CONSORCIO

GEOINTER

GEOMEKCA® INGENIERÍA

# INFORME TÉCNICO

Licitación Abreviada 2022LA-000004-0002400001

# SERVICIOS DE INGENIERÍA PARA EL ESTUDIO, DISEÑO DE PLANOS, MANO DE OBRA Y MATERIALES PARA LA ESTABILIZACIÓN DE TALUD EN CALLE MILLONARIOS

MUNICIPALIDAD DE SANTA ANA

*Elaborado para:*

MUNICIPALIDAD SantaAna

GEOMEKCA®
INGENIERÍA

INFORME TÉCNICO
DN-GMK-002-17

Municipalidad de Santa Ana

# GESTIÓN DEL RIESGO Y BLINDAJE CAMBIO CLIMÁTICO

ESTABILIZACIÓN DE TALUD CALLE MILLONARIOS

| | |
|---|---|
| CÓDIGO DOCUMENTO: | 1002.INF.22.RIE.TA |
| CÓDIGO DE PROYECTO: | 265.22.TA.MILL |
| CÓDIGO DE CLIENTE: | 125OTCR |
| FECHA DE ELABORACIÓN: | 17/08/2022 |

*Este documento se ha formateado para ser impreso por ambas caras de la hoja. Por tal razón, algunas páginas se han dejado intencionalmente en blanco.*

GEOMEKCA®
INGENIERÍA

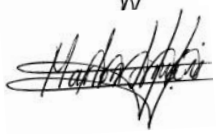
## DESCRIPCIÓN GENERAL DEL DOCUMENTO

| | |
|---|---|
| CÓDIGO DOCUMENTO: | 1002.INF.22.RIE.TA |
| TÍTULO: | GESTIÓN DEL RIESGO Y BLINDAJE CAMBIO CLIMÁTICO |
| CÓDIGO PROYECTO: | 265.22.TA.MILL |
| PROYECTO: | ESTABILIZACIÓN DE TALUD CALLE MILLONARIOS |
| CÓDIGO CLIENTE: | 125OTCR |
| CLIENTE: | Municipalidad de Santa Ana |

## CONTROL DE APROBACIONES

| | | | |
|---|---|---|---|
| ELABORADO POR: | Ing. Isaac Hernández C. | FIRMA | |
| CÓDIGO PROFESIONAL: | IC-22556 | | |
| FECHA: | 17/08/2022 | | |
| REVISADO POR: | Ing. Marlon Jiménez J. | FIRMA | |
| CÓDIGO PROFESIONAL: | IC-9247 | | |
| FECHA: | 17/08/2022 | | |
| APROBADO POR: | Ing. Marco Tapia B. | FIRMA | |
| CÓDIGO PROFESIONAL: | IC-5915 | | |
| FECHA: | 17/08/2022 | | |

## CONTROL DE REVISIONES

| | | | |
|---|---|---|---|
| REVISIÓN 1 POR: | Ing. Marlon Jiménez J. | FIRMA | |
| CÓDIGO PROFESIONAL: | IC-9247 | | |
| FECHA: | 22/09/2022 | | |
| REVISIÓN 2 POR: | Ing. Marlon Jiménez J. | FIRMA |  |
| CÓDIGO PROFESIONAL: | IC-9247 | | |
| FECHA: | 14/10/2022 | | |

## CONTROL DE COPIAS

| | | | |
|---|---|---|---|
| COPIA 1 | Cliente | FECHA: | 17/08/2022 |
| COPIA 2 | Archivo digital | FECHA: | 17/08/2022 |
| COPIA 3 | | FECHA: | |
| COPIA 4 | | FECHA: | |

*Esta página se ha dejado en blanco intencionalmente*

# CALIDAD

## Política de calidad

Geomekca Ingeniería se compromete a realizar los servicios profesionales que ofrece a sus clientes, según sus requerimientos y necesidades, aplicando las mejores prácticas aceptadas internacionalmente en el ámbito de la ingeniería y poniendo el máximo esfuerzo y el mejor criterio profesional. Así mismo, se compromete a realizar ajustes o modificaciones en caso de existir aspectos por corregir en los productos entregados, en tanto eso no implique trabajo nuevo o adicional, más allá de lo señalado en el alcance establecido para realizar dichos productos. Para ello, se compromete además a mantener los procesos de mejora continua del Sistema de Gestión de la Calidad.

## Objetivos de calidad

Operamos bajo los lineamientos de un Sistema de Gestión de la Calidad según la norma ISO 9001-2015, el cual está en proceso de perfeccionamiento para ser certificado. Nuestros objetivos de calidad son los siguientes:

- Lograr la plena satisfacción del cliente.
- Mantener la comunicación con el cliente a lo largo del proceso de elaboración del producto o servicio.
- Completar los productos en el tiempo establecido.
- Disponer de personal capacitado y consciente del estado del arte.
- Mantener el hardware y herramientas tecnológicas actualizadas y con la capacidad necesaria para todos los procesos.
- Disponer de software licenciado y herramientas de análisis de última generación.
- Disponer de bibliografía completa y actualizada sobre los temas relevantes de ingeniería y diseño.
- Aplicar los métodos de análisis más modernos y actualizados de la ingeniería a nivel internacional.

SISTEMA DE GESTIÓN ISO 9001 DE LA CALIDAD EN PROCESO DE PERFECCIONAMIENTO

**Marco Tapia**
Gerente General
Setiembre 2020

*Esta página se ha dejado en blanco intencionalmente*

# Contenido


1 Introducción ..... 19
2 Objetivo y alcance ..... 21
3 Ubicación del proyecto ..... 23
4 Evaluación del riesgo ..... 25
4.1 Metodología para la evaluación del riesgo ..... 25
4.1.1 Definición del riesgo ..... 25
4.1.2 Escalas del nivel de amenaza y la vulnerabilidad ..... 29
4.1.3 Matriz de riesgo ..... 30
4.2 Análisis de amenazas ..... 32
4.2.1 Amenaza de deslizamiento ..... 32
4.2.1.1 Deslizamientos en proceso o antecedentes de deslizamientos ..... 32
4.2.1.2 Humedad del suelo ..... 34
4.2.1.3 Pendiente promedio de la ladera ..... 35
4.2.1.4 Zonas sísmicas ..... 36
4.2.1.5 Precipitación máxima en 24 horas ..... 37
4.2.1.6 Ubicación del sitio o posición del proyecto respecto a la ladera ..... 38
4.2.1.7 Estimación de la amenaza por deslizamiento ..... 39
4.2.2 Amenaza de inundación ..... 41
4.2.2.1 Localización de zonas de amenaza con potencial de inundación ..... 41
4.2.2.2 Combinación entre la pendiente y la precipitación ..... 41
4.2.2.3 Humedad del suelo ..... 41
4.2.2.4 Vegetación predominante ..... 42
4.2.2.5 Distancia a cuerpos de agua y altura sobre el tirante ..... 43
4.2.2.6 Estimación de la amenaza por inundación ..... 43

4.2.3 Amenaza de alud torrencial ..... 44
4.2.3.1 Existencia de eventos previos de alud torrencial ..... 44
4.2.3.2 Ubicación del sitio a evaluar ..... 45
4.2.3.3 Precipitación máxima ..... 45
4.2.3.4 Zona sísmica ..... 45
4.2.3.5 Estimación de la amenaza por alud torrencial ..... 45
4.2.4 Amenaza sísmica ..... 46
4.2.4.1 Combinación entre zona sísmica y tipo de sitio ..... 46
4.2.4.2 Distancia respecto al trazo de una falla ..... 47
4.2.4.3 Combinación entre pendiente promedio y zona sísmica ..... 47
4.2.4.4 Estimación de la amenaza sísmica ..... 48
4.2.5 Amenaza volcánica y por tsunami ..... 48
4.2.6 Amenazas de origen antrópico ..... 49
4.2.6.1 Erosión por escorrentía y socavación hidráulica ..... 49
4.2.6.2 Daños por inseguridad social ..... 50
4.2.6.3 Deterioro por acumulación de desechos ..... 50
4.2.6.4 Deterioro por incendio ..... 50
4.2.6.5 Afectación a propiedades de terceros ..... 50
4.2.7 Listado de amenazas y nivel de amenaza ..... 51
4.3 Vulnerabilidad de la infraestructura ..... 52
4.3.1 Grado de exposición ..... 52
4.3.2 Valores económicos expuestos a daños ..... 54
4.3.3 Fragilidad ..... 55
4.3.4 Impactos sobre la vida humana ..... 57
4.3.5 Impactos sobre el ambiente ..... 58
4.3.6 Clasificación de la vulnerabilidad ..... 60
4.3.7 Listado de amenazas e índice de vulnerabilidad ..... 62
4.4 Evaluación del riesgo inicial ..... 63
4.4.1 Riesgo inicial por amenazas naturales ..... 63
4.4.2 Riesgo inicial por amenazas de origen antrópico ..... 66
4.5 Análisis de escenarios de cambio climático ..... 67

4.6 Información socio económica y biofísica básica disponible ..... 68
4.6.1 Datos generales ..... 68
4.6.2 Relieve ..... 70
4.6.3 Uso del suelo ..... 70
4.6.4 Geología y geomorfología ..... 70
4.6.5 Hidrografía ..... 71
4.6.6 Clima ..... 71
4.6.7 Flora y fauna ..... 71
4.6.8 Economía ..... 72
4.6.9 Desarrollo humano ..... 73
4.7 Análisis de la infraestructura pública por blindar ..... 73
4.7.1 Blindaje de infraestructura con criterio correctivo ..... 73
4.7.1.1 Evaluación del estado de la infraestructura ..... 73
4.7.1.2 Análisis del sitio y situación de la infraestructura ..... 74
4.7.1.3 Análisis de amenazas y eventos ocurridos ..... 78
4.7.1.4 Aplicación (o diseño) de instrumentos de evaluación de la infraestructura 78
4.7.1.5 Estudios de ingeniería ..... 78
4.7.2 Blindaje de infraestructura con criterio prospectivo ..... 78
4.7.2.1 Selección del terreno y evaluación del emplazamiento ..... 78
4.7.2.2 Aplicación de la normativa ..... 78
4.7.2.3 Estudios técnicos de ingeniería para el blindaje ..... 79
4.7.2.4 Identificación de opciones de diseño de infraestructura resiliente. ..... 79
4.7.2.5 Obras de contención y protección de la estructura. ..... 79
4.7.2.6 Materiales recomendados ..... 79
4.8 Opciones de blindaje y medidas para la reducción y manejo del riesgo ..... 79
4.8.1 Identificación y selección de opciones estructurales ..... 79
4.8.1.1 Diseño de las opciones de blindaje de las obras. ..... 79
4.8.1.2 Análisis de costo-beneficio de las opciones. ..... 83
4.8.2 Blindaje a través de procesos técnicos no estructurales ..... 83
4.8.2.1 Diagnóstico del proceso de gestión por blindar ..... 83

4.8.2.2 Identificación y selección de opciones no estructurales. 83
4.8.2.3 Propuesta de medidas u opciones. 85
4.8.3 Impacto de la implementación 86
4.8.4 Costo de la no implementación 86
4.9 Evaluación del riesgo residual 87
4.10 Apoyo a la gobernabilidad y el diálogo social local 89
4.10.1 Actores clave 89
4.10.2 Procesos de la gestión social 89
5 Investigación del sitio 91
5.1 Visita de campo 91
5.2 Investigación geotécnica realizada 91
5.2.1 Perforaciones SPT 91
5.2.2 Prospección geofísica 93
5.2.3 Resultados del laboratorio 95
5.3 Levantamiento topográfico 96
5.4 Modelo geotécnico 98
5.4.1 Unidades geotécnicas identificadas 98
5.4.2 Valores de las propiedades geomecánicas 98
5.4.3 Expresión gráfica del modelo geotécnico 99
6 Diseño de las obras de blindaje 101
6.1 Aspectos de seguridad y diseño 101
6.1.1 Definición del nivel de seguridad 101
6.1.2 Análisis estático 101
6.1.3 Análisis pseudoestático 102
6.1.4 Factores de seguridad admisibles 102
6.1.5 Programa utilizado en los análisis de estabilidad de taludes 103
6.2 Evaluación geotécnica de la estabilidad 104
6.2.1 Análisis de estabilidad del talud sin obras de blindaje 104
6.2.2 Análisis de estabilidad del talud con obras de blindaje 111
7 Presupuesto de las obras 117
7.1 Presupuesto de obras de la Etapa 1 117

7.2 Presupuesto de las obras de la Etapa 2 ..... 118
8 Conclusiones y recomendaciones ..... 121
9 Referencias ..... 123
10 Apéndice A: Topografía actualizada ..... 125
11 Apéndice B: Registro de Riesgos ..... 129
12 Apéndice C: Investigación geotécnica ..... 139

*Esta página se ha dejado intencionalmente en blanco*

# Lista de Tablas

Tabla 1. Escala del nivel de amenaza ..... 29
Tabla 2. Escala del Índice de vulnerabilidad ..... 30
Tabla 3. Matriz de Riesgo en función de la amenaza y de la vulnerabilidad ..... 30
Tabla 4. Matriz del riesgo por deslizamiento en términos numéricos ..... 31
Tabla 5. Estimación de la humedad del suelo, estación 84119 ..... 34
Tabla 6. Lista de amenazas relevantes ..... 51
Tabla 7. Clasificación del nivel de exposición ..... 53
Tabla 8. Clasificación del valor económico expuesto a daños ..... 54
Tabla 9. Clasificación de la fragilidad ..... 56
Tabla 10. Clasificación de impactos sobre la vida humana ..... 57
Tabla 11. Clasificación de impactos sobre el ambiente ..... 59
Tabla 12. Clasificación del Índice de vulnerabilidad ..... 60
Tabla 13. Listado de amenazas e índice de vulnerabilidad ..... 62
Tabla 14. Riesgo inicial de amenazas de origen antrópico ..... 66
Tabla 15. Índices de desarrollo humano del cantón de Santa Ana ..... 73
Tabla 16. Riesgo residual ..... 88
Tabla 17. Profundidad alcanzada en las perforaciones SPT. ..... 92
Tabla 18. Perfil estratigráfico preliminar del terreno según sondeos SPT. ..... 92
Tabla 19. Valores de $N_{SPT}$ y su variación con la profundidad. ..... 93
Tabla 20. Capas geofísicas, espesores y velocidades de onda ..... 93
Tabla 21. Ensayos geotécnicos realizados ..... 95
Tabla 22. Resultado de los ensayos geotécnicos ..... 95
Tabla 23. Descripción de las unidades geotécnicas. ..... 98
Tabla 24. Valores de las propiedades geomecánicas usadas para análisis y diseño. ..... 99
Tabla 25. Coeficiente pseudoestático horizontal con un periodo de retorno de 475 años. 102
Tabla 26. Factores de seguridad para taludes permanentes y análisis de laderas. ..... 103
Tabla 27. Resultado del análisis de estabilidad del Perfil 1, sin obras. ..... 105
Tabla 28. Resultado del análisis de estabilidad del Perfil 2, sin obras. ..... 108
Tabla 29. Resultado del análisis de estabilidad del Perfil 1, con obras de blindaje ..... 114
Tabla 30. Resultado del análisis de estabilidad del Perfil 2, con obras. ..... 115
Tabla 31. Presupuesto de la obras de la Etapa 1. ..... 118
Tabla 32. Presupuesto de la obras de la Etapa 2. ..... 119

*Esta página se ha dejado en blanco intencionalmente*

# Lista de Figuras

Figura 1. Ubicación del sitio ..... 24
Figura 2. Proceso de gestión del riesgo ..... 26
Figura 3. Componentes del análisis del riesgo ..... 28
Figura 4. Mapa de deslizamientos existentes ..... 33
Figura 5. Mapa de humedad ..... 35
Figura 6. Mapa de pendientes ..... 36
Figura 7. Mapa de zonas sísmicas ..... 37
Figura 8. Mapa de precipitaciones máximas ..... 38
Figura 9. Ubicación del deslizamiento junto a la calle ..... 39
Figura 10.Mapa de amenaza por deslizamiento ..... 40
Figura 11. Índice de Fragilidad Ambiental por amenaza a deslizamiento ..... 40
Figura 12. Combinación entre pendiente y precipitación ..... 42
Figura 13. Mapa de cobertura vegetal ..... 43
Figura 14. Mapa de amenaza por inundación ..... 44
Figura 15. Mapa de índice amenaza por alud torrencial ..... 46
Figura 16. Mapa de combinación entre pendiente y zona sísmica ..... 47
Figura 17. Mapa de amenaza sísmica ..... 48
Figura 18. Variables para la determinación de la vulnerabilidad del sitio ..... 52
Figura 19. Mapa de grado de exposición ..... 53
Figura 20. Mapa de valores económicos expuestos a daños ..... 55
Figura 21. Mapa de calificación de la condición de fragilidad ..... 56
Figura 22.Mapa de clasificación de los impactos sobre la vida humana ..... 58
Figura 23. Mapa de clasificación del nivel de impacto ambiental ..... 59
Figura 24. Mapa de estimación de la suma de vulnerabilidades ..... 61
Figura 25. Mapa de estimación del índice de vulnerabilidad ..... 61
Figura 26. Mapa de riesgo de deslizamiento ..... 64
Figura 27. Mapa de riesgo de inundación ..... 64
Figura 28. Mapa de riesgo de alud torrencial ..... 65
Figura 29. Mapa de riesgo de afectación por sismo ..... 65
Figura 30. Mapa oficial del cantón de Santa Ana ..... 69
Figura 31. Imágenes satelitales tomadas de Google Earth© ..... 75
Figura 32. Opción A: Suelo cosido – vista en planta ..... 80

Figura 33. Opción A: Suelo cosido - secciones ..... 81
Figura 34. Opción B: Suelo cosido flexible ..... 82
Figura 35. Perfil sísmico SR-1. ..... 94
Figura 36. Perfil sísmico SR-2. ..... 94
Figura 37. Levantamiento topográfico en planta. ..... 97
Figura 38. Modelo geotécnico en Perfil 1. ..... 99
Figura 39. Modelo geotécnico en Perfil 2. ..... 100
Figura 40. Vista en planta de los perfiles de análisis para la evaluación de la estabilidad. 105
Figura 41. Perfil 1. Análisis de estabilidad en condición estática, no saturado. ..... 106
Figura 42. Perfil 1. Análisis de estabilidad en condición pseudoestática, no saturado. ..... 106
Figura 43. Perfil 1. Análisis de estabilidad en condición estática, saturado. ..... 107
Figura 44. Perfil 1. Análisis de estabilidad en condición pseudoestática, saturado. ..... 107
Figura 45. Perfil 2. Análisis de estabilidad en condición estática, no saturado. ..... 109
Figura 46. Perfil 2. Análisis de estabilidad en condición pseudoestática, no saturado. ..... 109
Figura 47. Perfil 2. Análisis de estabilidad en condición estática, saturado. ..... 110
Figura 48. Perfil 2. Análisis de estabilidad en condición pseudoestática, saturado. ..... 110
Figura 49. Vista parcial de la planta de las obras de blindaje ..... 112
Figura 50. Sección A-A a lo largo del canal de drenaje de la alcantarilla pluvial. ..... 112
Figura 51. Sección 5-5 de estabilización longitudinal del talud con suelo cosido. ..... 113
Figura 52. Sección 9-9 de estabilización transversal del talud con suelo cosido. ..... 113
Figura 53. Perfil 1. Análisis de estabilidad en condición estática con obras, saturado. ..... 114
Figura 54. Perfil 1. Análisis en condición pseudoestática con obras, saturado. ..... 115
Figura 55. Perfil 2. Análisis en condición estática con obras, saturado. ..... 116
Figura 56. Perfil 2. Análisis en condición pseudoestática con obras, saturado. ..... 116

# 1 Introducción

La Municipalidad de Santa Ana ha realizado la contratación de servicios de ingeniería, bajo la modalidad de precio global o suma alzada para el diseño, anteproyecto, planos constructivos, presupuesto detallado, modelaciones e implementos a nivel de Sistema de Información Geográfica, mano de obra y materiales para la estabilidad de talud con enfoque de gestión del riesgo en calle Millonarios, distrito Piedades.

El sitio en cuestión ha mantenido por un tiempo prolongado condiciones adversas, que lo condicionan para sufrir inestabilidad causada por los procesos erosivos atribuibles a grandes concentraciones de escorrentía. Junto a esa situación, el sitio ha sido utilizado como botadero clandestino de residuos sólidos. La situación ha evolucionado al punto de que el ancho del camino se ha visto comprometido por la pérdida de terreno.

Debido a lo anterior la Municipalidad ha contratado los estudios señalados, de los cuales se entrega en este documento los resultados, que incluyen la evaluación del riesgo y el diseño conceptual de las soluciones estructurales y no estructurales requeridas para la gestión de ese riesgo en el sitio de calle Millonarios.

*Esta página se ha dejado intencionalmente en blanco*

# 2 Objetivo y alcance

El objetivo general del presente estudio es realizar el diseño integral y completo, presupuesto, planos constructivos, modelaciones e implementos a nivel de Sistema de Información Geográfica, estudio hidrológico e hidráulico de obras, mano de obra y materiales que contemplen el Enfoque de Gestión del Riesgo y reduzcan la vulnerabilidad de los pobladores del cantón ante amenazas naturales como: inestabilidad de laderas, inundaciones y sismicidad u otras, en varios sectores del cantón de Santa Ana, para el caso de un talud inestable en la ruta cantonal No. 159, conocida como calle Millonarios.

Para conseguir el objetivo indicado, se ha solicitado ejecutar un estudio integral, diseño estructural, planos constructivos, presupuesto detallado, mano de obra y materiales para la ejecución de la estructura de retención (preliminarmente muro de suelo cosido) con el fin de estabilizar el talud y disminuir la vulnerabilidad en el sector (incluye vía pública).

Por lo tanto, se han incluido dentro del alcance de este estudio, las siguientes actividades, que se denotan aquí con la misma numeración utilizada en los términos de referencia del documento de contratación:

*Actividad 2.5 Estudios preliminares*

2.5.1 Hidrología e hidráulica. Revisión de toda la información hidrológica de la zona y la zona de influencia o aporte hacia el talud o las cunetas o sistemas de drenaje existentes en los alrededores del sitio a intervenir, características morfológicas, tipologías de suelo y cobertura actual e información climática y meteorológica.

2.5.2 Levantamiento topográfico. Levantamiento topográfico como mínimo de 500 m2, sin embargo, si las obras propuestas o el análisis geotécnico requiere de un área mayor podrá aumentarse hasta 1000 m2, en los alrededores se la zona afectada.

2.5.3 Análisis geológico. Requerido para determinar la columna estratigráfica.

2.5.4 Análisis geotécnico. Debe cumplir con las normas establecidas de acuerdo con el Código de Cimentaciones de Costa Rica y a las normas de SETENA. Incluye investigación geotécnica con perforaciones tipo SPT y análisis de estabilidad de taludes mediante equilibrio límite.

2.5.5 Análisis geofísico. El análisis contempla la ejecución de un perfil sísmico de 125 metros de longitud, que se efectuará con la técnica de refracción sísmica, aunque se pueden utilizar MASW o REMI u otra equivalente.

2.5.6 Análisis estructural. Incluye tanto el diseño de la estabilización del talud, que dependería del resultado de los estudios previos como el diseño estructural del cabezal de desfogue que actualmente se encuentra y la recuperación de la ruta municipal.

2.5.7 Elaboración de planos. Elaboración de planos de las soluciones establecidas.

2.5.8 Gestión de riesgo y blindaje cambio climático. Incluye análisis integral de gestión de riesgo y cambio climático donde la propuesta del proyecto de mejora del sistema pluvial, desfogues y análisis hidrológico e hidráulico de la estabilidad de taludes. Esta actividad incluye un trabajo social comunitario con las fuerzas vivas de la comunidad.

*Actividad 2.6 Etapa de construcción*

2.6.1 Limpieza y desmonte

2.6.2 Limpieza y desmonte adicional

2.6.3 Eliminación de estructuras, servicios, existentes y obstáculos

2.6.4 Refuerzo de taludes y muros de retención

# 3 Ubicación del proyecto

La calle Millonarios, ubicada en el distrito Piedades, es gestionada por la Municipalidad de Santa Ana. Se trata de una calle vecinal, con una superficie de lastre que requiere mantenimiento continuo.

En el estacionamiento PK 1+200 de esta ruta municipal se ha presentado una situación de inestabilidad de un talud de aproximadamente 20 m de longitud y 12 m de altura, al costado noroeste. El terreno se encuentra erosionado a causa de una alta concentración de escorrentía superficial, la cual se favorece por el manejo insuficiente de las aguas pluviales.

En la Figura 1 se indica la ubicación del sitio, muy cerca de la localidad de Piedades, en una ladera de la carretera No.159.

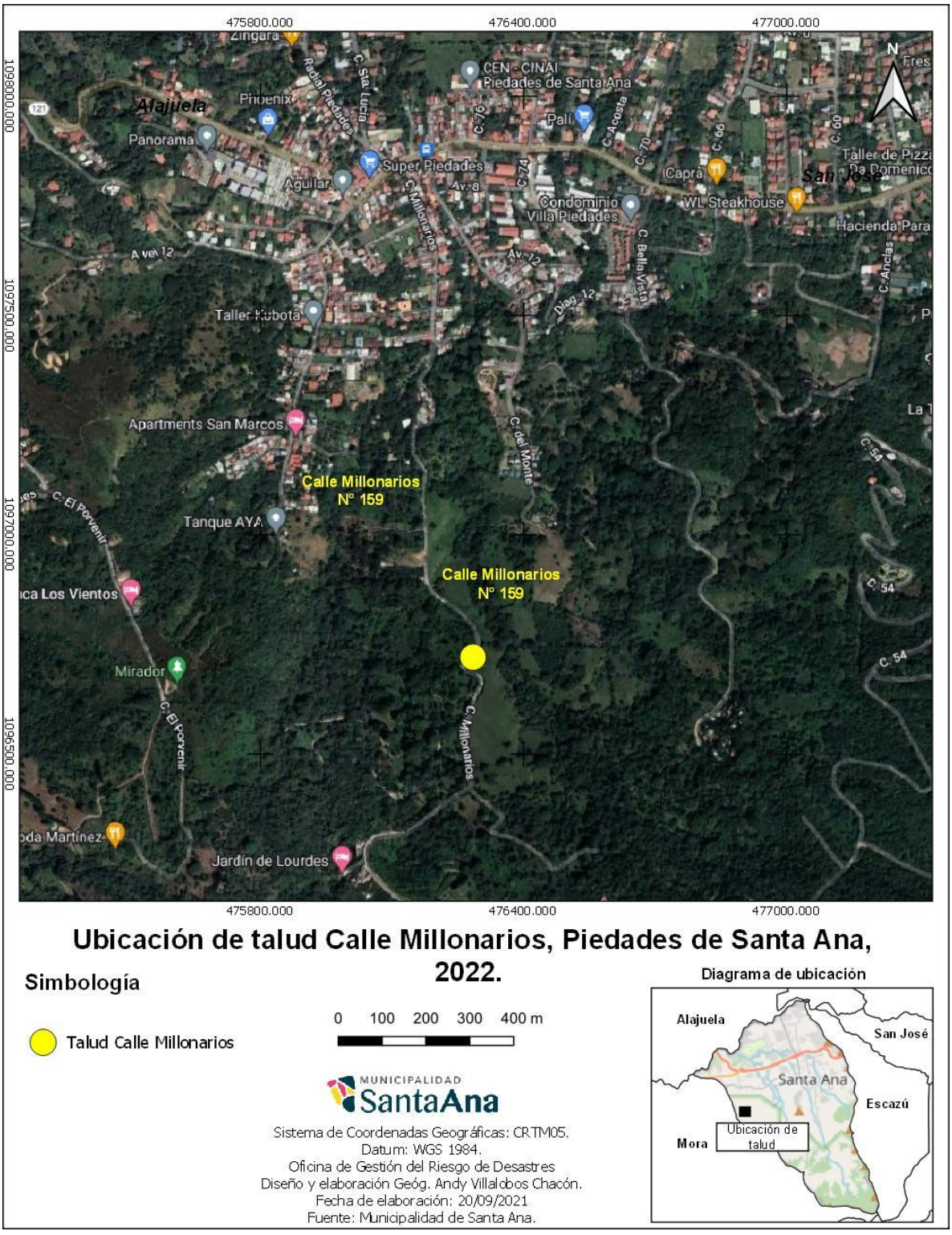



*Figura 1. Ubicación del sitio*
*Fuente: Municipalidad de Santa Ana, documento de contratación*

# 4 Evaluación del riesgo

Para la identificación y evaluación de las amenazas naturales y las consideraciones del cambio climático, se ha utilizado la metodología establecida por el MIDEPLAN (2014). Se omite de este informe la explicación de esta metodología y se remite, al lector interesado, a la fuente original, que puede ser descargada del sitio web del Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica de Costa Rica.

Este estudio se concentra en la evaluación del riesgo asociado a un sector de la calle Millonarios, en el cantón de Santa Ana, según el proceso de contratación 2022LA-000004-0002400001. El objetivo principal es, a partir de un enfoque de gestión del riesgo, realizar una evaluación completa, incluyendo la conceptualización de acciones de blindaje estructurales y no estructurales para reducir la vulnerabilidad de los pobladores del cantón, en relación, en este caso, con un sector de la calle Millonarios donde un talud ha presentado problemas de inestabilidad.

Para conseguir lo anterior, es necesario realizar una evaluación del riesgo, la cual se presenta con detalle en este capítulo.

## 4.1 Metodología para la evaluación del riesgo

Dado que existen numerosas metodologías para la evaluación del riesgo, resulta importante explicar cómo se realizó en este caso.

### 4.1.1 Definición del riesgo

El proceso de la evaluación del riesgo, que forma parte del proceso de gestión, se ilustra de manera conceptual en la Figura 2, según lo define la norma ISO 31000-2018 (Inteco, 2018).

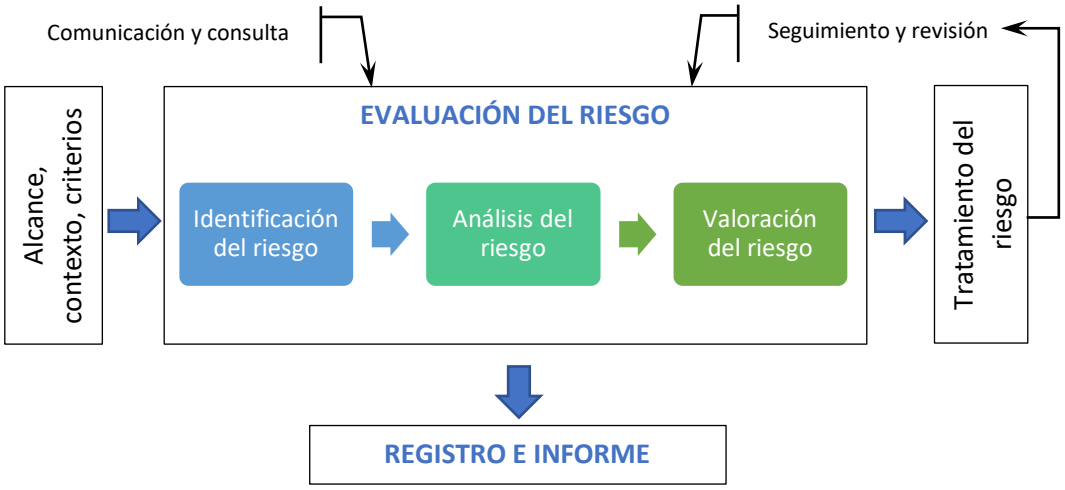



*Figura 2. Proceso de gestión del riesgo*

Aunque el proceso de la gestión del riesgo – y su evaluación – se presentan frecuentemente como secuenciales, en la práctica se trata de procesos iterativos.

Ahora bien, existen diversas formas de definir el riesgo. Por ejemplo, Aven (2018) o SRA (2018) definen el riesgo como "el concepto mental que existe cuando se considera una actividad en el futuro (aun si este riesgo no es medido o caracterizado). Comprende dos elementos principales: (i) valores expuestos, consecuencias con respecto a algo que los humanos valores y (ii) las incertidumbres.". Frantzova (2021) lo define como "la probabilidad de consecuencias dañinas o pérdidas esperadas (muertes, heridas, daños a la propiedad, disrupción de actividades económicas, ambientales y de modo de vida) resultante de las interacciones entre amenazas naturales o inducidas por los humanos y condiciones oportunas". La norma ISO 31000-2018, por su parte, define el riesgo como el "efecto de la incertidumbre sobre los objetivos." (Inteco, 2018). De manera que hay un amplio margen para definir cómo evaluar el riesgo.

Por otra parte, existen expresiones numéricas, algunas más complejas y otras más sencillas para cuantificar el riesgo. Mora (2022) opina que el riesgo es complicado de calcular y lo define como "la probabilidad, condicionada, del daño que podría generarse por la relación de convolución entre una amenaza y los elementos vulnerables y expuestos". Utilizando esta definición, se expresa el riesgo a partir del Teorema de la Probabilidad Total, por medio de la ecuación siguiente:

$$R = EDP = v(p) = \sum_{i=1}^{n} Pr(P > p|evento\ i) \times fA(evento\ i)$$

donde

| | |
|---|---|
| $R = EDP = v(p)$ | es la tasa de excedencia de daños y pérdidas $p$ |
| $fA(evento\ i)$ | es la frecuencia anual del evento i |
| $Pr(P > p \mid evento\ i)$ | es la probabilidad de que la pérdida $P$ sea mayor que $p$ en el i-ésimo evento |

Resulta entonces que $v(p)$ equivale a la sumatoria de las pérdidas en todos los elementos expuestos bajo todos los escenarios de la amenaza considerada.

Por lo tanto, el cálculo del riesgo requiere un conjunto importante de datos obtenidos de fuentes confiables. A pesar de lo anterior, es ampliamente aceptado el cálculo numérico del riesgo como el producto de la amenaza por la vulnerabilidad o, usando términos equivalentes, de la probabilidad de ocurrencia de una amenaza por las consecuencias (o impactos) derivadas de su ocurrencia (se pueden citar, por ejemplo, NSW (2014), NCHRP (2018)). Esta forma de cálculo es equivalente a la que se presenta en la ecuación de arriba. Así, para este estudio particular, se ha optado por este método de evaluación más simple del riesgo.

La valoración del riesgo se realiza para cada una de las amenazas identificadas, a partir de la combinación de la probabilidad de ocurrencia de dicha amenaza (nivel de amenaza, A) y la vulnerabilidad (V). Se puede entonces expresar numéricamente el riesgo con la siguiente relación:

$$R = A \times V$$

donde

$R$ = riesgo
$A$ = Nivel de amenaza
$V$ = Índice de vulnerabilidad

En este caso se expresan las variables $A\ y\ V$ en un formato geográfico y numérico, de manera que la distribución del riesgo se pueda asociar a la posición de una determinada estructura (en este caso, el tramo evaluado en la calle Millonarios), específicamente para las amenazas naturales consideradas, y sólo de manera numérica para las amenazas de origen antrópico. La generación de los insumos para la estimación del nivel de amenaza y el índice de vulnerabilidad es realizada mediante el sistema de información geográfica y su resultado final es una clasificación del sitio evaluado según la escala de riesgo.

La evaluación del riesgo se ilustra gráficamente en la Figura 3. Se ha representado, como ejemplo, el caso del riesgo por deslizamiento. Sin embargo, la estructura lógica del cálculo es la misma para las otras amenazas identificadas.

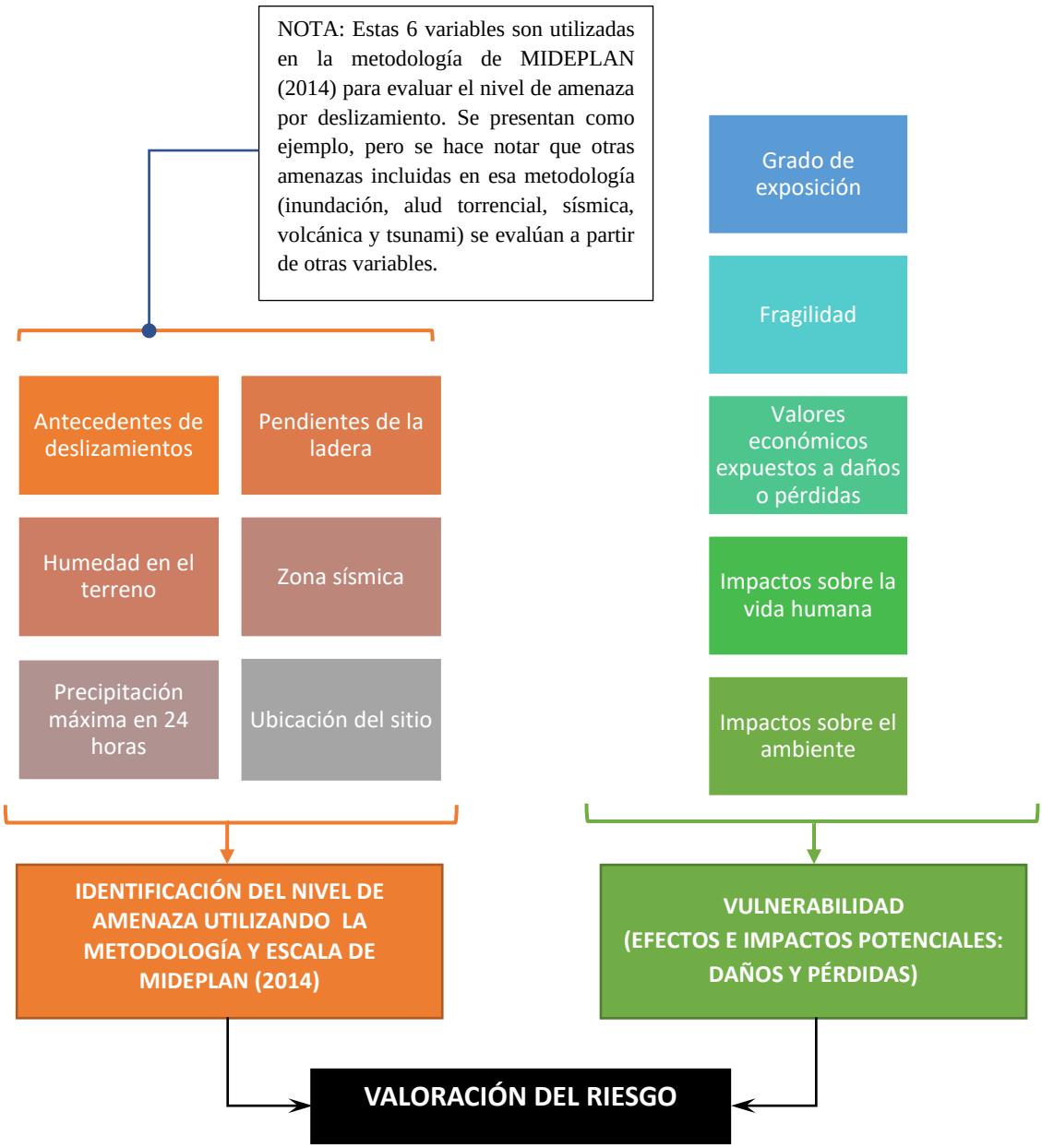



*Figura 3. Componentes del análisis del riesgo*

### 4.1.2 Escalas del nivel de amenaza y la vulnerabilidad

El nivel de amenaza, según el método de MIDEPLAN (2014) se valora en una escala que va de 1 a 5. Se ha utilizado la misma escala para las amenazas naturales y las de origen antrópico, descritas en la sección 4.2.6. Un valor de 1 representa un nivel de amenaza muy bajo, mientras que uno de 5 representa un nivel de amenaza muy alto. En la Tabla 1 se describe la escala del nivel de amenaza que se ha utilizado. La descripción de cada nivel ha sido modificada a partir del modelo de MIDEPLAN (2014).

