas se basaran en condiciones observadas en el sitio.

Aunque los valores numéricos definitivos se presentarán en el apartado de resultados, en esta sección se describe la función y la justificación de cada uno en el modelado de la metodología.

- **Cohesión (c):** Se estima como la correlación entre el índice GSI y el UCS (Hoek et al., 2002); es la resistencia inherente del material a la separación entre partículas. Su valor nos permite simular la capacidad del macizo rocoso para mantener la unión entre bloques, incluso en presencia de fracturas.
- **Ángulo de fricción interna (ϕ):** Indica la resistencia al deslizamiento a lo largo de discontinuidades o superficies de falla. Está relacionado con la condición superficial de las discontinuidades observadas (rugosidad, alteración, relleno) (Barton & Choubey, 1977).
- **Peso unitario (γ):** Está expresando el peso del material por unidad de volumen, este parámetro tiene una influencia directa de las fuerzas actuantes sobre cada dovela (Bishop, 1955).
- **Resistencia a compresión uniaxial (UCS):** Como ya se mencionó en este capítulo, se obtiene a partir de las mediciones realizadas con el martillo de Schmidt y el *Leeb Hardness Test* (Equotip). Es la representación de la resistencia de la roca intacta. Se utiliza bajo los criterios de Hoek & Brown (2019)
- **Índice Geológico de Resistencia (GSI):** También se presenta en este capítulo y sirve de base para estimar la resistencia del macizo, integrando la estructura

(bloques, columnas o brechas) y el estado de las discontinuidades. El GSI también permite diferenciar zonas de mayor alteración o fracturamiento dentro del perfil (V. Marinos et al., 2007).

- **Condición de saturación (GammSat):** Esta fue definida para la representación de varios escenarios con diferentes tipos de niveles freáticos, considerando la humedad y filtraciones (Peck et al., 1974).
- **Número de estratos o unidades (N):** Corresponde al número de capas o sectores dentro del talud con propiedades geotécnicas homogéneas

La cohesión (c) se expresó en MPa, el ángulo de fricción interna (ϕ) en grados ($^{\circ}$), la densidad aparente (γ) en kN/m^3 y la resistencia a compresión uniaxial (UCS) en MPa.

2.2.3. Validación y control de calidad de los datos

Para garantizar la confiabilidad de la información utilizada en el análisis, se aplicaron procedimientos de validación y control de calidad tanto en las mediciones de campo como en el procesamiento digital de los datos. En el trabajo de campo, la calibración del martillo de Schmidt se verificó previamente, y se realizaron mediciones repetidas en puntos seleccionados con el fin de reducir la variabilidad asociada al operador y al estado superficial del macizo rocoso. Asimismo, las observaciones geológicas y estructurales se corroboraron mediante registro fotográfico y comparación entre distintos miembros del equipo de trabajo.

En la etapa de gabinete, los datos espaciales fueron revisados para identificar y corregir errores topológicos, inconsistencias en la geometría de polígonos y líneas, así como discrepancias en los sistemas de referencia. De igual manera, las capas generadas en SIG fueron depuradas para asegurar la continuidad de los perfiles exportados y la correcta integridad del modelo digital de elevación. Estos pasos permitieron integrar información confiable en el modelado numérico posterior, evitando distorsiones en el cálculo del factor de seguridad.

2.3. Contextualización de la zona de estudio

La zona de estudio corresponde a los márgenes izquierdo y derecho de la presa; la cual está localizada al poniente de la ciudad de San Luis Potosí. El área se ubica en la hoja topográfica F14A83 “El Tepetate” y forma parte del sector norte del Complejo Volcánico de la Sierra de San Miguelito.

Se definieron los límites espaciales de la zona de estudio con base en la morfología y puntos de peligro basados en observación, se identificaron las principales unidades geomorfológicas. El relieve se caracteriza por laderas abruptas, superficies con pendientes variables y zonas de contacto entre depósitos aluviales y rocas ígneas de tipo ignimbrítico.

La delimitación de los márgenes permite diferenciar dos sectores con comportamientos geotécnicos contrastantes. La ladera izquierda presentó mayores evidencias de fracturación, alteración superficial e intemperismo avanzado, mientras que la derecha mostró un macizo más homogéneo y compacto.

2.4. Construcción de secciones mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG)

En el entorno de *ArcGis* se trazaron líneas vectoriales que siguieron desde la base hasta la corona de los taludes. Estas líneas, denominadas *feature lines*, se generaron para representar los perfiles longitudinales de cada ladera. Para cada línea se aplicó la herramienta “Interpolate Shape”, tomando como referencia el modelo digital de elevación (DEM) de 1.5 m del INEGI. Esto permitió asignar a cada vértice un valor de elevación correspondiente a la superficie topográfica del terreno.

Se definieron dieciséis perfiles o dovelas en la ladera izquierda y trece en la derecha, con el propósito de abarcar la mayor extensión posible del área de estudio y así garantizar la representación de las zonas con fallas y estructuras relevantes (Figura 16). A cada perfil se le asignaron un punto de inicio y un punto de fin, lo que permitió

integrar correctamente las coordenadas espaciales y mantener una secuencia ordenada para su análisis posterior.

Los perfiles analizados fueron seleccionados con base en su accesibilidad, su ubicación en zonas de interés geológico y geomorfológico, y su relevancia para la evaluación del peligro asociado a la inestabilidad de los taludes. También se consideraron los sectores donde la presencia de senderos, vialidades, áreas recreativas o el tránsito de personas y vehículos hace necesario identificar posibles puntos de afectación. Este criterio permitió definir secciones representativas que integran tanto la geometría característica de las laderas como los elementos que podrían ser susceptibles de un impacto por procesos de inestabilidad.

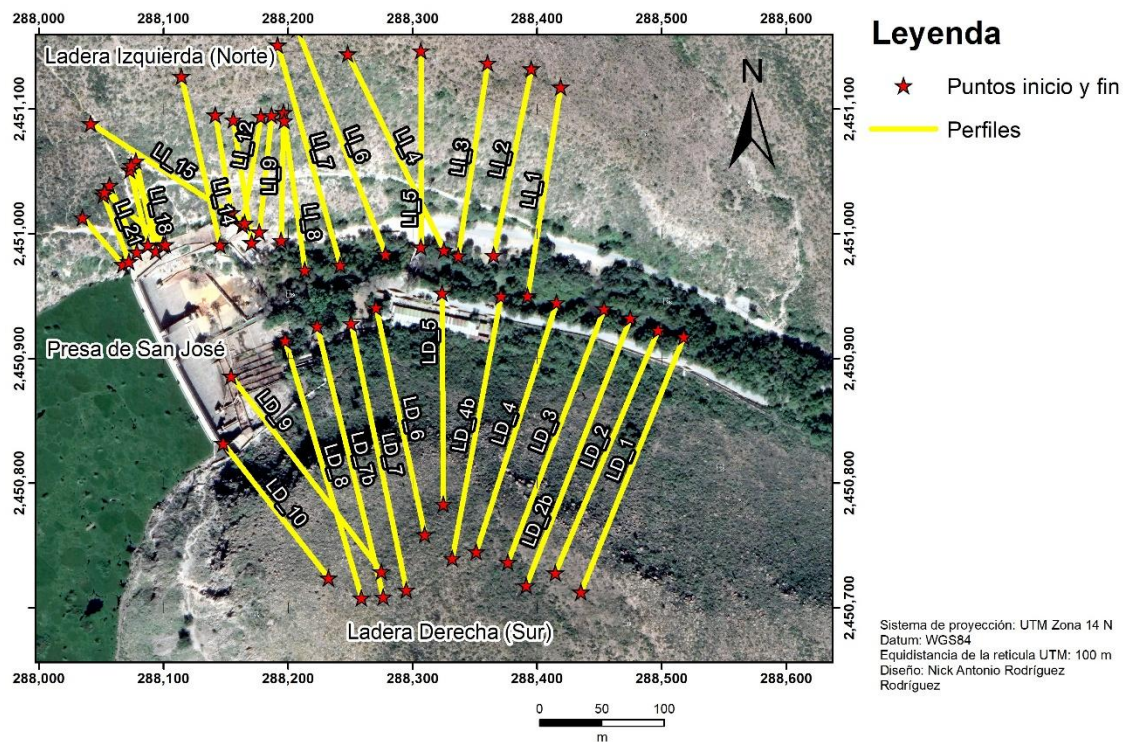


Figura 16. Perfiles elaborados sobre el Modelo Digital de Elevación (MDE) en las laderas izquierda y derecha de la Presa de San José.

Se muestran los puntos de inicio y de fin (estrellas) y las líneas de perfil (amarillas) utilizadas para extraer las coordenadas X, Y y Z requeridas por el software SSAP.

En la ladera izquierda, dada su mayor complejidad geomorfológica, se reconstruyeron perfiles mediante levantamientos con distanciómetro láser. El tramo inicial del talud

obtenido del DEM fue reemplazado por los datos de campo, debido a que la resolución espacial del modelo no representaba adecuadamente la geometría real (Figura 17).

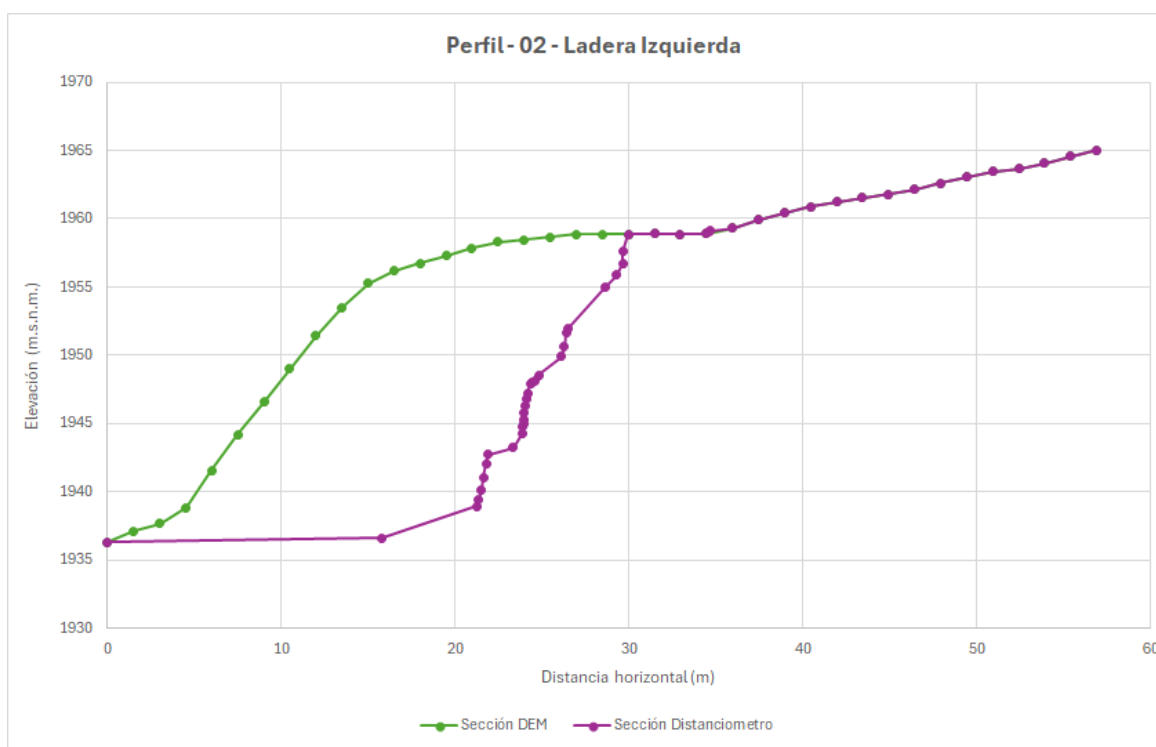


Figura 17. Perfil comparativo de la ladera izquierda (Perfil-02).

Se observa la sección obtenida a partir del Modelo Digital de Elevación (DEM) y la sección medida en campo mediante distanciómetro láser, mostrando la geometría del talud.

Cada punto se digitalizó y se exportó como archivo *shapefile* (*.shp) para conservar su referencia espacial. Estos puntos sirvieron como polígonos de control y facilitaron la verificación secuencial y la orientación de cada línea para el proceso de interpolación y exportación de datos.

Asimismo, se elaboraron mapas base georreferenciados de la zona de estudio, con la finalidad de identificar la ubicación exacta y analizar y reconocer los principales elementos topográficos del entorno. Se generó un mapa de pendientes, que sirvió de referencia para visualizar los gradientes topográficos del terreno y orientar la selección de los perfiles más representativos para el modelado.

Una vez completados el trazo y la interpolación, la información fue exportada en formato *.txt, conteniendo los valores X, Y y Z correspondientes a las coordenadas de cada línea trazada. Posteriormente, los archivos se convirtieron a formato *.xlsx, adecuados para su lectura y adecuación al modelado numérico, donde se realizaron los cálculos de estabilidad (Figura 18).

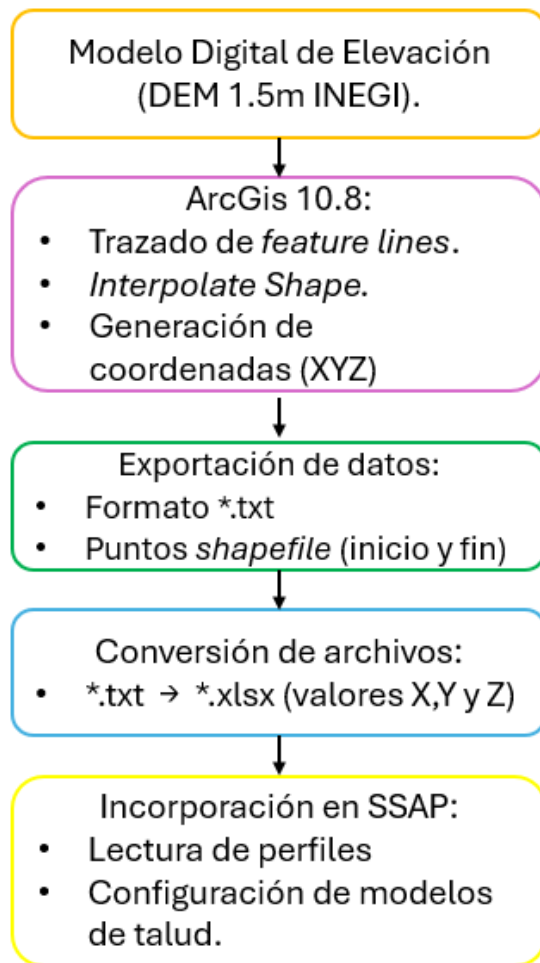


Figura 18. Esquema del flujo de trabajo para la transferencia de información topográfica desde el entorno SIG hacia el software SSAP.

Se muestra la secuencia de interpolación, exportación y conversión de archivos empleada para integrar los perfiles de las laderas en el modelado numérico de estabilidad.

2.5. Adecuación de datos para incorporar a modelado numérico

Una vez generadas las coordenadas de los perfiles en el entorno SIG, se realizó un proceso de filtrado y adecuación de datos, con el propósito de construir modelos de estabilidad correspondientes a cada ladera.

Los archivos exportados desde ArcGis en formato *.txt que contenían los valores en X y Y, fueron verificados individualmente para asegurar la continuidad topografica y evitar líneas o quiebres en las líneas interpoladas.

El proceso continúa generando un archivo *.xlsx en el cual se importan los puntos o los valores en X y Y, estos pasan por un proceso de adecuación el cual sirvió para incluirlos en el SSAP.

2.5.1. Filtrado de las capas internas del perfil.

El software SSAP permite un máximo de 100 puntos por perfil topográfico, por lo que fue necesario realizar un proceso de filtrado y homogeneización de los datos obtenidos en ArcGis, con el fin de reducir el número de vértices sin alterar significativamente la geometría del terreno.

Para ello, se desarrolló un programa en Python, utilizando el entorno de Google colab (<https://colab.research.google.com/>), que permitió automatizar la depuración y selección de los puntos representativos. El script leyó los archivos exportados en formato .xlsx, que contenían los valores de altura, contrastando con los de distancia (X y Y), y aplicó un filtro de muestreo que redujo el conjunto de datos a 75 por perfil, con base en el número mínimo que presentó nuestros datos obtenidos con los perfiles.

El código ejecutó las siguientes tareas principales (Figura 19):

- Lectura de los archivos *.xlsx exportados desde Excel y obtenidos en ArcGis.
- Detección y eliminación de puntos redundantes o de saltos abruptos en la elevación.

- Aplicación de un criterio de reducción proporcional de los datos hasta 75 puntos.
- Exportación del conjunto filtrado en formato *.xlsx, listo para corregir y construir capas para su posterior exportación en SSAP.

```

import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

# 1. Cargar el DataFrame desde Excel
df = pd.read_excel("24b.xlsx", sheet_name="24b")
print(df.shape)
print(df.columns)
print(df["X"].dtype, df["Graphic Profile 1"].dtype)
plt.plot(df["X"], df["Graphic Profile 1"])
plt.xlim([0, 140]) # Fuerza eje X a mostrar hasta 140
plt.ylim([1920, 1980]) # y en Y (opcional)
plt.show()

# 2. Graficar los valores de la columna "Valores" contra el índice
plt.plot(df["X"], df["Graphic Profile 1"], linewidth=1, color="blue")
plt.scatter(df["X"], df["Graphic Profile 1"], s=7, color="red", marker="o")
plt.title("Perfil")
plt.xlabel("X")
plt.ylabel("Y")
plt.grid(True)
plt.show()

# Generamos 75 índices aproximadamente equiespaciados a lo largo de el perfil que es mayor a 100 puntos:
indices = np.round(np.linspace(0, len(df)-1, 75)).astype(int)

# Creamos un nuevo DataFrame con esos 75 índices
df_downsampled = df.iloc[indices].reset_index(drop=True)

# df_downsampled ahora tiene 75 filas
print(df_downsampled.shape) # (75, columnas)

# Si quieres exportarlo a Excel:
df_downsampled.to_excel("24b_75.xlsx", index=False)

plt.plot(df["X"], df["Graphic Profile 1"], linewidth=1, color="blue")
plt.scatter(df["X"], df["Graphic Profile 1"], s=7, color="red", marker="o")
plt.title("Perfil")
plt.xlabel("X")
plt.ylabel("Y")
plt.grid(True)
plt.show()

```

Figura 19. Código en Python empleado para graficar y optimizar los perfiles topográficos mediante la reducción de vértices y la exportación de los datos en formato Excel.

Con los datos depurados, se procedió a construir las capas internas del perfil, que representaron las transiciones entre materiales y unidades geotécnicas identificadas en campo.

Los puntos correspondientes a cada perfil se organizaron en una hoja de cálculo de Excel, tomando como referencia las mediciones estructurales, las observaciones visuales y la continuidad de las rocas registradas durante el levantamiento.

En cada perfil se delimitaron las capas internas asignando valores específicos a las columnas que correspondían a los límites de cada unidad, conservando la secuencia topográfica y la correspondencia con las condiciones reales observadas en campo.

Una vez completada la estructuración de los datos, los puntos se copiaron y se prepararon para su exportación al software SSAP, donde se emplearon para configurar los modelos de análisis de estabilidad.

Este proceso también se complementó en el entorno QCAD, programa integrado en el paquete de SSAP, que, de igual forma, permite definir gráficamente las capas internas del perfil. En esta etapa, se trabajó con el perfil correspondiente a la ladera izquierda, en el que se trazaron manualmente las interfaces entre materiales, basándose en las observaciones de campo y en la información previamente organizada en Excel.

2.5.2. Construcción de las capas internas del perfil

Los perfiles generados en ArcGIS fueron revisados para asegurar su continuidad topográfica y corregir saltos o quiebres producidos por el DEM. Posteriormente, los archivos exportados se organizaron en formato .xlsx, lo que permitió preparar la información para su uso en el modelador.

Debido al límite de puntos permitido por SSAP, cada perfil fue filtrado mediante un script en Python que redujo los datos a 75 puntos representativos, eliminando valores redundantes sin modificar la geometría general del talud (Figura 20 y Figura 21).

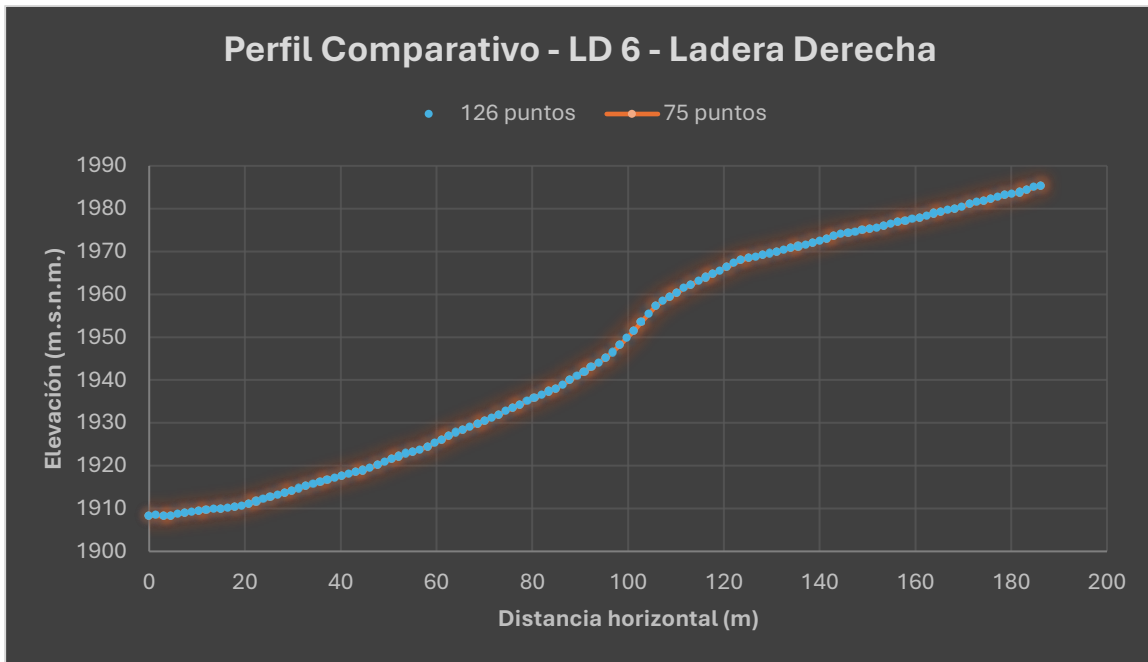


Figura 20. Perfil LD-6 topográfico del talud obtenido a partir de 126 tomado con el DEM, junto con una versión reconstruida a partir de 75 puntos. (Ladera Derecha).

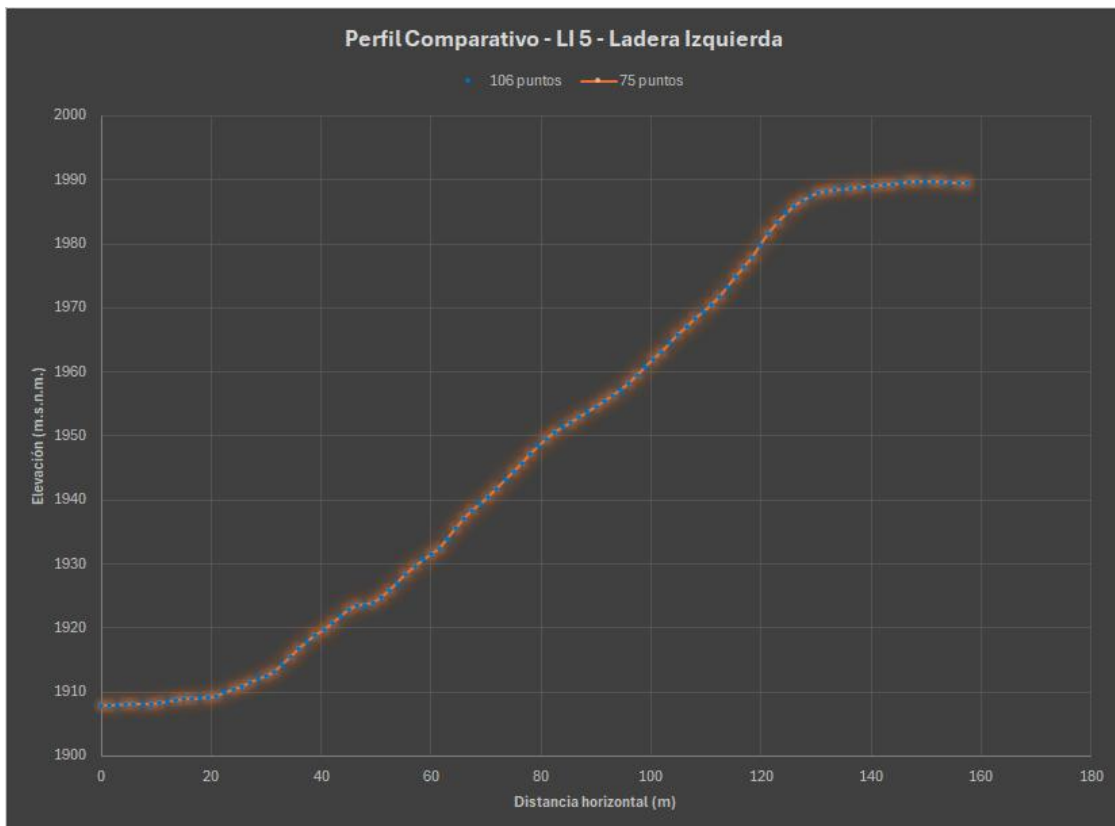


Figura 21. Perfil LI-5 obtenido a partir de 106 puntos obtenidos con el DEM, junto con una versión suavizada construida a partir de 75 puntos. (Ladera izquierda)

Con los puntos depurados, se definieron las capas internas de cada sección a partir de la información litológica y estructural obtenida en campo (Figuras 22 y 23).

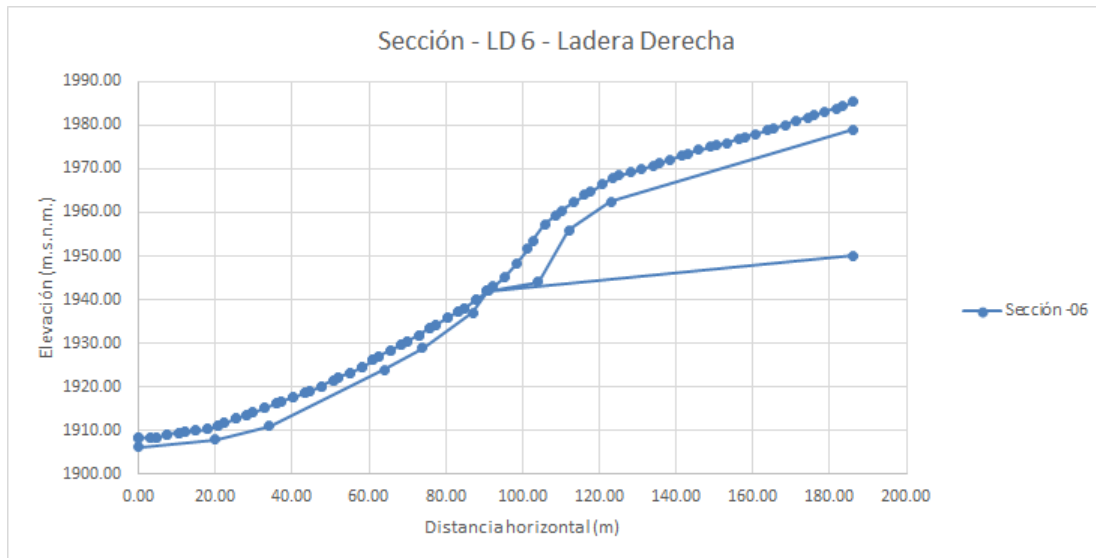


Figura 22. Perfil topográfico de la Sección LD-6 de la Presa de San José.

Se identifico cambios de pendiente, zonas de transición litológico y posterior construcción de modelos de estabilidad. (Ladera derecha).

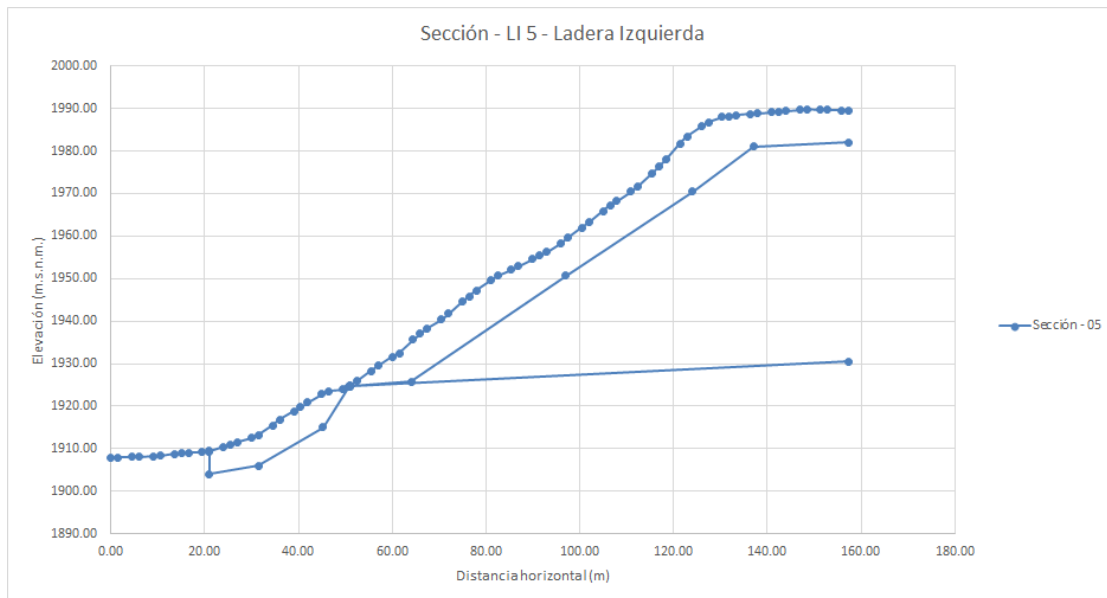


Figura 23. Perfil topográfico de la Sección LI-5 de la Presa de San José.

Se identifico cambios de pendiente, zonas de transición litológico y posterior construcción de modelos de estabilidad. (Ladera izquierda).

Finalmente, se integraron los valores de UCS (Schmidt y Leeb) y las estimaciones de GSI, lo que permitió asignar a cada capa los parámetros de resistencia utilizados posteriormente en los modelos de equilibrio límite. El conjunto resultante consistió en perfiles filtrados, estructurados y parametrizados, listos para su incorporación en SSAP.

2.5.3. Integración de datos de UCS y GSI

Para integrar los valores geotécnicos en el modelo numérico, se incorporaron los resultados de ensayos de resistencia a compresión uniaxial (UCS) y la clasificación geomecánica del macizo rocoso (GSI). El objetivo de esta etapa fue asignar a cada capa interna del perfil los parámetros representativos de resistencia y calidad estructural, con el fin de definir su comportamiento en el análisis de equilibrio límite.

Ambos parámetros se integraron, lo que permitió establecer relaciones entre la resistencia del material intacto y la calidad del macizo rocoso. A partir de estos valores, se calcularon las propiedades de resistencia equivalentes requeridas por el software SSAP, como la cohesión

Los valores de UCS se obtuvieron a partir de mediciones realizadas en campo con el martillo de Schmidt tipo N y el Leeb test, que se correlacionaron mediante ecuaciones empíricas ajustadas a rocas ígneas de tipo ignimbrita.

La Fórmula 1 del modelo empírico para el uso martillo de Schmidt nos dice que:

$$\sigma_c = a e^{bR}$$

Fórmula 1

donde:

- σ_c : resistencia a la compresión uniaxial (MPa).
- R : índice de rebote medio o equivalente al percentil 75.
- a y b : coeficientes determinados mediante un ajuste estadístico (regresión no lineal).

Donde Bolla & Paronuzzi (2021) Adaptaron la fórmula para la estimación de la resistencia a compresión uniaxial (UCS) del macizo rocoso; esta presenta un comportamiento no lineal (Fórmula 2). Ellos proponen para el martillo tipo N lo siguiente:

$$\sigma_{cN} = 5.2251 e^{0.0449R_N} \quad \text{Fórmula 2}$$

donde los parámetros $a = 5.2251$ y $b = 0.0449$ fueron determinados mediante ajuste de regresión exponencial sobre un conjunto de más de 2,400 mediciones de campo en diferentes litologías, obteniendo un coeficiente de correlación $R^2 = 0.99$. La forma exponencial refleja la respuesta no lineal entre el rebote y la resistencia de la roca.

Para obtener parámetros representativos y conservadores de la resistencia superficial, se seleccionó el percentil 5 de la distribución como el valor característico del rebote. Este percentil se utiliza para dar la estimación a la resistencia característica mínima probable del macizo rocoso (Aydin, 2009b, 2009a; Katz et al., 2000).

El uso del Leeb test y la parametrización de este, tiene un principio similar al del martillo de Schmidt, según Ulusay et al. (2025) (Fórmula 3), se basa en el rebote dinámico donde un impactador o pistón metálico, se define un método por el cual se puede calcular:

$$LHD = 1000 \times \frac{v_2}{v_1} \quad \text{Fórmula 3}$$

Donde:

- v_1 : velocidad de impacto previa al contacto con la superficie (m/s).
- v_2 : velocidad de rebote del cuerpo de impacto (m/s).
- El factor 1000 es una constante de escala que normaliza el valor a una magnitud adimensional comparable con otras escalas de dureza.

Esto fue normalizado por ASTM International (2017) y International Organization for Standardization (2015).