*Tabla 1. Escala del nivel de amenaza*

| Descripción del nivel de amenaza | Calificación del nivel de amenaza | Nivel de amenaza |
|---|---|---|
| El desarrollo de la obra no tiene necesidad de inversiones adicionales para la reducción del riesgo. | Nula a muy baja | 1 |
| Se podría requerir un monto mínimo de inversiones adicionales para la reducción del riesgo. | Baja | 1,01 a 2,00 |
| La amenaza no es una limitante para la obra, pero requiere considerar distintas alternativas y la inversión para la reducción del riesgo es indispensable. | Media | 2,01 a 3,00 |
| La inversión requerida para la reducción de riesgo es considerable. | Alta | 3,01 a 4,00 |
| La amenaza es inminente o ya afecta a las estructuras. Podría implicar buscar otro emplazamiento para la obra, a menos que se considere estratégica su localización. | Muy alta | 4,01 a 5,00 |

El índice de vulnerabilidad representa los posibles impactos que producen daños y pérdidas. La escala del índice de vulnerabilidad utilizada (ver sección 4.3), va desde un valor de 1 para una vulnerabilidad muy baja o nula hasta un máximo de 4, para una vulnerabilidad elevada. En la Tabla 2 se presenta la descripción de la escala utilizada para esta variable.

Es importante tener en mente que el concepto de vulnerabilidad está relacionado con las condiciones de la infraestructura que se evalúa y los impactos asociados. Este valor varía para cada amenaza que se considera.

*Tabla 2. Escala del Índice de vulnerabilidad*

| NIVEL DE DAÑO ASOCIADO | CLASIFICACIÓN DE LA VULNERABILIDAD | ÍNDICE DE VULNERABILIDAD (V) |
|---|---|---|
| Daño leve o nulo | Muy baja a nula | 1 |
| Daño moderado | Baja | 2 |
| Daño grave | Media | 3 |
| Daños muy graves o irreparables | Elevada | 4 |

La evaluación del nivel de amenaza y del índice de vulnerabilidad se realiza para cada una de las amenazas identificadas. Así, cada amenaza está asociada a un determinado nivel de riesgo.

### 4.1.3 Matriz de riesgo

Se deriva, de las discusiones anteriores, que la escala de riesgo es producto de la combinación del nivel de amenaza y la vulnerabilidad (A y V). En este caso, el riesgo se ha clasificado con el criterio que se explica en la matriz que se presenta a continuación, en la Tabla 3.

*Tabla 3. Matriz de Riesgo en función de la amenaza y de la vulnerabilidad*

| | | NIVEL DE AMENAZA | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | MUY BAJO | BAJO | MEDIO | ALTO | MUY ALTO |
| VULNERABILIDAD | MUY BAJA O NULA | Riesgo bajo | Riesgo bajo | Riesgo bajo | Riesgo bajo | Riesgo medio |
| | BAJA | Riesgo bajo | Riesgo bajo | Riesgo medio | Riesgo medio | Riesgo medio |
| | MEDIA | Riesgo bajo | Riesgo medio | Riesgo medio | Riesgo elevado | Riesgo elevado |
| | ELEVADA | Riesgo bajo | Riesgo medio | Riesgo elevado | Riesgo elevado | Riesgo elevado |

En términos numéricos, la matriz del riesgo se expresa en los términos de la Tabla 4, generada a partir de la aplicación de la ecuación $R=A\times V$ y del criterio de la Tabla 3.

*Tabla 4. Matriz del riesgo por deslizamiento en términos numéricos*

| | | | NIVEL DE AMENAZA | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | MUY BAJO | BAJO | MEDIO | ALTO | MUY ALTO |
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| VULNERABILIDAD | MUY BAJA O NULA | 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | BAJA | 2 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| | MEDIA | 3 | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 |
| | ELEVADA | 4 | 4 | 8 | 12 | 16 | 20 |

En resumen, valores del riesgo, R, iguales o menores a 4 se consideran bajos. Más de 4, hasta 10, corresponde a riesgo medio y, finalmente, valores de R por encima de 10, equivale a riesgos altos.

Debe notarse el uso de un código de colores de tipo “semafórico”, según el cual, el riesgo bajo (color verde) representa un nivel aceptable, el riesgo medio (color amarillo) representa un nivel “gestionable” y el riesgo alto (color rojo) representa un riesgo inaceptable.

De acuerdo con lo anterior, se deriva también que un riesgo bajo no requiere, por lo general, acciones de respuesta, el riesgo medio, por lo general, podría requerir acciones de respuesta (según lo determine la conveniencia de la Administración) y el riesgo alto necesariamente requiere acciones de respuesta que consigan llevar el nivel de riesgo al menos a un nivel medio.

El procedimiento requiere, como primer paso, la identificación de las amenazas y luego la evaluación del riesgo según se ha descrito. Cabe señalar que algunas amenazas (y su correspondiente vulnerabilidad) pueden ser expresadas en términos cartográficos utilizando mapas (sobre todo las amenazas naturales, pues su origen se puede ubicar geográficamente), pero otras, en particular las de origen antrópico, no son susceptibles de ese tratamiento.

## 4.2 Análisis de amenazas

La metodología planteada por el MIDEPLAN (2014) busca determinar el tipo de amenazas naturales que podrían afectar un sitio, al evaluar seis posibles eventos de origen natural que podrían afectar el sitio en estudio. Así, se realiza la evaluación de la amenaza por deslizamiento, por inundación, por alud torrencial, por amenaza sísmica, por actividad volcánica y por tsunami. Evidentemente, para cada sitio en particular, algunas de estas amenazas son plausibles y otras no.

A continuación, se presentan los resultados de la estimación de cada una de las amenazas naturales para cada uno de los escenarios evaluados, en el sitio denominado "calle Millonarios". Al final de esta sección, en el apartado 4.2.6, se discute la estimación de las amenazas de origen antrópico.

### 4.2.1 Amenaza de deslizamiento

Para la evaluación de la amenaza por deslizamiento, el MIDEPLAN (2014) propone la utilización de la matriz de ocurrencia a deslizamientos definida como la interacción entre distintas variables, como lo son: la pendiente de la ladera, la humedad del terreno, la intensidad de las lluvias y la ocurrencia de sismos que disparen el evento de inestabilidad, así como también condicionantes que aumentan la susceptibilidad del entorno, como lo son: la presencia o antecedentes de deslizamientos y la ubicación del sitio respecto a la ladera. A continuación, se hace una descripción de cada una de las variables y se muestra el resultado final de la interacción de la matriz de amenaza a deslizamiento.

#### *4.2.1.1 Deslizamientos en proceso o antecedentes de deslizamientos*

Para la estimación de esta variable fue necesaria la revisión de eventos previos en el sitio de interés, en un radio mínimo de 1500 m alrededor del sitio del proyecto. Es importante indicar que el sitio como tal presenta un deslizamiento de suelo el cual ha sido influenciado por las pérdidas de agua desde una tubería. Adicionalmente, se revisaron los mapas de amenaza de la Comisión Nacional de Emergencias (Mapa de Amenazas y Peligros Naturales del Cantón de Santa Ana (CNE, 2022)) y otras fuentes.

A partir de la revisión, se encontró que la Municipalidad de Santa tiene identificado dos procesos de deslizamientos a menos de 1500 m, el de mayor tamaño nombrado "Deslizamiento La Gruta" ubicado en el Barrio Montaña y Sol, el cual se encuentra

identificado como activo y ha sido reportado desde setiembre de 2021 (27/09/2021) (Municipalidad de Santa Ana, 2022). El segundo deslizamiento, ubicado en Hacienda Paraíso, muestra ser un desprendimiento de la ladera con poca actividad y fue reportado en noviembre de 2020 (20/11/2020) (Municipalidad de Santa Ana, 2022). Ambos se encontraban descritos en un archivo tipo "shapefile" del geoportal de archivos de información geográfica de la Municipalidad de Santa Ana (2022). En la Figura 4 se muestra la ubicación de cada uno de estos deslizamientos y la posición del sitio del proyecto.

De esta manera, se ha definido que el sitio evaluado **sí** ha presentado procesos de deslizamientos, lo que le asigna un nivel de incidencia muy alto y una calificación de 5 para este aspecto de la determinación de la amenaza en la metodología de MIDEPLAN (2014).

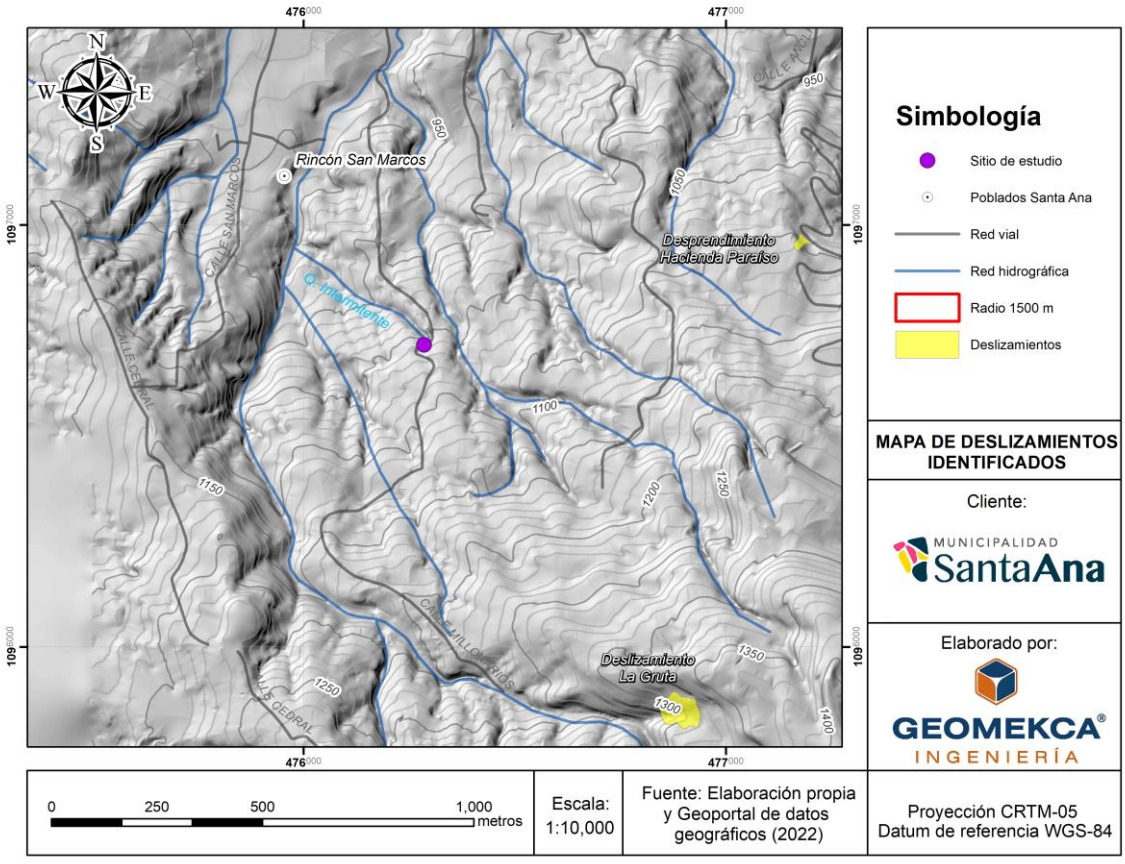



*Figura 4. Mapa de deslizamientos existentes*

#### *4.2.1.2 Humedad del suelo*

La humedad del suelo se ha estimado a partir de los promedios mensuales de precipitación. Se considera que, donde se haya superado los 125 mm/mes (que representan el umbral de evapotranspiración potencial), se genera un aumento considerable de la humedad del terreno.

A partir de la información solicitada al Instituto Meteorológico Nacional (IMN, 2022) para tres estaciones cercanas (84119 Santa Ana, Guachipelín, 84111 Lornessa, Santa Ana y 84199 Belén) se ha determinado una humedad del suelo baja. En la Tabla 5 se presenta, como ejemplo, la estimación para la estación 84119 Santa Ana, Guachipelín.

*Tabla 5. Estimación de la humedad del suelo, estación 84119*

| Mes | Precipitación (mm) | Días con lluvia | Valor asignado |
|---|---|---|---|
| Enero | 4.9 | 1 | 0 |
| Febrero | 8.3 | 1 | 0 |
| Marzo | 15.8 | 2 | 0 |
| Abril | 71.2 | 7 | 0 |
| Mayo | 224.1 | 17 | 1 |
| Junio | 213.5 | 19 | 1 |
| Julio | 162.3 | 17 | 1 |
| Agosto | 222 | 20 | 1 |
| Septiembre | 317.8 | 24 | 2 |
| Octubre | 307.9 | 25 | 2 |
| Noviembre | 135.1 | 14 | 1 |
| Diciembre | 29.8 | 6 | 0 |
| Total | 1712.7 | 153.0 | 9.0 |

En las otras estaciones el resultado ha sido el mismo, indicando una humedad del suelo con un parámetro de 9 que representa un nivel de **incidencia bajo,** con una calificación de 2. En la Figura 5 se presenta el mapa de humedad que se utilizó para el álgebra de mapas.

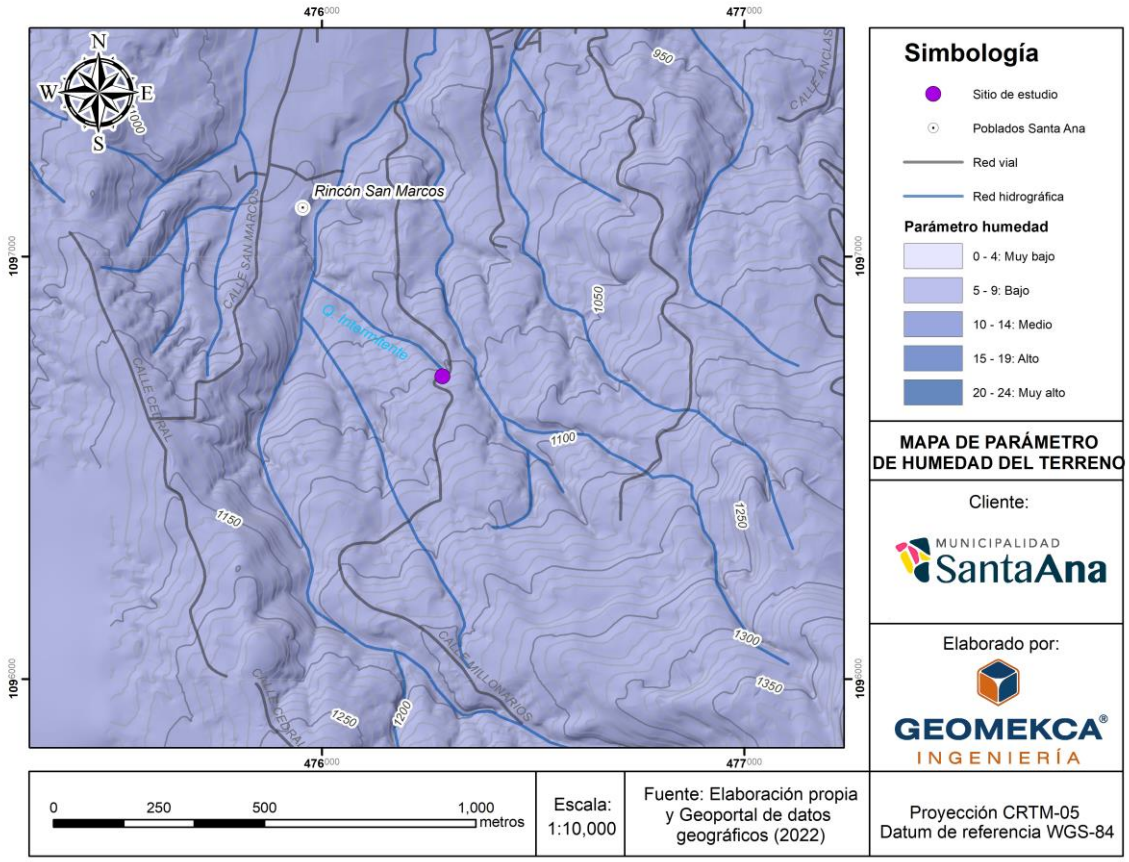



*Figura 5. Mapa de humedad*

### *4.2.1.3 Pendiente promedio de la ladera*

La pendiente promedio del sitio se calculó a partir del modelo de elevación digital, el cual fue estimado con las curvas de nivel en escala 1:1000, tomadas del Geoportal de la Municipalidad de Santa Ana para todo el cantón. El sitio del estudio se cataloga con pendientes moderadamente escarpadas o acolinadas, al cual se le asignó un nivel de incidencia medio, con un puntaje de 3. En la Figura 6 se presenta la variación de las pendientes para un área importante cercano al sitio de estudio.

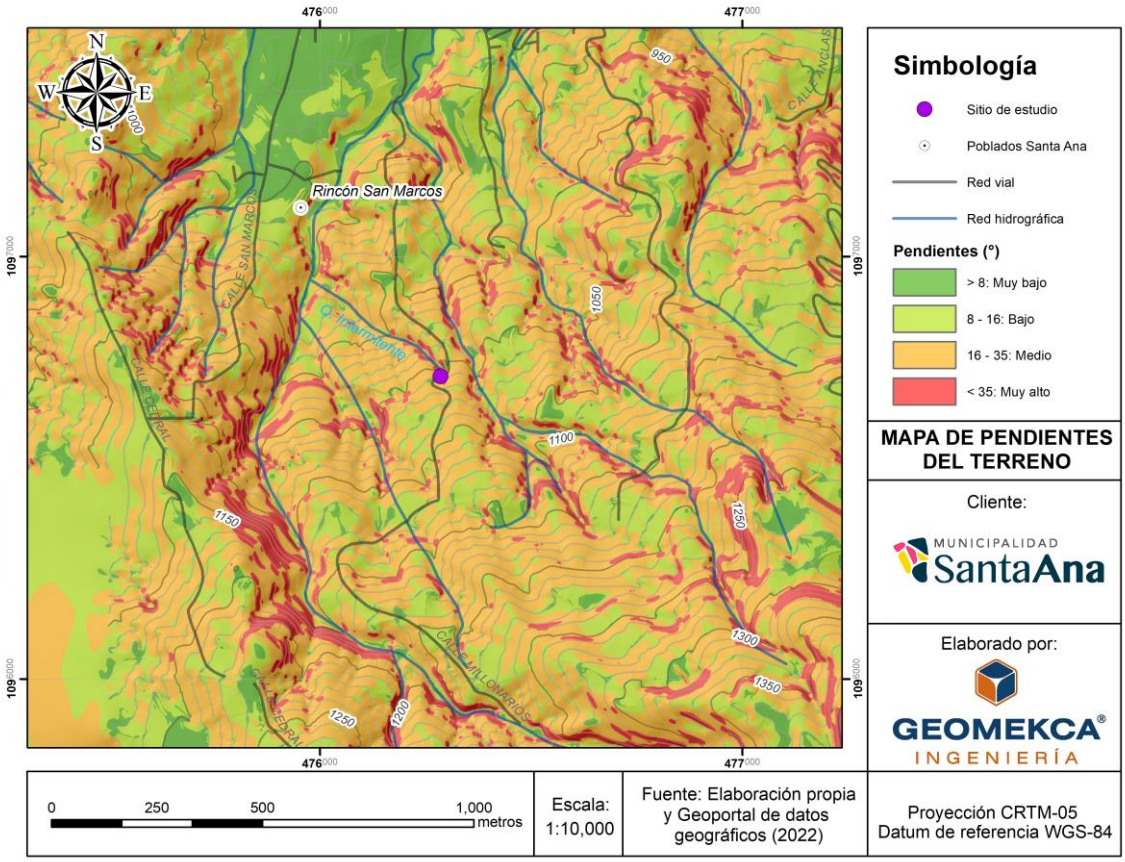



*Figura 6. Mapa de pendientes*

### *4.2.1.4 Zonas sísmicas*

Según el Código Sísmico de Costa Rica (2010), el cantón de Santa Ana y todos sus distritos se catalogan como una zona sísmica III. Este nivel se representa como un nivel de **incidencia alto**, con una clasificación de 4. En la Figura 7 se presenta el mapa de amenaza sísmica a partir de la zonificación del CSCR-2010.

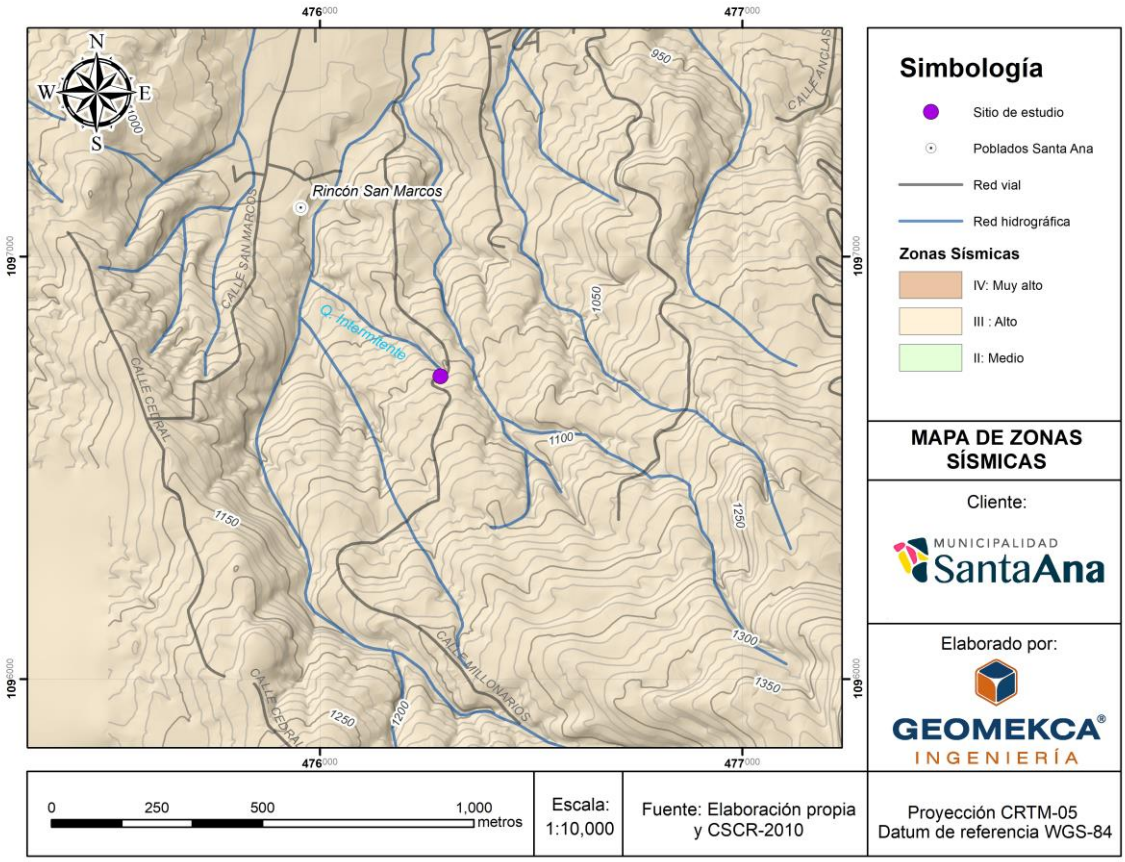



*Figura 7. Mapa de zonas sísmicas*

### *4.2.1.5 Precipitación máxima en 24 horas*

Debido a que no se disponía de los valores de precipitación para ser analizados estadísticamente, como lo propone la metodología, se estimó la precipitación máxima a partir de resultados de otros estudios. Se utilizaron las curvas de intensidad, duración y frecuencia del IMN (IMN, 2011) para estaciones cercanas, ubicadas en el Gran Área Metropolitana y, a partir de su revisión se determinó que, dependiendo de la estación hidrometeorológica que se considere, los valores extremos se pueden encontrar entre los 100 mm y 200 mm para toda el área considerada, lo cual se catalogaría con un nivel de incidencia bajo. En la Figura 8 se presenta una generalización de la precipitación máxima esperada en mapa para el sitio de estudio.

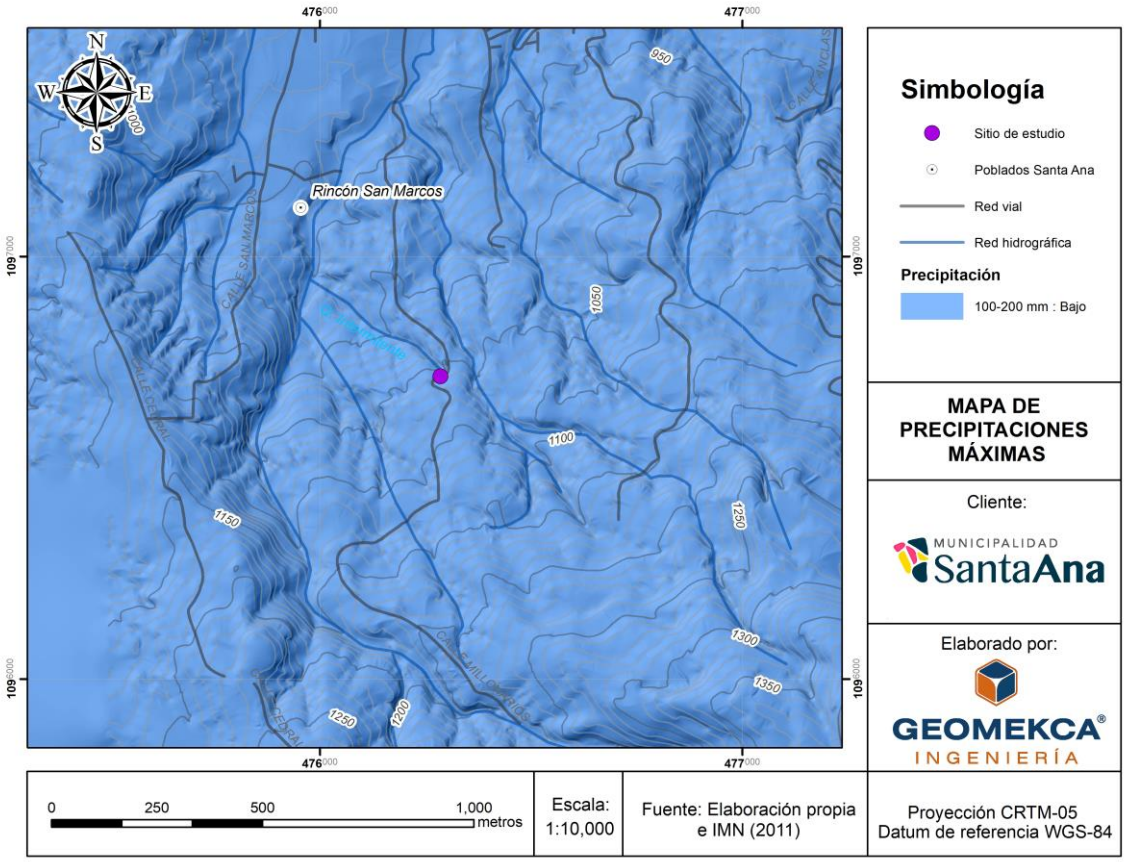



*Figura 8. Mapa de precipitaciones máximas*

#### *4.2.1.6 Ubicación del sitio o posición del proyecto respecto a la ladera*

Debido a la evidencia del sitio la cual se ejemplifica en la imagen de la Figura 9, este se encuentra ubicado directamente sobre la corona del talud, desde el nivel de la carretera hacia abajo, lo que indica un **nivel de incidencia muy alto**, con una puntuación de 5.

*Figura 9. Ubicación del deslizamiento junto a la calle*

#### *4.2.1.7 Estimación de la amenaza por deslizamiento*

Finalmente, a partir de la interacción de cada uno de los parámetros con su nivel de incidencia y considerando su factor de ponderación, se ha estimado la amenaza por deslizamiento para el sitio en estudio.

El álgebra de mapas estima un valor que varía entre 3,2 y 3,8, generando que el sitio en estudio se clasifique con un **índice de amenaza por deslizamiento ALTO,** el cual se representa en el mapa de la Figura 10. Este resultado es congruente con la estimación del Índice de Fragilidad Ambiental para Amenaza por Deslizamientos (ver Figura 11), realizado por PRUGAM en el 2007, el cual determinó que buena parte del territorio de Santa Ana ostenta un factor de amenaza I Muy alto ante los deslizamientos.

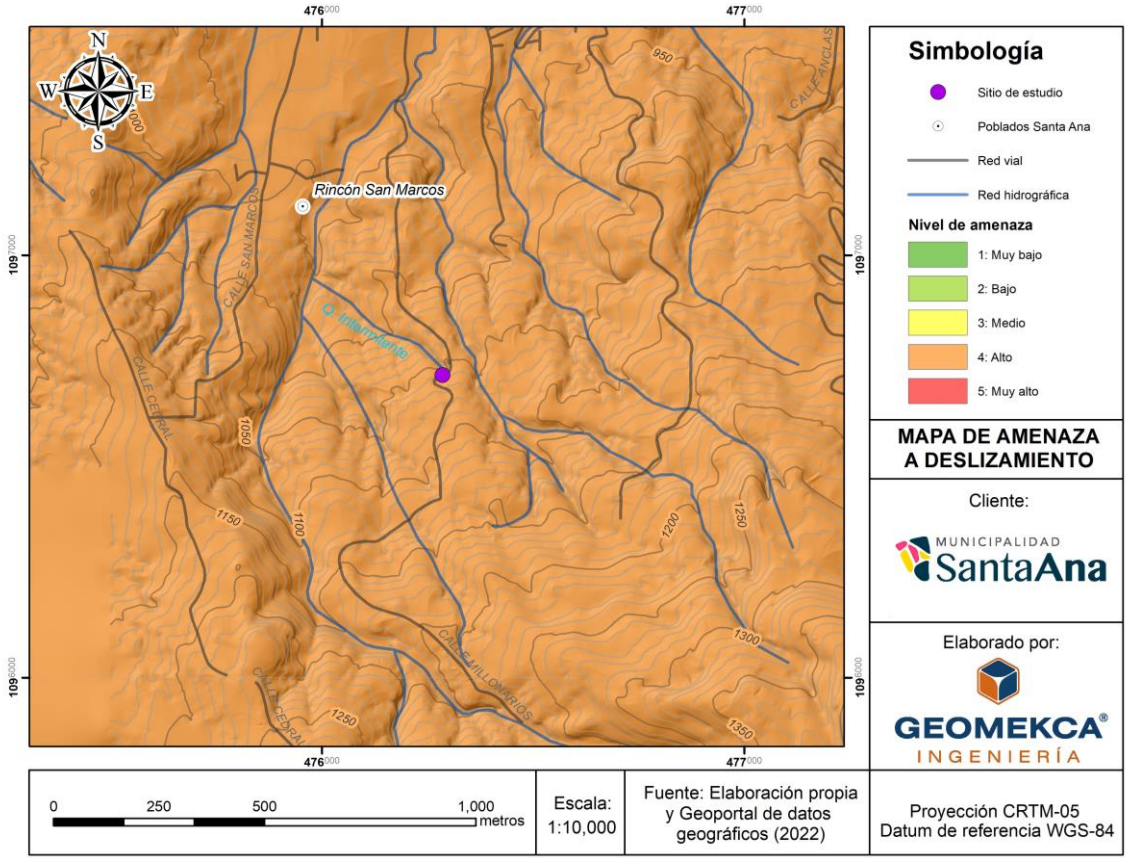



*Figura 10.Mapa de amenaza por deslizamiento*

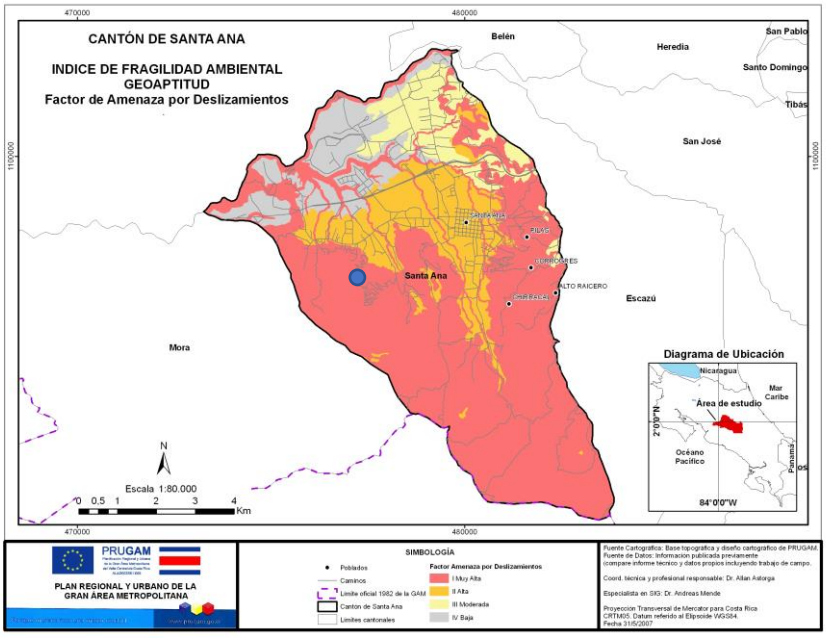



*Figura 11. Índice de Fragilidad Ambiental por amenaza a deslizamiento*
*Fuente: (PRUGAM, 2007)*

### 4.2.2 Amenaza de inundación

La estimación del nivel de amenaza de inundación sigue una lógica similar a la de deslizamiento, por medio de la combinación de puntajes asignados a varios parámetros.

#### *4.2.2.1 Localización de zonas de amenaza con potencial de inundación*

Según mapas de amenaza local (Municipalidad de Santa Ana, 2022), existen zonas con potencial de inundación, pero se encuentran ubicados lejos del sitio en estudio. Por esta razón, se determinó un **nivel de incidencia muy bajo,** con un puntaje de 1.

#### *4.2.2.2 Combinación entre la pendiente y la precipitación*

Para la combinación entre la pendiente y la precipitación se generó el mapa de la Figura 12, en el cual se clasificaron tres zonas catalogadas como: muy bajo, medio y alto (en referencia al nivel de incidencia por la precipitación y la pendiente). El sitio de estudio se determinó con un **nivel de incidencia muy bajo**.

#### *4.2.2.3 Humedad del suelo*

La determinación de la humedad del terreno se presentó en la sección 4.2.1.2 Humedad del suelo. Este dato se utiliza también para la estimación de la amenaza por inundación.

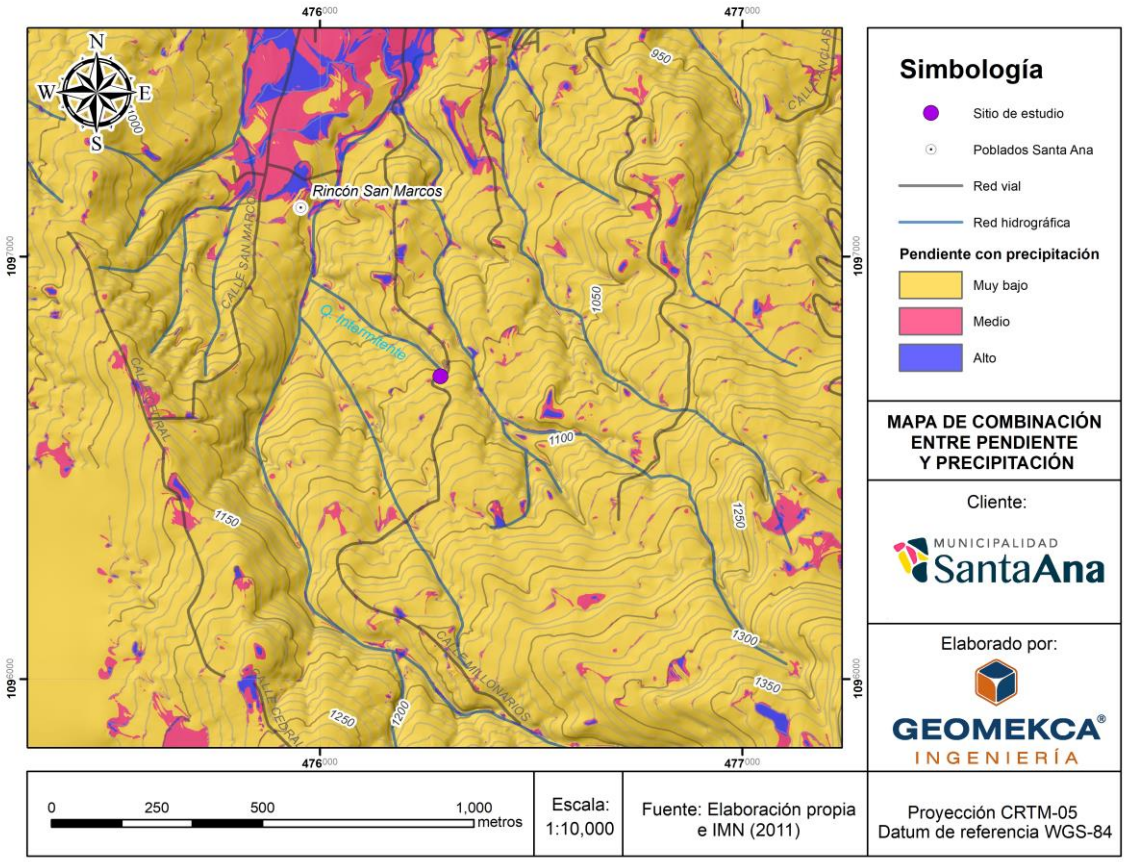



*Figura 12. Combinación entre pendiente y precipitación*

### *4.2.2.4 Vegetación predominante*

La vegetación predominante del sitio en estudio corresponde a cobertura de charral, lo que indica un **nivel de incidencia alto**, con un puntaje de 4. La capa de cobertura vegetal se extrajo del Atlas Cartográfico del TEC (2014) y se corroboró a partir de imágenes satelitales. En la Figura 13 se presenta el mapa de cobertura vegetal en la zona cercana al sitio de estudio.

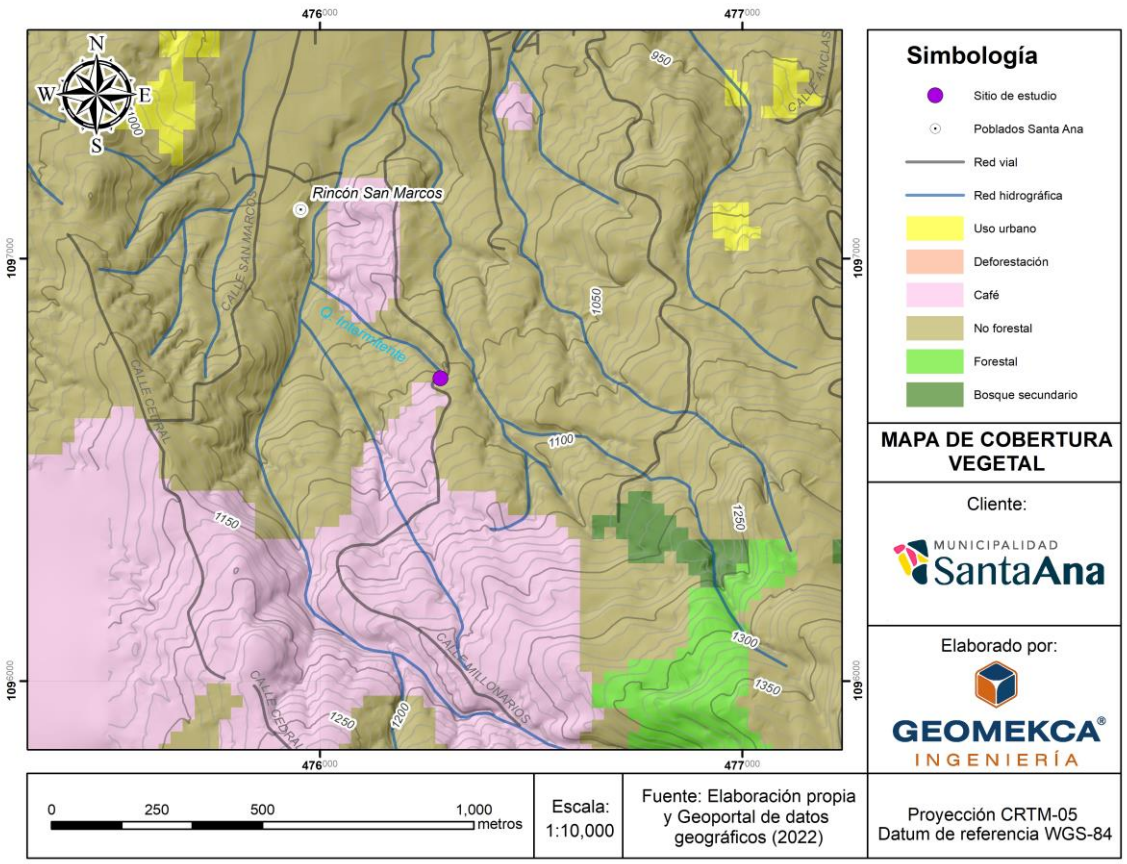



*Figura 13. Mapa de cobertura vegetal*

### *4.2.2.5 Distancia a cuerpos de agua y altura sobre el tirante*

Se determinó que la combinación entre la distancia a cuerpos de agua y altura sobre el tirante de agua tiene un valor **Medio,** con un puntaje de 3. Esto debido a que se consideró que el sitio en estudio se encuentra dentro de una cuenca que genera una quebrada intermitente dependiendo de la estacionalidad.

### *4.2.2.6 Estimación de la amenaza por inundación*

A partir de la interacción de cada uno de los parámetros con su nivel de incidencia y considerando su factor de ponderación, se ha estimado la amenaza por inundación para el sitio en estudio. El álgebra de mapas estima un valor que varía entre 1,6 y 2,25, generando que el sitio en estudio se clasifique en un **índice de amenaza BAJA por inundación,** el cual se muestra en la Figura 14.

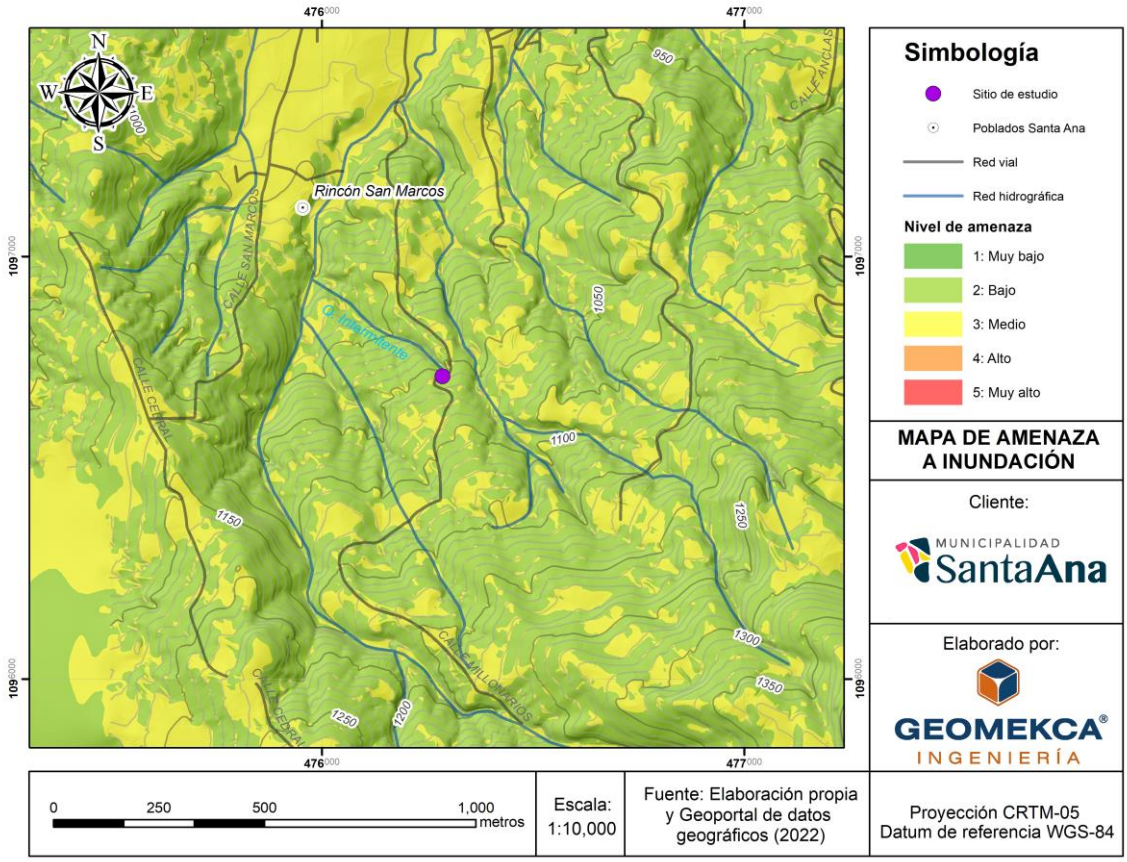



*Figura 14. Mapa de amenaza por inundación*

### 4.2.3 Amenaza de alud torrencial

#### *4.2.3.1 Existencia de eventos previos de alud torrencial*

Se han realizado estudios para determinar la amenaza por alud torrencial en el cantón de Santa Ana y, revisando mapas de la CNE (2022) y de la Municipalidad de Santa Ana (2022), ninguno describe o referencia la existencia de eventos de aludes torrenciales cercanos al sitio en estudio. Por lo tanto, se catalogó el sitio con un **nivel de incidencia Muy Bajo** con un puntaje de 1.

#### *4.2.3.2 Ubicación del sitio a evaluar*

Debido a la ubicación del sitio en estudio, en la parte alta de una ladera, se ha considerado que este se encuentra fuera del valle aluvial que se forma por la cuenca por lo que se ha clasificado con un **nivel de incidencia Muy Bajo**, con un puntaje de 1.

#### *4.2.3.3 Precipitación máxima*

La determinación de la precipitación se presentó en la sección 4.2.1.5 Precipitación máxima en 24 horas.

#### *4.2.3.4 Zona sísmica*

La determinación de las zonas sísmicas ya fue presentada en la sección 4.2.1.4 Zonas sísmicas.

#### *4.2.3.5 Estimación de la amenaza por alud torrencial*

A partir de la interacción de cada uno de los parámetros con su nivel de incidencia y, considerando su factor de ponderación, se ha estimado la amenaza por alud para el sitio en estudio. El álgebra de mapas estima un valor de 1,7, generando que el sitio en estudio se clasifique en un **índice de amenaza BAJO,** el cual se ejemplifica en la Figura 15.

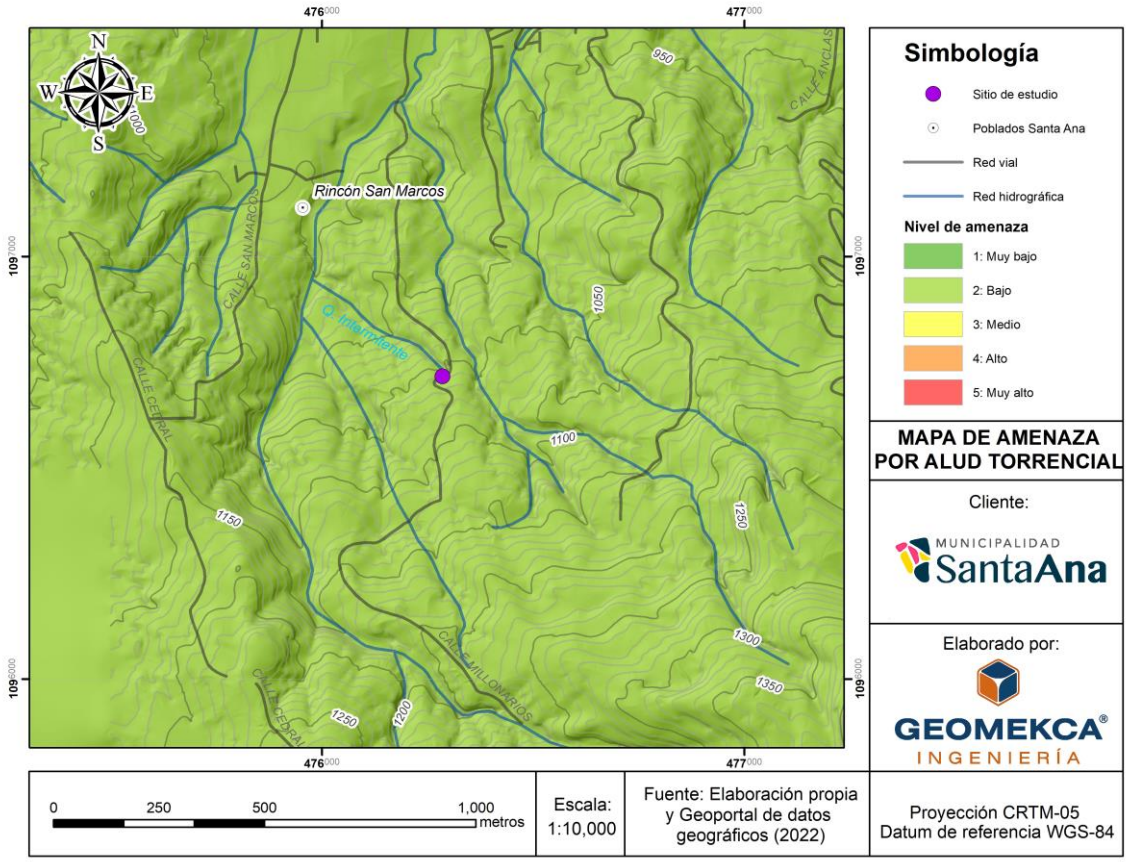



*Figura 15. Mapa de índice amenaza por alud torrencial*

### 4.2.4 Amenaza sísmica

La amenaza sísmica se estima, siguiendo la metodología de MIDEPLAN (2014) a partir de la interacción entre cuatro variables: la zona sísmica, el tipo de sitio de cimentación, la distancia respecto al trazo de una falla local y la pendiente promedio en un radio de 1,5 km.

#### *4.2.4.1 Combinación entre zona sísmica y tipo de sitio*

En la Figura 7 se presentó el mapa de zona sísmica, la cual es constante para todo el cantón de Santa Ana, que está catalogado como zona III. Por otra parte, a partir de la investigación geotécnica, el tipo de sitio puede ser definido como S2 (en cualquier caso, la clasificación como S3 y S4 aportan el mismo puntaje para este sitio). De esta manera, la combinación de los parámetros determina un nivel de **incidencia Alto** con un puntaje de 4.

### *4.2.4.2 Distancia respecto al trazo de una falla*

Cerca del sitio de estudio se detectaron dos fallas geológicas nombradas “falla del Parque Eólico” y “Falla Piedades” (Municipalidad de Santa Ana, 2022). A pesar de su cercanía, ambas fallas se consideran inactivas, por lo que se ha definido el **nivel de incidencia como muy bajo** con un puntaje de 1. Actualmente, la empresa Geotectica se encuentra elaborando un estudio sísmico para determinar el potencial de magnitud que tienen las fallas geológicas, así como otros elementos geológicos (Municipalidad de Santa Ana, 2022). Por lo tanto, este resultado podría cambiar una vez que sean presentados estos resultados. De momento, se consideran inactivas.

### *4.2.4.3 Combinación entre pendiente promedio y zona sísmica*

Según la Figura 16, la combinación entre la pendiente y la zona sísmica se clasifica como un índice muy alto, asignando un puntaje máximo de 5.

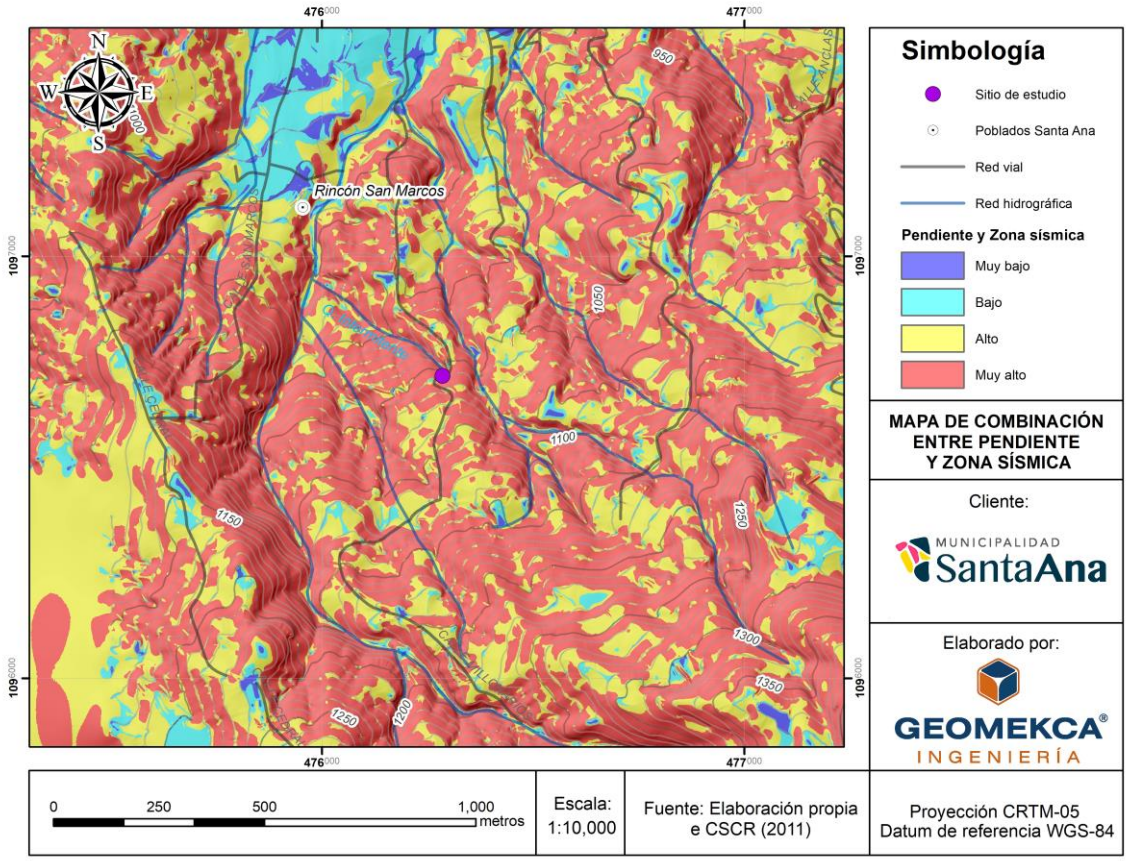



*Figura 16. Mapa de combinación entre pendiente y zona sísmica*

*4.2.4.4 Estimación de la amenaza sísmica*

A partir de la interacción de cada uno de los parámetros con su nivel de incidencia y, considerando su factor de ponderación, se ha estimado la amenaza sísmica para el sitio en estudio. El álgebra de mapas estima un valor que varía entre 2,7 y 4,0, generando que el sitio en estudio se clasifique en un **índice de amenaza ALTO,** el cual se muestra en la Figura 17.

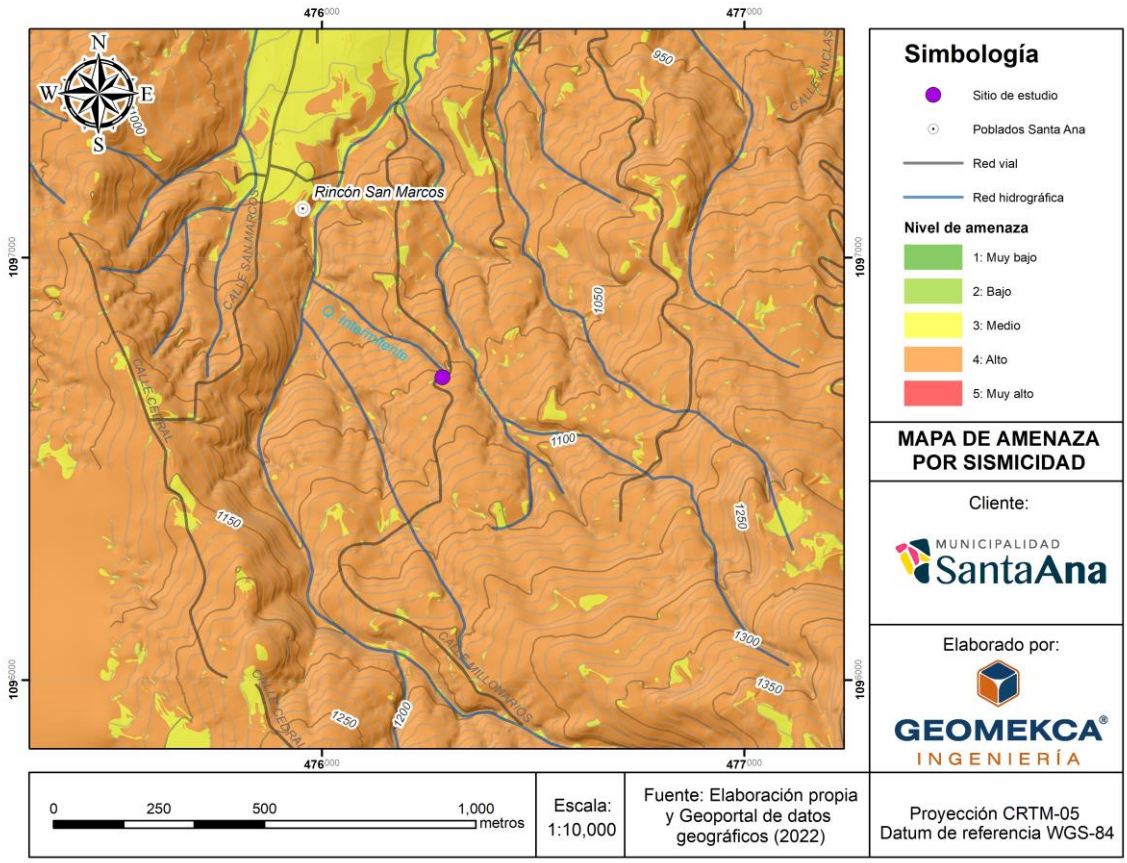



*Figura 17. Mapa de amenaza sísmica*

### 4.2.5 Amenaza volcánica y por tsunami

Evaluar la amenaza volcánica solamente es necesario cuando el sitio está dentro de un radio de 20 km alrededor de alguno de los cráteres volcánicos identificados por la CNE (MIDEPLAN, 2014). En este caso se descarta la amenaza en la valoración del sitio de estudio. De forma similar, debido a que el sitio de estudio no se encuentra localizado en una zona costera, se descarta evaluar la amenaza por tsunami.

### 4.2.6 Amenazas de origen antrópico

Las amenazas analizadas en las secciones anteriores pueden clasificarse como naturales y se han evaluado de acuerdo con la metodología establecida por el MIDEPLAN (2014). Tales amenazas, aun siendo de gran importancia no son, sin embargo, las únicas.

Se consideraron otras amenazas naturales cuya probabilidad de ocurrencia en el sitio se ha considerado sumamente baja y de muy escaso impacto, por ejemplo: daños por caída de rayos, daños por caída de bloques durante una erupción, daños por caída de cenizas volcánicas, etc.

Por otra parte, además de las amenazas naturales, se perciben otras cuyas causas son más bien de origen antrópico, pero que resultan de importancia para la operación de la infraestructura y la gestión del riesgo.

En el Apéndice B (capítulo 11) se incluye la lista completa de las amenazas evaluadas. Se podrá notar que muchas no se aplican a las condiciones particulares del sitio. Sin embargo, son consideradas y evaluadas de manera congruente con la matriz de riesgo.

Las amenazas que se incluyen a continuación han sido clasificadas como de origen antrópico, en contraposición a las amenazas naturales, que se evalúan con una perspectiva más macro. Para su evaluación se ha aplicado el criterio experto, como producto de la discusión y análisis interdisciplinario. La escala utilizada para establecer su nivel de amenaza, sin embargo, es la misma. Esto es, se cataloga con un valor de 1 si el nivel de amenaza es muy bajo y de 5 si es muy alto.

Valga aclarar que la mayoría de estas amenazas de origen antrópico no son susceptibles de expresión cartográfica, porque en muchos casos no puede determinarse la ubicación geográfica de la amenaza. Por lo tanto, estas amenazas no se representan en mapas.

#### *4.2.6.1 Erosión por escorrentía y socavación hidráulica*

El proceso de inestabilidad del sitio evaluado está muy ligado a procesos erosivos generados por la concentración de escorrentía. Por su ubicación, el agua es concentrada en las cunetas laterales de la carretera, conducida y vertida precisamente hacia el sitio que muestra inestabilidad. Es, precisamente, el vertido descontrolado del agua de escorrentía el causante del proceso erosivo que provoca la inestabilidad del sitio. Este proceso ocurre actualmente y se encuentra muy activo, de manera que el nivel de amenaza asociado es muy alto. Por lo tanto, el nivel de amenaza es igual a 4 para esta amenaza ($A = 4$), pues ocurre con certeza en la época lluviosa y no en la época seca.

#### *4.2.6.2 Daños por inseguridad social*

La pérdida de materiales de las obras de infraestructura, incluyendo materiales estructurales, elementos separadores, protectores o señales, entre otros, podría considerarse frecuente. Estos serían los principales daños esperables asociados a la "inseguridad social", es decir, a aquellas acciones que provienen de condiciones inseguras en relación con las actividades humanas. En este caso, se considera en esta categoría el vandalismo, principalmente, y no otras causas de inseguridad como podrían ser los conflictos armados, disturbios o terrorismo.

Dadas las experiencias anteriores en el sitio, se considera que su nivel de amenaza es alto, esto es A=4.

#### *4.2.6.3 Deterioro por acumulación de desechos*

Se incluyen la acumulación de desechos sólidos, líquidos o gaseosos, la contaminación y los derrames tóxicos. Siendo el sitio una zona que se ha utilizado por años como un botadero clandestino de basura, se asigna un nivel de amenaza alto (A=4).

#### *4.2.6.4 Deterioro por incendio*

De manera similar, se ha indicado la ocurrencia de, al menos, una situación previa de daños por incendio provocado. Por tal razón, se asigna un nivel de amenaza alto (A=4).

#### *4.2.6.5 Afectación a propiedades de terceros*

Se incluye en este caso la afectación provocada por el manejo inapropiado del agua de escorrentía acumulada en la carretera, así como daños que podría generar la inestabilidad del terreno o la falla en la aplicación correcta de obras de protección y estabilización al sitio evaluado. En este caso, se considera que la amenaza es media (A=3).

### 4.2.7 Listado de amenazas y nivel de amenaza

Todas las amenazas mencionadas en los apartados anteriores han sido evaluadas en el análisis de los riesgos. Sin embargo, se presenta a continuación, en la Tabla 6, una lista de aquellas consideradas con un nivel de amenaza medio o mayor, es decir, las que se consideran relevantes o significativas para este caso. La codificación utilizada en esta tabla proviene del Registro de Riesgos (ver Apéndice B, capítulo 11).

*Tabla 6. Lista de amenazas relevantes*

| Código | Amenaza | Nivel de amenaza |
|---|---|---|
| A.5 | Daños o salidas de operación provocadas por la influencia de un deslizamiento, avalancha u otro movimiento de masa del terreno causado por sismo. (*) | 4 |
| A.9 | Daños o salidas de operación provocadas por deslizamiento, avalancha u otro movimiento de masa causado por tormentas o eventos hidrológicos extremos. (*) | 4 |
| B.1 | Desplazamientos o inestabilidad por influencia directa de deslizamientos o inestabilidad del terreno, en zonas de fuerte pendiente. (*) | 4 |
| B.7 | Desplazamientos o inestabilidad por influencia directa de procesos erosivos. (*) | 4 |
| C.7 | Desplazamientos o inestabilidad por erosión superficial por el agua de escorrentía no controlada | 4 |
| C.8 | Desplazamientos o inestabilidad por influencia directa de socavación hidráulica. | 4 |
| F.7 | Daños a la infraestructura provocados por inseguridad social: vandalismo, conflictos armados, disturbios, terrorismo | 4 |
| F.8 | Daños a la infraestructura provocados por la acumulación de desechos, contaminación, derrames tóxicos | 4 |
| F.9 | Daños a la infraestructura provocados por incendio | 4 |
| G.2 | Afectación a propiedades de terceros causadas por el manejo inapropiado de agua | 3 |
| G.3 | Afectación al terreno de terceros a causa de inestabilidad generada por la estructura o por las obras de protección a la misma | 3 |

*(*) Nota: Esta amenaza se ha evaluado también con la metodología de MIDEPLAN, en términos cartográficos.*

## 4.3 Vulnerabilidad de la infraestructura

El poder destructivo de las amenazas se materializa, principalmente, en la población expuesta y frágil y sus elementos económicos y sociales, sobre los que se generan daños y pérdidas (e.g. muertos, heridos, acervos, capital, desequilibrios fiscales, etc.). El análisis de la vulnerabilidad comienza con la determinación del grado de exposición ante la amenaza considerada. Luego, otras variables son consideradas, a saber: la fragilidad, la estimación de los valores económicos expuestos a daños o pérdidas y los impactos sobre la vida humana y sobre el ambiente. En la Figura 18 se representan las componentes del análisis de vulnerabilidad.

*Figura 18. Variables para la determinación de la vulnerabilidad del sitio*

### 4.3.1 Grado de exposición

El grado de exposición se evalúa según la posición de la sección de calle Millonarios que se evalúa con respecto a la amenaza considerada y su dinámica (velocidad de expansión del proceso amenazante). El criterio que se ha utilizado para establecer el grado de exposición se detalla en la Tabla 7.

En la Figura 19 se presenta el mapa según el grado de exposición para aproximadamente 500 m de la calle Millonarios. Se ha zonificado en secciones de 10 m y cada una ha sido clasificada según su grado de exposición.

*Tabla 7. Clasificación del nivel de exposición*

| Distancia-influencia a la amenaza | Calificación del nivel de exposición | Grado relativo de exposición |
|---|---|---|
| Fuera de la influencia en el largo plazo (> 10 años) | Nula a muy baja | 0 |
| Fuera de la influencia en el mediano plazo (5 a 10 años) | Baja | 1 |
| La influencia es posible en el corto plazo (< 5 años) | Media | 2 |
| La amenaza es inminente o ya afecta a las estructuras | Elevada | 3 |

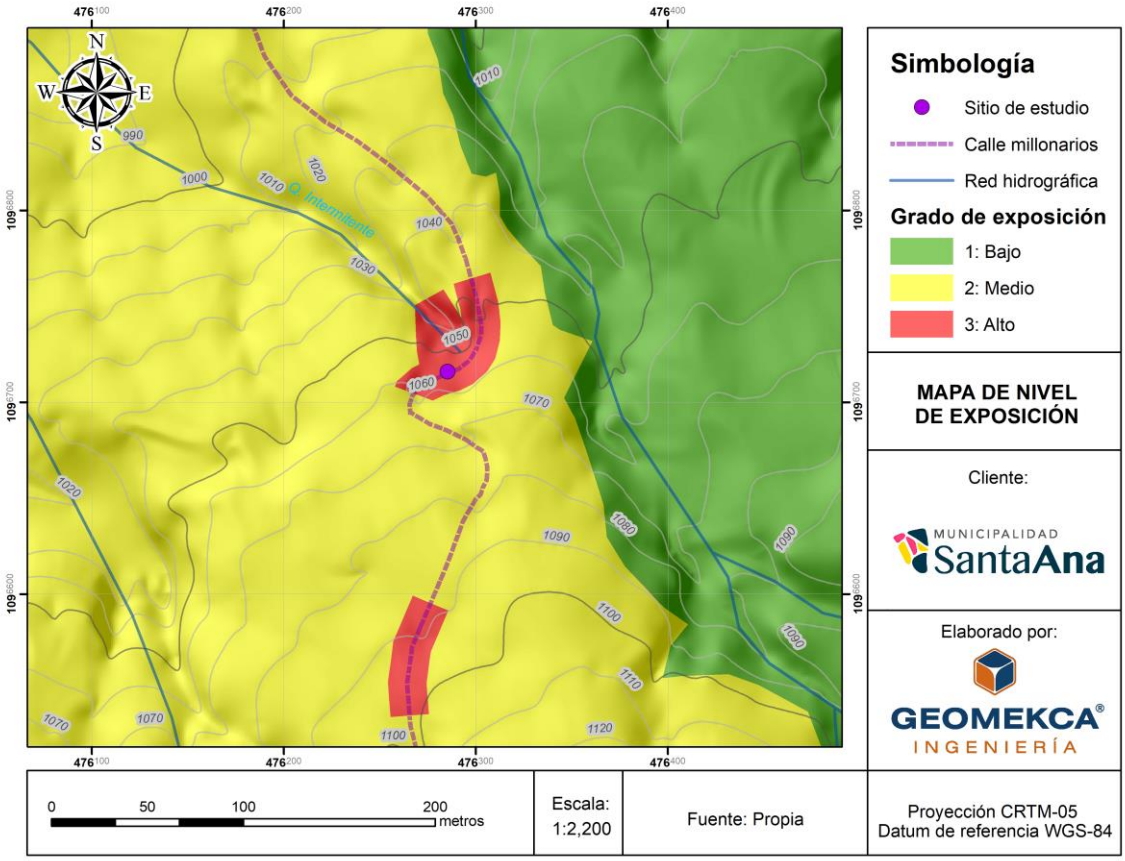



*Figura 19. Mapa de grado de exposición*

### 4.3.2 Valores económicos expuestos a daños

A falta de estudios específicos para el cantón, se considera una clasificación general de costo, de acuerdo con la importancia relativa que la infraestructura evaluada presente. En la Tabla 8 se muestra la clasificación por el valor económico expuesto.

*Tabla 8. Clasificación del valor económico expuesto a daños*

| Importancia relativa de la infraestructura evaluada | Calificación del nivel de valor económico | Grado relativo de valor |
|---|---|---|
| La pérdida de la infraestructura se puede compensar dentro del alcance presupuestario anual de operación y mantenimiento. | Muy bajo | 0 |
| La pérdida de la infraestructura se puede compensar dentro del alcance presupuestario equivalente a dos años consecutivos de operación y mantenimiento. | Bajo | 1 |
| La pérdida de la infraestructura se puede compensar dentro del alcance presupuestario equivalente a cinco años consecutivos de operación y mantenimiento. | Medio | 2 |
| La infraestructura perdida no se puede reponer con recursos propios, por su magnitud. | Elevado | 3 |

En la Figura 20 se presenta el mapa de valores económicos expuestos a daños, para aproximadamente 500 m de la calle Millonarios. Nuevamente, se ha zonificado en secciones de 10 m de longitud y, en este caso, se ha clasificado como constante para todo el tramo de calle, con una asignación de valor medio, al considerar directamente los valores económicos de la infraestructura. Para las zonas colindantes a la calle, que se componen por potreros y zonas de cultivo se ha clasificado el valor económico expuesto a daños con un valor bajo.

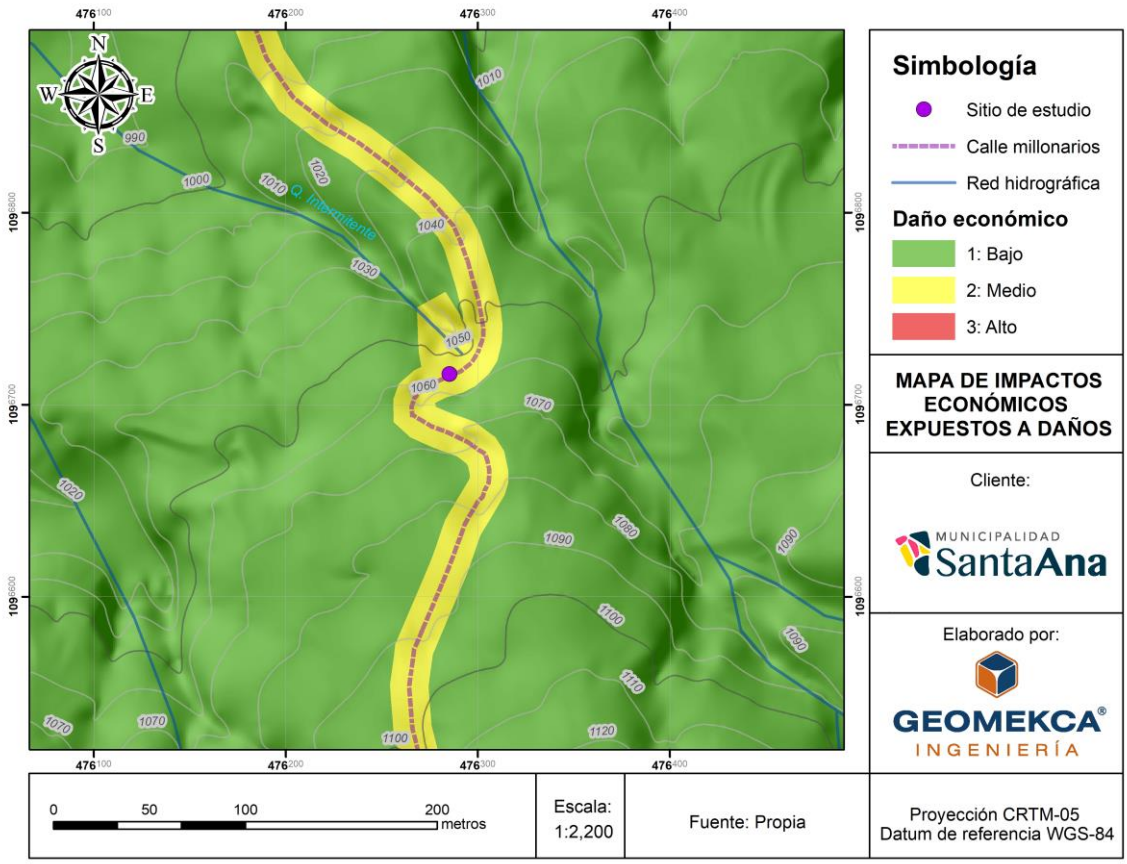



*Figura 20. Mapa de valores económicos expuestos a daños*

### 4.3.3 Fragilidad

La fragilidad está directamente relacionada con la capacidad intrínseca de la infraestructura para soportar sus cargas de diseño y solicitaciones extraordinarias. Representa la susceptibilidad a la ruptura o colapso de la infraestructura de acuerdo con las normas de diseño. En este caso, se utiliza una valoración general de la condición de la infraestructura para evaluar el grado de fragilidad asociada. En la Tabla 9 se muestra la clasificación de la fragilidad.

En la Figura 21 se presenta el mapa de clasificación de la fragilidad del sector evaluado de la calle Millonarios, que se ha catalogado como constante para todo el tramo, con una asignación de fragilidad media. Las zonas cercanas a la calle se han considerado de fragilidad baja.