Se han tomado las ecuaciones de diversos autores para calcular el UCS, basadas en correlaciones empíricas del LHD (Fórmula 4). En general, estas correlaciones presentan una tendencia exponencial de la forma:

$$UCS = a \times e^{b \times LHD}$$

Fórmula 4

Donde:

- *a* y *b*: son coeficientes empíricos determinados experimentalmente.
- *LHD*: índice de dureza.
- *UCS*: Resistencia a compresión uniaxial.

Para el presente estudio se seleccionaron dos modelos únicamente los propuestos por J. S. Lee et al. (2014a) y Ulusay et al. (2025), por ser los más recientes, estar normalizados y por las condiciones de trabajo de campo (Tabla 2).

Tabla 2. Modelos empíricos de correlación entre el índice de dureza Leeb (LHD) y la resistencia a compresión uniaxial (UCS), propuestos por diferentes autores.

Los modelos se derivan de bases de datos experimentales con distintas litologías y metodologías de calibración (J. S. Lee et al., 2014b; Ulusay et al., 2025b).

Modelo	Ecuación	Tipo de roca base	Observaciones
Lee et al. (2014)	$UCS = 2.1454 \times e^{0.0058 \times LHD}$	Lutitas y esquistos laminados (baja a media resistencia)	Derivado de núcleos de lutita compacta; calibrado para Leeb tipo D.
Ulusay et al. (2025)	$UCS = 5.64 \times e^{0.0042 \times LHD}$	Base de datos multilitológica (sedimentarias, ígneas y metamórficas)	Basado en más de 500 muestras con amplia variabilidad textural.

Ambos modelos presentan una estructura exponencial semejante y por eso se integraron en una sola formula, esta decisión está basada en que ambos modelos

presentan una estructura similar funcional, con coeficientes exponenciales dentro de la misma magnitud ($b \approx 0.004-0.005$), y ambos han sido probados en materiales de baja resistencia, la media aritmética entre ambos nos permite ir compensando inconsistencias, las diferencias sistemáticas y obtener un valor intermedio conservador (Fórmula 5).

La UCS final será la siguiente por el dado por el modelado numérico que se calculó:

$$UCS_{final} = \frac{UCS_{Lee} + UCS_{Ulusay}}{2} \quad \text{Fórmula 5}$$

Donde:

- UCS_{Lee} y UCS_{Ulusay} son las resistencias estimadas mediante las ecuaciones de los autores citados para un mismo valor de LHD.

Este procedimiento permite tener una consistencia con la literatura (Ulusay et al., 2025a) y así se evita depender de un único modelo empírico, lo que reduce la incertidumbre asociada a la extrapolación de resultados.

Ahora con el método estimar la resistencia y deformación del macizo rocoso a partir de observaciones visuales directas por medio de la clasificación geomecánica Índice Geológico de Resistencia o Geological Strength Index (GSI), con la consideración de dos variables principales:

- La estructura del macizo (bloques, columnas, fragmentos)
- La condición superficial de las discontinuidades (rugosidad, alteración, relleno).

Este sistema permite caracterizar el comportamiento del macizo mediante una escala visual que combina dos criterios principales: la estructura del macizo (desde macizos masivos hasta muy fracturados o disgregados) y la condición superficial de las discontinuidades (rugosidad, apertura, grado de meteorización y presencia de relleno).

A diferencia de otros sistemas como lo son el RMR o Q, el GSI no requiere mediciones en laboratorio, su método consiste en la observación y mediciones en campo que son identificadas en esquemas propuestos por P. Marinos & Hoek (2000) (Figura 24).

Durante el trabajo de campo, se realizaron evaluaciones visuales en distintos sectores de ambas laderas de la Presa de San José, asignando valores de GSI mediante la comparación con las gráficas de referencia propuestas por Hoek y Marinos.

Este procedimiento permitió clasificar cualitativamente los diferentes tipos de roca en función de su integridad estructural y del deterioro visible de sus juntas, obteniendo una estimación representativa del comportamiento general del macizo para su posterior integración en el modelado numérico.

El índice GSI se estimó mediante observación directa en campo, siguiendo los criterios de Hoek y Brown. Este sistema empírico semi-cuantitativo permite clasificar el macizo rocoso a partir del grado de fracturamiento y la condición de sus discontinuidades, asignando valores que representan su calidad estructural. La Figura 25 muestra ejemplos de los afloramientos evaluados.

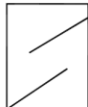
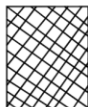
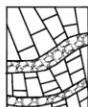
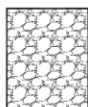
GSI INDICE GEOLÓGICO DE RESISTENCIA PARA ROCAS DIACLASADAS Los valores promedio de GSI son estimados de la litología, estructura y condiciones superficiales de las discontinuidades. No trate de ser tan preciso. Estimar un rango de 33 a 37, es una medida más real que establecer GSI=35. Observe que la tabla no aplica a fallas controladas estructuralmente. Donde están presentes planos estructurales débiles con una orientación desfavorable con respecto a la cara de la excavación, éstos van a dominar el comportamiento de la masa de roca. La resistencia al cortante de la superficie en rocas que son susceptibles al deterioro por cambios en el contenido de humedad, se reducirá si hay presencia de agua. Cuando se está trabajando con rocas en las categorías regular a muy pobre, puede hacerse un desplazamiento hacia la derecha de la tabla para condiciones de humedad. El manejo de presiones de poros se realiza con un análisis de esfuerzos efectivos.		Condiciones de la superficie de las diaclasas	MUY BUENAS Superficies muy ásperas, frescas, sin meteorizar.	BUENAS Ásperas, ligeramente meteorizadas, con manchas de oxidación.	REGULARES Superficies suaves, moderadamente meteorizadas y alteradas.	POBRES Superficies cizalladas ("Slickensided") muy meteorizadas con cubierta compacta de relleno o fragmentos angulares.	MUY POBRES Superficies muy meteorizadas con cubierta o relleno de arcilla blanda cubriendo o llenando espacios.	
ESTRUCTURA		Disminución de la calidad de la superficie de las diaclasas →						
	INTACTA O MASIVA: Especímenes in situ de roca intacta o masiva con muy pocas discontinuidades ampliamente espaciadas.	Disminución del entrelace de los pedazos de roca ↓	90	80	70	60	N/A	N/A
	FRACTURADA ("Blocky"): Masas de roca bien entrelazadas, inalteradas, constituidas por bloques cúbicos formados por tres conjuntos de diaclasas que se intersectan.		80	70	60	50	40	30
	MUY FRACTURADA (Very blocky). Masa entrelazada, parcialmente alterada constituidas por bloques angulares de múltiples caras, formados por 4 o mas conjuntos de diaclasas que se intersectan.		70	60	50	40	30	20
	FRACTURADA/ALTERADA/CON-VETAS. Plegada con bloques angulares formados por muchos conjuntos de discontinuidades que se intersectan. Persistencia de los planos de estratificación o esquistosidad.		60	50	40	30	20	10
	DESINTEGRADA: Masa de roca pobremente entrelazada, fuertemente partida, con una mezcla de pedazos de roca redondeados y angulares.		50	40	30	20	10	
	LAMINADA/CIZALLADA: Ausencia de bloques debido al espaciamiento cercano entre los planos débiles de esquistosidad o de cizallamiento.		N/A	N/A				

Figura 24. Índice Geológico de Resistencia (GSI).

La tabla permite estimar el valor de GSI a partir de la estructura del macizo rocoso y de las condiciones de la superficie de las discontinuidades, integrando observaciones de campo sobre la interconexión de bloques y el grado de meteorización. Fuente: adaptado de P. Marinos & Hoek (2000), "GSI: A Geologically Friendly Tool for Rock Mass Strength Estimation".

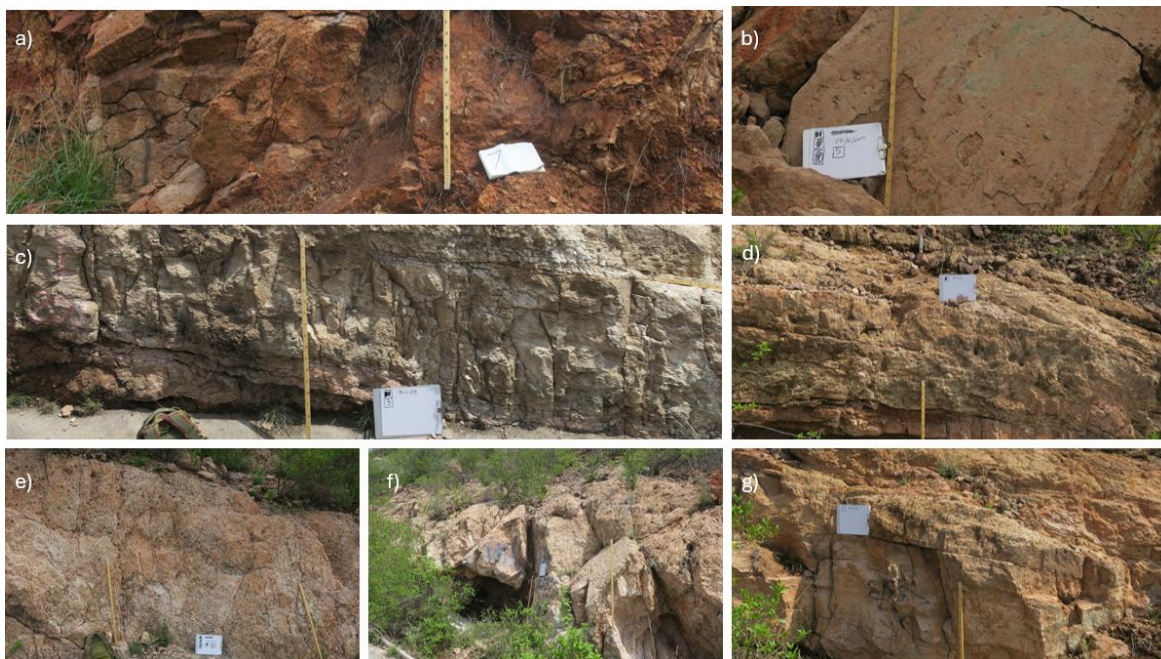


Figura 25. Afloramientos representativos evaluados durante el trabajo de campo para la estimación del índice GSI en la ladera izquierda.

Los subpaneles corresponden a las siguientes estaciones de muestreo: (a) Estación 7, (b) Estación 5, (c) Estación 3, (d) Estación 2, (e) Estación 6, (f) Estación 4 y (g) Estación 1. En las imágenes se observa la variabilidad en el grado de fracturamiento, el tamaño de los bloques y las condiciones superficiales del macizo rocoso.

2.6. Modelado de trayectorias de caída de rocas

Con el fin de complementar la evaluación de estabilidad global realizada mediante métodos de equilibrio límite, se incorporó un análisis cinemático preliminar de trayectorias de caída de bloques en las laderas que rodean la Presa de San José. Este análisis permitió estimar el alcance potencial de desprendimientos superficiales que no son capturados por el enfoque de estabilidad global.

Las zonas de posible desprendimiento se identificaron mediante observaciones directas en campo, registro fotográfico y análisis de bloques previamente caídos (Figura 11). Se reconocieron escarpes con pendientes superiores a 35° , alta densidad de fracturamiento y presencia de discontinuidades persistentes.

Con base en bloques observados en sitio, se consideraron elementos representativos con diámetro aproximado de 2 m y masa media cercana a 10 Mg. Las simulaciones se realizaron distribuyendo bloques desde múltiples puntos fuente hacia los sectores inferiores de la presa, incluyendo áreas de tránsito y uso recreativo (Borselli & Rodríguez Rodríguez, 2026).

El análisis se desarrolló mediante un modelado cinemático tipo *lumped-mass*, implementado en el software IS GeoMassi. En este enfoque, el bloque se representa como una masa puntual cuya trayectoria incluye fases de caída libre, impacto y rodadura. La interacción bloque–terreno se controla mediante coeficientes de restitución normal (R_n) y tangencial (R_t), que regulan la disipación de energía en cada rebote.

Tabla 3. Coeficientes de restitución (R_n y R_t) utilizados en la simulación de trayectorias de caída de bloques.

Considerados para los diferentes tipos de terreno identificados en el área de estudio, utilizados en el modelado cinemático de caída de bloques.

Tipos de terreno	R_n	R_t
Asfalto	0.9	0.5
Sustrato	0.85	0.7
Con vegetación	0.7	0.3
Zona húmeda	0.5	0.2

Se definieron cuatro tipos de superficie en el modelo digital del terreno: asfalto, sustrato rocoso o escombros, zonas con vegetación y zonas húmedas, asignando valores conservadores de R_n y R_t tomados de la literatura (Wyllie, 2014) (Tabla 3). Las simulaciones permitieron estimar alcance máximo, velocidad y energía de impacto, con el objetivo de identificar sectores potencialmente expuestos a desprendimientos superficiales y complementar el análisis de estabilidad global.

2.7. Construcción de modelado numérico con el software SSAP

El modelado numérico constituye una de las etapas más importantes del estudio, ya que permite estimar la estabilidad de los taludes en función de los parámetros geomecánicos obtenidos y de las condiciones físicas observadas en campo.

Para este análisis se utilizó el software Slope Stability Analysis Program (SSAP), desarrollado por Borselli (2024a). Este se basa en el método de equilibrio límite y permite evaluar múltiples escenarios de falla, considerando tanto condiciones estáticas como dinámicas.

El modelo que está siendo empleado busca representar de la forma más realista posible la geometría de las laderas izquierda y derecha de la Presa de San José, incorporando los parámetros derivados de los índices GSI, UCS, cohesión (c), ángulo de fricción interna (ϕ), además de la densidad aparente (γ) y la presencia de agua o grietas rellenas (filled tension crack) que alteran el equilibrio del macizo (Kiun You & Abd.Rahim, 2017).

El análisis se desarrolló bajo un enfoque estático, empleando condiciones de humedad compatibles con un estado relativamente seco, lo cual evita la incorporación de presiones intersticiales adicionales y permite evaluar principalmente la contribución de la resistencia del macizo rocoso. La configuración del modelo consideró condiciones de frontera que restringen los desplazamientos horizontales en la base del perfil y permiten desplazamientos verticales controlados, asegurando un comportamiento numérico coherente con la geometría de las laderas.

Para la estimación del factor de seguridad (FS), SSAP emplea la relación fundamental entre fuerzas resistentes y actuantes (Cala & Flisiak, 2020) (Fórmula 6):

$$FS = \frac{F_{resistentes}}{F_{actuantes}}$$

Fórmula 6.

En los perfiles analizados, las fuerzas resistentes derivan de los parámetros geomecánicos del macizo, mientras que las actuantes corresponden principalmente al esfuerzo gravitacional generado por la geometría del talud. De acuerdo con criterios comunes en equilibrio límite, valores de $FS < 1.0$ indican inestabilidad, valores entre 1.0 y 1.3 representan condiciones críticas, y valores mayores sugieren una estabilidad relativa del talud.

2.7.1. Configuración de modelo

El modelado numérico fue realizado en el SSAP (versión 6.1, 2025), el cual nos permitió tener una representación gráfica de la geometría de los taludes al analizar su estabilidad mediante el método de equilibrio límite (Borselli, 2024).

En este apartado, se buscó configurar un modelo que reprodujera de manera representativa las condiciones observadas en campo, utilizando parámetros derivados de las mediciones, clasificaciones y observaciones realizadas durante las salidas a campo y el procesamiento con SIG.

Se exportó desde ArcGIS cada dovela, y estas fueron importadas en SSAP, conservando las coordenadas X, Y y Z obtenidas.

Posteriormente, a cada perfil se le asignaron los parámetros geotécnicos que inciden directamente en la evaluación del factor de seguridad (FS).

Con el modelo configurado, se definieron cuatro escenarios de simulación para evaluar el comportamiento del macizo rocoso bajo distintas condiciones de carga y saturación.

Estos escenarios se seleccionaron para representar de manera integral los factores que influyen en la estabilidad de los taludes de la Presa de San José:

- 1. Condición estática:** corresponde al estado natural del talud sin la influencia de fuerzas externas dinámicas. Este escenario permitió establecer una línea base

del comportamiento del macizo y del factor de seguridad en condiciones de equilibrio gravitacional.

2. Condición dinámica: se consideró un coeficiente sísmico horizontal $k_h = 0.10$, que simula el efecto inercial de una aceleración sísmica equivalente aplicado al talud (Borselli, 2023). Este enfoque pseudoestático permite evaluar su comportamiento frente a cargas dinámicas, independientemente de la magnitud específica del evento.
3. Condición saturada: representó el escenario en el que el nivel freático alcanza la superficie o zonas cercanas a la corona del talud, evaluando la disminución de la resistencia efectiva por incremento de presiones intersticiales y pérdida de succión matricial. Esta condición incluye la saturación del sistema de fracturas del macizo rocoso durante eventos de precipitación, lo que puede reducir localmente la estabilidad.
4. Condición de *filled tension crack* (grieta rellena): modeló la presencia de grietas o discontinuidades rellenas de material fino o de agua, que actúan como superficies de debilidad en el macizo. Este escenario se incluyó para analizar la estabilidad local en sectores con evidencia de fracturación y posible infiltración, observadas durante el trabajo de campo.

La incorporación de estos cuatro casos permitió comparar la respuesta de los perfiles ante diferentes condiciones de sollicitación, ofreciendo una evaluación más completa del comportamiento del macizo rocoso y de las posibles variaciones del factor de seguridad (FS) en función de las condiciones geotécnicas y ambientales.

2.7.2. Método de equilibrio límite (Morgenstern-Price)

El método de equilibrio límite es una de las herramientas empleadas en la ingeniería geotécnica para evaluar taludes.

Es basado con el principio de que en un talud se encuentra en equilibrio cuando las fuerzas resistentes (producidas por la cohesión, la fricción y la misma estructura

del macizo rocoso) son iguales o son mayores a las fuerzas que actúan o actuantes (peso propio, presión del agua y las acciones sísmicas (Wyllie et al., 2004).

Según (Hoek & Bray, 1981) y (Duncan, 1996), cuando las fuerzas actuantes exceden a las resistentes, se genera una superficie de falla, ya que el talud pierde estabilidad. El análisis por equilibrio límite no evalúa deformaciones ni desplazamientos, sino que determina la condición límite entre estabilidad e inestabilidad, expresada mediante el factor de seguridad (FS) (Schuster & Krizek, 1978).

Este factor es definido como la relación entre la resistencia disponible y la requerida para mantener el equilibrio:

$$FS = \frac{\text{Resistencia disponible}}{\text{Esfuerzo actuante}} \quad \text{Fórmula 7}$$

En cuanto al factor de seguridad, un valor de $FS > 1$ indica una condición estable, mientras que $FS < 1$ puede considerarse inestable. En algunos casos de estudios geotécnicos, comúnmente se consideran como límites de seguridad $FS \geq 1.3$ para casos en condiciones estáticas y $FS \geq 1.1$ para casos en condiciones dinámicas o saturadas (Hoek & Bray, 1981; Wyllie et al., 2004).

2.7.3. Método de dovelas y formulación general

Para la aplicación práctica, el método de equilibrio limite divide el talud en perfiles, dovelas o rebanas verticales, sobre las cuales se evalúan las fuerzas que actúan en cada una de las porciones: peso propio (W), cohesión (c), fricción (ϕ), presión de poros (U) y posibles componentes sísmicas ($k_h W$).

$$FS = \frac{\sum c' L + (N - U) \tan \phi'}{\sum (W \sin \alpha + F_{in})} \quad \text{Fórmula 8}$$

Donde:

- c' : es la cohesión efectiva del material.
- ϕ' : es el ángulo de fricción interna efectivo.
- L : es la longitud de la base de la dovela.
- N : es la fuerza normal total en la base.
- U : es la fuerza debida a la presión de poros ($U=u L$).
- $W \sin(\alpha)$ es la componente del peso que induce el movimiento.
- F_{in} : representa las fuerzas de inercia, típicamente la componente sísmica.

Con esta ecuación se describe el balance que hay entre las fuerzas que resisten el movimiento (numerador, basado en el criterio de Mohr-Coulomb en términos efectivos) y los que lo inducen (denominador) (Huang, 2014). Con este modelo se busca evaluar de múltiples superficies todas las fallas posibles, seleccionando solo aquella que produce el posible FS mínimo, considerada como la superficie crítica de la rotura (Duncan & Wright, 2005).

2.7.4. Método Morgenstern-Price: Formulación Rigurosa

El método de Morgenstern & Price (1965) Fue seleccionado para este estudio debido a que constituye uno de los enfoques de equilibrio límite más completos (Tabla 4). Este método satisface de manera simultánea las tres condiciones fundamentales de equilibrio: la suma de fuerzas horizontales ($\sum F_x = 0$), la suma de fuerzas verticales ($\sum F_y = 0$) y la suma de momentos ($\sum M = 0$) para cada dovela. Esto permite representar de manera más realista el comportamiento del macizo rocoso y obtener una estimación más confiable del factor de seguridad.

Tabla 4. Modelos rigurosos de equilibrio límite (LEM) implementado en SSAP. Modificado de (Borselli, 2024)

Grupo	Modelo de cálculo adoptado para la resolución del FS	Relación funcional que expresa T(x)
1	Spencer (1967, 1973)	$T(x) = \lambda E(x)$
1	Sarma I (1973)	$T(x) = (\lambda / FS) \{ cH(x) + [E(x) - Pw(x)] \tan \phi' \}$
2	Morgenstern & Price (1965)	$T(x) = \lambda f(x) E(x)$
2I	Chen - Morgenstern (1983)	$T(x) = [\lambda f(x) + f_0(x)] E(x)$
2	Borselli (2016)	$T(x) = \lambda [f(x) + f_1(x)] E(x)$
2	Sarma II (1979)	$T(x) = (\lambda / FS) f(x) \{ cH(x) + [E(x) - Pw(x)] \tan \phi' \}$
3	Janbu Rigurosos (1973)	$T(x) = E(x) \tan \alpha + h_r (dE(x)/dx) - h_o (dQ/dx) + 0.5 K_e H (dW/dx)$

En este enfoque, las fuerzas que actúan entre dovelas adyacentes se dividen en una componente normal lateral ($E(x)$) y otra tangencial ($T(x)$). A diferencia de otros metodos, este propone que la relación que existe entre ambas fuerzas no es constante, sino que fluctúa a lo largo del talud según una función propia ($f(x)$) (Morgenstern & Price, 1965), expresada como:

$$T(x) = \lambda \cdot f(x) \cdot E(x) \quad \text{Fórmula 9}$$

Donde se describe:

- **T(X) y E(x):** se refieren a las fuerzas normales y cortantes sobre la dovela.
- **λ :** es una escala global que se vuelve iterativa y va resolviendo para forzar la convergencia de los FS de fuerza y de momento.
- **$f(x)$:** se refiere a una función distribuida arbitrariamente (media onda, trapezoidal) que le permite al usuario definir la forma del esfuerzo cortante lateral, que varía a lo largo de la misma superficie de deslizamiento, ajustándose a las condiciones reales del terreno.

Al satisfacerse los tres criterios de equilibrio a través de los parámetros λ dan resultado a una solución más precisa y general que a las que lo ignoran.

Este método, de acuerdo con (Borselli, 2024), está incorporado al SSAP y con el se puede interactuar con el Criterio de Resistencia Generalizada de Hoek & Brown (2019) y parametrización con el Índice Geológico de Resistencia (GSI).

Algunos de los criterios que se tomaron para el análisis por equilibrio límite fueron:

- Considerar el comportamiento frágil de ignimbritas fracturadas utilizando parámetros derivados del GSI y del UCS.
- Utilizamos cuatro diferentes tipos de condiciones que fueron simuladas; estos escenarios fueron condición estática seca, dinámica seca, estática saturada y *filled tension crack*.
- Con el componente dinámico utilizamos una aceleración horizontal de $k_h = 0.100$, esto con el fin de buscar un punto de quiebre.
- Para simular la variación de los esfuerzos, se utilizó una función de distribución semisinusoidal o trapezoidal.

Morgenstern-Price constituye la base conceptual y computacional para el análisis de estabilidad realizado.

2.8. Representación cartográfica de factores de seguridad

Se utilizó el programa complementario CSSAP, desarrollado por Borselli (2023), para integrar los datos de SSAP y generar una representación espacial continua del factor de seguridad (FS) en los márgenes de la presa de San José.

El CSSAP permite procesar conjuntamente los resultados individuales obtenidos en SSAP para cada perfil, automatizando el cálculo y la visualización de los valores de FS a lo largo de múltiples secciones (Mevoli et al., 2026).

El procedimiento general:

1. Preparación de archivos de entrada (.par): Cada simulación realizada en SSAP genera un archivo de salida con extensión *.par, que contiene los parámetros del análisis, las coordenadas del perfil y el factor de seguridad obtenido. Estos

- archivos fueron previamente verificados y ajustados para garantizar la correspondencia entre los nombres de los perfiles y sus ubicaciones geográficas.
2. Carga en CSSAP y procesamiento conjunto: Los archivos *.par fueron importados al programa CSSAP, donde se agruparon por condición de análisis (estática, saturada, dinámica, *filled tension crack*). Una vez cargados, el programa ejecuta un proceso automatizado que calcula y consolida los valores de FS en todos los puntos de cada perfil, generando una base de datos con coordenadas X, Y, Z y su correspondiente FS.
 3. Exportación e integración en SIG: Los resultados numéricos fueron exportados en formato *.csv o *.txt y posteriormente importados al entorno ArcGIS 10.8. En el SIG se realizó la interpolación espacial mediante el método Natural Neighbor, que permite estimar valores intermedios de FS entre los puntos calculados, garantizando una distribución continua de la estabilidad en la superficie de análisis (Watson, 1992).
 4. Generación del mapa de Factor de Seguridad: Finalmente, se generaron mapas temáticos del factor de seguridad interpolado, a los cuales se asignó una simbología continua en escala de colores, clasificando los valores según su nivel de estabilidad. Las zonas con $FS \leq 1.1$ fueron identificadas como de alta susceptibilidad, mientras que aquellas con $FS > 1.3$ se consideraron estables.

2.9. Integración de resultados esperados y representación cartográfica

La información que se generó en cada fase de la metodología fue integrada en una etapa final con el objetivo de obtener productos que permitieron interpretar de forma clara el comportamiento de los taludes en los márgenes de la Presa de San José. Los parámetros geomecánicos estimados, los perfiles seleccionados y los resultados del modelado numérico se organizaron en tablas comparativas que facilitaron la identificación de patrones entre litología, geometría y valores de factor de seguridad.

Asimismo, mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), se elaboraron mapas temáticos que permiten la visualización de la distribución espacial de los sectores analizados, la ubicación de los perfiles evaluados y las zonas en las que los factores de seguridad que muestran valores relativamente bajos. La superposición de los resultados numéricos sobre el modelo digital de elevación permite visualizar de manera integrada la relación entre topografía, características del macizo rocoso y estabilidad.

Estos productos mapas, perfiles, tablas y modelos constituyen la base para la interpretación final que se desarrolla en los capítulos posteriores, al proporcionar una síntesis visual y analítica del comportamiento de los taludes estudiados.

3. Resultados del modelado de estabilidad de laderas de la Presa de San José

Los resultados que fueron obtenidos se organizaron siguiendo la secuencia establecida en la metodología. Cada conjunto de resultados correspondió directamente a una fase dentro del estudio, asegurando coherencia entre los procedimientos ejecutados y la información generada.

En este capítulo se muestran los valores registrados en campo, los parámetros geomecánicos estimados, los productos cartográficos y los factores de seguridad calculados para los perfiles seleccionados. Las figuras, tablas y mapas incluidos sintetizan los principales hallazgos estos permitieron visualizar la relación entre la geometría de los taludes, las características del macizo rocoso y el comportamiento estimado de estabilidad.

3.1. Resultados del trabajo de campo

Durante el trabajo de campo se realizaron mediciones con el martillo de Schmidt, ensayos Leeb y registros estructurales en ambas márgenes de la Presa de San José. Se efectuaron alrededor de 100 mediciones por margen, además de 100 en la zona de brecha y entre 15 y 20 en cinco estaciones complementarias de la margen izquierda. Las mediciones Leeb sumaron entre 25 y 50 valores en tres puntos de control. Los valores de rebote mostraron una variabilidad significativa entre sectores. En la margen derecha se registraron valores entre 15 y 56, mientras que en la margen izquierda oscilaron entre 10 y 62. En las estaciones donde se aplicó el ensayo Leeb, los resultados variaron entre 80 y 486 HL (Hardness Leeb), evidenciando contrastes en la competencia mecánica del macizo rocoso (Figura 26).

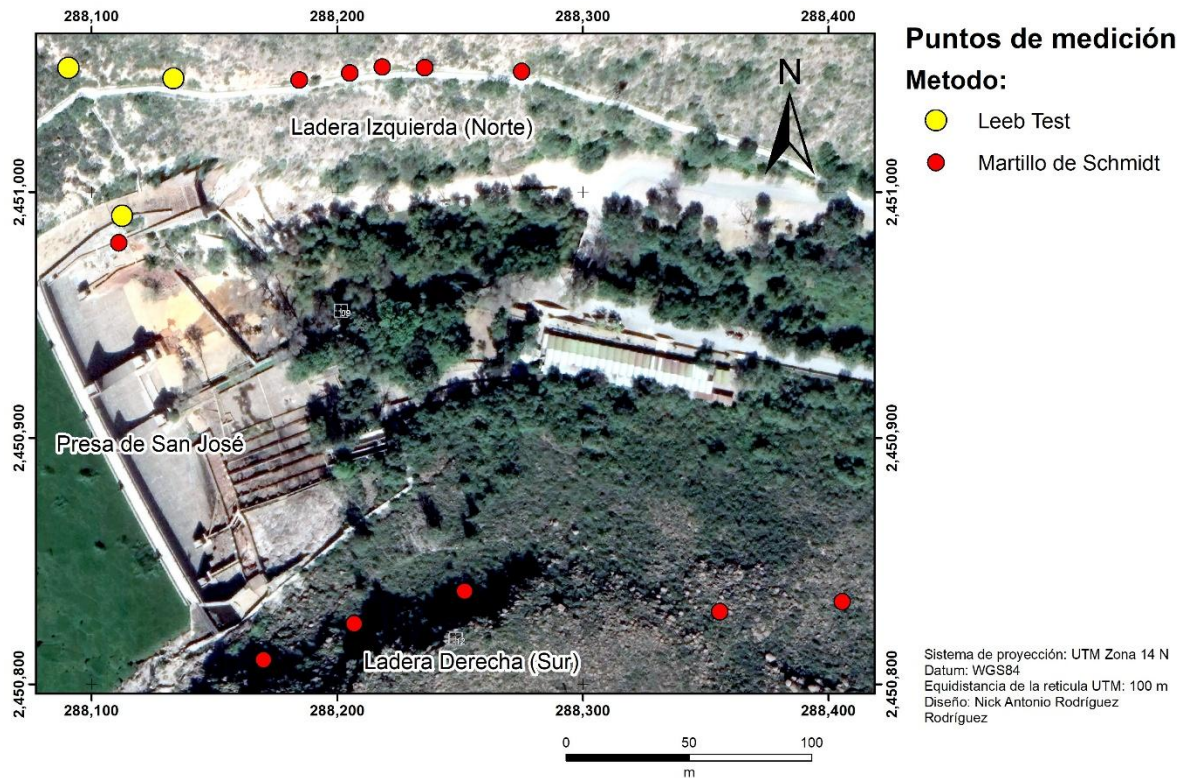


Figura 26. Ubicación de los puntos de medición con el martillo de Schmidt y el test de Leeb.

El levantamiento incluyó 7 estaciones estructurales, en las que se identificaron fracturas de enfriamiento, variaciones en el fracturamiento y contrastes litológicos entre sectores (Figura 27).

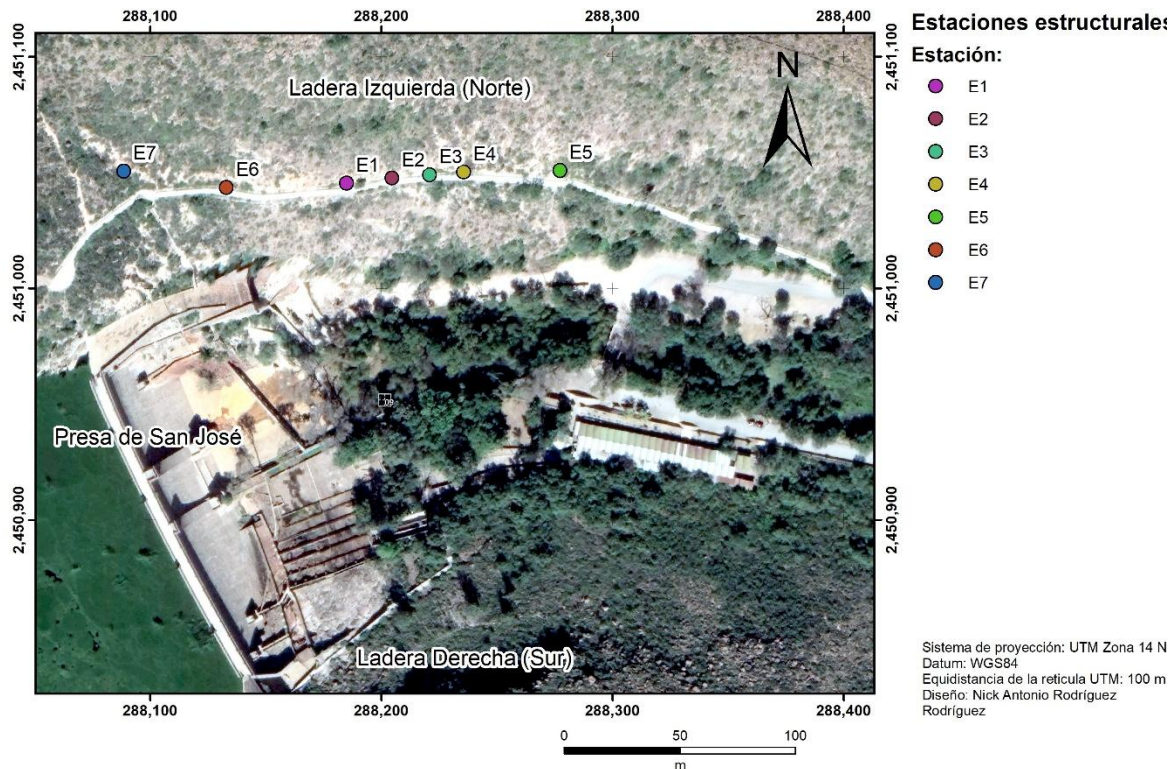


Figura 27. Estaciones estructurales ubicadas dentro de la ladera izquierda.