*Tabla 9. Clasificación de la fragilidad*

| Condición actual relativa de la infraestructura evaluada | Calificación del nivel de fragilidad | Grado relativo de fragilidad |
|---|---|---|
| La infraestructura evaluada ha sido diseñada y construida con altos estándares y normativa de ingeniería. Los materiales de construcción son de máxima calidad. No presenta daños evidentes por su operación. | Muy baja | 0 |
| La infraestructura evaluada ha sido diseñada y construida con altos estándares y normativa de ingeniería. Sin embargo, los materiales de construcción no son de máxima calidad. No presenta daños evidentes por su operación. | Baja | 1 |
| La infraestructura evaluada ha sido diseñada y construida sin controles ni verificación de la normativa de ingeniería. Los materiales de construcción son de regular calidad. Presenta daños evidentes por su operación. | Media | 2 |
| La infraestructura evaluada ha sido diseñada y construida sin controles ni verificación de la normativa de ingeniería. Los materiales de construcción son de baja calidad. Presenta daños evidentes, que ameritan intervención en el corto plazo. | Elevada | 3 |

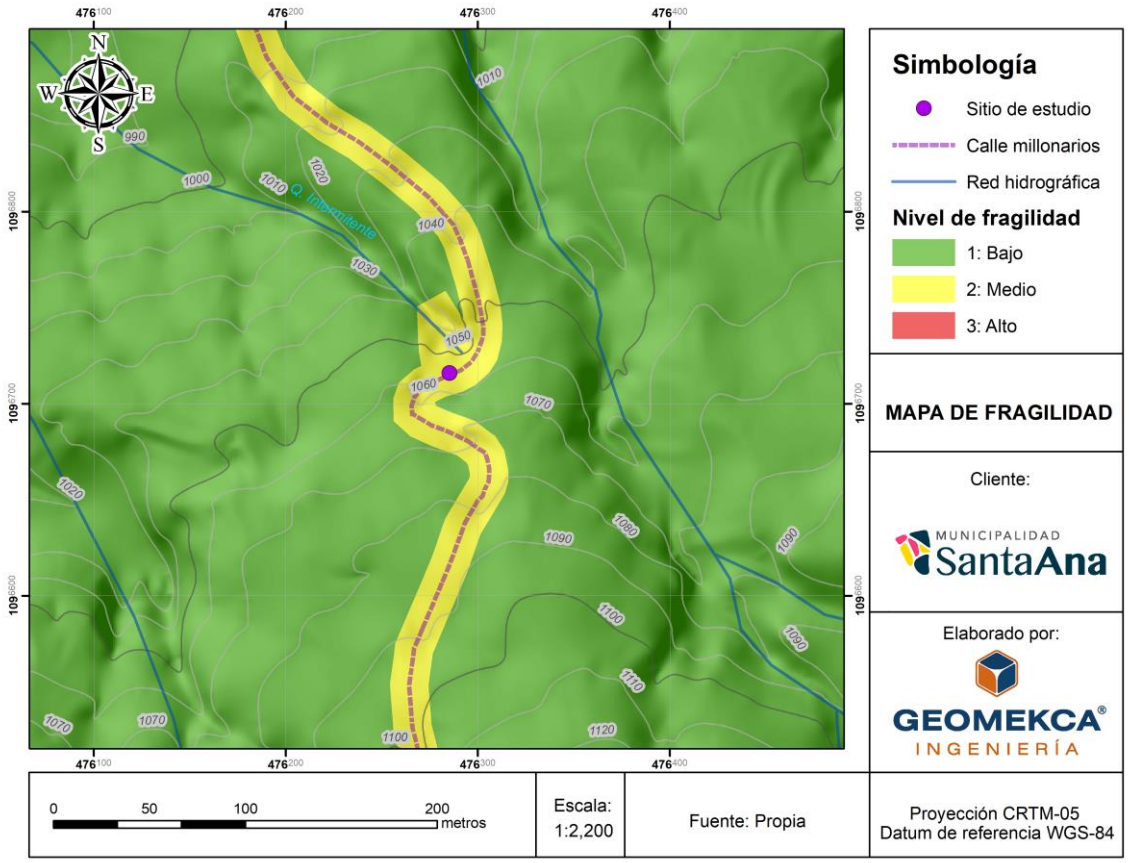



*Figura 21. Mapa de calificación de la condición de fragilidad*

### 4.3.4 Impactos sobre la vida humana

Para este análisis simplificado se consideran las posibles pérdidas para la comunidad en el entorno de la infraestructura evaluada, en relación con afectaciones al comercio, industria y servicios (lucro cesante, incomodidad, etc.) causada por la suspensión del servicio prestado por dicha infraestructura.

Se considera también la afectación personal, es decir, la posibilidad de que la falla de la infraestructura provoque daños físicos o la muerte a una o más personas usuarias. En la Tabla 10 se presenta la clasificación de los impactos sobre la vida humana.

*Tabla 10. Clasificación de impactos sobre la vida humana*

| **Impactos sobre la vida humana o sobre las condiciones socio económicas de las personas** | **Calificación del nivel de impacto sobre las personas** | **Grado relativo de impacto sobre personas** |
|---|---|---|
| La pérdida de la infraestructura evaluada no altera de manera significativa la dinámica socio económica de los usuarios ni afecta físicamente a ninguna persona. | Muy bajo o nulo | 0 |
| La pérdida de la infraestructura evaluada afecta negativamente, aunque de forma moderada, la dinámica socio económica de los usuarios. No afecta físicamente a ninguna persona. | Bajo | 1 |
| La pérdida de la infraestructura evaluada afecta negativa y significativamente la dinámica socio económica de los usuarios. Además, podría provocar daños físicos parciales a alguna persona usuaria si falla. | Medio | 2 |
| La pérdida de la infraestructura evaluada afecta negativa y gravemente la dinámica socio económica de los usuarios. Además, podría provocar daños físicos parciales o la muerte a alguna persona usuaria si falla. | Elevado | 3 |

En la Figura 22 se presenta el mapa de clasificación de impactos sobre la vida humana para aproximadamente 500 m de la calle Millonarios. Para esta variable, se ha clasificado el nivel de impacto sobre la vida humana como constante para todo el tramo, con una calificación de medio en la calle y bajo para las zonas de cultivo y potreros.

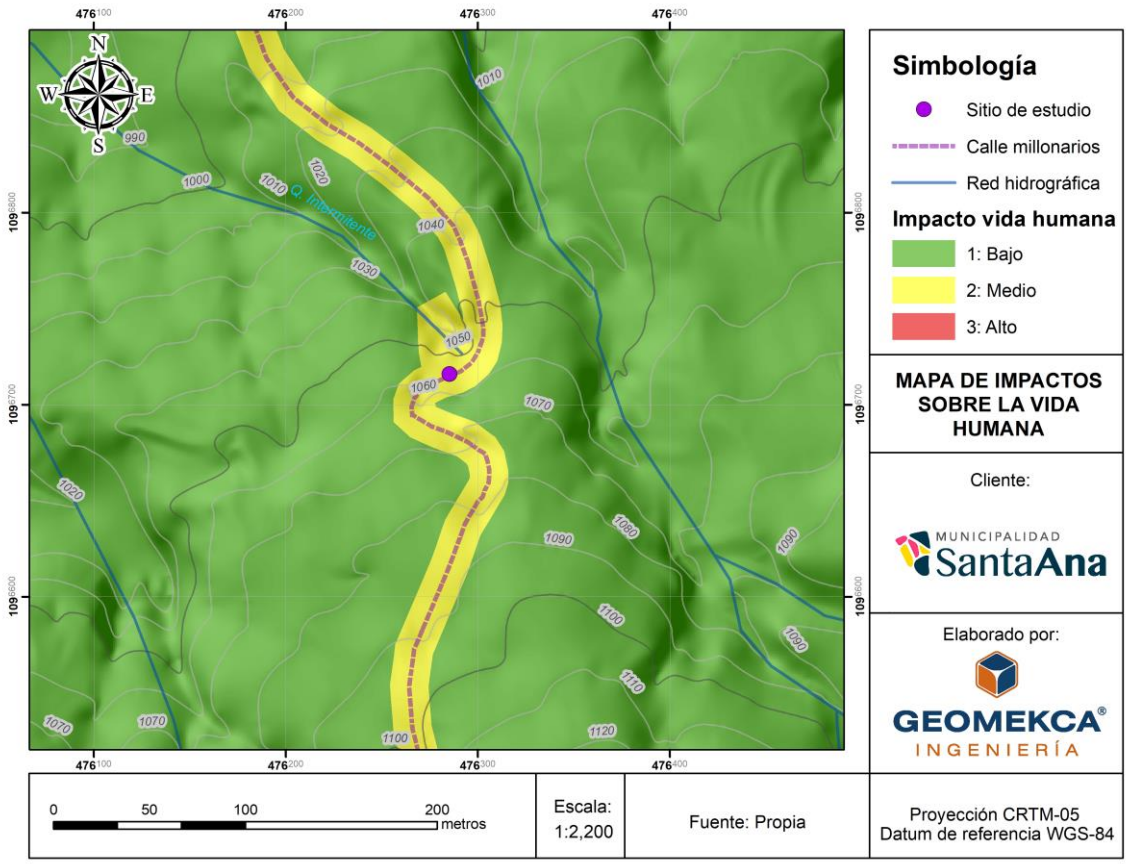



*Figura 22.Mapa de clasificación de los impactos sobre la vida humana*

### 4.3.5 Impactos sobre el ambiente

El impacto sobre el ambiente se asocia con la magnitud de los daños sobre el entorno, tanto desde la perspectiva física como biológica. Considera también la reversibilidad de los daños provocados. Para este análisis, se realiza una evaluación simplificada. En la Tabla 11 se presenta la clasificación por impactos sobre el ambiente.

En la Figura 23 se presenta el mapa de impactos sobre sobre el ambiente para aproximadamente 500 m de la calle Millonarios. Toda el área se ha clasificado como con una asignación de impacto sobre el ambiente, baja.

*Tabla 11. Clasificación de impactos sobre el ambiente*

| Impactos sobre el ambiente | Calificación del nivel de impacto sobre el ambiente | Grado relativo de impacto sobre el ambiente |
|---|---|---|
| La pérdida de la infraestructura evaluada no altera de manera significativa su entorno físico ni afecta de manera irreversible la flora o fauna local. | Muy bajo o nulo | 0 |
| La pérdida de la infraestructura evaluada afecta negativamente el entorno solamente de manera muy localizada (menos de 50 m alrededor). No afecta de manera irreversible la flora o fauna local. | Bajo | 1 |
| La pérdida de la infraestructura evaluada afecta negativamente el entorno en un área extensa (más de 50 m alrededor). Se produce contaminación leve. La afectación a la flora o fauna local tomaría varios años para ser revertida. | Medio | 2 |
| La pérdida de la infraestructura evaluada afecta negativamente el entorno en un área extensa (más de 50 m alrededor). Se produce contaminación severa. La afectación a la flora o fauna local tomaría décadas para ser revertida o es irreversible. | Elevado | 3 |

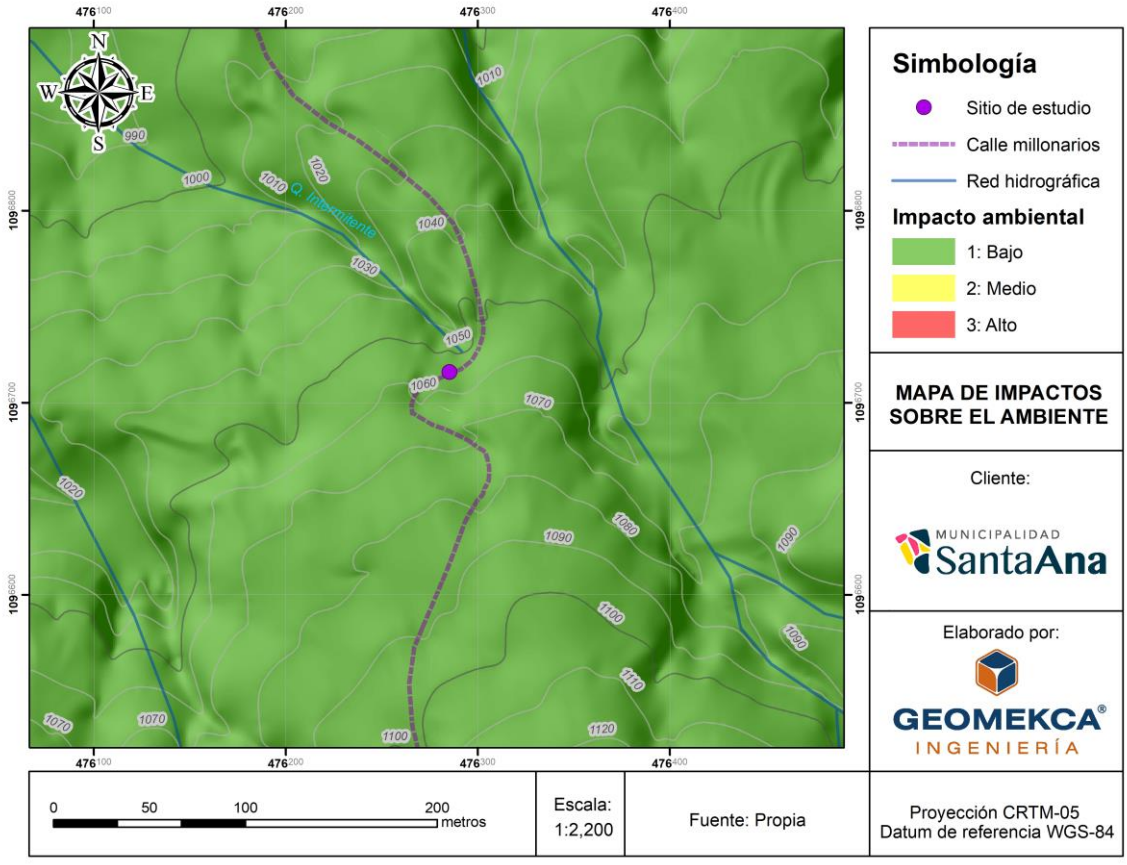



*Figura 23. Mapa de clasificación del nivel de impacto ambiental*

### 4.3.6 Clasificación de la vulnerabilidad

Para reclasificar la vulnerabilidad total de la infraestructura evaluada se calcula la sumatoria de los puntajes asignados en cada criterio descrito en los apartados anteriores. Esto permite la definición de un índice relativo de vulnerabilidad (V) de la infraestructura evaluada, considerando todos los aspectos que la definen. Se establece a partir de la sumatoria de las valoraciones por lo que, implícitamente, se asigna el mismo peso o valor relativo a cada una de las variables.

Para ello, se utiliza la matriz que se presenta a continuación, en la Tabla 12, donde se muestran los rangos de la clasificación del índice de vulnerabilidad.

*Tabla 12. Clasificación del Índice de vulnerabilidad*

| SUMATORIA DE PUNTAJES | CLASIFICACIÓN DE VULNERABILIDAD | NIVEL DE DAÑO ASOCIADO | ÍNDICE DE VULNERABILIDAD (V) |
|---|---|---|---|
| 12 a 15 | Elevada | Daños muy graves o irreparables | **4** |
| 8 a 11 | Media | Daño grave | **3** |
| 4 a 7 | Baja | Daño moderado | **2** |
| 0 a 3 | Muy baja a nula | Daño leve | **1** |

En la Figura 24 se presenta el resultado de la sumatoria de las vulnerabilidades para los aproximadamente 500 m de la calle Millonarios y en la Figura 25 se presenta la clasificación de la vulnerabilidad basado en el índice de vulnerabilidad (V). Este se ha catalogado en la categoría de vulnerabilidad media para todo el tramo y para la zona erosionada, mientras que el resto del área ha recibido una clasificación de vulnerabilidad baja.

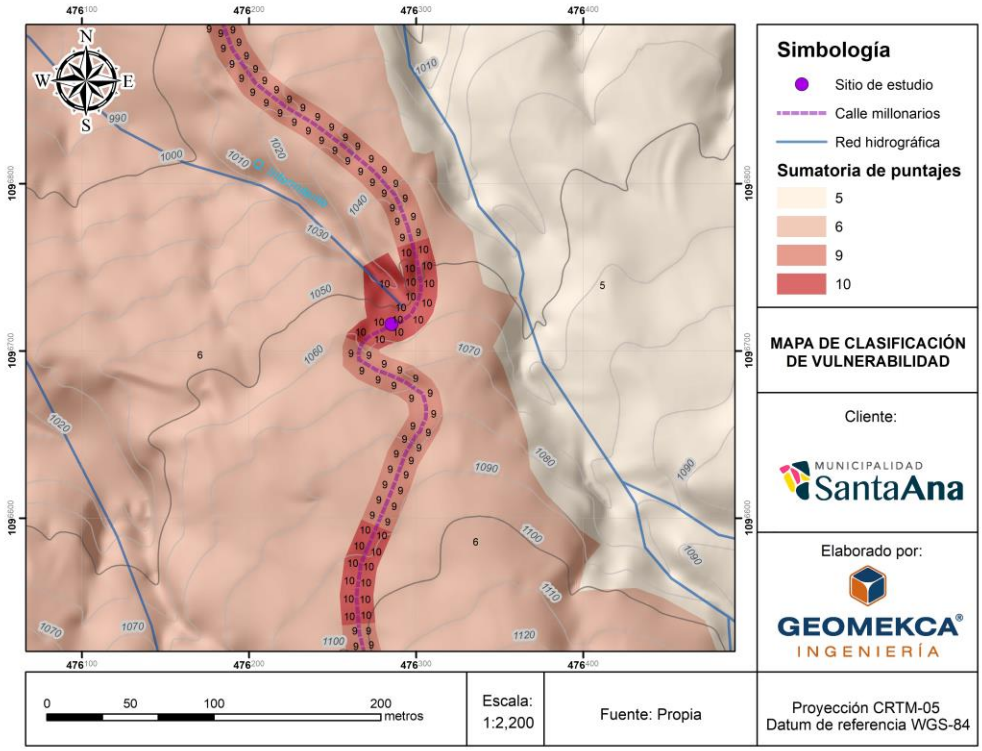



*Figura 24. Mapa de estimación de la suma de vulnerabilidades*

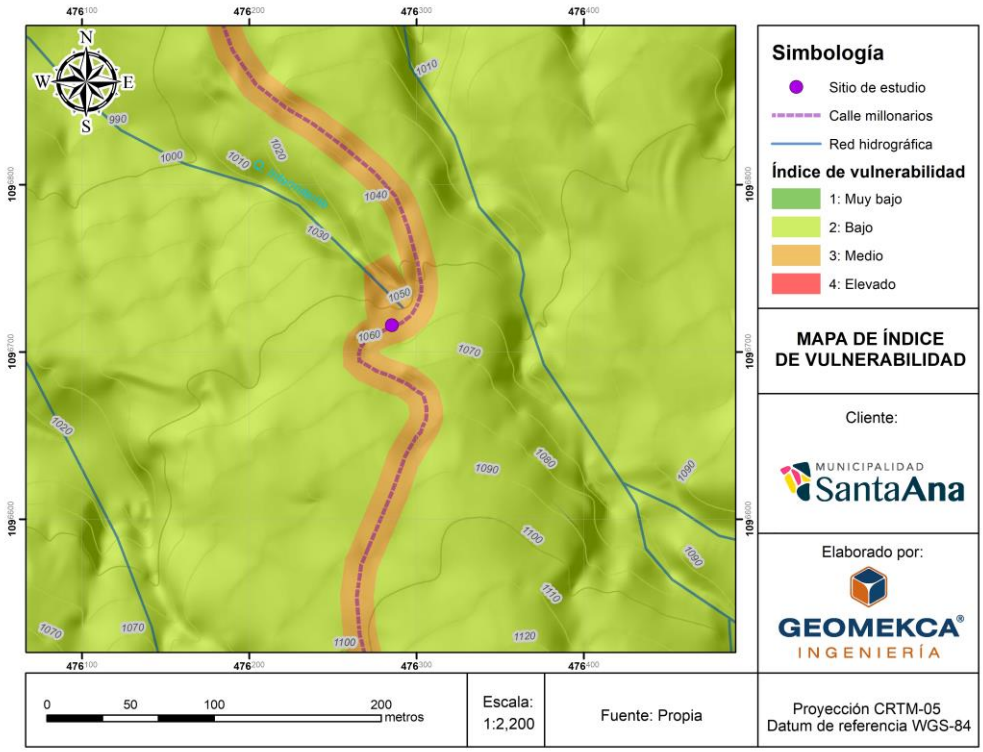



*Figura 25. Mapa de estimación del índice de vulnerabilidad*

### 4.3.7 Listado de amenazas e índice de vulnerabilidad

El resultado de la reclasificación, que se realiza considerando los distintos aspectos de la vulnerabilidad, se resume en el índice de vulnerabilidad, que puede tomar valores entre 1 y 4, como se indicó arriba. En términos generales, la vulnerabilidad del tramo de la calle Millonarios que se ha evaluado alcanza un índice de 3, en el peor de los casos. Sin embargo, para la gran mayoría de amenazas consideradas, la vulnerabilidad se ha establecido en baja (2) o muy baja (1). Esta se muestra en la siguiente Tabla 13.

*Tabla 13. Listado de amenazas e índice de vulnerabilidad*

| Código | Amenaza | Índice de vulnerabilidad |
|---|---|---|
| A.5 | Daños o salidas de operación provocadas por la influencia de un deslizamiento, avalancha u otro movimiento de masa del terreno causado por sismo. (*) | 3 |
| A.9 | Daños o salidas de operación provocadas por deslizamiento, avalancha u otro movimiento de masa causado por tormentas o eventos hidrológicos extremos. (*) | 3 |
| B.1 | Desplazamientos o inestabilidad por influencia directa de deslizamientos o inestabilidad del terreno, en zonas de fuerte pendiente. (*) | 3 |
| B.7 | Desplazamientos o inestabilidad por influencia directa de procesos erosivos. (*) | 3 |
| C.7 | Desplazamientos o inestabilidad por erosión superficial por el agua de escorrentía no controlada | 3 |
| C.8 | Desplazamientos o inestabilidad por influencia directa de socavación hidráulica. | 3 |
| F.7 | Daños a la infraestructura provocados por inseguridad social: vandalismo, conflictos armados, disturbios, terrorismo | 2 |
| F.8 | Daños a la infraestructura provocados por la acumulación de desechos, contaminación, derrames tóxicos | 2 |
| F.9 | Daños a la infraestructura provocados por incendio | 2 |
| G.2 | Afectación a propiedades de terceros causadas por el manejo inapropiado de agua | 2 |
| G.3 | Afectación al terreno de terceros a causa de inestabilidad generada por la estructura o por las obras de protección a la misma | 2 |

*(*) Nota: Esta amenaza se ha evaluado también en términos geográficos, definiendo la vulnerabilidad en el sector evaluado de la calle Millonarios.*

## 4.4 Evaluación del riesgo inicial

Una vez que se ha determinado el nivel de amenaza y la vulnerabilidad para cada una de las amenazas identificadas, en el momento actual, es posible determinar numéricamente el riesgo, utilizando la metodología que se explicó en la sección 4.1.

Esta evaluación corresponde a la determinación del riesgo inicial (o riesgo actual). Esto es, el nivel de riesgo que actualmente se asigna al sitio, antes de plantear acciones de respuesta o blindajes ante ese riesgo. Como se ha explicado, las amenazas naturales se han representado de manera cartográfica y las de origen antrópico en forma tabular.

Una vez que se determinen las acciones de respuesta que se aplicarán para la reducción del riesgo, puede estimarse el "riesgo residual", que resultará de la realización de esas acciones de respuesta. Las acciones de respuesta se discuten en las siguientes secciones, mientras que el riesgo residual se discute en la sección 4.9.

### 4.4.1 Riesgo inicial por amenazas naturales

En esta sección se muestran los mapas de riesgo asociado a amenazas naturales. Entre la Figura 26 y la Figura 29, se presentan las evaluaciones del riesgo de las amenazas naturales incluidas en la metodología de MIDEPLAN (2014). Otras amenazas naturales se han incluido en el Registro de Riesgos (Apéndice B, capítulo 11).

En resumen, con respecto a las amenazas naturales, se puede destacar que la amenaza de deslizamiento y la amenaza de afectación por sismo presentan **riesgo alto**, en tanto que la amenaza de inundación y la amenaza por alud torrencial, presentan riesgo bajo. Este resultado es consistente con estudios anteriores, según se ha mencionado en secciones precedentes.

Las figuras se presentan secuencialmente, sin comentarios específicos, pues se explican por sí mismas. Cabe notar que la escala utilizada para representar el riesgo es distinta de la usada para evaluar los niveles de amenaza con la metodología de MIDEPLAN (2014). En aquel caso se hace una valoración a una escala más macro (considerando 1500 m alrededor del sitio), mientras que el riesgo se ha calculado utilizando la misma escala que se usó para el índice de vulnerabilidad, que se concentra en el sitio (aproximadamente 500 m de la calle Millonarios).

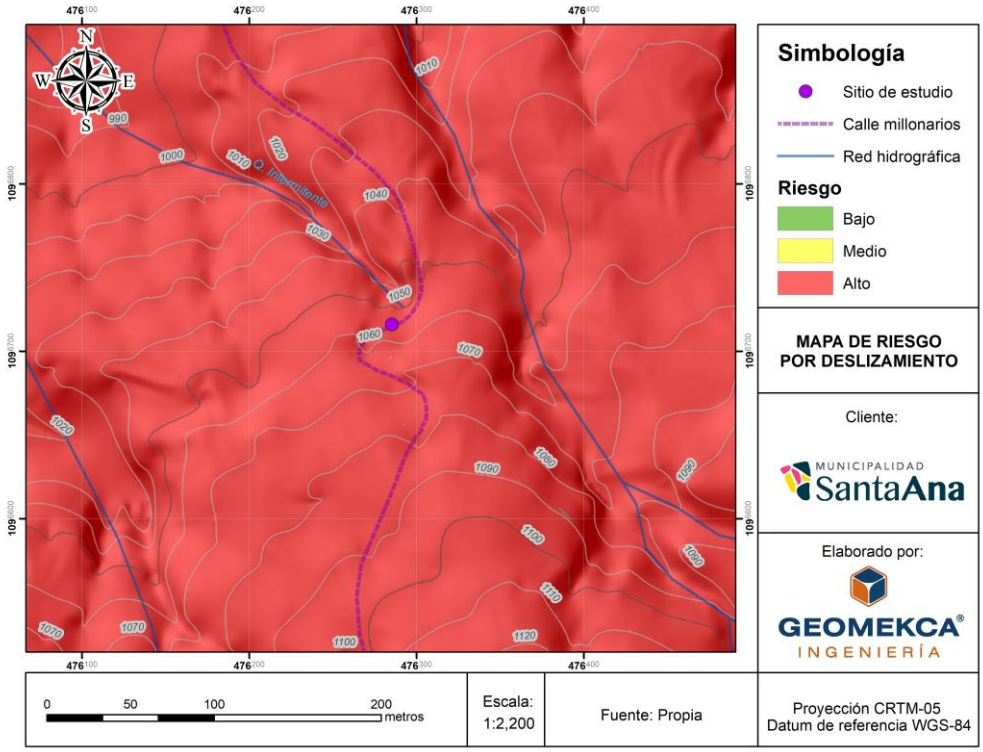



*Figura 26. Mapa de riesgo de deslizamiento*

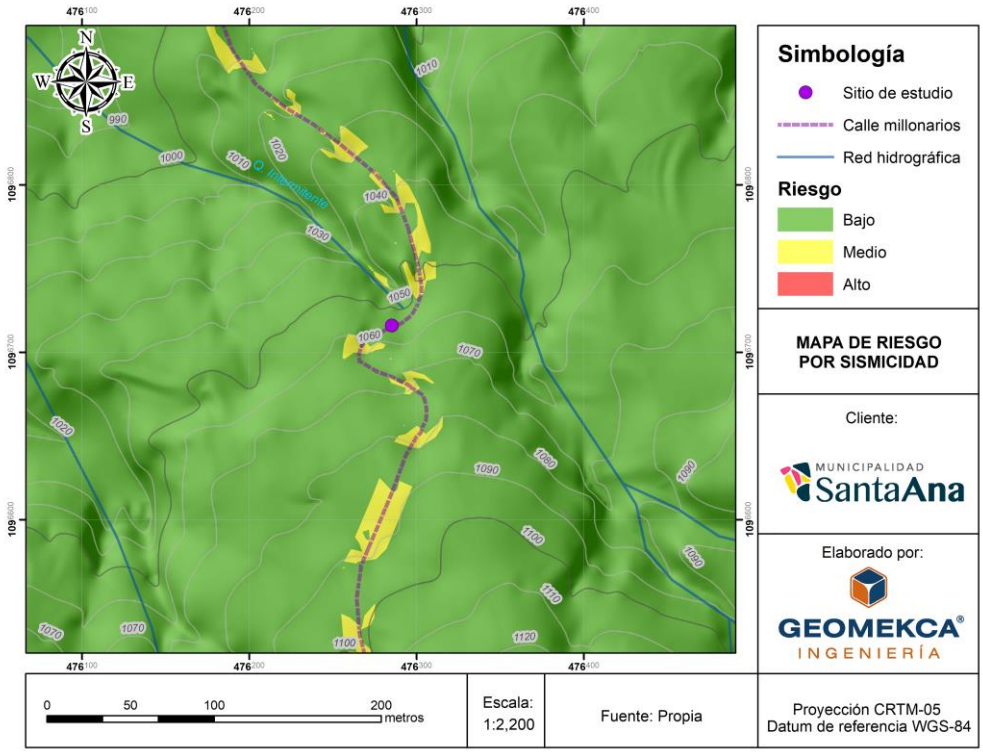



*Figura 27. Mapa de riesgo de inundación*

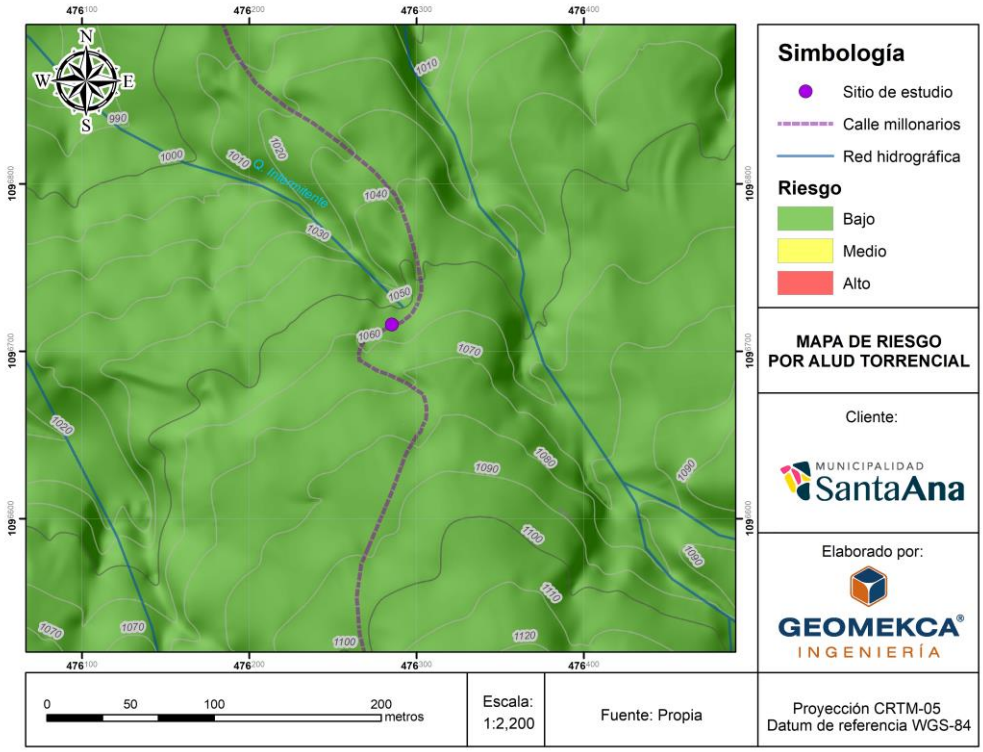



*Figura 28. Mapa de riesgo de alud torrencial*

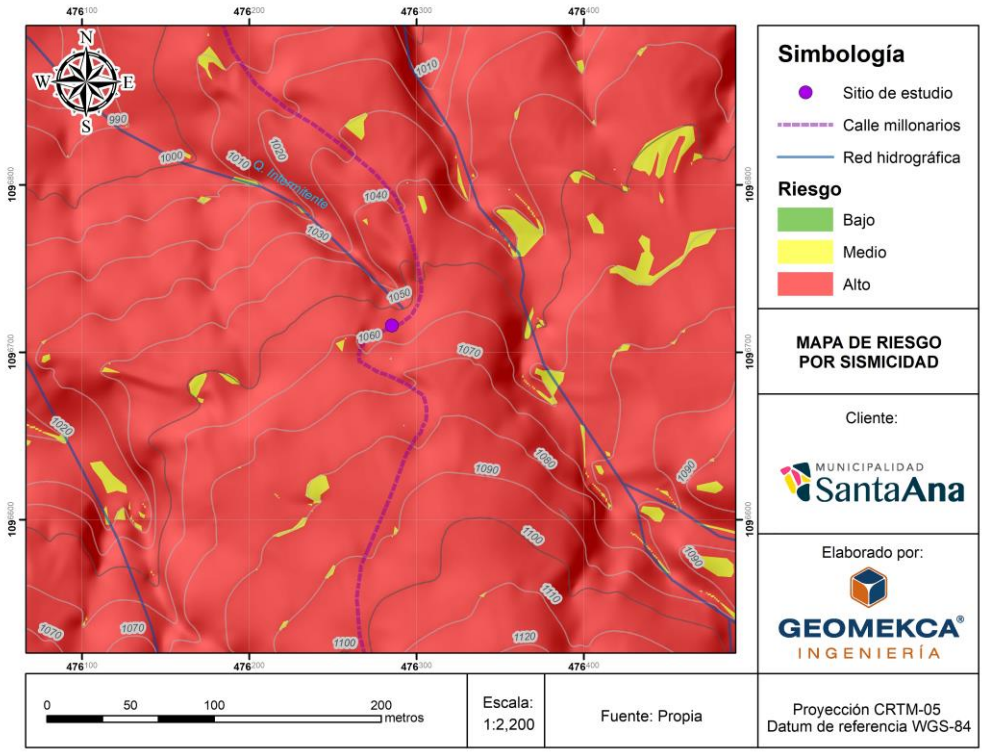



*Figura 29. Mapa de riesgo de afectación por sismo*

### 4.4.2 Riesgo inicial por amenazas de origen antrópico

En la Tabla 14 se indican los riesgos iniciales asociados a cada amenaza de origen antrópico, así como algunas amenazas naturales no consideradas en la sección anterior. En esta tabla solamente se incluyen las principales, que provocan niveles de riesgo medio o altos. La evaluación de la lista completa de amenazas evaluadas se muestra en el Apéndice B, del Registro de Riesgos (capítulo 11).

*Tabla 14. Riesgo inicial de amenazas de origen antrópico*

| Código | Amenaza | Nivel de amenaza | Índice de vulnerab. | Riesgo inicial |
|---|---|---|---|---|
| A.5 | Daños o salidas de operación provocadas por la influencia de un deslizamiento, avalancha u otro movimiento de masa del terreno causado por sismo. | 4 | 3 | 12 |
| A.9 | Daños o salidas de operación provocadas por deslizamiento, avalancha u otro movimiento de masa causado por tormentas o eventos hidrológicos extremos. | 4 | 3 | 12 |
| B.1 | Desplazamientos o inestabilidad por influencia directa de deslizamientos o inestabilidad del terreno, en zonas de fuerte pendiente. | 4 | 3 | 12 |
| B.7 | Desplazamientos o inestabilidad por influencia directa de procesos erosivos. | 4 | 3 | 12 |
| C.7 | Desplazamientos o inestabilidad por erosión superficial por el agua de escorrentía no controlada | 4 | 3 | 12 |
| C.8 | Desplazamientos o inestabilidad por influencia directa de socavación hidráulica. | 4 | 3 | 12 |
| F.7 | Daños a la infraestructura provocados por inseguridad social: vandalismo, conflictos armados, disturbios, terrorismo | 4 | 2 | 8 |
| F.8 | Daños a la infraestructura provocados por la acumulación de desechos, contaminación, derrames tóxicos. | 4 | 2 | 8 |
| F.9 | Daños a la infraestructura provocados por incendio. | 4 | 2 | 8 |
| G.2 | Afectación a propiedades de terceros causadas por el manejo inapropiado de agua. | 3 | 2 | 6 |
| G.3 | Afectación al terreno de terceros a causa de inestabilidad generada por la estructura o por las obras de protección a la misma. | 3 | 2 | 6 |

De acuerdo con el resultado que se presenta en la Tabla 14, resulta evidente que el principal riesgo para el sitio de calle Millonarios está relacionado con deslizamientos del terreno. La valoración específica permite indicar que el factor de inestabilidad principal corresponde al proceso erosivo que provoca la escorrentía superficial que se acumula durante los eventos extremos de precipitación, la cual es vertida directamente sobre la ladera.

Las amenazas codificadas con letra A, B o C, son amenazas naturales, algunas ya evaluadas también con la metodología de MIDEPLAN (2014).

Otras amenazas de consideración tienen que ver con la ocurrencia de deslizamientos provocados por sismo o saturación del terreno durante eventos extremos de precipitación y, adicionalmente, las amenazas de origen antrópico, asociadas con vandalismo, depósitos de basura e incendios provocados.

Se resalta también la importancia de atender el riesgo asociado a posibles daños que el talud podría provocar sobre propiedades de terceros, lo cual implicaría procesos de tipo legal en perjuicio de la gestión municipal.

La condición de estabilidad del terreno se ha evaluado de manera detallada, según se muestra en el capítulo 6.

## 4.5 Análisis de escenarios de cambio climático

No se dispone de estudios específicos sobre los procesos del cambio climático relacionados directamente con este sitio o con el cantón de Santa Ana. Evidentemente, la realidad del cambio climático afectará esta zona, por consiguiente, se ha buscado plantear alternativas viables de obras estructurales resilientes y adaptables para los escenarios de cambio que, probablemente, se darán en el futuro. Se considera que el principal escenario de cambio climático corresponde a la generación de caudales extraordinarios de escorrentía superficial.

En principio, en virtud de que la escorrentía superficial es posiblemente la principal variable de la estabilidad, se han considerado las siguientes premisas para el diseño de las obras de escorrentía superficial:

a. El sistema de manejo de la escorrentía superficial debe ser completamente revestido en concreto.
b. Los caudales extraordinarios, considerando al menos un 20% de exceso sobre los valores extremos, deberán ser canalizados adecuadamente por el sistema de manejo de la escorrentía superficial.
c. Todos los vertidos del agua de la escorrentía superficial deben disponer de sistemas de reducción de la energía hidráulica, con el fin de que no se generen nuevos problemas de erosión

d. La estabilidad de la ladera debe garantizarse para el escenario crítico establecido por el Código Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica.
e. Todos los elementos metálicos deben ser resistentes a la corrosión.
f. Las medidas estructurales deben ser planteadas en un desarrollo por etapas, a fin de permitir a la Municipalidad la posibilidad de completar todos los elementos de blindaje contra el cambio climático que se planteen para el sitio.

Las medidas de adaptación al cambio climático, estructurales, deberán ser conceptualizadas para considerar las siguientes premisas:

a. Estimación conservadora de caudales para el dimensionamiento de las obras de conducción, que permitan el manejo de eventos hidrometeorológicos extraordinarios
b. Estabilización del terreno mediante la inserción de anclajes, capaces de soportar variaciones en los procesos erosivos y magnitudes de sismos importantes.
c. Realineamiento de la vía, alejándola del borde de la ladera actual, a fin de compensar eventuales procesos erosivos que se manifiesten de manera inesperada a causa de eventos de escorrentía extraordinarios.

## 4.6 Información socio económica y biofísica básica disponible

### 4.6.1 Datos generales

El cantón de Santa Ana es el número 9 de la provincia de San José. Colinda al norte con la provincia de Alajuela y el cantón de Belén, al este con Escazú y al oeste y al sur con el cantón de Mora. Su territorio abarca 61,42 km2, de acuerdo con la descripción del sitio web municipal (www.santaana.go.cr/el-canton). Se trata de un cantón predominantemente urbano.

El sitio estudiado (calle Millonarios) se localiza en el distrito de Piedades. En la Figura 30 se puede observar el mapa oficial del cantón, donde se destaca el sitio evaluado.

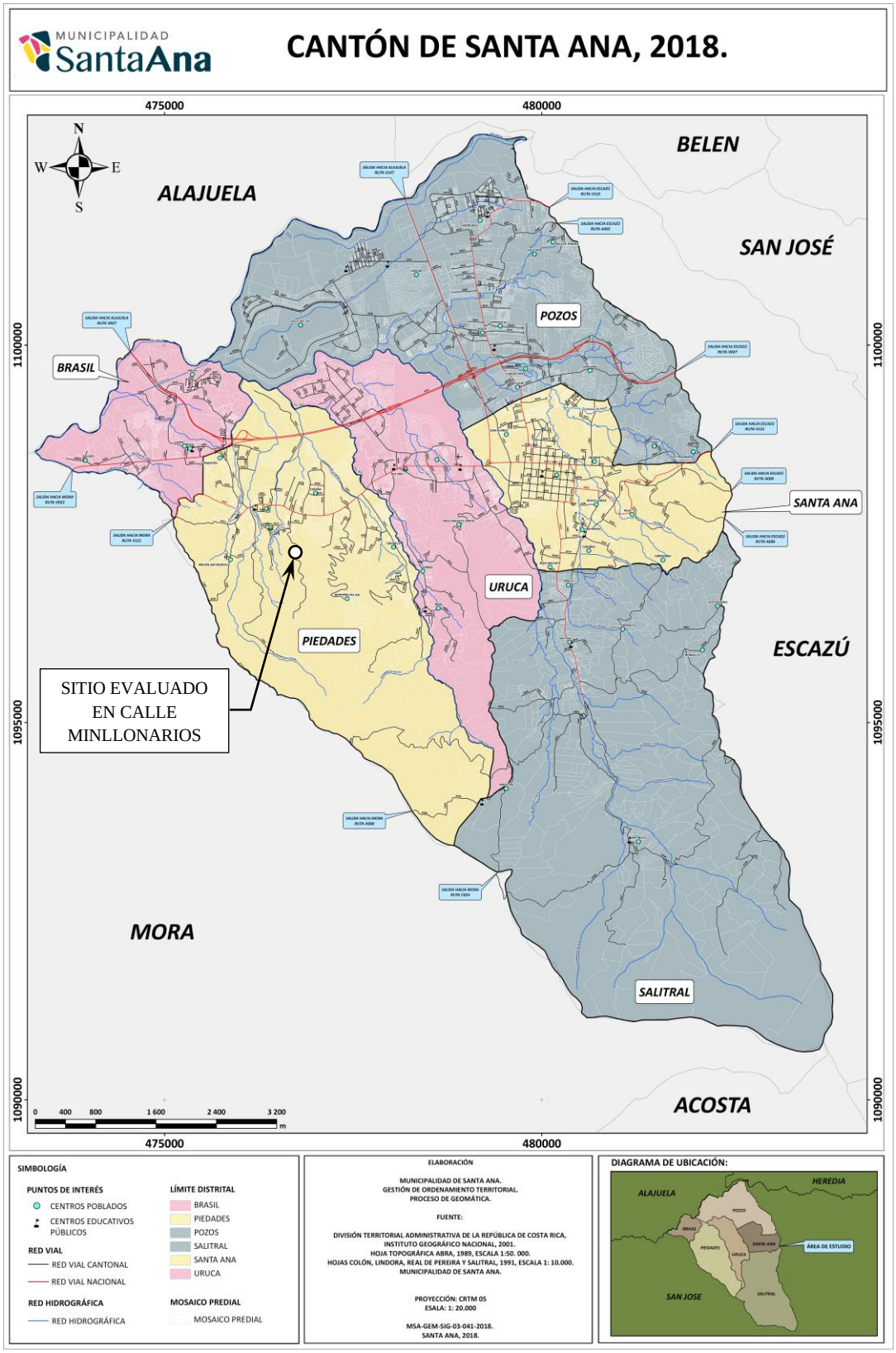



*Figura 30. Mapa oficial del cantón de Santa Ana*
*Fuente: Municipalidad de Santa Ana (2022)*

### 4.6.2 Relieve

Según datos del mapa topográfico de Costa Rica (topographic-map.com, 2022), el cantón de Santa Ana cuenta con relieves planos y otros más montañosos. El cantón tiene una elevación media de 904 metros sobre el nivel de mar (m.s.n.m.). Las elevaciones sobre el nivel del mar, del centro urbano de los poblados de distritos del cantón, son las siguientes: Santa Ana, a 904 m.s.n.m., Salitral, a 1 022 m.s.n.m., Pozos, a 847 m.s.n.m., Uruca, a 873 m.s.n.m., Piedades, a 899 m.s.n.m., y Brasil, a 878 m.s.n.m. El punto más alto del cantón se ubica en el extremo sur del cantón, en el distrito de Salitral, y cerca de la cima del cerro Cedral, y se encuentra a aproximadamente 2 358 m.s.n.m.

### 4.6.3 Uso del suelo

Del total de hectáreas que se conforman dentro del territorio del cantón de Santa Ana, un 42,38% se utiliza para uso urbano y otros usos, un 35,86% está cubierto por áreas silvestres protegidas, y un 8,71% está dedicado a áreas de cultivo, especialmente de café. Estos datos han sido dados por Esquivel (2012).

### 4.6.4 Geología y geomorfología

La siguiente información sobre geología y geomorfología ha sido publicada por el Instituto de Fomento y Asesoría Municipal, IFAM (2022).

El cantón de Santa Ana está compuesto geológicamente por materiales volcánicos de los periodos terciario y cuaternario, y son las rocas de la época terciaria las que predominan en la región. Del periodo terciario, se localizan al sur del cantón y cerca de los Cerros de Escazú, rocas sedimentarias e intrusivas, características de la época geológica del Mioceno. Se pueden ubicar también, cerca de los cerros, otros materiales tobáceos y propios de este periodo como conglomerados brechosos y areniscas, limolitas y lutitas.

Por otra parte, del periodo cuaternario, se localizan en los distritos de Pozos, Uruca y Piedades, materiales y rocas propias de este periodo como lavas, tobas y piroclastos, todos materiales volcánicos, así como se localizan en el distrito de Santa Ana otros materiales como rocas depósitos fluviales y coluviales.

El cantón de Santa Ana forma parte de tres unidades geomorfológicas; la de origen volcánico, la de acción intrusiva, y la de remoción en masa. Las tres unidades pertenecen a formación Pacacua. La primera unidad, de origen volcánico, se encuentra en los distritos de Santa Ana,

Pozos y Piedades, y presenta superficies planas onduladas. Está compuesta por rocas volcánicas, como lavas, tobas e ignimbritas, cubiertas por ceniza en un espesor variable.

La segunda unidad, de acción intrusiva, se divide en dos subunidades, denominadas Macizo de Escazú y loma del Alto de las Palomas. La subunidad Macizo de Escazú se encuentra en el sur del cantón y presenta laderas de fuerte pendientes. Está compuesta por rocas ígneas intrusivas y volcánicas con escamas o intercalaciones de sedimentos. Por otra parte, la subunidad loma del Alto de las Palomas se encuentra entre los poblados de Honduras y de Alto Palomas Oeste, y presenta lomas alargadas y laderas de pendiente suave, redondeadas y convexas. Está compuesta por ignimbritas como areniscas tobáceas muy meteorizadas y algo afectadas por la acción hidrotermal.

La tercera unidad, de remoción en masa, se encuentra en el norte del cantón, y presenta grietas longitudinales e irregularidades abundantes. Está compuesta por areniscas, conglomerados y lutitas, todas muy meteorizadas.

### 4.6.5 Hidrografía

El sistema fluvial del cantón de Santa Ana pertenece a la vertiente del Pacífico, así como a la cuenca del río Grande de Tárcoles. El sistema fluvial es drenado por los ríos Uruca y Oro, al cual se les unen los ríos Corrogres, Navajas, Pilas, Canca, La Cruz, San Marcos y Muerte. La mayoría de estos ríos nacen en el cantón, en los Cerros de Escazú. Además, los ríos Virilla y la quebrada Muerte funcionan también como límites cantonales (IFAM, 2022)

### 4.6.6 Clima

La información del Instituto Meteorológico Nacional (IMN, 2022b) señala que el clima del cantón de Santa Ana es tropical de sabana (tipo Aw), y cuya época seca va desde diciembre hasta marzo, y la lluviosa desde mayo a octubre, típico del clima del Valle Central. Cuenta con una temperatura que oscila entre los 15 y 26°C, y precipitaciones que promedian los 2 016 mm al año. El cantón además es parte de la subregión climática del Valle Central Oriental (VC2), que a su vez forma parte de la región climática del Valle Central.

### 4.6.7 Flora y fauna

El mapa ecológico de Costa Rica (Tosi Jr., 1969), aunque es una referencia antigua, se utiliza con frecuencia para describir la clasificación de zonas de vida del país. Según este mapa y la

información del IMN (2022b), el cantón de Santa Ana cuenta, según el sistema de clasificación de zonas de vida de Costa Rica, con las formaciones forestales de bosque húmedo premotano, bosque muy húmedo premontano, y bosque muy húmedo montano. Es por ello que en el cantón se pueden encontrar fauna como mariposas, ranas, conejos, pizotes, serpientes, dantas, jilgueros, coyotes, ardillas, venados y colibríes, así como flora como robles sabana passifloras, bromelias, orquídeas, iridáceas, montanoas, copey, cipresillos, nísperos, entre otros.

El sur del cantón se encuentra cubierto por la Zona Protectora Cerros de Escazú, la cual abarca una gran diversidad de hábitats y la biodiversidad. Una pequeña parte del este del cantón también se encuentra cubierta por el Centro de Conservación de Santa Ana, que alberga diferentes especies de flora y fauna para su protección.

### 4.6.8 Economía

El sitio web de la Municipalidad de Santa Ana (2022) refiere que la economía del cantón de Santa Ana es diversificada, siendo la más importante la que respecta al comercio, el sector inmobiliario, los servicios y financiero. Los distritos de Pozos y Brasil poseen una alta concentración de áreas comerciales y financieras, albergando varios parques empresariales y centros comerciales modernos, mientras que los distritos de Uruca y Santa Ana albergan diferentes áreas residenciales. Un 53,95% de la población es económicamente activa. La agricultura se desarrolla principalmente en el distrito de Salitral, donde se produce café, principalmente. Esta información proviene de los resultados del IX Censo Nacional de Población (INEC, 2002).

En el cantón se pueden encontrar a instituciones gubernamentales como la Bolsa Nacional de Valores, la Superintendencia General de Entidades Financieras (SUGEF), o el Patronato Nacional de Rehabilitación. También se ubican las sedes en Costa Rica de organismos y empresas internacionales como Mondelēz, Chiquita, Procter & Gamble, Daewoo, o Akamai. Asimismo, en el cantón se encuentran diversos centros comerciales como Terrazas Lindora o Momentum, y hoteles como Holiday Inn o Aloft.

Por otra parte, de acuerdo con el Índice de Competitividad Cantonal, el cantón de Santa Ana se ubica en el puesto 7.º a nivel nacional, destacándose en las áreas de porcentaje de matrícula terciaria en ciencias y tecnología, egresos municipales per cápita, tasa de mortalidad por infecciones, $m^2$ de construcción por $km^2$, y porcentaje de escuelas y colegios con Internet.

### 4.6.9 Desarrollo humano

De acuerdo con el Atlas de Desarrollo Humano Cantonal del año 2021 (UCR & PNUD, 2021), el cantón de Santa Ana tiene el mayor índice de desarrollo humano (IDH) de todo el país, con un valor de 0,935. Como referencia, el valor promedio de todo el país es 0,805.

Algunos datos que reflejan este alto valor del IDH, son los siguientes:

*Tabla 15. Índices de desarrollo humano del cantón de Santa Ana*

| | |
|---|---|
| Esperanza de vida al nacer | 83,5 años |
| Años esperados de escolaridad | 12,8 años |
| Años promedio de escolaridad | 10,8 años |
| Consumo eléctrico per cápita | 1530 kWh |
| Índice de conocimiento | 0,855 |
| Índice de bienestar material | 1,0 |
| Índice de desarrollo de género | 1,023 |
| Índice de desigualdad de género | 0,114 |

## 4.7 Análisis de la infraestructura pública por blindar

### 4.7.1 Blindaje de infraestructura con criterio correctivo

#### *4.7.1.1 Evaluación del estado de la infraestructura*

La infraestructura evaluada se encuentra en un estado de vulnerabilidad media (ver sección 4.2), en general, ante las diferentes amenazas a las que se expuesta. Los procesos de la geodinámica externa, así como las acciones antrópicas provocan el avance del deterioro de la calle Millonarios. Se requieren intervenciones para restablecer las condiciones seguras de operación. En la siguiente sección se analiza con detalle la situación actual del sitio.

En términos generales, el tramo evaluado de la calle Millonarios se encuentra lastreado, con una superficie de rodamiento sumamente deteriorada. Cuenta con cunetas laterales, en general, no revestidas con concreto ni otros materiales. En zonas de fuerte pendiente, se ha vertido una capa de concreto de pobre calidad y con alto deterioro.

Propiamente en el sitio evaluado, se tiene una disposición del agua de escorrentía, por medio de una tubería cuyo cabezal se ha desprendido, hacia la ladera. Esta situación, junto con el uso consuetudinario como botadero clandestino de residuos, por parte de los vecinos, genera un deterioro de la ladera, conducente a su inestabilidad. A su vez, el ancho de rodamiento de la calle en este sector se ha reducido a causa de la pérdida de terreno en la ladera.

#### *4.7.1.2 Análisis del sitio y situación de la infraestructura*

En el sitio evaluado existe una gran cantidad de residuos sólidos, que se han acumulado a lo largo del tiempo por causa de las deposiciones irregulares que realizan las personas. Como se aprecia en las imágenes de la Figura 31, la condición de inestabilidad ya estaba presente en el año 2018. En realidad, lo estaba desde varios años antes, según se puede corroborar por medio de las imágenes satelitales del sistema gratuito Google Earth, incluso con evidencias de inestabilidad o erosión desde el 2009.

El talud inestable se ubica dentro del derecho de vía y ha provocado un angostamiento de la ruta, generando una situación de riesgo para las personas que transitan la calle. Se puede apreciar su condición actual en la Fotografía 1, donde se pueden ver imágenes de la carretera y el inicio de la zona del talud inestable y en la Fotografía 2, donde se muestra la variedad y gran cantidad de basura que se ha depositado, desde basura orgánica hasta residuos de construcción e, incluso, bolsas de arena que se utilizaron en algún momento con la intención de evitar el avance de los procesos erosivos.

*Figura 31. Imágenes satelitales tomadas de Google Earth©*

*Fotografía 1. Imágenes del sitio desde la carretera*

*Fotografía 2. Condición del talud*

#### *4.7.1.3 Análisis de amenazas y eventos ocurridos*

El análisis de amenazas y eventos ocurridos se ha presentado en la sección 4.2.

#### *4.7.1.4 Aplicación (o diseño) de instrumentos de evaluación de la infraestructura*

No se han aplicado instrumentos de evaluación de la infraestructura para el análisis con criterio correctivo. Se ha utilizado el criterio experto como medio de evaluación.

#### *4.7.1.5 Estudios de ingeniería*

Los estudios de ingeniería que se describen en el capítulo 5 se han realizado bajo el criterio correctivo y prospectivo.

### 4.7.2 Blindaje de infraestructura con criterio prospectivo.

#### *4.7.2.1 Selección del terreno y evaluación del emplazamiento*

Se han considerado dos alternativas para el blindaje de la infraestructura con criterio prospectivo, a saber: la estabilización del sitio por medio de reforzamiento del terreno (ver apartado 4.8.1) y la reubicación del camino, mediante su alejamiento de la ladera, tomando parte de una propiedad privada para realinear el trazado de la ruta en una zona segura.

#### *4.7.2.2 Aplicación de la normativa*

La evaluación, identificación, diseño conceptual y diseño detallado de las obras de blindaje se ha realizado cumpliendo la normativa nacional aplicable, la cual incluye, entre las más importantes para este caso, las siguientes:

- Código Sísmico de Costa Rica (2010)
- Código de cimentaciones de Costa Rica (2009)
- Código geotécnico de taludes y laderas de Costa Rica (2015)

#### *4.7.2.3 Estudios técnicos de ingeniería para el blindaje*

Los estudios de ingeniería que se describen en el capítulo 5 se han realizado bajo el criterio correctivo y prospectivo. Por lo tanto, los resultados son útiles para realizar la ingeniería para el blindaje.

#### *4.7.2.4 Identificación de opciones de diseño de infraestructura resiliente.*

Se han identificado opciones de obras resilientes, con bajos requerimientos de mantenimiento. Estas se describen en la sección 4.8.1.

#### *4.7.2.5 Obras de contención y protección de la estructura.*

La estabilidad del terreno requiere la construcción de obras de estabilización, que consisten en la instalación de anclajes en el terreno. Por las dimensiones del sitio y de las zonas erosionadas, se considera que el uso de obras de contención conduciría a muros de gran volumen y costo. En la sección 4.8.1 se describen las obras de estabilización requeridas.

#### *4.7.2.6 Materiales recomendados*

El uso de anclajes metálicos inyectados, concreto lanzado y cunetas coladas en sitio con concreto convencional son los materiales recomendados para las obras.

## 4.8 Opciones de blindaje y medidas para la reducción y manejo del riesgo

### 4.8.1 Identificación y selección de opciones estructurales

#### *4.8.1.1 Diseño de las opciones de blindaje de las obras.*

A continuación, se presentan esquemas con el diseño conceptual de las opciones de blindaje del sitio.

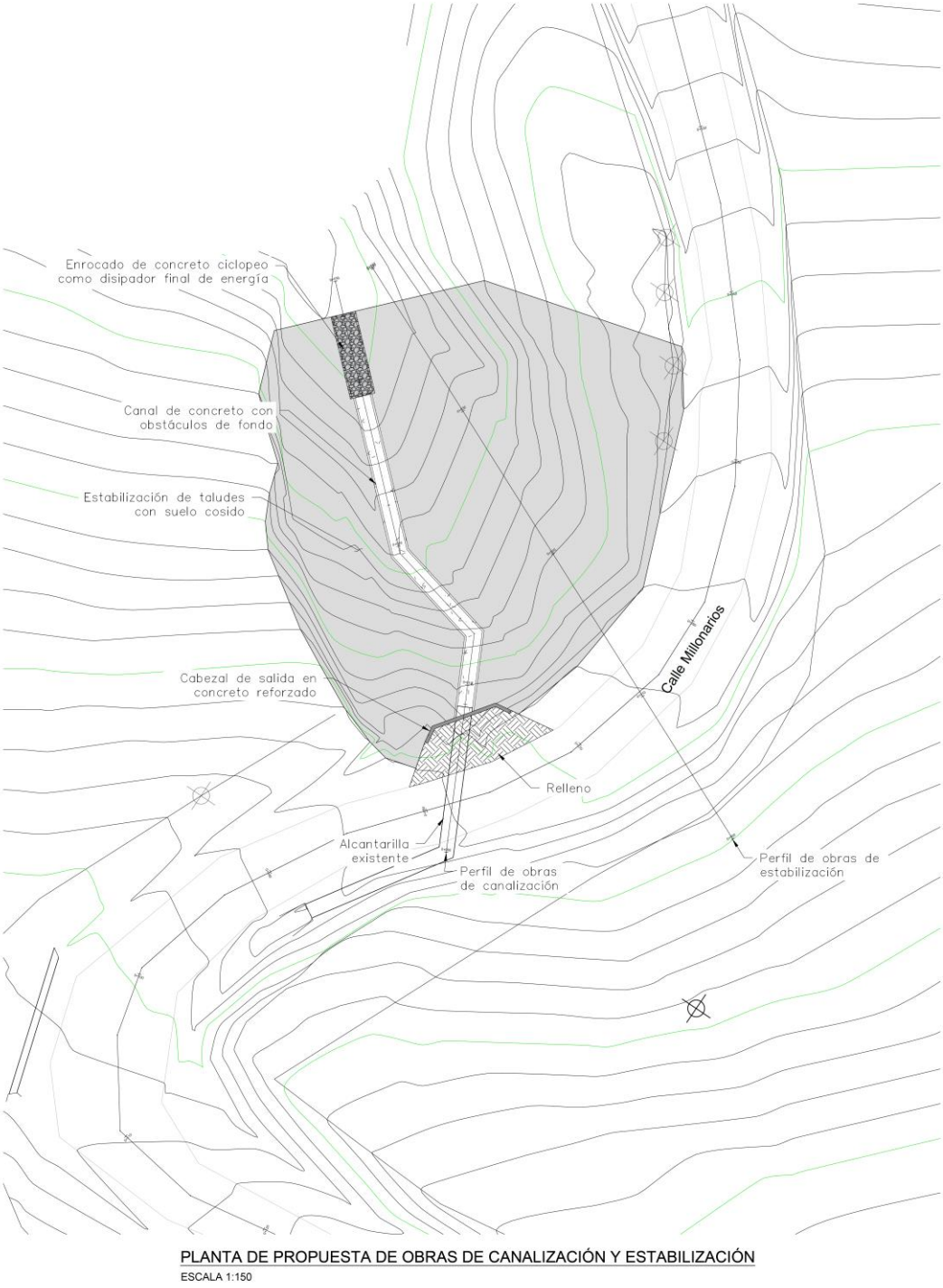
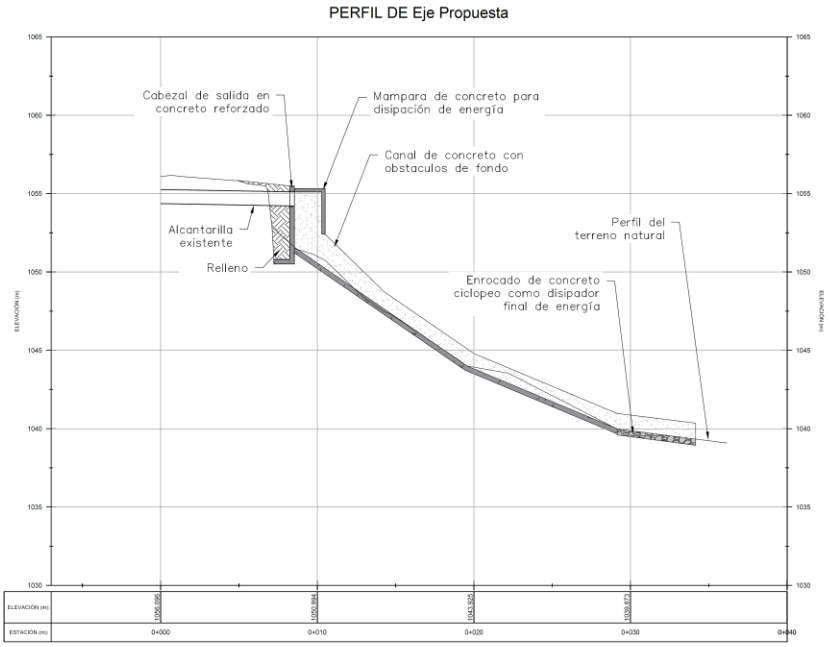
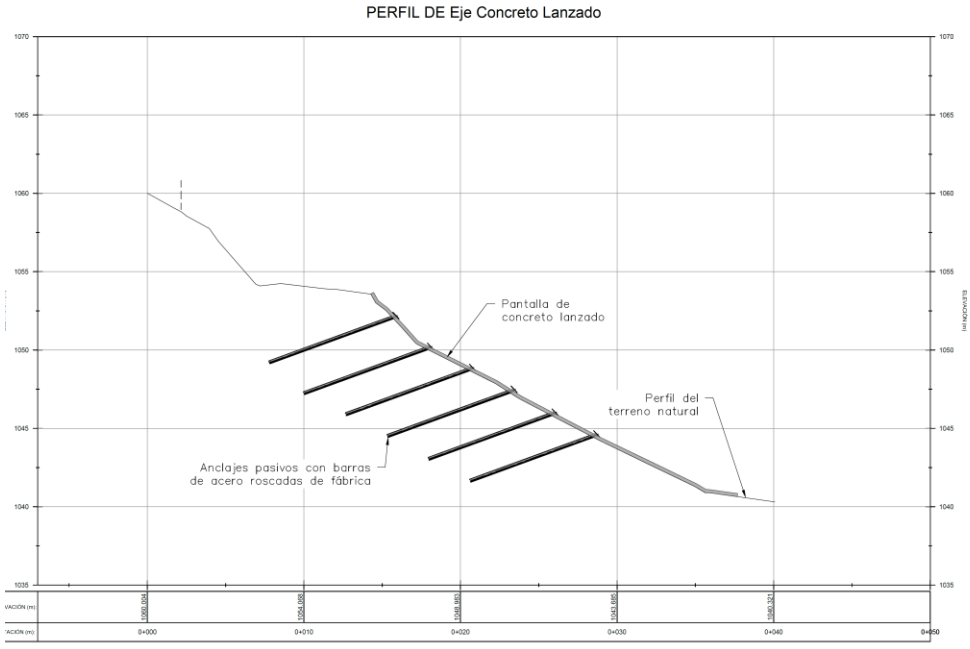



*Figura 32. Opción A: Suelo cosido – vista en planta*




PERFIL DE PROPUESTA DE OBRAS DE CANALIZACIÓN

ESCALA 1:150




PERFIL DE PROPUESTA DE OBRAS DE ESTABILIZACIÓN

ESCALA 1:150

*Figura 33. Opción A: Suelo cosido - secciones*

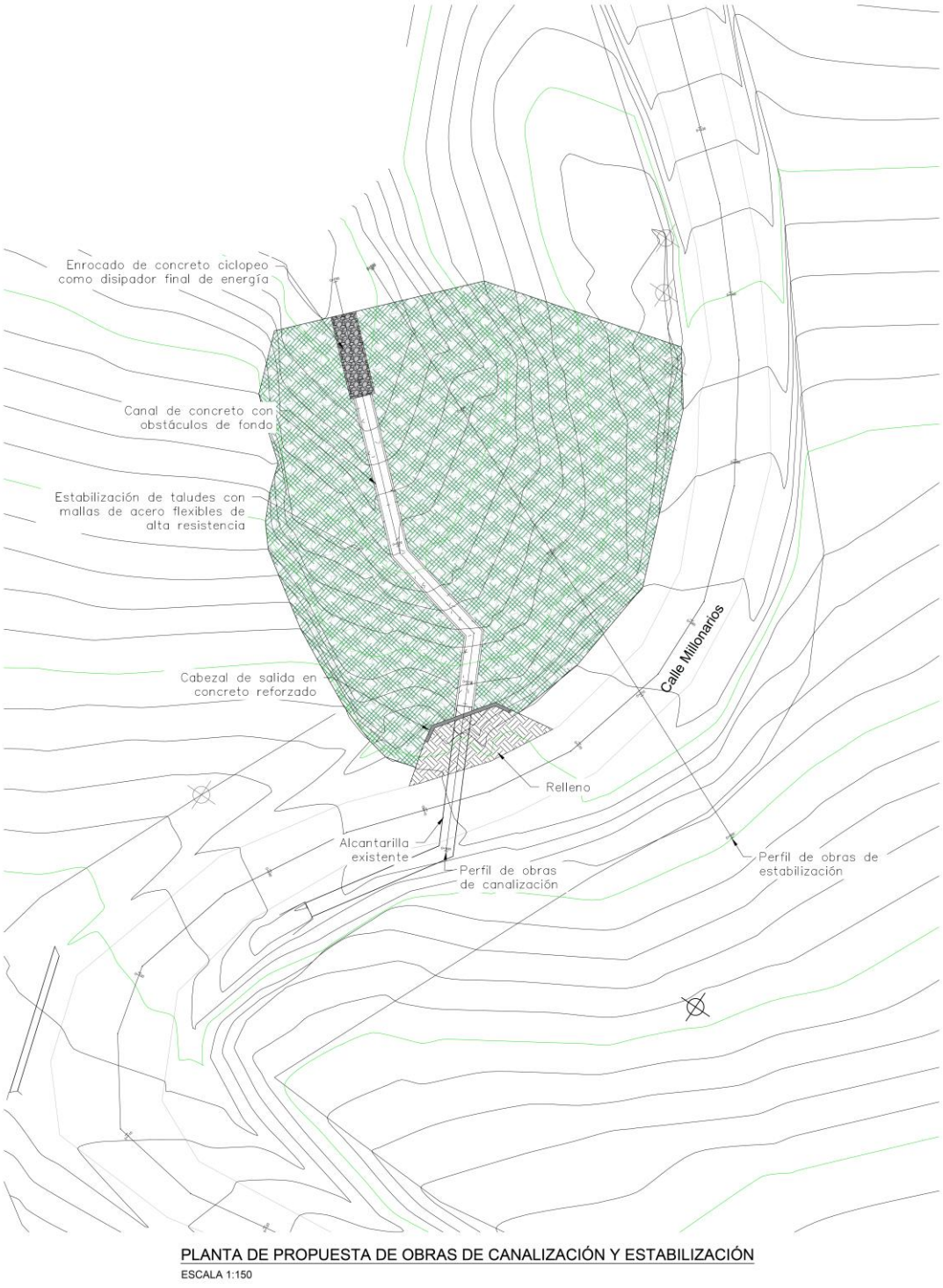



*Figura 34. Opción B: Suelo cosido flexible*

#### *4.8.1.2 Análisis de costo-beneficio de las opciones.*

El beneficio de las obras planteadas está estrechamente relacionado con las actividades de los usuarios de la ruta. Por lo tanto, se refiere a beneficio económico o social. No se ha establecido ningún mecanismo para la obtención de ingresos financieros por el uso de la infraestructura.

Dado que la determinación de los beneficios económicos está fuera del alcance de esta contratación, no es posible realizar un análisis detallado de las relaciones costo-beneficio o de otros índices del análisis económico.

Es necesario no omitir el comentario de que, aunque ambas opciones de blindaje estructural conducen a una reducción del riesgo, la alternativa con malla de alta resistencia podría ser más llamativa y seducir a vándalos, que podrían provocar incendios y daños a la malla o al geotextil. Por su parte, la opción con concreto lanzado podría ser más robusta, aunque también es susceptible de daños en caso de incendio.

### 4.8.2 Blindaje a través de procesos técnicos no estructurales

#### *4.8.2.1 Diagnóstico del proceso de gestión por blindar*

Según se ha derivado del análisis realizado hasta ahora, dos condiciones importantes son factores que amenazan el sitio de calle Millonarios. El primero está relacionado con las amenazas naturales. Para ello, las medidas del blindaje estructural descritas en la sección 4.8.1 son adecuadas y suficientes. El segundo comprende las amenazas de origen antrópico. Respecto de estas últimas, la erosión por escorrentía superficial (sección 4.2.6.1) y la posibilidad de daños a propiedades de terceros (sección 4.2.6.5), pueden ser resueltas con las mismas medidas de blindaje estructural. Sin embargo, los daños por inseguridad social (sección 4.2.6.2), el deterioro por acumulación de desechos (sección 4.2.6.3) y el deterioro por incendio provocado (sección 4.2.6.4) son sumamente difíciles de resolver por medio de un blindaje estructural. Para estas amenazas, se proponen en la siguiente sección algunas medidas de tipo no estructural.

#### *4.8.2.2 Identificación y selección de opciones no estructurales.*

Existen varias opciones no estructurales para evitar o reducir los niveles de amenaza en el sitio de calle Millonarios. Se pueden mencionar los siguientes:

a. Sensibilización y comunicación. Implica procesos de interacción social para comunicar sobre el riesgo evaluado. Se trata de una actividad permanente de la gestión social a cargo de la Municipalidad. Se requiere identificar los actores clave y trabajar con ellos para trasladar un mensaje eficaz a la ciudadanía respecto a la protección de la infraestructura.

b. Rotulación. Es posible preparar información gráfica y rotulación normativa que se instale en las inmediaciones del talud que se protegerá, de manera que los ciudadanos entiendan la importancia del cuido de la infraestructura, así como de las consecuencias de producir daños en las obras y, además, de la prohibición de depositar desechos y las consecuencias de hacerlo.

c. Limitación del acceso. Establecer vallados y cercas alrededor de la infraestructura protegida para evitar la entrada de personas que puedan dañarla.

d. Vigilancia y aplicación de multas. Instalación de cámaras de vigilancia remota y persecución de infractores, con el propósito de aplicar la normativa vigente.

e. Monitoreo mediante instrumentos. Instalación de instrumentos y equipos que permitan conocer la evolución de las deformaciones del terreno, formación de grietas, asentamientos y otras variables (por ejemplo, podría valorarse la instalación de un pluviómetro en una ubicación cercana, que permita vincular la cantidad de las precipitaciones con umbrales de atención y alarma).

f. Sistemas de alerta. Sistema de vigilancia equipado con los instrumentos de monitoreo señalados en el punto e., de manera que se generen alertas y alarma para la ejecución de medidas o acciones de respuesta inmediata. Para ello, debe establecerse un completo Plan de Gestión del Riesgo.

g. Plan de Gestión del Riesgo. Se requiere la elaboración de un plan completo que establezca los cursos de acción como respuesta ante los riesgos. Este Plan vincula los instrumentos de monitoreo con los sistemas de alerta y, además, establece los canales correctos de comunicación para la respuesta ante los riesgos, las responsabilidades y ámbitos de acción de las personas encargadas en la Municipalidad, las herramientas y equipos disponibles para la atención, entre otros aspectos. Implica, por otra parte, la instauración en todos los niveles de la organización de todos los componentes del Sistema de Gestión de Riesgos. Una posibilidad, sería la implantación del estándar ISO 31000-2018, aunque existen otras metodologías apropiadas.

h. Participación ciudadana. Involucrar a los ciudadanos que son usuarios de la infraestructura, están interesados en ella o se ven afectados por su mal

funcionamiento, para que participen del proceso de vigilancia y cuido de la infraestructura. Se requiere algún nivel de organización (por ejemplo, a través de un comité) apoyado por el área encargada de la gestión social dentro de la Municipalidad.

#### *4.8.2.3 Propuesta de medidas u opciones.*

Con respecto al talud inestable en calle Millonarios, se propone la ejecución de las siguientes medidas, las cuales se proponen segmentadas por etapas, de manera que puedan ser instauradas de manera progresiva, conforme se disponga de los recursos necesarios:

Etapa 1: Medidas inmediatas

- Rotulación
- Sensibilización y comunicación
- Participación ciudadana

Etapa 2: Medidas de mediano plazo

- Sistema de vigilancia remota
- Vigilancia y aplicación de multas
- Monitoreo
- Sistema de alerta

Etapa 3: Medidas de largo plazo

- Plan de gestión de riesgo

El detalle y dimensionamiento de estas medidas requiere un esfuerzo específico, que está fuera del alcance de esta evaluación.

### 4.8.3 Impacto de la implementación

La implementación de las medidas señaladas redundará en un impacto positivo para la Municipalidad y los ciudadanos del cantón. Entre otros beneficios, se pueden señalar como más relevantes los siguientes:

a. Conservación del valor de la infraestructura pública municipal
b. Incremento de la seguridad ciudadana contra amenazas naturales y el cambio climático
c. Mejora de la eficiencia en el uso de los recursos públicos
d. Optimización de los recursos y los esfuerzos de trabajo requeridos para el mantenimiento de la infraestructura pública.
e. Mantenimiento de las condiciones necesarias para el desarrollo socio económico del área de influencia inmediata
f. Integración de todos los habitantes del distrito de Piedades con la dinámica socio económica.
g. Mejora de la participación ciudadana y su involucramiento en las tareas de protección y cuido de la infraestructura y del ambiente en el distrito de Piedades.

Desde un punto de vista de los impactos negativos que se producen por la implantación de las obras, se pueden mencionar los siguientes:

a. Interrupción del paso, de manera temporal, en algunos puntos de la calle Millonarios durante la ejecución de las obras
b. Generación de ruido y polvo por el paso de vagonetas y maquinaria.

### 4.8.4 Costo de la no implementación

El costo social por la no implementación es importante, en especial para quienes lo asumen directamente, en este caso, los usuarios de la calle Millonarios. No existen estudios actuariales del costo de las actividades socio económicas vinculadas al uso de la infraestructura evaluada. Sin embargo, es claro que estos costos existen, vinculados a actividades y procesos como los que se indican a continuación (entre otros):

a. Costo económico por producción que no se puede comercializar
b. Costo económico por degradación de la infraestructura
c. Costos ambientales asociados a la no atención de las condiciones que provocan mayor calentamiento global y perjudican el ambiente

d. Costos a futuro de mayor cuantía por la necesidad de atender una condición crítica desfavorable si no se interviene ahora con obras de protección y estabilización
e. Costo de procesos legales en contra de la Municipalidad por desatención o incumplimiento de deberes.

## 4.9 Evaluación del riesgo residual

Las opciones disponibles para el blindaje por medio de acciones estructurales, descritas en la sección 4.8, implican la construcción de obras para el manejo de la escorrentía superficial y para la estabilización de la ladera mediante anclajes.

Para evaluar el impacto de la ejecución de las acciones estructurales se realiza una nueva evaluación del riesgo, la cual presume que tales acciones serán efectivamente realizadas. Bajo esa suposición, se realiza una nueva valoración del riesgo que, debido a la realización de las acciones de respuesta, implica una disminución del nivel de amenaza o, bien, una disminución de la vulnerabilidad (o ambas). Esto tiene como resultado que el nuevo valor del riesgo, así calculado, será menor. Este valor se denomina “riesgo residual”.

El procedimiento para determinar el riesgo residual es el mismo que el usado para el riesgo inicial. Por tal razón, se omiten de esta sección todos los cálculos y mapas intermedios y se presenta directamente la Tabla 16, que muestra el riesgo residual de las amenazas identificadas como principales (según la sección 4.2.7).

Podrá apreciarse ahora que, tras la aplicación de las acciones de respuesta recomendadas (acciones estructurales, pero también las no estructurales) se consigue llevar los niveles de riesgo a valores aceptables, blindando así la infraestructura contra las amenazas actuales (enfoque correctivo) y contra las futuras derivadas del cambio climático (enfoque prospectivo).