En el margen derecho se observó un macizo más homogéneo en su recorrido, con bloques sueltos en la zona alta y un fracturamiento más marcado en las inmediaciones de la cortina. En el margen izquierdo se registraron ignimbritas con distintos grados de erosión, depósitos sueltos y una mayor heterogeneidad del macizo rocoso (Figura 28).

Asimismo, se identificaron dos socavones superficiales a lo largo del empedrado del vertedero, asociados al cruce de discontinuidades estructurales y a procesos de erosión hídrica concentrada (Figura 29). El primero corresponde a un socavón de mayor desarrollo, con dimensiones aproximadas de 1.7–2.1 m de largo, 0.9–1.1 m de ancho y una profundidad estimada de 0.7–0.9 m. Posteriormente, se reconoció un segundo socavón de menor tamaño, con dimensiones del orden de 1.2–1.4 m de largo, 0.6–0.8 m de ancho y una profundidad aproximada de 0.25–0.40 m, asociado a una pérdida localizada de material fino bajo el empedrado.

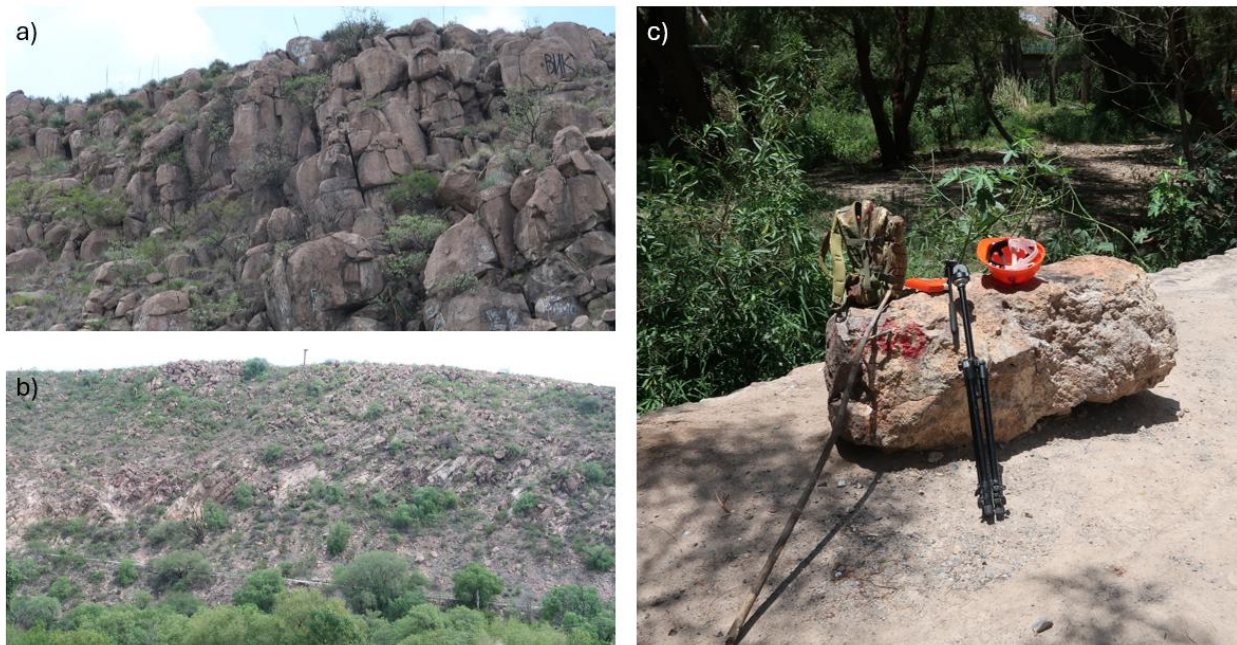


Figura 28. Macizo rocoso del margen derecho

a) Vista general, donde se observan bloques fracturados y discontinuidades características de las ignimbritas de la zona. b) Macizo rocoso del margen izquierdo, con fracturamiento heterogéneo y variaciones en la vegetación, asociadas a zonas de mayor meteorización. c) Bloque caído en la zona baja de la presa.



Figura 29. Socavones identificados en el vertedero de la margen izquierda

a) socavón de mayor desarrollo, con evidencia de subexcavación y colapso progresivo del recubrimiento; b) socavón de menor tamaño, asociado a una pérdida localizada de material fino por erosión hídrica. La mochila se muestra como referencia de escala.

3.2 Resultados del modelado de caída de rocas

Las simulaciones realizadas para bloques representativos de hasta 10 Mg indican que los desprendimientos potenciales desde los escarpes superiores pueden alcanzar velocidades máximas del orden de 25–27 m/s (≈ 90 –97 km/h), dependiendo de la geometría local y del tipo de superficie interceptada. Las energías de impacto estimadas alcanzan valores cercanos a 5000 kJ, particularmente en superficies de sustrato rocoso, donde se registraron máximos de hasta 5277 kJ. (Figura 30).

En los escenarios modelados, los bloques de mayor volumen (10 Mg) presentaron alcances horizontales superiores a 150 m, interceptando sectores ubicados en la parte baja de las laderas. La altura máxima de rebote alcanzó valores de hasta 16 m en algunos casos, mostrando variabilidad en función del tipo de superficie.

La altura máxima de rebote (HMAX) varió según la superficie interceptada, alcanzando valores de hasta 16.27 m en zonas con vegetación y aproximadamente 12–13 m en superficies asfaltadas y de sustrato.

Las superficies asfaltadas y de sustrato favorecieron mayores distancias de propagación, mientras que las zonas húmedas presentaron una reducción significativa de energía (≈ 1900 kJ como valor máximo registrado) (Figura 31) (Tabla 5).

Tabla 5. Resultados máximos de altura de rebote, velocidad y energía derivados de la simulación de caída de bloques, diferenciando entre todas las trayectorias modeladas y aquellas que registraron impacto.

Superficie	n° tra	H _{max} (m)	V _{tr max} (m/s)	E _{tr max} (kJ)	n° col	V _{tr max} (m/s)	E _{tr max} (kJ)	n° fer
Asfalto	1216	12.77	27.08	4173.03	1021	27.08	3968.88	639
Sustrato	13200	12.02	25.98	5277.05	13200	25.98	5277.05	9832
Vegetacion	553	16.28	26.02	4580.64	538	26.02	4580.64	493
Zona humeda	41	6.31	16.9	1902.25	41	16.9	1902.25	41

La distribución estadística de trayectorias permitió delimitar el perímetro de alcance máximo en la zona aguas abajo de la presa, integrando trayectorias, puntos de impacto y zonas de detención. Este perímetro abarca sectores de tránsito peatonal, áreas recreativas y espacios de estacionamiento (Figura 32).

Adicionalmente, se documentó un evento real ocurrido entre el 2 y 3 de junio de 2025, posterior a un episodio de lluvia intensa, en el cual un bloque con volumen aproximado de 0.22 m^3 ($\approx 600 \text{ kg}$) se desprendió desde un sector superior y recorrió una trayectoria descendente hasta zonas inferiores, dejando evidencia clara de impacto y desplazamiento (Figura 33). Este evento constituye un referente empírico que respalda la ocurrencia del fenómeno identificado en el análisis cinemático.

En conjunto, los resultados indican que, aun cuando el análisis de estabilidad global muestre condiciones aceptables en ciertos perfiles, existen sectores específicos donde la caída de bloques representa un proceso activo y potencialmente peligroso.

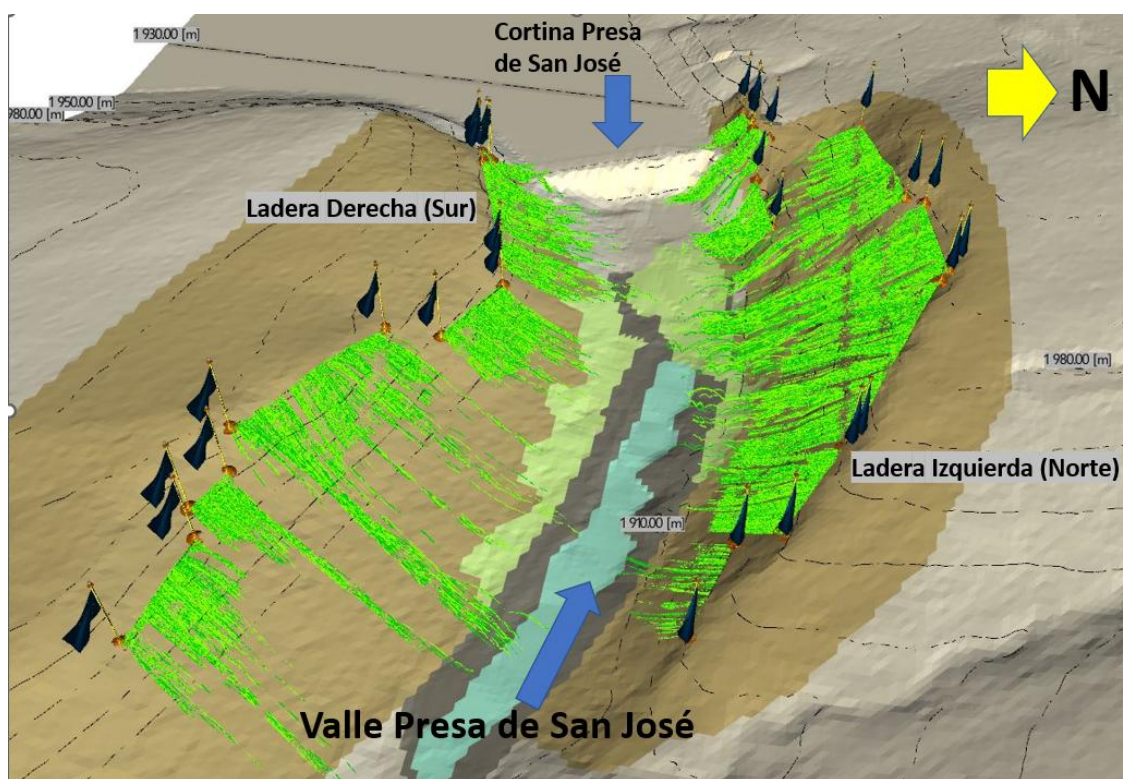


Figura 30. Imagen 3D de simulacro de caída de bloques de 10 Ton de puntos de alto Peligro de caída Bloques.

Resultados obtenidos con software especializado usado en las Alpes en Italia para evaluación de posible alcance y energía de caída de bloques de tamaño predefinido de proyecto de $2,5 \text{ m}^3$. Las trazas en verde corresponden a alcance probable de los bloques y evidencia de las áreas interesadas. Tomado de Borselli & Rodríguez Rodríguez (2026)

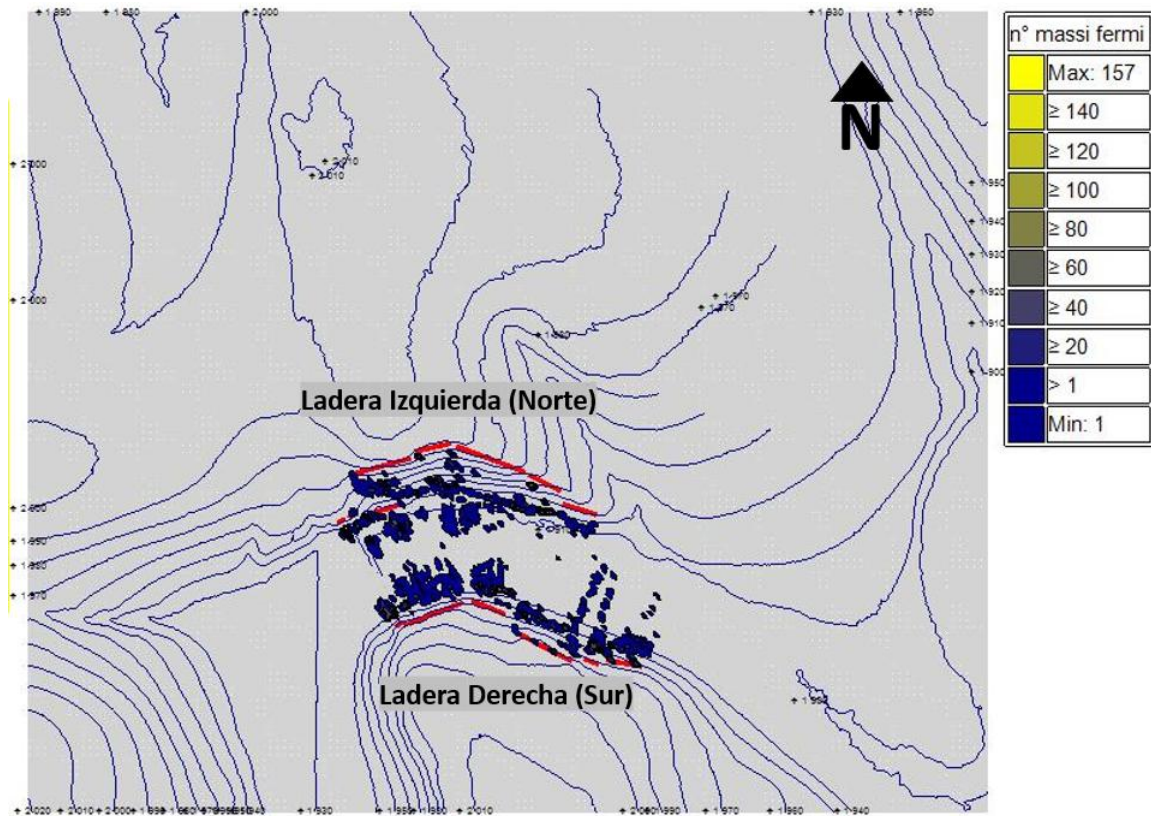


Figura 31. Distribución espacial del número de bloques detenidos (n° massi fermi) obtenidos a partir de la simulación de caída de bloques.

La escala cromática representa la frecuencia de detención acumulada por celda del modelo digital del terreno (mínimo = 1; máximo = 157). Las líneas rojas delimitan el perímetro de alcance máximo de las trayectorias simuladas, identificando las zonas con mayor concentración de impactos potenciales en la parte baja de la ladera. Tomado de (Borselli & Rodríguez Rodríguez, 2026)



Figura 32. Ubicación de los perímetros de la zona de peligro por caída de bloques, basado en el programa IS GeoMassi.



Figura 33. Evidencia del bloque caído en la ladera izquierda registrada durante la visita de campo del 3 de junio de 2025.

a) Fragmentos y esquirlas generadas por el impacto del bloque. b) Trayectoria de caída observable de manera tenue sobre el concreto, con el bloque detenido al fondo. c) Vista del bloque caído en su posición final.

Asimismo, se elaboró un mapa en el que se identifican los puntos de caída de bloques, las zonas de acumulación asociadas a la presencia de vegetación y las áreas donde se localizan los socavones, con el objetivo de reconocer espacialmente los procesos de inestabilidad y erosión presentes (Figura 34).

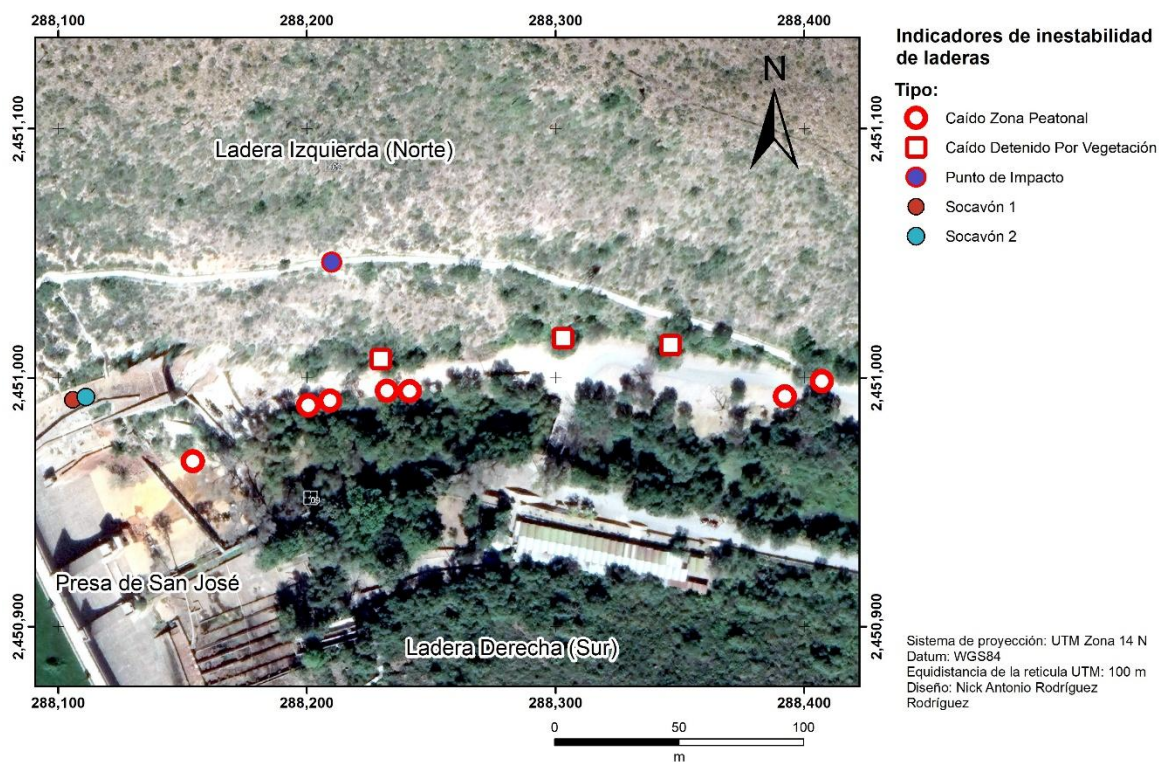


Figura 34. Mapa de localización de indicadores de inestabilidad de laderas en el vertedero de la Presa de San José

3.3. Resultados de la contextualización geomorfológica de la zona de estudio

Se identificaron diferencias geomorfológicas entre ambas laderas. Estas diferencias sirvieron de base para la selección de perfiles e integración de los resultados del análisis SIG presentados en el siguiente apartado.

3.4. Ladera derecha (zona sur)

3.4.1 Perfiles de ladera derecha

La generación de perfiles a partir del DEM permitió definir **13 secciones** en la ladera derecha, abarcando los sectores con mayores variaciones geométricas y aquellos de mayor relevancia para el análisis de estabilidad (Figura 35). Cada perfil quedó asociado a un par de puntos de control que garantizó su correcta orientación espacial.

Mediante la interpolación del DEM se asignó a cada perfil un conjunto ordenado de coordenadas **X, Y y Z**, obteniéndose una representación continua de la geometría del talud. Estas coordenadas fueron exportadas para su conversión al formato requerido para el modelado numérico (Tabla 6).

Los perfiles cubren zonas con pendientes elevadas, fracturación visible y áreas con tránsito de personas o vehículos, incluyendo tanto la parte baja como la parte alta del margen. La Figura 36 muestra solo los perfiles generados a partir del DEM para la ladera derecha.

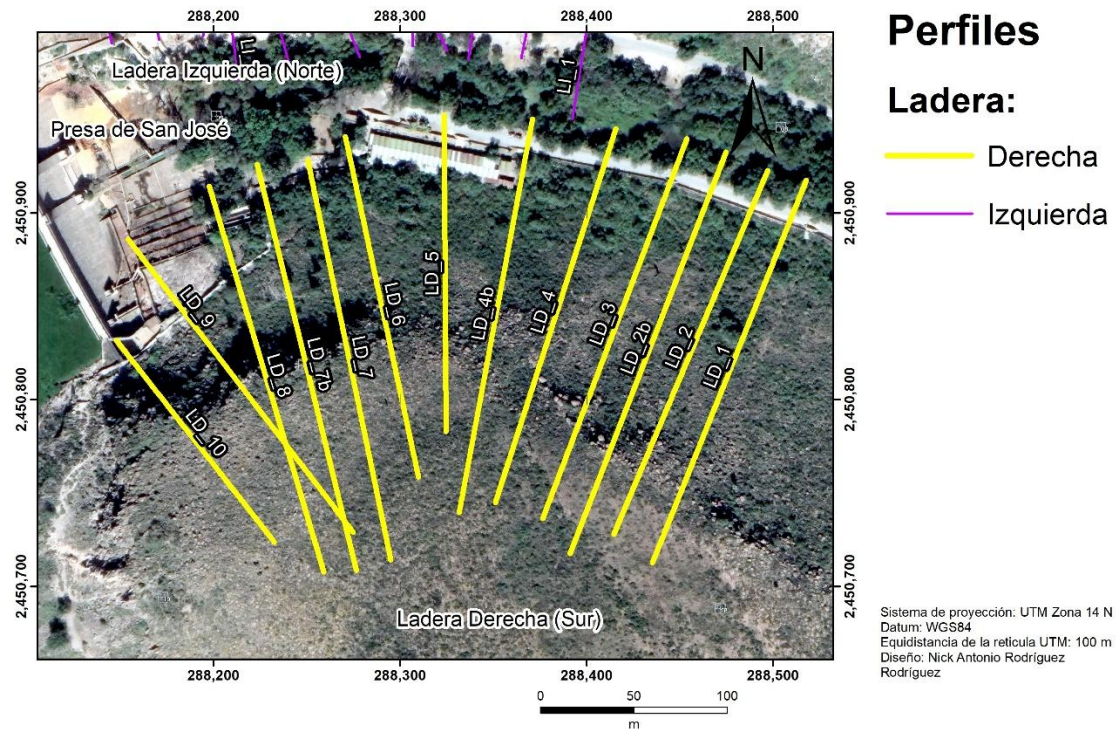


Figura 35. Ubicación de los perfiles topográficos en la ladera derecha.

Se observan los puntos de inicio y fin obtenidos mediante mediciones de campo.

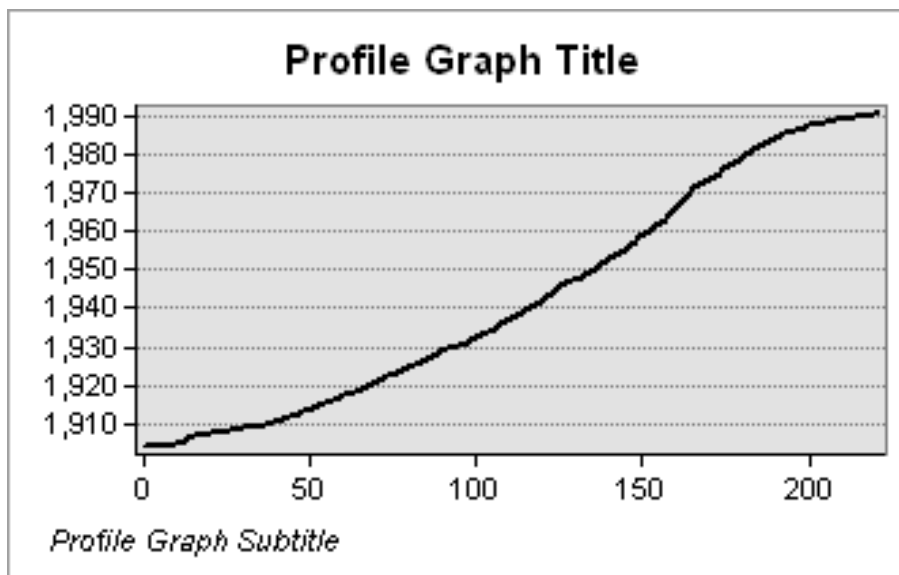


Figura 36. Perfil interpolado del LD_1 de la ladera derecha generado con el DEM de 1.5 m.

El eje X corresponde a la distancia horizontal acumulada a lo largo del perfil (m), mientras que el eje Y representa la elevación del terreno (m s.n.m.).

Tabla 6. Valores de interpolación para la ladera derecha obtenidos a partir de los perfiles.

FID	Name	ORIG_FID	Tipo	Punto_X	Punto_Y	Punto_Z
0	LD_1	0	I	288517.7747	2450917.443	1904.08
1	LD_1	0	F	288435.2246	2450712.655	1990.88
2	LD_2	1	I	288497.1155	2450922.729	1905.23
3	LD_2	1	F	288414.5654	2450727.995	1988.53
4	LD_3	2	I	288453.7238	2450939.663	1904.57
5	LD_3	2	F	288376.4653	2450736.462	1986.04
6	LD_4	3	I	288415.6237	2450944.954	1904.22
7	LD_4	3	F	288351.0652	2450744.929	1986.54
8	LD_5	4	I	288323.5485	2450952.363	1906.83
9	LD_5	4	F	288324.6068	2450783.029	1975.96
10	LD_6	5	I	288270.6317	2450940.721	1908.39
11	LD_6	5	F	288309.7902	2450758.687	1985.36
12	LD_7	6	I	288250.5234	2450928.021	1910.26
13	LD_7	6	F	288294.9735	2450714.237	1997.72
14	LD_8	7	I	288197.6066	2450914.262	1910.27
15	LD_8	7	F	288258.9901	2450707.887	2000.71
16	LD_9	8	I	288154.2148	2450885.687	1910.45
17	LD_9	8	F	288274.8651	2450729.054	1995.47
18	LD_10	9	I	288147.8648	2450831.712	1935.17
19	LD_10	9	F	288232.5317	2450723.762	1998.66
64	LD_2b	32	I	288474.7579	2450932.521	1904.37
65	LD_2b	33	F	288391.1494	2450717.679	1990.42
66	LD_4b	34	I	288370.9616	2450950.019	1905.56
67	LD_4b	35	F	288331.6709	2450739.675	1990.08
68	LD_7b	36	I	288223.3238	2450925.809	1909.99
69	LD_7b	37	F	288276.5052	2450708.718	1999.77

3.4.2. Resultados de procesamiento en gabinete

El procesamiento de los datos correspondientes a la ladera derecha se realizó a partir de las mediciones del martillo de Schmidt, organizadas en gráficas de distribución y *boxplots*. En la Figura 37 se presenta la distribución lognormal correspondiente a este margen, junto con los resultados obtenidos en la ladera izquierda de interés que se describen más adelante en este capítulo. El ajuste lognormal aplicado a los valores de rebote, la resistencia a compresión uniaxial (UCS) se estimó en un rango aproximado de 10 a 75 MPa, con una media geométrica cercana a 25 MPa ($\mu = 3.211$; $\sigma = 0.517$), según se observa en la distribución generada en *Origin*. Los valores resumidos de las mediciones del martillo de Schmidt para la ladera derecha se presentan en la Tabla 7.

La asignación del índice GSI se basó en la condición estructural observada en campo y en la presencia de fracturamiento moderado. En la parte alta se consideraron valores cercanos a 40, mientras que en la parte baja, donde el macizo mostró menor deterioro superficial, se asignaron valores próximos a 60.

A partir del GSI, la UCS estimada y los criterios del programa SSAP, se definieron los parámetros geomecánicos empleados para representar la ladera derecha. En el modelo se utilizaron una cohesión equivalente de $c = 8$ kPa, un ángulo de fricción interna de $\phi = 42^\circ$, una densidad aparente de $\gamma = 23$ kN/m³ y una densidad saturada de $\gamma_{sat} = 24$ kN/m³, valores consistentes con el comportamiento esperado de ignimbritas densamente soldadas. El parámetro mi se fijó en 20, mientras que el factor de perturbación $D = 1$ se asignó a los estratos con discontinuidades orientadas, según la configuración interna del software.

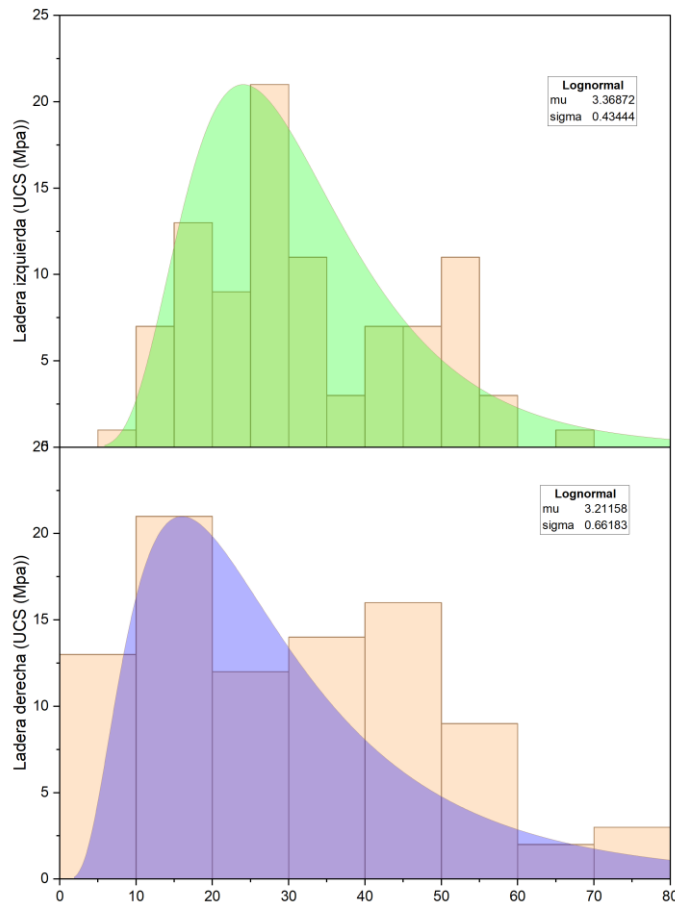


Figura 37. Distribución log normal del martillo de Schmidt, comparación entre zonas de interés del sitio.

Tabla 7. Valores obtenidos con el martillo de Schmidt para la ladera derecha, haciendo una comparación directa con la ladera izquierda.

Sector/Estación	N total	Min	Max	P5	P50 (Mediana)	P95	μ (lognormal)	σ (lognormal)
Ladera derecha	90	8.11	78.3	8.57	28.94	62.76	3.2116	0.6618
Ladera izquierda	94	9.57	66.33	14.1	28.94	53.17	3.3687	0.4344

3.4.3. Resultados de adecuación de datos para incorporar a modelado numérico

Las observaciones de campo en la ladera derecha evidencian un macizo rocoso intensamente fracturado, con presencia de bloques de gran tamaño parcialmente descalzados y discontinuidades abiertas, lo que indica un estado avanzado de degradación del macizo (Figura 38).

Los distintos grados de fracturamiento reconocidos en campo se reflejan en los valores empleados para la caracterización geomecánica y el cálculo numérico, los cuales se resumen en la Tabla 8, utilizada como base para los análisis realizados en SSAP.

Tabla 8. Valores estimados del índice de resistencia del macizo rocoso (GSI), ladera derecha.

Distribución de los valores de GSI estimados en campo para la ladera derecha de la Presa de San José.

Estación / Sector	Ladera	Litología	Descripción del macizo	GSI estimado
Zona vertedero	Derecha	Ignimbrita	Macizo moderadamente fracturado, bloques medianos	40-45
Zona comedor	Derecha	Ignimbrita	Macizo moderadamente fracturado, bloques medianos	40-45



Figura 38. Sectores representativos de la ladera derecha de la Presa de San José.

a) Punto alineado sobre la zona de comedor. b) Alineado completamente con el vertedero derecho.

3.4.4. Resultados del modelado numérico con el software SSAP

El modelado numérico realizado en SSAP permitió obtener el factor de seguridad (FS) para cada uno de los perfiles definidos en ambas laderas, bajo los cuatro escenarios evaluados: estático, dinámico, saturado y con grieta rellena (FTC). Los resultados muestran variaciones entre perfiles.

En la ladera derecha, la mayoría de los perfiles presentó valores de $FS \geq 1.3$ en condición estática. Sin embargo, bajo escenarios más demandantes (dinámico, saturado y FTC), particularmente en condiciones de saturación, donde algunos descensos fueron marcados (Figura 39 – 41, más perfiles fueron agregados en la parte de Anexos B).