*Tabla 16. Riesgo residual*

| CÓDIGO | AMENAZAS | RIESGO ACTUAL | | | ACCIONES DE RESPUESTA | RIESGO RESIDUAL | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Amenaza | Vulnerabilidad | Riesgo Actual | | Amenaza | Vulnerabilidad | Riesgo residual |
| **A** | **Riesgos asociados a factores externos (sismos, volcanes, fenómenos hidrometeorológicos)** | | | | | | | |
| A.5 | Daños o salidas de operación provocadas por la influencia de un deslizamiento, avalancha u otro movimiento de masa del terreno causado por sismo. | 4 | 3 | 12 | Evaluación detallada. Obras de estabilización con anclajes. | 1 | 1 | 1 |
| A.9 | Daños o salidas de operación provocadas por deslizamiento, avalancha u otro movimiento de masa causado por tormentas o eventos hidrológicos extremos | 4 | 3 | 12 | Evaluación detallada. Control de la escorrentía superficial. Obras de estabilización con anclajes. | 1 | 1 | 1 |
| B.1 | Desplazamientos o inestabilidad por influencia directa de deslizamientos o inestabilidad del terreno, en zonas de fuerte pendiente | 4 | 3 | 12 | Evaluación detallada. Obras de estabilización con anclajes. | 1 | 1 | 1 |
| B.7 | Desplazamientos o inestabilidad por influencia directa de procesos erosivos. | 4 | 3 | 12 | Obras de control de escorrentía superficial | 2 | 1 | 2 |
| C.7 | Desplazamientos o inestabilidad por erosión superficial por el agua de escorrentía no controlada | 4 | 3 | 12 | Obras de control de escorrentía superficial | 2 | 1 | 2 |
| C.8 | Desplazamientos o inestabilidad por influencia directa de socavación hidráulica. | 4 | 3 | 12 | Obras de control de escorrentía superficial | 2 | 1 | 2 |
| F.7 | Daños a la infraestructura provocados por inseguridad social: vandalismo, conflictos armados, disturbios, terrorismo | 4 | 2 | 8 | Rotulación. Concientización ciudadana. Instalación de cámaras de seguridad. | 3 | 1 | 3 |
| F.8 | Daños a la infraestructura provocados por la acumulación de desechos, contaminación, derrames tóxicos | 4 | 2 | 8 | Rotulación. Concientización ciudadana. Instalación de cámaras de seguridad. | 3 | 1 | 3 |
| F.9 | Daños a la infraestructura provocados por incendio | 4 | 2 | 8 | Rotulación. Concientización ciudadana. Instalación de cámaras de seguridad. | 3 | 1 | 3 |
| G.2 | Afectación a propiedades de terceros causadas por el manejo inapropiado de agua | 3 | 2 | 6 | Obras de control de escorrentía superficial | 2 | 1 | 2 |
| G.3 | Afectación al terreno de terceros a causa de inestabilidad generada por la estructura o por las obras de protección a la misma | 3 | 2 | 6 | Evaluación detallada. Control de la escorrentía superficial. Obras de estabilización con anclajes. | 2 | 1 | 2 |

## 4.10 Apoyo a la gobernabilidad y el diálogo social local

La gobernabilidad y el diálogo social son procesos que están a cargo de la Municipalidad de Santa Ana, como principal actor (no el único, lógicamente). Por lo tanto, le corresponde llevar la iniciativa de la gestión social, relacionada con la infraestructura que se intervendrá. Para ello, se mencionan a continuación algunos aspectos que deberán ser oportunamente considerados por el área responsable de la gestión social dentro de la Municipalidad.

### 4.10.1 Actores clave

Los actores clave son aquellos involucrados de manera directa en las causas del problema y de sus posibles soluciones. Estos actores clave deben, necesariamente, ser partícipes del proceso de gestión social. Se han identificado, de manera preliminar, los siguientes:

- Alcalde y vice alcaldesas
- Concejo municipal (los concejales)
- Concejo de distrito de Piedades (los concejales)
- Comité Municipal de Emergencias
- Proceso de Gestión de Desarrollo Humano
- Proceso de Gestión de Riesgo de Desastres
- Proceso de Seguridad y Vigilancia Comunal
- Comité de vecinos en la zona de inicio de la calle Millonarios
- Vecinos usuarios de la calle Millonarios, residentes de la zona superior
- Propietario del terreno por ser donado mediante convenio

### 4.10.2 Procesos de la gestión social

Los siguientes tres procesos son realizados por la Municipalidad y son fundamentales para el éxito de la gestión social:

a. Proceso de información-sensibilización
b. Proceso de carácter consultivo
c. Rendición de cuentas

Estos procesos se realizan de manera posterior a la ejecución del presente estudio, por lo cual no se incluye una descripción detallada en este informe.

*Esta página se ha dejado intencionalmente en blanco*

# 5 Investigación del sitio

A continuación, en el presente capítulo se hace una descripción de los estudios realizados en el sitio del talud inestable de calle Millonarios. Como parte de los análisis de la infraestructura pública por blindar (sección 4.7), se han realizado estos estudios de ingeniería, específicamente de investigación geotécnica, con carácter tanto predictivo como correctivo.

En el Apéndice C (capítulo 12) se ha incluido íntegramente el informe con los resultados de toda la investigación geotécnica, informe No. 2022-07-6296 del 28 de julio del 2022, realizado por la empresa Castro y De la Torre S.A.

## 5.1 Visita de campo

Se procedió a realizar una visita de campo por parte de dos profesionales especialistas en ingeniería geotécnica y evaluación de riesgos al sitio. El objetivo de la visita fue determinar los principales aspectos geotécnicos que puedan incidir en el análisis y evaluación de los riesgos. La visita se realizó en compañía del ingeniero que asumirá la responsabilidad del proceso constructivo.

## 5.2 Investigación geotécnica realizada

La investigación geotécnica se basa en perforaciones tipo SPT, prospección geofísica y ensayos de laboratorio.

### 5.2.1 Perforaciones SPT

Las perforaciones mediante la técnica SPT (Ensayo de Penetración Estándar, siglas en inglés), se realizaron siguiendo la norma ASTM D-1586.

La profundidad alcanzada en cada perforación se muestra en la Tabla 17. En ambos sondeos a la profundidad indicada en la Tabla 17 se alcanzó el rebote del mazo, lo cual significa que se aplicaron 50 golpes o más y no fue posible seguir perforando debido a la alta consistencia del terreno.

*Tabla 17. Profundidad alcanzada en las perforaciones SPT.*

| Sondeo | Metros perforados |
|---|---|
| P-1 | 2,80 |
| P-2 | 3,60 |

Este resultado implica que, si se requiere profundizar más los sondeos, habría que cambiar a la técnica de perforación a rotación con broca diamantada y recuperación de testigos de roca meteorizada y roca sana. No obstante, en el alcance de la contratación no está previsto el uso de la técnica mencionada.

En cuanto al perfil estratigráfico, en forma preliminar se definieron tres geomateriales de composición similar, según se muestra en la Tabla 18.

*Tabla 18. Perfil estratigráfico preliminar del terreno según sondeos SPT.*

| Capa | Sondeo | Profundidad (m) | Descripción |
|---|---|---|---|
| A | P-1 | 0,00 – 0,15 | Relleno de grava color café gris en una matriz arenosa |
| | P-2 | 0,00 – 0,20 | |
| B | P-1 | 0,15 – 0,35 | Relleno limo arenosos color café con raíces finas, con olor orgánico y bloques de roca |
| | P-2 | 0,20 – 0,45 | |
| C | P-1 | 0,35 – 2,80 | Limos arcillo arenosos, color café amarillento con pintas negras, consistencia semidura, dura a rígida |
| | P-2 | 0,45 – 3,60 | |

En los sondeos SPT no se encontró el nivel freático. Los resultados del número de golpes $N_{SPT}$ sin corregir por pérdidas de energía se presentan en la Tabla 19.

*Tabla 19. Valores de $N_{SPT}$ y su variación con la profundidad.*

| Profundidad (m) | | $N_{SPT}$ | |
|---|---|---|---|
| **Inicio** | **Fin** | **P-1** | **P-2** |
| 0,00 | 0,45 | -- | -- |
| 0,45 | 0,90 | 15 | 22 |
| 0,90 | 1,35 | 16 | 40 |
| 1,35 | 1,80 | 19 | 38 |
| 1,80 | 2,25 | 36 | 26 |
| 2,25 | 2,70 | 87 | 34 |
| 2,70 | 3,15 | RM | 25 |
| 3,15 | 3,60 | -- | 28 |

*RM: Rebote del mazo en estrato firme.*

### 5.2.2 Prospección geofísica

En el caso de la investigación geofísica, se obtuvieron resultados preliminares que indican que se detectaron entre tres y cuatro capas sísmicas bien definidas, con espesores variables, según el contraste que se obtuvo entre los valores de la velocidad de onda primaria ($V_p$).

Se realizaron dos perfiles sísmicos, según lo requerido por los especialistas en geotecnia de Geomekca Ingeniería, los cuales también fueron levantados con topografía.

Los resultados por perfil sísmico se presentan en la Tabla 20.

*Tabla 20. Capas geofísicas, espesores y velocidades de onda*

| **Perfil sísmico** | **Capa** | **$V_p$ (m/s)** | **$V_s$ (m/s)*** | **Profundidad (m)** | | **Correlación geológica** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | **mínima** | **máxima** | |
| SR-1 | 1 | 640 | 370 | 0,5 | 6,6 | Suelos residuales cohesivos |
| | 2 | 870 | 502 | 2,1 | 7,8 | Roca meteorizada y fracturada |
| | 3 | 1060 - 1340 | 774 | 0,5 | 15,7 | Roca fracturada |
| | 4 | 1530 - 1670 | 964 | > 4,0 | | Roca sana |
| SR-2 | 1 | 440 - 570 | 329 | 2,4 | 5,3 | Suelos residuales cohesivos |
| | 2 | 710 – 830 | 479 | 2,4 | 12,3 | Roca meteorizada y fracturada |
| | 3 | 980 | 566 | > 4,0 | | Roca fracturada |

*(*) Valores calculados con correlaciones.*

La interpretación de los perfiles sísmicos se muestra en la Figura 35 y en la Figura 36. En el modelo geotécnico del terreno se integran los resultados de los sondeos SPT y de los sondeos de refracción sísmica.

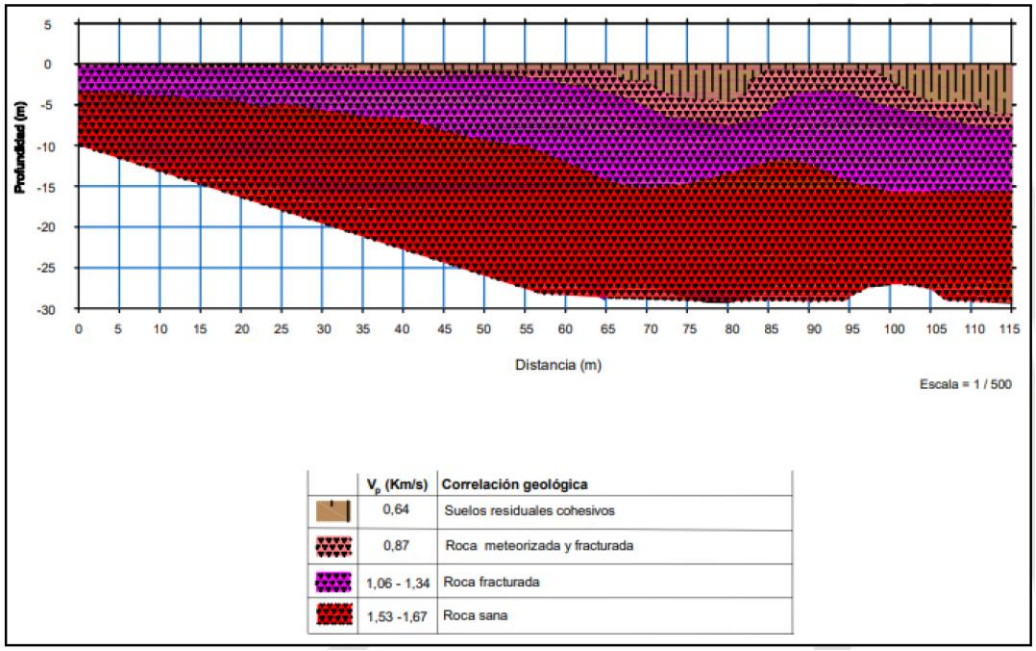



*Figura 35. Perfil sísmico SR-1.*

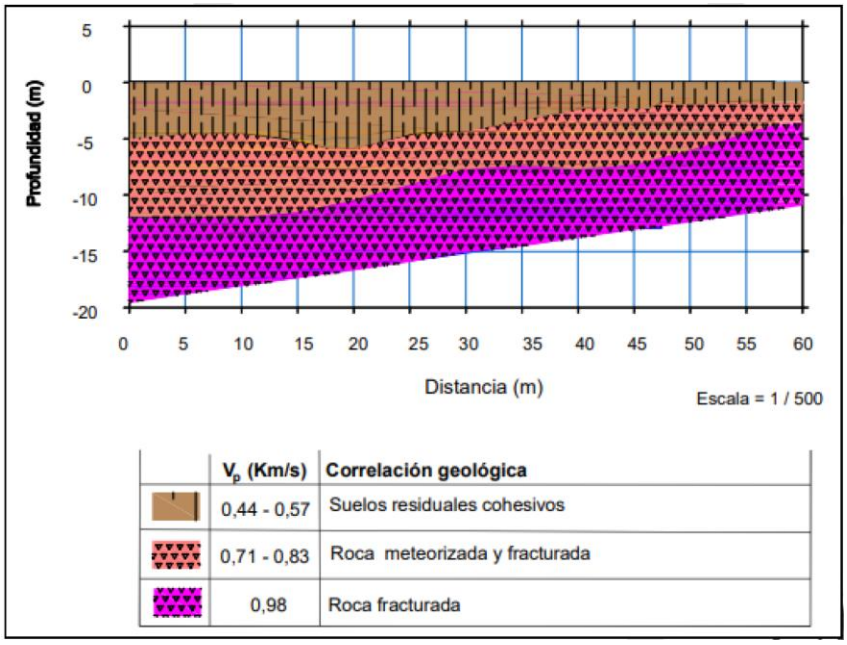



*Figura 36. Perfil sísmico SR-2.*

### 5.2.3 Resultados del laboratorio

El conjunto de ensayos de laboratorio fue realizado también por el laboratorio Castro & de la Torre, acreditado por ECA. Como conclusión general y, de acuerdo con los resultados obtenidos de las dos perforaciones realizadas, se puede considerar que este terreno es apto para la construcción del proyecto.

Con respecto a la estratigrafía, el laboratorio concluye que existe un relleno de grava, un relleno de un suelo cohesivo con raíces finas, olor a orgánico y piedras y un relleno de cascajo (capas A, B y C). Debajo de éstos aparece un perfil de suelos cohesivos de un limo arcillo arenoso (capa D), hasta los 3,60 m de profundidad máxima investigada.

Los ensayos realizados incluyen los siguientes (Tabla 21):

*Tabla 21. Ensayos geotécnicos realizados*

| Nombre del Ensayo | Normativa aplicada |
|---|---|
| Compresión inconfinada | (ASTM D-2166, Instrucción de ensayo IE-33*) |
| Densidad seca | (ASTM D-7263**) |
| Humedad natural | (AASHTO T-265, Instrucción de ensayo IE-06*) |
| Límites de Atterberg | (ASTM D-4318, Instrucción de ensayo IE-15*) |
| Análisis granulométrico | (ASTM D-1140**) |

Los resultados obtenidos se resumen a continuación, en la Tabla 22.

*Tabla 22. Resultado de los ensayos geotécnicos*

| Parámetro | Resultado |
|---|---|
| Límites de Atterberg: ASTM D-4318<br>Instrucción de ensayo IE-15* | |
| Límite líquido | 41 |
| Índice plástico | 5 |
| Granulometría: ASTM D-1140** | |
| MALLA | % PASANDO |
| • 9,5mm (3/8'') | 100 |
| • 4,75 mm (#4) | 98 |
| • 0,425 mm (#40) | 71 |
| • 0,075 mm (#200) | 52 |
| Contenido de arena % | 48 |
| Clasificación unificada: ASTM D-2487** | ML–SM |

## 5.3 Levantamiento topográfico

El levantamiento topográfico se realizó de acuerdo con lo indicado en los términos de referencia de la contratación. Sin embargo, en forma adicional se levantó una franja de terreno de la propiedad ubicada en el talud interno del camino, pues según fue indicado por la representante de la Municipalidad, el propietario está dispuesto a ceder un área de su terreno para realinear el trazo del camino y ampliar la curva.

En la Figura 37 se muestra el levantamiento topográfico en planta que incluye las curvas de nivel del terreno, el trazo del camino, el levantamiento del deslizamiento o zona de inestabilidad, las obras de drenaje y la ubicación de las perforaciones.

En el Apéndice A (capítulo 10) se incluye la lámina que contiene secciones transversales además de las curvas de nivel mostradas en la planta.

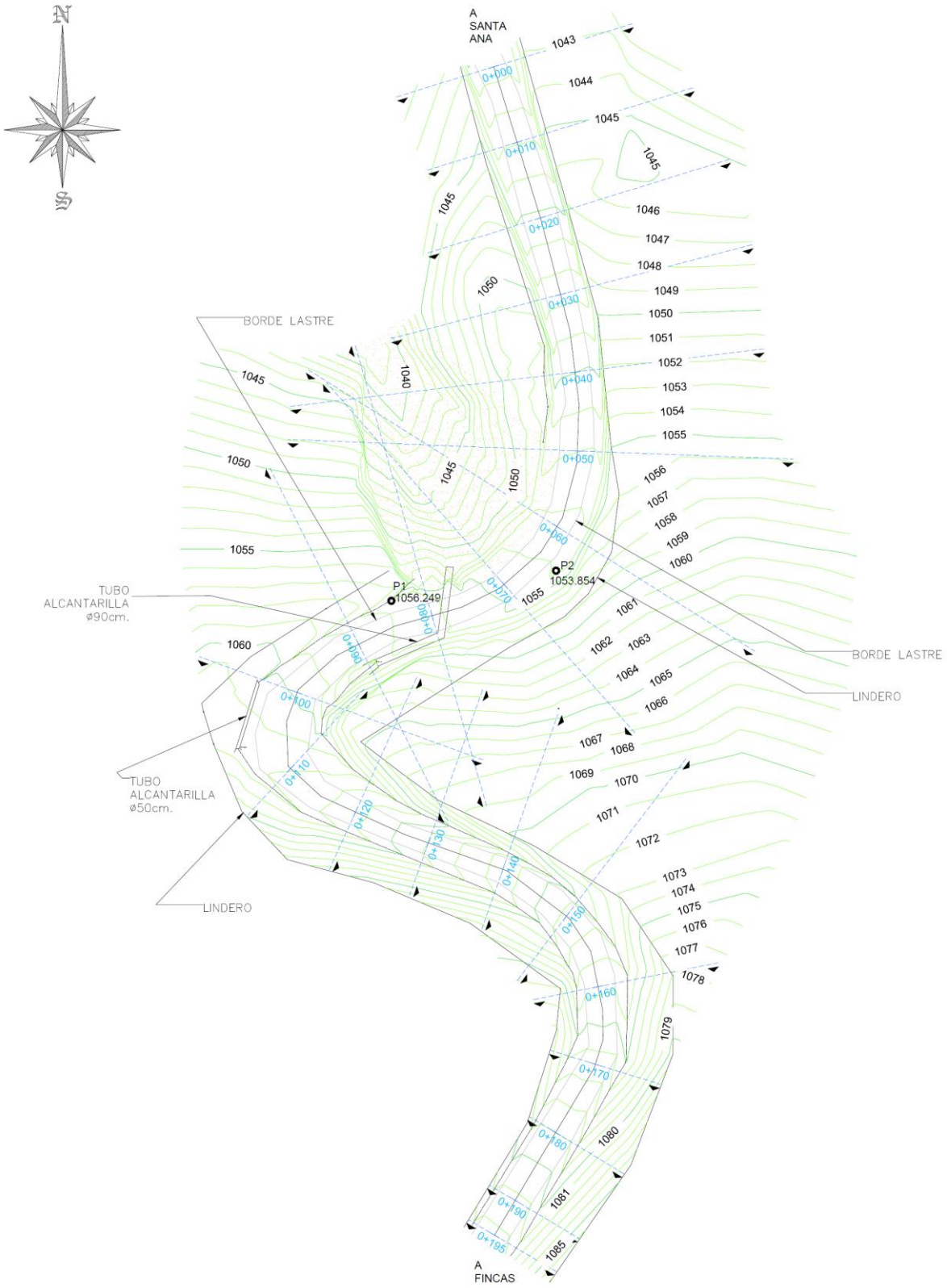



*Figura 37. Levantamiento topográfico en planta.*

## 5.4 Modelo geotécnico

A continuación, se presentan los principales resultados obtenidos mediante el análisis geotécnico obtenida de la investigación de campo. Para la definición del modelo geotécnico, se utilizaron los resueltos de las investigaciones de campo y de laboratorio, así como del levantamiento topográfico realizado.

### 5.4.1 Unidades geotécnicas identificadas

Para la definición del modelo geotécnico, se han utilizado los resultados de los valores de $N_{SPT}$, así como los resultados de los sondeos de refracción sísmica. Para una mejor estimación de los valores de los parámetros, en forma adicional se han utilizado correlaciones entre la velocidad de onda p (Vp) y los parámetros de resistencia al corte. En la Tabla 23 se presenta la descripción de las unidades geotécnicas identificadas en el sitio.

*Tabla 23. Descripción de las unidades geotécnicas.*

| Unidad Geotécnica | Descripción |
|---|---|
| UG 1:<br>Suelos residuales | Suelos residuales cohesivos, con velocidad de onda p de 440 a 640 m/s. |
| UG 2:<br>Roca descompuesta | Roca altamente meteorizada y fracturada, con velocidad de onda p de 710 a 870 m/s. |
| UG 3:<br>Roca meteorizada | Roca medianamente meteorizada y fracturada, con velocidad de onda p de 1060 a 1340 m/s. |
| UG-4<br>Basamento rocoso | Roca dura pero fracturada que constituye el basamento local, con velocidad de onda p de 1530 a 1570 m/s. |

### 5.4.2 Valores de las propiedades geomecánicas

A continuación, en la Tabla 24 se presentan los valores de las propiedades de cada una de las unidades geotécnicas.

*Tabla 24. Valores de las propiedades geomecánicas usadas para análisis y diseño.*

| Descripción de las UG | Peso unitario, γ (kN/m$^3$) | Cohesión, c (kPa) | Ángulo de fricción, ϕ (grados) |
|---|---|---|---|
| UG 1: Suelos y rellenos | 15.5 | 20 | 20 |
| UG 2: Roca descompuesta | 16.5 | 40 | 25 |
| UG 3: Roca meteorizada | 18.5 | 60 | 30 |
| UG-4 Basamento rocoso | 20 | 100 | 38 |

Nota: en las perforaciones SPT realizadas no se encontró un nivel freático.

### 5.4.3 Expresión gráfica del modelo geotécnico

El modelo geotécnico debe expresarse de forma gráfica y debe mostrar las unidades geotécnicas y sus propiedades. En la Figura 38 y Figura 39 se presentan las expresiones gráficas del modelo geotécnico.

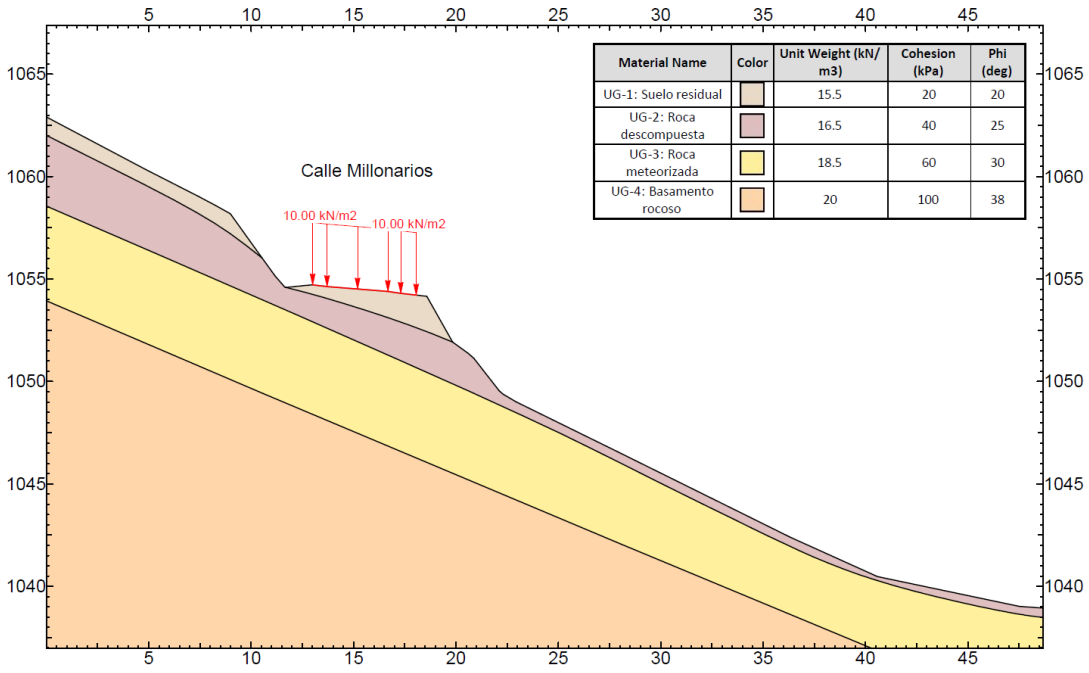



*Figura 38. Modelo geotécnico en Perfil 1.*

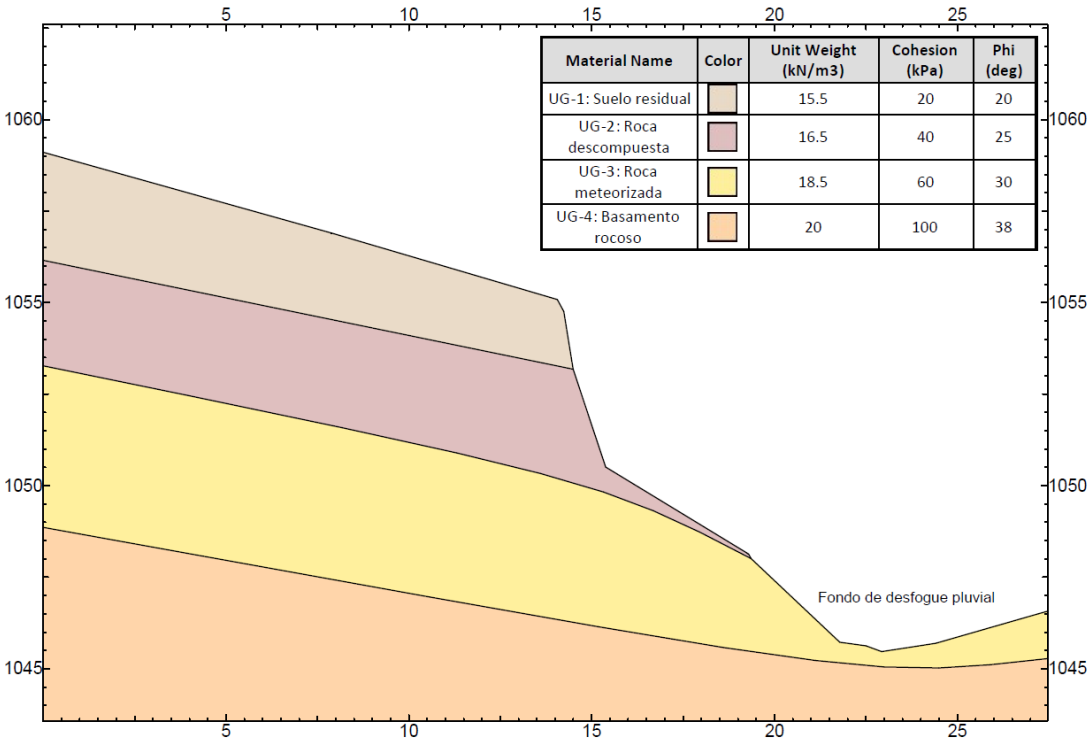



*Figura 39. Modelo geotécnico en Perfil 2.*

# 6 Diseño de las obras de blindaje

El diseño final, incluyendo la elaboración de planos constructivos y especificaciones técnicas se ha realizado sobre la opción de blindaje estructural (sección 4.8) que la Municipalidad de Santa Ana ha seleccionado, que corresponde a la que se muestra en la Figura 32 y en la Figura 33. Tal selección se ha realizado a partir de la evaluación del riesgo y considerando las mejores condiciones para la gestión municipal.

En este informe se han incluido los resultados del análisis y el diseño de las obras. Sin embargo, los planos y las especificaciones técnicas se entregan de manera separada.

## 6.1 Aspectos de seguridad y diseño

A continuación, se describen las premisas de los análisis de estabilidad realizados para el sitio de estudio en el cantón de Santa Ana. Las definiciones aquí usadas son las del Código Geotécnico de Estabilidad de taludes y Laderas de Costa Rica (2015), en adelante denominado por medio de su acrónimo CGTLCR15.

### 6.1.1 Definición del nivel de seguridad

De acuerdo con lo indicado en el Capítulo 2, apartado 2.1 *Definición del Nivel de Seguridad* y 2.2 *Factores de Seguridad Mínimos para Taludes en General*, del CGTLCR15, se ha clasificado el sitio como de riesgo MEDIO contra pérdida de vidas humanas y riesgo MEDIO contra daños económicos y ambientales.

### 6.1.2 Análisis estático

Los análisis en condición estática se refieren a una modelación del sitio en la cual no se introduce una carga de sismo. Por lo tanto, se considera que en un caso actúan únicamente las cargas gravitacionales sobre el modelo y en otro caso, las cargas gravitacionales más las presiones hidrostáticas por saturación del suelo.

### 6.1.3 Análisis pseudoestático

Los análisis en condición pseudoestática se refieren a una modelación del sitio en la cual se introduce una carga horizontal desestabilizadora, para simular la sacudida sísmica. En el análisis pseudoestático se ha considerado la actuación de las cargas gravitacionales sobre el modelo.

En este tipo de análisis se utiliza la misma zonificación sísmica descrita en el Código Sísmico de Costa Rica, 2010 (en adelante CSCR-10) y el tipo de perfil estratigráfico que se encuentra en el sitio, para la determinación de un factor de aceleración sísmica que se utiliza en los análisis de estabilidad.

El sitio en estudio se ubica en la Zona III (Zona sísmica del cantón de Santa Ana, San José) y se clasifica como un tipo de sitio S2 (definido a partir del promedio ponderado de la velocidad de onda cortante Vs en los 30 m superficiales del depósito), por lo que el coeficiente pseudoestático horizontal corresponde a 0,20g para taludes permanentes. En la Tabla 25 se resalta el valor seleccionado.

*Tabla 25. Coeficiente pseudoestático horizontal con un periodo de retorno de 475 años.*

| **Tipo de sitio** | Zona II | **Zona III** | Zona IV |
|---|---|---|---|
| S1 | 0,15 | 0,15 | 0,20 |
| **S2** | 0,15 | **0,20** | 0,20 |
| S3 | 0,15 | 0,20 | 0,25 |
| S4 | 0,15 | 0,20 | 0,25 |

*Fuente: Código geotécnico de taludes y laderas de Costa Rica, 2015.*

### 6.1.4 Factores de seguridad admisibles

A partir de la definición del nivel de seguridad del sitio, se obtienen los valores de los factores de seguridad mínimos que se muestran resaltados en la Tabla 26.

Como puede verse, se tomó como factor de seguridad admisible para taludes permanentes al lado del camino, un valor de 1,40 para la condición estática y de 1,05 para la condición pseudoestática. En el caso del talud lateral de la inestabilidad, ubicado hacia el suroeste, se consideró que el riesgo por daños económicos es medio y por pérdida de vidas humanas es bajo, por lo que el valor del factor de seguridad en condición estática es de 1,30 y en condición pseudoestática, 1,00.

*Tabla 26. Factores de seguridad para taludes permanentes y análisis de laderas.*

| **Condición de análisis** | Riesgo de pérdida de vidas / Riesgo de daños económicos y ambientales | **Bajo** | **Medio** | **Alto** |
|---|---|---|---|---|
| **Estática** | Bajo | 1,20 | 1,30 | 1,40 |
| | Medio | **1,30** | **1,40** | 1,50 |
| | Alto | 1,40 | 1,50 | 1,50 |
| **Pseudoestática** | Bajo | >1,00 | >1,00 | >1,05 |
| | Medio | **>1,00** | **1,05** | 1,10 |
| | Alto | 1,05 | 1,10 | 1,10 |

*Fuente: Código geotécnico de taludes y laderas de Costa Rica, 2015.*

### 6.1.5 Programa utilizado en los análisis de estabilidad de taludes

Los análisis de estabilidad se realizaron utilizando el software Slide2 de Rocscience®. El Slide2 Versión 9.024 2022 es un programa en el que se utiliza el método de equilibrio límite (E.L.). Mediante el programa, en el que se introduce el modelo geotécnico del terreno, se efectúan los análisis de estabilidad por equilibrio límite aplicando los métodos de Bishop, Spencer y Sarma.

El programa incluye varios modelos de resistencia. En este caso particular, se utilizó el criterio de falla Mohr-Coulomb. Mediante los análisis se determinaron más de 5000 posibles superficies de deslizamiento que se filtraron para obtener la superficie de deslizamiento que genera el factor de seguridad mínimo del talud.

Adicionalmente, de acuerdo con el criterio experto, se han analizado superficies de falla no circulares, que son las que generan los valores del factor de seguridad más bajo y que, en el caso en estudio, por la disposición de las UG, son las de mayor probabilidad de ocurrencia. Geomekca Ingeniería cuenta con la licencia actualizada y capacitación en el modelaje del terreno con el programa Slide2, ambos adquiridos al fabricante Rocscience®, con lo cual se garantiza su uso correcto y la confiabilidad de los resultados obtenidos, partiendo también de la base de una adecuada modelación geotécnica del terreno.

## 6.2 Evaluación geotécnica de la estabilidad

En este capítulo se discuten las condiciones geotécnicas del sitio en su estado actual. En primera instancia se realiza un análisis de la estabilidad de los taludes, a fin de evaluar el tipo de obras geotécnicas de estabilización que mejor se ajuste a las condiciones actuales.

### 6.2.1 Análisis de estabilidad del talud sin obras de blindaje

Según se observó en la primera visita de inspección realizada, el terreno ha continuado fallando, pero con pequeños desprendimientos de suelo, debido a la descompresión por la pendiente alta y por las lluvias. Además, por la tubería de alcantarillado pluvial fluyen aguas que promueven la erosión del talud, a pesar de que, por las lluvias intensas y la saturación del suelo, se ha generado una revegetación espontánea en algunos sectores del talud. Así mismo, en visitas adicionales se ha observado que los vecinos continúan lazando desechos de todo tipo en el sitio, lo cual es desfavorable para la estabilidad del terreno.

En la Figura 40 se presenta la vista en planta de los perfiles utilizados para la evaluación de estabilidad de los taludes, la cual se realizó mediante el método de equilibrio límite. El Perfil 1 se trazó de manera longitudinal a la inestabilidad y el Perfil 2 es transversal al talud lateral de mayor pendiente y al Perfil 1.

Como se verá adelante, los resultados obtenidos confirman que, en la condición de saturación del terreno, el talud posee una estabilidad precaria. Así, de acuerdo con las superficies de falla obtenidas, la ocurrencia de otro deslizamiento que afectaría el ancho del camino y que representa un riesgo alto para los usuarios de la vía, es muy probable. Esto concuerda con la evaluación del riesgo inicial presentada en la sección 4.4.

Como puede verse en la Tabla 27, los valores del factor de seguridad (FS) obtenidos para una condición de carga estática y pseudoestática, con el terreno saturado a lo largo del Perfil 1, no cumplen con los admisibles. Los valores obtenidos son FS = 0,90 y FS = 0,71 y, por lo tanto, no cumplen con los valores requeridos en el CGETLCR 2015.

Los valores obtenidos del FS demuestran que, en el caso de saturación del talud, las condiciones de estabilidad actuales son precarias y que se requieren el blindaje con obras de estabilización y control de la erosión para evitar que más material siga deslizándose. Por otro lado, en la condición no saturada, los valores obtenidos del FS son mayores a los solicitados en la normativa nacional vigente. Debe recordarse que aún falta tiempo para la finalización de la estación lluviosa y que, por lo tanto, el terreno puede llegar al grado de saturación que se ha considerado en los análisis.

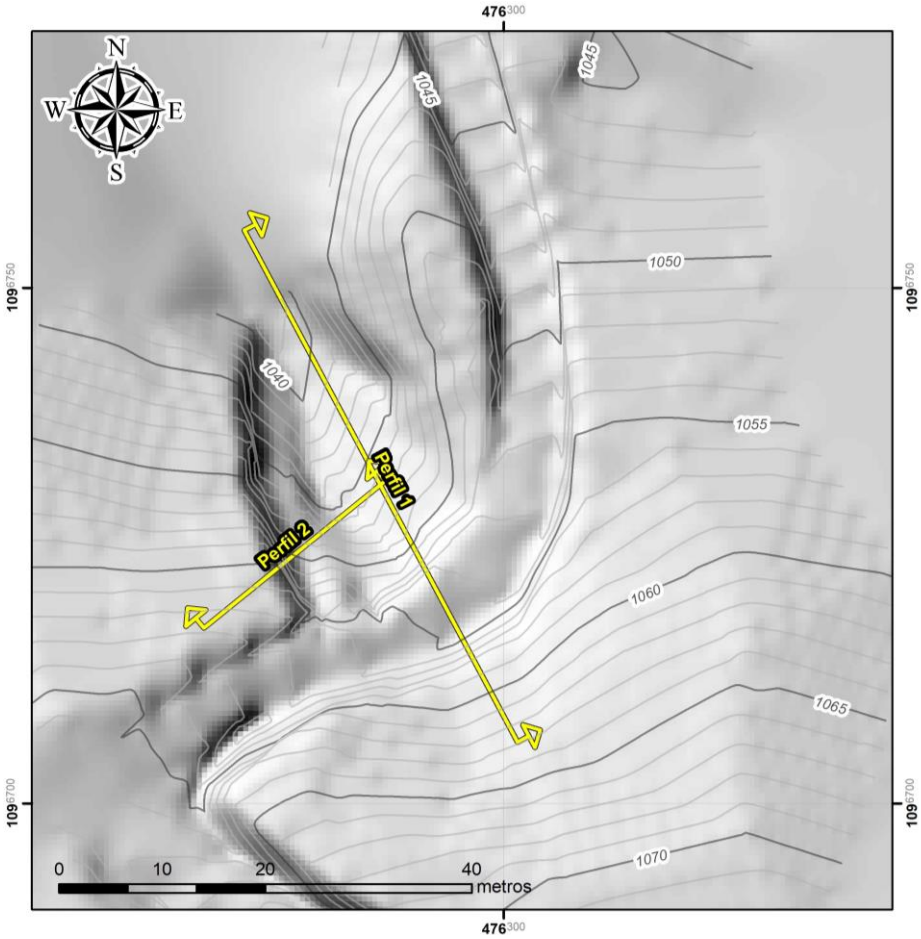



*Figura 40. Vista en planta de los perfiles de análisis para la evaluación de la estabilidad.*

*Tabla 27. Resultado del análisis de estabilidad del Perfil 1, sin obras.*

| Condición de análisis | $FS_{obtenido}$ | $FS_{requerido}$ | Cumplimiento |
|---|---|---|---|
| Estática, no saturado. | 3,05 | 1,40 | Cumple |
| Estática, saturado. | 0,90 | 1,40 | No cumple (Estabilidad precaria) |
| Pseudoestática, no saturado. | 2,37 | 1,05 | Cumple |
| Pseudoestática, saturado. | 0,71 | 1,05 | No cumple (Estabilidad precaria) |

A continuación, en la Figura 41 y en la Figura 42, se presentan las superficies de falla y el valor del FS asociado, producto del análisis de estabilidad sin obras de blindaje en el talud, en condición estática, con el terreno no saturado a lo largo del Perfil 1.

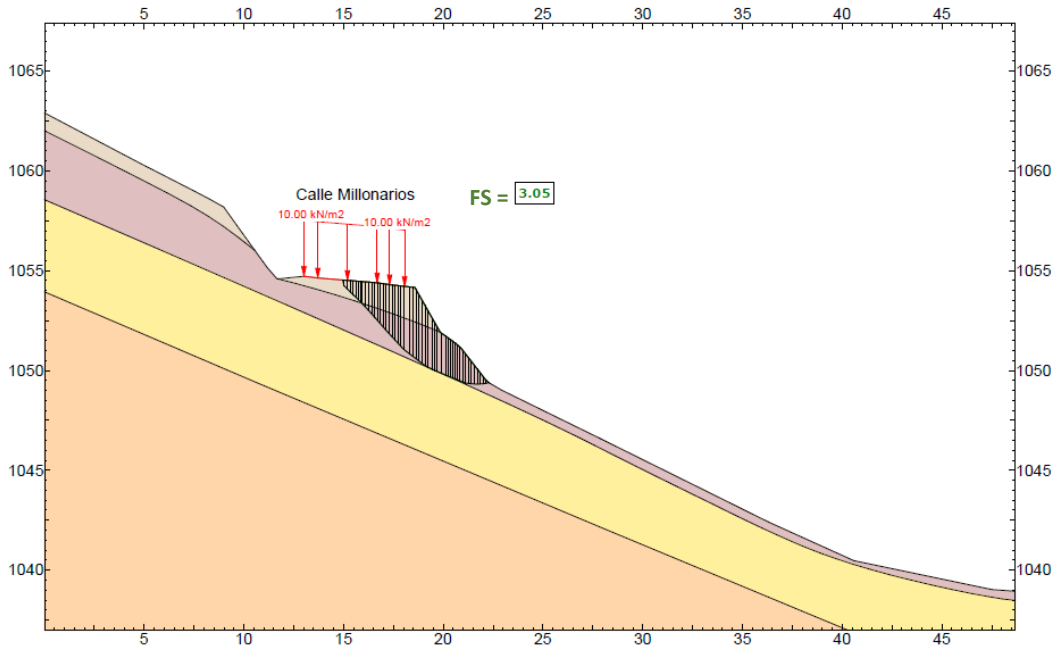



*Figura 41. Perfil 1. Análisis de estabilidad en condición estática, no saturado.*

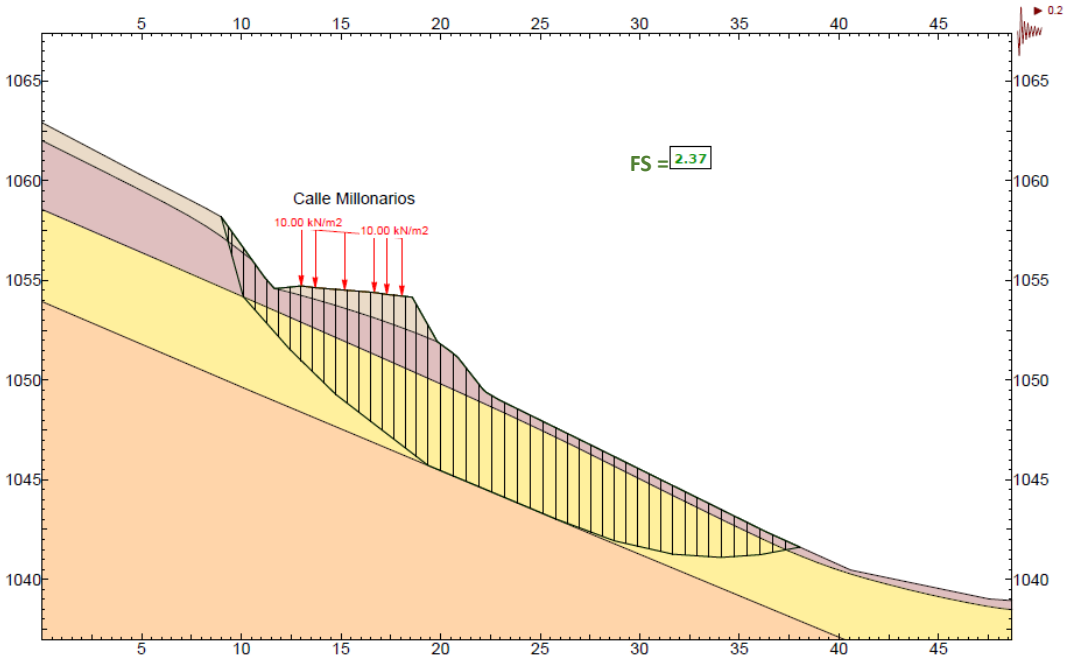



*Figura 42. Perfil 1. Análisis de estabilidad en condición pseudoestática, no saturado.*

Seguidamente, en la Figura 43 y en la Figura 44, se presentan las superficies de falla y el valor del FS asociado, producto del análisis de estabilidad sin obras de blindaje en el talud,

en condición estática, con el terreno saturado a lo largo del Perfil 1. Puede notarse la disminución drástica del valor del FS.

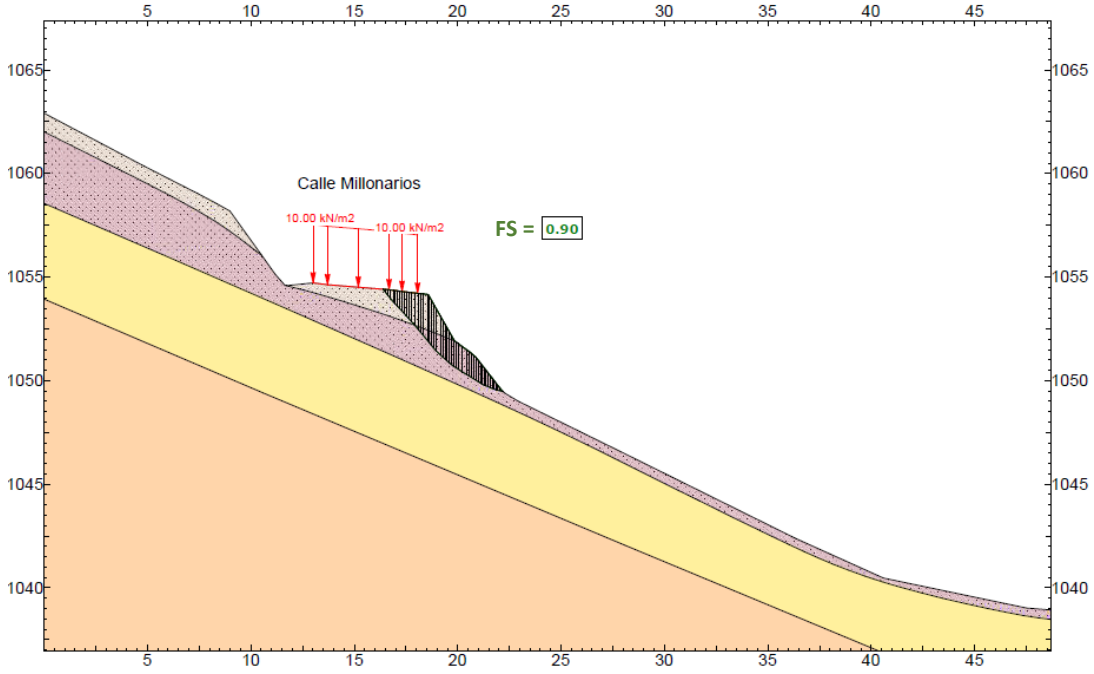



*Figura 43. Perfil 1. Análisis de estabilidad en condición estática, saturado.*

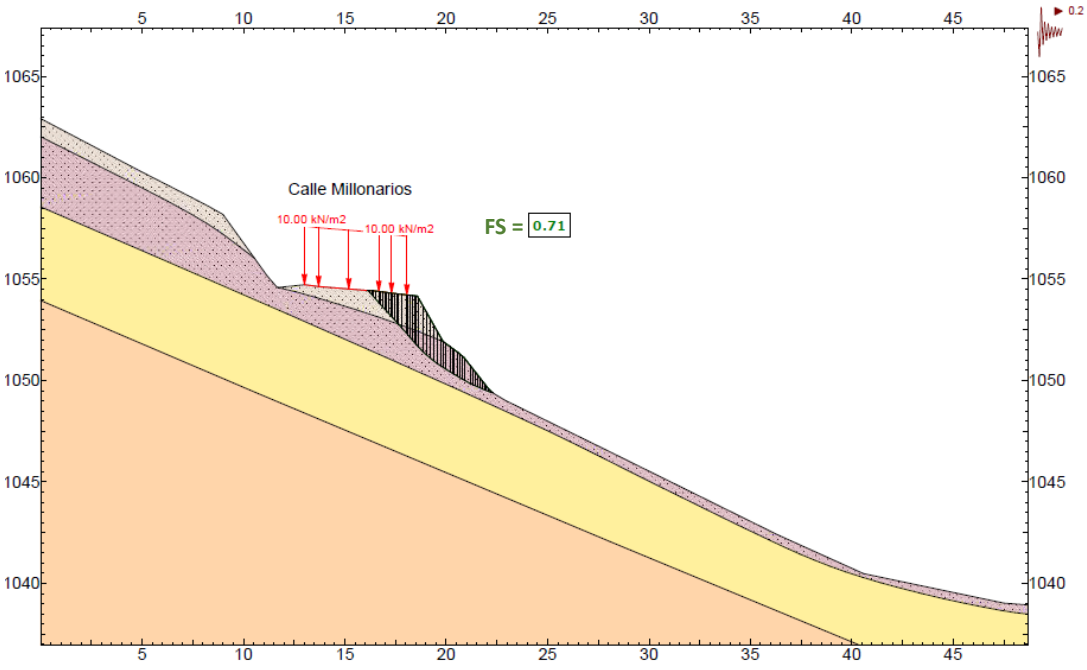



*Figura 44. Perfil 1. Análisis de estabilidad en condición pseudoestática, saturado.*

Por otra parte, los resultados del análisis de estabilidad del Perfil 2, muestran que, hacia el talud lateral de mayor pendiente, el terreno posee peores condiciones de estabilidad, probablemente debido a que la pendiente alta se conjuga con un mayor espesor del suelo residual y de la roca descompuesta que se encuentran en este sector.

En la Tabla 28 se muestran los valores del factor de seguridad (FS) obtenidos para una condición de carga estática y pseudoestática, con el terreno saturado a lo largo del Perfil 2. Los valores obtenidos son FS = 0,63 y FS = 0,49 y, por lo tanto, no cumplen con los valores requeridos por el CGETLCR 2015.

*Tabla 28. Resultado del análisis de estabilidad del Perfil 2, sin obras.*

| **Condición de análisis** | **$FS_{obtenido}$** | **$FS_{requerido}$** | **Cumplimiento** |
|---|---|---|---|
| Estática, no saturado. | 2,35 | 1,30 | Cumple |
| Estática, saturado. | 0,63 | 1,30 | No cumple (Estabilidad precaria) |
| Pseudoestática, no saturado. | 1,65 | >1,00 | Cumple |
| Pseudoestática, saturado. | 0,49 | >1,00 | No cumple (Estabilidad precaria) |

Como se muestra en los resultados obtenidos, se requiere el blindaje con obras de estabilización para la condición de terreno saturado, tanto en condición estática como pseudoestática, pues los valores del FS no cumplen con los requerimientos de la normativa nacional.

A lo largo del Perfil 2 las superficies de falla críticas obtenidas en la evaluación de estabilidad con el terreno no saturado, en condición estática, se presenta en la Figura 45 y en la condición pseudoestática en la Figura 46. Nótese que a pesar de que el volumen de terreno es importante, los valores del FS son mayores a los requeridos en la normativa vigente.

Posteriormente, en la Figura 47 y en la Figura 48, se muestran las superficies de falla críticas para el terreno saturado, en condición estática y pseudoestática, respectivamente. Nótese que el volumen de terreno inestable es menor, pero los valores del FS son muy inferiores a los requeridos en la normativa nacional, e inclusive, menores que 1,0 y, por lo tanto, indican que la falla del talud es inminente para la condición de saturación, la cual se puede alcanzar en lo que resta de la estación lluviosa.

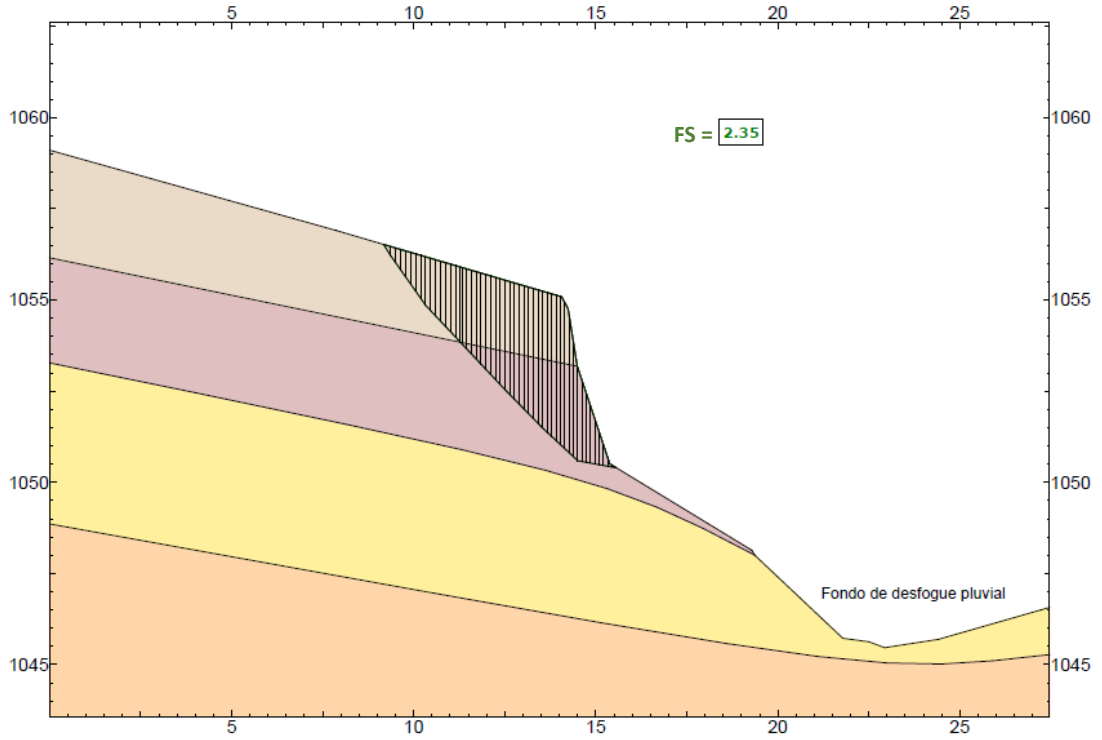



*Figura 45. Perfil 2. Análisis de estabilidad en condición estática, no saturado.*

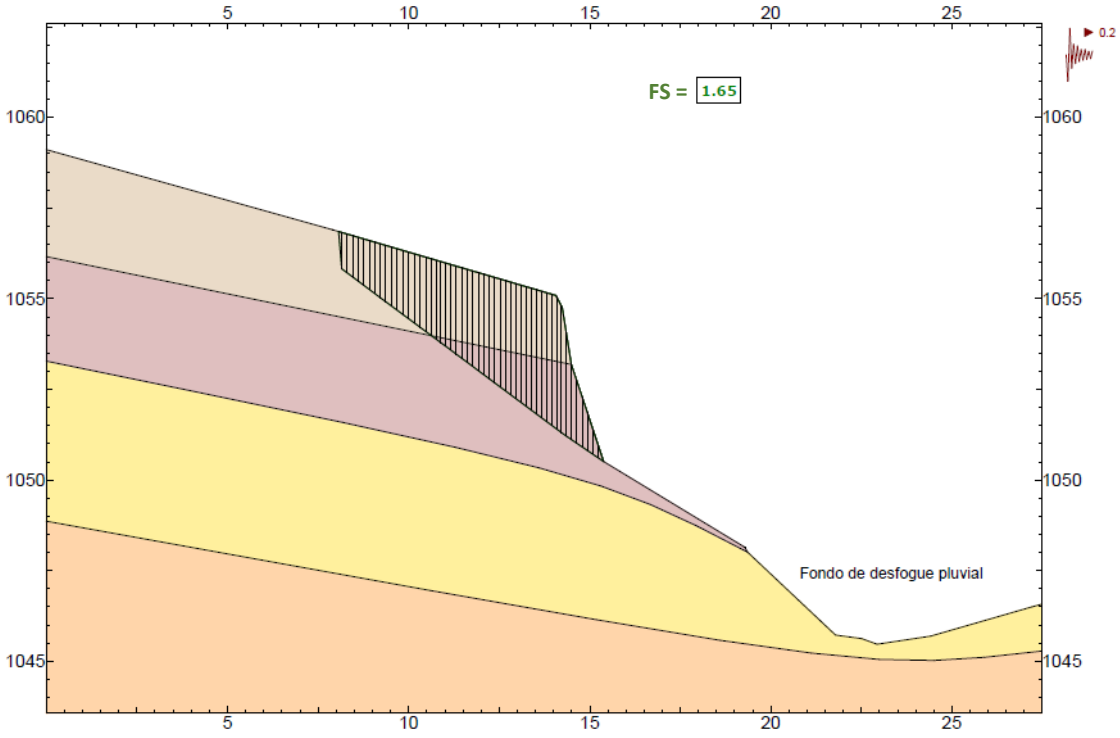



*Figura 46. Perfil 2. Análisis de estabilidad en condición pseudoestática, no saturado.*

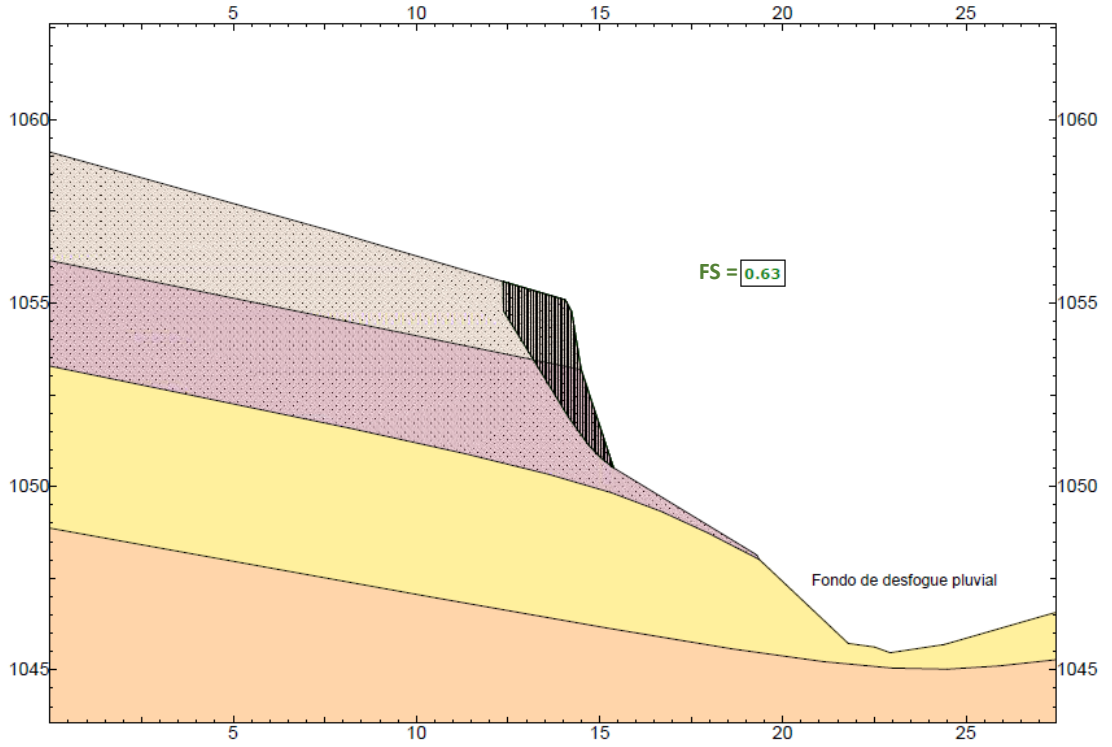



*Figura 47. Perfil 2. Análisis de estabilidad en condición estática, saturado.*

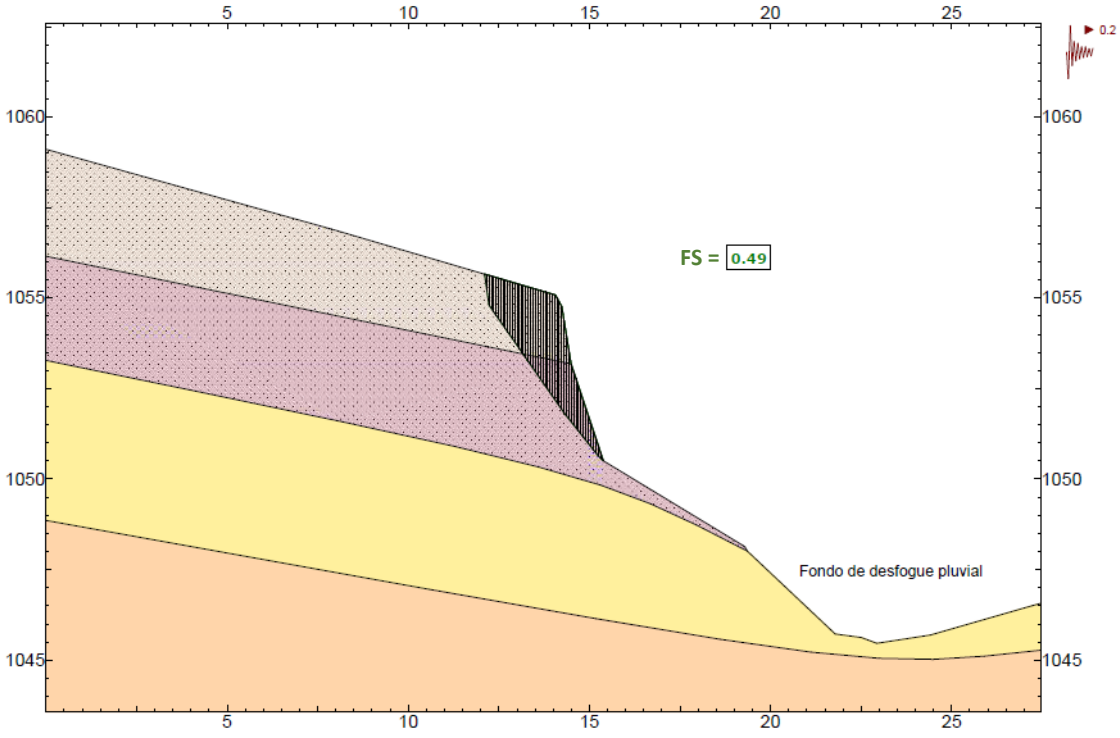



*Figura 48. Perfil 2. Análisis de estabilidad en condición pseudoestática, saturado.*

### 6.2.2 Análisis de estabilidad del talud con obras de blindaje

Como se indicó en el apartado anterior, los resultados del análisis de estabilidad en la condición saturada del terreno para el Perfil 1 y el Perfil 2 demuestran la necesidad de implementar obras de estabilización y protección de los taludes y, con ello, disminuir el nivel de riesgo inicial.

En consecuencia, se ha propuesto la implementación de un mejoramiento sustancial de las obras de drenaje pluvial y el refuerzo del terreno mediante anclajes pasivos y concreto lanzado, que corresponden con la opción aprobada por las ingenieras de la Municipalidad de Santa Ana.

De acuerdo con los resultados de los análisis de estabilidad que se mostrarán adelante, con las obras de refuerzo y soporte se logra alcanzar los valores del factor de seguridad requeridos en el CGETLCR 2015.

Según lo solicitado por la Municipalidad de Santa Ana, las obras se realizarán en dos etapas. En la Etapa 1 se realizarán las obras estructurales de mitigación de mayor urgencia para el blindaje del sitio. En la Etapa 2, se realizarán obras complementarias estructurales y se tomarán acciones no estructurales para completar el blindaje del sitio.

Una vista parcial de la planta de las obras de estabilización, tomada de los planos de diseño, se muestra en la Figura 49. Así mismo, en la Figura 50 se muestra una sección longitudinal por donde transcurre la alcantarilla existente, el pozo de descarga (que además funcionará como disipador de la energía) y el canal de desagüe con obstáculos que también contribuyen con el proceso de disipación de la energía del agua vertida durante las lluvias.

Finalmente, en la Figura 51 se muestra una sección longitudinal de estabilización del talud, donde se observan los anclajes del suelo cosido rígido con concreto lanzado y una sección transversal por el talud lateral de mayor pendiente (ver la Figura 52), en la que se muestran los elementos de refuerzo (anclajes pasivos) y la de soporte (concreto lanzado), así como la sección del canal disipador de desfogue de las aguas.

La implantación de estas obras en el modelo geotécnico del terreno permitió obtener los resultados de los análisis de estabilidad en las siguientes condiciones de carga externa y de saturación, pues la condición de saturación es la crítica para los taludes. En los casos de análisis se modeló una carga por tránsito para el Perfil 1 (ver la Tabla 29 y la Tabla 30). Los escenarios de diseño son los siguientes:

- Condición estática, terreno saturado
- Condición pseudoestática, terreno saturado

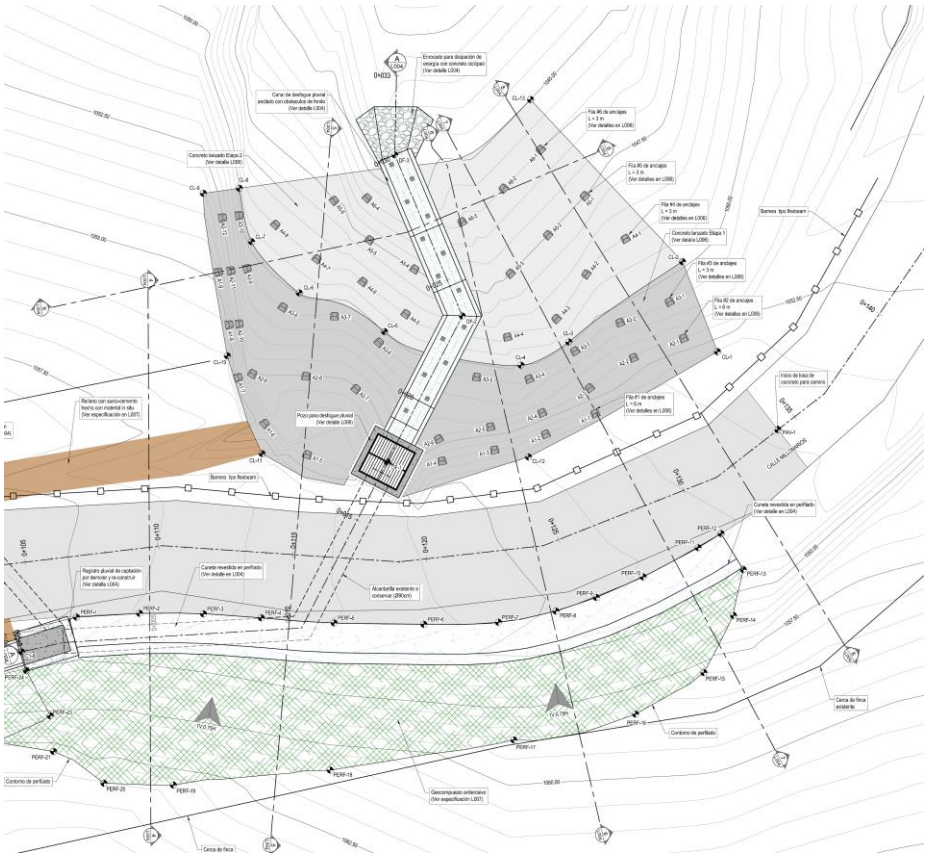


*Figura 49. Vista parcial de la planta de las obras de blindaje*

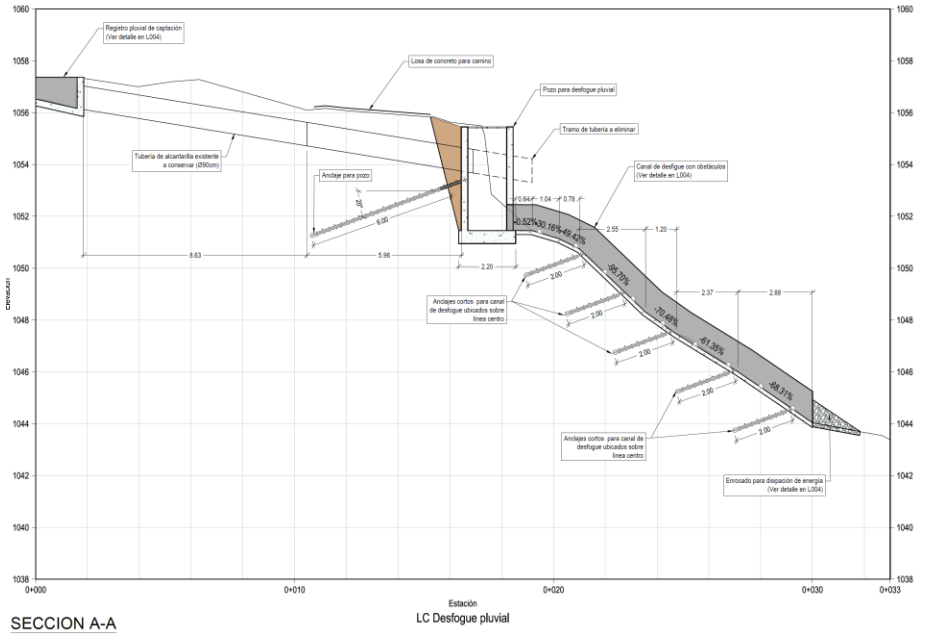



*Figura 50. Sección A-A a lo largo del canal de drenaje de la alcantarilla pluvial.*

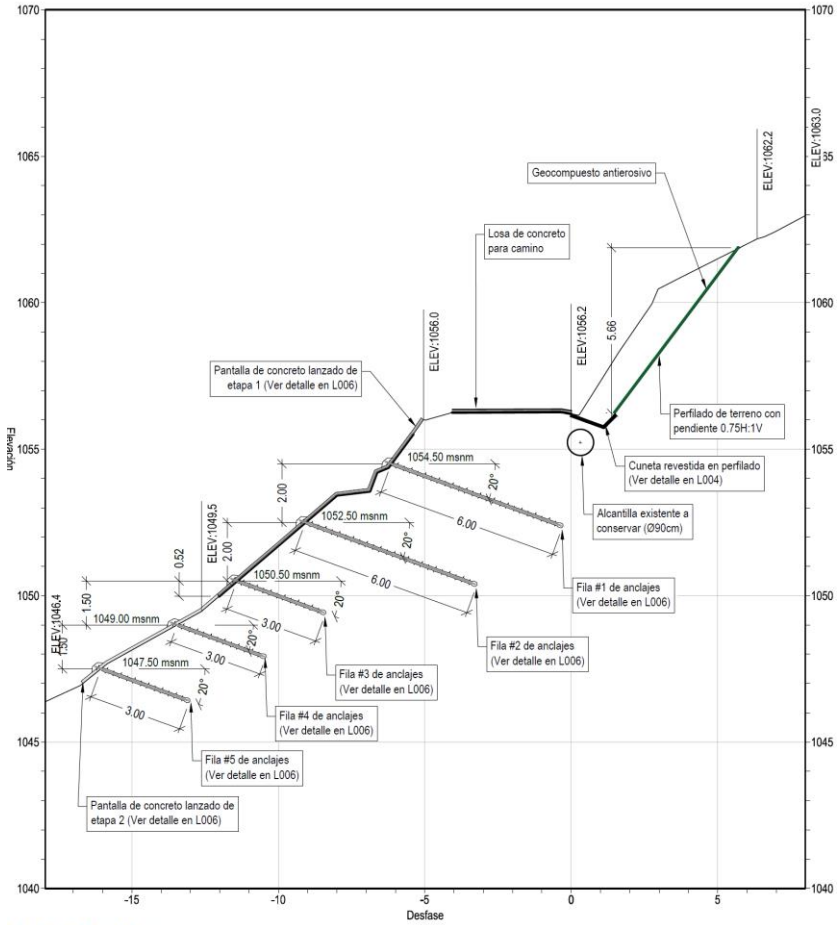



*Figura 51. Sección 5-5 de estabilización longitudinal del talud con suelo cosido.*

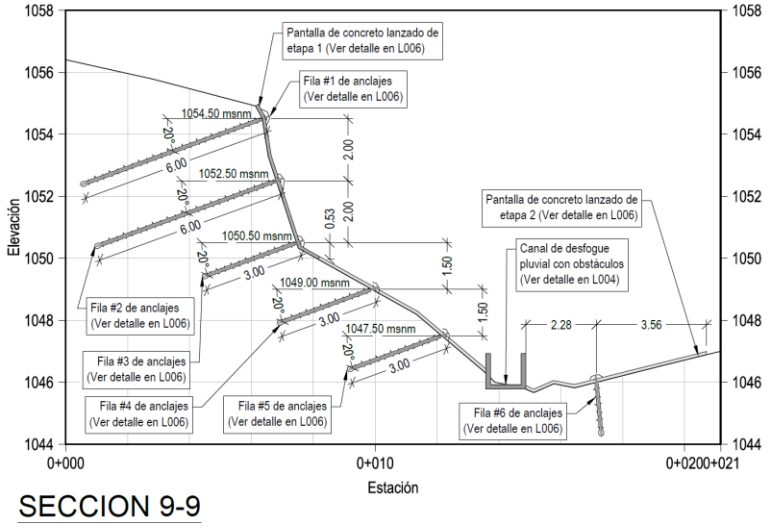



*Figura 52. Sección 9-9 de estabilización transversal del talud con suelo cosido.*

*Tabla 29. Resultado del análisis de estabilidad del Perfil 1, con obras de blindaje*

| Condición de análisis | $FS_{obtenido}$ | $FS_{requerido}$ | Condición |
|---|---|---|---|
| Estática, saturado. | 1,60 | 1,40 | Cumple |
| Pseudoestática, saturado. | 1,33 | 1,05 | Cumple |

Como se muestra en los resultados, las obras de estabilización para el Perfil 1 muestran ser efectivas para alcanzar los valores de los factores de seguridad requeridos según el CGETLCR 2015. Puede verse que en los análisis se usaron superficies de falla no circular que son las más críticas. Con las obras propuestas se mantendría el ancho del camino, pues la falla del talud desde el escarpe actual de la inestabilidad estaría controlada, así, el nivel de riesgo actual se reduce a un riesgo residual aceptable.

A continuación, en la Figura 53 y en la Figura 54, se presentan las salidas del análisis de estabilidad con equilibrio límite, donde se pueden observar los anclajes propuestos para estabilizar el talud, en condición estática y en condición pseudoestática, respectivamente.

Puede notarse que los anclajes que más actúan son los de la parte superior del talud, no obstante, a fin de mantener la integridad del concreto lanzado en toda la superficie por estabilizar, se han incluido unos anclajes más cortos (de 3 m), que además evitan que la superficie de falla se propague a lo largo del talud.