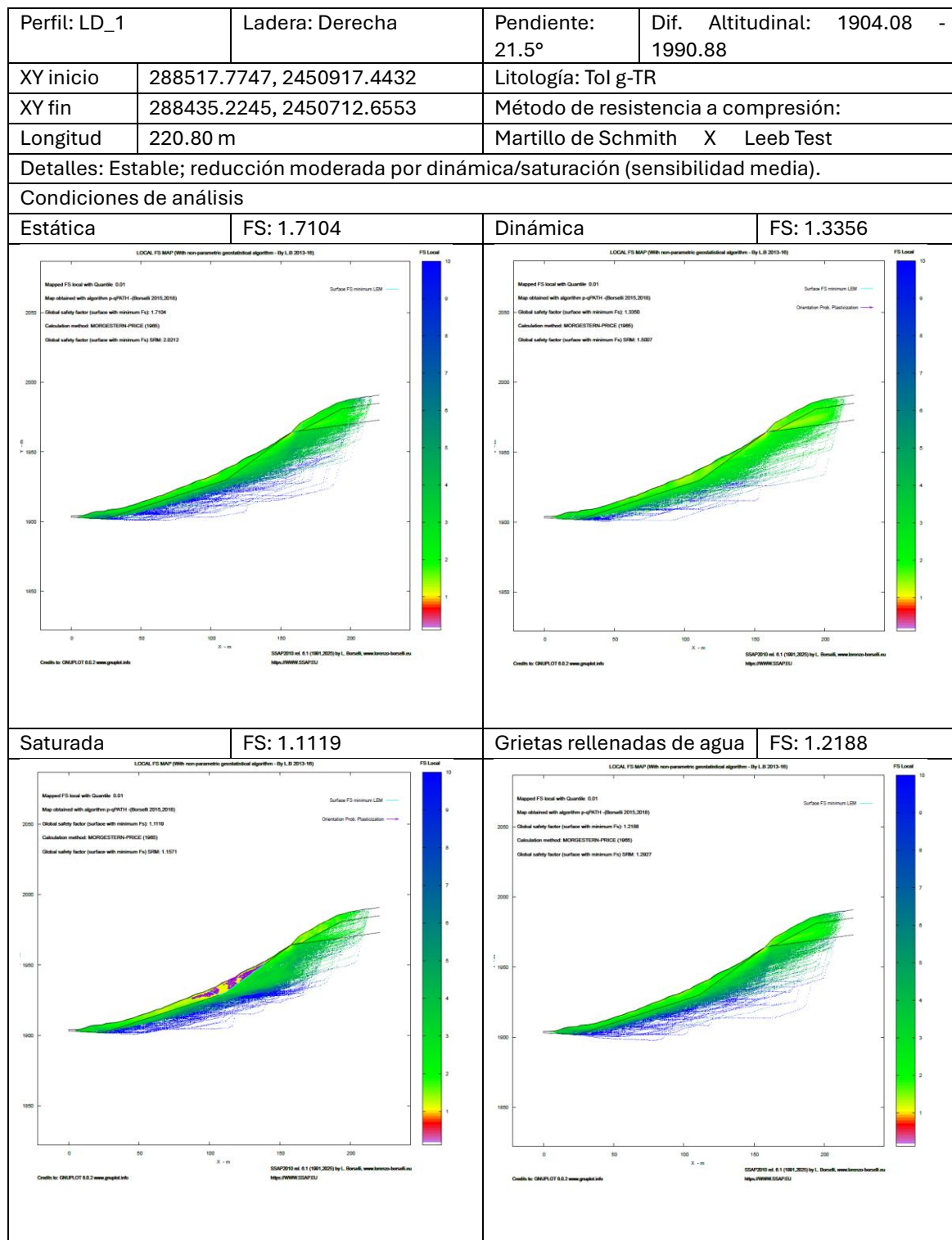


Figura 39. Perfil LD_1 representativo de la ladera derecha y escenarios de análisis considerados.

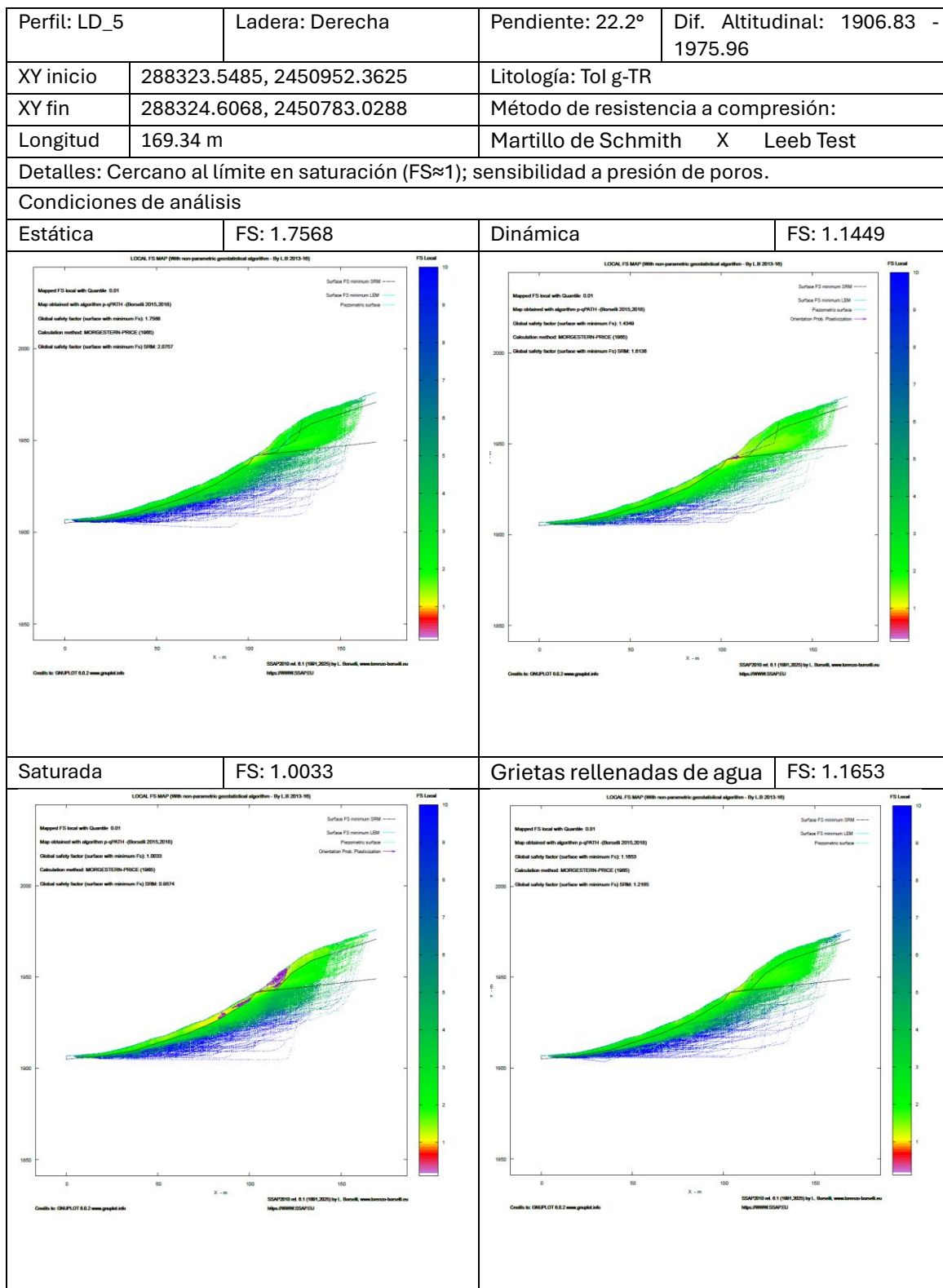


Figura 40. Perfil LD_5 representativo de la ladera derecha y escenarios de análisis considerados

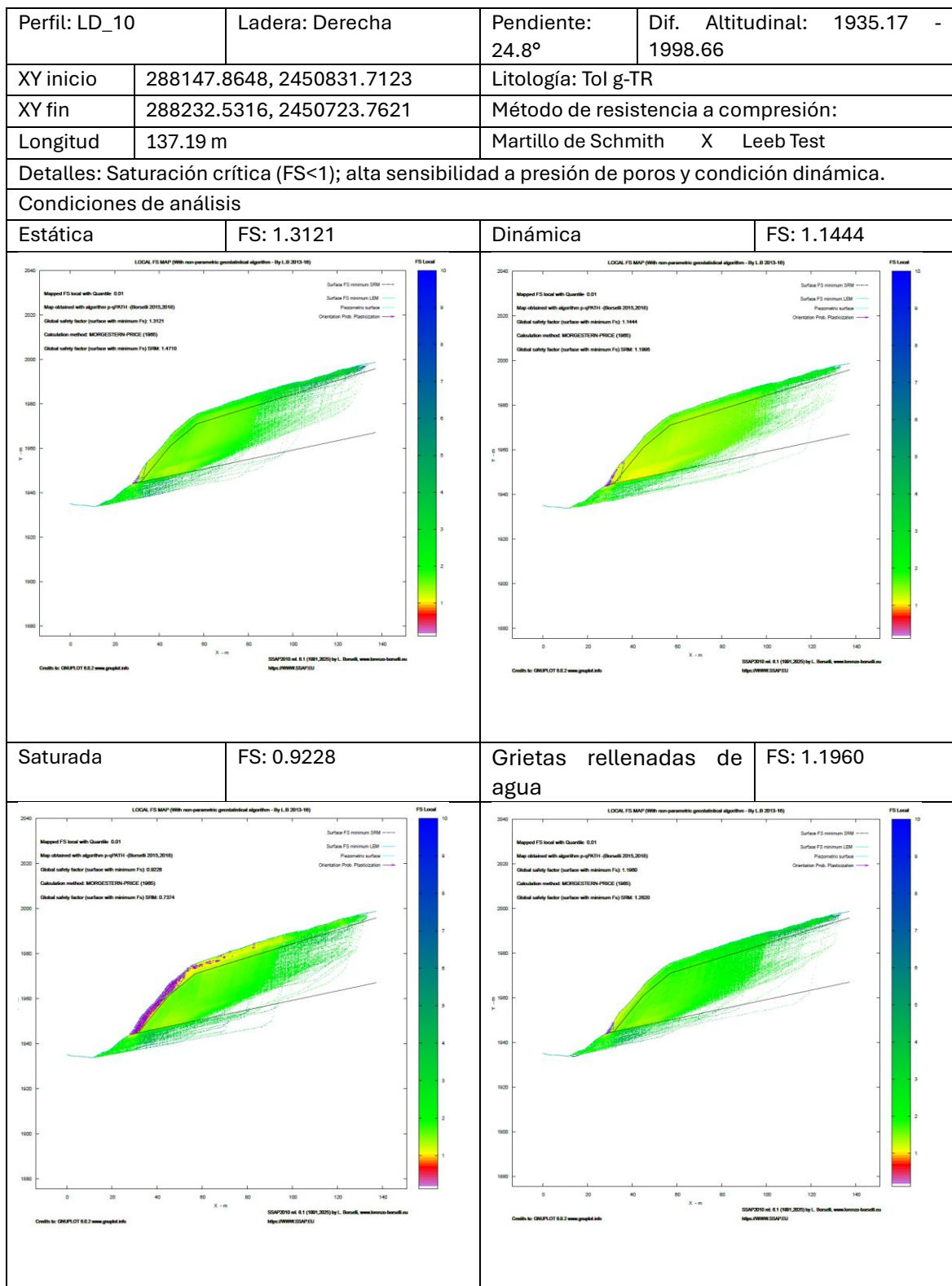


Figura 41. Perfil LD_10 representativo de la ladera derecha y escenarios de análisis considerados.

3.4.5. Resultados de representación cartográfica de factores de seguridad

Los archivos *.par generados en SSAP fueron procesados en CSSAP para consolidar los valores de FS obtenidos en cada perfil y escenario de análisis. Estos datos fueron luego integrados en ArcGIS, donde se aplicó la interpolación Natural Neighbor para generar superficies continuas que representaran la distribución espacial del FS en ambas laderas (Figura 42 -Figura 45).

Los mapas resultantes mostraron un comportamiento contrastante entre los márgenes de la presa. La ladera derecha presentó valores predominantemente superiores a $FS > 1.3$ en los escenarios estático y dinámico, reflejando una mayor homogeneidad y menor fracturación (Tabla 9). En cambio, la ladera izquierda concentró los valores más bajos, con zonas continuas de $FS \leq 1.1$, particularmente en sectores de mayor pendiente y fracturación.

Las condiciones saturadas y de grietas rellenas incrementaron las áreas inestables en ambas laderas, siendo más notorias en el margen izquierdo. La cartografía obtenida permitió visualizar de manera integral las zonas críticas y reforzó la interpretación del comportamiento mecánico derivado del modelado numérico.

Tabla 9. Resume los factores de seguridad calculados para cada sección modelada, bajo condiciones estáticas, dinámicas, saturadas y de falla por FTC. Margen derecho (LD).

Nombre	FS Estático	FS Dinámico	FS Saturado	FS FTC
LD_1	1.7104	1.335	1.1119	1.2188
LD_2	1.6503	1.3365	1.043	1.4096
LD_3	1.772	1.4251	1.0547	1.5298
LD_4	2.026	1.5401	1.0804	1.6269
LD_5	1.7568	1.4349	1.0033	1.1653
LD_6	1.5947	1.2887	0.8705	1.2615
LD_7	1.4245	1.1332	0.8473	1.0891
LD_8	1.297	1.0929	0.4633	1.0618
LD_9	1.586	1.2321	0.8056	0.7888
LD_10	1.3121	1.444	0.9228	1.196
LD_2b	1.3385	1.1714	0.8946	1.0086
LD_4b	1.7957	1.4437	1.1712	1.8025
LD_7b	1.7196	1.3874	1.0097	1.4034

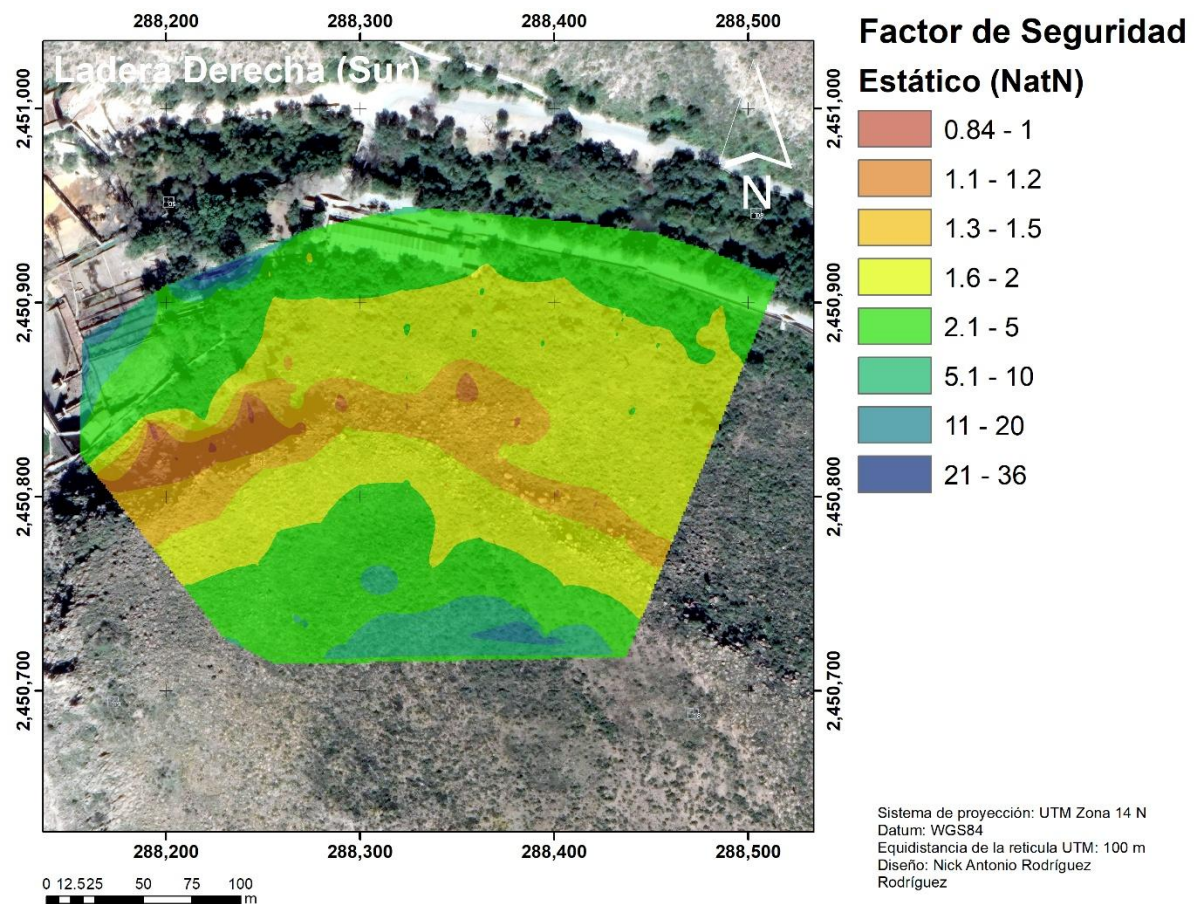


Figura 42. Mapa del factor de seguridad (FS) en condición estática para los márgenes derecho.

Se muestran las secciones analizadas mediante equilibrio límite, donde los valores de FS representan la estabilidad relativa del talud bajo condiciones de carga estáticas. Las zonas con FS menor indican sectores con menor margen de seguridad estructural.

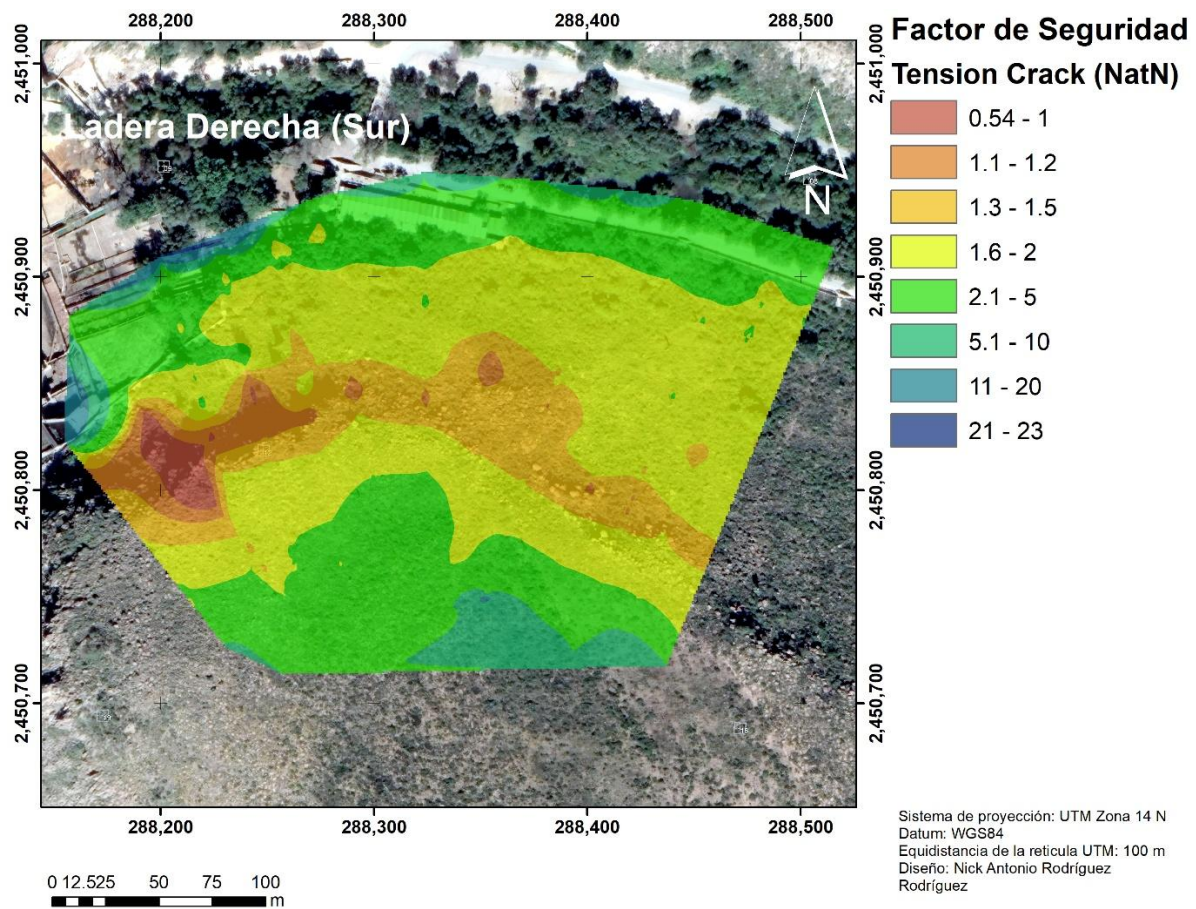


Figura 43. Mapa del factor de seguridad (FS) para el escenario FTC, correspondiente a la condición de carga adicional modelada para la presa.

Se identifican las zonas donde el FS disminuye frente a este tipo de solicitación, permitiendo delimitar sectores con mayor susceptibilidad a pérdida de estabilidad.

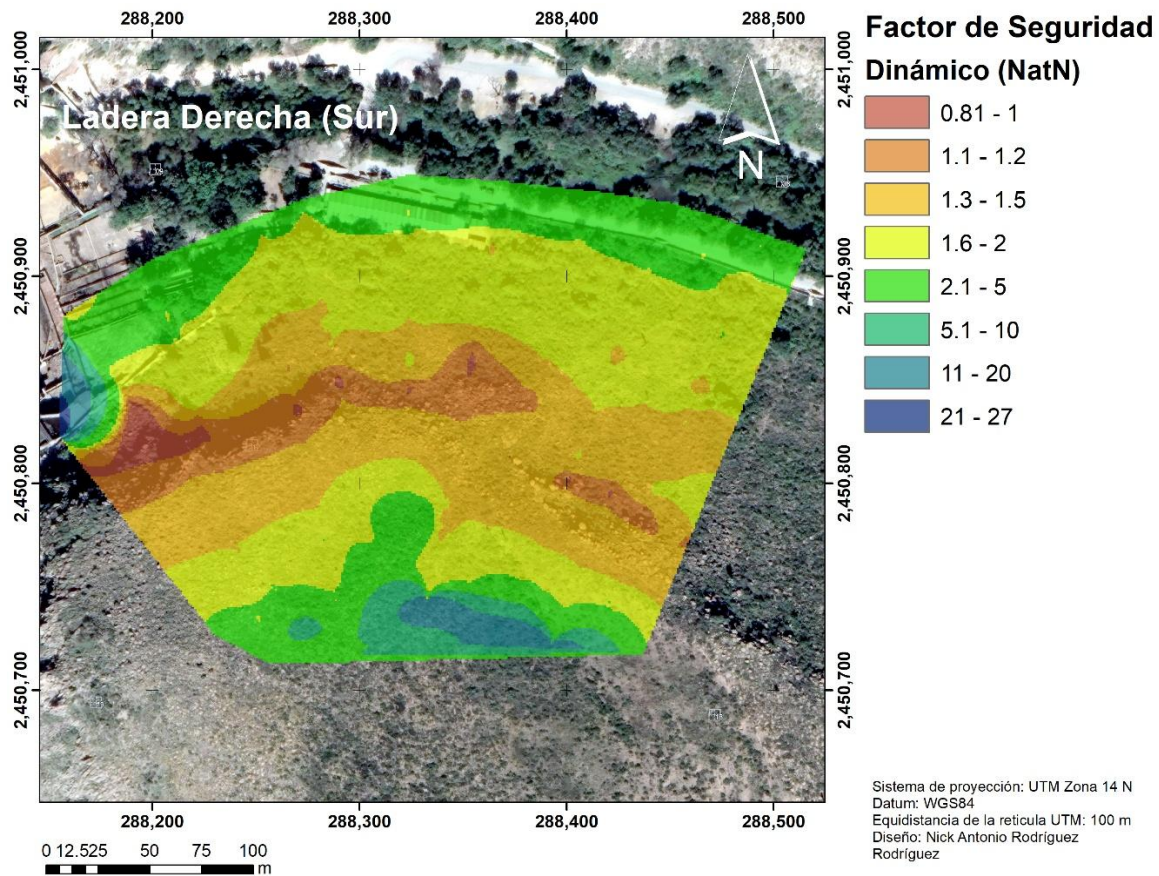


Figura 44. Mapa del factor de seguridad (FS) bajo condición dinámica, considerando la acción sísmica especificada para la zona.

El mapa muestra la disminución del FS en comparación con el escenario estático, lo que evidencia los sectores del talud más sensibles a la aceleración horizontal.

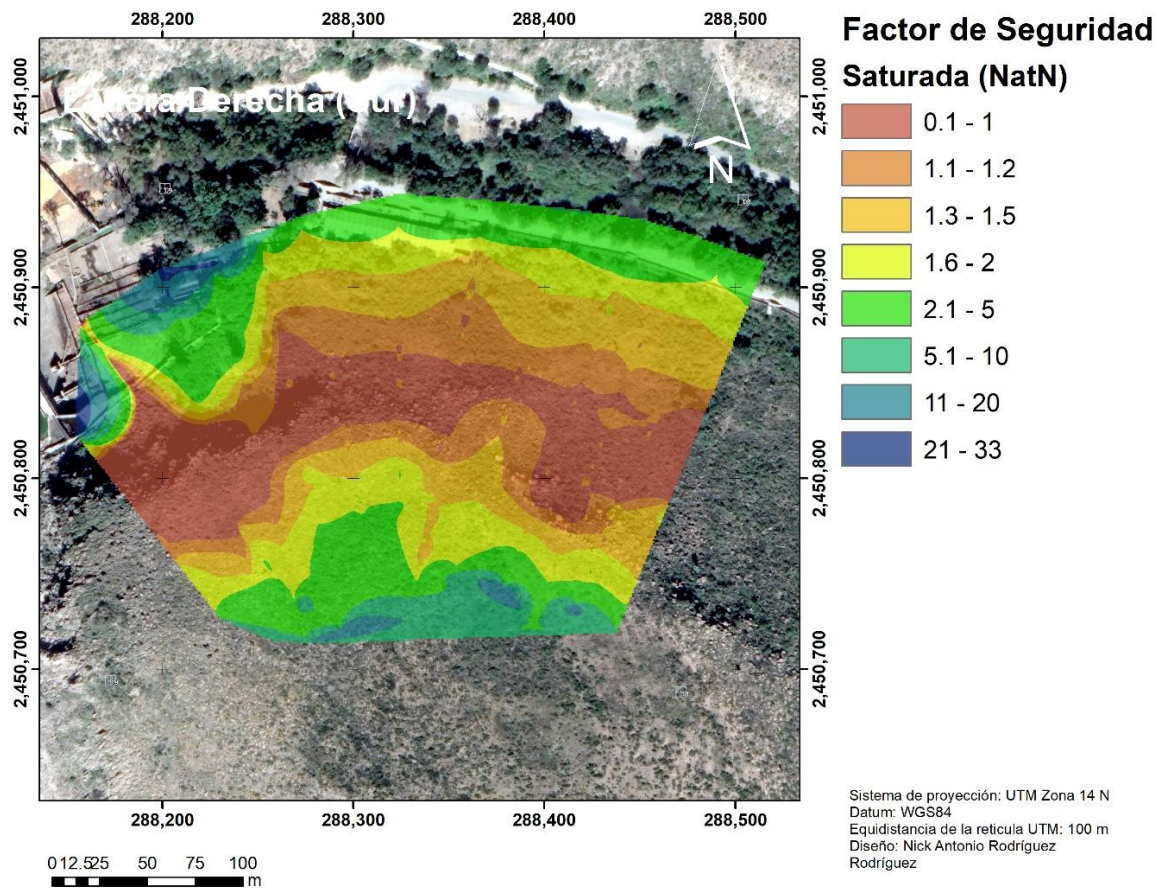


Figura 45. Mapa del factor de seguridad (FS) para el escenario saturado, asociado al incremento de presión de poros dentro del macizo rocoso.

Se observan reducciones de estabilidad en los sectores donde la saturación afecta de manera más significativa la resistencia al corte del material.

3.5. Ladera izquierda (zona norte)

3.5.1. Perfiles de ladera izquierda

En la ladera izquierda se definieron 16 perfiles a partir del DEM, los cuales fueron posteriormente ajustados y complementados mediante el uso del perfilómetro, alcanzando un total de 21 secciones (Figura 46).

La información geométrica obtenida fue procesada de manera análoga a la ladera derecha, permitiendo representar la geometría del talud y preparar los datos para su incorporación en el modelado numérico correspondiente (Tabla 10). La Figura 47 presenta la distribución final de los perfiles generados para este margen.

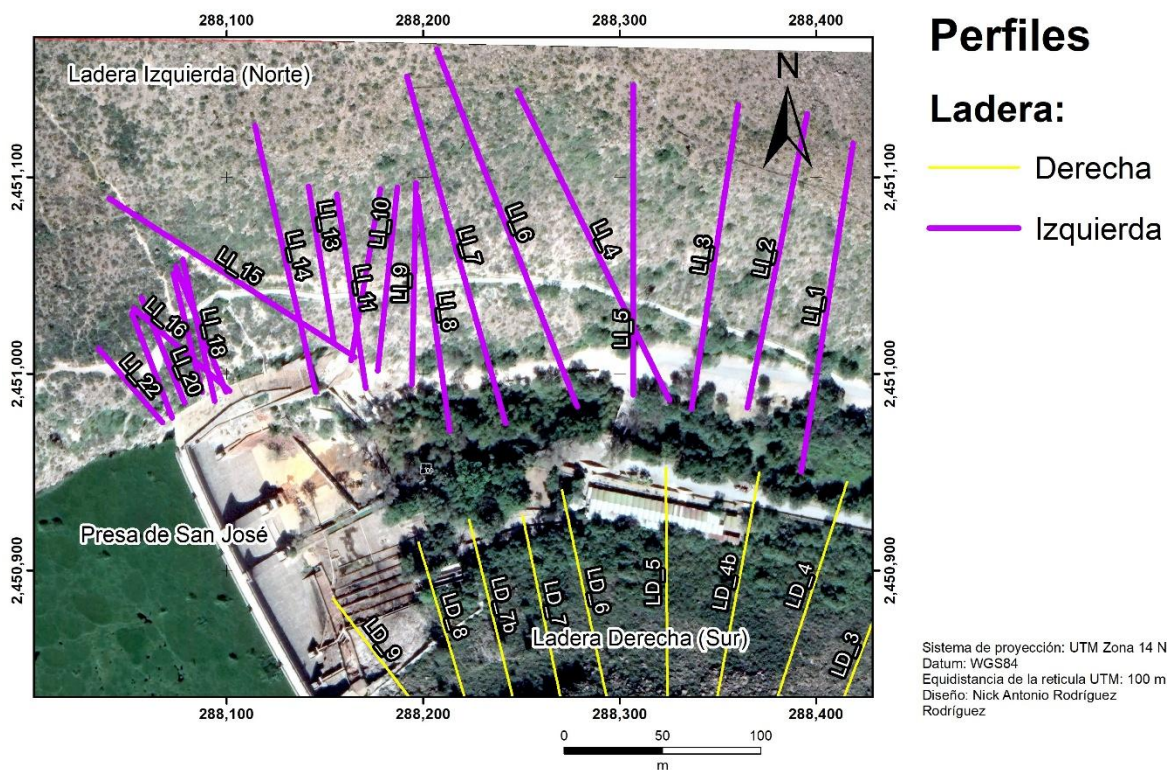


Figura 46. Ubicación de los perfiles topográficos en la ladera izquierda.

Se observan los puntos de inicio y fin obtenidos mediante mediciones de campo.

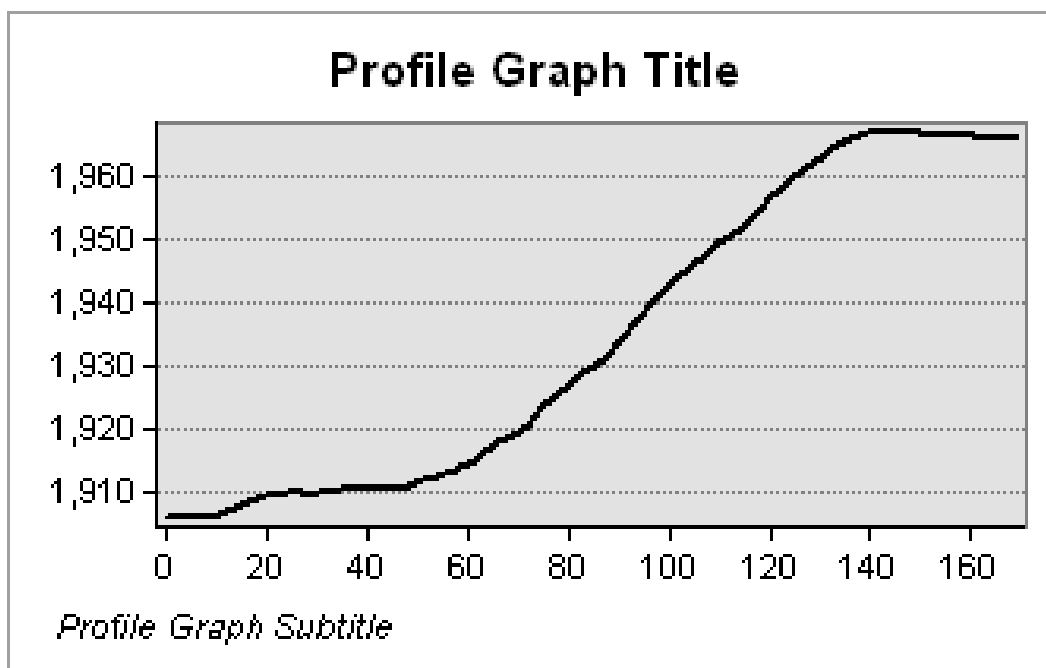


Figura 47. Perfil interpolado del LI_1 de la ladera izquierda generado con el DEM de 1.5 m.

El eje X corresponde a la distancia horizontal acumulada a lo largo del perfil (m), mientras que el eje Y representa la elevación del terreno (m s.n.m.).

Tabla 10. Valores de interpolación para la ladera izquierda obtenidos a partir de los perfiles.

FID	Name	ORIG_FID	Tipo	Point_X	Point_Y	Point_Z
20	LI_22	10	I	288067.2675	2450975.357	1936.680054
21	LI_22	10	F	288034.803	2451012.981	1963.349976
22	LI_21	11	I	288072.2416	2450977.712	1936.52002
23	LI_21	11	F	288051.7099	2451030.946	1965.170044
24	LI_20	12	I	288078.5917	2450985.226	1941.060059
25	LI_20	12	F	288056.5783	2451038.778	1965.959961
26	LI_19	13	I	288087.3758	2450990.73	1940.829956
27	LI_19	13	F	288072.8766	2451050.949	1963.400024
28	LI_18	14	F	288077.6656	2451058.357	1963.339966
29	LI_18	14	I	288093.8052	2450986.126	1934.699951
30	LI_17	15	I	288099.6261	2450990.888	1934.939941
31	LI_17	15	F	288074.0937	2451054.785	1963.699951
32	LI_16	16	I	288101.4782	2450991.418	1934.189941
33	LI_16	16	F	288052.5301	2451033.486	1965.410034
34	LI_15	17	I	288145.3513	2450990.727	1911.060059
35	LI_15	17	F	288114.2627	2451126.326	1996.810059
36	LI_14	18	F	288141.6122	2451095.333	1985.180054
37	LI_14	18	I	288154.3916	2451016.897	1928.920044
38	LI_13	19	I	288163.2816	2451006.742	1915.949951
39	LI_13	19	F	288178.1248	2451094.055	1980.829956
40	LI_12	20	I	288165.1951	2451008.587	1918.640015
41	LI_12	20	F	288041.4294	2451088.478	1977.119995
42	LI_11	21	I	288170.7429	2450992.78	1906.26001
43	LI_11	21	F	288155.8997	2451091.523	1982.930054
44	LI_10	22	I	288176.7463	2451001.522	1909.530029
45	LI_10	22	F	288186.8666	2451094.947	1979.73999
46	LI_9	23	I	288194.3147	2450994.608	1907.560059
47	LI_9	23	F	288196.2991	2451097.16	1978.599976
48	LI_8	24	I	288213.4816	2450970.883	1906.73999
49	LI_8	24	F	288196.9451	2451090.608	1973.52002
50	LI_7	25	I	288241.9244	2450974.852	1906.01001
51	LI_7	25	F	288191.6535	2451151.462	1999.099976
52	LI_6	26	I	288278.3047	2450983.451	1905.209961
53	LI_6	26	F	288207.4124	2451163.964	1998.939941
54	LI_5	27	I	288306.7474	2450989.404	1907.849976
55	LI_5	27	F	288306.7474	2451146.832	1989.530029
56	LI_4	28	I	288325.2683	2450986.758	1908.099976
57	LI_4	28	F	288247.8775	2451144.209	1993.380005
58	LI_3	29	I	288336.5131	2450982.128	1906.829956
59	LI_3	29	F	288360.3257	2451136.91	1980.829956
60	LI_2	30	I	288364.9559	2450982.79	1909.089966
61	LI_2	30	F	288395.383	2451132.28	1971.859985
62	LI_1	31	I	288392.3403	2450950.246	1905.890015
63	LI_1	31	F	288418.7987	2451117.463	1966.25

3.5.2. Resultados de procesamiento en gabinete

El procesamiento de los datos correspondientes a la ladera izquierda integró las mediciones obtenidas con el martillo de Schmidt y los resultados del Leeb test, realizados en tres estaciones adicionales. Los valores del martillo de Schmidt presentaron rangos entre 10 y 62 unidades de rebote, registrados en sectores como la zona alta, la brecha de falla, la base del desagüe y la escalinata inferior. Estos valores se organizaron en distribuciones lognormales y boxplots, que permitieron estimar la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) mediante correlaciones empíricas. En la Figura 48 se muestra la distribución correspondiente a este margen.

En las estaciones donde se aplicó el ensayo Leeb las estaciones 6, 7 y la brecha izquierda, se obtuvieron rangos de 104 a 431 HL y de 80 a 486 HL. A partir de estos valores se estimaron intervalos adicionales de UCS, complementando las mediciones obtenidas con el martillo de Schmidt, según lo reportado en las gráficas generadas en Origin (Figura 49).

La asignación del índice GSI en esta margen se basó en la observación directa del macizo, considerando variaciones en el grado de fracturamiento, la condición superficial de las discontinuidades y el estado de erosión de las ignimbritas presentes.

A partir de la UCS estimada y de los valores de GSI seleccionados, se definieron los parámetros geomecánicos para la configuración del SSAP en esta ladera. Para los estratos representativos se utilizaron valores de c , ϕ , γ , γ_{sat} , m_i y D acordes con la resistencia esperada del macizo ignimbrítico, siguiendo la misma metodología aplicada en la ladera derecha. La Tabla 11 y Tabla 12 resume los parámetros finales empleados en esta margen.

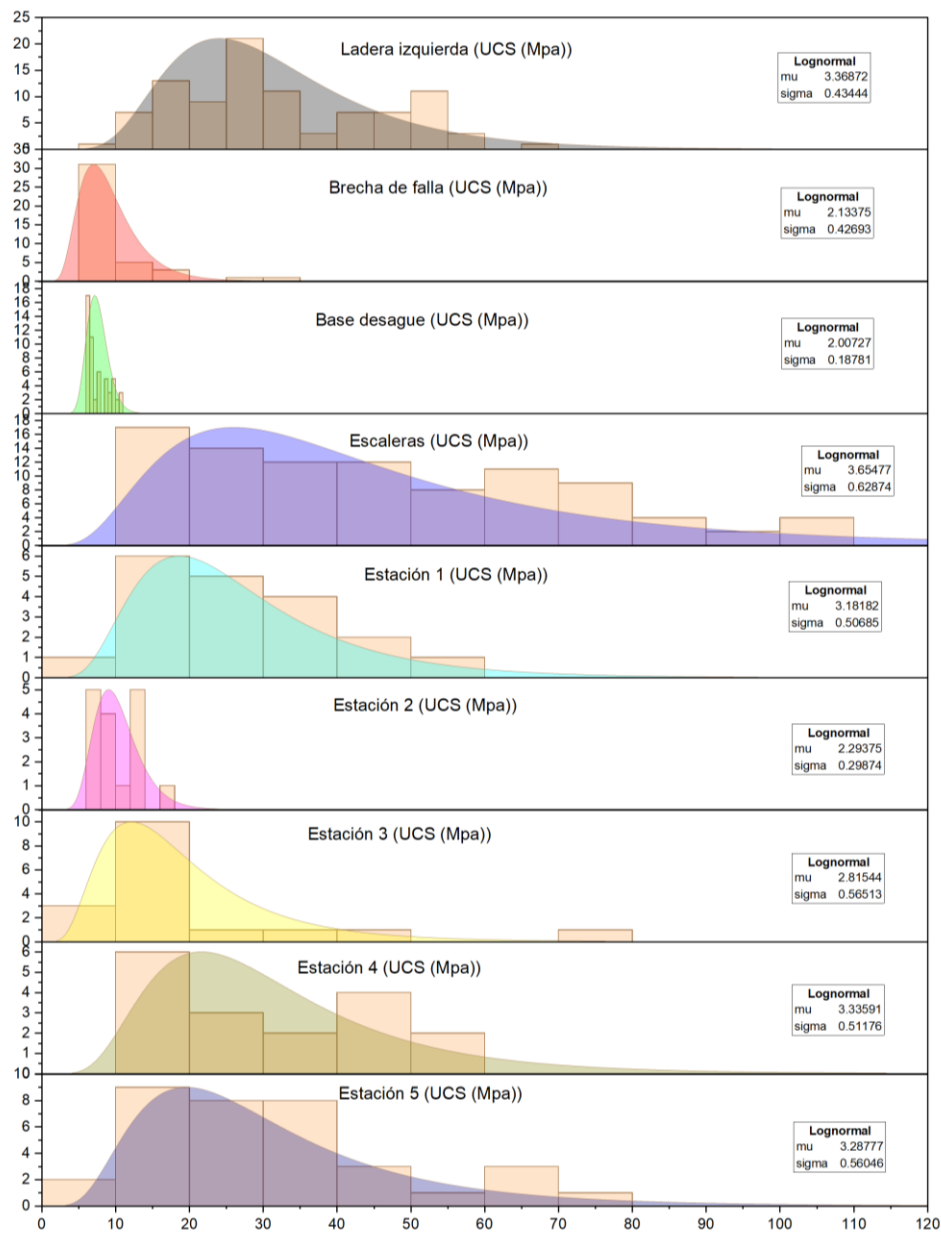


Figura 48. Distribución log normal del martillo de Schmidt, diferentes puntos en la ladera izquierda.

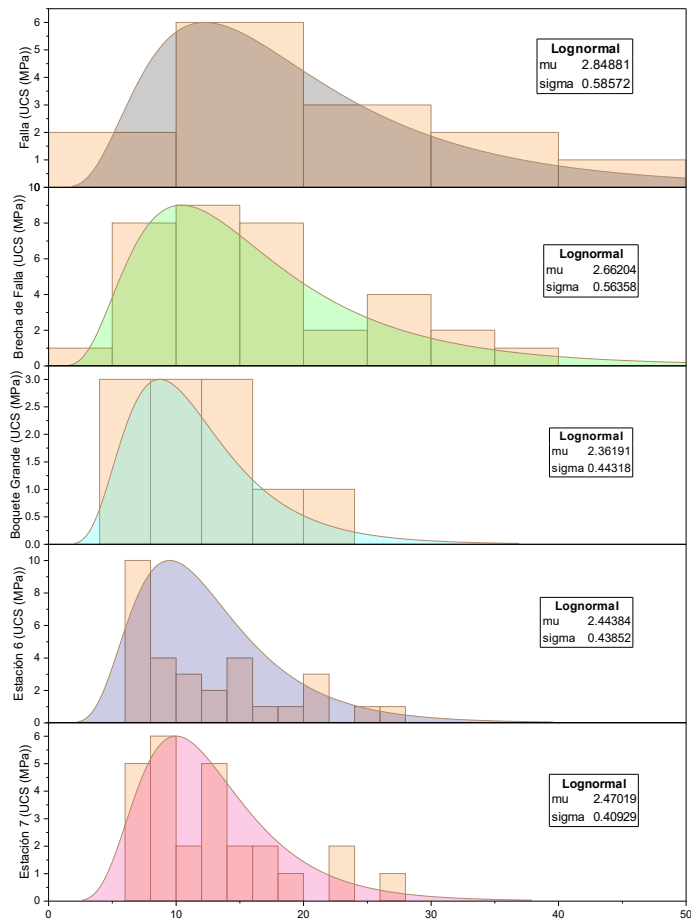


Figura 49. Distribución lognormal del leeb test, comparación entre zonas de interés del sitio

Tabla 11. Valores obtenidos Martillo de Schmidt para las zonas y sectores de la ladera izquierda

Sector/Estación	N total	Min	Max	P5	P50 (Mediana)	P95	μ (lognormal)	σ (lognormal)
Ladera izquierda	94	9.57	66.33	14.1	28.94	53.17	3.3687	0.4344
Estación 1	19	6.5	59.39	6.5	24.52	59.39	3.1818	0.5069
Estación 2	16	6.15	16.65	6.15	9.58	16.65	2.2938	0.2987
Estación 3	17	7.68	70.1	7.68	14.1	70.1	2.8154	0.5651
Estación 4	17	11.3	53.17	11.3	27.38	53.17	3.3359	0.5118
Estación 5	35	9.06	74.09	9.58	28.94	62.76	3.2878	0.5605
Brecha de falla	41	6.15	32.32	6.15	7.26	19.65	2.1338	0.4269
Base desagüe	54	6.15	10.7	6.15	6.87	10.7	2.0073	0.1879
Escaleras	93	10.7	109.11	13.34	42.62	97.69	3.6548	0.6287

Tabla 12. Valores obtenidos con leeb test para las zonas y sectores de la ladera izquierda

Sector/Estación	N total	Min	Max	P5	P50	P95	μ (lognormal)	σ (lognormal)
Falla	14	6.88	44.83	6.88	15.24	44.83	2.8488	0.5857
Brecha de Falla	35	4.23	39.89	5.54	14.45	33.64	2.662	0.5636
Bloquete Grande	11	5.49	20.11	5.49	10.54	20.11	2.3619	0.4432
Estación 6	30	6.13	26.29	6.94	10.55	25.6	2.4438	0.4386
Estación 7	26	6.32	26.29	6.41	11.58	23.72	2.4702	0.4093

3.5.3. Resultados de adecuación de datos para incorporar a modelado numérico

En la ladera izquierda se realizaron observaciones de campo complementarias en sectores que no fueron definidos como estaciones específicas de análisis. La Figura 50 muestra tramos representativos de este margen, donde se identifica un macizo rocoso con grados variables de fracturamiento, presencia localizada de bloques potencialmente inestables y evidencias de procesos de degradación progresiva. Estas observaciones confirman la heterogeneidad estructural del macizo en la ladera izquierda y son coherentes con los parámetros geomecánicos considerados en la interpretación global del comportamiento del talud (Tabla 13).

Tabla 13. Valores estimados del índice de resistencia del macizo rocoso (GSI), ladera izquierda.

Variabilidad de los valores de GSI estimados en campo para la ladera izquierda de la Presa de San José.

Estación / Sector	Ladera	Litología	Descripción del macizo	GSI estimado
E1	Izquierda	Ignimbrita	Macizo fracturado, bloques medianos, juntas abiertas	40-45
E2	Izquierda	Ignimbrita	Macizo moderadamente fracturado, bloques medianos	35-45
E3	Izquierda	Ignimbrita	Macizo fracturado, bloques medianos, alta persistencia de discontinuidades	30-35
E4	Izquierda	Ignimbrita	Macizo moderadamente fracturado, bloques medianos a grandes	50-55
E5	Izquierda	Ignimbrita	Macizo fracturado, bloques medianos, discontinuidades bien definidas	50-55
E6	Izquierda	Ignimbrita	Macizo moderadamente fracturado, bloques medianos	35-40
E7	Izquierda	Ignimbrita	Macizo fracturado, bloques medianos	30-35
Zona vertedero	Izquierda	Ignimbrita	Macizo fracturado, bloques medianos, mayor angularidad	45-55
Brecha de falla inferida	Izquierda	Ignimbrita	Roca triturada, fragmentos angulosos, matriz fina, muy baja cohesión	20-35
Zona alta de la ladera	Izquierda	Ignimbrita	Macizo fracturado, bloques grandes, muy angulosos	40-50

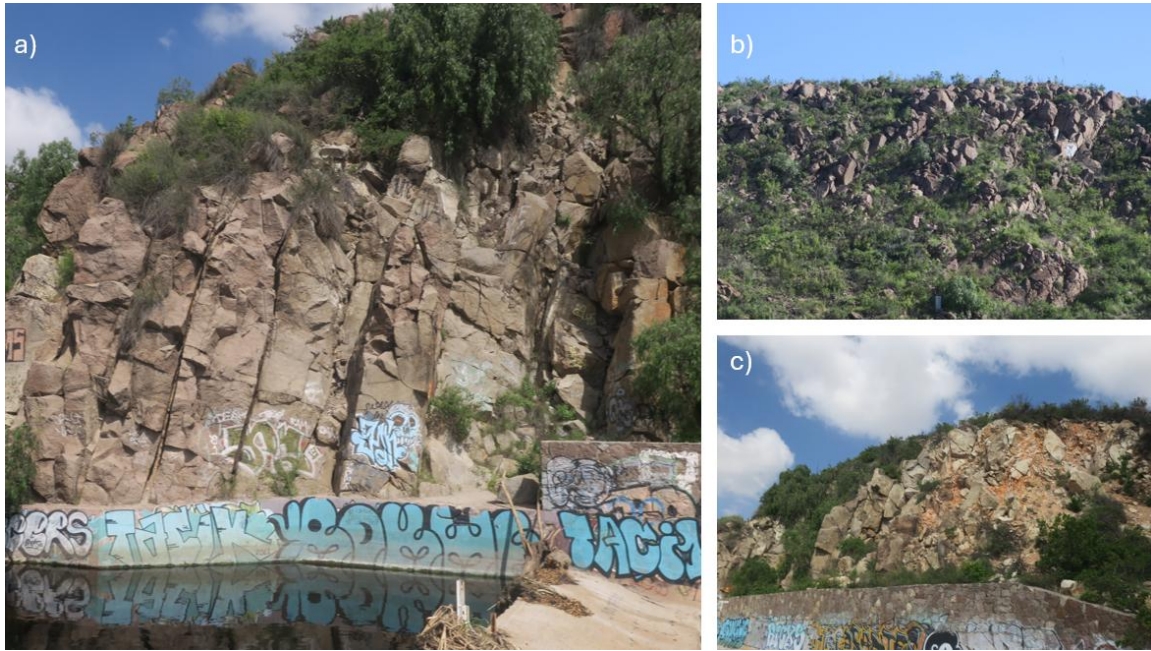


Figura 50. Sectores representativos de la ladera izquierda de la Presa de San José que no forman parte de las secciones modeladas.

a) talud rocoso fracturado con bloques medianos; b) acumulación de bloques producto de procesos de degradación; c) macizo rocoso intensamente fracturado con evidencia de alteración superficial.

3.5.4. Resultados del modelado numérico con el software SSAP

El modelado numérico realizado en SSAP permitió obtener el factor de seguridad (FS) para los perfiles definidos en la ladera izquierda bajo los escenarios estático, dinámico, saturado y con grieta rellena (FTC). Los resultados muestran variaciones entre perfiles asociadas a la heterogeneidad estructural del macizo y a las diferencias geométricas del talud (Figuras 51 - 53)

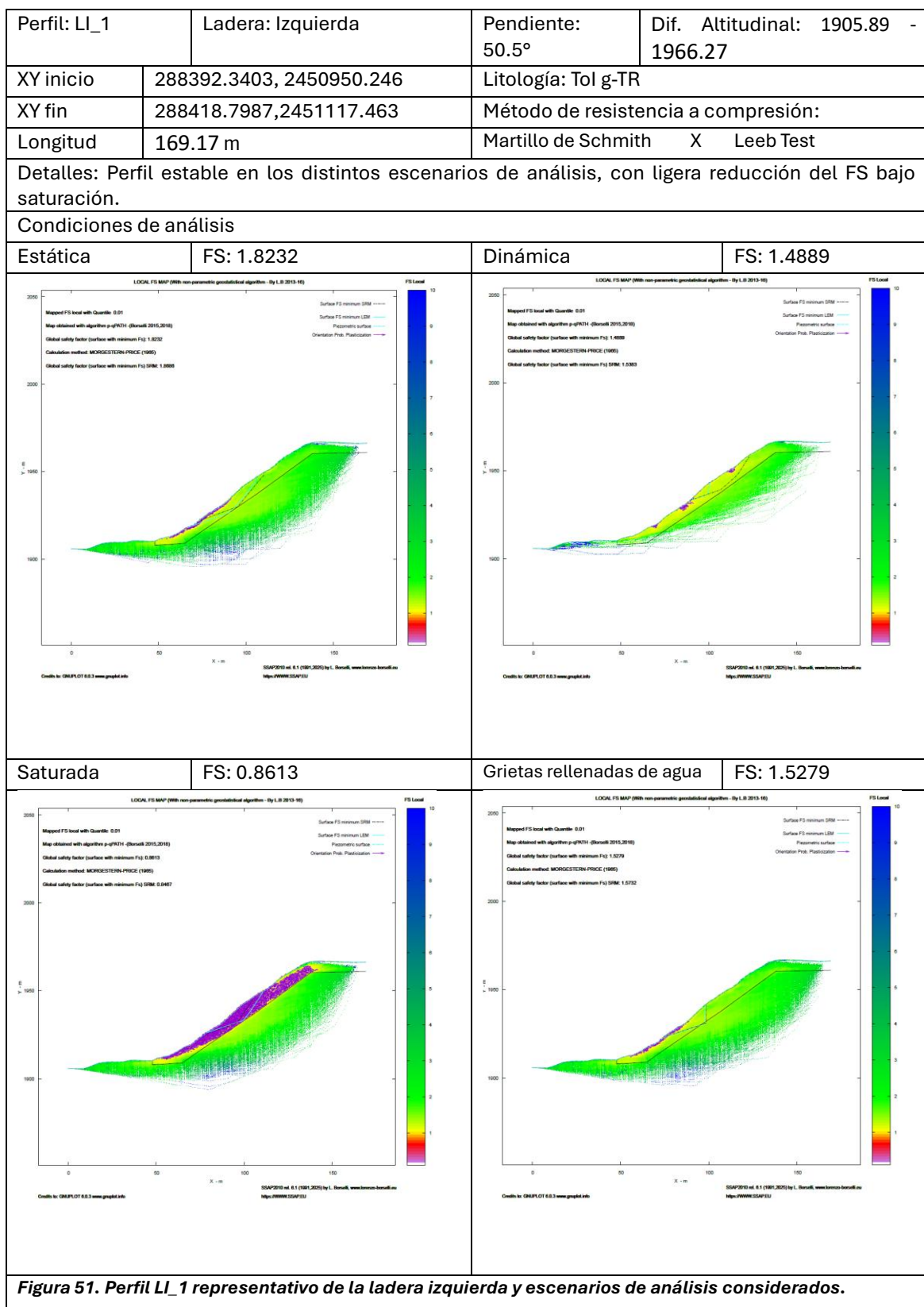


Figura 51. Perfil LI_1 representativo de la ladera izquierda y escenarios de análisis considerados.

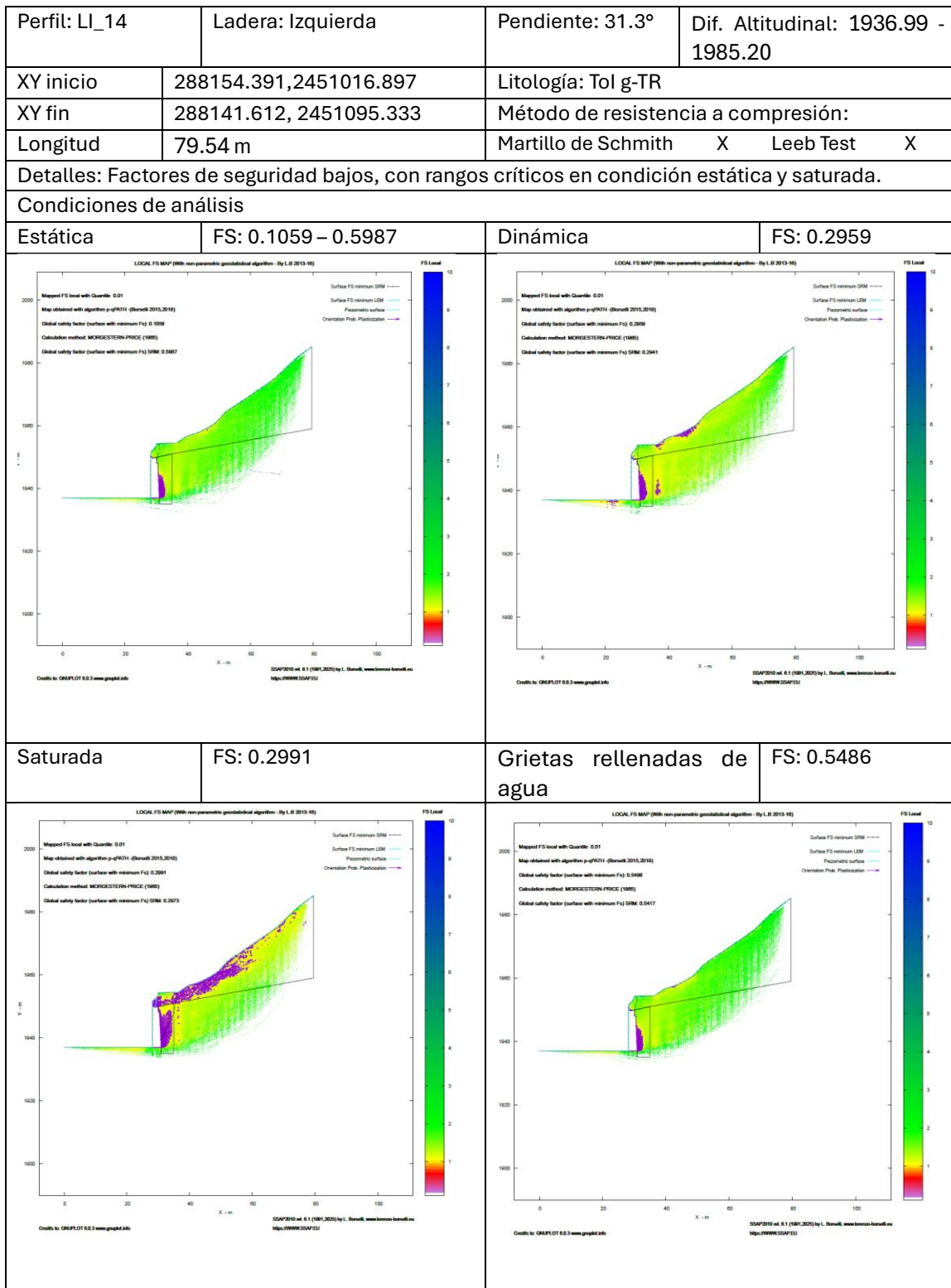


Figura 52. Perfil LI_14 representativo de la ladera izquierda y escenarios de análisis considerados.

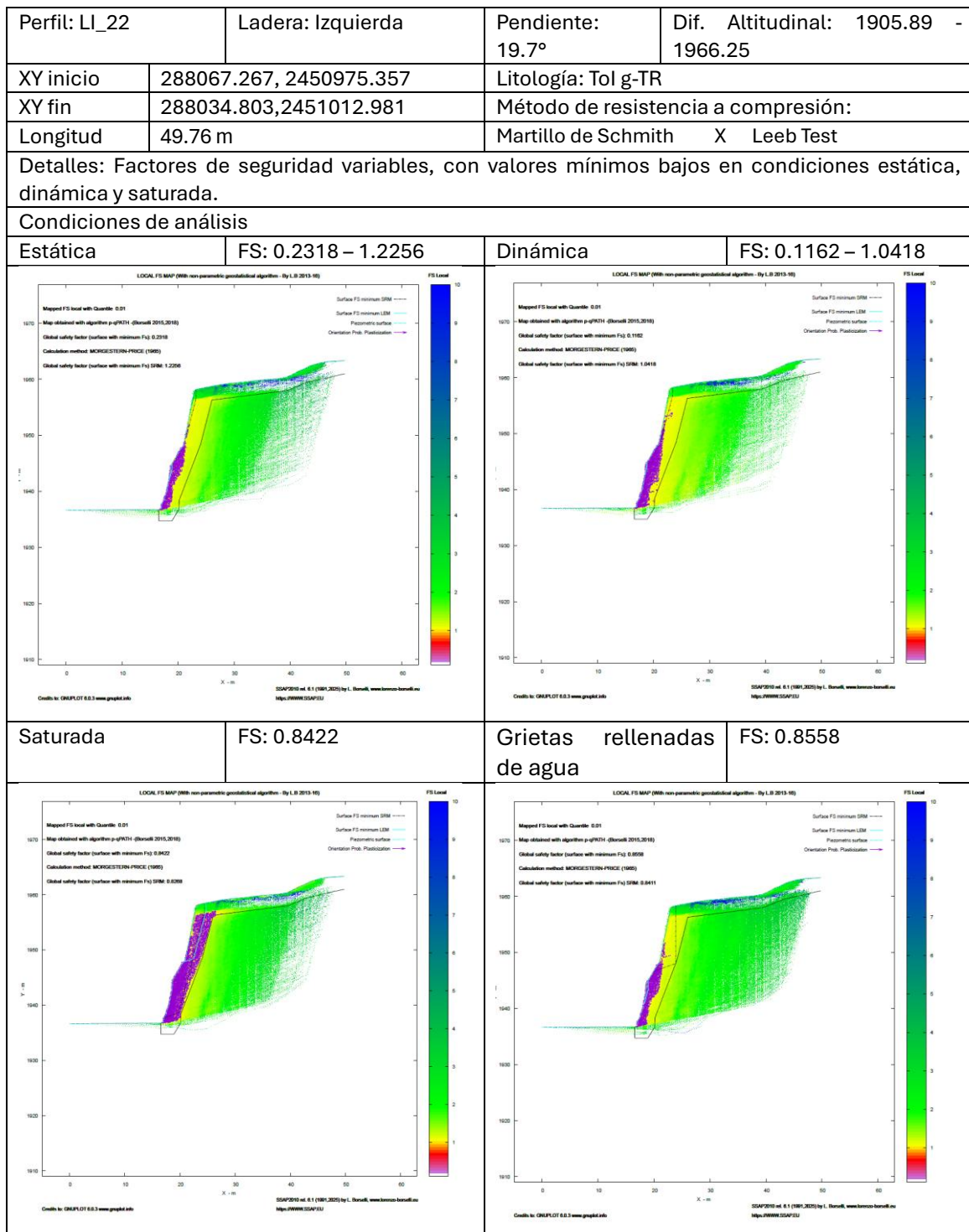


Figura 53. Perfil LI_22 representativo de la ladera izquierda y escenarios de análisis considerados.

3.5.5. Resultados de representación cartográfica de factores de seguridad

Los resultados del modelado numérico correspondientes a la ladera izquierda fueron procesados e integrados en un entorno SIG para su representación espacial (Figura 54 - Figura 57). A partir de esta información se generaron mapas continuos que permiten visualizar el comportamiento general del talud y la distribución de las zonas con mayor condición de inestabilidad, facilitando la identificación de sectores críticos y su análisis posterior (Tabla 14).

Tabla 14. Resume los factores de seguridad calculados para cada sección modelada, bajo condiciones estáticas, dinámicas, saturadas y de falla por FTC. Margen izquierdo (LI).

Nombre	FS Estático	FS Dinámico	FS Saturado	FS FTC
LI_1	1.8232	1.4889	0.8613	1.5279
LI_2	1.6327	1.3285	0.7616	1.3557
LI_3	1.5333	1.2595	0.6409	1.2777
LI_4	0.8769	1.4893	0.761	1.6643
LI_5	1.667	1.3088	0.6978	1.4089
LI_6	2.0044	1.5985	0.9696	1.6988
LI_7	1.5456	1.3085	0.686	1.3455
LI_8	1.5104	1.3377	0.761	1.288
LI_9	0.1724 - 0.8324	0.1302 - 0.5073	0.2564	1.0072
LI_10	0.5902	0.2160 - 0.4148	0.2144	0.5268
LI_11	1.0325	0.8557	0.4147	1.0743
LI_12	1.6862	1.383	0.7653	1.6343
LI_13	1.3657	0.9728	0.5268	1.2949
LI_14	0.1059 - 0.5987	0.2959	0.2991	0.5486
LI_15	1.494	1.212	0.6421	1.1693
LI_16	0.8789	0.67	0.2512	0.7049
LI_17	1.1258	0.9585	1.0674	1.2538
LI_18	0.8805	0.543	0.1842	0.8511
LI_19	0.8163	0.6899	0.1881 - 0.2653	0.8756
LI_20	1.4838	1.1862	0.5517	1.3323
LI_21	1.3468	1.394	0.3227	0.9152
LI_22	0.2318 - 1.2256	0.1162 - 1.0418	0.8422	0.8558

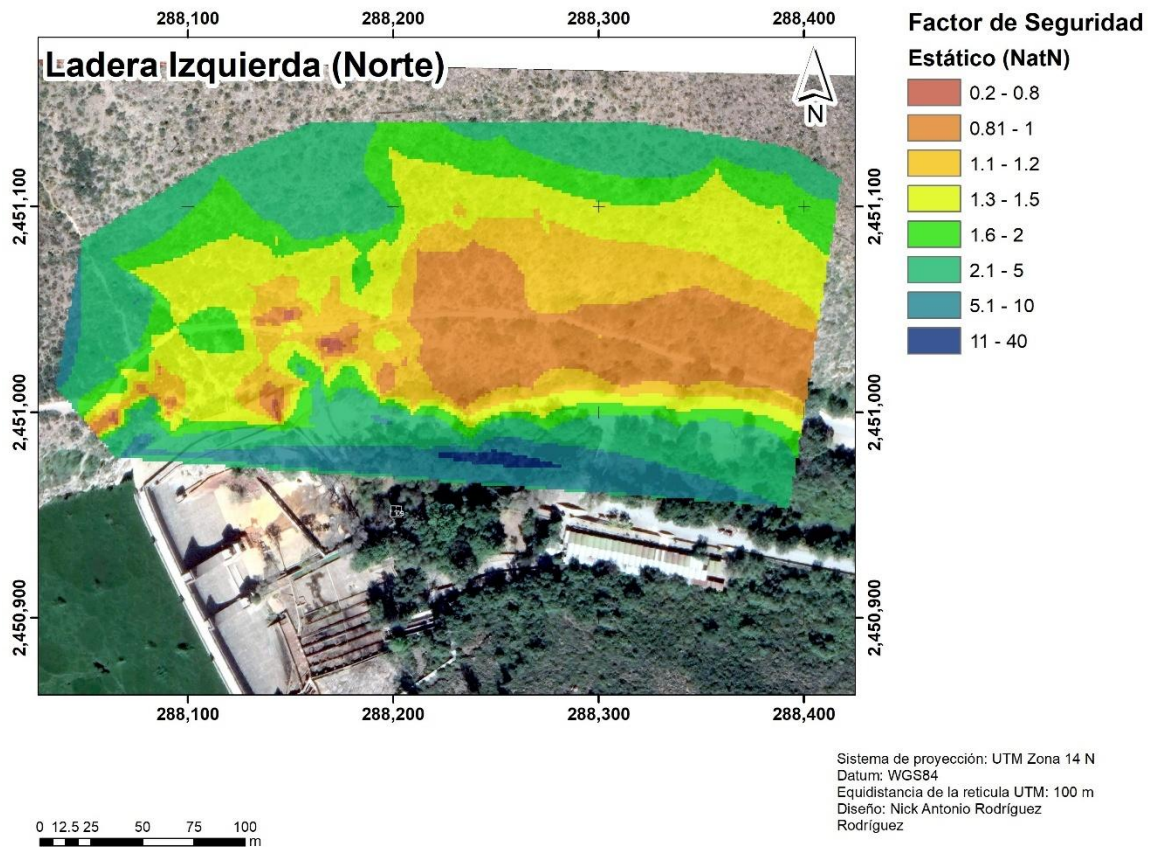


Figura 54. Mapa del factor de seguridad (FS) en condición estática para los márgenes derecho.