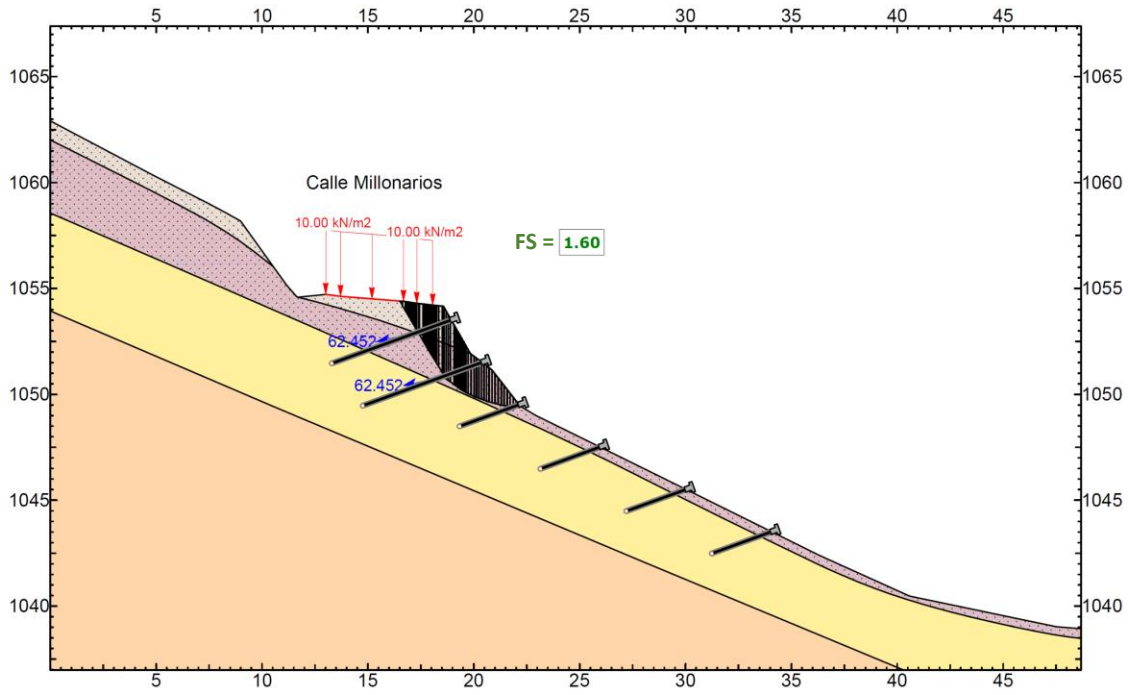



*Figura 53. Perfil 1. Análisis de estabilidad en condición estática con obras, saturado.*

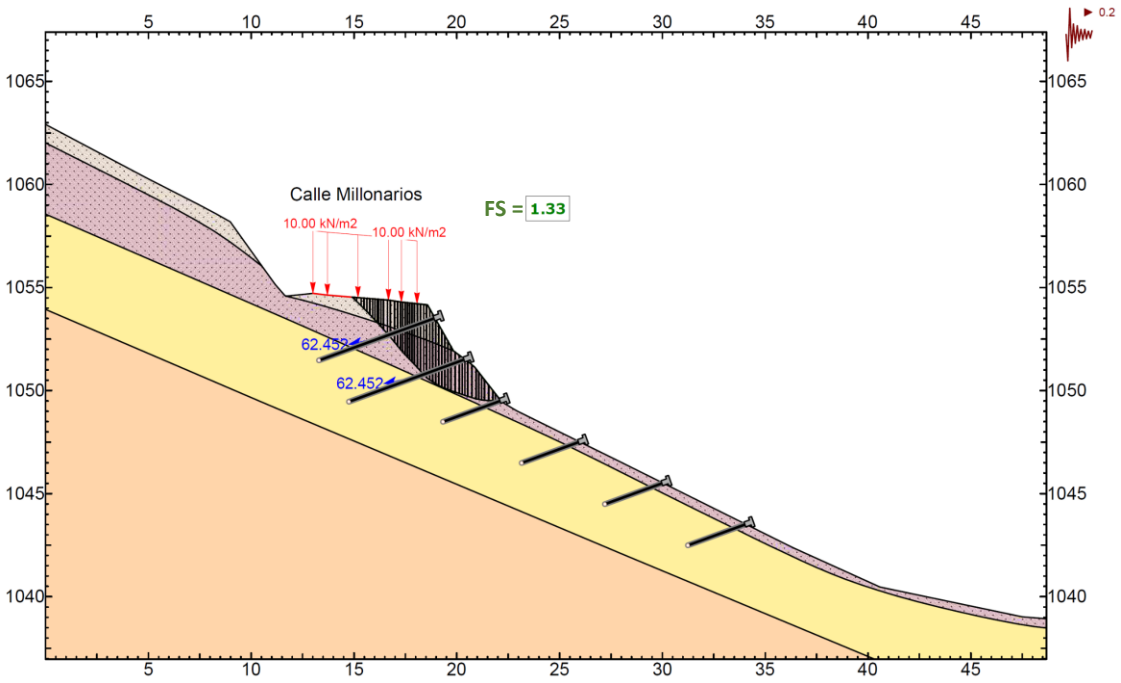



*Figura 54. Perfil 1. Análisis en condición pseudoestática con obras, saturado.*

Seguidamente se presentan los resultados de los análisis de estabilidad del talud de alta pendiente del Perfil 2. Se debe recordar que este perfil coincide con la propiedad donde ocurrió la inestabilidad a causa de la erosión que produjo la descarga del agua desde la alcantarilla. Por ello, sobre la parte alta del talud no hay carga de tránsito (ver la Figura 40) y por esa razón los valores del FS admisibles son menores a los del Perfil 1.

*Tabla 30. Resultado del análisis de estabilidad del Perfil 2, con obras.*

| **Condición de análisis** | **$FS_{obtenido}$** | **$FS_{requerido}$** | **Condición** |
|---|---|---|---|
| Estática, saturado. | 1,34 | 1,30 | Cumple |
| Pseudoestática, saturado. | 1,12 | >1,00 | Cumple |

Los resultados obtenidos con las obras de refuerzo y soporte indican que se alcanzan los valores admisibles del FS requeridas en la normativa nacional vigente. Por ende, se consideran efectivas para el blindaje del sitio.

En la Figura 55, se presenta el resultado del análisis en condición estática con terreno saturado, se puede observar que con los anclajes del suelo cosido se refuerza el volumen de terreno que se desprendería a causa de la saturación. En la Figura 56, se muestra que el suelo cosido permite estabilizar el terreno saturado de alta pendiente ante la sacudida sísmica.

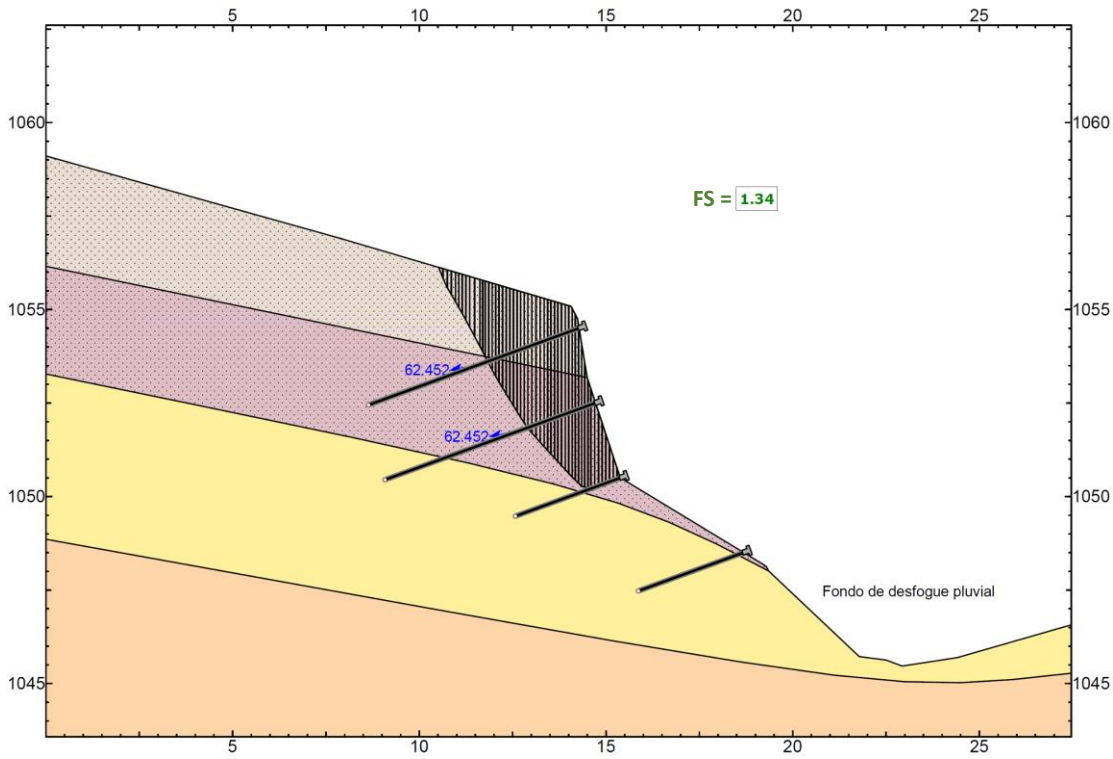



*Figura 55. Perfil 2. Análisis en condición estática con obras, saturado.*

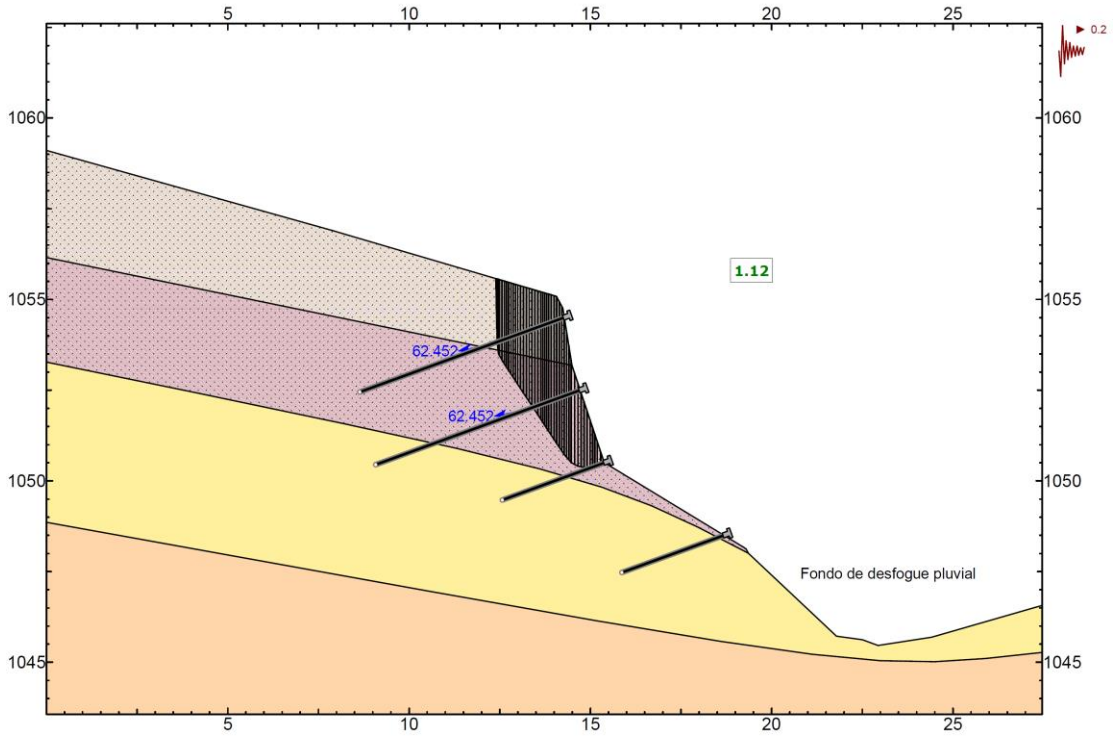



*Figura 56. Perfil 2. Análisis en condición pseudoestática con obras, saturado.*

# 7 Presupuesto de las obras

En este apartado se presenta el cálculo de los costos de las obras que serán construidas en la Etapa 1 y el de las obras de la Etapa 2. La mayoría de los costos unitarios fueron definidos por la Municipalidad de Santa Ana.

## 7.1 Presupuesto de obras de la Etapa 1

El presupuesto de las obras de estabilización para la Etapa 1 se presenta en la Tabla 31. Como puede observarse, se definieron 13 ítems o actividades principales y se calculó el costo total de cada ítem y la sumatoria de esos costos.

Se consideró la exoneración del IVA a que tienen derecho las municipalidades, por lo que ese ítem no se incluyó en el presupuesto.

El costo total estimado de la Etapa 1 de las obras asciende a: **₡40 764 932.52 (cuarenta millones setecientos sesenta y cuatro mil novecientos treinta dos colones con 52/100 céntimos).**

Para el cálculo del monto en dólares se utilizó un tipo de cambio con valor de ₡645/1US$. Así, el costo en dólares se traduce a **US$ 63 201.45 (sesenta y tres mil doscientos un dólares con 45/100 centavos).**

Es importante indicar que se debe contemplar un costo adicional por **control de calidad, verificación de carga de anclajes y supervisión de las obras**. Estos costos son del orden de **₡3 500 000.00 (tres millones quinientos mil colones).**

*Tabla 31. Presupuesto de las obras de la Etapa 1.*

| Ítems | Descripción | Unidad | Cantidad | Precio unitario | Precio total |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Muro de concreto lanzado (f´c=210kg/cm²), espesor 0,10 m, incluye concreto y suministro, transporte, preparación y colocación de DOBLE malla electrosoldada No.2, más 2 varillas longitudinales y 2 varillas transversales No.4G60, uniendo las cabezas de los anclajes. | $m^2$ | 150,0 | ₡147,986.06 | ₡22,197,909.00 |
| 2 | Excavación para estructuras (en Banco) | $m^3$ | 144,0 | ₡11,541.83 | ₡1,662,023.52 |
| 3 | Suelo-cemento compactado con material de sitio | $m^3$ | 30,0 | ₡30,000.00 | ₡900,000.00 |
| 4 | Pozos para desfogue pluvial | unidad | 1 | ₡3,000,000.00 | ₡3,000,000.00 |
| 5 | Canal para desfogue pluvial con obstáculos | m | 14 | ₡75,000.00 | ₡1,050,000.00 |
| 6 | Cuneta 001 | m | 15,5 | ₡50,000.00 | ₡775,000.00 |
| 7 | Cuneta 002 | m | 9,5 | ₡30,000.00 | |
| 8 | Cuneta en perfilado de camino | m | 26,0 | ₡30,000.00 | ₡780,000.00 |
| 9 | Registros pluviales de captación | unidad | 2 | ₡1,250,000.00 | ₡2,500,000.00 |
| 10 | Registro pluvial intermedio | unidad | 1 | ₡1,750,000.00 | ₡1,750,000.00 |
| 11 | Alcantarilla Pluvial Ø60cm | m | 6,0 | ₡115,000.00 | ₡690,000.00 |
| 12 | Excavación, inspección y realineamiento de alcantarilla | unidad | 1 | ₡600,000.00 | ₡600,000.00 |
| 13 | Demolición de registro pluvial existente | unidad | 1 | ₡350,000.00 | ₡350,000.00 |
| 12 | Concreto ciclópeo para enrocado | $m^3$ | 2,0 | ₡250,000.00 | ₡500,000.00 |
| 13 | Suministro y colocación de geomanto antierosivo | $m^2$ | 150 | ₡23,100.00 | ₡3,465,000.00 |
| | | | | **Total Etapa 1** | **₡40,764,932.52** |

## 7.2 Presupuesto de las obras de la Etapa 2

Seguidamente, el presupuesto de las obras de estabilización para la Etapa 2 se presenta en la Tabla 32. Para la Etapa 2 se definieron 3 ítems o actividades principales y se calculó el costo total de cada ítem y la sumatoria de esos costos.

Al igual que para la Etapa 1, se consideró la exoneración del IVA a que tienen derecho las municipalidades, por lo que ese ítem no se incluyó en el presupuesto.

El costo total de la Etapa 2 de las obras asciende a: **₡32,963,721.28 (treinta y dos millones novecientos sesenta y tres mil setecientos veintiún colones con 28/100 céntimos).**

Para el cálculo del monto en dólares se utilizó un valor de ₡645/1US$ para el tipo de cambio. Así, el costo en dólares se traduce a **US$ 51 106.55 (cincuenta y un mil ciento seis dólares con 55/100 centavos).**

Adicionalmente, se debe contemplar un costo adicional por **control de calidad, verificación de carga de anclajes y supervisión de las obras**. Estos costos son del orden de **₡3 000 000.00 (tres millones de colones).**

*Tabla 32. Presupuesto de las obras de la Etapa 2.*

| Ítems | descripción | Unidad | Cantidad | Precio unitario | Precio total |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Muro de concreto lanzado (f´c=210kg/cm²), espesor 0,10 m, incluye concreto y suministro, transporte, preparación y colocación de DOBLE malla electrosoldada No.2, más 2 varillas longitudinales y 2 varillas transversales No.4G60, uniendo las cabezas de los anclajes. | $m^2$ | 108 | ₡147,986.06 | ₡15,982,494.48 |
| 2 | Losa de concreto para camino | $m^3$ | 40 | ₡321,600.00 | ₡12,864,000.00 |
| 3 | Suministro y colocación de baranda tipo Flex Beam | m | 40 | ₡102,930.67 | ₡4,117,226.80 |
| | | | | **Total Etapa 2** | **₡32,963,721.28** |

*Esta página se ha dejado intencionalmente en blanco*

# 8 Conclusiones y recomendaciones

El riesgo de deslizamiento es alto en el sitio de la calle Millonarios que se ha evaluado (ver sección 4.4.1).

Las condiciones que provocan ese alto nivel de riesgo provienen principalmente de las amenazas naturales sobre el sitio, causadas por la geodinámica, especialmente la concentración del flujo de la escorrentía superficial durante eventos hidrometeorológicos extremos, capaz de producir severos procesos erosivos y la profundización de cárcavas en el terreno, así como la saturación y la ocurrencia de sismos, capaces de provocar nuevos desprendimientos (ver sección 4.2).

Otros riesgos de consideración se relacionan con prácticas culturales, como la depositación clandestina de residuos de todo tipo, el vandalismo y los incendios provocados. Estos riesgos también deben ser atendidos (ver sección 4.4.2).

En vista de que el nivel de riesgo actual se ha catalogado como inaceptable, se requiere necesariamente la implantación de obras estructurales que blinden la infraestructura contra las amenazas naturales y sus variaciones derivadas del cambio climático. Así, se han propuesto dos alternativas que pueden desarrollarse por etapas, según los recursos disponibles (ver sección 4.8.1). La configuración de tales etapas se realizará en la fase de diseño detallado, que se realizará en forma posterior a este informe, toda vez que se requiere una definición de parte de la Administración sobre cuál de las opciones de blindaje estructural se desarrollará.

La realización de alguna de las opciones de blindaje propuesta deriva en una estimación de riesgo residual catalogada de aceptable. De ahí la importancia de la ejecución de obras de estabilización y protección.

Se realizaron estudios de ingeniería (ver capítulo 5), incluyendo topografía e investigación geotécnica. De los resultados de la investigación geotécnica se ha podido elaborar un modelo geotécnico utilizado para las evaluaciones preliminares de las soluciones de blindaje estructural propuestas. Estas indican que las propuestas de blindaje son realizables con montos razonables en un desarrollo por etapas, como se indica arriba.

Además de las opciones de blindaje estructural, se han propuesto otras de índole no estructural (ver sección 4.8.2), con el propósito de reducir los niveles de riesgo de las

amenazas de origen antrópico. También estas se pueden realizar por etapas, según la conveniencia de la Municipalidad, pero requieren necesariamente del concurso ciudadano para que sean exitosas.

Se recomienda proseguir con la construcción de las obras de blindaje estructural. El diseño detallado de tales obras (capítulo 6) se ha realizado para la alternativa establecida por las funcionarias de la Municipalidad de Santa Ana. Consisten en una estabilización y protección con anclajes y concreto lanzado. Las obras se han propuesto para ser ejecutadas en dos etapas: la primera con un costo aproximado de poco más de 35 millones de colones y la segunda con un costo de 30 millones de colones. En el capítulo 7 se presenta el presupuesto detallado. De esta manera, se facilita el desarrollo de las obras y se favorece la gestión financiera de la Municipalidad de Santa Ana.

# 9 Referencias


Aven, T. (2018) An emerging New Risk Analysis Science: Foundations and implications. En: Risk Analysis, Vol. 38, No.5, 2018. DOI: 10.1111/risa.12899.

Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica (2010) Código Sísmico de Costa Rica. Editorial Tecnológica, Cartago, Costa Rica.

Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica (2009) Código de cimentaciones de Costa Rica. Editorial Tecnológica, Cartago, Costa Rica.

Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica (2015) Código geotécnico de taludes y laderas de Costa Rica. Editorial Tecnológica, Cartago, Costa Rica.

Comisión Nacional de Emergencias CNE (2022). Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias de Costa Rica. Obtenido de Comisión Nacional de Emergencias: https://www.cne.go.cr/reduccion_riesgo/mapas_amenzas/san_jose.aspx

Esquivel Acosta, Alfredo (2012). Uso del suelo, actividades productivas agropecuarias a nivel cantonal. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Costa Rica.

Frantzova, A. (2021) Risk assessment of geological disaster in the region of Primorsko Municipality. Geologica Balcanica 50 (3), Sofia, Diciembre 2021, pp. 29-35.

Instituto de Fomento y Asesoría Municipal, IFAM (2022) Santa Ana, Cantón 1-09. Consultado en: https://www.ifam.go.cr/?page_id=389

Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica (2022) Datos de precipitación, recibidos mediante correo electrónico. San José, Costa Rica.

Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica (2022b) Regiones y subregiones climáticas de Costa Rica. Descargado en: https://www.imn.ac.cr/documents/10179/20909/Regionalizaci%C3%B3n+clim%C3%A1tica+de+Costa+Rica

Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica IMN. (2011). Curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia de algunas estaciones meteorológicas automáticas. San José: Instituto Meteorológico Nacional.

Instituto Nacional de Estadística y Censos, INEC (2002) IX Censo Nacional de Población, Características Económicas. Censo 2000.Instituto Nacional de Estadística y Censos. San José, Noviembre 2002. Descargado en: https://www.inec.cr/sites/default/files/documentos/inec_institucional/publicaciones/03_ix_censo_nacional_de_poblacion._caracteristicas_economicas.pdf

INTECO (2018) INTE/ISO 31000:2018. Gestión del riesgo – Directrices. Norma internacional ISO 31000:2018 “Risk management – Guidelines”. Costa Rica.

MIDEPLAN (2014) Metodología de análisis de amenazas naturales para proyectos de inversión pública en etapa de perfil. Convenio interministerial Ministerio de agricultura y ganadería y Ministerio de planificación nacional y política económica. San José, Costa Rica, octubre 2014. ISBN 978-9977-73-081-3.

Mora, S. (2022) La geodinámica externa: aspectos geomecánicos, hidrogeológicos, climáticos y del riesgo. Editorial Asociació Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería ASAGAI, Buenos Aires, Argentina. ISBN:978-987-21766-7-9.

Municipalidad de Santa Ana (2022) Geoportal de Datos Geográficos Infraestructura de Datos Espaciales | Estandarizando el modo de acceso a la información geográfica. En: https://www.santaana.go.cr/, consultado numerosas veces durante los meses de julio y agosto de 2022.

NCHRP (2018) Guidelines for managing geotechnical risks in design-build projects. National Cooperative Highway Research Program, NCHRP Research Report 884. ISSN 2572-3774. Washington, USA.

NSW (2014) Standard: Geotechnical Risk Assessment and Hazard Management. NSW Government, Transport for NSW. Documento T HR CI 12100 ST.

PRUGAM (2007) Mapa de índice de fragilidad ambiental para el cantón de Santa Ana. Descargado de: https://www.mivah.go.cr/PRUGAM_IFAS_CRTM05_Santa_Ana.shtml. MIVAH : PRUGAM Productos : IFAS Sin Viabilidad : Santa Ana.

SRA (2018) Society for Risk Analysis Glossary. Society for Risk Analysis. Descargado de: https://www.sra.org/wp-content/uploads/2020/04/SRA-Glossary-FINAL.pdf en agosto de 2022.

Tecnológico de Costa Rica (2014) Atlas cartográfico. Recopilación de mapas. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, 2014.

Topographic-map.com (2022) Mapa topográfico de Costa Rica. En: https://es-cr.topographic-map.com/maps/jcrz/Cant%C3%B3n-Santa-Ana/ Consultado en agosto 2022.

Tosi Jr., J. (1969) Mapa ecológico República de Costa Rica, según la clasificación de zonas de vida del mundo de L.R. Holdridge. Centro Científico Tropical, San José, Costa Rica. Descargado de: https://repositorios.cihac.fcs.ucr.ac.cr/cmelendez/bitstream/123456789/149/1/mp%20ecologico.jpg

Universidad de Costa Rica y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (2021) Atlas de desarrollo humano cantonal 2021, Costa Rica. Consultado en línea en: https://www.undp.org/es/costa-rica/atlas-de-desarrollo-humano-cantonal-2021

# 10 Apéndice A: Topografía actualizada

*Esta página se ha dejado intencionalmente en blanco*

# 11 Apéndice B: Registro de Riesgos

*Esta página se ha dejado en blanco intencionalmente*

| CÓDIGO | AMENAZAS | RIESGO ACTUAL | | | ACCIONES DE RESPUESTA | RIESGO RESIDUAL | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Amenaza | Vulnerabilidad | Riesgo Actual | | Amenaza | Vulnerabilidad | Riesgo residual |
| **A** | **Riesgos asociados a factores externos (sismos, volcanes, fenómenos hidrometeorológicos)** | | | | | | | |
| A.1 | Daños o salidas de operación provocadas por amplificación de la onda sísmica | 1 | 2 | 2 | Evaluación detallada. Obras de estabilización con anclajes. | 1 | 2 | 2 |
| A.2 | Daños o salidas de operación provocadas por licuefacción | 1 | 2 | 2 | No se requieren | 1 | 2 | 2 |
| A.3 | Desplazamientos o daños por la inestabilidad del terreno por la sacudida sísmica | 2 | 2 | 4 | No se requieren | 2 | 2 | 4 |
| A.4 | Daños estructurales por la sacudida sísmica | 1 | 2 | 2 | No se requieren | 1 | 2 | 2 |
| A.5 | Daños o salidas de operación provocadas por la influencia de un deslizamiento, avalancha u otro movimiento de masa del terreno causado por sismo. | 4 | 3 | 12 | Evaluación detallada. Obras de estabilización con anclajes. | 1 | 1 | 1 |
| A.6 | Interrupción de la operación por la caída de ceniza proveniente de la erupción de un volcán cercano. | 1 | 1 | 1 | No se requieren | 1 | 1 | 1 |
| A.7 | Interrupción de la operación por caída de bloques o material volcánico de la erupción de un volcán cercano | 1 | 1 | 1 | No se requieren | 1 | 1 | 1 |
| A.8 | Daños o salidas de operación provocadas por la influencia de un deslizamiento, avalancha, flujo lahárico u otro asociado a la erupción de un volcán cercano | 1 | 2 | 2 | No se requieren | 1 | 2 | 2 |
| A.9 | Daños o salidas de operación provocadas por deslizamiento, avalancha u otro movimiento de masa causado por tormentas o eventos hidrológicos extremos | 4 | 3 | 12 | Evaluación detallada. Control de la escorrentía superficial. Obras de estabilización con anclajes. | 1 | 1 | 1 |
| A. 10 | Daños o salidas de operación provocadas por avenidas o inundaciones por eventos hidrológicos extremos | 1 | 3 | 3 | No se requieren | 1 | 3 | 3 |
| A. 11 | Desplazamientos o daños por la ocurrencia de vientos de intensidad extrema | 1 | 1 | 1 | No se requieren | 1 | 1 | 1 |

| CÓDIGO | AMENAZAS | RIESGO ACTUAL | | | ACCIONES DE RESPUESTA | RIESGO RESIDUAL | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Amenaza | Vulnerabilidad | Riesgo Actual | | Amenaza | Vulnerabilidad | Riesgo residual |
| **B** | **Riesgos asociados a condición litológica, estructuras geológicas, morfología o procesos geológicos.** | | | | | | | |
| B.1 | Desplazamientos o inestabilidad por influencia directa de deslizamientos o inestabilidad del terreno, en zonas de fuerte pendiente | 4 | 3 | 12 | Evaluación detallada. Obras de estabilización con anclajes. | 1 | 1 | 1 |
| B.2 | Desplazamientos o inestabilidad por impacto de bloques, troncos u objetos provenientes de las zonas altas de las pendientes | 1 | 1 | 1 | No se requieren | 1 | 1 | 1 |
| B.3 | Desplazamientos o inestabilidad por deslizamientos o inestabilidad del terreno en superficie, en zonas de terreno incompetente | 1 | 3 | 3 | No se requieren | 1 | 3 | 3 |
| B.4 | Desplazamientos o inestabilidad por influencia directa de zonas de debilidad (grietas, capas meteorizadas, rellenos de falla, zonas de cortante) | 1 | 1 | 1 | No se requieren | 1 | 1 | 1 |
| B.5 | Desplazamientos o inestabilidad por deslizamientos o inestabilidad del terreno a causa de orientación desfavorable de las capas litológicas | 1 | 3 | 3 | No se requieren | 1 | 3 | 3 |
| B.6 | Desplazamientos o inestabilidad por influencia directa de deslizamientos o inestabilidad del terreno por estratos débiles no identificados | 1 | 3 | 3 | No se requieren | 1 | 3 | 3 |
| B.7 | Desplazamientos o inestabilidad por influencia directa de procesos erosivos. | 4 | 3 | 12 | Obras de control de escorrentía superficial | 2 | 1 | 2 |
| B.8 | Asentamientos provocados por la erosión del material de relleno de dolinas (sinkholes) presentes en el terreno | 1 | 1 | 1 | No se requieren | 1 | 1 | 1 |

| CÓDIGO | AMENAZAS | RIESGO ACTUAL | | | ACCIONES DE RESPUESTA | RIESGO RESIDUAL | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Amenaza | Vulnerabilidad | Riesgo Actual | | Amenaza | Vulnerabilidad | Riesgo residual |
| **C** | **Riesgos asociados a condición hidrogeológica** | | | | | | | |
| C.1 | Desplazamientos o inestabilidad por desplazamientos o deformaciones del terreno a causa de la elevación del nivel freático | 1 | 1 | 1 | No se requieren | 1 | 1 | 1 |
| C.2 | Desplazamientos o inestabilidad por desplazamientos o deformaciones del terreno a causa del descenso del nivel freático | 1 | 1 | 1 | No se requieren | 1 | 1 | 1 |
| C.3 | Desplazamientos o inestabilidad por erosión interna del terreno a causa de gradientes hidráulicos excesivos | 1 | 3 | 3 | No se requieren | 1 | 3 | 3 |
| C.4 | Desplazamientos o inestabilidad por desplazamientos del terreno por la saturación excesiva por control de capas impermeables más profundas | 1 | 1 | 1 | No se requieren | 1 | 1 | 1 |
| C.5 | Desplazamientos o inestabilidad por desplazamientos o deformaciones del terreno a causa del artesianismo | 1 | 1 | 1 | No se requieren | 1 | 1 | 1 |
| C.6 | Desplazamientos o inestabilidad por deformaciones del terreno a causa de la acumulación de presiones por su baja permeabilidad | 1 | 1 | 1 | No se requieren | 1 | 1 | 1 |
| C.7 | Desplazamientos o inestabilidad por erosión superficial por el agua de escorrentía no controlada | 4 | 3 | 12 | Obras de control de escorrentía superficial | 2 | 1 | 2 |
| C.8 | Desplazamientos o inestabilidad por influencia directa de socavación hidráulica. | 4 | 3 | 12 | Obras de control de escorrentía superficial | 2 | 1 | 2 |

| CÓDIGO | AMENAZAS | RIESGO ACTUAL | | | ACCIONES DE RESPUESTA | RIESGO RESIDUAL | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Amenaza | Vulnerabilidad | Riesgo Actual | | Amenaza | Vulnerabilidad | Riesgo residual |
| **D** | **Riesgos asociados al comportamiento geotécnico del terreno (esfuerzos, deformaciones, estabilidad)** | | | | | | | |
| D.1 | Asentamientos diferenciales provocados por la deformabilidad de los materiales de la cimentación | 1 | 1 | 1 | No se requieren | 1 | 1 | 1 |
| D.2 | Desplazamientos de la estructura a causa de baja capacidad soportante del terreno de cimentación | 1 | 1 | 1 | No se requieren | 1 | 1 | 1 |
| D.3 | Desplazamientos de la estructura a causa de la inestabilidad de bloques o cuñas presentes en la cimentación | 1 | 1 | 1 | No se requieren | 1 | 1 | 1 |
| D.4 | Asentamientos diferenciales provocados por la expansión, colapso o contracción de los materiales debidos a su estructura mineralógica | 1 | 1 | 1 | No se requieren | 1 | 1 | 1 |
| D.5 | Desplazamientos de la estructura a causa de la formación de grietas de retracción por los cambios volumétricos del suelo | 1 | 1 | 1 | No se requieren | 1 | 1 | 1 |
| D.6 | Desplazamientos de la estructura a causa de la formación de grietas de descompresión asociadas a zonas inestables | 2 | 1 | 2 | No se requieren | 2 | 1 | 2 |
| D.7 | Corrosión de elementos metálicos por su contacto directo con el terreno | 1 | 1 | 1 | No se requieren | 1 | 1 | 1 |

| CÓDIGO | AMENAZAS | RIESGO ACTUAL | | | ACCIONES DE RESPUESTA | RIESGO RESIDUAL | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Amenaza | Vulnerabilidad | Riesgo Actual | | Amenaza | Vulnerabilidad | Riesgo residual |
| **E** | **Riesgos asociados al tipo de cimentación u obras asociadas** | | | | | | | |
| E.1 | Incapacidad de cimentar las obras de protección mediante pilotes hincados, debido a la presencia de dolinas o cavidades en terreno kárstico | 1 | 1 | 1 | No se requieren | 1 | 1 | 1 |
| E.2 | Desplazamientos de la estructura a causa del descalce de las obras de protección por procesos erosivos | 3 | 1 | 3 | No se requieren | 3 | 1 | 3 |
| E.3 | Desplazamientos a causa de erosión provocada por corta de arbustos / deforestación, actividad agrícola | 2 | 1 | 2 | No se requieren | 2 | 1 | 2 |
| E.4 | Costos excesivos por requerimientos especiales de protección (necesidad de obras especiales o sistemas de estabilización, etc.) | 1 | 2 | 2 | No se requieren | 1 | 2 | 2 |
| E.5 | Imposibilidad técnica de estabilizar el terreno | 1 | 1 | 1 | No se requieren | 1 | 1 | 1 |

| CÓDIGO | AMENAZAS | RIESGO ACTUAL | | | ACCIONES DE RESPUESTA | RIESGO RESIDUAL | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Amenaza | Vulnerabilidad | Riesgo Actual | | Amenaza | Vulnerabilidad | Riesgo residual |
| **F** | **Riesgos de origen antrópico** | | | | | | | |
| F.1 | Empeoramiento de los riesgos geotécnicos por la imposibilidad de ejecutar las obras de protección por trámites externos (permisos, negociaciones, etc.) | 2 | 2 | 4 | No se requieren | 2 | 2 | 4 |
| F.2 | Empeoramiento de los riesgos geotécnicos por la imposibilidad de ejecutar las obras de protección por trámites internos (contratación, autorizaciones, etc.) | 1 | 2 | 2 | No se requieren | 1 | 2 | 2 |
| F.3 | Costos no previstos por la necesidad de realizar obras temporales adicionales para mantener la estabilidad durante el tiempo requerido para trámites externos | 1 | 2 | 2 | No se requieren | 1 | 2 | 2 |
| F.4 | Costos no previstos debido a la necesidad de diseñar obras adicionales o rediseñar obras existentes a causa de mal funcionamiento o fallos de obras de protección. | 1 | 2 | 2 | No se requieren | 1 | 2 | 2 |
| F.5 | Costos no previstos debido a la necesidad de diseñar obras adicionales o rediseñar obras ya existentes a causa de un pobre mantenimiento. | 2 | 2 | 4 | No se requieren | 2 | 2 | 4 |
| F.6 | Daños a la infraestructura provocados por la colisión de vehículos de cualquier tipo | 1 | 3 | 3 | No se requieren | 1 | 3 | 3 |
| F.7 | Daños a la infraestructura provocados por inseguridad social: vandalismo, conflictos armados, disturbios, terrorismo | 4 | 2 | 8 | Rotulación. Concientización ciudadana. Instalación de cámaras de seguridad. | 3 | 1 | 3 |
| F.8 | Daños a la infraestructura provocados por la acumulación de desechos, contaminación, derrames tóxicos | 4 | 2 | 8 | Rotulación. Concientización ciudadana. Instalación de cámaras de seguridad. | 3 | 1 | 3 |
| F.9 | Daños a la infraestructura provocados por incendio | 4 | 2 | 8 | Rotulación. Concientización ciudadana. Instalación de cámaras de seguridad. | 3 | 1 | 3 |

| CÓDIGO | AMENAZAS | RIESGO ACTUAL | | | ACCIONES DE RESPUESTA | RIESGO RESIDUAL | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Amenaza | Vulnerabilidad | Riesgo Actual | | Amenaza | Vulnerabilidad | Riesgo residual |
| **G** | **Riesgos del proceso constructivo de obras de protección o el mantenimiento** | | | | | | | |
| G.1 | Daños a personas o animales debidos a la poca resistividad eléctrica del terreno ante la ocurrencia de descargas atmosféricas | 1 | 1 | 1 | No se requieren | 1 | 1 | 1 |
| G.2 | Afectación a propiedades de terceros causadas por el manejo inapropiado de agua | 3 | 2 | 6 | Obras de control de escorrentía superficial | 2 | 1 | 2 |
| G.3 | Afectación al terreno de terceros a causa de inestabilidad generada por la estructura o por las obras de protección a la misma | 3 | 2 | 6 | Evaluación detallada. Control de la escorrentía superficial. Obras de estabilización con anclajes. | 2 | 1 | 2 |
| G.4 | Daños a la infraestructura, caminos públicos o privados por causa de los procesos constructivos de las obras de protección | 2 | 2 | 4 | No se requieren | 2 | 2 | 4 |
| G.5 | Interrupción de servicios públicos por causa de los procesos constructivos de las obras de protección | 2 | 2 | 4 | No se requieren | 2 | 2 | 4 |
| G.6 | Lesiones o pérdidas humanas a terceros causadas por el proceso constructivo de las obras | 1 | 4 | 4 | No se requieren | 1 | 4 | 4 |
| G.7 | Afectación a propiedades de terceros causadas por el manejo inapropiado del material de desecho y los sitios de escombrera | 1 | 2 | 2 | No se requieren | 1 | 2 | 2 |
| G.8 | Costos excesivos por no dar mantenimiento a las obras debido a la imposibilidad de acceder con equipo apropiado a los sitios | 1 | 1 | 1 | No se requieren | 1 | 1 | 1 |
| G.9 | Costos no previstos debido a una pobre logística del proceso constructivo (materiales de construcción, de desecho, escombreras, instalaciones temporales, etc.) | 1 | 1 | 1 | No se requieren | 1 | 1 | 1 |
| G. 10 | Lesiones o pérdidas humanas a trabajadores causadas por el proceso constructivo de las obras | 1 | 4 | 4 | No se requieren | 1 | 4 | 4 |
| G. 11 | Costos excesivos por requerimientos especiales de proceso constructivo (uso de equipos especiales, limitaciones de acceso de equipos, tecnologías no disponibles, etc.) | 1 | 1 | 1 | No se requieren | 1 | 1 | 1 |

*Esta página se ha dejado intencionalmente en blanco*

# 12 Apéndice C: Investigación geotécnica

*Esta página se ha dejado intencionalmente en blanco*