Se muestran las secciones analizadas mediante equilibrio límite, donde los valores de FS representan la estabilidad relativa del talud bajo condiciones de carga estáticas. Las zonas con FS menor indican sectores con menor margen de seguridad estructural.

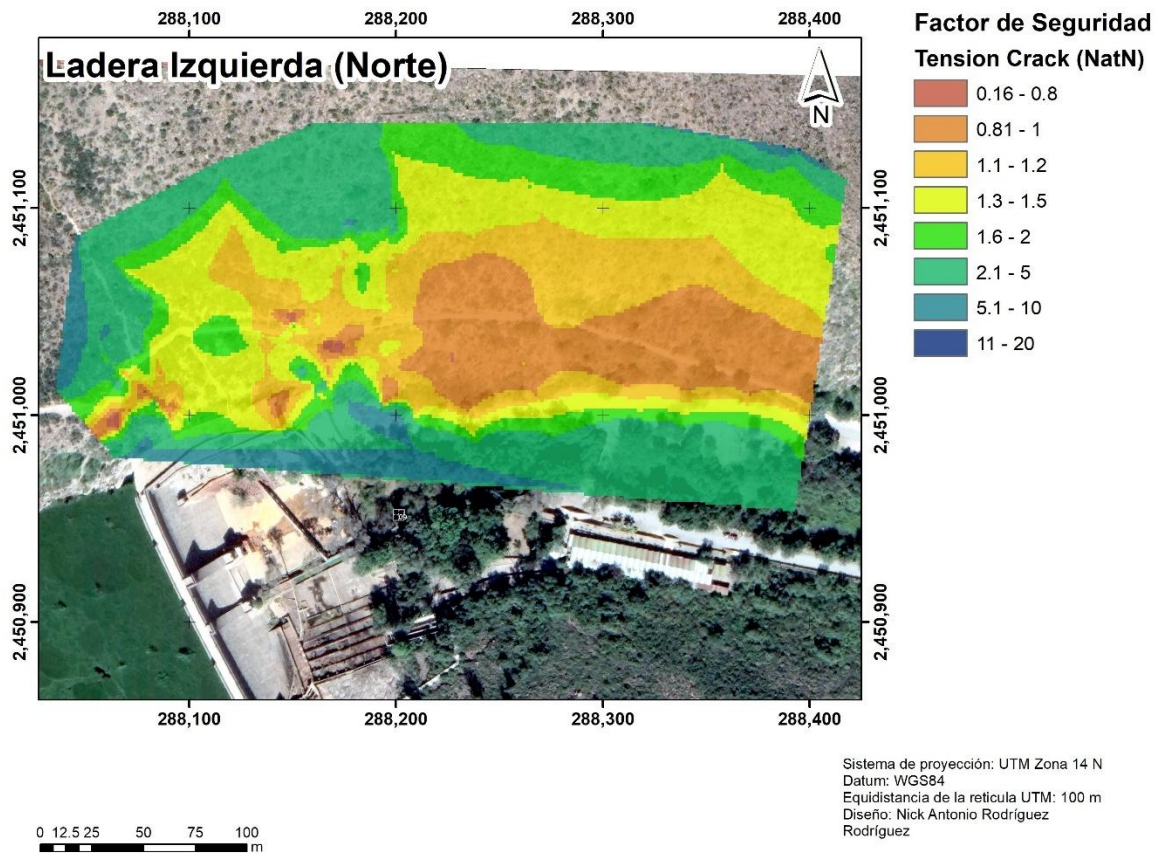


Figura 55. Mapa del factor de seguridad (FS) para el escenario FTC, correspondiente a la condición de carga adicional modelada para la presa.

Se identifican las zonas donde el FS disminuye frente a este tipo de solicitación, permitiendo delimitar sectores con mayor susceptibilidad a pérdida de estabilidad.

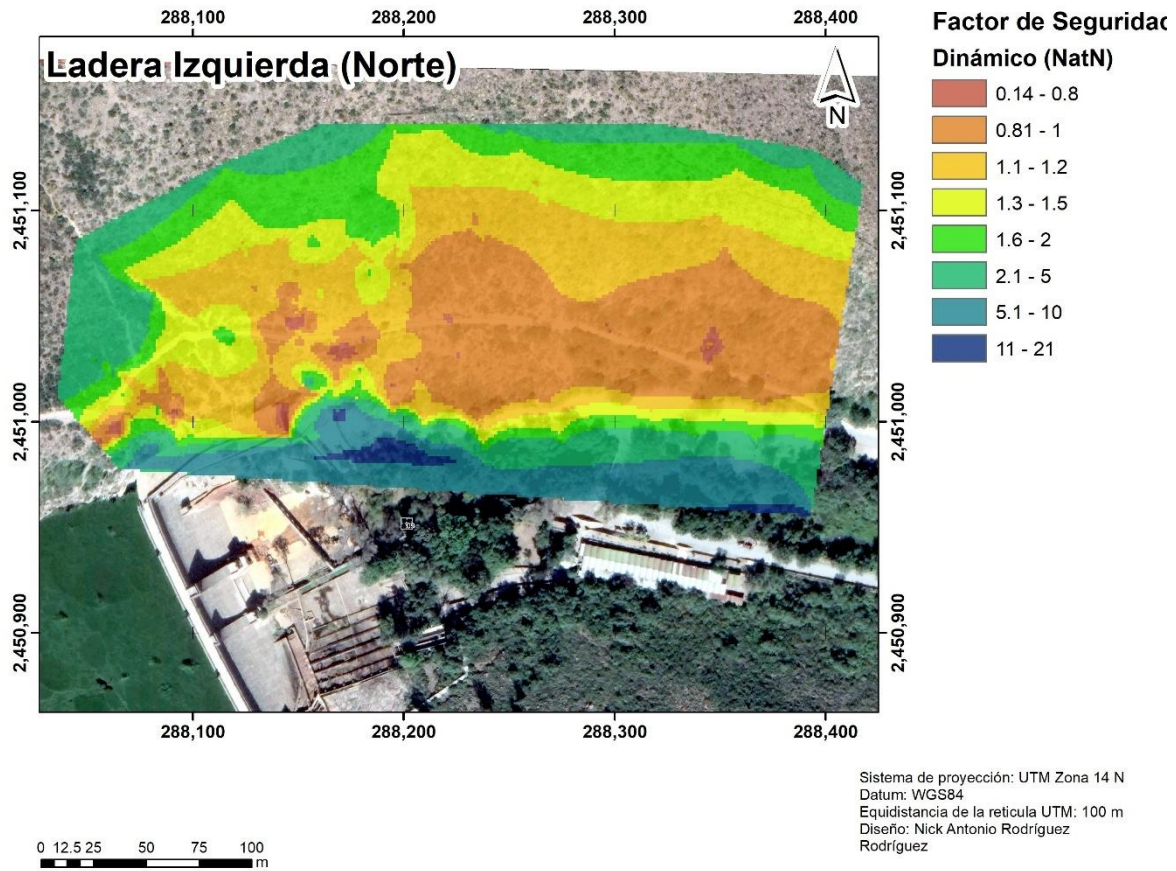


Figura 56. Mapa del factor de seguridad (FS) bajo condición dinámica, considerando la acción sísmica especificada para la zona.

El mapa muestra la disminución del FS en comparación con el escenario estático, lo que evidencia los sectores del talud más sensibles a la aceleración horizontal.

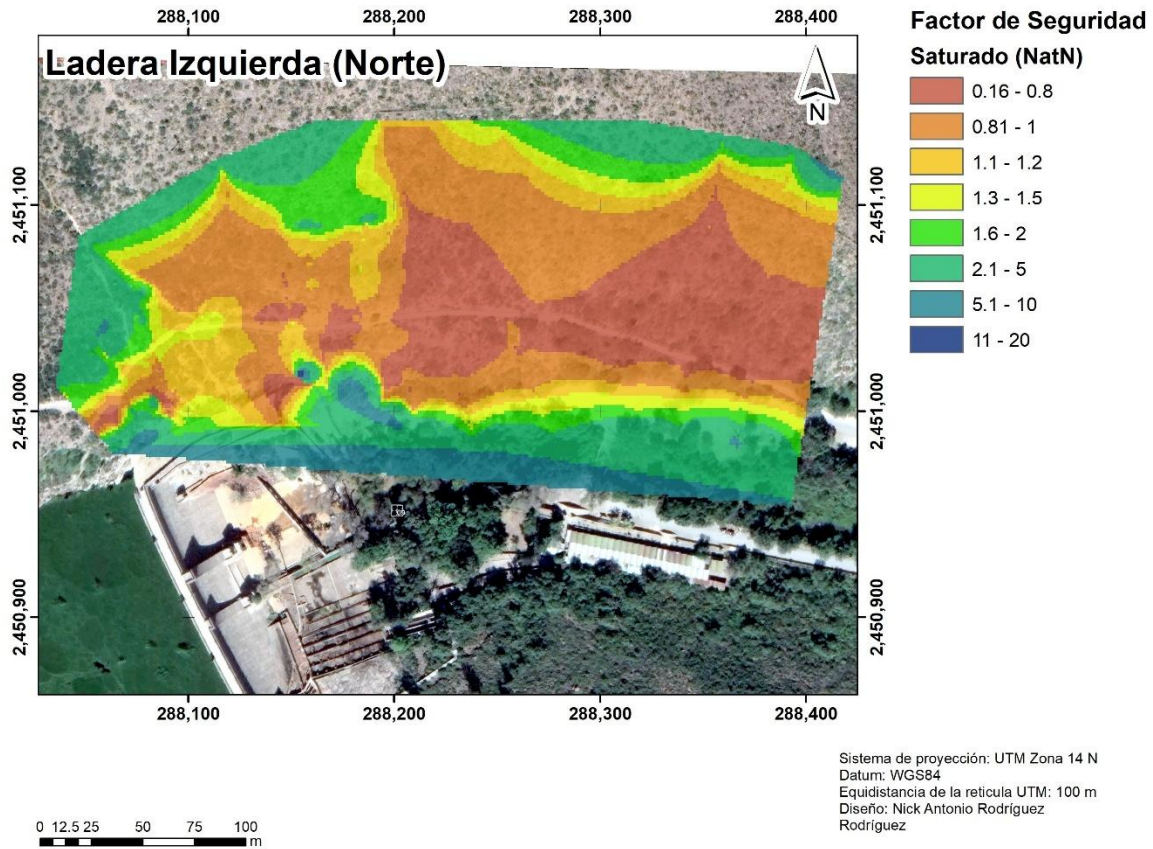


Figura 57. Mapa del factor de seguridad (FS) para el escenario saturado, asociado al incremento de presión de poros dentro del macizo rocoso.

Se observan reducciones de estabilidad en los sectores donde la saturación afecta de manera más significativa la resistencia al corte del material.

4. Discusión

4.1 Control geológico, estructural y geotécnico de la estabilidad de los taludes

El análisis integrado desarrollado en este estudio permitió evaluar de manera consistente el comportamiento geotécnico de los taludes que conforman los márgenes izquierdo y derecho de la Presa de San José, articulando información de campo, caracterización geomecánica y modelado numérico. Los resultados confirman que la estabilidad de las laderas está controlada principalmente por la interacción entre la geometría real del talud, el grado de fracturamiento del macizo rocoso y las condiciones externas que modifican su estado tensional, en particular la saturación y, en menor medida, las solicitaciones dinámicas.

La heterogeneidad litológica y estructural del macizo volcánico desempeña un papel central en la definición de los mecanismos de inestabilidad. La presencia de ignimbritas y lavas con distintos grados de soldadura, alteración y densidad de discontinuidades genera contrastes significativos en las propiedades mecánicas, lo que favorece la localización de superficies de falla en zonas de transición litológica o a lo largo de sistemas de fracturas preexistentes. Este comportamiento concuerda con lo documentado en estudios clásicos y recientes sobre la estabilidad de taludes en macizos volcánicos, donde la anisotropía estructural y el estado de alteración controlan la respuesta mecánica del sistema (González de Vallejo et al., 2004; Hoek & Brown, 2019; Stead & Coggan, 2012).

4.2 Procesos superficiales de inestabilidad: caída de bloques.

Los resultados indican que una condición de estabilidad global favorable no excluye la ocurrencia de procesos locales de caída de bloques. Mientras el análisis de equilibrio límite evalúa posibles fallas continuas del talud, la caída de rocas responde a mecanismos estructurales puntuales controlados por discontinuidades, fracturamiento superficial y geometría local (Wyllie, 2014, 2015).

La coexistencia de factores de seguridad mayores a la unidad con evidencias de desprendimientos en campo confirma que ambos procesos operan a escalas distintas. Taludes que no presentan falla generalizada pueden generar bloques individuales capaces de alcanzar zonas bajas, especialmente cuando la pendiente y las condiciones superficiales favorecen el rebote y la propagación (Volkwein et al., 2011).

El evento documentado tras lluvias intensas en 2025 refuerza el papel de la infiltración como detonante, al reducir la resistencia efectiva en discontinuidades superficiales y activar desprendimientos localizados sin comprometer la estabilidad global del talud (Borselli & Rodríguez Rodríguez, 2026).

En conjunto, la caída de bloques se reconoce como un proceso activo en sectores específicos de ambas laderas, cuya evaluación complementa el análisis geotécnico tradicional y resulta esencial para la gestión del peligro en infraestructura hidráulica y áreas de uso público.

4.3 Estabilidad aparente bajo condiciones estáticas y sus implicaciones

Este comportamiento ha sido ampliamente reportado en la literatura, donde se señala que taludes desarrollados en materiales volcánicos densamente soldados pueden mostrar estabilidad relativa cuando no se consideran perturbaciones externas significativas (Hoek & Brown, 2019; Stead & Coggan, 2012).

No obstante, esta estabilidad aparente debe interpretarse con cautela. Los resultados ponen de manifiesto que los factores de seguridad estáticos no reflejan necesariamente el comportamiento real del macizo ante escenarios transitorios, en particular en sistemas geológicamente complejos y estructuralmente debilitados. En este sentido, el análisis confirma que la evaluación de la estabilidad basada únicamente en condiciones estáticas puede subestimar el peligro real asociado a la inestabilidad de los taludes.

4.4 Influencia dominante de la saturación y de la presión de poros

La incorporación de escenarios de saturación evidenció una disminución significativa del factor de seguridad en diversos perfiles, especialmente en aquellos sectores caracterizados por geometrías desfavorables y alta presión de agua en las discontinuidades Figura 57. Este resultado pone de manifiesto el papel dominante de la presión de poros en la reducción de la resistencia al corte del macizo rocoso, al disminuir las tensiones efectivas que controlan su estabilidad.

Este comportamiento concuerda con los principios fundamentales de la mecánica de suelos y rocas (Terzaghi et al., 1996) y con estudios que identifican a los eventos de precipitación intensa y a los periodos prolongados de humedad como detonantes frecuentes de procesos de inestabilidad en laderas (Highland & Bobrowsky, 2008) En el contexto específico de la Presa de San José, los resultados sugieren la infiltración de agua en las grietas haciendo un incremento temporal de la presión de agua en condiciones de lluvia extrema, es el principal condicionante de inestabilidad de este ambiente.

4.5 Respuesta del macizo bajo condiciones dinámicas (sísmicas) y escenarios no ideales

El análisis bajo condiciones dinámicas también mostró una reducción general del factor de seguridad, aunque menos marcada que la observada en el escenario de saturación. Este comportamiento es coherente con estudios previos que indican que, incluso en regiones de baja sismicidad, las solicitaciones dinámicas pueden contribuir a activar procesos de inestabilidad cuando el macizo se encuentra previamente debilitado por fracturamiento o meteorización (Stead & Coggan, 2012).

Estos resultados refuerzan la idea de que la respuesta del talud depende más del estado mecánico y estructural del macizo que de la magnitud aislada de un evento sísmico, lo cual resulta consistente con la clasificación de la zona de estudio como de baja peligrosidad sísmica. En este sentido, la acción dinámica actúa como un

mecanismo amplificador de condiciones de inestabilidad preexistentes, más que como un detonante primario independiente.

La inclusión de escenarios de carga adicional se incorporó como parte del enfoque metodológico del estudio, con el objetivo de explorar condiciones no ideales que pueden presentarse durante la operación de la presa o como resultado de modificaciones antrópicas en su entorno inmediato. Este tipo de análisis resulta útil para identificar sectores sensibles a incrementos en la demanda y priorizar áreas que requieren mayor atención en monitoreo y gestión. En el presente estudio, estos escenarios reforzaron la identificación de perfiles críticos (Figura 55 - Figura 57), en particular en la ladera izquierda, lo que coincide con los valores más bajos del factor de seguridad obtenidos bajo condiciones saturadas y dinámicas.

4.6 Correspondencia entre modelado numérico y evidencias de campo

La comparación entre los resultados del modelado numérico y las evidencias de inestabilidad observadas en campo —bloques caídos, socavones y zonas con fracturamiento intenso— muestra una concordancia general en la identificación de sectores potencialmente inestables. Esta correspondencia respalda la validez del enfoque metodológico adoptado, al demostrar que los patrones de inestabilidad simulados reflejan de manera razonable los procesos observados en el terreno.

No obstante, las discrepancias locales identificadas son esperables y pueden atribuirse a las limitaciones inherentes al modelado bidimensional, a la simplificación de la geometría real del macizo y a la variabilidad espacial de los parámetros geomecánicos a escalas más finas. En este contexto, los factores de seguridad obtenidos deben interpretarse como indicadores de estabilidad relativa, útiles para la zonificación del peligro, más que como valores deterministas absolutos, en concordancia con el enfoque clásico propuesto por Varnes (1981).

4.7 Alcances, limitaciones e implicaciones para la gestión del peligro

Es importante reconocer que el presente estudio presenta limitaciones que deben considerarse al interpretar sus resultados. Entre ellas destacan el carácter bidimensional del modelado numérico, la homogeneización de los parámetros geomecánicos dentro de cada perfil y la ausencia de un análisis cinemático detallado de las discontinuidades. Asimismo, la estimación indirecta de la resistencia a compresión uniaxial introduce incertidumbre adicional (Aydin & Basu, 2005; Basu & Aydin, 2004).

No obstante, estas limitaciones no invalidan los resultados obtenidos, sino que delimitan su alcance y refuerzan la necesidad de interpretar los factores de seguridad como herramientas de apoyo para la toma de decisiones, más que como predicciones exactas de falla. Desde esta perspectiva, los resultados obtenidos permiten afirmar que el peligro asociado a la inestabilidad de los taludes de la Presa de San José no está controlado por un único factor, sino por la combinación de condiciones geométricas, estructurales y externas.

La saturación temporal emerge como el principal detonante potencial, mientras que las sollicitaciones dinámicas actúan como mecanismos que amplifican condiciones de inestabilidad preexistentes, especialmente en sectores con macizos altamente fracturados de ignimbritas volcánicas, como ha señalado en estudios similares.

Conclusiones

El análisis integrado de la información de campo, gabinete y modelación numérica permitió comprender de manera coherente el comportamiento geotécnico de los taludes en las laderas izquierda y derecha de la Presa de San José. La estrategia adoptada —basada en la observación directa del macizo, su caracterización geomecánica y la simulación mediante equilibrio límite— resultó adecuada para abordar un entorno volcánico fracturado, donde la variabilidad estructural juega un papel determinante en la estabilidad.

La caracterización geomecánica evidenció que el macizo rocoso está constituido principalmente por ignimbritas con distintos grados de fracturamiento y meteorización. Esta condición genera contrastes locales en la calidad del macizo y en su respuesta mecánica. Si bien los valores estimados de resistencia y los rangos del índice GSI indican una resistencia global moderada, la variabilidad espacial de estos parámetros es clave para explicar el comportamiento diferenciado de ciertos sectores, especialmente donde coinciden pendientes pronunciadas y una alta densidad de discontinuidades.

Las observaciones realizadas en campo —como la presencia de bloques caídos, zonas de socavación y pérdida de material superficial— muestran una clara correspondencia con los sectores identificados como más sensibles en el modelado numérico. Esta coincidencia fortalece la confiabilidad del enfoque aplicado y confirma que el factor de seguridad debe interpretarse como un indicador de susceptibilidad relativa, más que como una garantía absoluta de estabilidad. En este sentido, la geometría del talud y los cambios locales de pendiente influyen directamente en la distribución de esfuerzos y en el comportamiento mecánico del conjunto.

El análisis de distintos escenarios permitió reconocer que, aunque bajo condiciones estáticas los taludes presentan estabilidad global aceptable, la incorporación de saturación y solicitaciones dinámicas reduce el factor de seguridad

en sectores específicos. La infiltración de agua y el consecuente incremento en la presión de poros se identifican como el principal detonante potencial de procesos de inestabilidad, mientras que las cargas dinámicas pueden amplificar condiciones de debilidad ya existentes.

La integración de los resultados en un entorno SIG facilitó la delimitación espacial de zonas críticas y permitió generar productos cartográficos útiles para la gestión del peligro en torno a la infraestructura hidráulica. En términos generales, las laderas presentan condiciones favorables de estabilidad; sin embargo, existen sectores con mayor susceptibilidad a procesos de remoción en masa y caída de bloques, particularmente bajo escenarios hidrológicos adversos.

Por ello, la inestabilidad de taludes no debe entenderse únicamente como un fenómeno técnico, sino como un peligro geológico con implicaciones directas para la seguridad de las personas que transitan o realizan actividades recreativas en el entorno de la presa. La implementación de esquemas de monitoreo periódico y estudios complementarios —incluyendo análisis tridimensionales y evaluación más detallada del comportamiento hidráulico del macizo— permitiría reducir la incertidumbre y fortalecer la gestión preventiva.

En conjunto, los resultados obtenidos cumplen con el objetivo de evaluar el peligro asociado a la inestabilidad de taludes y caída de rocas en ambas laderas, identificar los factores geotécnicos y geométricos involucrados, estimar el factor de seguridad bajo distintos escenarios y delimitar espacialmente las zonas más susceptibles. Más allá de los valores numéricos obtenidos, el estudio aporta una base técnica sólida para la toma de decisiones orientadas a la protección de la infraestructura y, sobre todo, a la salvaguarda de la integridad física de la población.

Bibliografía.

- (anon.). (1933, septiembre 18). FLOODS IN MEXICO. *The Mercury (Hobart, Tasmania)*. <http://nla.gov.au/nla.news-article24887708>
- Abramson, L. W., Lee, T. S., Sharma, S., & Boyce, G. M. (2002). *Slope Stability and Stabilization Methods* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Agliardi, F., Crosta, G. B., & Frattini, P. (2009). Integrating rockfall risk assessment and countermeasure design by 3D modelling techniques. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(4), 1059–1073. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-1059-2009>
- Aguillón-Robles, A., Tristán-González, M., de Jesús Aguirre-Díaz, G., López-Doncel, R. A., Bellon, H., & Martínez-Esparza, G. (2014). Eocene to Quaternary mafic-intermediate volcanism in San Luis Potosí, central Mexico: The transition from Farallon plate subduction to intra-plate continental magmatism. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 276, 152–172. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.02.019>
- A.K. Lobeck. (1939). *GEOMORPHOLOGY*. McGraw-Hill Companies, The.
- Alcántara Ayala, Irasema., Echavarría Luna, Alonso., Martínez Gutiérrez, Carlos., Domínguez Morales, Leobardo., & Noriega Roja, Ignacio. (2008). *Inestabilidad de Laderas*.
- ASTM International. (2017). *ASTM A956/A956M-17: Standard Test Method for Leeb Hardness Testing of Steel Products*.
- Aydin, A. (2009). ISRM Suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: Revised version. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(3), 627–634. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.01.020>
- Aydin, A., & Basu, A. (2005). The Schmidt hammer in rock material characterization. *Engineering Geology*, 81(1), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.06.006>
- Baltazar Martínez, F. (2022). *Análisis del peligro por inestabilidad de laderas en el área de Teziutlán, Puebla*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Barton, N., & Choubey, V. (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics Felsmechanik Mécanique des Roches*, 10(1–2), 1–54. <https://doi.org/10.1007/BF01261801>
- Basu, A., & Aydin, A. (2004). A method for normalization of Schmidt hammer rebound values. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(7), 1211–1214. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.05.001>
- Beven, K. (2006). A manifesto for the equifinality thesis. *Journal of Hydrology*, 320(1–2), 18–36. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.07.007>

- Bishop, A. W. (1955). The use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes. *Géotechnique*, 5(1), 7–17. <https://doi.org/10.1680/geot.1955.5.1.7>
- Bolla, A., & Paronuzzi, P. (2021). UCS field estimation of intact rock using the Schmidt hammer: A new empirical approach. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 833(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/833/1/012014>
- Borselli, L. (2023). *SSAP 2010: ``a step away...’’ (Slope Stability Analysis Program). Reference Manual / Manuale di Riferimento (Version 5.2)*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. <https://www.ssap.eu>
- Borselli, L. (2024, mayo 26). *SSAP2010 (rel 6.0 -2024) - CARACTERISTICAS PROGRAMMA*. https://www.ssap.eu/caratteristiche_es.html. https://www.ssap.eu/caratteristiche_es.html
- Borselli, L., & Rodríguez Rodríguez, N. A. (2026). *Actualización de Peligro y Riesgo Geológico en la zona de la cortina de la Presa de San José, SLP, México*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26877.83681>
- Brunetti, M. T., Guzzetti, F., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., Mancinelli, P., Komatsu, G., & Borselli, L. (2014). Analysis of a new geomorphological inventory of landslides in Valles Marineris, Mars. *Earth and Planetary Science Letters*, 405, 156–168. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.08.025>
- Cala, M., & Flisiak, J. (2020). Slope stability analysis with FLAC and limit equilibrium methods. En *FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics* (pp. 111–114). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003077527-18>
- Camacho Altamirano, H. (2000). *Estado, empresarios e ingenieros en la ciudad de San Luis Potosí: la construcción de la Presa de San José, 1869–1903* [Licenciatura en Sociología, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)]. <https://repositorio.unam.mx/contenidos/148315>
- Cardenas-Tristan, A., Galvan-Medina, S. A., Reyes-Cardenas, O., Wu, H., Cisneros-Almazan, R., & Galindo-Mendoza, M. G. (2025). Urban Development with Gentrification Traces and Its Effects on Drinking Water Consumption in San Luis Potosí City. *Water*, 17(8), 1111. <https://doi.org/10.3390/w17081111>
- CONAGUA. (s/f). *Sistema de Seguridad de Presas*. Recuperado el 24 de septiembre de 2025, de https://presas.conagua.gob.mx/inventario/tcuenca.aspx?DSP,2980&utm_source=chatgpt.com
- CONAGUA. (2021). *Estadísticas del Agua en México 2021* (CONAGUA, Ed.).
- CONAGUA. (2025). *Sistema Nacional de Información del Agua - Monitoreo de las Principales Presas de México*. <https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/Presas/>. <https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/Presas/>

- Di Traglia, F., Borselli, L., Nolesini, T., & Casagli, N. (2023). Crater-rim collapse at Stromboli volcano: understanding the mechanisms leading from the failure of hot rocks to the development of glowing avalanches. *Natural Hazards*, 115(3), 2051–2068. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05626-y>
- Di Traglia, F., Calvari, S., Borselli, L., Cassanego, L., Giudicepietro, F., Macedonio, G., Nolesini, T., & Casagli, N. (2023). Assessing flank instability of Stromboli volcano (Italy) by reappraising the 30 December 2002 tsunamigenic landslides. *Landslides*, 20(7), 1363–1380. <https://doi.org/10.1007/s10346-023-02043-5>
- Dolmen S.r.l. (2024). *IS GeoMassi – Rockfall Simulation Software: Technical Manual*.
- Duncan, J. M. (1996). State of the Art: Limit Equilibrium and Finite-Element Analysis of Slopes. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(7), 577–596. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1996\)122:7\(577\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:7(577))
- Duncan, J. M. ., & Wright, S. G. . (2005). *Soil strength and slope stability*. John Wiley & Sons.
- Ferrari, F., Giacomini, A., & Thoeni, K. (2016). Qualitative Rockfall Hazard Assessment: A Comprehensive Review of Current Practices. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(7), 2865–2922. <https://doi.org/10.1007/s00603-016-0918-z>
- Geológica Mexicana, S., México Nieto-Samaniego, A., Francisco, Á., Alicia, S., & í Cano, C. (2005). Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. *Geológica Mexicana*, LVII, 285–318. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94320266004>
- González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2004). Ingeniería Geológica. En *Pearson Education*. Pearson Educación.
- Gutiérrez Elorza, M. (2008). *Geomorfología*. <https://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n71/n71a11.pdf>
- Hernández, G. A., Rosete, F. A., Salas, L., Alvarado, L. F., Martinez, J., & Sanchez, J. F. (2021). Landscape Planning for Conservation: The Case of the Flora and Fauna Protection Area “Sierra de San Miguelito”, San Luis Potosi, Mexico. *Diversity*, 14(1), 25. <https://doi.org/10.3390/d14010025>
- Herrera Ollachica, D. A., Asiedu Asante, B. K., & Imamura, H. (2025). Advancing Water Hyacinth Recognition: Integration of Deep Learning and Multispectral Imaging for Precise Identification. *Remote Sensing*, 17(4), 689. <https://doi.org/10.3390/rs17040689>
- Highland, L. M., & Bobrowsky, P. T. (2008). *The Landslide Handbook—A Guide to Understanding Landslides* (U.S. Geological Survey & V. Reston, Eds.).
- Hoek, E. (1994). Strength of rock masses. *News Journal of the International Society for Rock Mechanics*, 2(2), 3–7.

- Hoek, E., & Bray, J. D. (1981). *Rock Slope Engineering*. CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/9781482267099>
- Hoek, E., & Brown, E. T. (2019). The Hoek-Brown failure criterion and GSI - 2018 edition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(3), 445–463.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., & Corkum, B. (2002). Hoek-Brown failure criterion - 2002 Edition. *Proceedings of the North American Rock Mechanics Symposium*, 1, 267–273.
- Hoek, E., Carter, T. G., & Diederichs, M. S. (2013). Quantification of the geological strength index chart. *47th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium 2013*, 3, 1757–1764.
- Hoek, E., Kaiser, P. K., & Bawden, W. F. (1995). *Support of Underground Excavations in Hard Rock*. Balkema.
- Huang, Y. H. . (2014). *Slope stability analysis by the limit equilibrium method : fundamentals and methods*. ASCE Press.
- Hutchinson, J. N. (1989). General report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 26(2), 88.
[https://doi.org/10.1016/0148-9062\(89\)90310-0](https://doi.org/10.1016/0148-9062(89)90310-0)
- INEGI. (2002). 6. *Hidrología*.
- Innocenti, A., Pazzi, V., Borselli, L., Nocentini, M., Lombardi, L., Gigli, G., & Fanti, R. (2023). Reconstruction of the evolution phases of a landslide by using multi-layer back-analysis methods. *Landslides*, 20(1), 189–207.
<https://doi.org/10.1007/s10346-022-01971-y>
- International Organization for Standardization. (2015). *ISO 16859–1: Metallic materials — Leeb hardness test — Part 1: Test method*.
- IPICYT. (2018). *Estudio Técnico de Factibilidad para el establecimiento del Área Natural Protegida. Reserva Estatal. “Sierra de San Miguelito”. San Luis Potosí*.
https://d3dac9gdq8t83x.cloudfront.net/media/archivos/ETF_ANP_Sierra_San_Miguelito_version_final_2_agosto2018.pdf?utm_source=chatgpt.com#page=23.58
- José Helios Serna Bafún. (2018). *Control estructural para explicar el emplazamiento del volcanismo final en el Norte del Complejo Volcánico de la Sierra San Miguelito, S.L.P.* [Facultad de Ingeniería]. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Juan Esteban Ortiz López. (2017). *Levantamiento geomecánico de la estabilidad de taludes en la carretera tierra nueva – El Realito, municipio de Victoria Guanajuato kilómetro 43+300 al 45+140*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Kahraman, S., Fener, M., & Gunaydin, O. (2002). Predicting the Schmidt hammer values of in-situ intact rock from core sample values. *International Journal of Rock*

- Mechanics and Mining Sciences*, 39(3), 395–399. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(02\)00028-X](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(02)00028-X)
- Karakas, A. (2008). Practical Rock Engineering. *Environmental and Engineering Geoscience*, 14(1), 55–57. <https://doi.org/10.2113/gseegeosci.14.1.55>
- Katz, O., Reches, Z., & Roegiers, J. C. (2000). Evaluation of Mechanical Properties of Rock Using a Schmidt Hammer. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37(4), 723–728. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(00\)00004-6](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(00)00004-6)
- Kiun You, L., & Abd.Rahim, I. (2017). Application Of Gsi System For Slope Stability Studies On Selected Slopes Of The Crocker Formation In Kota Kinabalu Area, Sabah. *Geological Behavior*, 1(1), 10–12. <https://doi.org/10.26480/gbr.01.2017.10.12>
- Labarthe-Hernández, G., & Jiménez-López, L. S. (1992). *Características físicas y estructura de lavas e ignimbrita riolíticas en la Sierra de San Miguelito, S.L.P.* (Número 114).
- Labarthe-Hernández, G., & Jiménez-López, L. S. (1993). *Geología del Domo Cerro Grande, Sierra de San Miguelito, S.L.P.* (Número 117).
- Labarthe-Hernández, G., & Jiménez-López, L. S. (1994). *Geología de la porción sureste de la Sierra de San Miguelito, S.L.P.* (Número 120).
- Labarthe-Hernández, G., Tristán-González, M., & Aranda-Gómez, J. J. (1982). *Revisión estratigráfica del Cenozoico de la parte central del Estado de San Luis Potosí.*
- Laussin, H. (2024, julio 3). *Estudios de la UASLP advierten sobre riesgos en área de presa de San José por derrumbes y caída de rocas.* UASLP Noticias. https://wp.uaslp.mx/noticias/investigacion/estudios-de-la-uaslp-advierten-sobre-riesgos-en-area-de-presa-de-san-jose-por-derrumbes-y-caida-de-rocas/?utm_source=chatgpt.com
- Lee, J. S., Smallwood, L., & Morgan, E. (2014). *New Application of Rebound Hardness Numbers to Generate Logging of Unconfined Compressive Strength in Laminated Shale Formations.* U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, 48th U.S., ARMA-2014-6972.
- Lee, S., Suh, J., & Park, H. (2013). Smart Compass-Clinometer: A smartphone application for easy and rapid geological site investigation. *Computers & Geosciences*, 61, 32–42. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2013.07.014>
- Limones Carranza, C. J. (2024). *Estudio de la problemática de contaminación de la Presa de San José en San Luis Potosí* [Maestría, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnología, A.C.]. <https://repositorio.ipicyt.edu.mx///handle/11627/6515>

- Marinos, P., & Hoek, E. (2000). GSI: A geologically friendly tool for rock mass strength estimation. *Proceedings of GeoEng 2000: International Conference on Geotechnical & Geological Engineering*, 1422–1446. <https://www.rocsience.com/assets/resources/learning/hoek/2000-GSI-A-Geologically-Friendly-Tool-for-Rock-Mass-Strength-Estimation.pdf>
- Marinos, V., Marinos, P., & Hoek, E. (2007). Geological Strength Index (GSI). A characterization tool for assessing engineering properties for rock masses. En *Underground Works under Special Conditions* (pp. 13–21). Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1201/NOE0415450287.ch2>
- Mevoli, F. A., Borselli, L., Santangelo, M., Monte, N., de Lucia, D., Ugenti, A., & Rossi, M. (2026). Landslide susceptibility zoning through physically-based limit equilibrium method modelling. *CATENA*, 263, 109726. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.109726>
- Moreno-Maroto, J. M., & Alonso-Azcárate, J. (2022). Evaluation of the USDA soil texture triangle through Atterberg limits and an alternative classification system. *Applied Clay Science*, 229, 106689. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2022.106689>
- Morgenstern, N. R., & Price, V. E. (1965). The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces. *Géotechnique*, 15(1), 79–93. <https://doi.org/10.1680/geot.1965.15.1.79>
- Nkpadobi, J. I., Raj, J. K., & Ng, T. F. (2015). Influence of discontinuities on the stability of cut slopes in weathered meta-sedimentary rocks. *Geomechanics and Geoengineering*, 10(4), 290–302. <https://doi.org/10.1080/17486025.2014.987701>
- Ortega-Gutiérrez, F., Mitre-Salazar, L. M., Roldán-Quintana, J., Aranda-Gómez, J. J., Morán-Zenteno, D. J., Alaniz-Álvarez, S. A., & Nieto-Samaniego, Á. F. (2008). *Carta Geológica de la República Mexicana, quinta edición: Texto explicativo*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología.
- Ortiz Rodríguez, A. J. (2010). *Análisis del impacto ocasionado por el fenómeno de subsidencia en la zona metropolitana de San Luis Potosí-Soledad de Graciano Sánchez, México*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Peck, R. B., Hanson, W. E., & Thornburn, T. H. (1974). *Foundation Engineering* (Second). John Wiley & Sons.
- Plano Informativo. (2021, julio 5). *Inundación de 1933 en San Luis*. <https://planoinformativo.com/799829/inundacion-de-1933-en-san-luis/>
- Puente Castillo, W. L. (2014). *ESTUDIO GEOTÉCNICO Y DE PELIGRO GEOMORFOLÓGICO DE UNA PORCIÓN DE LA SIERRA DE SAN MIGUELITO, S.L.P.* [MAESTRÍA EN CIENCIAS EN GEOLOGÍA APLICADA]. Facultad de Ingeniería.
- Raccanello, D., Gobbo, C., Corona, L., De Bona, G., Hall, R., & Burro, R. (2022). Long-term intergenerational transmission of memories of the Vajont disaster.

Psychological Trauma: Theory, Research, Practice, and Policy, 14(7), 1107–1116.
<https://doi.org/10.1037/tra0000528>

- Ramírez Rodríguez, C. A. (2016). *Evaluación de riesgos enfocado a caída de rocas en el área de Escalerillas, San Luis Potosí* [Tesis de Licenciatura]. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Reyes-Hernández, H., Silva-Flores, M., Muñoz-Robles, C., & Ortiz-Rodríguez, A. J. (2022). Strengthening Environmental Management and Local Planning in Indigenous Communities Through Hydrological Connectivity Analysis. *Human Ecology*, 50(4), 617–632. <https://doi.org/10.1007/s10745-022-00329-1>
- Russo, G. (2009). A new rational method for calculating the GSI. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(1), 103–111. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2008.03.002>
- Sarro, R., Pérez-Rey, I., Tomás, R., Alejano, L. R., Hernández-Gutiérrez, L. E., & Mateos, R. M. (2021). Effects of Wildfire on Rockfall Occurrence: A Review through Actual Cases in Spain. *Applied Sciences*, 11(6), 2545. <https://doi.org/10.3390/app11062545>
- Schuster, R. L. ., & Krizek, R. J. . (1978). *Landslides, analysis and control*. National Academy of Sciences.
- Secretaría de Ecología y Gestión ambiental. (2015). *Plan de Manejo Área Natural Protegida. “Reserva Estatal Sierra de San Miguelito”*. San Luis Potosí. https://d3dac9gdq8t83x.cloudfront.net/media/archivos/Plan_de_Manejo_San_Miguelito_Extenso.pdf#page=22.40
- SGM. (2004). *Carta Geológica Tepetate F14-A83, escala 1:50,000*.
- Sosa Davila, V. V. (2019). *Caracterización geomecánica para averiguar el grado de la estabilidad de taludes, margen izquierda y derecha de la cortina de la presa “El Realito” San Luis de la Paz, Guanajuato*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Stead, D., & Coggan, J. (2012). Numerical modeling of rock-slope instability. En J. J. Clague & D. Stead (Eds.), *Landslides* (pp. 144–158). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511740367.014>
- Tarbut, E. J. ., Lutgens, F. K. ., & Tasa, Dennis. (2017). *Earth : an introduction to physical geology*. Pearson.
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Torres Sánchez, Dario. (2020). *Geoquímica, petrogénesis y geocronología del vulcanismo en el Complejo Volcánico Sierra de San Miguelito, Campo Volcánico de San Luis Potosí, México* [Doctor(a) en Geociencias Aplicadas]. Instituto Potosino de Investigación Científica Y Tecnológica, A.C.

- Tristán-González, M. (1986). *Estratigrafía y tectónica del Graben de Villa de Reyes, en los estados de San Luis Potosí y Guanajuato, México* (Número 107).
- Tristán-González, M., Aguillón-Robles, A., Barboza-Gudiño, J. R., Torres-Hernández, J. R., Bellon, H., López-Doncel, R., Rodríguez-Ríos, R., & Labarthe-Hernández, G. (2009). Geocronología y distribución espacial del vulcanismo en el Campo Volcánico de San Luis Potosí. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 61(3), 287–303.
- Tunini, L., Zuliani, D., Di Traglia, F., Borselli, L., de Luca, C., Nolesini, T., & Casu, F. (2024). Monitoring and modelling moraine landslides: an example from Cazzaso village (Carnic Alps, Italy). *Bulletin of Geophysics and Oceanography*, 65, 327–346.
- Uc Castillo, J. L. (2020). *Estudio de la recarga hídrica en el Complejo Volcánico de la Sierra de San Miguelito (CVSSM), mediante técnicas estadísticas multivariadas*. [Maestría]. Instituto Potosino de Investigación Científica Y Tecnológica .
- Ulusay, R., Ersoy, H., Sünnetci, M. O., & Karahan, M. (2025). The leeb (Equotip) hardness test for rock materials: An overview, assessments on the factors influencing test results, and prediction models based on a large database. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 84(3), 148. <https://doi.org/10.1007/s10064-025-04170-w>
- Universidad Nacional Autónoma de México. (s/f). *SSN Catálogo de sismos UNAM, México*. Servicio Sismológico Nacional. <https://doi.org/10.21766/SSNMX/EC/MX>
- U.S. Geological Survey. (2004). *Landslide Types and Processes*. <https://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/fs-2004-3072.html>
- U.S. Geological Survey (USGS). (2025). *Earthquake Catalog (ComCat): Search results for San Luis Potosí (1990–present)*.
- Uzielli, M., Geppetti, A., Borselli, L., Renzi, S., & Preti, F. (2025). Comparative geotechnical analysis of slope stabilization through conventional, soil and water bioengineering, and combined solutions. *Ecological Engineering*, 212, 107487. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2024.107487>
- Varnes, D. J. (1981). Slope instability analysis and zonation. En R. L. Schuster & R. J. Krizek (Eds.), *Landslides: Analysis and Control*. National Academy of Sciences.
- Villaseñor, J. (2019). *Evaluación geomecánica de macizos volcánicos en el área de la Sierra de San Miguelito, San Luis Potosí*.
- Volkwein, A., Schellenberg, K., Labiouse, V., Agliardi, F., Berger, F., Bourrier, F., Dorren, L. K. A., Gerber, W., & Jaboyedoff, M. (2011). Rockfall characterisation and structural protection – A review. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(9), 2617–2651.

- Wark, D. A. (1991). Oligocene ash flow volcanism, northern Sierra Madre Occidental: Role of mafic and intermediate-composition magmas in rhyolite genesis. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 96(B8), 13389–13411. <https://doi.org/10.1029/90JB02666>
- Watson, D. F. . (1992). *Contouring : a guide to the analysis and display of spatial data : with programs on diskette*. Pergamon Press.
- Wyllie, D. C. (2014). *Rock Slope Engineering: Civil and Mining* (5th ed.).
- Wyllie, D. C. . (2015). *Rock fall engineering*. CRC Press/Taylor & Francis Group.
- Wyllie, D. C. ., Mah, C. W. ., Hoek, Evert., & Bray, John. (2004). *Rock slope engineering : civil and mining*. Spon Press.
- Xiao, S., Dai, T., & Li, S. (2024). Review and Comparative Analysis of Factor of Safety Definitions in Slope Stability. *Geotechnical and Geological Engineering*, 42(6), 4263–4283. <https://doi.org/10.1007/s10706-024-02793-6>
- Záruba, Q., & Mencl, V. (2014). Landslides and their control: Developments in Geotechnical Engineering. *Elsevier Science*.
- Zhu, C., Fang, C., Tao, Z., Zhang, Q., Zhang, W., Yan, J., He, M., & Cheng, Z. (2025). Remote Sensing Techniques for Landslide Prediction, Monitoring, and Early Warning. *Remote Sensing*, 17(11), 1893. <https://doi.org/10.3390/rs17111893>

Anexos

Anexo A. Ajuste y construcción de perfiles topográficos a partir de mediciones con distanciómetro láser y DEM.

Con el fin de representar de manera más precisa la geometría real de los taludes analizados, se realizó un procedimiento de construcción y ajuste de perfiles topográficos que integra mediciones directas de campo con información derivada del DEM.

A.1 Medición de puntos en campo

Inicialmente, durante el trabajo de campo se efectuaron mediciones con un distanciómetro láser, registrando para cada perfil:

- Coordenadas UTM del punto de inicio (x_0, y_0) ,
- Azimut del perfil,
- Distancia medida,
- Ángulo de inclinación del talud,
- Altura real del frente rocoso.

Estas mediciones permitieron definir la orientación y geometría real del perfil, particularmente en zonas donde el DEM presenta suavización de pendientes o pérdida de verticalidad.

A.2 Construcción de la geometría vertical del perfil

A partir de los datos obtenidos en campo, se procedió a la construcción geométrica del perfil vertical mediante relaciones trigonométricas básicas. Para cada segmento medido, se calcularon los incrementos horizontales y verticales de acuerdo con las siguientes expresiones:

$$\Delta x = \cos(\text{radianes}(\theta)) \cdot d$$

Formula A. 1

$$\Delta y = \sin(\text{radianes}(\theta)) \cdot d$$

Formula A. 2

donde:

- θ corresponde al ángulo de inclinación medido,
- d es la distancia registrada por el distanciómetro.

El valor de Δy se sumó a la cota inicial (y_0) para obtener la altura correspondiente a cada punto del perfil, permitiendo así reconstruir la geometría vertical real del talud (Tabla A. 1).

Tabla A. 1. Datos de medición con distanciómetro láser y cálculo de incrementos espaciales (Δx , Δy) utilizados para la construcción y ajuste del perfil topográfico sobre el DEM.

							Y0 absoluto =	1935.08
Medicion No.	d (m)	β (degrees)	Δx	Δy	x	y	x(m)	Ytrasf(m)
1	9.16	-14.5	8.87	-2.29	8.87	-2.29	8.87	1932.79
2	10.259	-12.75	10.01	-2.26	10.01	-2.26	10.01	1932.82
3	10.332	-12.35	10.09	-2.21	10.09	-2.21	10.09	1932.87
4	10.558	-8.55	10.44	-1.57	10.44	-1.57	10.44	1933.51
5	10.558	-3.3	10.54	-0.61	10.54	-0.61	10.54	1934.47
6	10.64	5.65	10.59	1.05	10.59	1.05	10.59	1936.13
7	11.47	6.4	11.40	1.28	11.40	1.28	11.40	1936.36
8	11.831	8.6	11.70	1.77	11.70	1.77	11.70	1936.85
9	13.523	9.5	13.34	2.23	13.34	2.23	13.34	1937.31
10	15.688	15.55	15.11	4.21	15.11	4.21	15.11	1939.29
11	16.983	17.85	16.17	5.21	16.17	5.21	16.17	1940.29
12	17.027	18.25	16.17	5.33	16.17	5.33	16.17	1940.41
13	18.214	18.8	17.24	5.87	17.24	5.87	17.24	1940.95
14	18.668	18.85	17.67	6.03	17.67	6.03	17.67	1941.11
15	18.971	20.8	17.73	6.74	17.73	6.74	17.73	1941.82
16	19.285	21.5	17.94	7.07	17.94	7.07	17.94	1942.15
17	20.45	22.4	18.91	7.79	18.91	7.79	18.91	1942.87
18	20.361	23.7	18.64	8.18	18.64	8.18	18.90	1943.26
19	20.88	24.45	19.01	8.64	19.01	8.64	19.01	1943.72
20	21.104	25.35	19.07	9.04	19.07	9.04	19.07	1944.12
21	21.345	25.85	19.21	9.31	19.21	9.31	19.21	1944.39
22	21.484	26.35	19.25	9.54	19.25	9.54	19.25	1944.62
23	21.842	26.95	19.47	9.90	19.47	9.90	19.47	1944.98
24	22.104	27.8	19.55	10.31	19.55	10.31	19.55	1945.39
25	22.324	28.45	19.63	10.63	19.63	10.63	19.63	1945.71
26	22.63	29.05	19.78	10.99	19.78	10.99	19.78	1946.07
27	22.862	29.65	19.87	11.31	19.87	11.31	19.87	1946.39
28	23.139	30.25	19.99	11.66	19.99	11.66	19.99	1946.74
29	23.213	30.45	20.01	11.76	20.01	11.76	20.01	1946.84

A.3 Interpolación y ajuste espacial sobre el DEM

Una vez obtenida la geometría vertical del perfil LI_19 (Figura A. 1), los puntos calculados fueron interpolados y posicionados espacialmente sobre el DEM, utilizando las coordenadas iniciales y el azimuth del perfil como referencia. Este procedimiento permitió ajustar localmente la topografía derivada del DEM, manteniendo su coherencia espacial, pero incorporando la verticalidad real observada en campo.

Posteriormente, a partir de este ajuste, se generó el perfil topográfico definitivo mediante herramientas de análisis espacial en ArcGIS, obteniendo así perfiles que integran información de campo y gabinete.

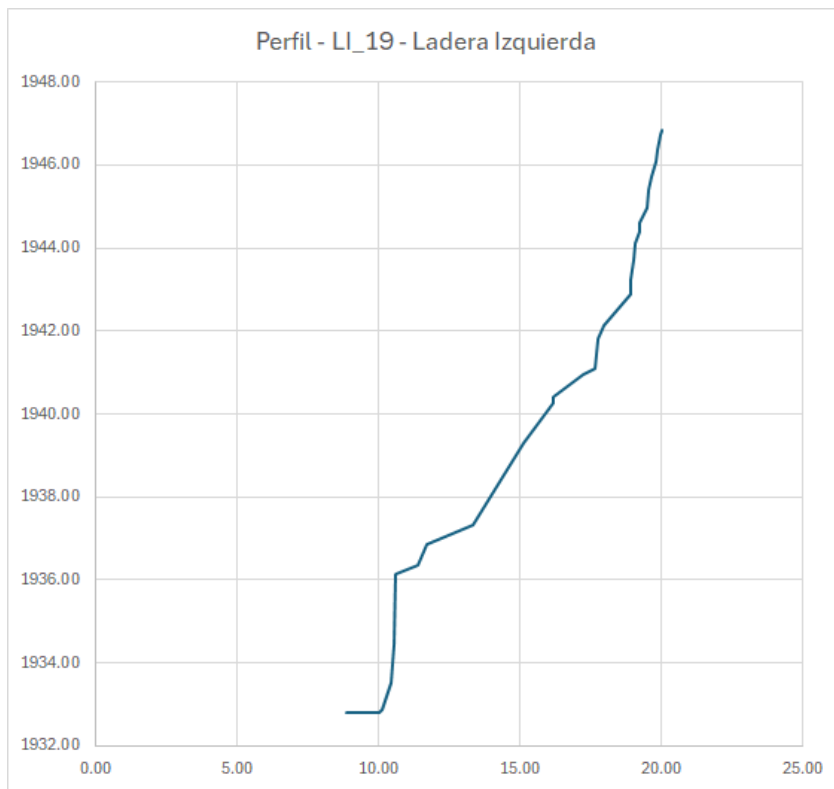


Figura A. 1. Perfil LI-19 construido a partir de mediciones con distanciómetro láser, previo al ajuste con el DEM.

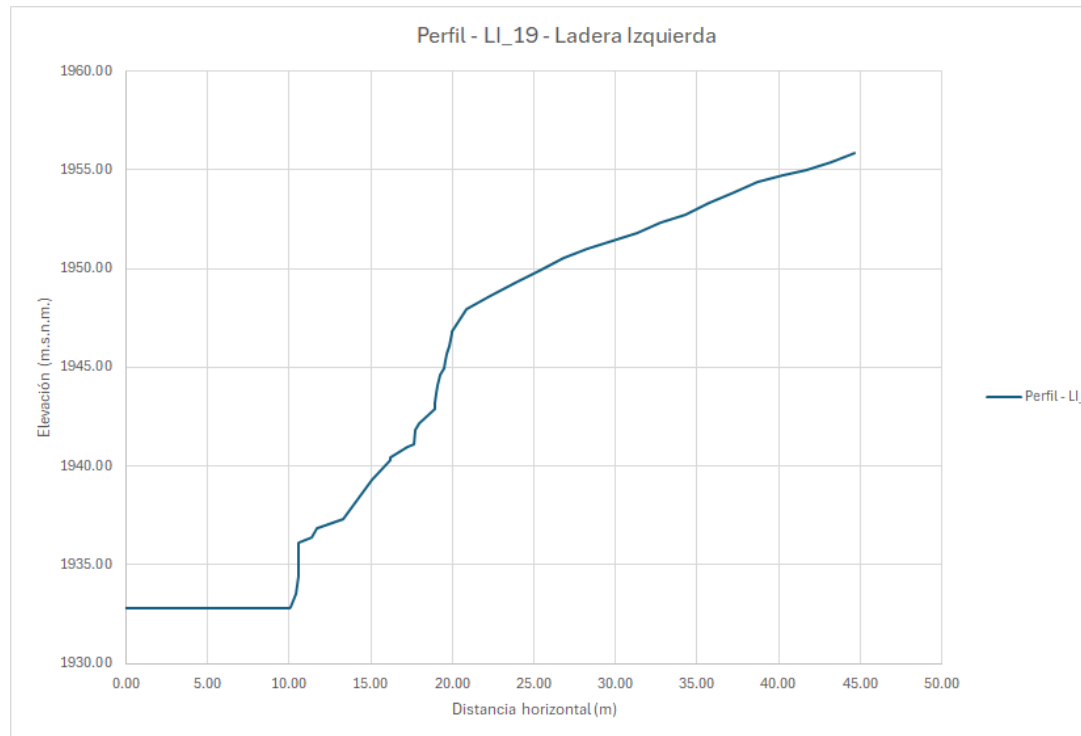


Figura A. 2. Perfil topográfico LI-19 transpuesto y anclado espacialmente al DEM a partir de mediciones de campo con distanciómetro láser.

Anexo B. Perfiles de estabilidad – Ladera derecha.

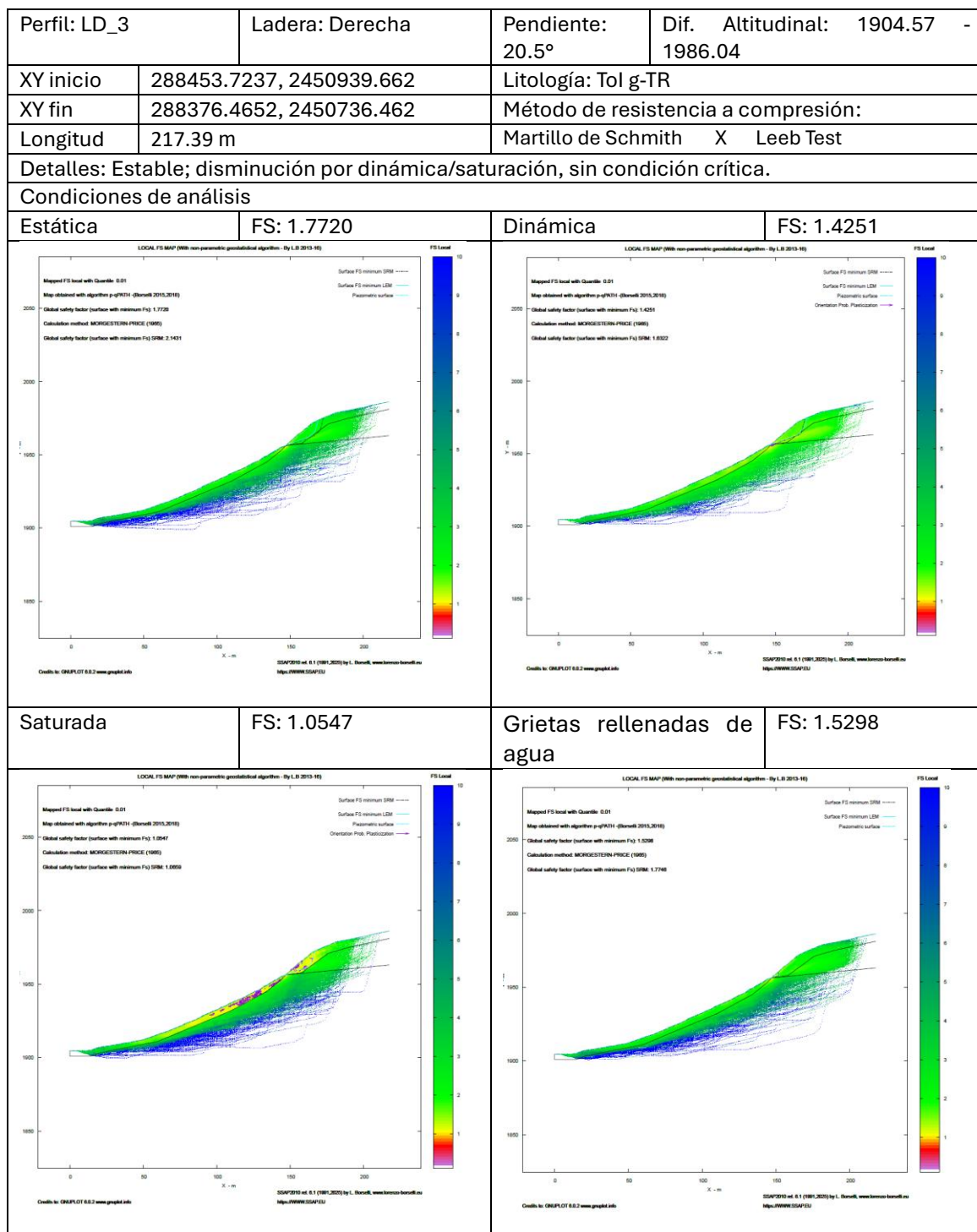


Figura B. 1. Perfil LD_3 representativo de la ladera derecha y escenarios de análisis considerados.

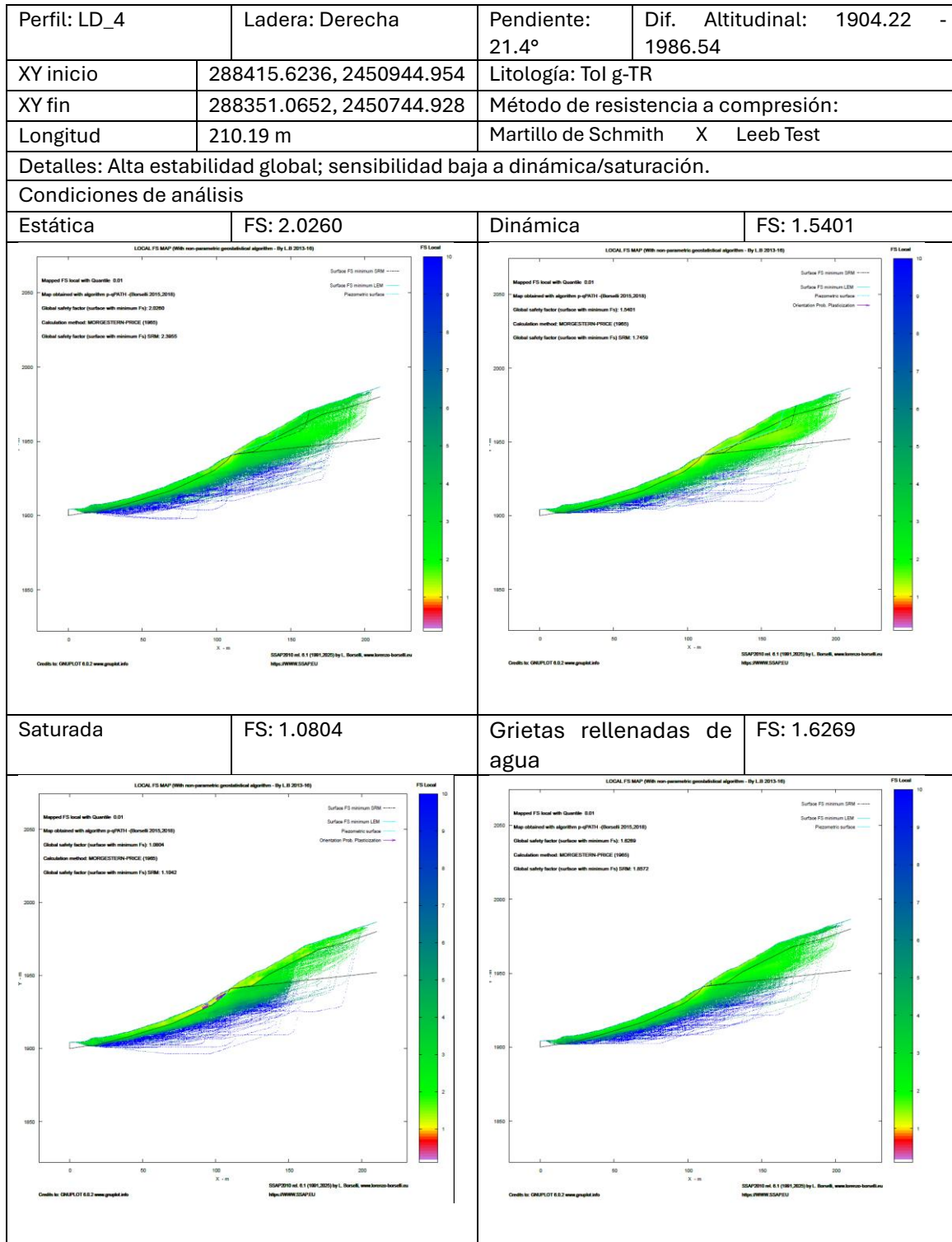


Figura B. 2. Perfil LD_4 representativo de la ladera derecha y escenarios de análisis considerados.

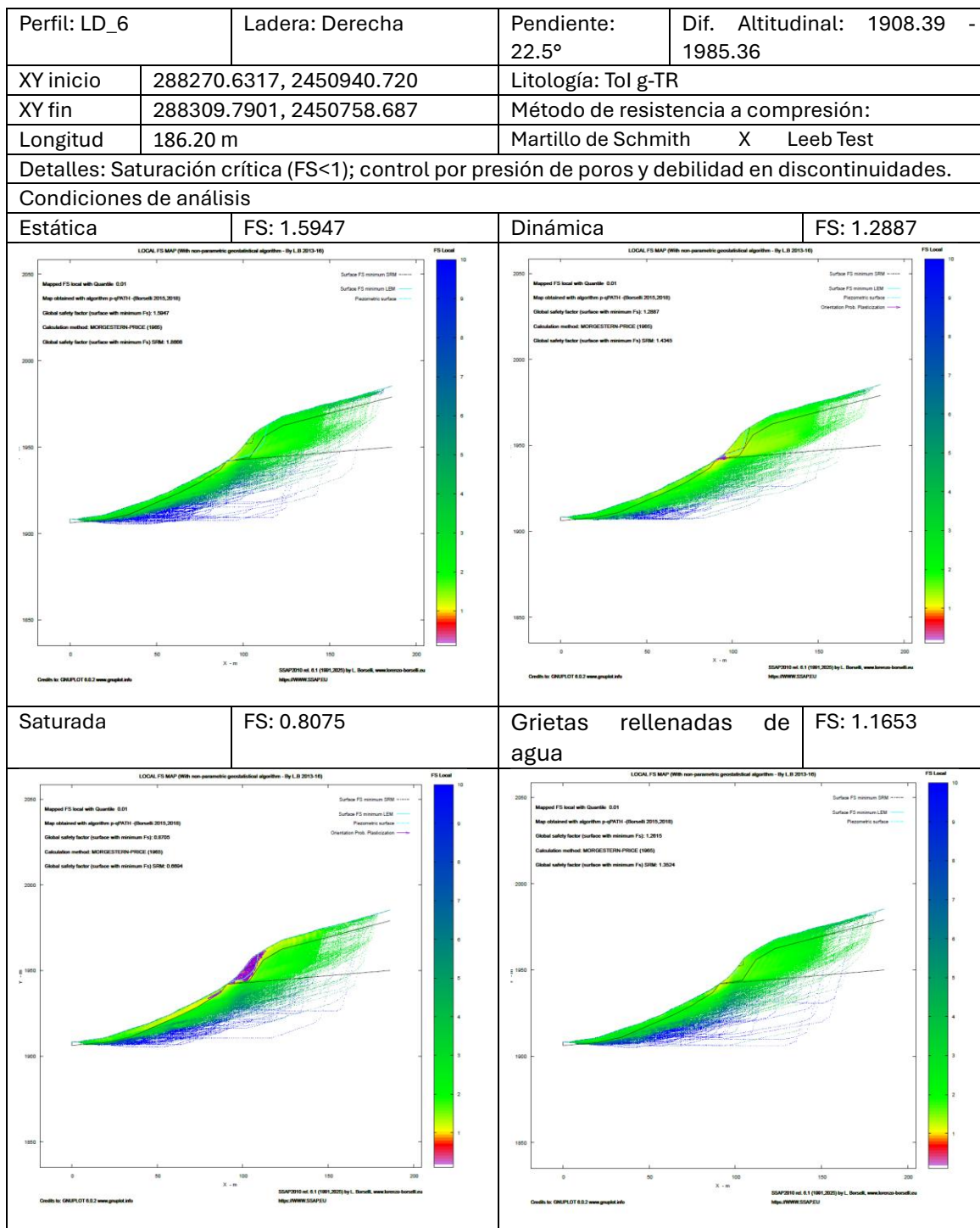


Figura B. 3. Perfil LD_6 representativo de la ladera derecha y escenarios de análisis considerados.

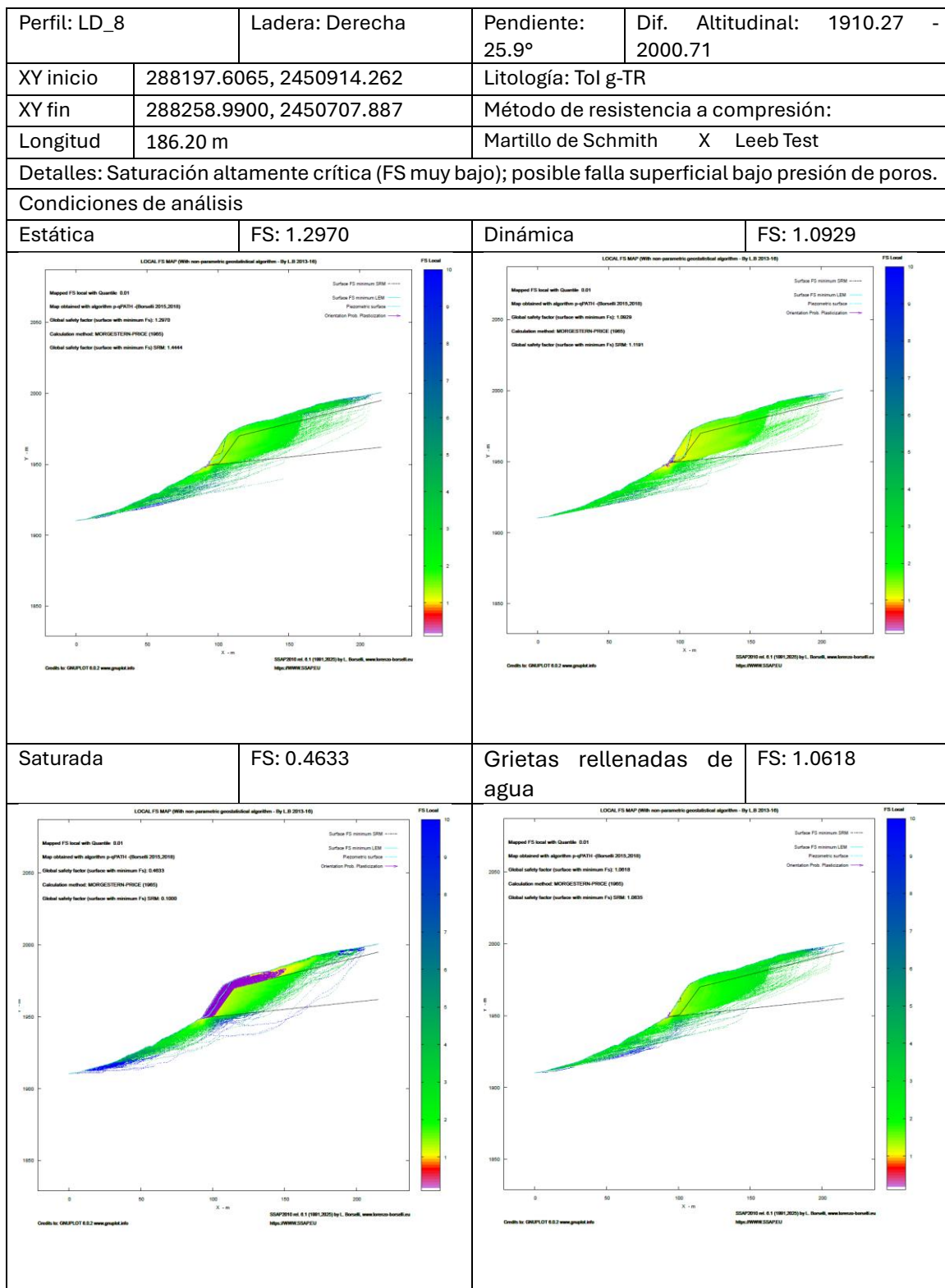


Figura B. 4. Perfil LD_8 representativo de la ladera derecha y escenarios de análisis considerados.

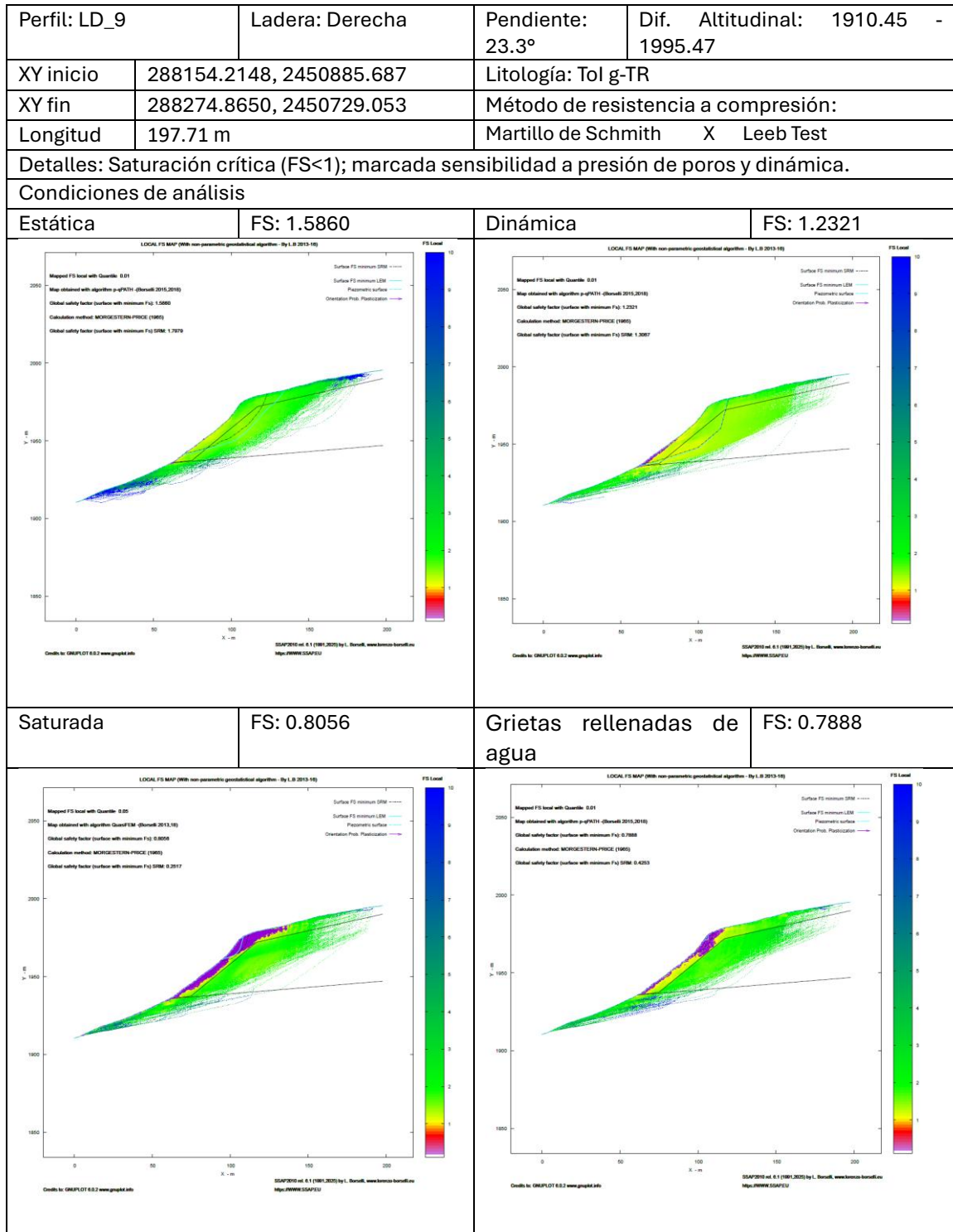


Figura B. 5. Perfil LD_8 representativo de la ladera derecha y escenarios de análisis considerados.

Anexo C. Perfiles de estabilidad – Ladera izquierda.

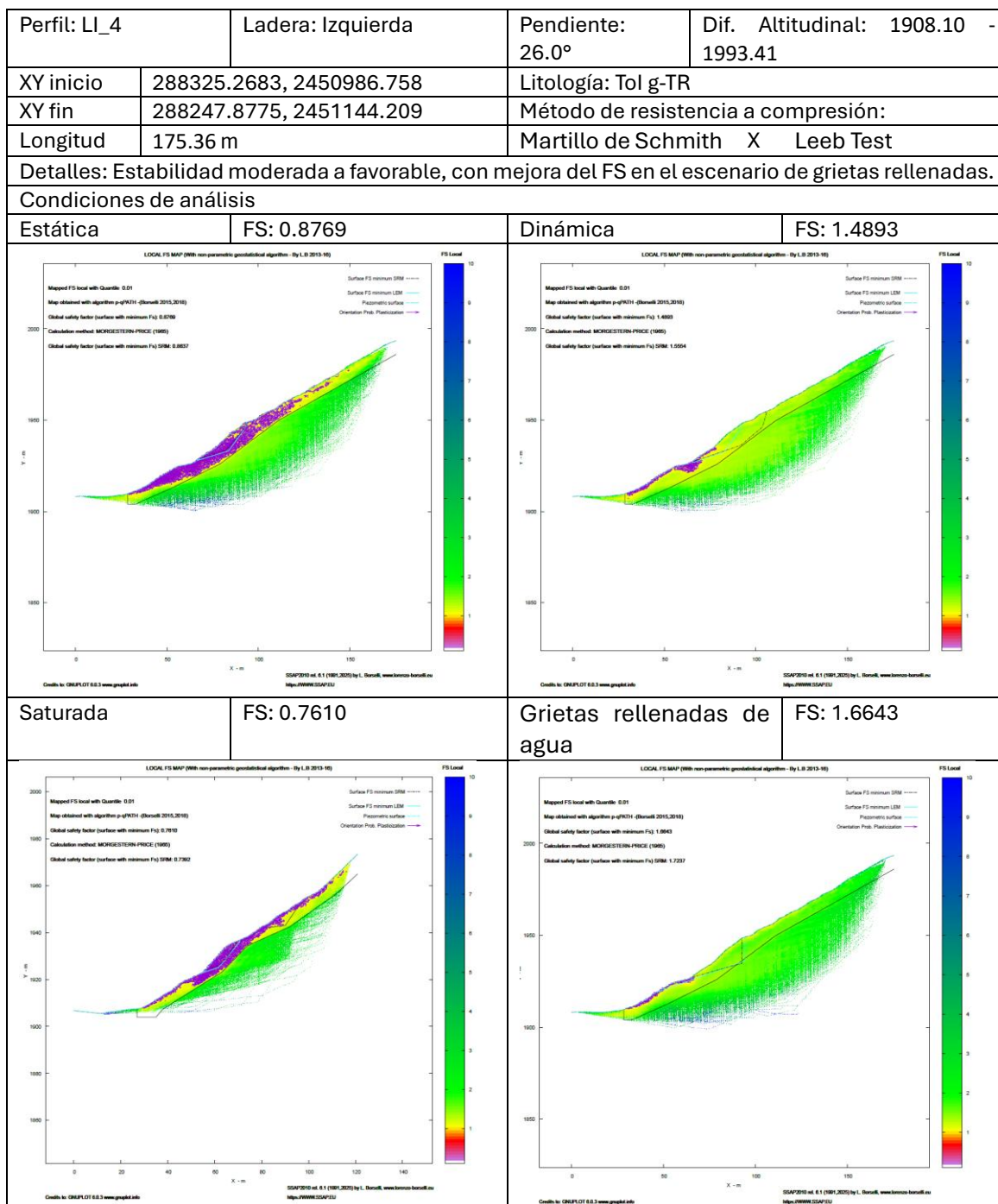


Figura C. 1. Perfil LI_4 representativo de la ladera derecha y escenarios de análisis considerados.

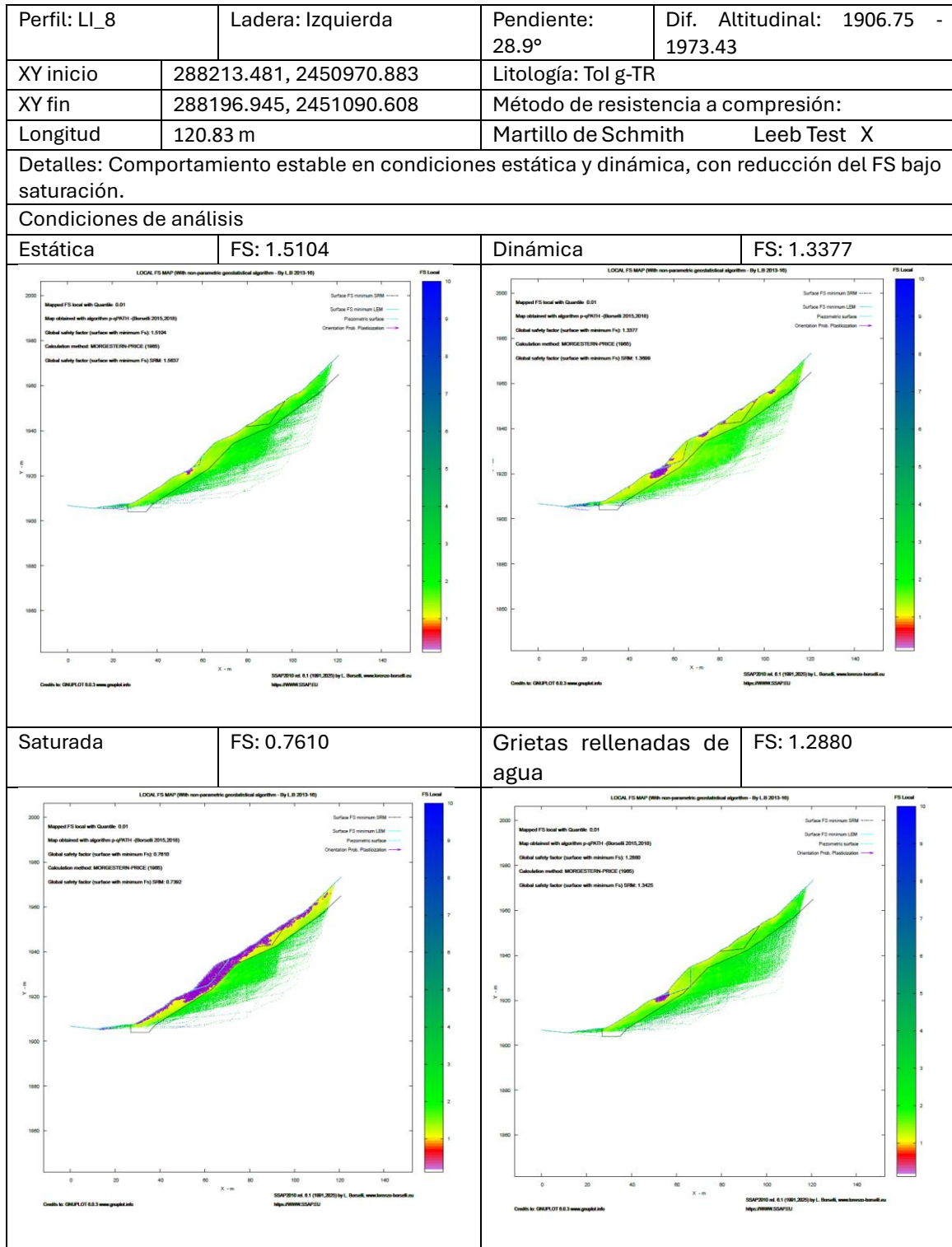


Figura C. 2. Perfil LI_8 representativo de la ladera derecha y escenarios de análisis considerados.

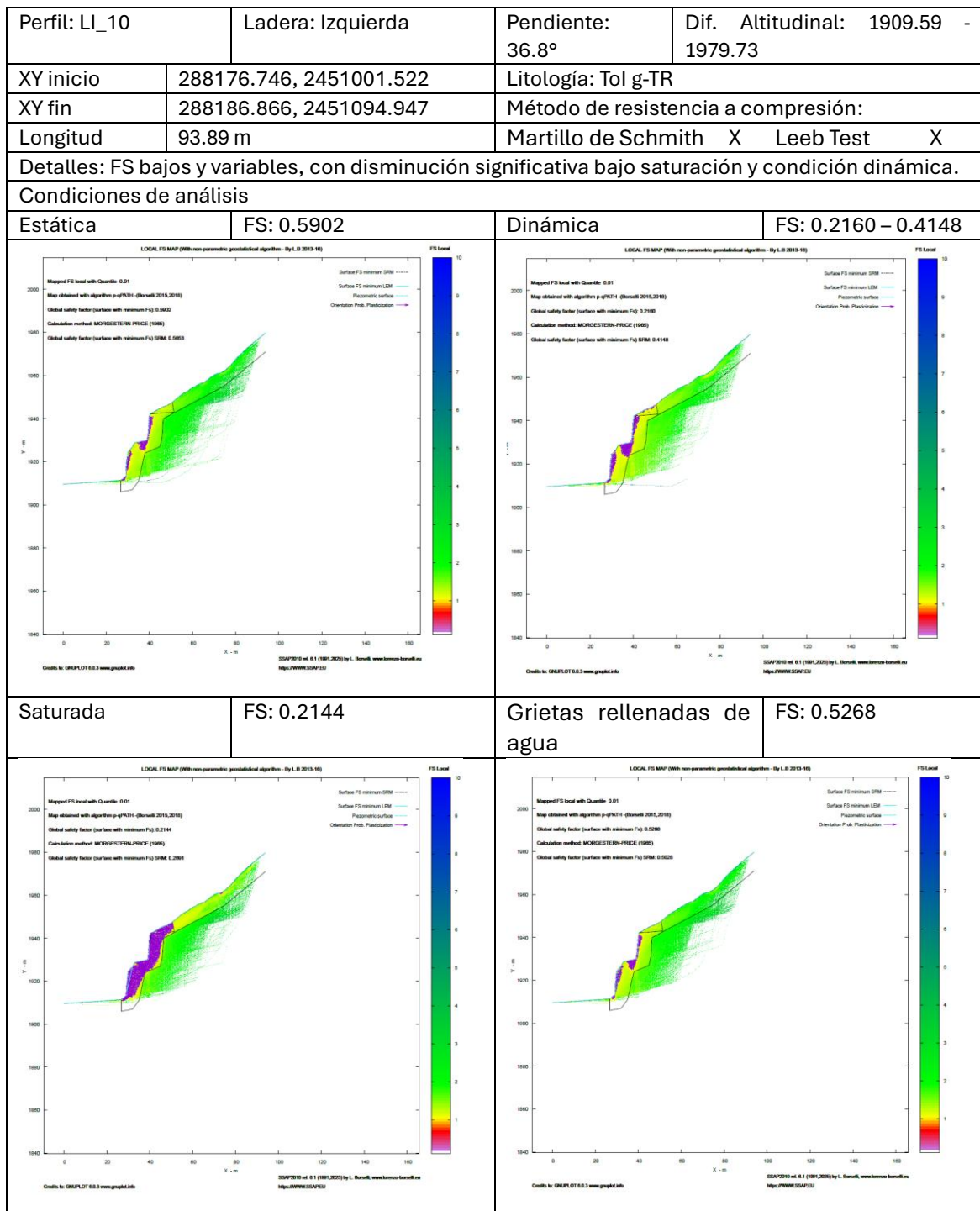


Figura C. 3. Perfil LI_10 representativo de la ladera derecha y escenarios de análisis considerados.

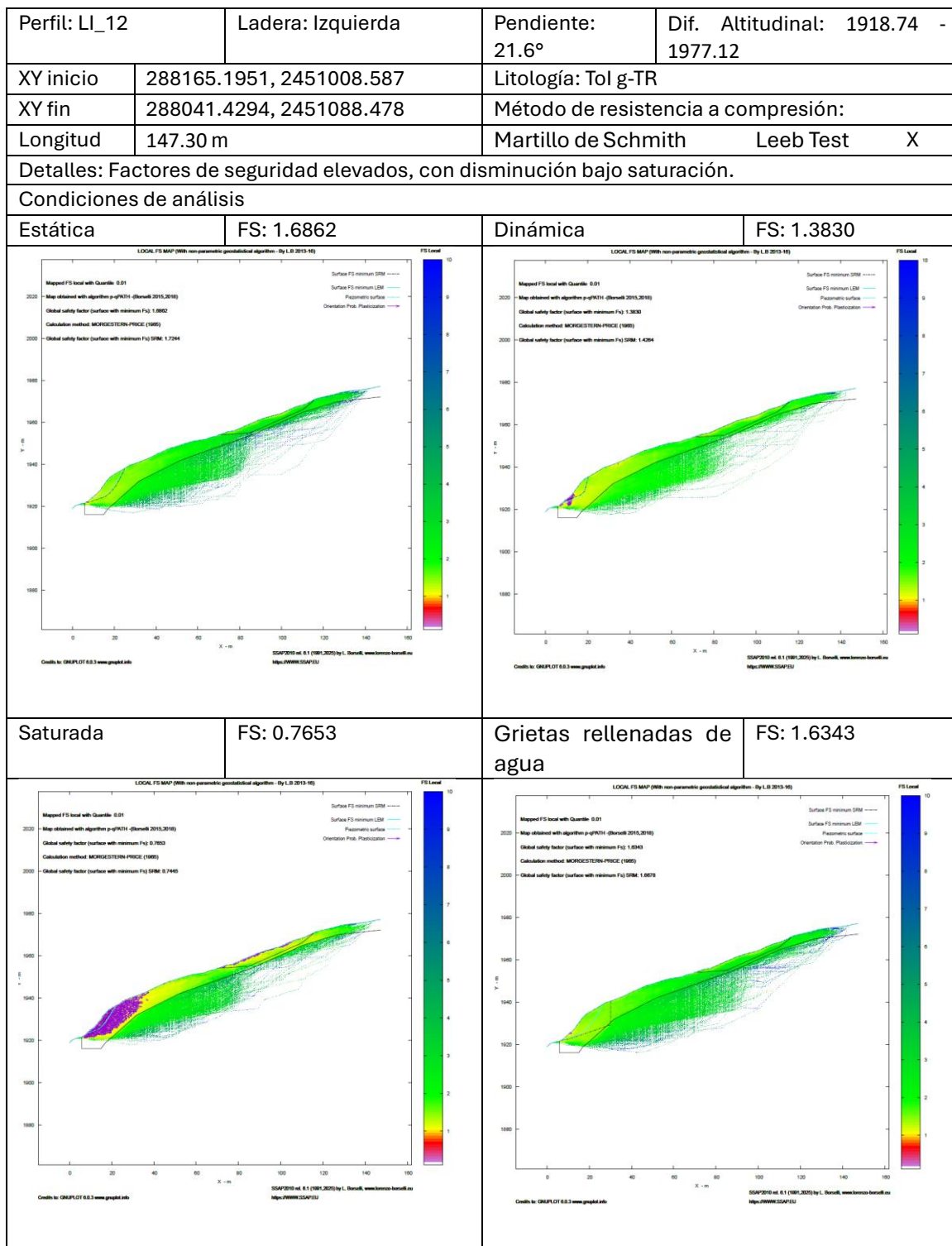


Figura C. 4. Perfil LI_12 representativo de la ladera derecha y escenarios de análisis considerados.

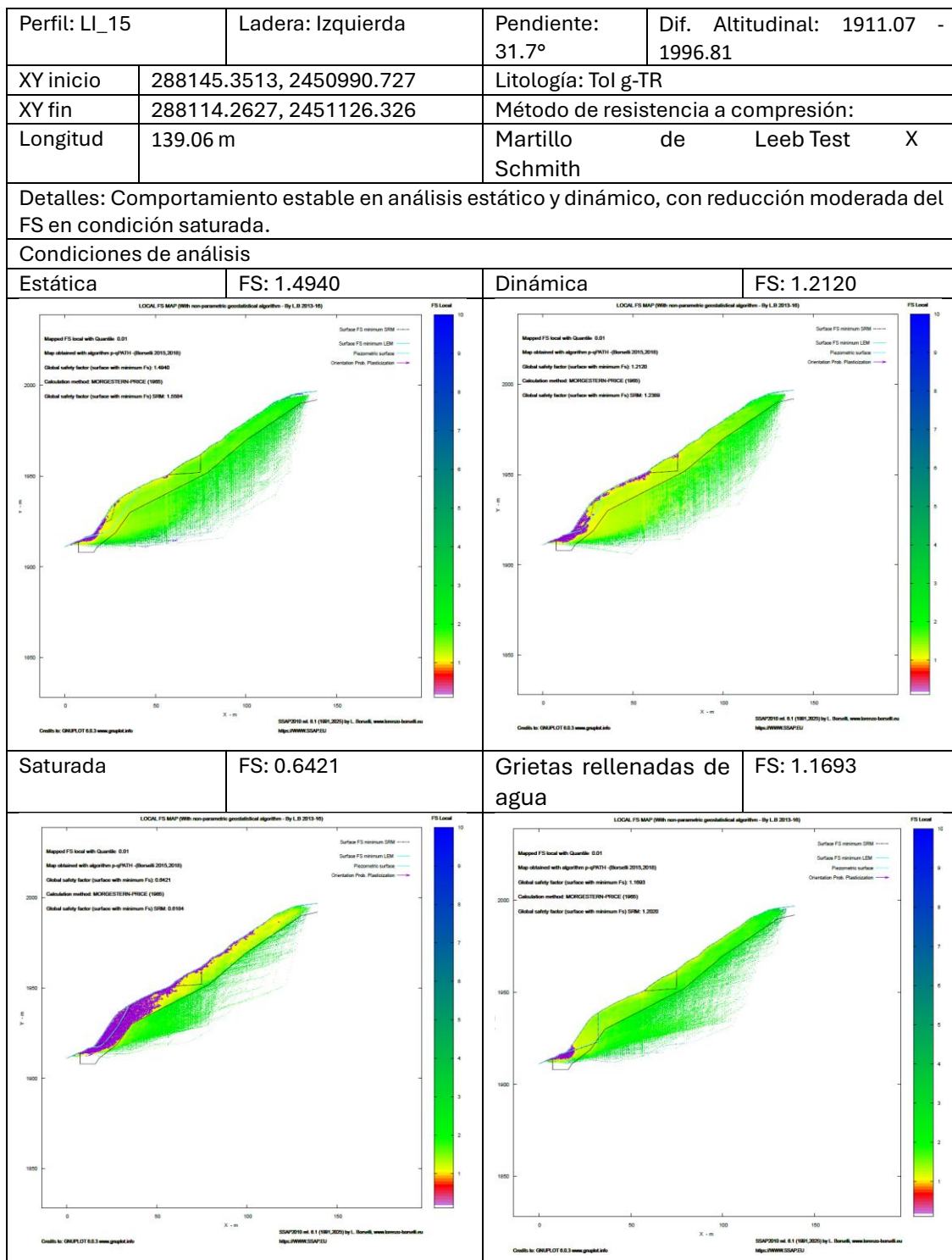


Figura C. 5. Perfil LI_15 representativo de la ladera derecha y escenarios de análisis considerados.

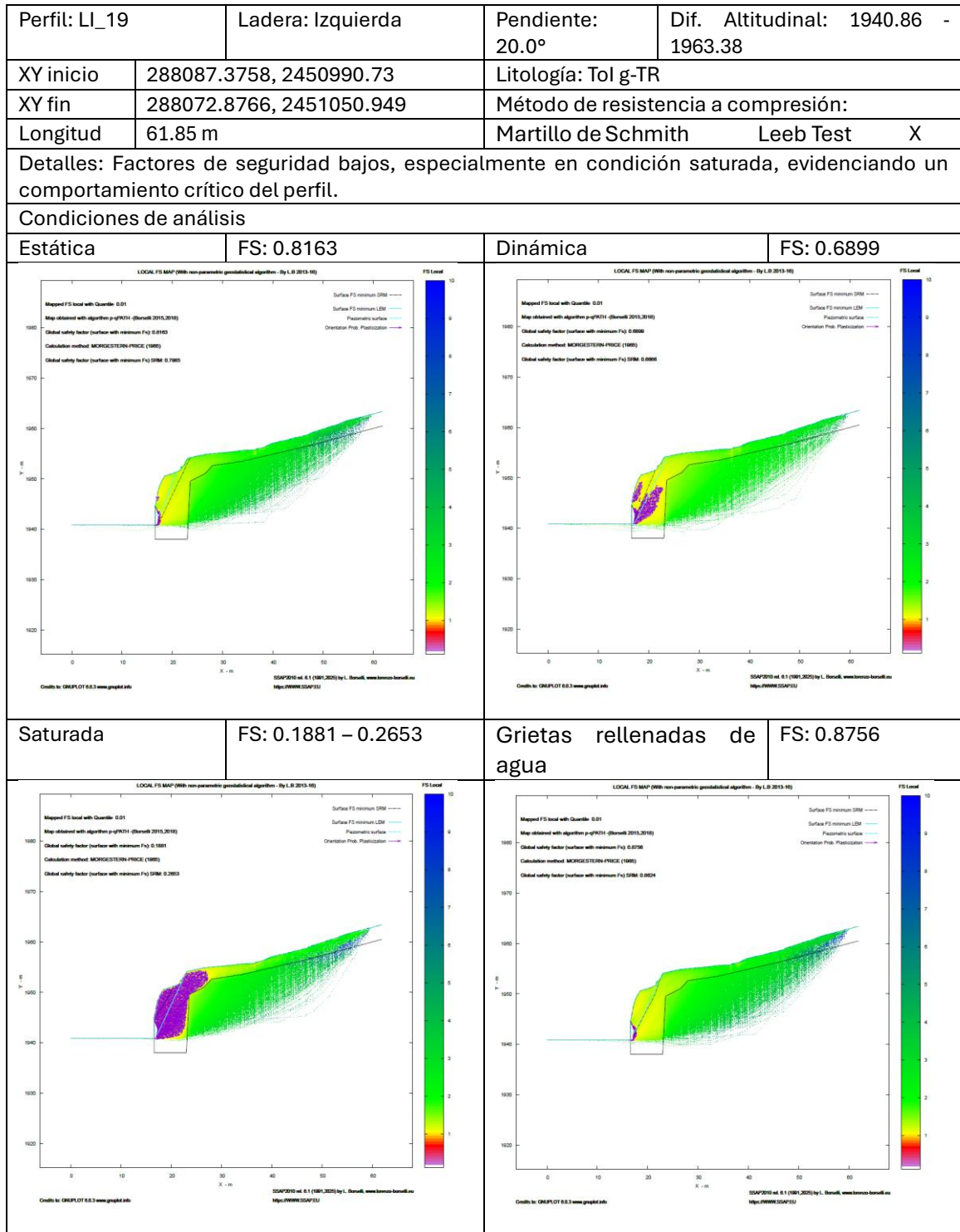


Figura C. 6. Perfil LI_19 representativo de la ladera derecha y escenarios de análisis considerados.

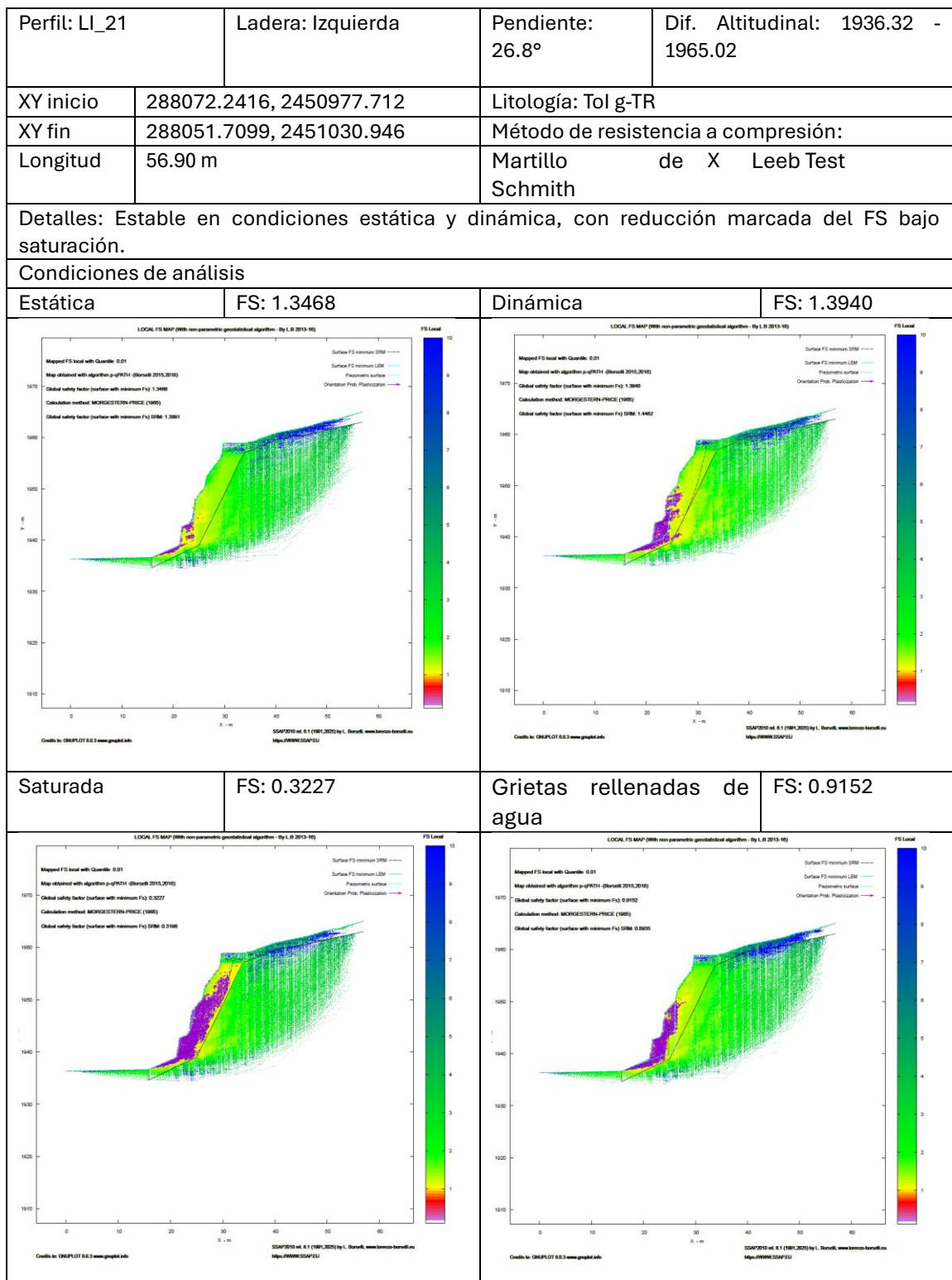


Figura C. 7. Perfil LI_21 representativo de la ladera derecha y escenarios de análisis considerados.

